

การวิเคราะห์ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมในการเสริมกำลัง
ผนังก่ออิฐมวลเบาภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ

OPTIMIZATION OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER ORIENTATION
FOR REINFORCEMENT OF LIGHTWEIGHT MASONRY WALLS
UNDER OUT-OF-PLANE LOADING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-097-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMIZATION OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER ORIENTATION
FOR REINFORCEMENT OF LIGHTWEIGHT MASONRY WALLS
UNDER OUT-OF-PLANE LOADING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-M-097-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมในการเสริมกำลังผนังก่ออิฐมวลเบาภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ
นักศึกษา	นายปิติ กิตติวิทยารัตน์
รหัสประจำตัว	60601122
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อัมพน จรัสจรุงเกียรติ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอาคารที่พักอาศัยส่วนมากจะเป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยปกติแล้ว ในส่วนของโครงสร้างผนังที่ทำจากวัสดุก่อมักจะได้รับน้ำหนักของตัวเองเท่านั้น แต่ในความเป็นจริง ผนังก่ออิฐยังต้องรับแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐนี้เกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษา พัฒนาต่อยอดแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบ และทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด ผลจากงานวิจัย จะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าว และเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐในการรับแรงกระทำนอกระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Optimization of Carbon Fiber Reinforced Polymer Orientation for Reinforcement of Lightweight Masonry Walls under Out-of-plane Loading
Student	Mr. Piti Kittivittayarat
Student ID	60601122
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Amphon Jarasjarungkiat

Abstract

In many areas of Thailand, out-of-plane loading of masonry wall construction were rarely recognized for instance water pressure from the flood, lateral earth pressure, etc. These load types may cause severe cracking and failure on the masonry wall. This research focus on studies and development the lightweight masonry walls reinforced with carbon fiber reinforced polymer under out-of-plane loading by a finite element model. The purpose of this research is optimization of carbon fiber reinforced polymer orientation for reinforcement of lightweight masonry walls under out-of-plane loading. The analysis results with carbon fiber reinforced polymer orientation of reinforcement introduced optimal choices for reinforcement to achieve a performance-based masonry wall with decreased cracking and increased factor of safety for the out-of-plane loading under consideration.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ ให้แง่คิดและถ่ายทอดประสบการณ์องค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำเพื่อเป็นการพัฒนาตัวข้าพเจ้า ซึ่งข้าพเจ้าได้นำมาใช้ในกระบวนการคิด การทำงานในการค้นคว้าอิสระเล่มนี้ อีกทั้งต้องขอขอบพระคุณ คุณณณิรัตน์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้การสนับสนุน และเป็นธุระในเรื่องของการจัดการด้านเอกสาร

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และสร้างแรงผลักดันในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และคนรอบข้างของข้าพเจ้าที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ปิติ กิตติวิทยารัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และก่อกองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติการรับแรงของงานก่อ.....	4
2.2 ผนังรับแรงด้านข้างและไม่มีแรงกด.....	4
2.3 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงแบบต่างๆ.....	6
2.4 คอนกรีตมวลเบา.....	10
2.5 ทฤษฎีของวัสดุคอมโพสิต.....	11
2.6 การหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	15
2.7 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	24
2.8 ทบทวนวรรณกรรมปริทัศน์ (Literature Review).....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	32
3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	33
3.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	45
3.3 การวิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	52
4.1 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการอ่อนตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Before Optimization).....	54
4.3 ผลการวิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด.....	55
4.4 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (After Optimization).....	59
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลวิจัย.....	63
5.2 อภิปรายผล.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	65
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	71
ภาคผนวก ข. รายงานผลวิเคราะห์โปรแกรม.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	118

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการใช้งาน.....	10
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (Isotropic Material).....	36
ตารางที่ 3.2 ขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง.....	38
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเมทริกซ์แบบทิศทางเดียว.....	48
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการออกแบบเพื่อวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุด.....	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 ลักษณะกำแพงกันดินรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกระนาบ.....	1
รูปที่ 2.1 ผนังพาดรับแรงทั้ง 3 รูปแบบ.....	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง เมื่อรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกระนาบ.....	7
รูปที่ 2.3 สภาพะของการรับแรงดึงจากการดัดของพื้นที่หน้าตัดรอยแตกกว้างของผนังก่อน.....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวนอน.....	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงสองทิศทาง.....	9
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย.....	12
รูปที่ 2.7 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง (Laminate).....	13
รูปที่ 2.8 ลักษณะของผลเฉลยในรูปแบบที่แตกต่างกันสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตัวแปรเดียว.....	18
รูปที่ 2.9 ขอบเขตของปัญหาแบบมีเงื่อนไขบังคับและแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ.....	19
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบหรือกระบวนการที่สนใจ.....	24
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ.....	26
รูปที่ 3.1 ลักษณะของการเสริมเหล็กยึดชั้นปูนก่อน.....	33
รูปที่ 3.2 ผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (ชั้นงานทดสอบ).....	34
รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและเครื่องมือวัด.....	34
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT จำนวน 4 จุด เพื่อวัดค่าแอนตัวของผนัง.....	35
รูปที่ 3.5 แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง.....	36
รูปที่ 3.6 เงื่อนไขขอบเขตจุดรองรับของแบบจำลอง.....	37
รูปที่ 3.7 รูปตัดของแบบจำลองแสดงเงื่อนไขขอบเขตของจุดรองรับ และการให้แรงกระทำ.....	38
รูปที่ 3.8 Project Schematic สำหรับการวิเคราะห์ความไวของเมฆทั้ง 6 แบบจำลอง.....	39
รูปที่ 3.9 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.752 มม. (แบบจำลองที่ 1).....	40
รูปที่ 3.10 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.810 มม. (แบบจำลองที่ 2).....	40
รูปที่ 3.11 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.787 มม. (แบบจำลองที่ 3).....	41
รูปที่ 3.12 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.782 มม. (แบบจำลองที่ 4).....	41
รูปที่ 3.13 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.771 มม. (แบบจำลองที่ 5).....	42
รูปที่ 3.14 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.775 มม. (แบบจำลองที่ 6).....	42
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงค่าแอนตัวเทียบกับขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....	43
รูปที่ 3.16 ลักษณะการแตกร้าวและค่าแอนตัวของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง.....	44
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบ (ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1).....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.18 Project Schematic สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ รวมถึงการวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization.....	45
รูปที่ 3.19 ทิศทางและมุมการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	46
รูปที่ 3.20 แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	47
รูปที่ 3.21 รูปตัดของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	47
รูปที่ 3.22 แผนผังลำดับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหา.....	49
รูปที่ 3.23 แผนผังกระบวนการทำงานในการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ Ansys OptiSlang.....	51
รูปที่ 4.1 ค่าแอนตัวสูงสุดของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง.....	52
รูปที่ 4.2 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง.....	53
รูปที่ 4.3 ทิศทางความเค้นหลักสูงสุด (Vector Stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของผนัง.....	53
รูปที่ 4.4 ค่าแอนตัวสูงสุดของแบบจำลองเสริมกำลัง CFRP (Before Optimization).....	54
รูปที่ 4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองเสริมกำลัง CFRP (Before Optimization).....	54
รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำไปวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization.....	55
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด.....	56
รูปที่ 4.8 ผลเฉลยค่าตอบที่ดีที่สุดบริเวณจุด Design Point 121.....	56
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง (ค่าแอนตัวสูงสุด) กับตัวแปรออกแบบ (ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอน).....	57
รูปที่ 4.10 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรก (มุม 40.04°).....	58
รูปที่ 4.11 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นที่ 2 (มุม 133.31°).....	58
รูปที่ 4.12 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	59
รูปที่ 4.13 ค่าแอนตัวสูงสุดของแบบจำลองเสริมกำลัง CFRP (After Optimization).....	60
รูปที่ 4.14 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองเสริมกำลัง CFRP (After Optimization).....	60
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแอนตัวของแบบจำลอง.....	61
รูปที่ 4.16 แนวรูปตัดที่นำมาพิจารณาเส้นโค้งการแอนตัวบริเวณกึ่งกลางผนัง.....	61
รูปที่ 4.17 กราฟเส้นโค้งการแอนตัวบริเวณกึ่งกลางช่วงผนัง (ตามแนวแกน X).....	62
รูปที่ 4.18 กราฟเส้นโค้งการแอนตัวบริเวณกึ่งกลางช่วงผนัง (ตามแนวแกน Y).....	62
รูปที่ 5 แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาแบบ Discrete Modeling.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอาคารที่พังกาศัยส่วนมากจะเป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยปกติแล้ว ในส่วนของโครงสร้างผนังที่ทำจากวัสดุก่ออิฐหรือบล็อกจะรับน้ำหนักของตัวเองเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงผนัง ก่ออิฐยังต้องรับแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระบบจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น ดังแสดง ในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ผู้วิจัยได้มีโอกาสเห็นกำแพงสูงหลายเมตรที่ต้องรับแรงกระทำที่เกิดขึ้น นอกระบบเนื่องจากดินถม และเมื่อสังเกตลักษณะของกำแพงกันดินพบว่ากำแพงดังกล่าวมีการนำ เศษวัสดุคอนกรีตที่เหลือจากการทุบทำลาย รวมทั้งเศษวัสดุอื่นมาใช้ในการก่อ โดยที่อาจจะไม่ได้ผ่าน การวิเคราะห์หรือออกแบบ ซึ่งจากกรณีดังกล่าวที่เกิดขึ้นทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงอันตรายที่อาจจะ เกิดขึ้นเนื่องจากการวิบัติของกำแพง ดังนั้นการออกแบบหรือการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพใน การรับแรงให้กับผนังก่อจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาให้สอดคล้องและเหมาะสม เพื่อทำให้ลดความ เสี่ยงและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 1 ลักษณะกำแพงกันดินรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกระบบ
(ที่มา : อำนวย จรัสจรวงเกียรติ, สถานที่ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี)

การเสริมกำลังโครงสร้างด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer , CFRP) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงหรือซ่อมแซมโครงสร้างได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุ คอมโพสิตเสริมเส้นใยมีกำลังรับน้ำหนักสูง สามารถต้านทานแรงดึงได้ดี วัสดุมีน้ำหนักเบา ทนทานต่อ การกัดกร่อน มีความสะดวกในการติดตั้ง และเป็นที่ยอมรับในมาตรฐานการออกแบบ เช่น มาตรฐาน ACI-440 ของประเทศสหรัฐอเมริกา มาตรฐานการออกแบบของประเทศยุโรป และมาตรฐานการเสริม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ. 1508-51) เป็นต้น

จากบทความวิจัยเรื่องการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน พบว่าผลของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) มีส่วนช่วยในการลดการแอ่นตัว และเพิ่มกำลังรับแรงให้กับผนังก่ออิฐมวลเบาได้ดีกว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีอื่นที่นำมาพิจารณาร่วมกัน แต่ผลที่ได้ยังไม่ได้ระบุชัดเจนว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังกล่าวมีรูปแบบและทิศทางเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด โดยขั้นตอนต่อไปในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Ansys Composite PrepPost (ACP) ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ และทำการวิเคราะห์แบบจำลองร่วมกับกระบวนการ Optimization เพื่อหาทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลัง ผลการวิจัยจะนำไปสู่การเสนอรูปแบบและทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่ทำให้การแอ่นตัวของผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐในการรับแรงกระทำนอกระนาบ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัว การเสีรูปร่างและการแตกร้าวของผนังก่ออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษา พัฒนาต่อยอดแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ
3. วิเคราะห์ และนำเสนอรูปแบบทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลัง เพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าว และทำให้การแอ่นตัวมีค่าน้อยที่สุด โดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่าการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง มาใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
2. สร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิต (Static Structural analysis) เพื่อหาค่าแอ่นตัวสูงสุดของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในงานวิจัยนี้ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Laminate) ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเมทริกซ์แบบทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon/Epoxy Lamina) จำนวน 2 ชั้นวางเรียงซ้อนกัน โดยใช้โปรแกรม Ansys Composite PrepPost (ACP)
4. วิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละชั้นที่วางเรียงซ้อนกันในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และมีผลทำให้ค่าแอนตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อยที่สุด
5. ลักษณะปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของงานวิจัย คือ ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียวของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีเงื่อนไขบังคับ

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. สร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ
4. วิเคราะห์แบบจำลองร่วมกับกระบวนการ Optimization เพื่อหาผลลัพธ์และคำตอบของปัญหาตามขอบเขตของงานวิจัย
5. สรุปผล และเขียนรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำไปสู่การเสนอรูปแบบ และแนวทางที่เหมาะสมในการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ

ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการศึกษานี้จะประโยชน์สำหรับนักวิจัยท่านอื่น ในการนำไปใช้เป็นแนวทางการวิเคราะห์ ออกแบบ และเสริมกำลังให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมั่นคงต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติการรับแรงของงานก่อ

งานก่อในแต่ละส่วนของอาคารหลังหนึ่งอาจทำหน้าที่รับแรงแตกต่างกันไป และในแต่ละหน้าที่มีแรงกระทำที่มีลักษณะเฉพาะ โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง ผนังก่อที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดัดในระนาบของผนังขึ้น

2.1.1 กำลังรับแรงดัดจากการดัด (Flexural Tensile Strength)

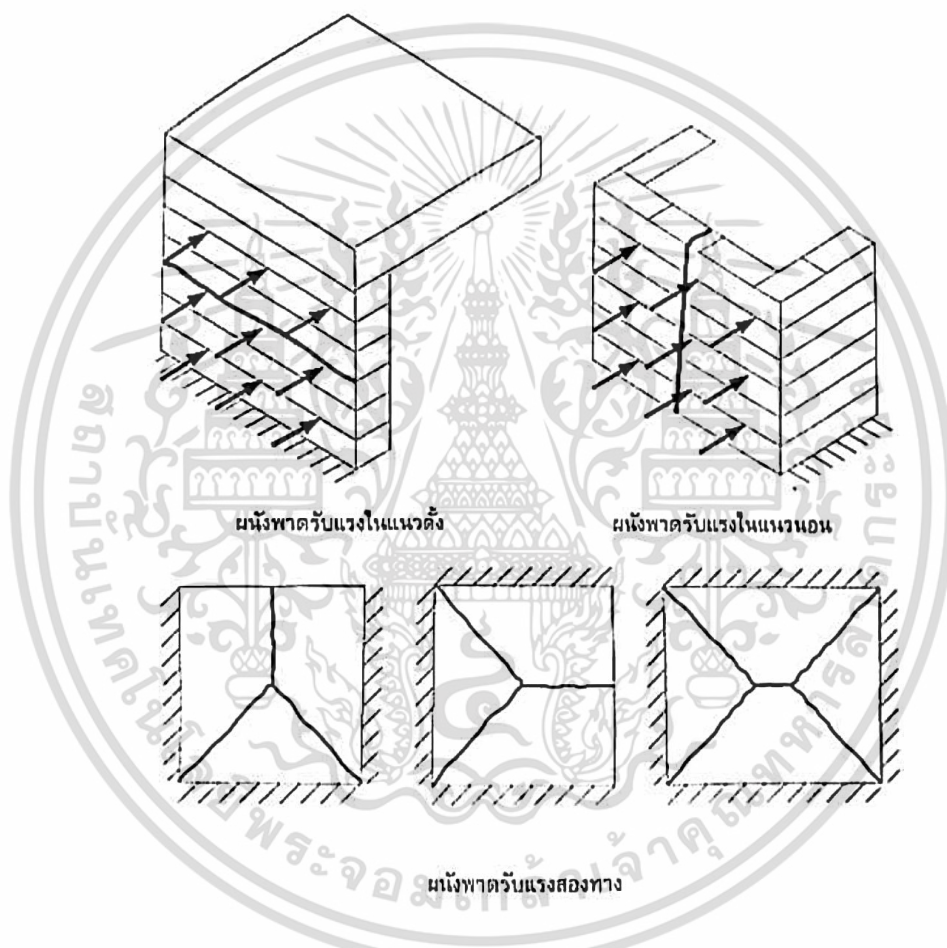
แรงดัดในผนังงานก่อเกิดจากการรับแรงกระทำด้านข้างตั้งฉากกับระนาบของผนัง ซึ่งอาจเป็นแรงลม แรงดันดินหรือแรงดันน้ำ แรงดัดนี้มีได้สองแกน คือกรณีที่ผนังถูกยึดตั้งในแนวนอนที่ขอบล่างและขอบบน แรงดัดจะเกิดรอบแกนขนานกับแนวก่อ กรณีนี้แรงต้านจะเกิดจากการยึดเกาะระหว่างก้อนวัสดุก่อและปูนก่อเช่นเดียวกับกรณีรับแรงดัดแบบตรง ในการออกแบบต้องอาศัยแรงอัดในแนวตั้งช่วยเพื่อไม่ให้เกิดหน่วยแรงดัดขึ้น ส่วนกรณีที่ผนังถูกรองรับในแนวตั้งสองข้าง เช่น จากเสาแนบ (Engaged pier) หรือเสียบผนัง (Return wall) แรงดัดจะเกิดรอบแกนตั้ง และจะถูกต้านด้วยกำลังรับแรงดัดของก้อนวัสดุก่อเป็นหลัก ในกรณีที่ก่อแบบเหลื่อมกัน กำลังรับแรงดัดในแกนนี้จะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดัดรอบแกนนอนหลายเท่า อย่างไรก็ตามความแปรปรวนมีมากเช่นเดียวกับกำลังรับแรงดัดแบบตรง มาตรฐานการออกแบบของสหภาพยุโรปยอมให้หาค่ากำลังรับแรงดัดจากการทดสอบเท่านั้น และให้ใช้เพื่อรับแรงชั่วขณะ เช่น แรงลมเท่านั้น มาตรฐานการออกแบบของอเมริกาให้ค่าหน่วยแรงดัดจากการดัดที่ยอมให้ (Allowable flexural tensile stress) สำหรับวัสดุก่อและปูนก่อแบบต่างๆ (ตารางที่ 6.3.1.1 ใน ACI 530-9) มาตรฐานการออกแบบของอังกฤษให้ค่ากำลังรับแรงดัดเนื่องจากแรงดัดสำหรับวัสดุก่อและปูนก่อแบบต่างๆ (ตารางที่ 3 ใน BS 5628 : part I) มาตรฐานการออกแบบของออสเตรเลียกำหนดให้กำลังรับแรงดัดเนื่องจากแรงดัดเป็นศูนย์ ยกเว้นเพื่อรับแรงชั่วขณะ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว หรือแรงลักษณะคล้ายกัน โดยไม่ถือว่าน้ำหนักบรรทุกจรเป็นแรงชั่วขณะ และในกรณีเหล่านี้ยอมให้กำลังรับแรงดัดเนื่องจากแรงดัดที่แนวปูนก่อมีค่าไม่เกิน 0.20 MPa

2.2 ผนังรับแรงด้านข้างและไม่มีแรงกด

ผนังงานก่อเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแปรปรวนมาก เนื่องจากทั้งคุณสมบัติของวัสดุประกอบ ได้แก่ ก้อนวัสดุก่อ ปูนก่อ และฝีมือการก่อ นอกจากนั้นหน่วยแรงดัดและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวก็เป็นหน่วยแรงที่มีความแปรปรวนมากกว่าหน่วยแรงอื่น ดังนั้นอาจคาดการณ์ได้ว่าการแตกร้าวจะเกิดที่จุด

ที่มีกำลังน้อยที่สุดซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยที่ทดสอบได้ โดยผนังรับแรงด้านข้างมีการรองรับเป็น 3 รูปแบบ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.1

1. รองรับแบบง่าย (Simple support) ที่ขอบบนและล่าง เรียกว่า ผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง
2. รองรับแบบง่ายที่ขอบข้างทั้งสองข้าง เรียกว่า ผนังพาดรับแรงในแนวนอน
3. รองรับแบบต่อเนื่อง (Continuous support) มากกว่าสองด้าน ซึ่งอาจไม่มีการรองรับที่ขอบบนหรือขอบข้างด้านใดด้านหนึ่งหรือมีการรองรับทั้งสองด้าน เรียกว่า ผนังพาดรับแรงสองทาง



รูปที่ 2.1 ผนังพาดรับแรงทั้ง 3 รูปแบบ

(ที่มา : อนุสรณ์ อินทร์ซี่. 2552 การออกแบบโครงสร้างงานก่อ)

2.2.1 ผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง

กรณีผนังพาดรับแรงในแนวตั้งอาจพบได้ไม่บ่อย โดยอาจพบเป็นในลักษณะผนังที่มีโครงสร้างหลังคาหรือพื้นเกาะที่ขอบบนของผนัง และสามารถยึดตรึงขอบบนโดยถ่ายแรงไปยังโครงสร้างส่วนอื่น เช่น ผนังรับแรงเฉือนซึ่งแข็งแรงกว่า และไม่มีผนังขวาง (Cross wall) เล็บผนัง (Return wall) หรือเสาแนบ (Engaged pier) ช่วยยึดตรึงขอบสองข้าง ในกรณีนี้แรงที่กระทำกับผนัง นอกจากมีโมเมนต์ตัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดจากแรงกระทำด้านข้างแล้ว ยังมีแรงกดที่เกิดจากน้ำหนักตัวของผนังและแรงอื่น แม้ว่ามิต้านน้อย แต่ควรนำมาพิจารณา เพราะแรงเหล่านี้มีส่วนช่วยลดหน่วยแรงดึงจากโมเมนต์ดัด และมีส่วนทำให้แนวที่เกิดการวิบัติเคลื่อนไปจากกึ่งกลางช่วงของผนัง

2.2.2 ผนังพาดรับแรงในแนวนอน

กรณีผนังพาดรับแรงในแนวนอนพบได้ไม่บ่อยเช่นกัน เนื่องจากขอบล่างของผนังต้องถูกยึดรั้งเสมอด้วยฐานรองรับ แต่อาจมีกรณีที่ผนังมีช่วงพาดในแนวนอนแคบเมื่อเทียบกับความสูง และที่ขอบทั้งสองข้างมีสิ่งรองรับ เช่น ผนังขวาง (Cross wall) เล็บผนัง (Return wall) หรือเสาแนบ (Engaged pier) ในกรณีนี้ผนังจะเกิดการวิบัติได้ 2 รูปแบบ คือ

1. วิบัติในแนวตั้งผ่านแนวปูนก่อ ซึ่งแนวแตกหักต้องเป็นรูปซิกแซกในกรณีของการก่อแบบเหลื่อมก้อน (Running bond)
2. วิบัติในแนวตั้งเป็นเส้นตรงผ่านแนวปูนก่อ แนวตั้งบางส่วน และผ่านก้อนวัสดุก่อบางส่วน

2.2.3 ผนังพาดรับแรงสองทิศทาง

กรณีนี้เกิดจากการที่ผนังมีขอบรองรับมากกว่าสองด้าน ในระยะแรกของการใส่แรงกระทำผนังมีพฤติกรรมคล้ายแผ่นพื้นอิลาสติก แต่เมื่อผนังเริ่มแตกร้าว กำลังของผนังจะลดลงเนื่องจากผนังส่วนที่แตกร้าวแล้ว ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป ซึ่งเป็นความแตกต่างจากทฤษฎี “Yield line” ของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กยังสามารถรับแรงดัดได้ตามรอยแตกเนื่องจากการยึดตัวของเหล็กเสริม ดังนั้นถึงแม้ผนังจะมีรูปแบบการแตกร้าวคล้ายแผ่นพื้น แต่ทฤษฎี “Yield line” นั้นนำมาใช้กับผนังไม่ได้

2.3 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงแบบต่างๆ

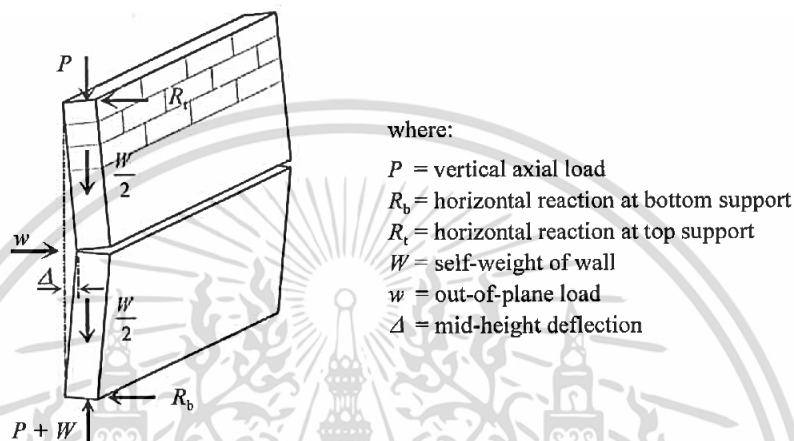
ลักษณะการวิบัติของผนังรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกกระนาบ จะเกิดขึ้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบของการรองรับ จากที่เดิกล่าวไปในข้างต้นผนังรับแรงด้านข้างสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ ผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง ผนังพาดรับแรงในแนวนอน และผนังพาดรับแรงสองทิศทาง

2.3.1 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง

หากความเค้นดึงของรอยต่อในแนวนอนที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกกระนาบกับผนังมีค่ามากกว่าผลรวมของความเค้นดึงเนื่องจากการดัดที่เป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวในปูนก่อกับความเค้นอัดเนื่องจากน้ำหนักของผนังและแรงในแนวแกนแล้วจะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นที่รอยต่อนั้น ตำแหน่งที่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่อยู่เหนือกึ่งกลางความสูงของผนังขึ้นมาเล็กน้อย หากพิจารณาเงื่อนไขการใช้แรงกระทำคงที่เป็นตัวกำหนดการวิบัติที่ทำให้ผนัง

เกิดการพังทลาย ผนังจะไม่เกิดการพังทลายเว้นแต่มีแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกกระนาบมากพอที่เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อให้เกิดการวิบัติ ในทางตรงกันข้าม Priestley (1985) พิจารณาเงื่อนไขการใช้การแอ่นตัวเป็น ตัวกำหนด การพังทลายจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางความสูงของผนังจะมีค่ามากเกินไปจน ทำให้จุดนั้นสูญเสียเสถียรภาพ และยังได้มีการให้ความเห็นของ Doherty et al (2000) โดยกล่าวว่า โดยทั่วไประยะแอ่นตัวที่ทำให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพ (Δ_u) จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับความหนา ของผนัง (t) ทั้งนี้ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง เมื่อรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น นอกกระนาบ แสดงในรูปที่ 2.2

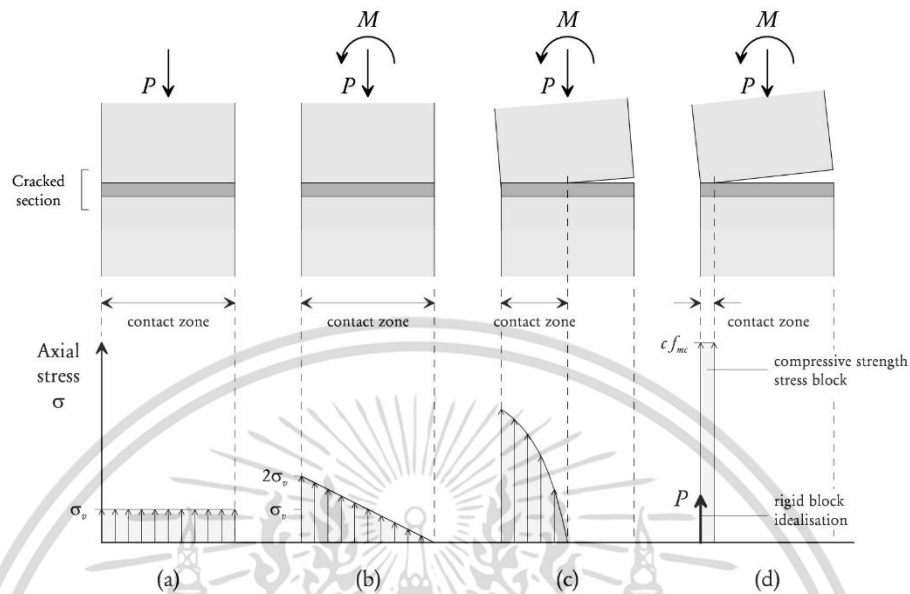


รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง เมื่อรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกกระนาบ (ที่มา : Craig Robert Willis, 2004)

หากเราพิจารณาถึงสภาวะคงค้างของกำลัง (Residual strength) สามารถแบ่งสภาวะของการ รับแรงดึงจากการตัดตามพื้นที่หน้าตัดของรอยแตกกว้างของผนังก่อได้เป็น 4 สภาวะ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อเราพิจารณาผนังก่อที่เกิดรอยแตกกว้างซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดที่มีความหนา (t_u) และความกว้าง (L_d) และรับแรงกระทำในแนวแกนเช่น แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวผนัง แรงกระทำในแนวตั้งอื่นๆ (P) ที่สภาวะพักหรือสภาวะหยุดนิ่ง (รูปที่ 2.3a) เป็นสภาวะที่ยังไม่มีแรงตัดหรือโมเมนต์ตัด มากกระทำ แต่จะมีหน่วยแรงอัด (σ_v) กระจายบนพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอและเมื่อเกิดแรงตัดกระทำ ให้เกิดโมเมนต์ขึ้น หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนจากการกระจายสม่ำเสมอเป็นการกระจายแบบ เส้นตรงที่ต่อเนื่องโดยเริ่มจาก $2\sigma_v$ จนกระทั่งเป็น 0 เรียกสภาวะ ณ จุดนี้ว่าเป็นสภาวะที่หน้าตัดเริ่ม มีการแตกกว้างขึ้น (รูปที่ 2.3b) หลังจากโมเมนต์มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น รอยแตกกว้างจะเกิดเพิ่มขึ้นอย่าง ต่อเนื่อง ทำให้ความยาวของแนวรอยต่อตามขวางของหน้าตัดลดน้อยลงและแนวรอยแยกจะเลื่อนเข้า มามากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดเส้นแนวแรงอัดสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุไม่เป็น เส้นตรงอีกต่อไป โดยสภาวะนี้เรียกว่า สภาวะที่เกิดรอยแตกกว้างบางส่วน (รูปที่ 2.3c) และเมื่อโมเมนต์ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าโมเมนต์สูงสุดจะสามารถประมาณค่าที่ใกล้ความเป็นจริงของขอบเขตบนได้ โดยใช้พื้นที่แบกรับน้อยสุดที่ถ่ายแรงอัดผ่านรอยแตกกว้าง ถ้าสมมติให้หน่วยแรงกระจายบนวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตของการบดอัดสามารถประมาณได้โดยการใช้หน่วยแรงที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีขนาดเท่ากับ $c f_{mc}$ สถานะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าสถานะที่เกิดรอยแตกกว้างเต็มที่ (รูปที่ 2.3d)



รูปที่ 2.3 สถานะของการรับแรงดึงจากการดัดของพื้นที่หน้าตัดรอยแตกกว้างของผนังก่อ : (a) สถานะพักหรือสถานะหยุดนิ่ง ; (b) สถานะที่หน้าตัดเริ่มเกิดการแตกร้าวและแรงเค้นมีลักษณะกระจายแบบเส้นตรง ; (c) สถานะที่เกิดรอยแตกร้าวบางส่วน ; (d) สถานะที่เกิดรอยแตกร้าวเต็มที่

(ที่มา : Jaroslav Vaculik, 2012)

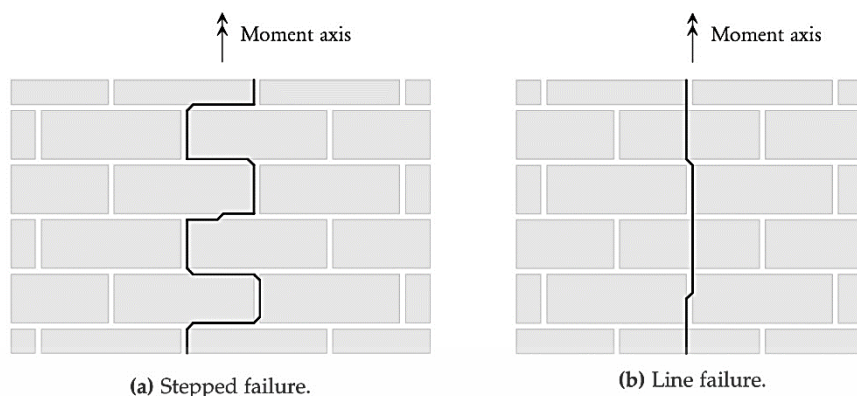
2.3.2 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวนอน

เมื่อผนังพาดรับแรงในแนวนอน ต้องรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ ผนังสามารถเกิดลักษณะการวิบัติได้ 2 รูปแบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นในผนังก่อ โดยลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวนอนแสดงได้ในรูปที่ 2.4

1. การวิบัติแบบแตกร้าวเป็นซิกแซกหรือแบบขั้น (Stepped failure) ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น จะเกิดรอยแตกร้าวผ่านรอยต่อในแนวตั้งแล้วแตกร้าวผ่านครึ่งหนึ่งของรอยต่อแนวนอนสลับกันไปเป็นลักษณะซิกแซก (รูปที่ 2.4a) โดยหากพิจารณาถึงสถานะคงค้างของกำลัง การแตกร้าวในแนวตั้งที่เป็นการวิบัติแบบซิกแซกหรือแบบขั้นนั้นเมื่อถึงขีดจำกัดการรับกำลังสูงสุดแล้วจะเกิดโมเมนต์ดัดคงค้างเกิดขึ้นเนื่องแรงเสียดทานจากการบิดผ่านส่วนที่เชื่อมต่อกันของรอยต่อในแนวนอน

2. การวิบัติแบบแตกร้าวเป็นเส้นตรง (Line failure) เป็นลักษณะการวิบัติที่เกิดจากการที่ผนังแตกร้าวหรือเกิดการหักในแนวตั้งเป็นเส้นตรงผ่านแนวปูนก่อแนวตั้งบางส่วนและผ่านก้อนวัสดุก่อบางส่วน (รูปที่ 2.4b) แรงดัดที่เกิดในแกนที่ตั้งฉากกับรอยต่อในแนวนอนจะถูกต้านโดยกำลังรับหน่วยแรงดึงจากการดัดของรอยต่อในแนวตั้งและโมดูลัสแตกหักด้านข้างของก้อนวัสดุก่อ

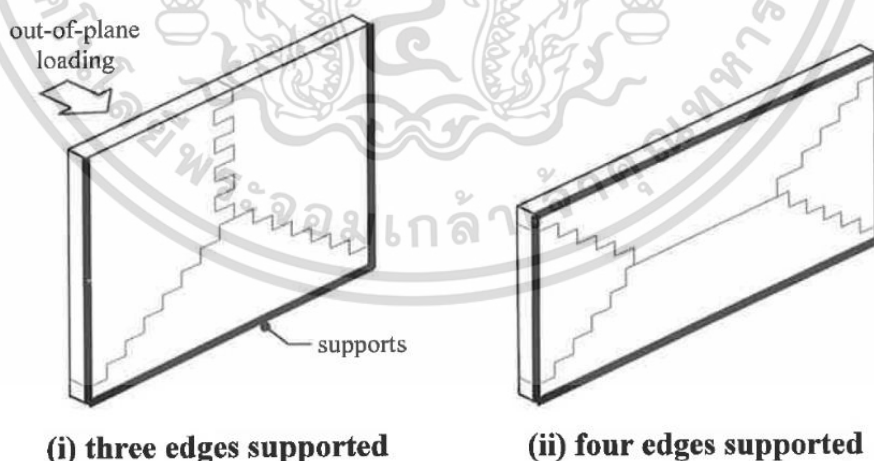
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงในแนวนอน
(ที่มา : Jaroslav Vaculik, 2012)

2.3.3 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงสองทิศทาง

ผนังก่อที่มีการรองรับสามด้านหรือสี่ด้าน จะส่งผลให้ผนังก่อนั้นต้องรับแรงดัดในสองทิศทาง ซึ่งแรงดัดนั้นเป็นผลมาจากการรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงสองทิศทางจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปแบบการรองรับของผนัง ซึ่งการวิบัติที่เกิดขึ้นมักจะเกิดในลักษณะการแตกร้าวแบบเส้นทแยง (Diagonal crack line) และเมื่อผนังต้องรับแรงกระทำประลัย มีความเป็นไปได้ว่าผนังจะเกิดโมเมนต์ดัดขึ้นตามแนวการวิบัติแบบเส้นทแยงนั้น โดยลักษณะการวิบัติของผนังก่อเมื่อมีการรองรับสามด้านและสี่ด้าน แสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการวิบัติของผนังพาดรับแรงสองทิศทาง : (i) ผนังพาดรับแรงสองทิศทางที่มีการรองรับสามด้าน ; (ii) ผนังพาดรับแรงสองทิศทางที่มีการรองรับสี่ด้าน
(ที่มา : Craig Robert Willis, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซึ่งผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม น้ำ และส่วนผสมพิเศษในอัตราส่วนที่เป็นสูตร Cement Base ผสมกัน ทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักและความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป โดยคอนกรีตมวลเบาสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างที่โครงสร้างไม่ต้องรับน้ำหนักหรือรับกำลังต้านทานการอัดมาก ทั้งนี้หากพิจารณาลักษณะการนำไปใช้งานของคอนกรีตมวลเบาจะสามารถแบ่งได้ตามเกณฑ์ของ ACI 213R-87 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

ลักษณะการใช้งาน	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (kg/cm ²)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete)	180-480	1,400-1,800
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (Masonry Lightweight Concrete)	100-180	500-800
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนความร้อน (Insulating Lightweight Concrete)	10-100	น้อยกว่า 800

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบา เป็นวัสดุก่อสร้างที่มุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการนำไปใช้งานในทุกด้าน ด้วยคุณสมบัติพิเศษ คือ วัสดุมีน้ำหนักเบา คงทนต่อสภาพอากาศและทนไฟ ทนความร้อนและดูดซับเสียงได้ดี และที่สำคัญคือ ทำงานได้รวดเร็วเนื่องจากขนาดก้อนใช้งานง่ายและมีน้ำหนักค่อนข้างเบาทำให้สามารถขนย้ายได้รวดเร็ว ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและลดต้นทุนโครงสร้าง

คอนกรีตมวลเบา มีหลายประเภท หากสังเกตเพียงภายนอกลักษณะจะดูคล้ายกัน แต่ในความเป็นจริงคอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติแตกต่างกันด้วย โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาสามารถจำแนกตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System)

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เถ้า ขี้เถ้า ซานอ้อย หรือเม็ดโม่ ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้นแต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้ สารเหล่านี้จะเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Circular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟู และทิ้งให้แห้งตัว คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรง คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นฟลิกสีขาว

2. ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง(Autoclaved System)

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาว ซึ่งควบคุมคุณภาพได้ยาก มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอมีการดูดซึมน้ำมากกว่าปกติ

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีต มีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดการตกผลึก (Calcium Silicate) ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ทนทาน กว่าที่ผลิตในระบบอื่นมาก

2.5 ทฤษฎีของวัสดุคอมโพสิต

คอมโพสิต (Composite) เป็นระบบของวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งมีการเชื่อมประสานวัสดุดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกัน วัสดุคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ หมายถึง เมทริกซ์ (Matrix) ของวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย หรือวัสดุเสริมกำลังอื่น ซึ่งมีความยาวมากกว่าความหนาอย่างชัดเจน

วัสดุคอมโพสิต หรือ พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใย สามารถอธิบายให้ชัดเจนมากขึ้น ด้วยการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้าง เช่น คอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Composite Reinforced Concrete) ต้องมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดจากส่วนประกอบทั้งหมด เป็นส่วนเสริมกำลังอย่างต่อเนื่องซึ่งรองรับโดยวัสดุเมทริกซ์ที่ทำให้มีเสถียรภาพ โดยปกติเส้นใยที่ต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักจะมีความแข็งแรง (Stiffness) และกำลังรับน้ำหนักสูงกว่าวัสดุเมทริกซ์ซึ่งใช้กันทั่วไป เช่น พอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต (Thermosetting Polymers) อย่างไรก็ตามถ้าเส้นใยไม่ต่อเนื่อง ปริมาณเส้นใยควรมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร จากส่วนผสมทั้งหมดเพื่อให้มีผลอย่างมีนัยสำคัญในการเสริมกำลัง ทั้งนี้สมรรถนะของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ วัสดุที่ใช้ผลิต การจัดเรียงตัวของส่วนรับกำลังหลักของวัสดุ (เส้นใยเสริมกำลัง) และอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ (Interaction between Fibers and Matrix)

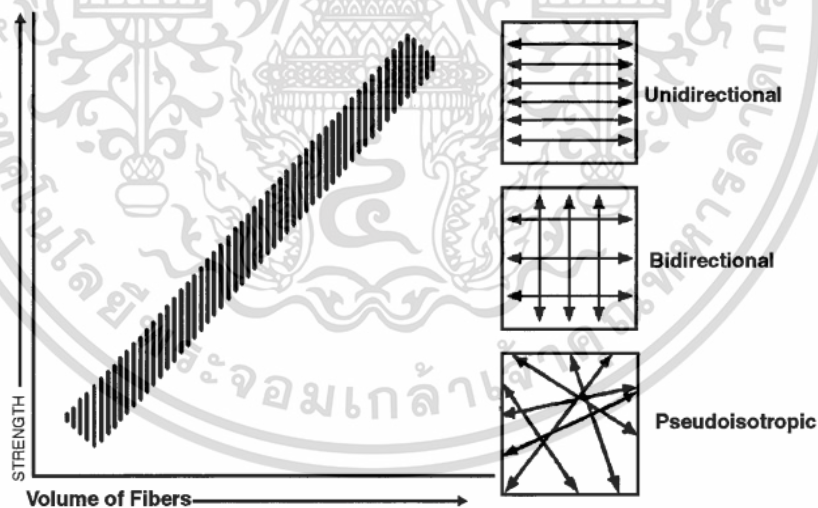
2.5.1 เส้นใยเสริมกำลังสำหรับวัสดุคอมโพสิต

เส้นใยที่ใช้กันในท้องตลาดสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอะรามิด รูปแบบของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ใช้กันมากในงานโครงสร้างมักจะเป็นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช.สนับสนุนให้ดำเนินการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเสริมกำลัง (Laminate) ที่ทำขึ้นโดยการเรียงซ้อนของเส้นใย และเมทริกซ์ชั้นบางๆหลายชั้น รวมกันจนได้ความหนาที่ต้องการ การควบคุมทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใย (Fiber Orientation) ในแต่ละชั้นและลำดับของการเรียงซ้อนชั้นต่างๆ จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการ ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRP Matrix Composite) ได้แก่ คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย ทิศทางการวางเส้นใย (Fiber Orientation) ความยาวรูปร่าง และส่วนประกอบของเส้นใย คุณสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์เรซิน และการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

การจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional Fiber Arrangement) จะทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะทำให้เกิดกำลังรับน้ำหนักและมอดูลัสสูงสุดในทิศทางตามแกนของเส้นใย การจัดเรียงเส้นใยแบบระนาบ (Planar Arrangement) เป็นการจัดเรียงเส้นใยสองมิติและมีกำลังรับน้ำหนักแตกต่างกันในทุกทิศทาง เทียบกับทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใย การเรียงเส้นใยแบบสามมิติจะทำให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิกแต่กำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่าการจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว คุณสมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่จัดเรียงตัวในทิศทางที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 2.6



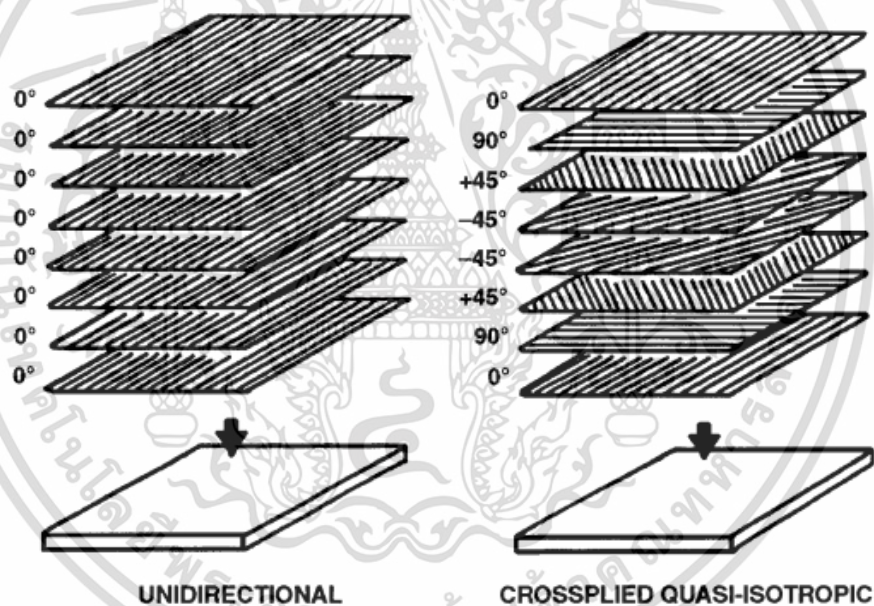
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทาง การเรียงตัวของเส้นใย

(ที่มา: ACI 440R-96 Figure 2.3)

คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยจะขึ้นอยู่กับทิศทางในการวัดเทียบกับทิศทาง การวางตัวของเส้นใย กำลังรับแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของแผ่นเสริมกำลังชนิดเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectionally Reinforced Laminate) จะมีค่าสูงสุดเมื่อตรวจวัดในทิศทางตามยาวของเส้นใย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีตรวจวัดในทิศทางอื่นคุณสมบัติดังกล่าวจะมีค่าลดลง และสำหรับคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆจะขึ้นอยู่กับทิศทางการตรวจวัดเช่นเดียวกับกำลังรับแรงดึงและมอดูลัส

ถ้าผู้ออกแบบมีความต้องการวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก อาจพิจารณาเลือกใช้ทิศทางการเรียงเส้นใยและรูปแบบการวางเส้นใยแบบทิศทางเดียวที่เหมาะสม แต่หากมีความต้องการต่างไปจากนี้อาจต้องพิจารณาเลือกหน้าตัดที่เหมาะสม ทั้งนี้ทำได้ในขนาดจำกัดในกรณีที่ไม่เสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้น หรือกรณีที่ไม่มีการจัดเรียงเส้นใยใหม่ การเสริมเส้นใยในทิศทางแกนสั้นหรือการจัดเรียงเส้นใยใหม่จะลดความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีผลกระทบต่อความคุ้มค่าในการใช้งาน ทั้งนี้สำหรับชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนอาจต้องจัดเรียงเส้นใยเสริมเพิ่มเติมเพื่อเสริมกำลังให้ขึ้นรูปเป็นสามมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบควอไซแอนไอโซทรอปิก (Quasi-Isotropic) ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ในการสร้างแผ่นเส้นใยเสริมกำลัง (Laminate)

(ที่มา: ACI 440R-96 Figure 2.4)

2.5.2 เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers)

ในส่วน of เส้นใยเสริมกำลัง งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fibers) หรือเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาอย่างแพร่หลาย ทั้งในงานเสริมกำลังโครงสร้าง รวมถึงงานซ่อมแซมโครงสร้างเดิมเพื่อเสริมความมั่นคงและอายุการใช้งาน โดยเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในท้องตลาดผลิตได้จาก 3 แหล่ง ได้แก่ น้ำมันดิน (Pitch) พอลิอะคริโลไน-ทริล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Polyacrylonitrile: PAN) และเรยอน (Rayon) คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุล และระดับของความบกพร่อง (Degree of Freedom from Defects) การขึ้นรูปของเส้นใยคาร์บอนต้องผลิตภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส (1830 องศาฟาเรนไฮต์) ณ อุณหภูมินี้ เส้นใยสังเคราะห์โดยส่วนใหญ่จะหลวมเหลวและกลายเป็นไอ อย่างไรก็ตามอะคริลิกจะไม่หลวมเหลวและไม่กลายเป็นไอและโครงสร้างโมเลกุลจะรักษาสภาพอยู่ขณะทำปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันภายใต้ อุณหภูมิสูง (High-Temperature Carbonization)

เส้นใยคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยชนิดมอดูลัสสูง (High Modulus Type 1) และเส้นใยชนิดกำลังสูง (High Strength Type 2) ความแตกต่างของคุณสมบัติระหว่างเส้นใยชนิด 1 และชนิด 2 เกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย (Fiber Microstructure) คุณสมบัตินี้เกิดมาจากการเรียงตัวของโครงข่ายเป็นชั้นแบบกราฟีนหรือรูปหกเหลี่ยม (Graphene Hexagonal Layer Network) ซึ่งมักพบในกราไฟต์ (Graphite) ถ้าชั้นเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นชั้นสามมิติจะเรียกว่า กราไฟต์ แต่ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นแต่ละชั้นต่ำและเกิดเป็นชั้นสองมิติจะเรียกว่าคาร์บอน เส้นใยคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นการจัดเรียงสองมิติ

เรยอนและสารตั้งต้นน้ำมันดินแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิตเส้นใยคาร์บอนมอดูลัสต่ำ (ประมาณ 50 กิกะปาสกาล หรือ 7×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ในขณะที่ PAN และสารตั้งต้นน้ำมันดินเหลวเนื้อผลึก (Liquid Crystalline Pitch Precursor) จะใช้ในการผลิตเส้นใยคาร์บอนมอดูลัสสูง โดยกระบวนการคาร์บอนในเซชันภายใต้อุณหภูมิก่อน 800 องศาเซลเซียส (1400 องศาฟาเรนไฮต์) มอดูลัสของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนจาก 1000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส (1830 ถึง 5430 องศาฟาเรนไฮต์) ผลของกระบวนการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ กำลังของเส้นใยจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส (2730 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับ PAN และเส้นใยจากสารตั้งต้นของน้ำมันดิน (Pitch Precursor Fiber) แต่จะเพิ่มขึ้นสำหรับเส้นใยซึ่งผลิตจากสารตั้งต้นของน้ำมันดินชนิดเมโซเฟส (Mesophase or Anisotropic Pitch Precursor Fiber) การเรียงตัวตามแนวแกนที่ต้องการของชั้นกราฟีนในเส้นใยคาร์บอนจะเป็นตัวกำหนดค่ามอดูลัสของเส้นใย เส้นใยตามแนวแกนและเส้นใยตามแนวรัศมีและช่องว่างจะมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเส้นใย การเรียงตัวของชั้นกราฟีนที่ผิวเส้นใยจะช่วยเพิ่มกำลังและลดการดึงผิว (Wetting) ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

เส้นใยคาร์บอนในท้องตลาดจะอยู่ในรูปแบบโทว์ (Tow) หรือมัดของเส้นใย (Bundles of Parallel Fibers) จำนวนเส้นใยในแต่ละโทว์ประมาณ 1000 ถึง 200000 เส้นใย เส้นใยคาร์บอนอาจผลิตในรูปแบบพรีเพรก (Prepreg) หรือแผ่นเสริมกำลังทิศทางเดียว (Unidirectional Tow Sheet)

2.6 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

2.6.1 ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) คือ วิธีที่ใช้ในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหาหรือการกำหนดทางเลือกเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่กำหนดขึ้น ทั้งนี้การหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นการหาค่าตัวแปรออกแบบที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่ามากที่สุด (Maximized) หรือมีค่าน้อยที่สุด (Minimized) ปัจจุบันหลักการหรือวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้รับความนิยมนในหลากหลายสาขาวิชา อาทิเช่น การออกแบบทางด้านวิศวกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดหรือรูปร่างที่แข็งแรงและประหยัดต้นทุน การปรับปรุงประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อลดค่าใช้จ่ายและต้นทุนการผลิตให้ได้มากที่สุด เป็นต้น

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ตัวแปรออกแบบ (Design Variable) และเงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัด (Constraints)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ ฟังก์ชันที่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวแปรออกแบบเป็นตัวกำหนดเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบ่งชี้ค่าของตัวแปรออกแบบว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่ภายใต้เงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัดที่กำหนดขึ้น

ตัวแปรออกแบบ (Design Variable) คือ ตัวแปรที่เป็นคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยตัวแปรออกแบบอาจเป็นจำนวนจริงที่ต่อเนื่อง (Real continuous) หรือแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) และบางตัวแปรออกแบบสามารถเป็นได้ทั้งสองแบบคือทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

เงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัด (Constraints) คือ ความสัมพันธ์ของตัวแปรออกแบบและพารามิเตอร์ต่างๆภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด โดยเงื่อนไขบังคับมีผลต่อการหาค่าตัวแปรออกแบบภายในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพราะเป็นสิ่งที่กำหนดขอบเขตผลลัพธ์หรือค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปรออกแบบ เงื่อนไขบังคับสามารถกำหนดได้สองรูปแบบคือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ (Equality Constraints) และเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality Constraints)

โดยทั่วไปปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ทั้งรูปแบบปัญหาการหาค่าสูงสุดหรือการหาค่าต่ำสุด สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้ (Xin-She Yang, 2018)

$$\text{Minimize (or maximize) } f_i(x) \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (2.1)$$

$$\text{Subject to } G_j(x) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J), \quad (2.2)$$

$$h_k(x) \leq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (2.3)$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบ

$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$G_j(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ

$h_k(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ

2.6.2 ลักษณะของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ลักษณะหรือรูปแบบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด สามารถจำแนกประเภทตามเกณฑ์ที่พิจารณาได้ 6 รูปแบบหลัก ดังนี้

1. จำนวนของตัวแปรออกแบบ (The Number of Variables) เป็นเกณฑ์การแบ่งลักษณะของปัญหาที่ทำให้ได้ 2 รูปแบบย่อยคือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดตัวแปรเดียว (Univariate Problem) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายตัวแปร (Multivariate Problem)

2. ชนิดของตัวแปรออกแบบ (The Type of Variables) สามารถแบ่งลักษณะของปัญหาได้ 3 รูปแบบคือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous-valued Variables) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Integer or Discrete Variables) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรผสม (mixed integer problem) โดยมีทั้งตัวแปรต่อเนื่องและตัวแปรไม่ต่อเนื่อง

3. ระดับขั้นความไม่เชิงเส้นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (The Degree of Nonlinearity of The Objective Function) ทำให้แบ่งลักษณะของปัญหาได้ 2 รูปแบบคือ ปัญหากำหนดการเชิงเส้น (Linear Problem) และปัญหากำหนดการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Problem)

4. การใช้เงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัด (The Constraints Used) ทำให้แบ่งลักษณะของปัญหาได้ 2 รูปแบบคือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ (Constrained Optimization Problem) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Unconstrained Optimization Problem)

5. จำนวนของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (The Number of Optima) ทำให้แบ่งลักษณะของปัญหาได้ 2 รูปแบบคือ ปัญหาแบบยอดเดียว (Unimodal Problem) เป็นปัญหาที่มีคำตอบหรือผลเฉลยชัดเจนเพียงคำตอบเดียว และปัญหาแบบหลายยอด (Multimodal Problem) เป็นปัญหาที่มีผลเฉลยที่เป็นไปได้มากกว่าหนึ่งคำตอบ

6. การพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (The Number of Objective Function) ทำให้แบ่งลักษณะของปัญหาได้ 2 รูปแบบคือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียว (Single-objective Problem) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Problem)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด มักไม่ได้มีลักษณะของปัญหาเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง แต่เกิดจากการผสมผสานของรูปแบบตามที่กล่าวมาข้างต้น อาทิ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียวของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีเงื่อนไขบังคับ

2.6.3 ลักษณะผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การหาผลเฉลยของปัญหา หมายถึง การหาค่าตัวแปรออกแบบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยเซตซึ่งมีสมาชิกเป็นผลเฉลยทั้งหมดของปัญหา เรียกว่า ปริภูมิการค้นหา (Search Space) และผลเฉลยที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัดของปัญหาจะเรียกว่า ผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) ทั้งนี้เมื่อผลเฉลยที่เป็นไปได้อยู่ในปริภูมิการค้นหา บริเวณดังกล่าวจะเรียกว่า บริเวณค่าความเป็นไปได้ (Feasible region) และถ้าผลเฉลยในบริเวณค่าความเป็นไปได้ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าเหมาะสมที่สุดจะเรียกผลเฉลยนั้นว่า ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ซึ่งแบ่งออกเป็น ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimal) และผลเฉลยเหมาะสมที่สุดแบบเฉพาะที่ (Local Optimal)

เมื่อพิจารณาปัญหาการหาค่าต่ำสุด ค่าจัดความสำหรับผลเฉลยซึ่งให้ค่าต่ำสุดแบบวงกว้าง (Global Minimum) และค่าต่ำสุดแบบเฉพาะที่ (local Minimum) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 (Andries P. Engelbrecht 2007) ส่วนปัญหาการหาค่าสูงสุด สำหรับผลเฉลยซึ่งให้ค่าสูงสุดแบบวงกว้าง (Global Maximum) และค่าสูงสุดแบบเฉพาะที่ (local Maximum) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8

$$f(x^*) < f(x), \forall x \in \mathcal{F} \quad \text{เมื่อ } \mathcal{F} \subseteq S \quad (2.5)$$

$$f(x_N^*) \leq f(x), \forall x \in \mathcal{N} \quad \text{เมื่อ } \mathcal{N} \subseteq \mathcal{F} \subseteq S \quad (2.6)$$

$$f(x^*) > f(x), \forall x \in \mathcal{F} \quad \text{เมื่อ } \mathcal{F} \subseteq S \quad (2.7)$$

$$f(x_N^*) \geq f(x), \forall x \in \mathcal{N} \quad \text{เมื่อ } \mathcal{N} \subseteq \mathcal{F} \subseteq S \quad (2.8)$$

โดยที่ \mathcal{F} คือ ผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible Solution)

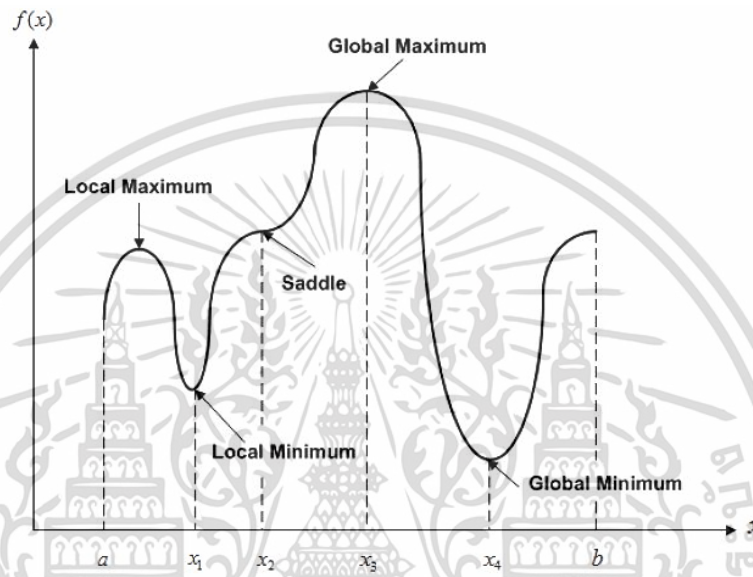
S คือ บริเวณค่าความเป็นไปได้ (Feasible region or Feasible Search Space)

\mathcal{N} คือ ผลเฉลยบริเวณข้างเคียง (Neighborhood)

ในสมการที่ 2.5 ได้อธิบายว่า x^* จะเป็นผลเฉลยที่ให้ค่าต่ำสุดแบบวงกว้าง เมื่อไม่มีผลเฉลยอื่นในบริเวณค่าความเป็นไปได้ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ x^* และสมการที่ 2.6 ได้อธิบายว่า x_N^* จะเป็นผลเฉลยที่ให้ค่าต่ำสุดแบบเฉพาะที่ เมื่อไม่มีผลเฉลยอื่นในบริเวณข้างเคียง (Neighborhood) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ x_N^*

ในสมการที่ 2.7 ได้อธิบายว่า x^* จะเป็นผลเฉลยที่ให้ค่าสูงสุดแบบวงกว้าง เมื่อไม่มีผลเฉลยอื่นในบริเวณค่าความเป็นไปได้ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ x^* และสมการที่ 2.8 ได้อธิบายว่า x_N^* จะเป็นผลเฉลยที่ให้ค่าสูงสุดแบบเฉพาะที่ เมื่อไม่มีผลเฉลยอื่นในบริเวณข้างเคียง (Neighborhood) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ x_N^*

ตัวอย่างลักษณะของผลเฉลยซึ่งให้ค่าต่ำสุดแบบวงกว้าง ค่าต่ำสุดแบบเฉพาะที่ ค่าสูงสุดแบบวงกว้าง และค่าสูงสุดแบบเฉพาะที่สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตัวแปรเดียว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของผลเฉลยในรูปแบบที่แตกต่างกันสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตัวแปรเดียว (ที่มา: เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ 2561, *Advanced Mathematics for Electrical Engineering*)

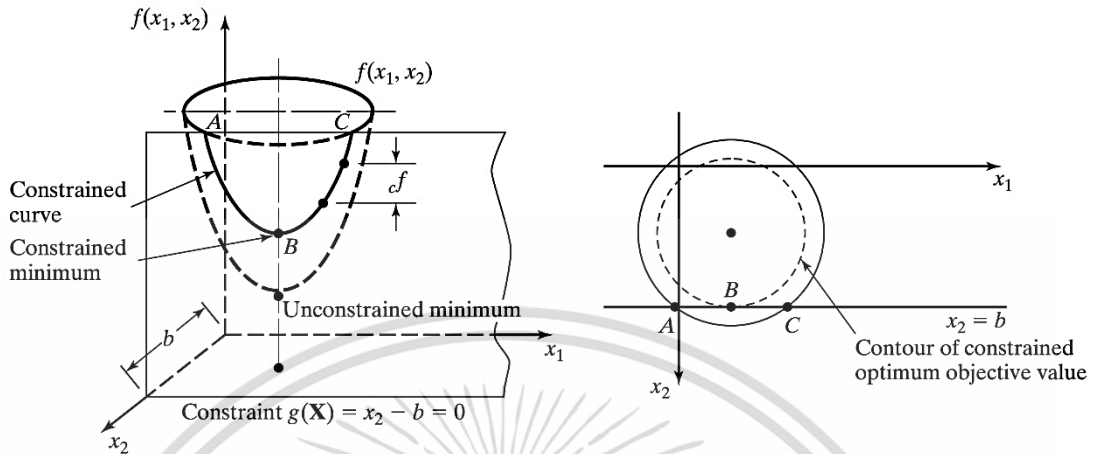
2.6.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีเงื่อนไขบังคับ

เนื่องจากปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในงานออกแบบทางวิศวกรรม โดยปกติลักษณะของปัญหามักเป็นฟังก์ชันหลายตัวแปรที่มีเงื่อนไขบังคับ ซึ่งส่วนใหญ่เงื่อนไขบังคับจะอยู่ในรูปของข้อจำกัด เช่น ความแข็งแรงหรือความทนทานของโครงสร้างชิ้นงาน ปริมาณของวัสดุ หรือข้อจำกัดอื่นด้านการออกแบบ เป็นต้น ทั้งนี้ปัญหาในงานวิศวกรรมสามารถพิจารณาเงื่อนไขบังคับได้เป็น 2 รูปแบบ คือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ และเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบสมการจะใช้วิธี Jacobian method และ Lagrange's method ในการแก้ปัญหา ส่วนปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการจะใช้วิธี Karush Kuhn Tucker ในการแก้ปัญหา

2.6.4.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Jacobian Method

หลักการของวิธี Jacobian method จะใช้อนุพันธ์ฟังก์ชันของเงื่อนไขบังคับ (Constrained) ในการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ อันดับที่ 1 โดยมีรูปแบบของฟังก์ชันคือ การหาค่า Minimize ของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชัน $z = f(x)$ ซึ่งกำหนดเงื่อนไขบังคับ constrained $g(x) = 0$ โดยที่ $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ และ $g = (g_1, g_2, \dots, g_m)^T$ ทั้งนี้ลักษณะขอบเขตของปัญหาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขอบเขตของปัญหาแบบมีเงื่อนไขบังคับและแบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ
(ที่มา : Hamdy A. Taha. 2017, Operations Research An Introduction)

จากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าถ้าฟังก์ชันไม่มีการกำหนดเงื่อนไขบังคับ ผลเฉลยหรือคำตอบจะอยู่บนแนวเส้นประ แต่หากฟังก์ชันมีการกำหนดเงื่อนไขบังคับ ผลเฉลยจะอยู่บริเวณที่เป็นเส้นทึบ (Constrained Curve) และมีช่วงที่แคบลง โดยเมื่อพิจารณาเกรเดียนต์ (Gradient) ของฟังก์ชันด้วย ทฤษฎีบทของเทย์เลอร์ (Taylor's theorem) จะได้สมการของฟังก์ชัน และเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$f(x + \Delta x) - f(x) = \nabla f(x)\Delta x + o(\Delta x_j^2) \tag{2.9}$$

$$g(x + \Delta x) - g(x) = \nabla g(x)\Delta x + o(\Delta x_j^2) \tag{2.10}$$

โดยที่ $o(\Delta x_j^2)$ เป็นเทอมของอนุพันธ์อันดับสูง และเมื่อ (Δx_j) มีค่าเข้าใกล้ 0 จะสามารถลดรูปสมการที่ 2.9 และ 2.10 ได้ดังนี้

$$\partial f(x) = \nabla f(x)\partial x \tag{2.11}$$

$$\partial g(x) = \nabla g(x)\partial x \tag{2.12}$$

เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขบังคับของสมการ constrained $g(x) = 0$ และ $\partial g(x) = 0$ จากสมการที่ 2.11 และ 2.12 จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\partial f(x) - \nabla f(x)\partial x = 0 \tag{2.13}$$

$$\nabla g(x)\partial x = 0 \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ $x = (y, z)$ โดย $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ เป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น และ $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) จะสามารถเขียน gradient vector ของฟังก์ชันและเงื่อนไขบังคับได้ดังนี้

$$\nabla f(y, z) = (\nabla_y f, \nabla_z f) \quad (2.15)$$

$$\nabla g(y, z) = (\nabla_y g, \nabla_z g) \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะสามารถเขียน Jacobian matrix (J) และ control matrix (C) ได้ดังนี้

$$J = \nabla_y g = \begin{bmatrix} \nabla_y g_1 \\ \nabla_y g_2 \\ \vdots \\ \nabla_y g_m \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$C = \nabla_z g = \begin{bmatrix} \nabla_z g_1 \\ \nabla_z g_2 \\ \vdots \\ \nabla_z g_m \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 สามารถเขียนในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\partial f(y, z) = \nabla_y f \partial y + \nabla_z f \partial z \quad (2.19)$$

$$J \partial y = -C \partial z \quad (2.20)$$

ถ้า Jacobian matrix เป็น nonsingular matrix จากสมการที่ (2.20) จะได้

$$\partial y = -J^{-1} C \partial z \quad (2.21)$$

$$\partial f(y, z) = (\nabla_z f - \nabla_y f J^{-1} C) \partial z \quad (2.22)$$

และจากสมการที่ 2.22 สามารถนิยาม constrained gradient ($\nabla_c f$) ของฟังก์ชันที่สอดคล้องกับ independent vector (z) ได้ดังนี้

$$\nabla_c f = \frac{\partial f(y, z)}{\partial_c z} = \nabla_z f - \nabla_y f J^{-1} C \quad (2.23)$$

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของวิธี Jacobian Method ถูกใช้เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าทางขวาในสมการเงื่อนไขบังคับซึ่งมีผลต่อค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชัน กล่าวคือ เมื่อสามารถหาค่า Optimal value ได้จากสมการเงื่อนไขบังคับ $g(x) = 0$ และเรียกค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวว่าค่า f แล้ว จะพิจารณาว่าเมื่อสมการเงื่อนไขบังคับเปลี่ยนแปลงค่าไปเป็น $g_i(x) = \partial g_i$ แล้วค่า f จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ทั้งนี้การวิเคราะห์ความไวในปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Programming) สามารถทำได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าที่น้อยในบริเวณข้างเคียงกับจุด Optimal value เท่านั้น จากสมการดังที่กล่าวไปในข้างต้นถ้า $g_i(x) \neq 0$ เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\partial f(y, z) &= \nabla_y f \partial y + \nabla_z f \partial z \\ \partial g(x) &= J \partial y + C \partial z\end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $\partial g \neq 0$ ดังนั้น

$$\partial y = J^{-1} \partial g - J^{-1} C \partial z$$

แทนค่าที่ได้ลงใน $\partial f(y, z)$ จะได้

$$\partial f(y, z) = \nabla_y f J^{-1} \partial g + \nabla_c f \partial z$$

โดยที่

$$\nabla_c f = \nabla_z f - \nabla_y f J^{-1} C$$

บริเวณจุด optimal point $x_0 = (y_0, z_0)$ สามารถพิจารณาได้เป็นจุดหยุดนิ่ง Stationary ซึ่งทำให้ค่า constrained gradient $\nabla_c f$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\nabla f(y_0, z_0) = \nabla_{y_0} f J^{-1} \partial g(y_0, z_0) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial g} = \nabla_{y_0} f J^{-1} \quad (2.25)$$

สมการที่ 2.25 ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficients) ซึ่งคือปริมาณที่บ่งบอกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าทางด้านขวาในสมการเงื่อนไขบังคับ constraint g ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าฟังก์ชัน f ไปมากน้อยเพียงใด

2.6.4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Lagrange Method

วิธี Lagrange method เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบสมการซึ่งใช้อนุพันธ์ของฟังก์ชันอันดับที่ 1 (First Derivative) โดยกำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือ $f(x_1, x_2)$ และกำหนดเงื่อนไขบังคับแบบสมการดังนี้

$$g(x_1, x_2) = 0 \quad (2.26)$$

โดยที่ x_1 เป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับ x_2 ดังสมการ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_1 = \phi(x_2) \quad (2.27)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.27 สามารถเขียนฟังก์ชันของ x_2 ได้เป็น

$$F(x_2) = f(\phi(x_2), x_2) \quad (2.28)$$

และเงื่อนไขบังคับของ x_2 คือ

$$h(x_2) = g(\phi(x_2), x_2) = 0 \quad (2.29)$$

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $F = f(x_1, x_2)$ เราสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันได้ดังนี้

$$dF = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.30 จะได้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเทียบกับ x_1 และ x_2

$$\frac{dF}{dx_1} = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dx_1} \quad (2.31)$$

$$\frac{dF}{dx_2} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dx_2} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.28 และ 2.29 สามารถหาผลเฉลยที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้โดยกำหนดให้อนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x_2)$ และอนุพันธ์ของเงื่อนไขบังคับ $h(x_2)$ มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\frac{dF(x_2)}{dx_2} = \frac{\partial f}{\partial x_2} + \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{d\phi(x_2)}{dx_2} = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{dh(x_2)}{dx_2} = \frac{\partial g}{\partial x_2} + \frac{\partial g}{\partial x_1} \frac{d\phi(x_2)}{dx_2} = 0 \quad (2.34)$$

จากกฎลูกโซ่ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\frac{df}{dx_1} - \left(\frac{df}{dx_1} \right) \frac{dg}{dx_1} = 0 \quad (2.35)$$

$$\nabla f - \lambda \nabla g = 0 \quad (2.36)$$

$$\lambda = \frac{df}{dg} \quad (2.37)$$

โดยที่ λ คือตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multiplier) ซึ่งเป็นตัววัดค่าการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขบังคับ และ Lagrange function สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$L(x, \lambda) = f(x) - \lambda g(x) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Karush Kuhn Tucker

วิธี Karush Kuhn Tucker เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาผลเฉลยหรือคำตอบของฟังก์ชันที่มีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality Constraints) โดยรูปแบบของ Karush Kuhn Tucker เมื่อพิจารณาปัญหาการหาค่า Minimize ของฟังก์ชัน $f(x)$ ซึ่งมีเงื่อนไขบังคับเป็น

$$\begin{aligned} h(x) &= 0 \\ g(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

เงื่อนไขบังคับแบบอสมการอาจแปลงรูปแบบเป็นสมการได้โดยใช้ตัวแปรส่วนขาดที่ไม่เป็นลบ (Nonnegative Slack Variables, $s_i^2 \geq 0$) ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนค่า slack เข้าไปในเงื่อนไขบังคับ constraint $g(x) \leq 0$ ดังสมการ

$$s^2 = (s_1^2, s_2^2, \dots, s_m^2) \quad (2.40)$$

โดยที่ m คือจำนวนเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ และสามารถเขียนฟังก์ชัน Lagrange function ได้ดังนี้

$$L(x, s, \mu) = f(x) - \lambda^T h - \mu^T (g(x) + s^2) = 0 \quad (2.41)$$

โดยที่ λ^T คือ ตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange Multiplier) และ μ^T คือ ตัวคูณคาร์ช-คุนทักเกอร์ (KKT Multiplier)

จากสมการที่ 2.41 สามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันอันดับที่ 1 เทียบกับ x, s, μ และ λ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h - \mu^T \nabla g(x) = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial s} = -2\mu s_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = -(g(x) + s^2) = 0 \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = h(x) = 0 \quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.43 และ 2.44 สามารถลดรูปสมการได้ดังนี้

$$\mu_i g_i(x) = 0 \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของของฟังก์ชันโดยใช้ KKT condition สามารถกำหนดรูปแบบได้ดังต่อไปนี้

Maximize or minimize $f(x)$

subject to $h(x) = 0$

$g(x) \leq 0$

KKT condition

$\mu_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, m$ (For Maximize)

$\mu_i \leq 0$, $i = 1, 2, \dots, m$ (For Minimize)

$\nabla f(x) - \lambda^T \nabla h - \mu^T \nabla g(x) = 0$

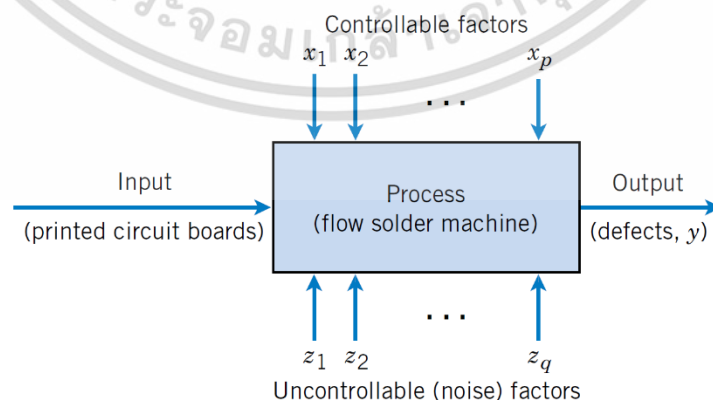
$\mu^T g(x) = 0$

$h(x) = 0$

$g(x) \leq 0$

2.7 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) คือ การทดสอบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจ เพื่อสังเกตและชี้ถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าถูกแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) หรือตัวแปรออกแบบ (Design Variables) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รับกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้การออกแบบการทดลอง มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของกระบวนการหรือระบบที่สนใจ (ประไพศรี สุตทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบหรือกระบวนการที่สนใจ

(ที่มา : Douglas C. Montgomery, 2002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาหรือกระบวนการ (Optimal Condition) โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และการวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบสนอง (Response) ของปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งในแวดวงของอุตสาหกรรมโลก วิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีการรวบรวมเทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์ที่เป็นประโยชน์มาใช้ในการออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปวิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์ (ในที่นี้จะเรียกว่าผู้ทดลองหรือผู้วิจัย) ที่วิจัยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กระบวนการ ปัญหาหรือระบบที่สนใจ จะมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับตัวแปรนำเข้าที่ควบคุม ซึ่งตัวแปรนำเข้าในบางครั้งเรียกว่าปัจจัย (Factor) หรือตัวแปรอิสระ (independent variable) ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 2.47

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (2.47)$$

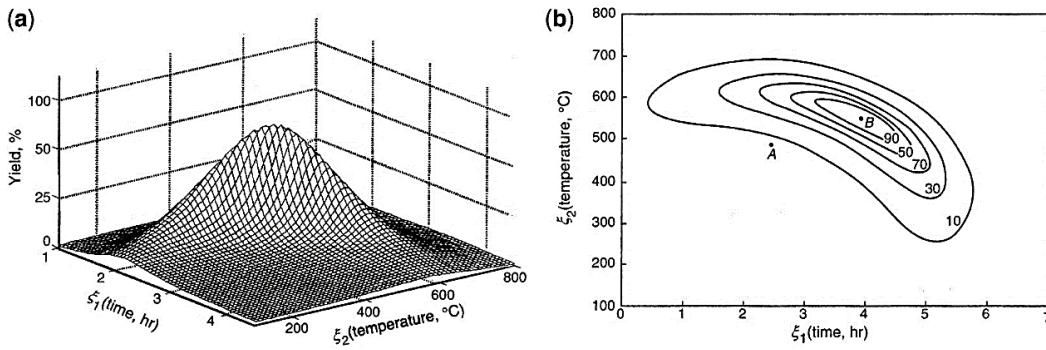
โดยที่ y คือ ตัวแปรผลตอบสนอง

$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = E(y) = \eta$ คือ ค่าผลตอบสนองที่คาดหวัง

x คือ ปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของผลตอบสนอง

กรณีปัญหาหรือกระบวนการทดลองมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเข้าใกล้หรือเป็นศูนย์ สามารถแทน $E(y) = \eta = f(x_1, x_2)$ เป็นสมการพื้นผิวตอบสนอง โดยพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) จะแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว 3 มิติ ซึ่งเป็นการนำค่าผลตอบสนอง η มาพล็อตเทียบกับระดับของค่าตัวแปรอิสระ x_1 และ x_2 แสดงดังรูปที่ 2.11a ทั้งนี้พื้นผิวตอบสนองยังสามารถฉายภาพลงมาเป็นแบบ 2 มิติ ในลักษณะกราฟเส้นชั้นความสูง (Contour Plot) แสดงดังรูปที่ 2.11b



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ : (a) กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ ; (b) กราฟเส้นชั้นความสูงของพื้นผิวตอบสนอง (ที่มา : Raymond H. Myers, Douglas and Christine, 2016)

เนื่องจากปัญหาที่ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยส่วนใหญ่ มักไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ดังนั้นในการประมาณค่าความสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อความรวดเร็วในการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวตอบสนอง ในขั้นตอนแรกจะใช้ฟังก์ชันแบบจำลองอันดับหนึ่ง (First Order Model) เป็นตัวแทนของความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.48 ทั้งนี้ในลำดับถัดไปของการประมาณค่าเพื่อนำไปสู่การหาค่าเหมาะสมที่สุดของพื้นผิวตอบสนอง จะใช้ฟังก์ชันแบบจำลองที่อันดับสูงขึ้นเข้ามาช่วยในการประมาณค่า ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่จะนิยมใช้ฟังก์ชันแบบจำลองอันดับสอง (Second Order Model) เพราะมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น ดังสมการที่ 2.49

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \tag{2.48}$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{2.49}$$

- โดยที่
- y คือ ค่าผลตอบสนอง
 - x_i คือ ปัจจัยหรือตัวแปรอิสระที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, k$
 - β_0 คือ ค่าคงที่
 - β_i คือ สัมประสิทธิ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, k$
 - β_{ii} คือ สัมประสิทธิ์กำลังสองของค่าพารามิเตอร์ที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, k$
 - β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่ i และ j เมื่อ $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, k$ และ $j > i$
 - ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองที่ใช้ฟังก์ชันแบบจำลองอันดับหนึ่งหรือฟังก์ชันแบบจำลองอันดับสองในการประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระ ต้องอาศัยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือตัวแปร เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง โดยจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดต่างๆในแต่ละช่วงได้ จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันในสมการที่ 2.48 และ 2.49 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2.50)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \text{and } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

โดยที่ y คือ เวกเตอร์ของค่าผลตอบสนอง
 X คือ เมทริกซ์ของตัวแปรอิสระ
 β คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (unknown parameter) หรือเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ถดถอย (regression coefficients)
 ε คือ เวกเตอร์ของความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์การถดถอย โดยทั่วไปจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นวิธีในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (β) ที่ทำให้ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสมการที่ 2.51

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (2.51)$$

จากสมการที่ 2.51 เราจะใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาและสามารถประมาณค่าเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ถดถอยแบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้ดังสมการที่ 2.52

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.52)$$

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีข้อควรพิจารณาคือ ตัวแปรอิสระแต่ละตัวต้องไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระตัวอื่น แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก เพราะตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษามักมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเรียกความสัมพันธ์ดังกล่าวว่า พหุสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งปัญหาพหุสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ทำให้ $|X'X|$ (ค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ $X'X$) มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผล

ทำให้ความแปรปรวนของค่าประมาณสัมประสิทธิ์ถดถอยซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์ $Var(\hat{\beta}) = \sigma^2(X^T X)^{-1}$ มีค่ามาก และทำให้ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้ขาดความแม่นยำ (สุวิตรา ทวระลึก, 2557)

โดยทั่วไปการทำให้ความแปรปรวนของค่าประมาณสัมประสิทธิ์ถดถอยมีค่าน้อยที่สุด จะใช้การออกแบบที่เรียกว่า D-Optimal design ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ทำให้ $|X^T X|$ มีค่าสูงสุด เทียบเท่ากับการลดค่า $|(X^T X)^{-1}|$ ให้ต่ำที่สุด และเมื่อ $Var(\hat{\beta}) = \sigma^2(X^T X)^{-1}$ มีค่าน้อยที่สุดย่อมส่งผลทำให้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

2.8 ทบทวนวรรณกรรมปริทัศน์ (Literature Review)

ปิติ และ อำพน (2561) ได้ศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัว การเสียรูปที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ และเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เมื่อพิจารณาตรวจสอบให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลจากการทดสอบ แบบจำลองดังกล่าวนี้ได้ถูกนำไปใช้เป็นตัวแบบเพื่อสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองบ่งบอกได้ว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) มีส่วนช่วยในการลดการแอ่นตัว และเพิ่มกำลังรับแรงให้กับผนังก่ออิฐมวลเบาได้ดีกว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีอื่นที่นำมาพิจารณาร่วมกัน ทั้งนี้ผลที่ได้ยังไม่ได้ระบุชัดเจนว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังกล่าวมีรูปแบบและทิศทางเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด โดยขั้นตอนการศึกษาต่อไปจะคำนึงถึงรูปแบบและทิศทางของการเสริมกำลัง ซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสมต่อไป

Hamid and Shing (1994) ได้ทำการวิเคราะห์ก้ำแกงอิฐภายใต้แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Load) ในการวิเคราะห์ได้สมมติว่าก้ำแกงเป็นเนื้อผสมซึ่งประกอบด้วย อิฐ และปูนก่อ โดยอิฐถูกจำลองให้มีพฤติกรรมที่มีการแตกร้าวแบบกระจาย (Smear Crack Modeling) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีต โดยความเสียหายของก้ำแกงเกิดขึ้นเนื่องจากรอยแตกจากแรงดึง (Tensile Fracture) มากกว่ารอยแตกจากแรงกด (Compressive Fracture) ส่วนปูนก่อถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนสัมผัส (Interface Element) โดยจะเป็นตัวเชื่อมระหว่างอิฐแต่ละก้อน การที่แบ่งปูนก่อเป็นชิ้นส่วนสัมผัสเนื่องจากการเสียหายของก้ำแกงอิฐที่ไม่มีการเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะเกิดที่ปูนก่อ ซึ่งจะมีแรงเฉือนเป็นตัวแปรสำคัญ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าสามารถทำนายความสามารถในการรับแรงเฉือน น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย รูปแบบความเสียหาย และความเหนียว (Ductility) ของก้ำแกง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Seismic Resistance) ของก้ำแกงอิฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clay Brick and Paver Institute (1999) ได้ทำการทดสอบแรงกระทำด้านข้างกับตัวอย่างผนังก่อที่พิจารณา โดยผนังก่อมีความหนา 11 cm. ความสูง 2.4 m. และความยาว 3.0 m. ซึ่งผนังก่อไม่มีแรงกระทำในแนวแกนและไม่มีช่องเปิดตรงส่วนที่ทำการพิจารณา ที่จุดรองรับเป็นการรองรับแบบง่ายและกำลังรับหน่วยแรงดึงแบบตัดจำเพาะ (Characteristic flexural tensile strength, f'_{mt}) มีค่าเท่ากับ 0.2 MPa ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง ผนังพาดรับแรงในแนวนอน และผนังพาดรับแรงสองทิศทาง สามารถรับแรงกระทำได้โดยประมาณเท่ากับ 0.34, 0.78, 2.0 kPa ตามลำดับ

Page and Sekender (1989) ได้ทำการวิเคราะห์กำแพงอิฐภายใต้แรงกระทำเฉพา ที่คุณสมบัติของอิฐและปูนก่อใช้เป็นแบบไม่ยืดหยุ่น ในการวิเคราะห์ได้แยกอิฐและปูนก่อเป็นคนละชิ้นส่วน แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ได้ใช้แบบรูปสี่เหลี่ยม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบน้ำหนักที่ทำให้เกิดความเสียหายเริ่มต้น น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของกำแพงและรูปแบบของความเสียหายสุดท้ายที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยหากมีการกระจายความเค้นที่ละน้อย จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกว่าการให้ความเค้นกระจายหมดไปในทันที หลังจากเกิดการแตกร้าว

ดร.หมิง จิ่ง และคณะ (2553) ได้ศึกษาพฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสมือนจริงเสริมด้วย Fiber Reinforced Polymer ภายใต้แรงกระทำด้านบน โดยได้ทำการก่อสร้างผนังอิฐก่อโบราณขนาดความสูง 1.20 เมตร กว้าง 1.54 เมตร ซึ่งก่ออยู่บนฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกว้าง 0.90 เมตร ยาว 2.00 เมตร หนา 0.30 เมตร จำนวน 4 ชุด และทำการทดสอบผนังอิฐก่อโบราณโดยการให้แรงกระทำทางด้านบน ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบผนังเปล่าจำนวน 2 ผนัง และทดสอบผนังอิฐก่อโบราณเสริมด้วย Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) แบบเต็มผนังและแบบ 3-stripe ซึ่งผลการทดสอบการเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอิฐโบราณ ปรากฏว่าผนังเปล่ามีความสามารถในการรับแรงได้น้อยมาก ผนังเสริม GFRP แบบ 3-stripe รับแรงได้ 148.00 ตัน ผนังอิฐที่เสริม FRP แบบเต็มผนังมีความสามารถในการรับแรงดีที่สุดเท่ากับ 148.89 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับผนังทั้งหมดแล้ว พบว่าผนังเสริม GFRP มีความสามารถในการรับแรงใกล้เคียงกัน แต่แนะนำให้ใช้วิธีแบบ 3-stripe เนื่องจากความประหยัดและความสะดวกในการติดตั้งเหมาะสำหรับการใช้งานกับโครงสร้าง

ธวัชชัย และสุจินต์ (2014) ศึกษาและวิจัยการหาค่าเหมาะสมที่สุดสองขั้นตอนแบบหลายเป้าหมายของโครงสร้างแบบแผ่นโดยใช้วิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากร (Multi-objective Population-Based Incremental Learning, MOPBIL) ทั้งนี้การหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก คือ การหาทอพอโลยีเหมาะสมที่สุด (Topology Optimization) หรือขั้นตอนการออกแบบเชิงแนวคิดซึ่งดำเนินการร่วมกับวิธีตัวกรองเอลิเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคพื้น (Ground Element Filtering, GEF) เพื่อลดจำนวนของตัวแปรออกแบบทอพอโลยีพร้อมทั้งป้องกันการเกิดตาหมากรุกบนโครงสร้าง และขั้นตอนที่ 2 คือ การหาขนาดและรูปร่างเหมาะสมที่สุด (shape and sizing optimization) ซึ่งเป็นขั้นตอนการปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างจากขั้นตอนแรกและผลลัพธ์จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของวิธี MOPBIL ในการหาผลเฉลยของการออกแบบทั้ง 2 ขั้นตอนคือ ขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ทอพอโลยี และขนาดรูปร่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากร โดยผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากร สำหรับการออกแบบ 2 ขั้นตอน และผลลัพธ์จากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของวิธี MOPBIL มีผลกระทบต่อสมรรถนะในการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพียงเล็กน้อย

รศ.ดร.กิตติศักดิ์ และคณะ (2553) ศึกษาจุดเหมาะสมของการซ่อมบำรุงคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต และเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้วัสดุคอมโพสิตชนิด CFRP, GFRP และ AFRP และแบบไม่มีการเสริมกำลัง โดยใช้โปรแกรม ABAQUS สร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตแต่ละชนิด ทั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Design of Experiment (DOE) มาใช้ในการศึกษาและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิต อีกทั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ได้มีการนำทฤษฎีทางสถิติโดยการสร้างแบบจำลองการถดถอยเข้ามาช่วยวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเพิ่มเติม ซึ่งช่วยในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ นอกจากนี้ยังช่วยหาจุดเหมาะสมของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีราคาค่อนข้างสูง การเสริมกำลังจึงต้องพิจารณาหาจุดเหมาะสมของการเสริมกำลังทั้งความหนา ความกว้าง และความยาว ซึ่งการเสริมกำลังด้วยวัสดุคอมโพสิตที่มีความเหมาะสมจะทำให้ได้กำลังรับน้ำหนักตามต้องการแล้ว ยังช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย และจากผลการศึกษาพบว่าวัสดุเสริมกำลังชนิดคาร์บอน (CFRP) สามารถรับน้ำหนักได้มากที่สุดรองลงมาคือ อารามิต (AFRP) และกลาสไฟเบอร์ (GFRP) ตามลำดับ ส่วนความหนาและความกว้างของวัสดุเสริมกำลังจะมีผลต่อพฤติกรรมของคานเหมือนกันคือ การเพิ่มความหนาหรือความกว้างของวัสดุเสริมกำลังที่มากเกินไปก็ไม่ช่วยให้กำลังรับน้ำหนักของคานสูงขึ้น แต่การเพิ่มความยาวของวัสดุเสริมกำลังมีผลทำให้กำลังรับน้ำหนักของคานสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าหากพิจารณาจากภาพรวมของตัวแปรทั้งหมด โดยใช้เทคนิควิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) จะทำให้ได้จุดเหมาะสมของการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตในการเสริมกำลังทั้งในแง่ของกำลังและค่าใช้จ่ายด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

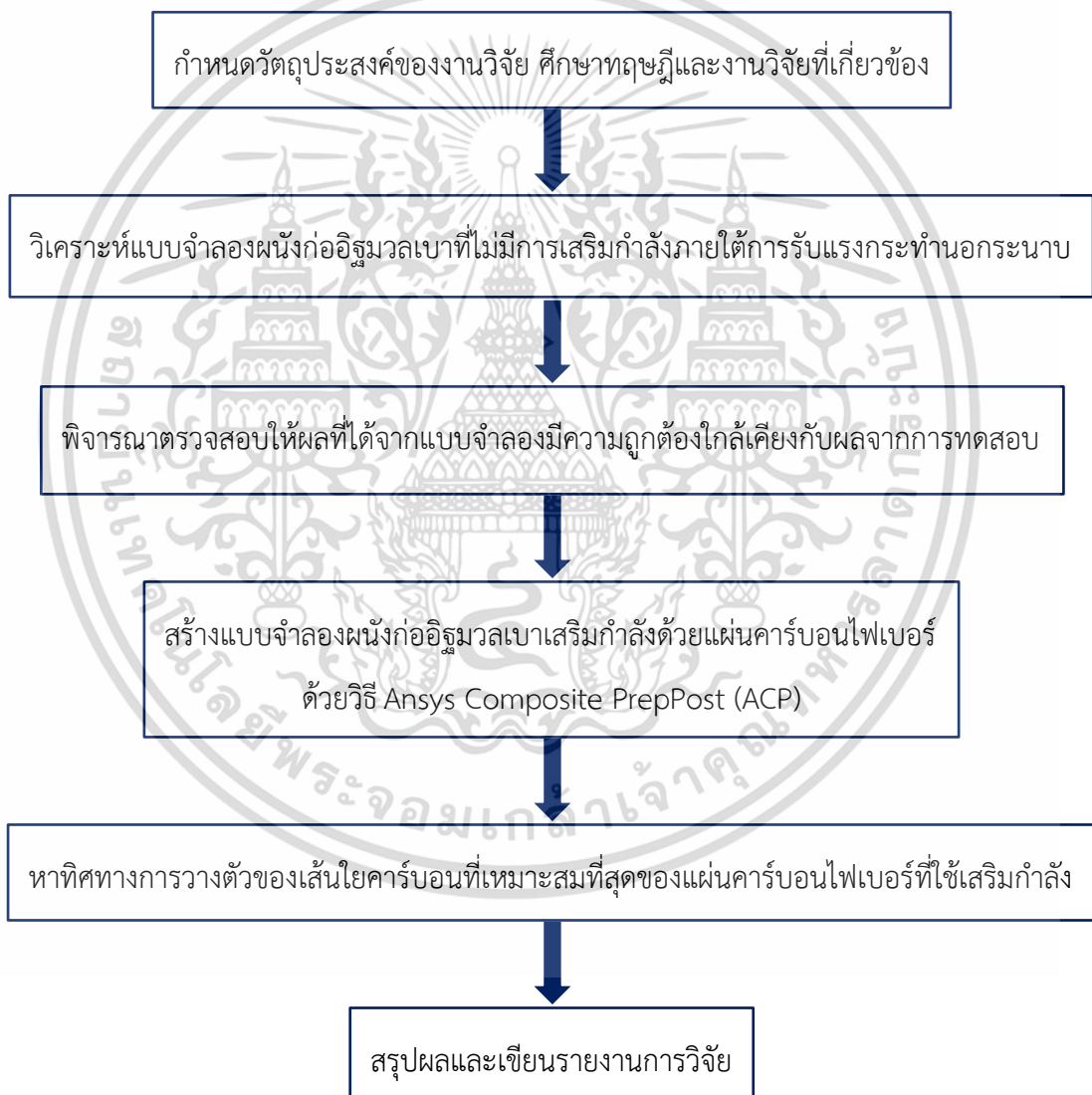
Matteo Bruggi, Gabriele Milani, and Alberto Taliercio (2014) ศึกษาและวิจัยรูปแบบที่เหมาะสมในการเสริมกำลังผนังก่ออิฐด้วยแผ่น FRP strips บริเวณพื้นผิวภายนอก ภายใต้การรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกระนาบ โดยมีขนาดของแบบจำลองผนังก่อขนาดความสูง 2.50 เมตร ความกว้าง 1.20 เมตร และความหนา 0.125 เมตร และมีการเสริมกำลังด้วยการติดตั้งแผ่น FRP strip ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ทั้ง 2 ด้านของผนัง ทั้งนี้ขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมในการเสริมกำลัง (The Topology Optimization) ได้พิจารณาให้สอดคล้องกับทิศทางของแนวความเค้นหลักที่เกิดขึ้น รวมถึงบริเวณที่เกิดค่าโก่งตัวสูงสุด (Maximum Out-of-plane Deflection) ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้นำไปสู่การนำเสนอรูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP Strip ที่เหมาะสมให้ผนังก่อ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มกำลังรับแรงดัด ช่วยลดการโก่งตัว และทำให้พลังงานความเครียดสะสมโดยรวมมีค่าน้อยที่สุด (the minimization of the overall strain energy)

lúri Marcelo Pinheiro Figueiredo (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด (Hybrid Composite Plates) แผ่นขึ้นงานทดสอบถูกผลิตขึ้นจากอีพ็อกซีเมทริกซ์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว โดยมีจำนวนของชั้น (Numbers of Plies) หลายชั้นและรูปแบบการวางตัวที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบขึ้นงานจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ansys Workbench เมื่อผลของแบบจำลองถูกต้องสอดคล้องแล้ว แบบจำลองดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อหาทิศทางวางตัวของเส้นใยเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นขึ้นงาน โดยทำให้ค่าการแอ่นตัวมีค่าน้อยที่สุด (Minimized Displacement) ภายใต้การรับแรงดัดและแรงบิด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ การวิเคราะห์แบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การประยุกต์ใช้แบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และการหาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้กระบวนการ Optimization



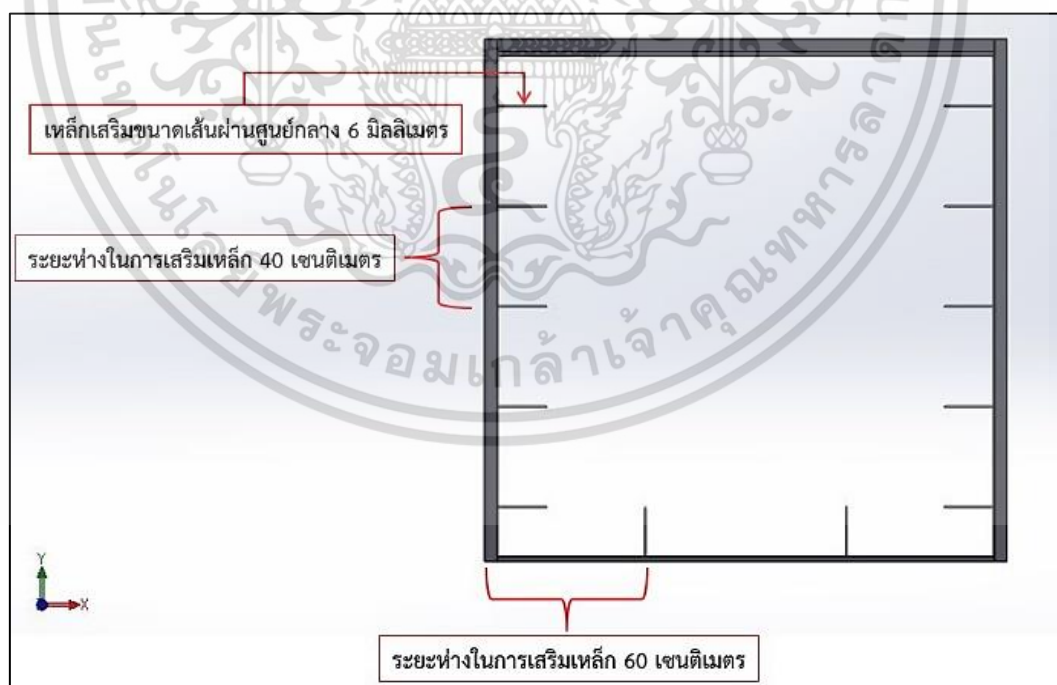
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1.1 การทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

ชิ้นงานทดสอบ

ผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง เป็นผนังก่ออิฐที่สร้างขึ้นแบบเต็มช่อง (Infilled) โดยเสาและคานใช้เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กกล่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 10 ซม. ความลึก 5 ซม. และความหนา 2 มม. โดยผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีขนาดประสิทธิภาพที่ไม่รวมโครงสร้างเสาและคานคือ ความสูง 2 ม. ความกว้าง 2 ม. และมีความหนา 10 ซม. โดยที่ความหนาของผนังเกิดขึ้นจากการใช้อิฐมวลเบาที่มีขนาดความหนา 7.5 ซม. และฉาบผนังที่ผิวทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบสำเร็จรูปเพื่อให้ได้ความหนาประสิทธิภาพดังกล่าว โดยที่ในแต่ละชั้นปูนก่อจะใช้ปูนก่อสำเร็จรูปสำหรับอิฐมวลเบา และมีการเสริมเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. (RB6) ยึดชั้นปูนก่อทุกระยะห่าง 40 ซม. ในแนวราบ ส่วนในแนวดิ่งจะเจาะเสียบเหล็กที่พื้นที่ระยะห่าง 60 ซม. เหล็กเสริมมีขนาดความยาว 20 ซม. โดยลักษณะของการเสริมเหล็กยึดชั้นปูนก่อ แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยฐานรองรับที่เป็นเสาเหล็กรูปพรรณจะถูกติดตั้งค้ำยันเพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ (Overturning) ซึ่งรูปแบบของชิ้นงานทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของการเสริมเหล็กยึดชั้นปูนก่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (ชิ้นงานทดสอบ)

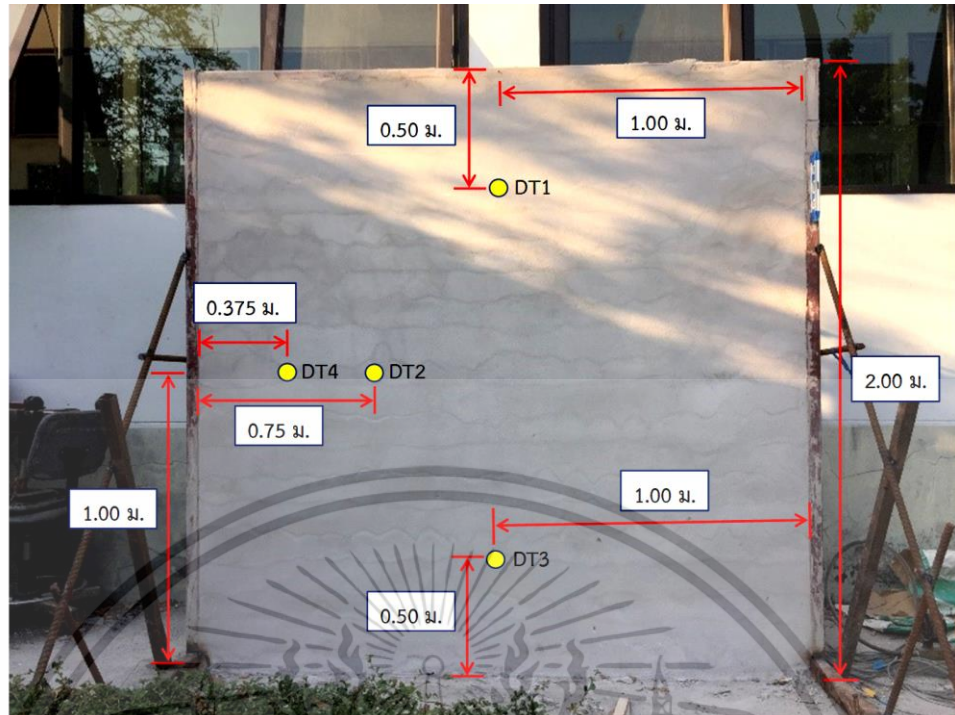
ขั้นตอนการทดสอบผนังก่อภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ

ก่อนการทดสอบ ได้ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและเครื่องมือในการวัดค่าแอนตัว (LVDT) ทั้งหมด 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ หลังจากนั้นติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อใช้อ่านค่าแรงกระทำ รวมทั้งต่อสาย LVDT เข้ากับเครื่อง Data logger และเชื่อมต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แปลงผลที่ได้ต่อไป การถ่ายแรงจะใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) ถ่ายแรงเข้าแผ่นเพลา เพื่อให้แผ่นเพลากระจายแรงในลักษณะที่เกิดขึ้นนอกระนาบเข้าสู่ผนังก่ออิฐมวลเบา



รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT จำนวน 4 จุด เพื่อวัดค่าแอนตัวของผนัง

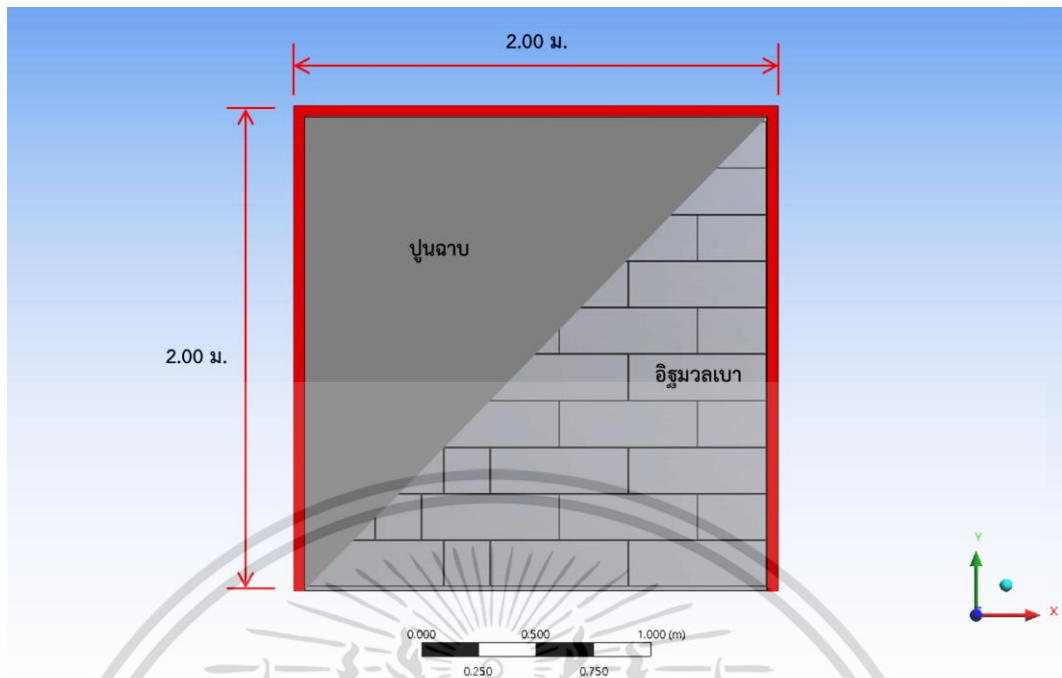
เมื่อติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือแล้วเสร็จ เริ่มทำการทดสอบและบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการแอนตัว ณ บริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดค่าการแอนตัว (DT-1 ถึง DT-4) จนกระทั่งผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าว

3.1.2 แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ ถูกสร้างขึ้นและคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Static Structural) ซึ่งแบบจำลองจะใช้ Solid Element โดยในเอลิเมนต์ประกอบด้วย 8 Node แต่ละ Node ประกอบด้วยการเคลื่อนตัวอิสระใน 3 ทิศทางคือ (U_x , U_y , U_z) และผิวสัมผัสระหว่างวัสดุในแต่ละชั้นส่วนที่จำลองจะถูกเชื่อมยึดติดกันโดยสมบูรณ์ด้วยคำสั่ง Contact แบบ Bonded ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างขึ้นตามรูปแบบและเงื่อนไขของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังมีขนาด 2000×2000×100 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ได้กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นคุณสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Material) โดยค่าคุณสมบัติที่นำมาใช้ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus, G) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio, ν) และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (Density, ρ) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

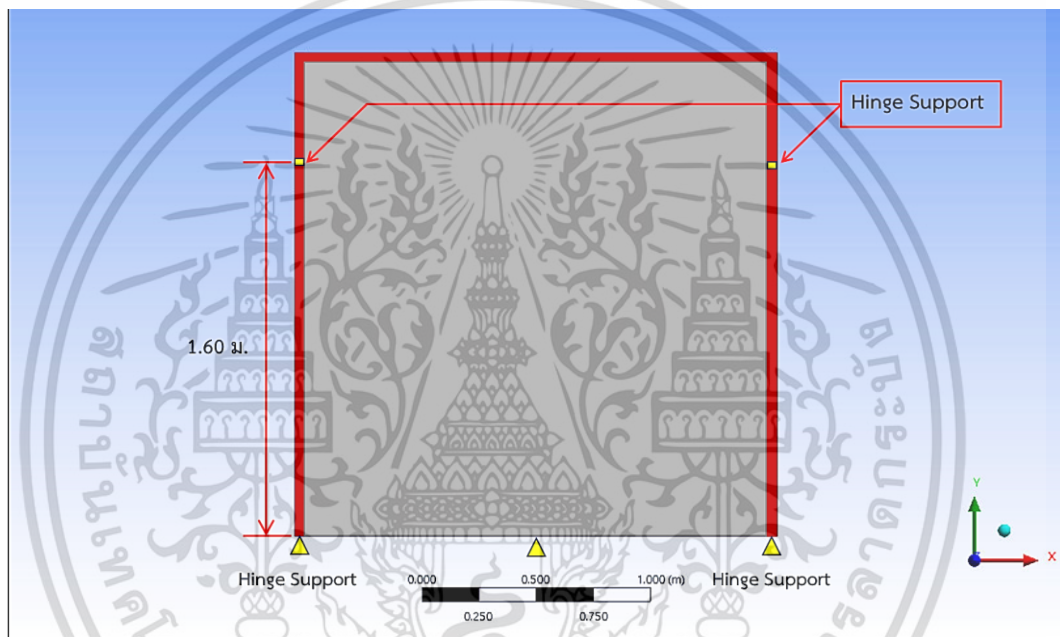
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (Isotropic Material)

วัสดุ	E (MPa)	G (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
อิฐมวลเบา	1,500	646.55	0.16	500
ปูนก่อ	1,800	805.73	0.117	2,000
ปูนฉาบ	2,650	1,137.30	0.165	2,132
เหล็ก	200,000	76,923	0.3	7,850
คอนกรีต	23,000	10,648	0.20	2,400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

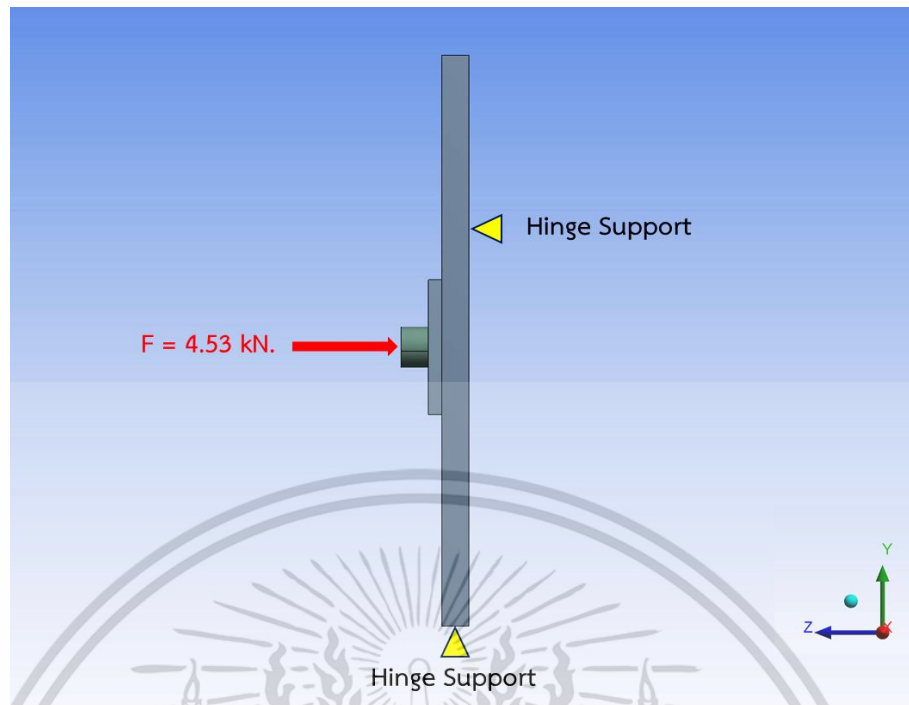
แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) โดยให้เสาเหล็กในตำแหน่งที่ทำค้ำยันมีฐานรองรับเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge support) การเคลื่อนตัวในทิศทางแกน Z ถูกยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวแต่สามารถหมุนตัวได้ ส่วนบริเวณฐานของเสาเหล็กซึ่งทำการเชื่อมยึดติดกับเพลาเหล็กที่พื้นถูกจำลองให้ฐานรองรับเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ การเคลื่อนตัวในแต่ละทิศทางถูกยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวแต่สามารถหมุนตัวได้ และบริเวณที่เจาะยึดเสริมเหล็กในแนวตั้งที่พื้นจำลองให้ฐานรองรับเป็นแบบหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เงื่อนไขขอบเขตจุดรองรับของแบบจำลอง

การให้แรงกระทำกับแบบจำลอง

เนื่องจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สามารถระบุค่าแรงกระทำสูงสุดก่อนที่ผนังจะเกิดการแตกร้าวได้เท่ากับ 4.53 kN ดังนั้นพฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่จำลองจะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าวัสดุยังรับแรงกระทำได้ในช่วงที่มีความยืดหยุ่น (Elasticity) และแบบจำลองดังกล่าวจะให้แรงกระทำที่เท่ากันกับการทดสอบเป็นจำนวน 10 ชั้น จนกระทั่งถึงค่าแรงกระทำ 4.53 kN เพื่อสังเกตค่าความสัมพันธ์ของแรงกระทำและค่าการแอ่นตัว ลักษณะแรงกระทำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปตัดของแบบจำลองแสดงเงื่อนไขขอบเขตของจตุรรองรับ และการให้แรงกระทำ

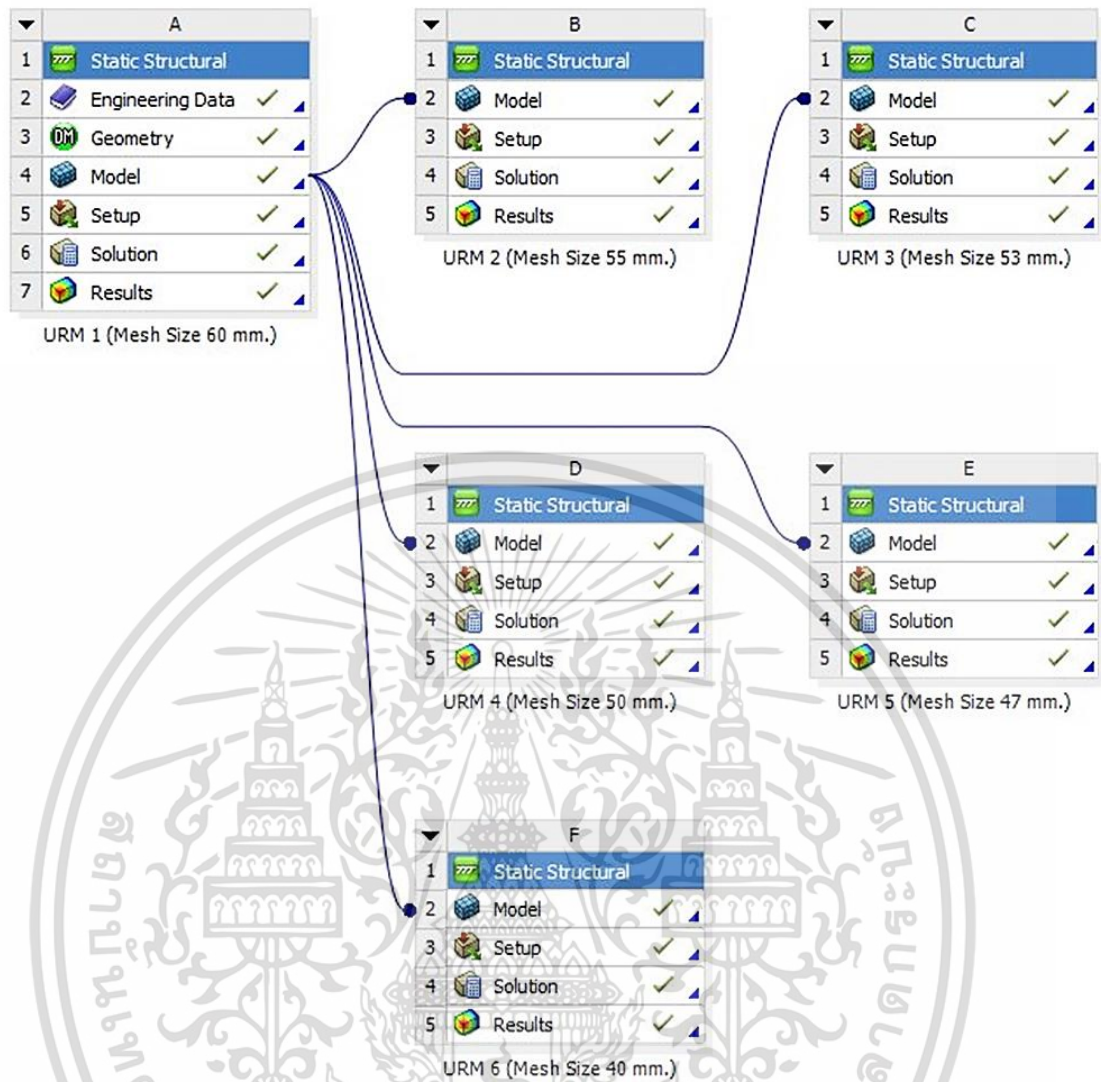
การแบ่งเอลิเมนต์และการวิเคราะห์ความไวของเมช (Mesh Sensitivity Analysis)

แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวทั้งหมด 6 แบบจำลอง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตและการรับแรงกระทำที่เท่ากัน ซึ่งในแต่ละแบบจำลอง จะทำการสร้างตาข่าย (Meshing) ที่มีจำนวนเอลิเมนต์แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์หาขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของแบบจำลองต่อไป ลักษณะแผนผังการทำงาน (Project Schematic) แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 ขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

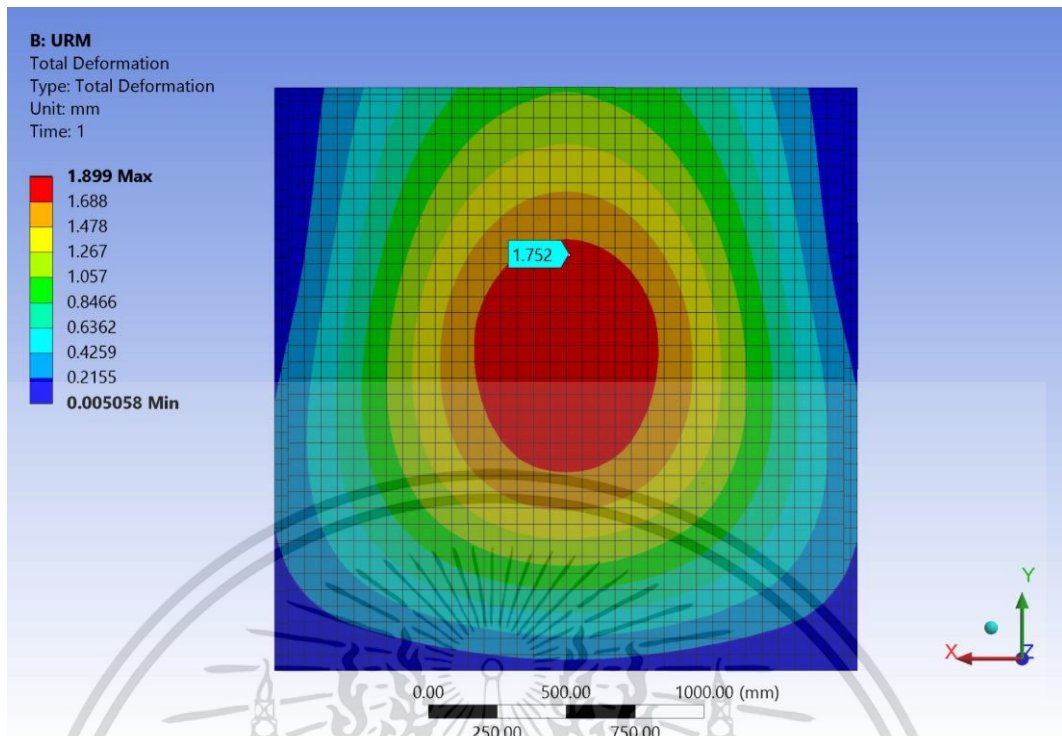
แบบจำลอง	ขนาดเอลิเมนต์ (มม.)	จำนวนเอลิเมนต์
1	60	21011
2	55	21209
3	53	21857
4	50	22351
5	47	30413
6	40	37574

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

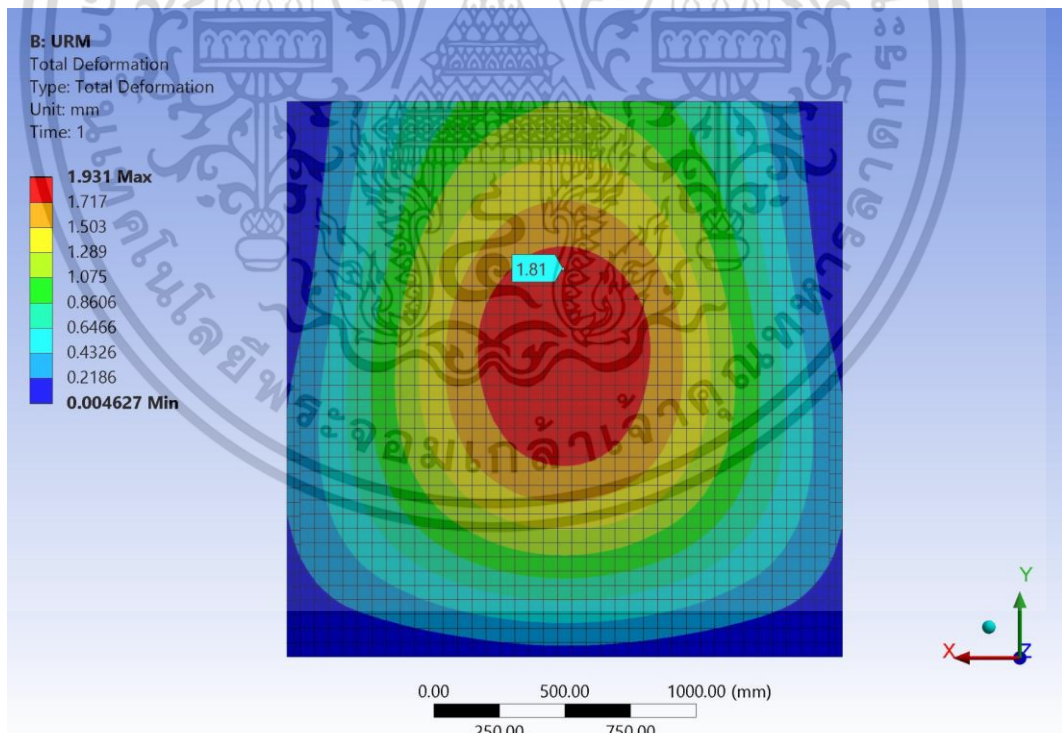


รูปที่ 3.8 Project Schematic สำหรับการวิเคราะห์ความไวของเมชทั้ง 6 แบบจำลอง

การวิเคราะห์ทั้ง 6 แบบจำลอง ได้ใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Static Structural) ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของจตุรกรรับแบบเดียวกัน รวมทั้งการให้แรงกระทำขนาด 4.53 kN. เพื่อหาค่าแอนตัว (Total deformation) บริเวณตัววัดค่า DT-1 โดยค่าแอนตัวของแบบจำลองจะถูกนำไปเขียนกราฟเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ของแต่ละแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์ผลความไวของเมชต่อไป ทั้งนี้ค่าแอนตัวของทั้ง 6 แบบจำลองที่มีการแบ่งเอลิเมนต์ที่แตกต่างกันแสดงได้ดังนี้

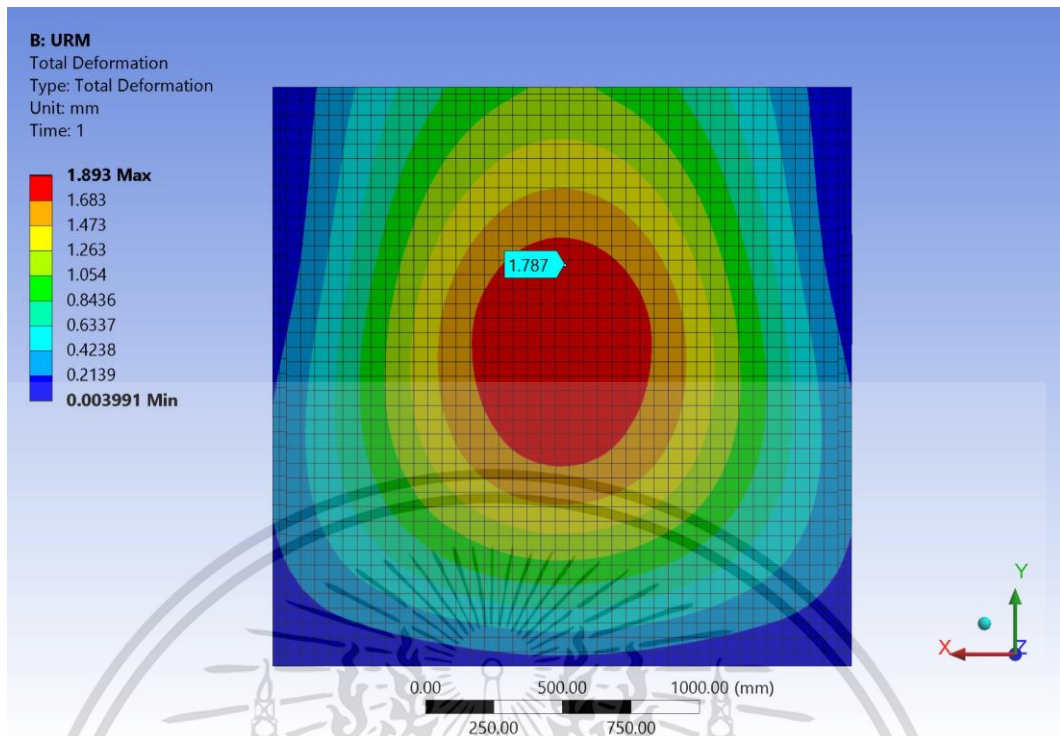


รูปที่ 3.9 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.752 มม. (แบบจำลองที่ 1)

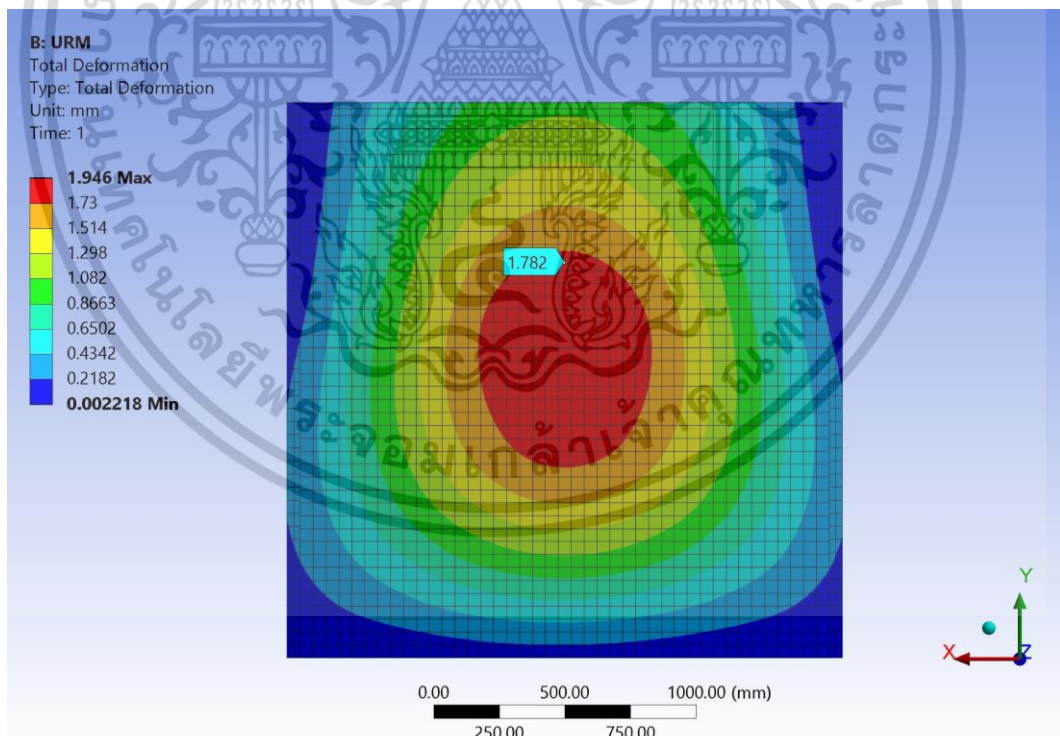


รูปที่ 3.10 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.810 มม. (แบบจำลองที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

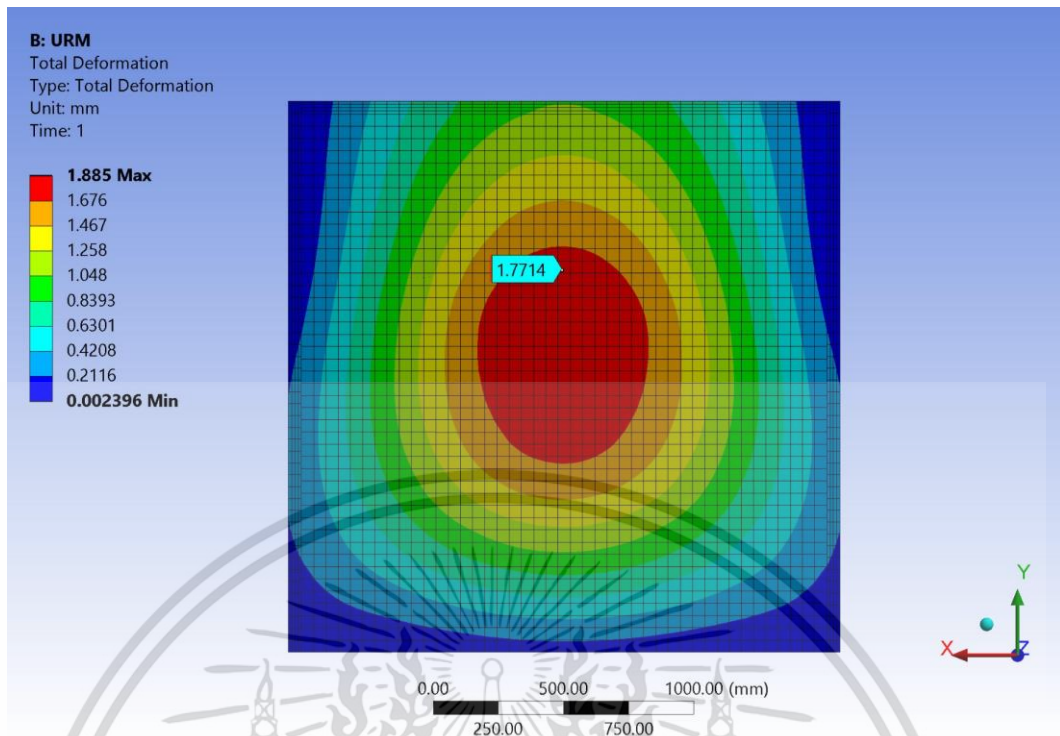


รูปที่ 3.11 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.787 มม. (แบบจำลองที่ 3)

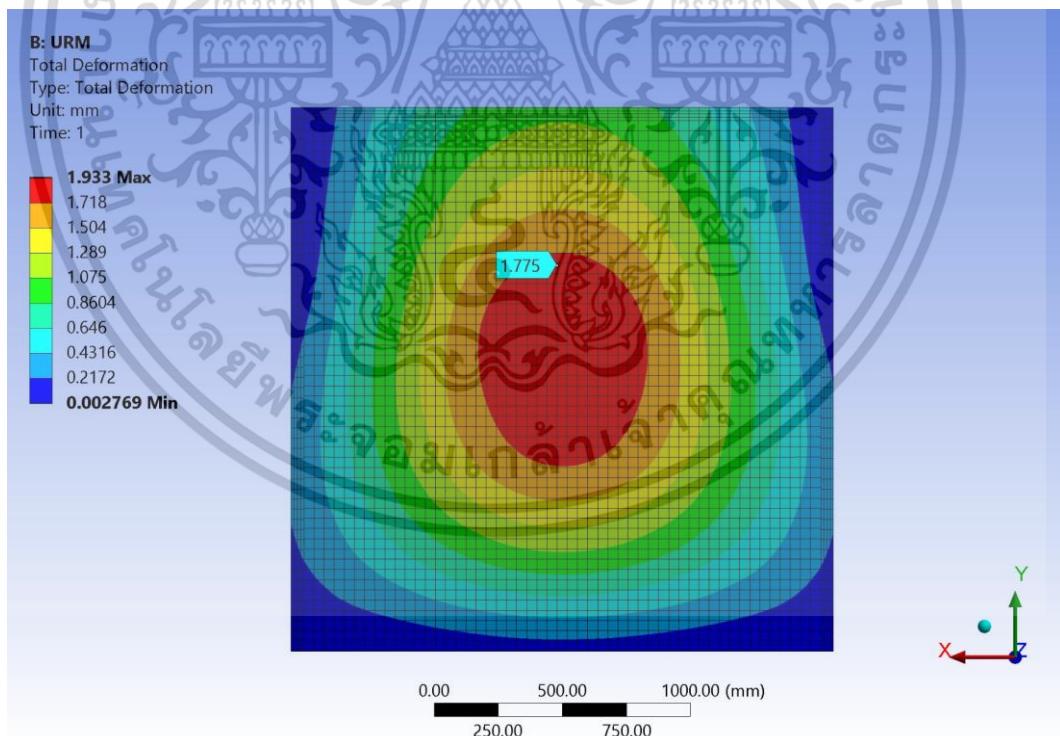


รูปที่ 3.12 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.782 มม. (แบบจำลองที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.771 มม. (แบบจำลองที่ 5)

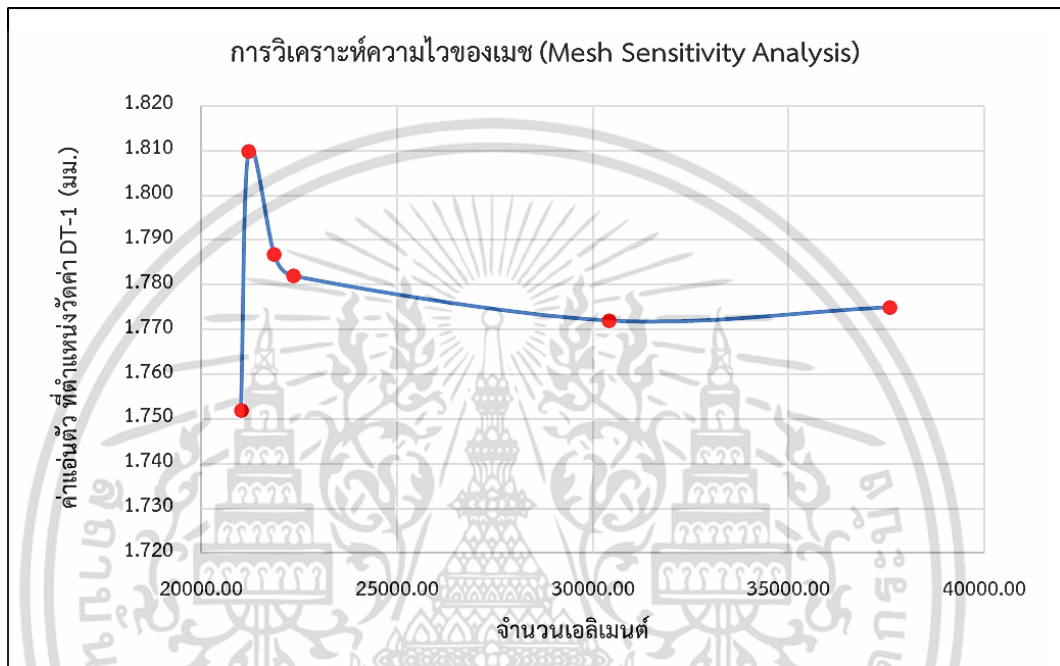


รูปที่ 3.14 ค่าแอนตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 เท่ากับ 1.775 มม. (แบบจำลองที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ความไวของเมช

จากการวิเคราะห์ผลของทั้ง 6 แบบจำลองที่มีขนาดและจำนวนเอลิเมนต์แตกต่างกัน พบว่าในแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 เส้นกราฟค่าแอนตัวมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ แต่ในแบบจำลองที่ 4 ถึง 6 กราฟค่าแอนตัวเริ่มมีแนวโน้มคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองที่ 4 ที่มีขนาดเอลิเมนต์ 50 มม. ในการนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

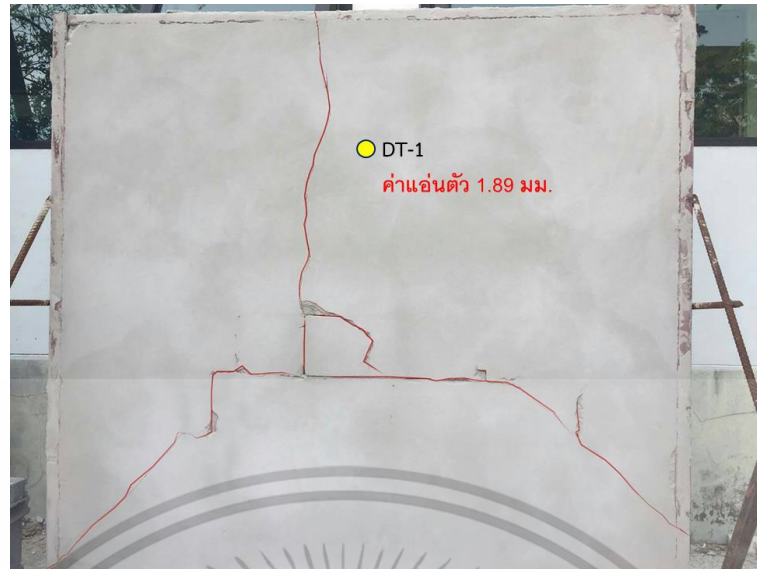


รูปที่ 3.15 กราฟแสดงค่าแอนตัวเทียบกับขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

3.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเทียบกับผลของแบบจำลอง

ผลการทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

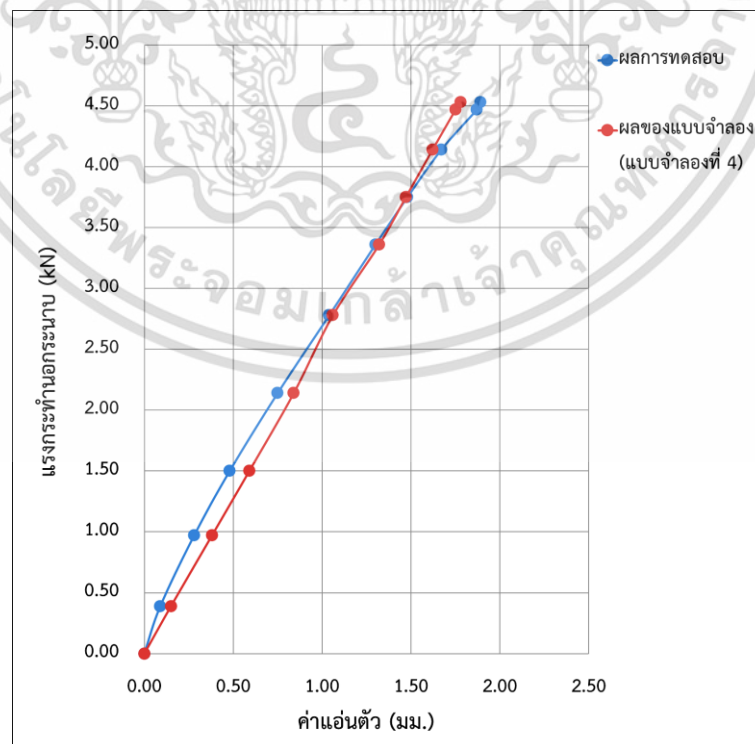
จากการทดสอบพบว่าในช่วงที่ผนังก่ออิฐมวลเบาสามารถรับแรงกระทำได้ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าว มีค่าแรงกระทำเท่ากับ 4.53 kN ซึ่งบริเวณที่เกิดการแอนตัวสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Elastic) สามารถวัดค่าแอนตัวที่ตำแหน่งวัดค่า DT-1 ได้เท่ากับ 1.89 มม. ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะการแตกร้าวและค่าแอนตัวของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

การเปรียบเทียบผลและการพิจารณาตรวจสอบ

ผลของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (แบบจำลองที่ 4) พบว่าค่าแอนตัวสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Elastic) ที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 มีค่าเท่ากับ 1.78 มม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบคือ 1.89 มม. โดยผลการเปรียบเทียบสามารถแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าแอนตัว ดังรูปที่ 3.17

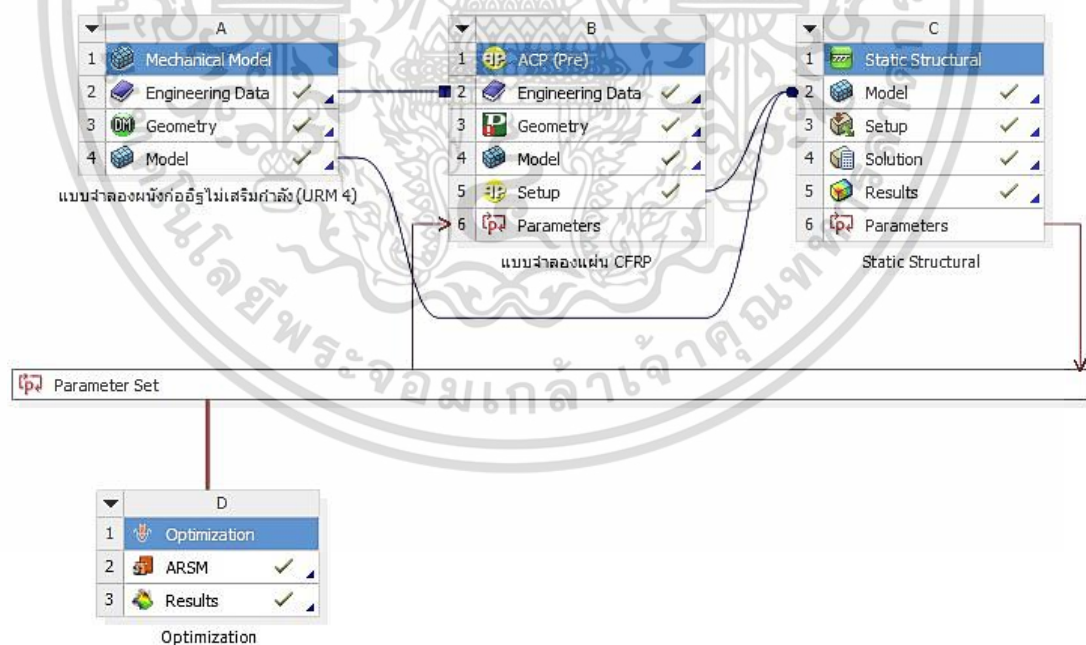


รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบ (ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่าผลของแบบจำลองกับผลจากการทดสอบค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นพิจารณาได้ว่าแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองดังกล่าว (แบบจำลองที่ 4) สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกันได้

3.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

จากบทความวิจัยเรื่องการศึกษาลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังกออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากแบบจำลองพบว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) บริเวณด้านที่รับแรงดึงของผนัง มีส่วนช่วยในการลดการแอ่นตัว และเพิ่มกำลังรับแรงให้กับผนังกออิฐมวลเบาได้ดีขึ้น แต่ผลที่ได้ยังไม่ได้ระบุชัดเจนว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังกล่าวมีรูปแบบและทิศทางเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุด โดยขั้นตอนต่อไปจะสร้างแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Ansys Composite PrepPost (ACP) ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์รูปแบบและทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองสามารถแสดง Project Schematic ได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 Project Schematic สำหรับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ รวมถึงการวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization

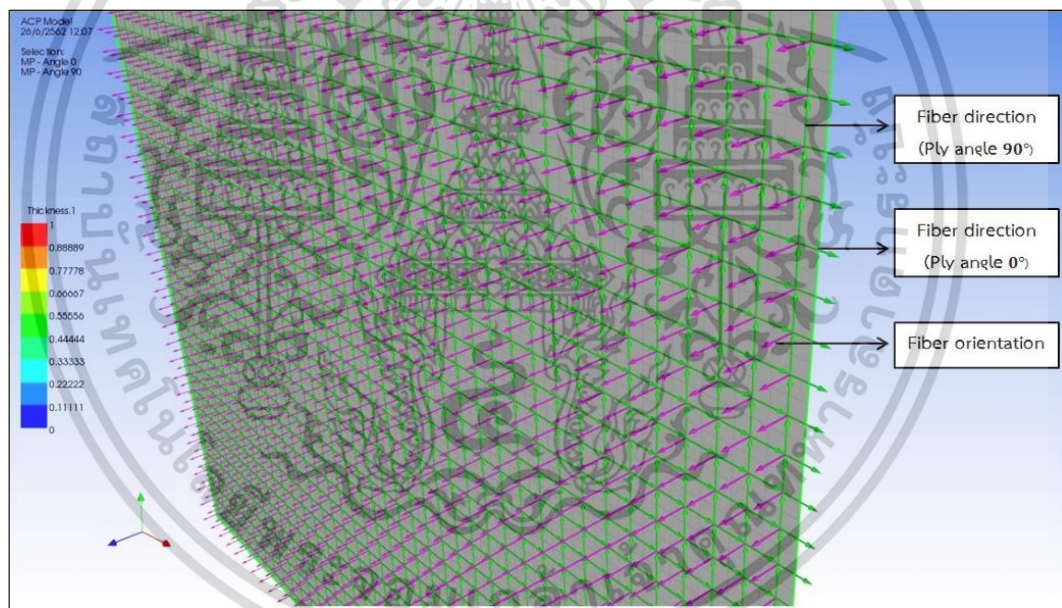
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 แบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

การสร้างแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี Ansys Composite PrepPost (ACP)

การสร้างแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยวิธี ACP เป็นวิธีการที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยหลายองค์ประกอบหรือหลายชั้น (layered) โดยมีคุณลักษณะที่โดดเด่น คือสามารถกำหนดทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Fiber Direction) และสามารถกำหนดคุณลักษณะพารามิเตอร์ของแต่ละชั้นที่เรียงซ้อนกันได้ โดยจาก Project Schematic ในรูปที่ 3.18 การสร้างแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะอยู่ส่วนของ Work flow ของ ACP Pre (B)

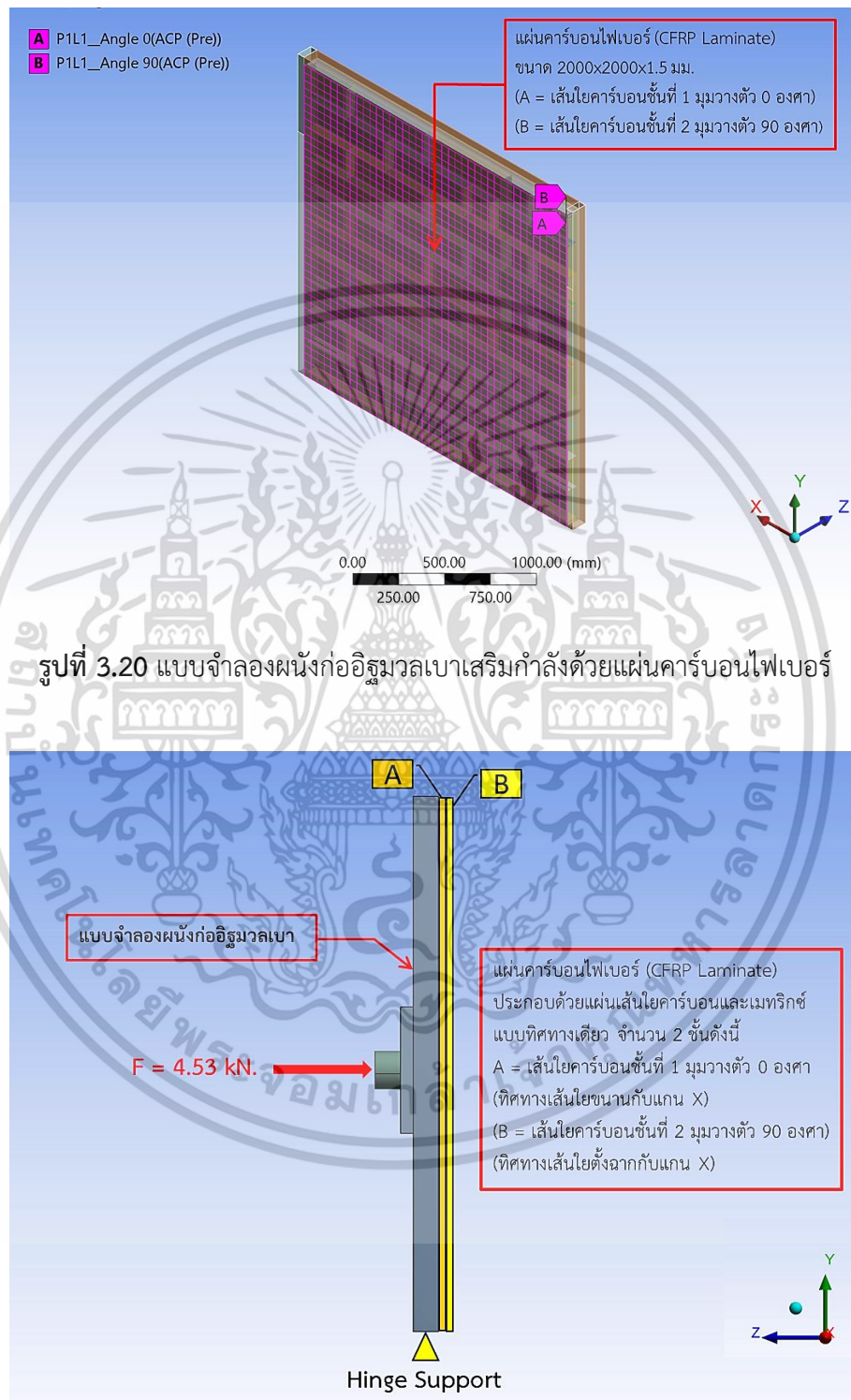
ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้แบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเมทริกซ์แบบทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon/Epoxy Lamina) จำนวน 2 ชั้นวางเรียงซ้อนกัน แต่ละชั้นมีความหนา 0.75 มม. โดยมุมการวางตัวของเส้นใย (Ply Angle) ในชั้นแรกและชั้นที่ 2 มีมุม 0° และ 90° ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ทั้งนี้แบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะมีขนาด $2000 \times 2000 \times 1.5$ มม.



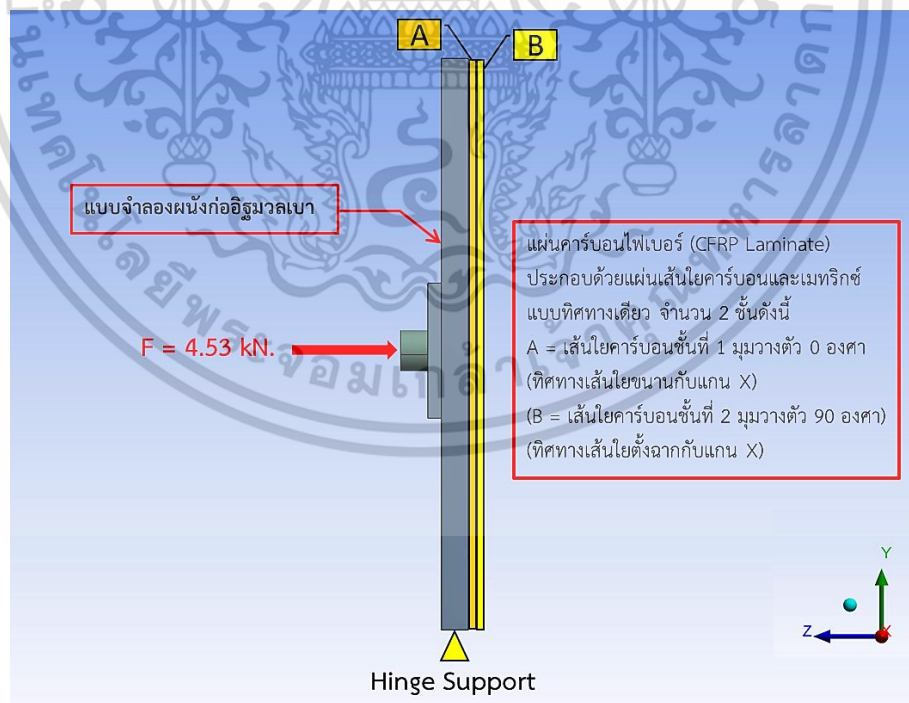
รูปที่ 3.19 ทิศทางและมุมการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

แบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะถูกจำลองขึ้นเป็น Layered Solid Element โดยใช้พื้นฐานมาจากแบบจำลอง Composite Shell Model และเมื่อแบบจำลองมีการกำหนดคุณสมบัติของพารามิเตอร์แล้วเสร็จ แบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะถูกประกอบรวม (merge) กับแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเพื่อเสริมกำลังบริเวณผิวด้านรับแรงดึงของผนัง (ด้านหลังของผนัง) ซึ่งผิวสัมผัสระหว่างวัสดุจะถูกเชื่อมยึดติดกันแบบ Bonded โดยสมบูรณ์ และการ Meshing ของแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะใช้ขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 50 มม. โดยแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวจะอยู่ส่วน Work flow การวิเคราะห์ Static Structural (C) ตาม Project Schematic ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.20 แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 3.21 รูปตัดของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเมทริกซ์แบบทิศทางเดียวที่ใช้สร้างแบบจำลองแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP aminate) ได้กำหนดให้มีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันในระนาบหนึ่ง และจะมีคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบนั้น (transversely isotropic material) โดยค่าคุณสมบัติที่นำมาใช้ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus, G) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio, ν) และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (Density, ρ) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเมทริกซ์แบบทิศทางเดียว

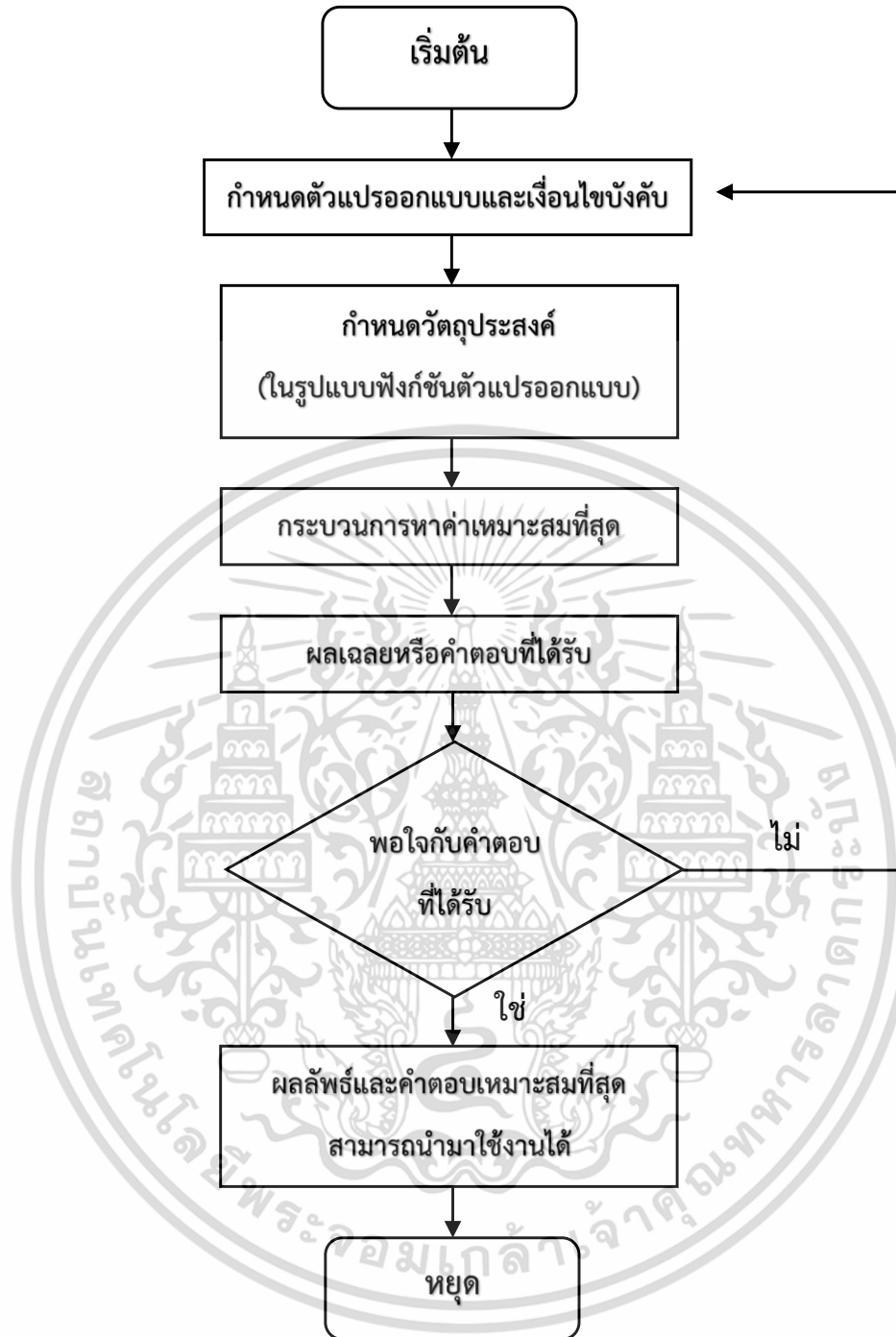
วัสดุ	E (GPa)	G (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Unidirectional Carbon/Epoxy Lamina	$E_x = 209$ $E_y = 9.45$ $E_z = 9.45$	$G_{xy} = 5.5$ $G_{yz} = 3.9$ $G_{xz} = 5.5$	$\nu_{xy} = 0.27$ $\nu_{yz} = 0.40$ $\nu_{xz} = 0.27$	1540

แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่สร้างขึ้นจะถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench (Static Structural) ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตและการให้แรงกระทำเช่นเดียวกันกับแบบจำลองในหัวข้อที่ 3.1.2 ซึ่งผลแบบจำลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับวิธีการ Optimization เพื่อหาทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลัง เพื่อให้ได้ผนังกออิฐที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าวของผนังและทำให้การแอ่นตัวมีค่าน้อยที่สุด

3.3 การวิเคราะห์หาทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด

3.3.1 หลักการหรือขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนในการดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เริ่มจากการพิจารณาและทำความเข้าใจปัญหาหรือระบบที่ให้ความสน เพื่อให้สามารถกำหนดวัตถุประสงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการ ซึ่งถือเป็นการตั้งโจทย์ปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ขั้นตอนแรกเมื่อได้โจทย์ปัญหาแล้ว จะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรออกแบบ และเงื่อนไขบังคับ หลังจากนั้นจะกำหนดรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อไป โดยแผนผังการดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนผังลำดับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหา
(ที่มา : ชวนพิศ มังคละ, 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กระบวนการหาทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด

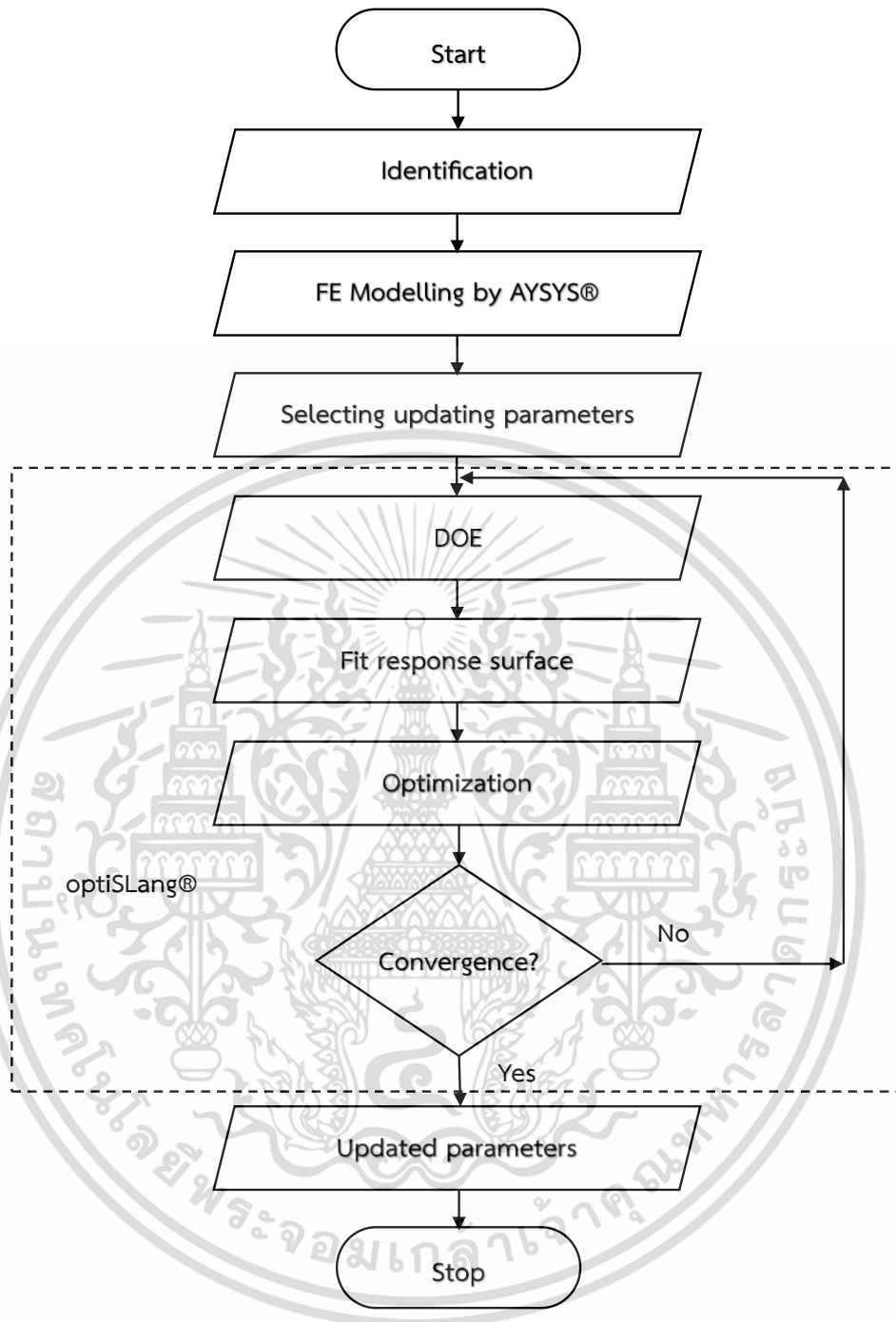
ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่กำหนด โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัย (Objective Function) คือ การทำให้ค่าแอนตัวของผนังกออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อยที่สุด (Minimize The Total Deformation) โดยตัวแปรออกแบบ (Design Variable) คือ ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้น และเงื่อนไขบังคับจะอยู่ในรูปสมการของมุมเส้นใยคาร์บอน (Inequality Constraints) ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการออกแบบเพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)	ตัวแปรออกแบบ (Design Variables)	มุม(องศา) Ply Angle	เงื่อนไขบังคับ (A range of angle)
Minimize The Total Deformation $y = f(x)$	ทิศทางเส้นใยคาร์บอนชั้นที่ 1 (x_1)	0°	$0^\circ \leq x_1 \leq 90^\circ$
	ทิศทางเส้นใยคาร์บอนชั้นที่ 2 (x_2)	90°	$90^\circ \leq x_2 \leq 180^\circ$

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ได้ใช้โปรแกรม Ansys OptiSLang ในการวิเคราะห์ตัวแปรนำเข้าหรือตัวแปรออกแบบ (Input or Design Variables) ของกระบวนการที่สนใจเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขบังคับที่กำหนด โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (ค่าแอนตัว) และตัวแปรออกแบบที่จะถูกนำไปเขียนในรูปของกราฟพื้นผิว 3 มิติ โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และการวิเคราะห์ข้อมูลผลตอบสนอง (Response) ของปัญหาหรือที่เรียกว่า วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยวิธีการดังกล่าวจะนำไปสู่การหาทิศทางวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่ทำให้ค่าแอนตัวของผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้กระบวนการวิเคราะห์ของโปรแกรมสามารถดูได้จาก Project Schematic ในรูปที่ 3.18 โดยจะอยู่ในส่วน Work Flow การทำงานของพารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งเป็นการกำหนดตัวแปรนำเข้าจาก ACP Pre (B) และตัวแปรผลลัพธ์จาก Static Structural (C) ที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ในการกระบวนการ Optimization ของ Ansys OptiSLang และเพื่อให้เข้าใจในกระบวนการทำงานดังกล่าวได้ดีขึ้น เราสามารถเขียนแผนผังอธิบายได้ตามรูปที่ 3.23 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แผนผังกระบวนการทำงานในการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ Ansys OptiSlang
(ที่มา : Amit Kumar Rathi, Arunasis Chakraborty. 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

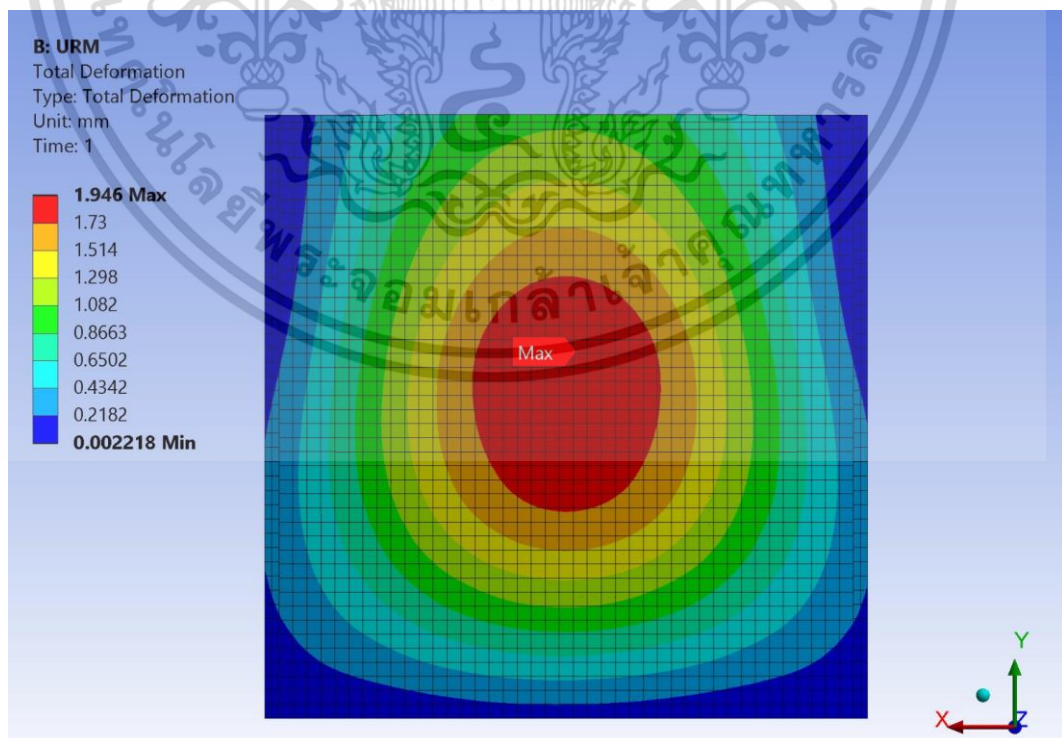
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ผลวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ผลวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Before Optimization) ผลวิเคราะห์ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้โปรแกรม Ansys OptiSlang และผลวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (After Optimization)

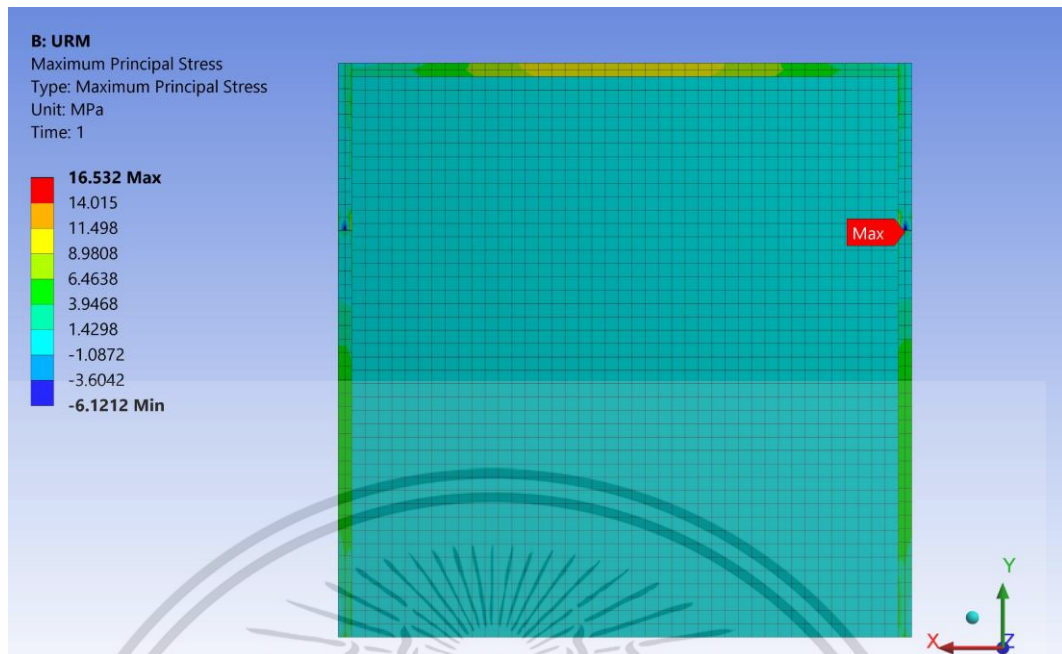
4.1 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ

ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมที่ไม่มีการเสริมกำลัง ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบขนาด 4.53 kN พบว่ามีค่าแอ่นตัวสูงสุด (Maximum Total Deformation) เท่ากับ 1.946 มม. บริเวณช่วงกึ่งกลางผนัง ดังแสดงในรูป 4.1 และความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principle Stress) มีค่า 16.534 MPa เกิดที่บริเวณบริเวณใกล้จุดรองรับของผนัง ดังแสดงในรูป 4.2 และทิศทางของความเค้นหลัก (Vector Stress) ซึ่งมีลักษณะเป็นความเค้นดึง แสดงได้ดังรูปที่ 4.3

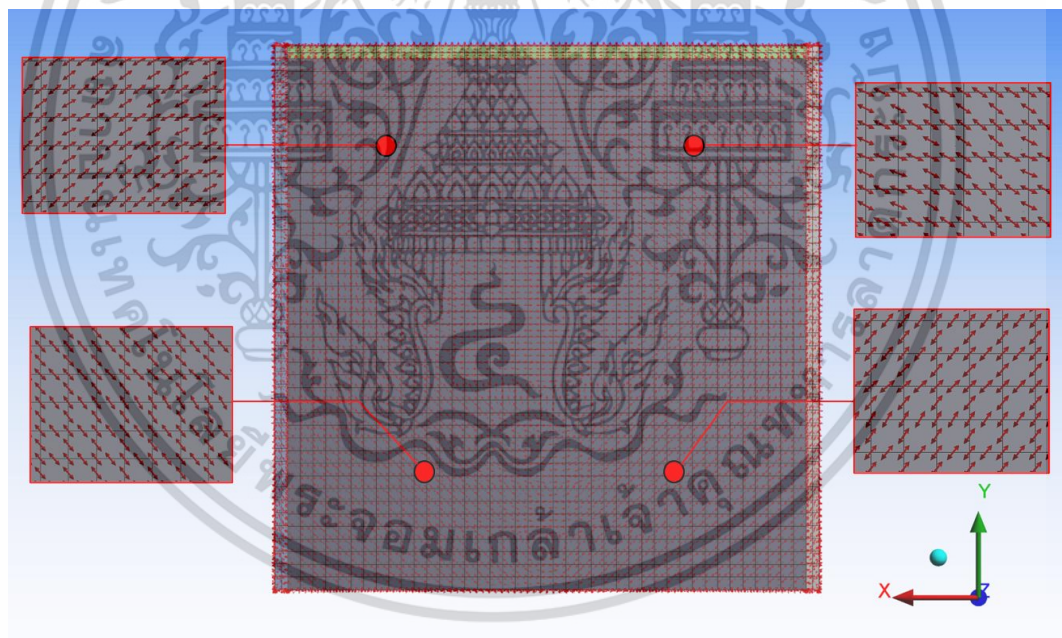


รูปที่ 4.1 ค่าแอ่นตัวสูงสุดของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่ได้เห็นไว้เป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

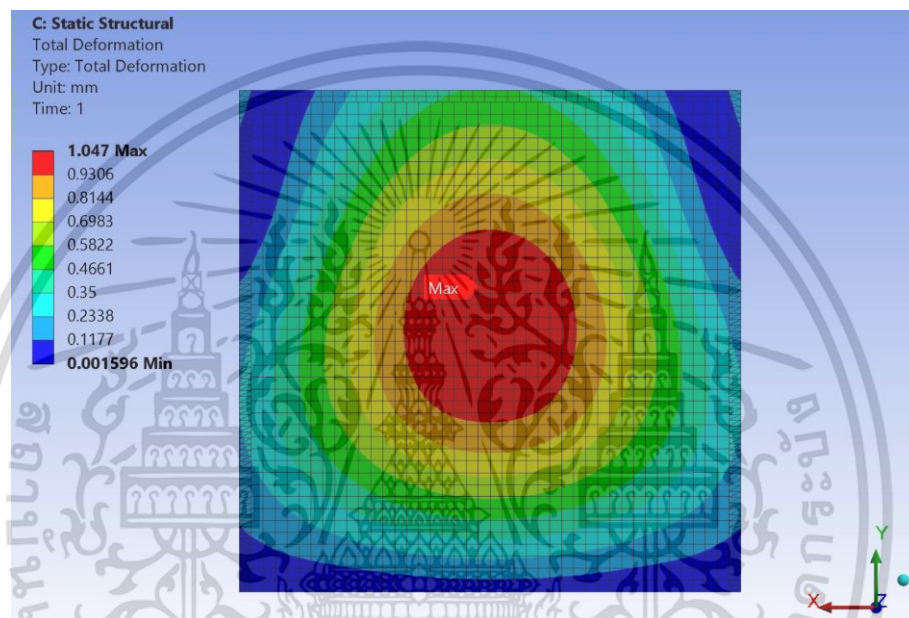


รูปที่ 4.3 ทิศทางความเค้นหลักสูงสุด (Vector Stress) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของผนัง

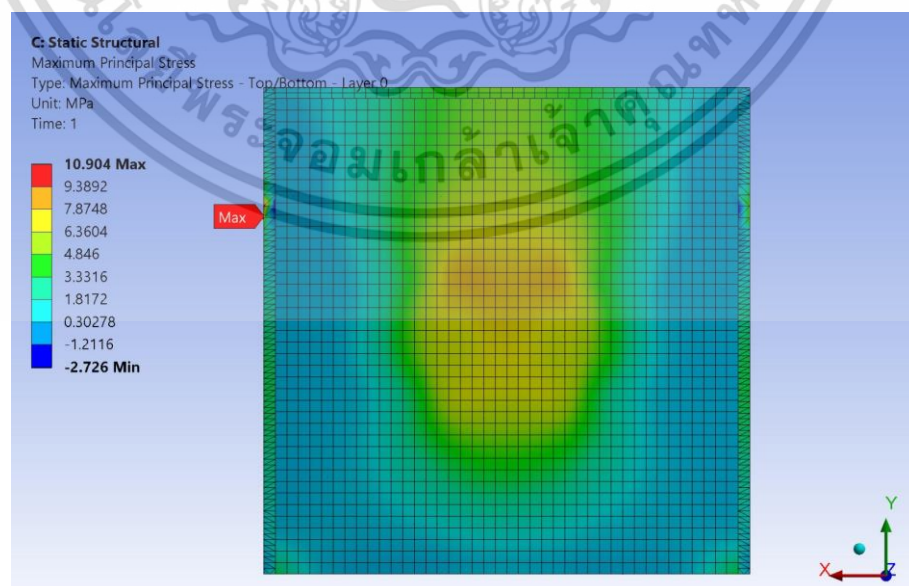
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Before Optimization)

ผลของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบขนาด 4.53 kN พบว่ามีค่าแอ่นตัวสูงสุด (Maximum Total Deformation) เท่ากับ 1.047 มม. บริเวณช่วงกึ่งกลางผนัง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principle Stress) มีค่า 10.904 MPa เกิดที่บริเวณใกล้จุดรองรับของผนัง ดังแสดงในรูป 4.5



รูปที่ 4.4 ค่าแอ่นตัวสูงสุดของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

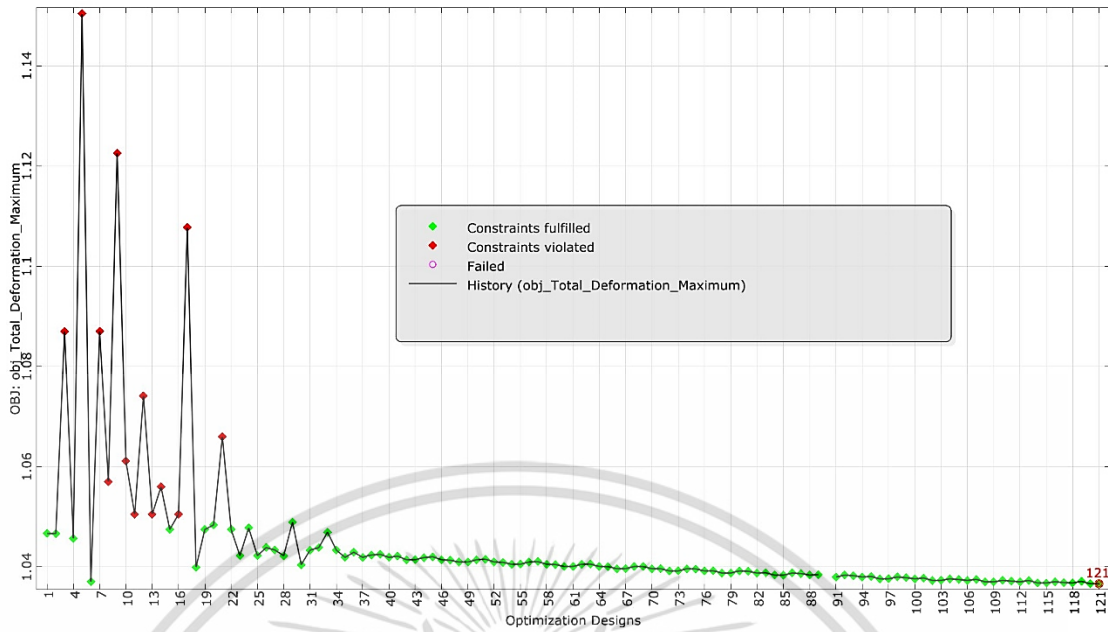
เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของทั้ง 2 แบบจำลอง พบว่าผลวิเคราะห์ของแบบจำลองผนัง ก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีส่วนช่วยในการลดค่าแอนตัวได้ประมาณ 0.899 มม. และลดความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ประมาณ 5.628 MPa ทั้งนี้ผลวิเคราะห์ที่ได้ยังไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเนื่องจากเป็นผลของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีมุมการวางตัวของเส้นใยในชั้นแรกและชั้นที่ 2 คือมุม 0° และ 90° ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของตัวแปร ออกแบบ และจะต้องนำผลที่ได้ไปใช้เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อไปนั้นคือ การทำให้ค่าแอนตัวมีค่าน้อยที่สุด

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] CFRP Laminate (B1)			
4	P1	Angle 0.ply_angle	0	
5	P2	Angle 90.ply_angle	90	
*	New input parameter	New name	New expression	
7	[+] Output Parameters			
8	[+] Static Structural (C1)			
9	P3	Total Deformation Maximum	1.0467	mm
*	New output parameter		New expression	
11	Charts			

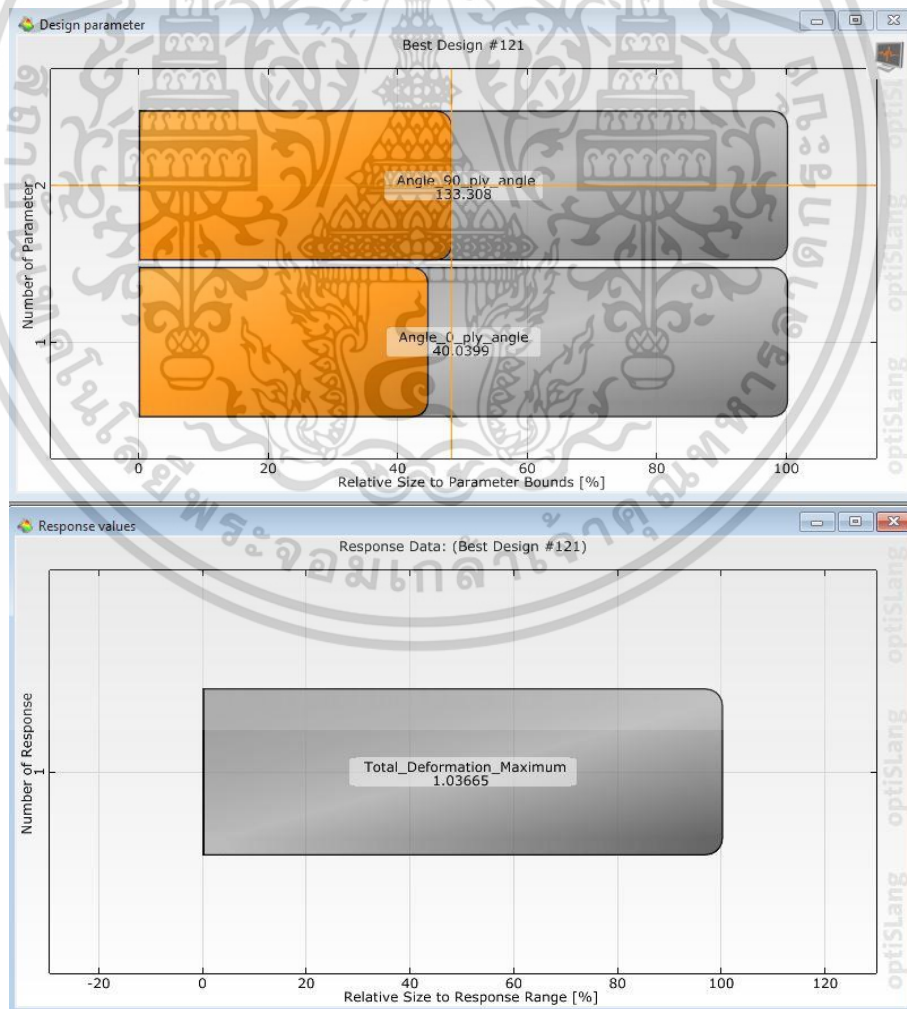
รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ถูกนำไปวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization

4.3 ผลการวิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด

ผลของแบบจำลองในหัวข้อที่ 4.2 ได้นำไปวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization โดยใช้โปรแกรม Ansys OptiSLang เพื่อวิเคราะห์หาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสม และทำให้ค่าแอนตัวสูงสุดมีค่าน้อยที่สุด (Minimize The Maximum Total Deformation) โดยผลวิเคราะห์ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแสดงได้กราฟรูปที่ 4.7 ซึ่งผลการออกแบบแสดงให้เห็นว่าที่ Design point 121 เป็นค่าการออกแบบที่ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.8



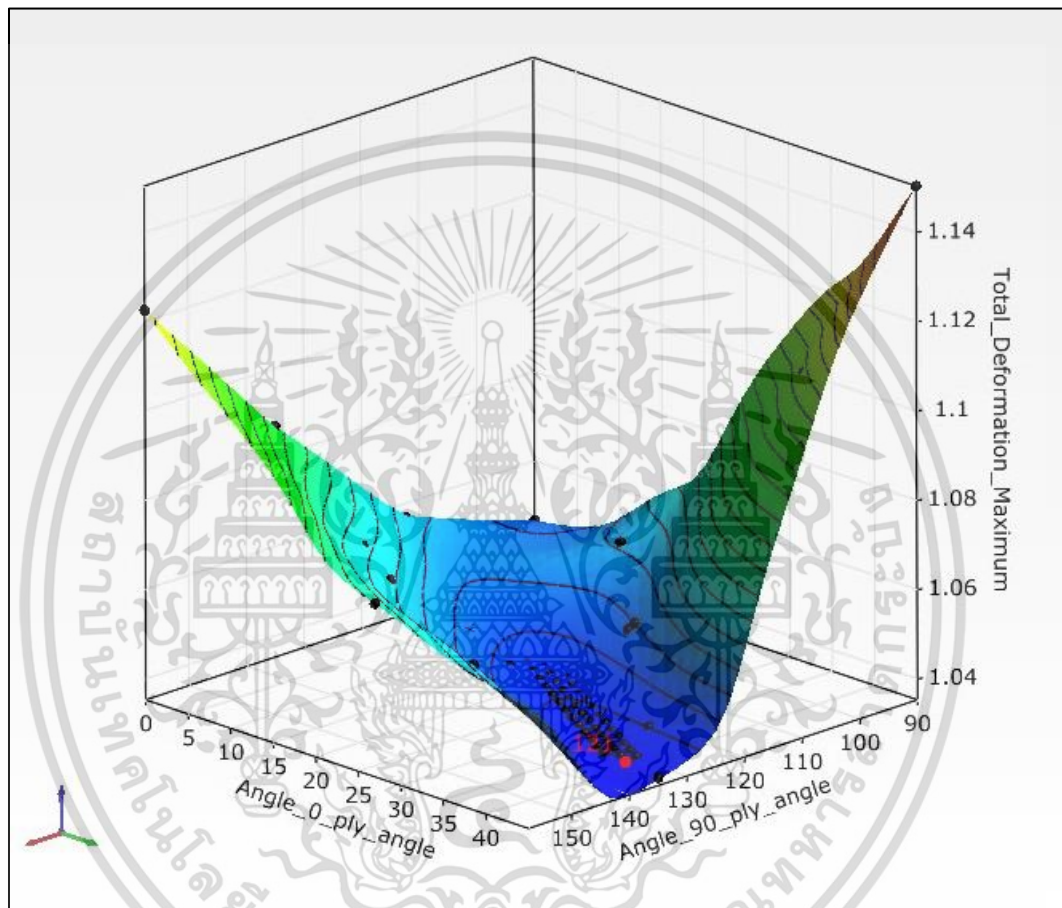
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.8 ผลเฉลยคำตอบที่ดีที่สุดบริเวณจุด Design Point 121

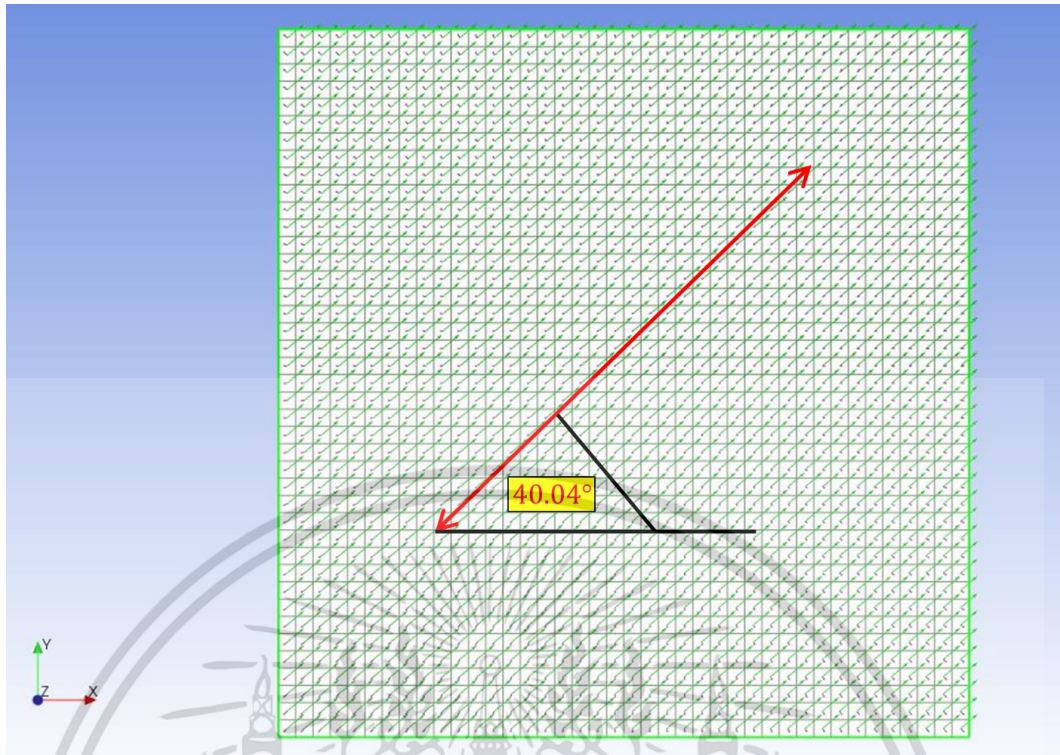
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลตาม Design Point 121 พบว่าเมื่อทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรกและชั้นที่ 2 มีมุม 40.04° และ 133.31° ตามลำดับ จะทำให้ค่าแอนตัวสูงสุดมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.036 มม. และค่าที่ได้จากคำนวณในกราฟรูปที่ 4.7 ยังสามารถนำเขียนแสดงในรูปแบบของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอนตัวสูงสุดเทียบกับทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้น ดังรูปที่ 4.9

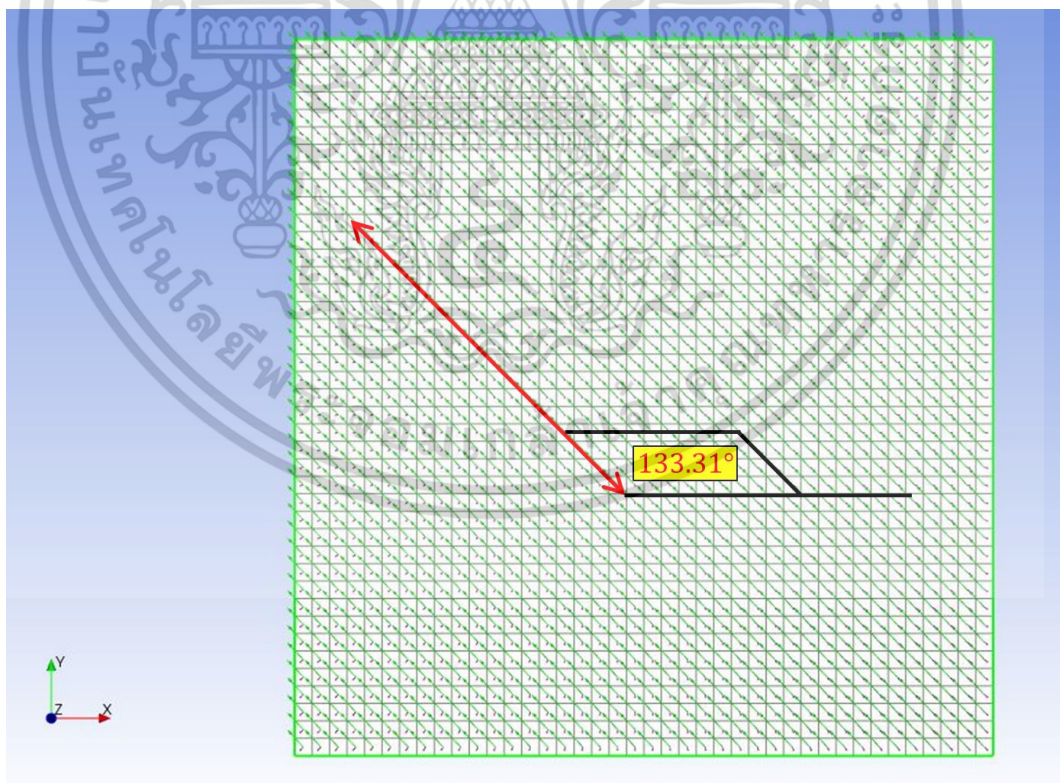


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง (ค่าแอนตัวสูงสุด) กับตัวแปรออกแบบ (ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอน)

โดยรูปแบบทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรก และชั้นที่ 2 ของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มุม 40.04° และ 133.31° ตามลำดับ สามารถแสดงได้ใน Ansys Composite PrepPost (ACP) ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ โดยเส้นลูกศรสีเขียวเป็นเส้นทิศทางของเส้นใยคาร์บอน (Fiber Direction)

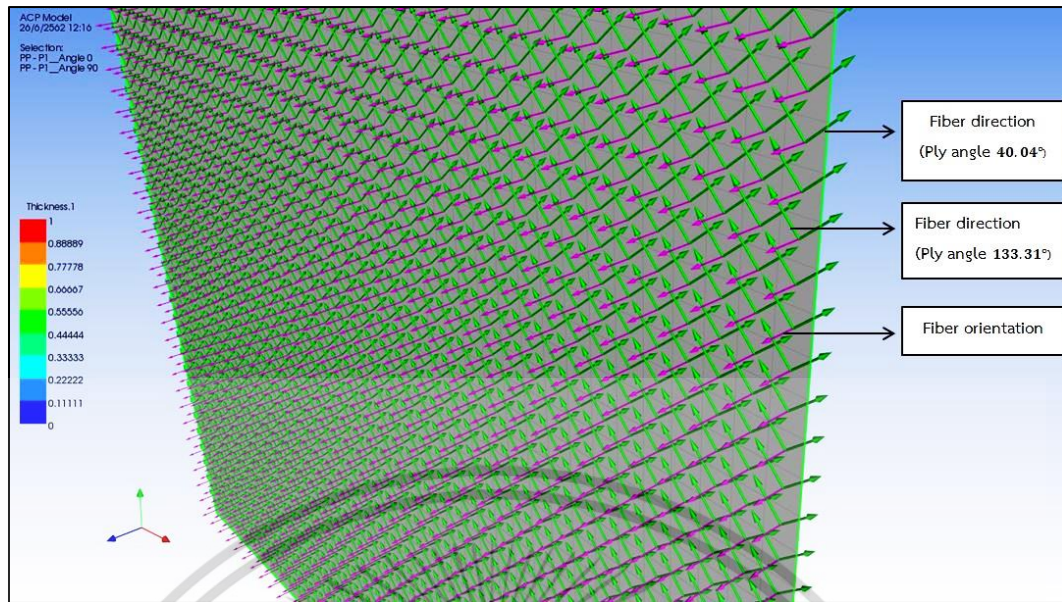


รูปที่ 4.10 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรก (มุม 40.04°)



รูปที่ 4.11 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นที่ 2 (มุม 133.31°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



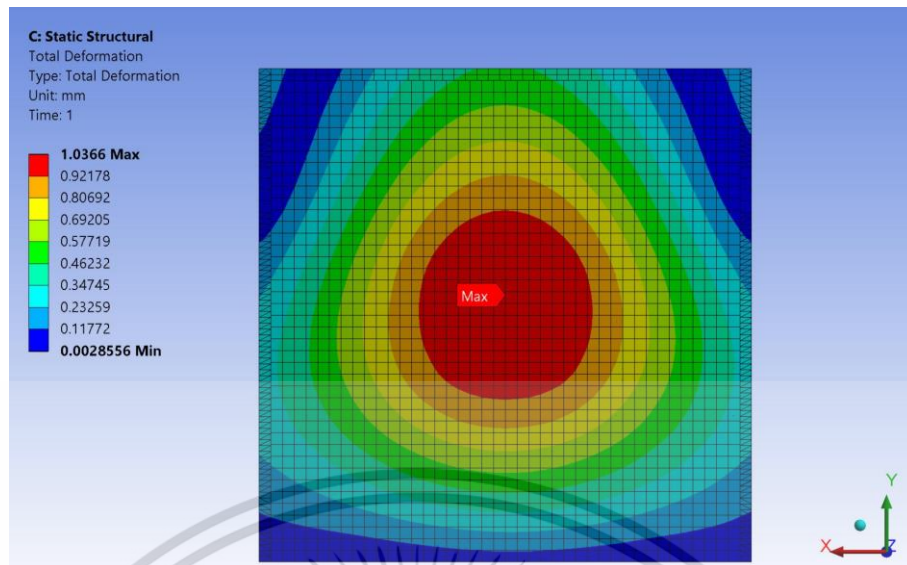
รูปที่ 4.12 ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เนื่องจากแผ่นเสริมกำลังชนิดเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectionally Reinforced Laminate) จะมีคุณสมบัติในการรับแรงดึง โดยกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในทิศทางตามยาวของเส้นใย และเมื่อวิเคราะห์รูปแบบทิศทางของเส้นใยคาร์บอนหลังจากวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization พบว่ามุมหรือทิศทางของเส้นใยที่เรียงตัวของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นมีทิศทางตามยาวที่สอดคล้องกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผนังท่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ซึ่งมีความเป็นความเค้นดึง ดังนั้นพิจารณาได้ว่ารูปแบบและทิศทางเส้นใยคาร์บอนที่ใช้สร้างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อใช้เสริมกำลังผนังท่ออิฐมวลเบาที่มีความเหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดึงเนื่องจากการตัด

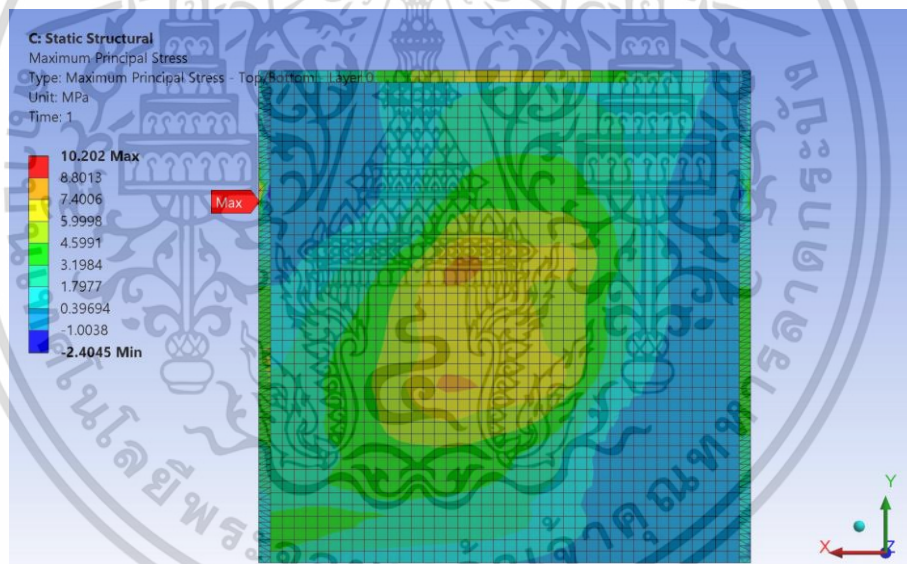
4.4 ผลวิเคราะห์ความเค้นและการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (After Optimization)

การตรวจสอบผลของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ภายหลังจากวิเคราะห์ในกระบวนการ Optimization พบว่ามีค่าแอ่นตัวสูงสุด (Maximum Total Deformation) เท่ากับ 1.036 มม. บริเวณช่วงกึ่งกลางผนัง ดังรูปที่ 4.13 และความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principle Stress) มีค่า 10.202 MPa เกิดที่บริเวณใกล้จุดรองรับของผนัง ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

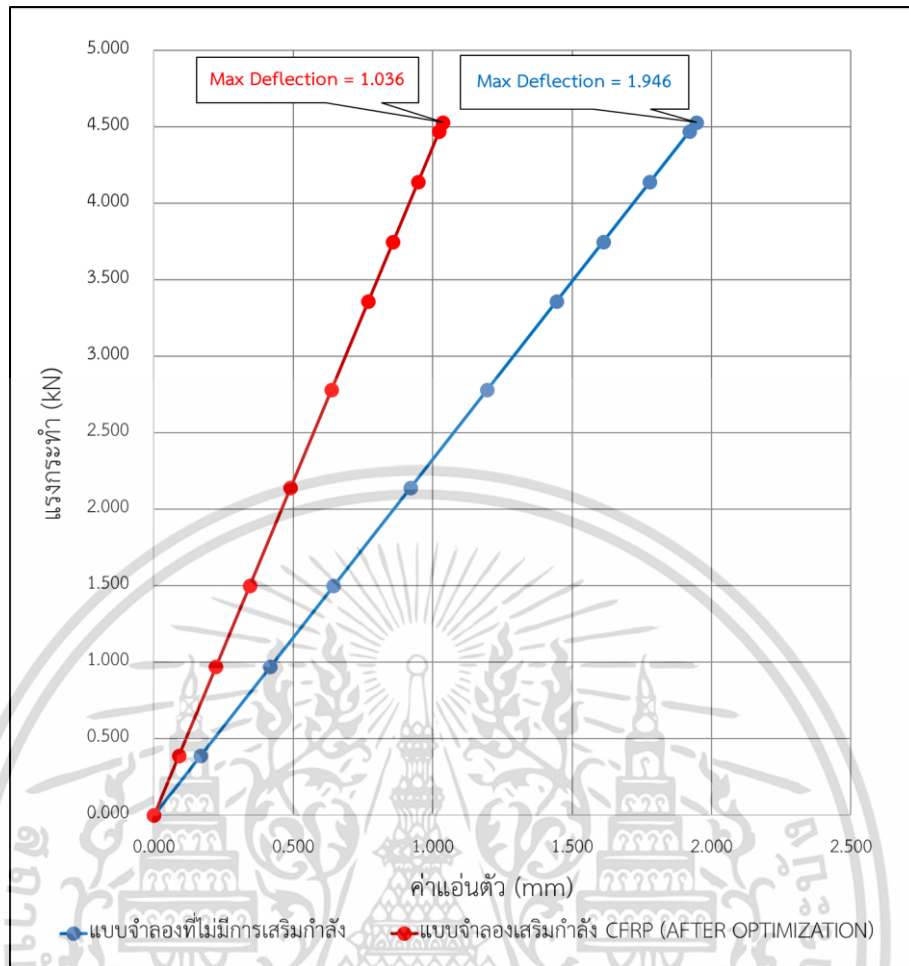


รูปที่ 4.13 ค่าแอนตัวสูงสุดของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (After Optimization)

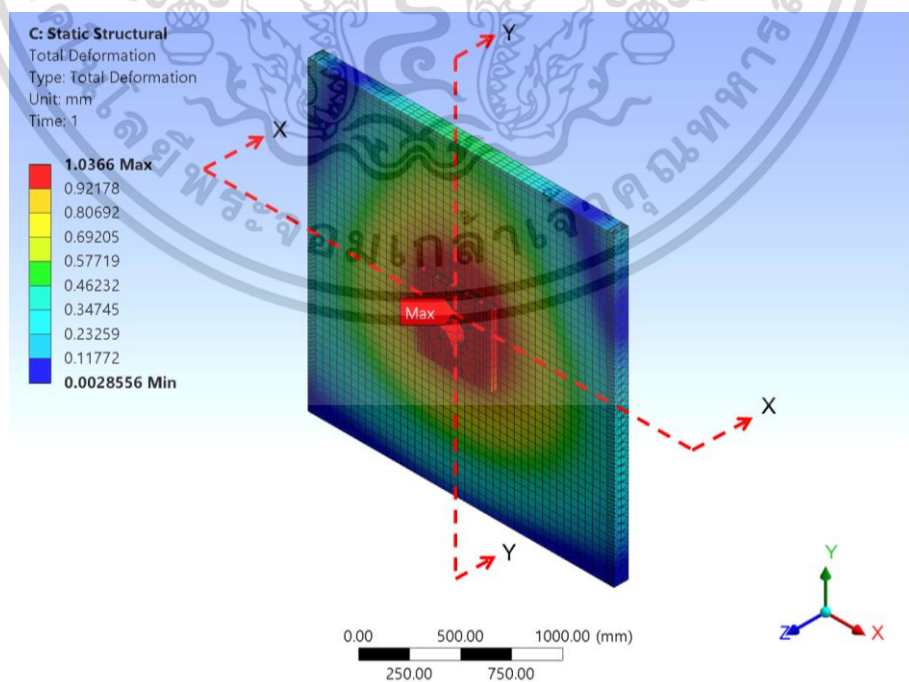


รูปที่ 4.14 ค่าความเค้นสูงสุดของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (After Optimization)

เมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ที่มีค่าแอนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.946 มม. และผลของแบบจำลองผนังท่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่าแอนตัว 1.036 มม. แล้วพบว่าค่าแอนตัวลดลง 0.91 มม. (ค่าแอนตัวลดลง 46.76%) แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.15 และเพื่อให้เห็นลักษณะการแอนตัวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางผนัง (Mid Span) ได้ชัดเจน เราสามารถเขียนรูปตัดแสดงการแอนตัวได้ 2 แนวดังรูปที่ 4.16 ซึ่งประกอบด้วยกราฟเส้นโค้งการแอนตัวทิศทางขนานแกน X ดังรูปที่ 4.17 และกราฟเส้นโค้งการแอนตัวทิศทางขนานแกน Y ดังรูปที่ 4.18 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังกระดานการคำนวณราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

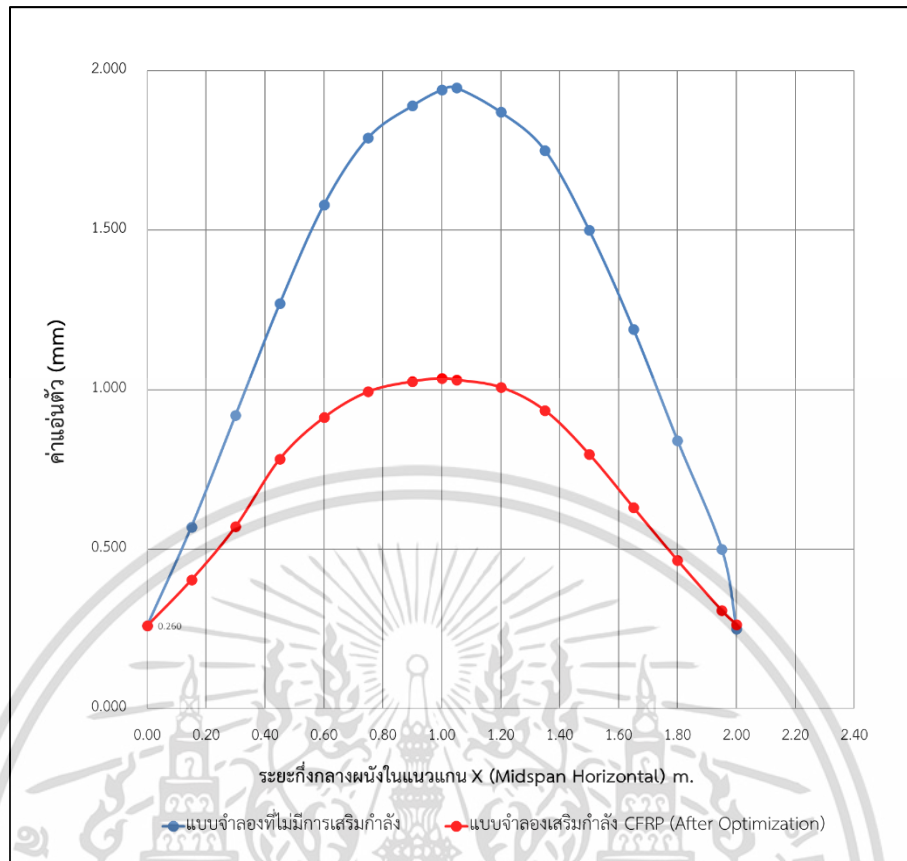


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแอนตัวของแบบจำลอง

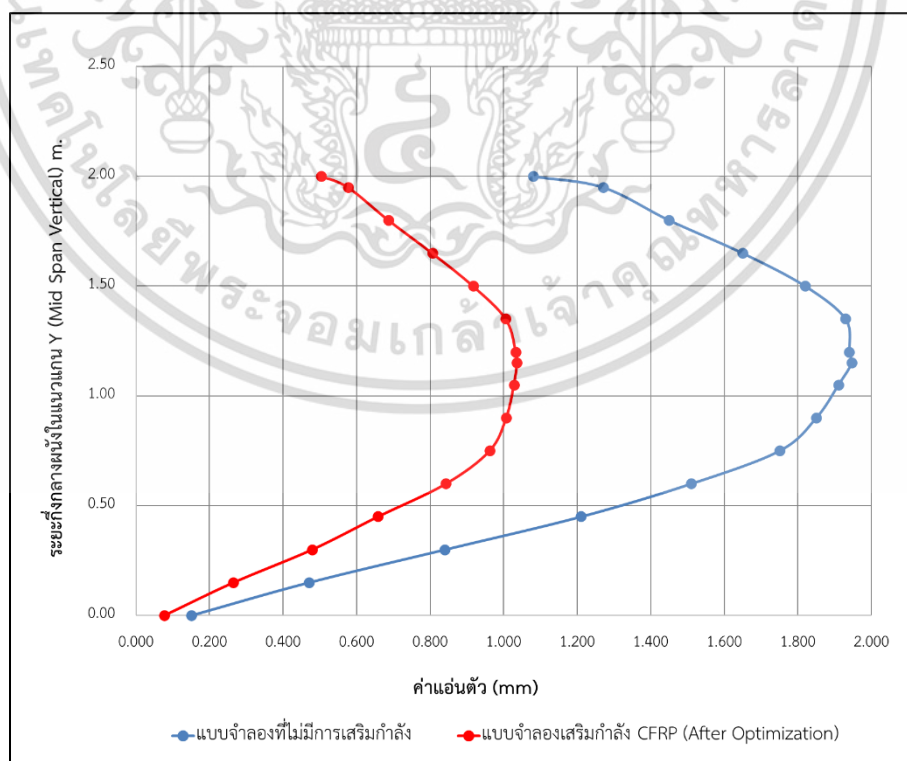


รูปที่ 4.16 แนวรูปตัดที่นำมาพิจารณาเส้นโค้งการแอนตัวบริเวณกึ่งกลางผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารวิจัยในวารสารวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นใบเซอร์วิชาการด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟเส้นโค้งการแฉับตัวบริเวณกึ่งกลางช่วงพ้ง (ตามแนวแกน X)



รูปที่ 4.18 กราฟเส้นโค้งการแฉับตัวบริเวณกึ่งกลางช่วงพ้ง (ตามแนวแกน Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

จากกรณีศึกษาที่เกิดขึ้นของกำแพงที่มีลักษณะต้องรับแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบเนื่องจากดินถมสูง เป็นกรณีศึกษาที่ทำให้ผู้วิจัยตระหนักและเห็นถึงความสำคัญของการเสริมกำลังโครงสร้างผนังที่ทำจากวัสดุก่อ เพราะเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าในความเป็นจริงผนังก่ออิฐไม่เพียงแต่รับน้ำหนักของตัวเองเท่านั้น แต่ยังต้องรับแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐนี้เกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น ดังนั้นการออกแบบหรือการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงให้กับผนังก่อจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาให้สอดคล้องและเหมาะสม เพื่อให้ลดความเสี่ยงและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น งานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นจากการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งผลวิเคราะห์ในเบื้องต้นพบว่าแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) มีส่วนช่วยในการลดการแอ่นตัว และเพิ่มกำลังรับแรงให้กับผนังก่ออิฐมวลเบาได้ดี ผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นพัฒนาต่อยอดแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบและทิศทางการเสริมกำลังที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และหาทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสมโดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ การทำให้ค่าแอ่นตัวของผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อยสุด (Minimize The Total Deformation) คำตอบของปัญหาหรือตัวแปรออกแบบ คือ ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้น และเงื่อนไขบังคับจะอยู่ในรูปสมการของมุมเส้นใยคาร์บอน ลักษณะของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่กล่าวไปข้างต้นเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียวของฟังก์ชันหลายตัวแปรแบบมีเงื่อนไขบังคับ

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ และพิจารณาตรวจสอบให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเมื่อแบบจำลองดังกล่าวมีความสอดคล้องถูกต้องแล้ว แบบจำลองดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาความเค้นและการแอ่นตัว รวมถึงการวิเคราะห์หารูปแบบทิศทางการเสริมกำลังในลำดับต่อไป จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

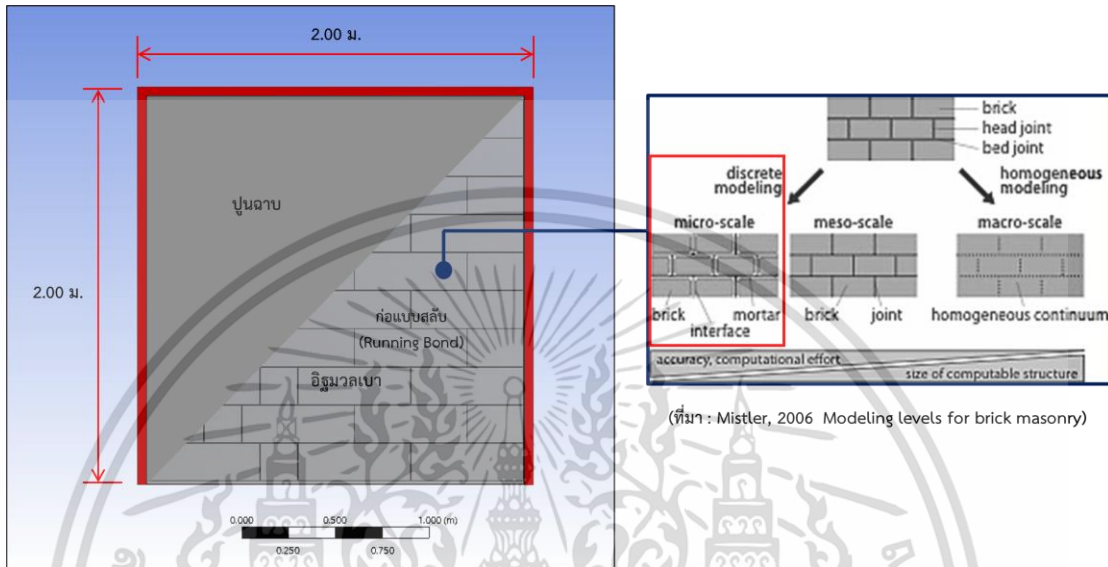
อิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบ และผลการวิเคราะห์ทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนเหมาะสมที่สุด พบว่าที่ Design Point 121 ของการออกแบบเป็นค่าการออกแบบที่ดีที่สุด (Best Design) โดยมีค่าตัวแปรออกแบบหรือทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรกและชั้นที่ 2 ที่มุมการวางตัว 40.04° และ 133.31° ตามลำดับ โดยทำให้ค่าแอนตัวมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.036 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์กับแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังซึ่งมีค่าแอนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.946 มม. พบว่าค่าแอนตัวลดลง 0.91 มม. (ค่าแอนตัวลดลง 46.76%) และเมื่อตรวจสอบค่าความเค้นหลักสูงสุดของแบบจำลองภายหลังกระบวนการ Optimization พบว่ามีค่าเท่ากับ 10.202 MPa ซึ่งเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองที่ไม่มีการเสริมกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.532 MPa พบว่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าลดลง 6.33 MPa. ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมในการรับแรงที่เกิดขึ้นนอกระนาบ เนื่องจากเมื่อผนังก่ออิฐรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นนอกระนาบ บริเวณที่ผิวของผนังอีกด้าน (ด้านหลัง) ของผนังจะเกิดหน่วยแรงดึงหรือความเค้นดึง และเมื่อผิวที่ด้านหลังของผนังมีการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้ดี ย่อมส่งผลทำให้ผนังมีประสิทธิภาพในการรับแรงได้มากขึ้นหรือสามารถต้านทานแรงดึงเนื่องจากการดัดได้มากขึ้น

5.2 อภิปรายผล

เมื่อวิเคราะห์ทิศทางของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้น ภายหลังจากกระบวนการ Optimization พบว่ามุมหรือทิศทางของเส้นใยที่เรียงตัวของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ มีทิศทางตามยาวที่สอดคล้องกับทิศทางของความเค้นหลักสูงสุด (Vector Maximum Principle Stress) ที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ซึ่งมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile Stress) บริเวณพื้นผิวด้านหลังของผนัง ดังนั้นพิจารณาได้ว่ารูปแบบและทิศทางเส้นใยคาร์บอนที่ใช้สร้างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อเสริมกำลังผนังก่ออิฐมวลเบา มีทิศทางที่เหมาะสม ช่วยลดการแอนตัวของผนัง และเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรง ทั้งนี้มีข้อสังเกตในเรื่องทิศทางของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรก และชั้นที่ 2 ภายหลังจากกระบวนการ Optimization โดยเมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างมุมหรือทิศทางของเส้นใย พบว่ามีค่าเท่ากับ 93.27° ซึ่งผลต่างระหว่างทิศทางไม่ทำมุม 90° เท่ากับค่าตัวแปรออกแบบเริ่มต้นสามารถอธิบายได้ว่าในกระบวนการ Optimization ทิศทางของเส้นใยในแต่ละชั้นไม่ได้ถูกจำกัดหรือมีเงื่อนไขบังคับให้ทำมุมต่อกัน 90° โดยสามารถหมุนได้อิสระต่อกันภายใต้เงื่อนไขบังคับในแต่ละชั้นเท่านั้น ดังนั้น Design of Experiment ในกระบวนการ Optimization จะพยายามออกแบบและวิเคราะห์ทิศทางการวางตัวของเส้นใยที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และทิศทางความเค้นดึงสูงสุด (Vector Maximum Principle Stress)

เมื่อพิจารณาในส่วนของทิศทางความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น พบว่ามีลักษณะไม่สมมาตรระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ซึ่งเป็นผลจากรูปแบบการรองรับของโครงเฟรมเหล็ก โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กบริเวณทั้ง 2 ข้างของผนังถูกจำลองให้มีการยึดรับแบบ Hinge Support ส่วนเฟรมเหล็กด้านบน
ไม่มีการยึดรับ ทำให้บริเวณขอบบนมีการแอ่นตัว อีกทั้งแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบามีการจำลองให้
ก้อนอิฐ และปูนก่อแยกส่วนออกจากกัน (Discrete Modeling) รูปแบบการก่อมีลักษณะแบบสลับ
(Running Bond) ดังแสดงในรูปที่ 5



(ที่มา: Mistler, 2006 Modeling levels for brick masonry)

รูปที่ 5 แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีลักษณะการก่อเป็นแบบ Running Bond
และการจำลองเป็นแบบ Discrete Modeling

ปัจจัยที่กล่าวไปข้างต้นอาจเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่อธิบายเพิ่มเติมได้ว่า ผลต่างระหว่างทิศทาง
ของเส้นใยคาร์บอนในชั้นแรกและชั้นที่ 2 ไม่ทำมุม 90° ต่อกัน หลังกระบวนการ Optimization
เป็นเพราะทิศทางของเส้นใยคาร์บอนในแต่ละชั้นพยายามปรับมุมหรือเฉลี่ยทิศทางให้เหมาะสมและ
สอดคล้องกับทิศทางความเค้นดึงที่ไม่สมมาตร ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของผลต่างระหว่างมุมหรือ
ทิศทางที่เกิดขึ้นไม่มีนัยสำคัญต่อผลการออกแบบแต่อย่างใด

5.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

ผลการวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการเสริมกำลังเพื่อให้ได้
ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าว และเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้การรับ
แรงกระทำนอกระบบ รวมถึงเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขผนังก่อหรือกำแพงที่มีอยู่เดิม
ให้มีความสามารถในการรับแรงมากขึ้น (Retrofit Existing Wall) ทั้งนี้หากผู้วิจัยท่านอื่นที่กำลังศึกษา
หรือให้ความสนใจในการต่อยอด แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
ภายใต้การรับแรงกระทำในรูปแบบอื่นหรือภายใต้การรับแรงกระทำนอกระบบ แต่พิจารณาขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผนังที่ไม่สมมาตร (ความยาวและความสูงไม่เท่ากัน) ทิศทางการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อาจมีความแตกต่างกัน เนื่องจากแนวความเค้นดึง (Vector Tensile Stress) ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกรณี ผู้วิจัยต้องพิจารณาออกแบบ และวิเคราะห์แบบจำลองในการเสริมกำลังให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของโครงสร้าง รวมทั้งต้องคำนึงถึงเรื่องระดับของการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐ (Modeling Levels) ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ระดับ คือ แบบจำลองระดับจุลภาค (Micro-Scale) แบบจำลองระดับกลาง (Meso-Scale) และแบบจำลองระดับมหภาค (Macro Scale) โดยระดับของการสร้างแบบจำลองมีความซับซ้อน และข้อควรพิจารณาที่แตกต่างกัน เช่น การสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองเป็น Discrete Modeling ซึ่งจำลองให้ก้อนอิฐ และปูนก่อ แยกส่วนออกจากกันในระดับ Micro-Scale โดยมีข้อควรพิจารณาคือการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลอง (Meshing) ต้องแบ่งเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กละเอียด (Fine Mesh) เนื่องจากแต่ละชิ้นส่วนในการจำลองไม่ได้ถูกวิเคราะห์เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์การในการประมวลผล และการคำนวณ หากผู้วิจัยแบ่งเอลิเมนต์ไม่ละเอียดเพียงพอ ย่อมส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ ดังนั้นผู้วิจัยที่กำลังให้ความสนใจในการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐ ควรศึกษาและพิจารณาข้อจำกัด โดยเลือกใช้ระดับของแบบจำลองให้เหมาะสมกับงานวิจัยของตนเอง และควรมีการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานจริง (Specimen) เปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันผลความถูกต้องและความสอดคล้องต่อไป

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในส่วนของราคาต้นทุนในการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อเสริมกำลัง เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีราคาค่อนข้างสูง อ้างอิงฐานข้อมูลจาก 2 เว็บไซต์ที่มีการจำหน่ายแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

1. <http://www.brpcarbon.com/index.php>
2. <https://alphacomposition.com/>

จากข้อมูลราคาแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อพิจารณาแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีขนาด 400x500 มม. ความหนา 1.5 มม. พบว่ามีราคา/แผ่น เท่ากับ 2,800 บาท ซึ่งเทียบเท่ากับ 14,000 บาท/ตร.ม. ราคาที่ค่อนข้างสูงนี้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต่อไปผู้วิจัยต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในการนำแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาใช้ในการเสริมกำลัง ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวการเสริมกำลังที่พิจารณาเรื่องของทิศทางการวางตัวของเส้นใยคาร์บอนที่เหมาะสม ทางผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยท่านอื่นที่มีความสนใจในเรื่องเดียวกันนี้ และสามารถพัฒนา ต่อยอดการวิเคราะห์รูปร่างการเสริมกำลังของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้งขนาด ความหนา รวมทั้งตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสม (Topology Optimization) เพื่อให้งานวิจัยมีความสอดคล้องกับราคาต้นทุน และนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริงต่อไป

บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย. 2551 มยพ.1508-51 **มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย**. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- ชวนพิศ มังคละ. 2562. “การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้น สำหรับฟังก์ชันหนึ่งตัวแปรโดยใช้วิธีการค้นแบบสุ่มหลายจุด.” **วารสารวิจัยรำไพพรรณี**. 13(3) : 170-181.
- ดร.หมิง จิ่ง และคณะ. 2553. “พฤติกรรมของผนังอิฐโบราณเสมือนจริงเสริมด้วย FIBER-RIENFORCED POLYMER ภายใต้แรงกระทำทางด้านบน” **โครงการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**.
- ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร และสุจินต์ บุรีรัตน์. 2014. “การหาค่าเหมาะที่สุดสองขั้นตอนแบบหลายเป้าหมายของโครงสร้างแบบแผ่นโดยใช้วิธีเรียนรู้แบบเพิ่มพูนโดยอาศัยกลุ่มประชากร.” **วารสารวิจัย มข**. 19(2) : 233-244.
- นิത്യรดี ดอเลาะ. 2552. “วัสดุมวลเบาที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง.” **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์**. 1(3) : 48-62.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.
- เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ 2561. **EEE 603 Advanced Mathematics for Electrical Engineering**. [Online]. Available : <https://inc.kmutt.ac.th/~yoodyui/courses/EEE603/>
- ปิติ กิตติวิทยารัตน์ และ อัมพน จรัสจรวงเกียรติ. 2561. “การศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน” หน้า 19. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23**. นครนายก : โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.
- รศ.ดร.กิตติศักดิ์ และคณะ. 2553. “การศึกษาจุดเหมาะสมของการซ่อมบำรุงคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต” **โครงการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**
- สุวิตรา หวลระลีก. 2557. “การเปรียบเทียบวิธีประมาณค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยเมื่อเกิดปัญหาหาค่าสัมพันธ์” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร**
- อนุสรณ์ อินทร์งษ์. 2552. **การออกแบบโครงสร้างงานก่อ**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Amit Kumar Rathi and Arunasis Chakraborty. 2014. “Adaptive Response Surface based FE Model Updating for Operational Modal Analysis of RC Road Bridge.” **4th Optimization & Stochastic Days, Bangalore.**
- Andries P. Engelbrecht 2007. **Computational Intelligence: An Introduction.** Second Edition. England : John Wiley & Sons, Ltd.
- Clay Brick and Paver Institute. 1999 **Design of clay masonry for wind and earthquake.** Sydney : Clay Brick and Paver Institute.
- Craig Robert Willis. 2004. “Design of Unreinforced Masonry Walls for Out-of-plane Loading.” Ph.D. Thesis of School of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide.
- Hafeezur, R.A. Sivakumar, P. Balaguru, V. and Rajesh, K.J. 2016. “Design of a Composite Vibration Fixture for Testing Fuel Tank for Combat Vehicle Application.” **International NAFEMS Conference on Engineering Analysis.** Modeling, Simulation, and 3D-Printing (NAFEMS-3D) – 2016.
- Douglas C. Montgomery and George C. Runger. 2002. **Applied statistics and probability for engineers.** 3rd ed. United States of America : John Wiley & Sons, Inc.
- Hamdy A. Taha 2017. **Operations Research An Introduction.** 10th edition. London, England : Pearson Education Limited.
- Hamid, Lotfi and P. Benson Shing. 1994. “Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures.” **Journal of Structural Engineering.** Vol.120 Issue 1 : 68-80.
- lúri Marcelo Pinheiro Figueiredo. 2016. “MECHANICAL BEHAVIOUR PREDICTION AND OPTIMIZATION OF HYBRID COMPOSITE PLATES.” Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Jaroslav Vaculik. 2012. “Unreinforced Masonry Wall Subjected to Out-of-plane Seismic Action.” Doctor of Philosophy, School of Civil, Environmental & Mining Engineering, The University of Adelaide.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Matteo, B. Gabriele, M. and Alberto, T. 2014. "OPTIMAL FIBER REINFORCEMENT OF MASONRY WALLS LOADED OUT-OF-PLANE" **9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions**. Mexico : Mexico city.
- Narayanan, S.P. and Sirajuddin, M. 2013. "Properties of Brick Masonry for FE modeling." **American Journal of Engineering Research (AJER)**. Vol.1 : 6-11.
- Prakash, T.M. Naresh, kumar B.G. and Karisiddappa. 2013. "Strength and elastic properties of aerated concrete block masonry." **International journal of structural and civil engineering research**. Vol.2, No.1 : 63-76.
- Raymond, H.M Douglas, C.M. and christine, M.A. 2016. **Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments**. 4th ed. United States of America : John Wiley & Sons, Inc.
- Sk. Sekender Ali and Adrian W. Page. 1988. "Finite Element Model for Masonry Subjected to Concentrated Loads." **Journal of Structural Engineering**. Vol.114 Issue 8 : 1761 - 1784.
- Xin-She Yang. 2018. **Optimization techniques and applications with examples**. This edition first published. United States of America : John Wiley & Sons, Inc.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๓

Proceeding of the 23rd National Convention on Civil Engineering

NCCE-23



ภายใต้หัวข้อการประชุม

วิศวกรรมโยธายุคใหม่กับการรับใช้สังคม

SMART Civil Engineering and Social Enterprise

18-20 กรกฎาคม 2561

ณ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก

จัดโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์

กองวิชาวิศวกรรมโยธา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารบัญบทความ	หน้า
วิศวกรรมโครงสร้าง (Structural Engineering, STR)	1-53
วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (Construction Material Engineering, MAT)	55-111
วิศวกรรมการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Engineering and Management, CEM)	113-182
วิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering, GTE)	183-240
วิศวกรรมขนส่ง จราจรอัจฉริยะ และโลจิสติกส์ (Intelligent Transportation, Traffic and Logistics Engineering, TRL)	241-302
วิศวกรรมแหล่งน้ำ (Water Resource Engineering, WRE)	303-336
วิศวกรรมสำรวจและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Survey and Geographic Information System Engineering, SGI)	337-356
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Environmental and Energy Engineering, ENV)	357-378
วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Engineering, INF)	379-384
วิศวกรรมโยธาและการศึกษา (Civil Engineering and Education, CEE)	385-392
วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ (Defense Engineering and Technology, STR)	393-398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**STR17
ID171**

A study on out-of-plane behaviors of masonry walls with various forms of reinforcement

Piti Kittivittayarat and Amphon Jarasjarungkiat

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok
*Corresponding author; E-mail address: amphon.ja@kmitl.ac.th

Abstract

In many areas of Thailand, out-of-plane loading of masonry wall construction were rarely recognized for instance water pressure from the flood, lateral earth pressure, etc. These load types may cause severe cracking and failure on the masonry wall. This research studies deflection behavior, deformation and cracking of unreinforced masonry wall under out-of-plane loading by a finite element model. The results from finite element model were compared with those of experiments. When both of them are considered as in a good agreement between each other, then the unreinforced masonry wall model was used as a prototype to simulate masonry wall with various forms of reinforcement. The analysis results with various forms of reinforcement introduced optimal choices for reinforcement to achieve a performance-based masonry wall with decreased cracking and increased factor of safety for the out-of-plane loading under consideration.

Keywords : masonry wall, out-of-plane loading, deformation and cracking, finite element model, reinforcement

การศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน

ปิติ กิตติวิทยารัตน์¹, และ อำพน จรัสจรวงศ์เกียรติ²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: amphon.ja@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในหลายพื้นที่ของประเทศไทยการก่อสร้างผนังก่ออิฐมักไม่คำนึงถึงแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ อาทิ เช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าว การเสียรูปและการแตกร้าวของผนังก่ออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเมื่อพิจารณาตรวจสอบให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แบบจำลองของผนังก่ออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแบบเพื่อสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกันผลจากการวิเคราะห์จะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสมเบื้องต้นในการเสริมกำลังเพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐในการรับแรงกระทำนอกระนาบ

คำสำคัญ : ผนังก่ออิฐ, แรงกระทำนอกระนาบ, การเสียรูปและการแตกร้าว, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, การเสริมกำลัง

การศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกระนาบของผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน A study on out-of-plane behaviors of masonry walls with various forms of reinforcement

ปิติ กิตติวิทยารัตน์¹ และ อำพน จรัสจรวงเกียรติ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: amphon.ja@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในหลายพื้นที่ของประเทศไทยการก่อสร้างผนังก่ออิฐมักไม่คำนึงถึงแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ อาทิเช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัว การเสียรูปและการแตกร้าวของผนังก่ออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกระนาบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเมื่อพิจารณาตรวจสอบให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แบบจำลองของผนังก่ออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแบบเพื่อสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน ผลจากการวิเคราะห์จะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสมเบื้องต้นในการเสริมกำลังเพื่อให้ผนังก่ออิฐที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแตกร้าวและเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐในการรับแรงกระทำนอกระนาบ

คำสำคัญ: ผนังก่ออิฐ, แรงกระทำนอกระนาบ, การเสียรูปและการแตกร้าว, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, การเสริมกำลัง

Abstract

In many areas of Thailand, out-of-plane loading of masonry wall construction were rarely recognized for instance water pressure from the flood, lateral earth pressure, etc. These load types may cause severe cracking and failure on the masonry wall. This research studies deflection behavior, deformation and cracking of unreinforced masonry wall under out-of-plane loading by a finite element model. The results from finite element model were compared with those of experiments. When both of them are considered as in a good agreement between each other, then the unreinforced masonry wall model was used as a prototype to simulate masonry wall with various forms of reinforcement. The

analysis results with various forms of reinforcement introduced optimal choices for reinforcement to achieve a performance-based masonry wall with decreased cracking and increased factor of safety for the out-of-plane loading under consideration.

Keywords: masonry wall, out-of-plane loading, deformation and cracking, finite element model, reinforcement

1. บทนำ

เนื่องจากอาคารที่พักอาศัยส่วนมากจะเป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยปกติแล้วในส่วนของโครงสร้างผนังที่ทำจากวัสดุก่ออิฐจะรับน้ำหนักของตัวเองเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงผนังก่ออิฐยังต้องรับแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นนอกระนาบ อาทิเช่น แรงดันน้ำจากอุทกภัย แรงดันดินด้านข้าง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าวและวิบัติขึ้น

แนวความคิดการศึกษาที่เกี่ยวข้องในเรื่องนี้เป็นที่สนใจของนักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Hamid and Shing (1994) [1] ได้ทำการวิเคราะห์กำแพงอิฐภายใต้แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Load) ในการวิเคราะห์ได้สมมติว่ากำแพงเป็นเนื้อผสมซึ่งประกอบด้วย อิฐ และปูนก่อ โดยอิฐถูกจำลองให้มีพฤติกรรมที่มีการแตกร้าวแบบกระจาย (Smear Crack Modeling) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีต โดยความเสียหายของกำแพงเกิดขึ้นเนื่องจากรอยแตกจากแรงดึง (Tensile Fracture) มากกว่ารอยแตกจากแรงกด (Compressive Fracture) ส่วนปูนก่อถูกจำลองเป็นชั้นส่วนสัมผัส (Interface Element) โดยจะเป็นตัวเชื่อมระหว่างอิฐแต่ละก้อน การที่แบ่งปูนก่อเป็นชั้นสัมผัส เนื่องจากการเสียหายของกำแพงอิฐที่ไม่มีการเสริมเหล็กส่วนใหญ่จะเกิดที่ปูนก่อ ซึ่งจะมีแรงเฉือนเป็นตัวแปรสำคัญ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าสามารถทำนายความสามารถในการรับแรงเฉือนหน้าหนักบรรทุกทุกประลัย รูปแบบความเสียหาย และความเหนียว (Ductility) ของกำแพง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Seismic Resistance) ของกำแพงอิฐ

Clay Brick and Paver Institute (1999) [2] ได้ทำการทดสอบแรงกระทำด้านข้างกับตัวอย่างผนังก่ออิฐที่พิจารณา โดยผนังก่อมีความหนา 11 cm. ความสูง 2.4 m. และความยาว 3.0 m. ซึ่งผนังก่อไม่มีแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำในแนวแกนและไม่มีช่องเปิดตรงส่วนที่ทำการพิจารณา ที่จุดรองรับเป็นการรองรับแบบง่ายและกำลังรับหน่วยแรงดึงแบบดัดจำเพาะ (Characteristic flexural tensile strength, f'_{mt}) มีค่าเท่ากับ 0.2 MPa ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ผนังพาดรับแรงในแนวตั้ง ผนังพาดรับแรงในแนวนอน และผนังพาดรับแรงสองทิศทาง สามารถรับแรงกระทำได้โดยประมาณเท่ากับ 0.34, 0.78, 2.0 kPa ตามลำดับ

Page and Sekender (1989) [3] ได้ทำการวิเคราะห์ก้ำแกงอิฐภายใต้แรงกระทำเฉพาะ ที่คุณสมบัติของอิฐและปูนก่อใช้เป็นแบบไม่ยืดหยุ่น ในการวิเคราะห์ได้แยกอิฐและปูนก่อเป็นคนละชิ้นส่วนแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ได้ใช้แบบรูปสี่เหลี่ยม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบน้ำหนักที่ทำให้เกิดความเสียหายเริ่มต้น น้ำหนักบรรทุกประลัยของก้ำแกงและรูปแบบของความเสียหายสุดท้าย ที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยหากมีการกระจายความเค้นที่ละน้อย จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกว่าการให้ความเค้นกระจายหมดไปในทันที หลังจากเกิดการแตกร้าว

บทความวิจัยนี้จึงให้ความสนใจและตระหนักถึงผลของแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับผนังก่ออิฐ โดยมีขอบเขตคือศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนอกกระบวนของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังภายใต้การรับแรงกระทำนอกกระบวน เพื่อสังเกตพฤติกรรมการแอ่นตัวและลักษณะการแตกร้าวของผนังก่ออิฐดังกล่าว ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และเมื่อพิจารณาตรวจสอบให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็นกรณีศึกษาดังนี้ กรณีที่ 1 : ผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง, กรณีที่ 2 : ผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังช่วงกึ่งกลางของผนัง, กรณีที่ 3 : ผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง

โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม ANSYS โดยใช้ Solid Element ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้จะถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) ยกเว้นแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ที่เป็นแผ่นเสริมกำลังชนิดเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional Reinforced Laminate) ถูกกำหนดให้เป็นคุณสมบัติที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง (Orthotropic material)

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกันจะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสมเบื้องต้นในการเสริมกำลังเพื่อให้ได้ผนังก่ออิฐที่มีประสิทธิภาพ ช่วยลดการแอ่นตัว การแตกร้าวและเพิ่มสัดส่วนความปลอดภัยของผนังก่ออิฐในการรับแรงกระทำนอกกระบวน

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

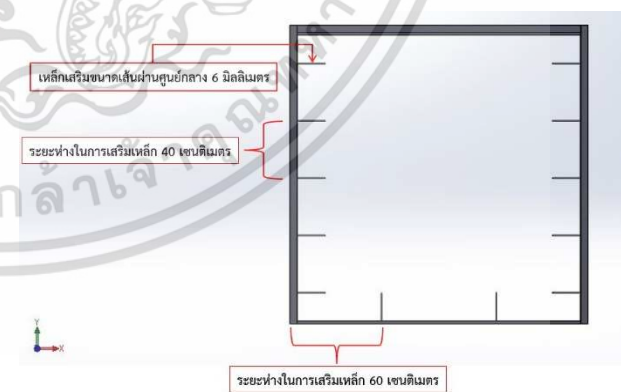
บทความวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วน คือ การทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง, การสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง และการประยุกต์ใช้แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังไปใช้เป็นต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งในที่สุดท้ายนี้จะกล่าวถึงภายหลังจากการพิจารณาตรวจสอบผลที่ได้จากสองส่วนแรกให้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกัน

2.1 การทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

2.1.1 ชิ้นงานทดสอบ

ผนังก่ออิฐมวลก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง เป็นผนังก่ออิฐที่สร้างขึ้นแบบเติมช่อง (infilled) โดยเสาและคานถูกสร้างขึ้นโดยใช้เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กกล่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง 10 cm, ความลึก 5 cm, และความหนา 2 mm.

ผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีขนาดประสิทธิภาพที่ไม่รวมโครงสร้างเสาและคานคือ ความสูง 2 m, ความกว้าง 2 m, และมีความหนา 10 cm. โดยที่ความหนาของผนังเกิดขึ้นจากการใช้อิฐมวลเบาที่มีขนาดความหนา 7.5 cm, และฉาบผนังที่ผิวทั้งสองด้านด้วยปูนฉาบสำเร็จรูปเพื่อให้ได้ความหนาประสิทธิภาพดังกล่าว โดยที่ในแต่ละชั้นปูนก่อจะใช้ปูนก่อสำเร็จรูปสำหรับอิฐมวลเบา และมีการเสริมเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. (RB6) ยึดชั้นปูนก่อทุกระยะห่าง 40 cm. ในแนวราบส่วนในแนวตั้งจะเจาะเสียบเหล็กที่พื้นที่ระยะห่าง 60 cm. เหล็กเสริมมีขนาดความยาว 20 cm. โดยลักษณะของการเสริมเหล็กยึดชั้นปูนก่อแสดงได้ดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ฐานรองรับที่เป็นเสาเหล็กรูปพรรณจะถูกติดตั้งค้ำยันเพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ (Overturning) ของเสาเหล็กดังกล่าว ซึ่งรูปแบบของชิ้นงานทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะของการเสริมเหล็กยึดชั้นปูนก่อ



รูปที่ 2 ผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

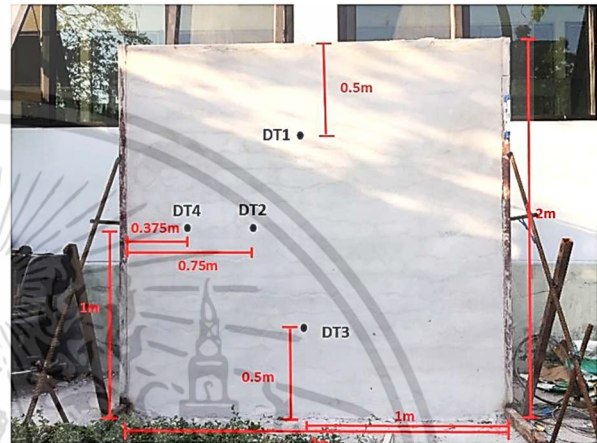
ก่อนการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและอุปกรณ์ในการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบจะใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) เป็นอุปกรณ์ที่ถ่ายแรงเข้าตัวแผ่นเพลทที่สร้างขึ้นจากเหล็กกล่องรูปพรรณที่เชื่อมติดกันโดยมีขนาดความกว้าง 50 cm. และความยาว 50 cm. เพื่อให้แผ่นเพลทดังกล่าวกระจายแรงในลักษณะที่เกิดขึ้นนอกระนาบเข้าสู่ผนังก่ออิฐ อีกทั้งเพื่อป้องกันการเกิดแรงเฉือนยวบทะลุ (Punching shear) หลังจากนั้นจะทำการติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อใช้อ่านค่าแรงกระทำ



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและเครื่องมือวัด

ต่อจากนั้นจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดค่าการแอ่นตัว LVDT ทั้งหมด 4 จุดบนผนัง ซึ่งตำแหน่งและระยะที่ติดตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยตำแหน่งที่วัดค่าการแอ่นตัวในตำแหน่งที่ 1 แทนด้วย DT-1 ซึ่งติดตั้งห่างจากขอบบนของคานเหล็กเป็นระยะ 0.50 m. (ในแนวตั้ง) และติดตั้งห่างจากเสาเหล็กเป็นระยะ 1.00 m. (ในแนวราบ)

ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าการแอ่นตัวในตำแหน่งที่ 2 (DT-2) ติดตั้งห่างจากระดับพื้นเป็นระยะ 1.00 m. (ในแนวตั้ง) และติดตั้งห่างจากเสาเหล็กเป็นระยะ 0.75 m. (ในแนวราบ) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าการแอ่นตัวในตำแหน่งที่ 3 (DT-3) ติดตั้งห่างจากระดับพื้นเป็นระยะ 0.50 m. (ในแนวตั้ง) และติดตั้งห่างจากเสาเหล็กเป็นระยะ 1.00 m. (ในแนวราบ) ส่วนตำแหน่งสุดท้ายที่วัดค่าการแอ่นตัวคือตำแหน่งที่ 4 (DT-4) ซึ่งติดตั้งห่างจากระดับพื้นเป็นระยะ 1.00 m. (ในแนวตั้ง) และติดตั้งห่างจากเสาเหล็กเป็นระยะ 0.375 m. (ในแนวราบ)



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้ง LVDT เพื่อวัดค่าการแอ่นตัว

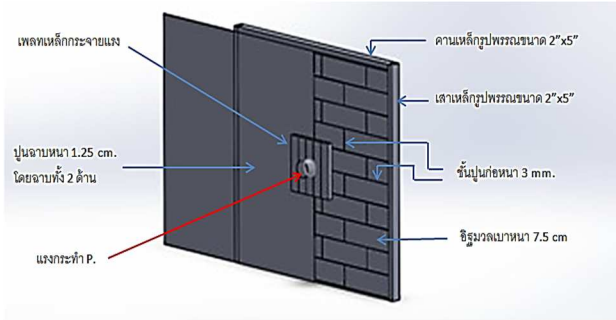
หลังจากติดตั้ง LVDT เสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการเชื่อม LVDT เข้ากับเครื่อง Data logger และเชื่อมต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แปลงผลที่ได้ต่อไป เมื่อติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือทุกอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเริ่มทำการทดสอบด้วยการให้แรงกระทำจากปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยก (Hydraulic hand pump) โดยให้แรงอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง บันทึกค่าความสัมพันธ์ของแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวบริเวณตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดค่าการแอ่นตัว (DT-1 – DT-4) จนกระทั่งผนังก่ออิฐเกิดการแตกร้าว

2.2 การสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยโปรแกรม ANSYS

2.2.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นจะใช้ Solid Element (solid 185) ซึ่งในเอลิเมนต์ประกอบด้วย 8 node แต่ละ node ประกอบด้วย การเคลื่อนตัวอิสระใน 3 ทิศทางคือ (U_x , U_y , U_z) โดยผิวสัมผัสระหว่างวัสดุที่ทำการจำลองในแต่ละชั้นส่วนจะถูกเชื่อมยึดติดกันโดยสมบูรณ์ด้วยคำสั่ง Contact แบบ bonded ซึ่งรูปแบบของแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นตามเงื่อนไขที่เป็นไปตามรูปแบบของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง แสดงได้ดังรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

2.2.2 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง จะทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นคุณสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) โดยค่าคุณสมบัติของวัสดุสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

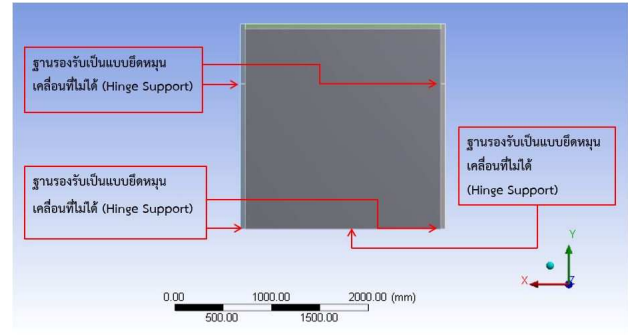
ทั้งนี้ ค่าคุณสมบัติที่นำมาใช้ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)), โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear modulus (G)), อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (ν)) และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (Density (ρ))

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุไอโซทรอปิกที่ใช้ในผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (Isotropic material), [4], [5]

วัสดุ	E (MPa)	G (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
อิฐมวลเบา	1500	646.55	0.16	500
ปูนก่อ	1800	805.73	0.117	2000
ปูนฉาบ	2650	1137.30	0.165	2132
เหล็ก	200000	76923	0.3	7850
คอนกรีต	23000	10648	0.20	2400

2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

แบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง กำหนดให้เสาเหล็กในตำแหน่งที่ยึดมีฐานรองรับเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge support) โดยการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน Z จะถูกยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวแต่สามารถหมุนตัวได้ ส่วนบริเวณฐานของเสาเหล็กซึ่งทำการเชื่อมยึดติดกับเพลาเหล็กที่พื้นจะจำลองให้ฐานรองรับเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ โดยการเคลื่อนตัวในแต่ละทิศทางจะถูกยึดรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวแต่สามารถหมุนตัวได้ และบริเวณที่เจาะยึดเสริมเหล็กในแนวตั้งที่พื้นจะจำลองให้ฐานรองรับเป็นแบบหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

2.2.4 การให้แรงกระทำกับแบบจำลอง

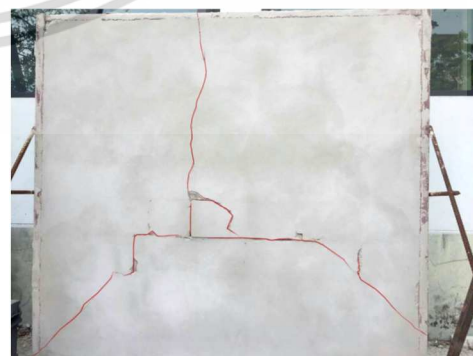
เนื่องจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำให้สามารถหาค่าแรงกระทำสูงสุดก่อนที่ผนังจะเกิดการแตกร้าวได้เท่ากับ 4.53 kN ดังนั้นจะเปรียบเสมือนให้พฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่จำลองขึ้นอยู่ในช่วงที่วัสดุยังรับแรงกระทำได้ในช่วงที่มีความยืดหยุ่น (Elasticity) และแบบจำลองดังกล่าวจะให้แรงกระทำที่เท่ากันกับการทดสอบเป็นจำนวน 10 ชั้น จนกระทั่งถึงค่าแรงกระทำ 4.53 kN เพื่อสังเกตค่าความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการแอ่นตัว

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ผลที่ได้จากการทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง และผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ผลการทดสอบผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงที่ผนังก่ออิฐมวลเบาสามารถรับแรงกระทำได้ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าว มีค่าแรงกระทำเท่ากับ 4.53 kN ซึ่งบริเวณที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Elastic) สามารถวัดค่าการแอ่นตัวได้ 1.89 mm. ที่ตัววัดค่าการแอ่นตัว DT-1 ในรูปที่ 4 และเมื่อให้แรงกระทำต่อไปหลังจากนี้ผนังก่ออิฐจะเกิดการแตกร้าวและไม่สามารถรับแรงกระทำต่อไปได้ ซึ่งลักษณะการแตกร้าวของผนังก่ออิฐมวลเบาแสดงได้ดังรูปที่ 7

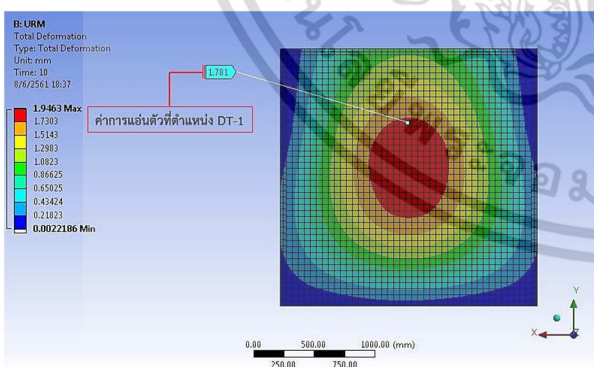


รูปที่ 7 ลักษณะการแตกร้าวของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการสร้างแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังพบว่าเมื่อนำค่าคุณสมบัติวัสดุในตารางที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์ ผลที่ได้คือค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่างจากผลที่ได้จากการทดสอบ โดยมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบประมาณ 2.5 เท่า ซึ่งตั้งสมมติฐานได้ว่าอาจเกิดจากข้อผิดพลาดในการควบคุมปัจจัยแวดล้อมของการทดสอบซึ่งมีผลทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป หรืออีกสาเหตุอาจเป็นผลจากการที่แบบจำลองมีสติฟเนส (Stiffness) ที่สูงกว่าความเป็นจริง ส่งผลทำให้ค่าที่ได้ไม่เป็นตามที่คาดการณ์ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงมุ่งประเด็นสำคัญไปในเรื่องการพิจารณาผลของการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกันว่ามีส่วนช่วยในการลดค่าการแอ่นตัวได้ในช่วงที่วัสดุยังอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic) ดังนั้นในแบบจำลองของผนังกออิฐที่ไม่มีการเสริมกำลังนี้จะถูกจำลองขึ้นใหม่ โดยนำค่าคุณสมบัติของวัสดุในตารางที่ 1 มาใช้โดยทำการปรับลดค่า โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (ν)) ของวัสดุลง 2.5 เท่า จากค่าที่แสดงในตาราง เพื่อให้ผลที่ได้จากแบบจำลองในขั้นแรกมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบและสามารถนำผลที่ได้จากแบบจำลองนี้ไปพิจารณาเพื่อเสริมกำลังต่อไปได้ ทั้งนี้การปรับลดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการเสริมกำลังต้องมีการปรับลดค่าคุณสมบัติลง 2.5 เท่าเช่นเดียวกันเพื่อให้ผลที่ได้อยู่ในเงื่อนไขที่พิจารณาเดียวกัน ซึ่งเมื่อปรับลดค่าคุณสมบัติดังกล่าวลงแล้ว ผลที่ได้พบว่าค่าการแอ่นตัวสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Elastic) ที่ทำการวัดค่าในตำแหน่งเดียวกันกับการทดสอบมีค่า 1.78 mm. ที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 ของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบคือ 1.89 mm. และค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 แสดงได้ดังรูปที่ 8



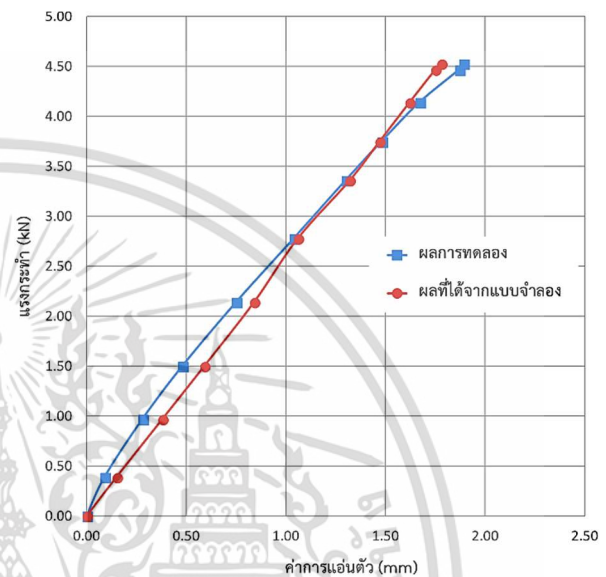
รูปที่ 8 ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1 ของแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

3.3 การเปรียบเทียบผลและการพิจารณาตรวจสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งตัววัดค่า DT-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากผลการทดสอบและผลที่ได้จากแบบจำลองค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังนี้ให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ และแบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่ต่างกันได้

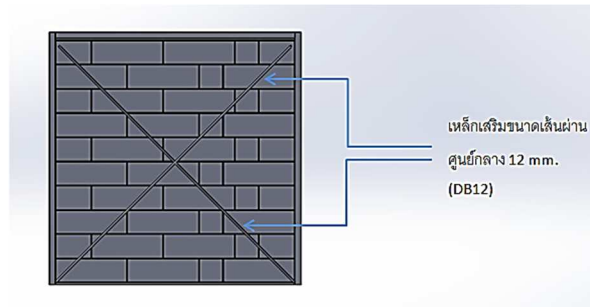


รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (ที่ตำแหน่งตัววัดค่าการแอ่นตัว DT-1)

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อการเสริมกำลัง

4.1 แบบจำลองผนังกออิฐที่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง

แบบจำลองผนังกออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังดังกล่าวเป็นการนำแบบจำลองของผนังกออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังมาใช้เสริมกำลังด้วยการใช้เหล็กเสริมข้ออ้อยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm. (DB12) จำนวน 2 เส้น วางทำมุม +45° และ -45° กับระนาบของผนังตามลำดับ โดยทำการเชื่อมเหล็กเสริมนี้ยึดเข้ากับเสาเหล็กรูปพรรณรวมทั้งเชื่อมเหล็กเสริมทั้งสองเส้นนี้เข้าด้วยกันบริเวณจุดตัด ซึ่งลักษณะของการเสริมกำลังแสดงได้ดังรูปที่ 10 และเมื่อผนังกออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมแล้ว หลังจากนั้นจะทำการฉาบผิวด้วยปูนฉาบด้วยเช่นกัน



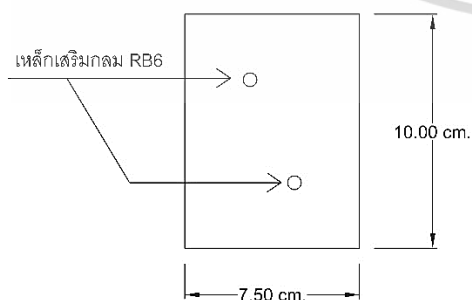
รูปที่ 10 ลักษณะแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง

การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองจะวิเคราะห์โดยกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นคุณสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยทำการปรับลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (U)) ของวัสดุลง 2.5 เท่า จากค่าที่แสดงในตาราง เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังในตอนแรก

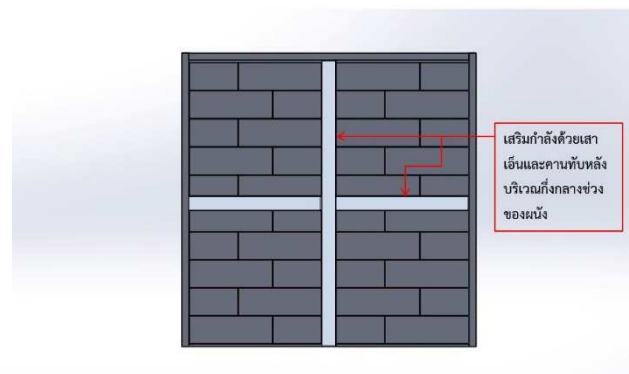
เงื่อนไขขอบเขตและการให้แรงกระทำกับแบบจำลองจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

4.2 แบบจำลองผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังช่วงกึ่งกลางของผนัง

แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังดังกล่าวเป็นการนำแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังมาใช้เสริมกำลังด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังบริเวณกึ่งกลางช่วงของผนัง โดยเสาเอ็นและคานทับหลังมีขนาดความกว้าง 10 cm. และมีความหนา 7.5 cm. เท่ากับความหนาของอิฐมวลเบา วัสดุของเสาเอ็นและคานทับหลังเป็นคอนกรีตภายในเสริมเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. (RB6) จำนวน 2 เส้น โดยขนาดหน้าตัดของเสาเอ็นและคานทับหลังแสดงได้ดังรูปที่ 11 เมื่อผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังเสร็จแล้ว หลังจากนั้นจะทำการฉาบผิวด้วยปูนฉาบด้วยเช่นกัน ซึ่งลักษณะของการเสริมกำลังแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ขนาดหน้าตัดของเสาเอ็นและคานทับหลัง



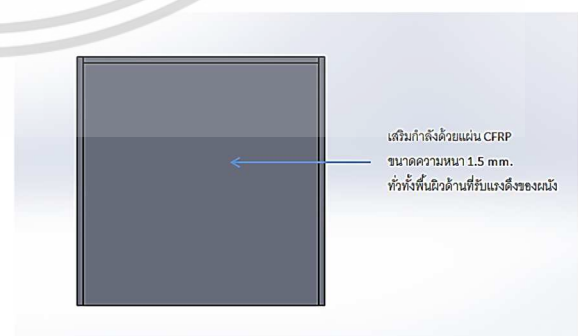
รูปที่ 12 ลักษณะแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังช่วงกึ่งกลางของผนัง

การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองจะวิเคราะห์โดยกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นคุณสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยทำการปรับลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (U)) ของวัสดุลง 2.5 เท่า จากค่าที่แสดงในตาราง เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังในตอนแรก

เงื่อนไขขอบเขตและการให้แรงกระทำกับแบบจำลองจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง

4.3 แบบจำลองผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง

แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังดังกล่าวเป็นการนำแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังมาใช้เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ที่จำลองให้เป็นชั้น (layer) ที่มีขนาดความหนา 1.5 mm. โดยจะเสริมกำลังทั่วพื้นผิวภายนอกด้านที่รับแรงดึงของผนังก่ออิฐมวลเบา ซึ่งจะใช้กาอพิออกซีเป็นตัวยึดประสานระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) กับผิวที่ฉาบด้วยปูนฉาบแล้ว ลักษณะการเสริมกำลังแสดงได้ดังรูปที่ 13 และหน้าตัด (Section) ภายในแต่ละชั้น แสดงได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 ลักษณะแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนฉาบ
อิฐมวลเบา
ปูนฉาบ
เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP

รูปที่ 14 หน้าตัดภายในแสดงลักษณะแต่ละชั้นของผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CRFP laminate)

การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองจะวิเคราะห์โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็น 2 แบบได้แก่

1. คุณสมบัติของวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง แสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยทำการปรับลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (ν)) ของวัสดุลง 2.5 เท่าจากค่าที่แสดงในตาราง เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังในตอนแรก

2. คุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันในแต่ละแกนหลัก (Orthotropic material) ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยทำการปรับลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (ν)) ของวัสดุลง 2.5 เท่า จากค่าที่แสดงในตารางเช่นเดียวกัน เนื่องจากต้องพิจารณาในเรื่องไขของการปรับลดค่าลงตามขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังในตอนแรก

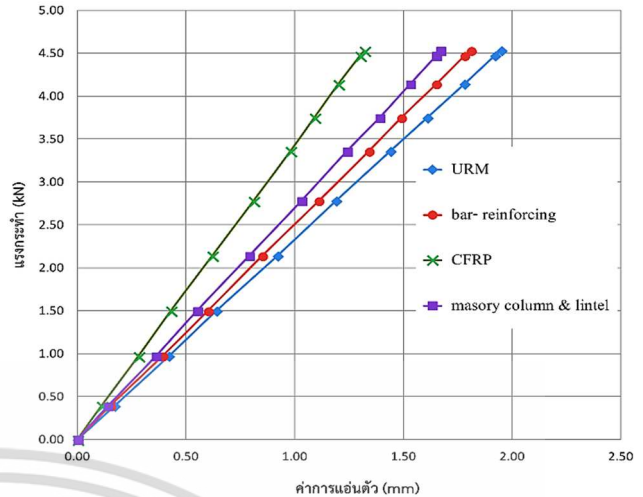
ตารางที่ 2 คุณสมบัติออร์โธโทรปิกของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate), (Orthotropic material) [6]

วัสดุ	E (GPa)	G (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
แผ่น CFRP	$E_x = 209$	$G_{xy} = 5.5$	$\nu_{xy} = 0.27$	1540
	$E_y = 9.45$	$G_{yz} = 3.9$	$\nu_{yz} = 0.40$	
	$E_z = 9.45$	$G_{xz} = 5.5$	$\nu_{xz} = 0.27$	

4.4 ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกัน

4.4.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลอง

ผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงของผนัง (Mid span) แสดงได้ดังรูปที่ 15

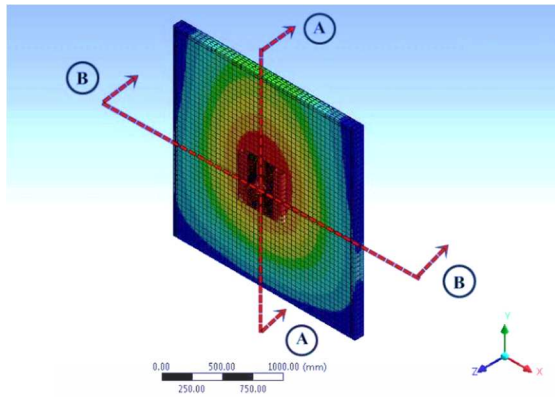


รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบา

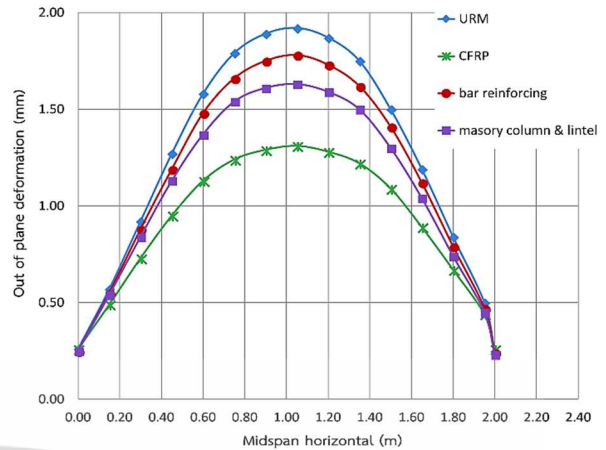
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) มีผลให้ค่าการแอ่นตัวของผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีค่าลดลงและเสริมกำลังให้กับผนังก่ออิฐได้มากกว่าการเสริมกำลังในวิธีอื่น ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นการคาดการณ์ผลที่ได้ในเบื้องต้น ทั้งนี้จากกราฟรูปที่ 15 เส้นกราฟ URM แทนกราฟความสัมพันธ์ของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลัง (Unreinforced masonry wall), เส้นกราฟ bar-reinforcing คือกราฟความสัมพันธ์ของผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมที่ผิวด้านรับแรงดึงของผนัง, เส้นกราฟ CFRP คือกราฟความสัมพันธ์ของผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) และเส้นกราฟ Masonry column & lintel คือ กราฟความสัมพันธ์ของผนังก่ออิฐมวลเบาที่เสริมกำลังด้วยเสาเอ็นและคานทับหลังช่วงกึ่งกลางของผนัง

4.4.2 เส้นโค้งการแอ่นตัว (Deflection curve) ของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบา

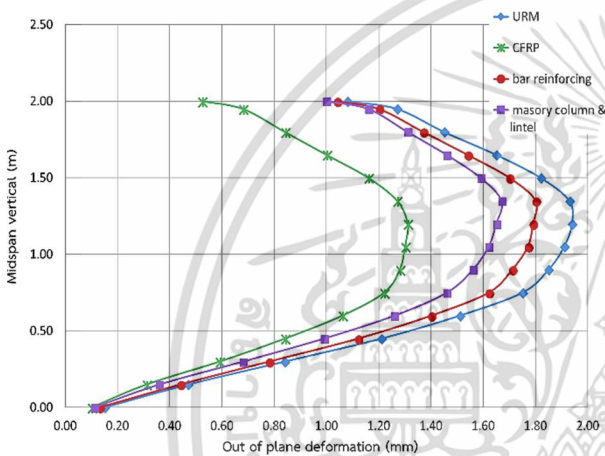
การวิเคราะห์ลักษณะเส้นโค้งการแอ่นตัวของแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ทิศทาง คือ ช่วงกึ่งกลางความยาวของผนังในทิศทางหน้าตัด A-A และช่วงกึ่งกลางความยาวของผนังในทิศทางหน้าตัด B-B โดยที่หน้าตัดที่นำมาพิจารณาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16 ซึ่งกราฟเส้นโค้งการแอ่นตัวของผนังในทิศทางหน้าตัด A-A แสดงได้ดังรูปที่ 17 และกราฟเส้นโค้งการแอ่นตัวของผนังในทิศทางหน้าตัด B-B แสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 16 หน้าตัดที่นำมาพิจารณาเส้นโค้งการแอ่นตัว



รูปที่ 18 กราฟเส้นโค้งการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาวของผนังในทิศทางหน้าตัด B-B



รูปที่ 17 กราฟเส้นโค้งการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาวของผนังในทิศทางหน้าตัด A-A

โดยแกน X แสดงค่าการแอ่นตัวของผนังในทิศทางหน้าตัด A-A ที่กึ่งกลางช่วงความยาวของผนัง และแกน Y ในที่นี้แสดงค่าตำแหน่งของผนังในแนวตั้งที่กึ่งกลางช่วงความยาว ซึ่งผลคาดการณ์จากแบบจำลองบ่งบอกได้ว่าแบบจำลองผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ส่งผลให้เส้นโค้งการแอ่นตัวมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยวิธีอื่น

โดยแกน Y แสดงค่าการแอ่นตัวของผนังในทิศทางหน้าตัด B-B ที่กึ่งกลางช่วงความยาวของผนัง และแกน X ในที่นี้แสดงค่าตำแหน่งของผนังในแนวราบที่กึ่งกลางช่วงความยาว ซึ่งผลคาดการณ์จากแบบจำลองบ่งบอกได้ว่าแบบจำลองผนังก่ออิฐที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) ส่งผลให้เส้นโค้งการแอ่นตัวมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยวิธีอื่น

5. สรุปผล

จากผลการทดสอบ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองของผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังในตอนแรกพบว่าให้ผลที่แตกต่างกัน โดยค่าการแอ่นตัวที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบประมาณ 2.5 เท่า ซึ่งตั้งสมมติฐานได้ว่าอาจเกิดจากข้อผิดพลาดในการควบคุมปัจจัยแวดล้อมของการทดสอบซึ่งมีผลทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปหรืออีกสาเหตุอาจเป็นผลจากการที่แบบจำลองมีสติฟเนส (Stiffness) ที่สูงกว่าความเป็นจริงทำให้ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองในเบื้องต้น ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่เป็นตามที่คาดการณ์ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงมุ่งประเด็นสำคัญไปในเรื่องการพิจารณาผลของการเสริมกำลังในรูปแบบที่แตกต่างกันว่ามีส่วนช่วยในการลดค่าการแอ่นตัวได้ ในช่วงที่วัสดุยังอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic) ดังนั้นการสร้างแบบจำลองนี้จึงได้ทำการปรับลดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยทำการปรับลดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity (E)) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio (ν)) ของวัสดุลง 2.5 เท่า จากค่าที่แสดงในตาราง

เมื่อสามารถพิจารณาตรวจสอบแบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาที่ไม่มีการเสริมกำลังให้ผลที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบแล้ว แบบจำลองดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวต้นแบบในการสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐที่มีการเสริมกำลังในรูปแบบที่ต่างหากัน ซึ่งผลที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลองบ่งบอกได้ว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP laminate) มีส่วนช่วยในการลด

การแอ่นตัว และเพิ่มกำลังรับแรงให้กับผนังก่ออิฐมวลเบาได้ดีกว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีอื่นที่นำมาพิจารณาร่วมกัน ทั้งนี้ผลที่ได้เป็นการคาดการณ์ในภาพรวมของการเสริมกำลังซึ่งยังไม่สามารถชี้ชัดได้ว่ารูปแบบการเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าวสามารถเสริมกำลังได้ในตำแหน่งที่เหมาะสมและดีที่สุด ซึ่งขั้นตอนการศึกษาต่อไป จะคำนึงถึงทิศทางของการเสริมกำลังและวิเคราะห์รูปแบบการเสริมกำลัง ซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนวทางที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ในภาคปฏิบัติได้จริงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ครอบครวั และผู้ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทดสอบท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องทดสอบ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบครั้งนี้จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hamid and Shing (1994). Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol.120 Issue 1
- [2] Clay Brick and Paver Institute (1999). *Design of clay masonry for wind and earthquake*. Clay Brick and Paver Institute, Sydney, 48 p.
- [3] Sk. Sekender Ali and Adrian W. Page (1989). Finite Element Model for Masonry Subjected to Concentrated Loads. *Journal of Structural Engineering*, 114, 1761
- [4] Prakash T M, Naresh kumar B G and Karisiddappa. (2013). Strength and elastic properties of aerated concrete block masonry. *International journal of structural and civil engineering research*, Vol.2, No.1
- [5] Narayanan, S P., Sirajuddin, M. (2013). Properties of Brick Masonry for FE modelling. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Volume-1, pp06-11.
- [6] Hafeezur Rahman A, Sivakumar P , Balaguru V, Rajesh Kumar J. (2016). Design of a Composite Vibration Fixture for Testing Fuel Tank for Combat Vehicle Application. *International NAFEMS Conference on Engineering Analysis, Modeling, Simulation and 3D-Printing (NAFEMS-3D) – 2016*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

รายงานผลวิเคราะห์โปรแกรม

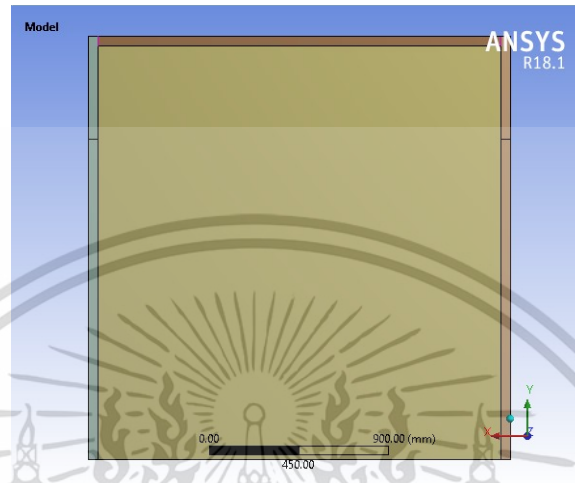
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Static Structural Report (แบบจำลองผนังก่ออิฐมวลเบาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์)
(After Optimization)



Project

First Saved	Thursday, March 14, 2019
Last Saved	Sunday, June 11, 2023
Product Version	18.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents

- **Units**
- **Model (C2)**
 - **Geometry**
 - **URM 4**
 - **Body Groups**
 - Parts
 - Parts
 - Parts
 - Parts
 - Parts
 - **CFRP Laminate**
 - **SolidModel.1**
 - **Coordinate Systems**
 - **URM 4**
 - **Connections**
 - **URM 4**
 - **Contacts(URM 4)**
 - **Contact Regions**
 - **Contacts**
 - **Contact Regions**
 - **Mesh**
 - **Imported Plies**
 - **CFRP Laminate**
 - **SolidModel.1.h5(CFRP Laminate)**
 - **LAYERS(CFRP Laminate)**
 - **Angle 40.04(CFRP Laminate)**
 - **P1 - Angle 0(CFRP Laminate)**
 - **P1L1 - Angle 40.04(CFRP Laminate)**
 - **Angle 133.31(CFRP Laminate)**
 - **P1 - Angle 90(CFRP Laminate)**
 - **P1L1 - Angle 133.31(CFRP Laminate)**
 - **Named Selections**
 - **CFRP Laminate**
 - **Static Structural (C3)**
 - **Analysis Settings**
 - **Loads**
 - **Solution (C4)**
 - **Solution Information**
 - **Results**
 - **Material Data**
 - **Structural Steel**
 - **Plastering**
 - **Lightweight Concrete**
 - **Glue**
 - **Epoxy Carbon UD Prepreg**

Units

TABLE 1

| | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Unit System | Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) | Degrees rad/s Celsius |
| Angle | | Degrees |
| Rotational Velocity | | rad/s |
| Temperature | | Celsius |

Model (C2)

Geometry

TABLE 2
Model (C2) > Geometry

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Object Name | Geometry |
| State | Fully Defined |
| Definition | |
| Source | No Name |
| Type | Model Assembly |
| Length Unit | Meters |
| Element Control | Program Controlled |
| Display Style | Body Color |
| Bounding Box | |
| Length X | 2115. mm |
| Length Y | 2117. mm |
| Length Z | 250. mm |
| Properties | |
| Volume | 4.2631e+008 mm ³ |
| Mass | 203.66 kg |
| Statistics | |
| Bodies | 115 |
| Active Bodies | 115 |
| Nodes | 128906 |
| Elements | 41518 |
| Mesh Metric | None |
| Advanced Geometry Options | |
| Analysis Type | 3-D |

URM 4

TABLE 3
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Body Groups

| | | | | | |
|----------------------------|---------------------------------|------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| Object Name | STEEL (URM 4) | Round Bar(URM 4) | Plastering(URM 4) | Lightweight(URM 4) | Glue(URM 4) |
| State | Meshed | | | | |
| Graphics Properties | | | | | |
| Visible | Yes | | | | |
| Definition | | | | | |
| Suppressed | No | | | | |
| Assignment | Structural Steel | Plastering | Lightweight Concrete | Glue | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | |
| Bounding Box | | | | | |
| Length X | 2115. mm | 2015. mm | 2009. mm | 2015. mm | |
| Length Y | 2117. mm | 1630. mm | 2067. mm | 2067. mm | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Length Z | 250. mm | 6.0008 mm | 98.5 mm | 75. mm |
| Properties | | | | |
| Volume | 9.8077e+006 mm ³ | 56530 mm ³ | 9.7878e+007 mm ³ | 2.9998e+008 mm ³ |
| Mass | 30.796 kg | 0.1775 kg | 83.196 kg | 59.996 kg |
| Centroid X | | -832.28 mm | | -831.76 mm |
| Centroid Y | -29.24 mm | | -239.02 mm | |
| Centroid Z | 94.593 mm | 49.998 mm | 53.142 mm | 49.998 mm |
| Moment of Inertia Ip1 | 1.0026e+007 kg·mm ² | 58519 kg·mm ² | 2.9778e+007 kg·mm ² | 2.0625e+007 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 1.5286e+007 kg·mm ² | 1.4678e+005 kg·mm ² | 2.8306e+007 kg·mm ² | 2.0234e+007 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 2.5059e+007 kg·mm ² | 2.0529e+005 kg·mm ² | 5.7771e+007 kg·mm ² | 4.0803e+007 kg·mm ² |
| Statistics | | | | |
| Nodes | 18768 | 1080 | 24944 | 35527 |
| Elements | 7281 | 120 | 3444 | 13584 |
| Mesh Metric | | | None | |
| Transfer Properties | | | | |
| Source | | | A4::URM 4 | |
| Read Only | | | Yes | |
| CAD Attributes | | | | |
| Color:143.159.175 | | | | |
| Color:143.175.143 | | | | |
| Color:143.175.175 | | | | |
| Color:159.143.175 | | | | |
| Color:159.175.143 | | | | |
| Color:175.143.143 | | | | |
| Color:175.143.159 | | | | |
| Color:175.143.175 | | | | |
| Color:175.175.143 | | | | |
| Color:143.143.175 | | | | |
| Color:143.175.159 | | | | |
| Color:175.159.143 | | | | |

TABLE 4
Model (C2) > Geometry > URM 4 > STEEL (URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | |
| Reference Temperature | By Environment | | | | | | | | |
| Behavior | None | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | |
| Assignment | Structural Steel | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | |
| Length X | 50. mm | 150. mm | | | 100. mm | | | | 2015. mm |
| Length Y | 2117. mm | 150. mm | | | 500. mm | | | | 50. mm |
| Length Z | 100. mm | | | | 50. mm | | | | 100. mm |
| Properties | | | | | | | | | |
| Volume | 1.9456e+006 mm ³ | 1.767e+006 mm ³ | | | 4.5952e+005 mm ³ | | | | 1.8519e+006 mm ³ |
| Mass | 6.1092 kg | 5.5485 kg | | | 1.4429 kg | | | | 5.8149 kg |
| Centroid X | -1864.8 mm | 200.22 mm | -832.28 mm | -1032.3 mm | -932.28 mm | -832.28 mm | -732.28 mm | -632.28 mm | -832.28 mm |
| Centroid Y | -214.02 mm | | -239.03 mm | | | -239.02 mm | | | 819.48 mm |
| Centroid Z | 49.998 mm | 200. mm | | | 125. mm | | | | 49.998 mm |
| Moment of Inertia Ip1 | 2.2895e+006 kg·mm ² | 12342 kg·mm ² | | | 30681 kg·mm ² | | | | 10012 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 10519 kg·mm ² | 12348 kg·mm ² | | | 2484.4 kg·mm ² | | | | 1.975e+006 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 2.2843e+006 kg·mm ² | 15479 kg·mm ² | | | 31924 kg·mm ² | | | | 1.97e+006 kg·mm ² |
| Statistics | | | | | | | | | |
| Nodes | 5465 | 5491 | 235 | 900 | 936 | 900 | 960 | 900 | 3504 |
| Elements | 2710 | 2733 | 100 | 120 | 434 | 120 | 452 | 120 | 492 |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | |

TABLE 5
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Round Bar(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | |
| Reference Temperature | By Environment | | | | | | | | |
| Behavior | None | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | |
| Assignment | Structural Steel | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | |
| Length X | 200. mm | | | | | | | | |
| Length Y | 6. mm | | 5.9999 mm | | 6. mm | | 5.9999 mm | | 6. mm |
| Length Z | 6. mm | | | | | | | | |
| Properties | | | | | | | | | |
| Volume | 5653. mm ³ | | | | | | | | |
| Mass | 1.775e-002 kg | | | | | | | | |
| Centroid X | -1739.8 mm | | | | | | | | |
| Centroid Y | -645.02 mm | -1051. mm | 572.98 mm | 166.98 mm | -239.02 mm | -1051. mm | -645.02 mm | -239.02 mm | 166.98 mm |
| Centroid Z | 49.998 mm | | 49.999 mm | | | | 49.998 mm | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 7.9236e-002 kg·mm ² | 7.9235e-002 kg·mm ² | 7.9237e-002 kg·mm ² | 7.9235e-002 kg·mm ² | 7.9236e-002 kg·mm ² | 7.9235e-002 kg·mm ² | 7.9237e-002 kg·mm ² | 7.9235e-002 kg·mm ² | 7.9235e-002 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 58.979 kg·mm ² | | 58.98 kg·mm ² | | 58.979 kg·mm ² | 58.98 kg·mm ² | 58.979 kg·mm ² | 58.98 kg·mm ² | 58.979 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 58.979 kg·mm ² | | 58.98 kg·mm ² | | 58.979 kg·mm ² | 58.98 kg·mm ² | 58.979 kg·mm ² | 58.98 kg·mm ² | 58.979 kg·mm ² |
| Statistics | | | | | | | | | |
| Nodes | 108 | | | | | | | | |
| Elements | 12 | | | | | | | | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำออกให้บุคคลอื่น ไม่ควรนำออกให้หน่วยงานอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Transfer Properties | |
|---------------------|-----------|
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 6
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Plastering(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| State | Meshed | |
| Graphics Properties | | |
| Visible | Yes | |
| Transparency | 1 | |
| Definition | | |
| Suppressed | No | |
| Stiffness Behavior | Flexible | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | |
| Behavior | None | |
| Material | | |
| Assignment | Plastering | |
| Nonlinear Effects | Yes | |
| Thermal Strain Effects | Yes | |
| Bounding Box | | |
| Length X | 2015. mm | |
| Length Y | 2067. mm | |
| Length Z | 11. mm | 12.5 mm |
| Properties | | |
| Volume | 4.5815e+007 mm³ | 5.2063e+007 mm³ |
| Mass | 38.943 kg | 44.253 kg |
| Centroid X | -832.28 mm | |
| Centroid Y | -239.02 mm | |
| Centroid Z | 6.9983 mm | 93.748 mm |
| Moment of Inertia Ip1 | 1.3866e+007 kg·mm² | 1.5756e+007 kg·mm² |
| Moment of Inertia Ip2 | 1.3177e+007 kg·mm² | 1.4974e+007 kg·mm² |
| Moment of Inertia Ip3 | 2.7042e+007 kg·mm² | 3.0729e+007 kg·mm² |
| Statistics | | |
| Nodes | 12472 | |
| Elements | 1722 | |
| Mesh Metric | None | |
| Transfer Properties | | |
| Source | A4::URM 4 | |
| Read Only | Yes | |

TABLE 7
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Lightweight(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Behavior | None | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Lightweight Concrete | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 600. mm | | 300. mm | | 600. mm | | 300. mm | | | | |
| Length Y | 200. mm | | | | | | | | | | |
| Length Z | 75. mm | | | | | | | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 8.9989e+006 mm³ | | 4.4989e+006 mm³ | | 8.9989e+006 mm³ | | 4.4989e+006 mm³ | | | | |
| Mass | 1.7998 kg | | 0.89978 kg | | 1.7998 kg | | 0.89978 kg | | | | |
| Centroid X | -1536.8 mm | -127.81 mm | 22.203 mm | -1686.8 mm | -127.81 mm | -1536.8 mm | -127.81 mm | -1686.8 mm | 22.203 mm | -127.81 mm | -1686.8 mm |
| Centroid Y | 471.47 mm | | 674.5 mm | 288.5 mm | 674.5 mm | 65.468 mm | -340.53 mm | -137.5 mm | | | |
| Centroid Z | 49.998 mm | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 6841.6 kg·mm² | | 3419.7 kg·mm² | | 6841.6 kg·mm² | | 3419.7 kg·mm² | | | | |
| Moment of Inertia Ip2 | 54834 kg·mm² | | 7170.6 kg·mm² | | 54834 kg·mm² | | 7170.6 kg·mm² | | | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 59988 kg·mm² | | 9746.6 kg·mm² | | 59988 kg·mm² | | 9746.6 kg·mm² | | | | |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 1327 | 1357 | 851 | 1019 | 815 | 1384 | 1444 | 1346 | 1343 | 1026 | 1093 |
| Elements | 662 | 685 | 440 | 518 | 418 | 706 | 746 | 680 | 675 | 522 | 569 |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 8
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Lightweight(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Behavior | None | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Lightweight Concrete | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 300. mm | 600. mm | 300. mm | | 600. mm | 300. mm | 600. mm | | | | |
| Length Y | 200. mm | | | | | | | | | | |
| Length Z | 75. mm | | | | | | | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------|------------|
| Volume | 4.4989e+006 mm ³ | 8.9989e+006 mm ³ | 4.4989e+006 mm ³ | | 8.9989e+006 mm ³ | 4.4989e+006 mm ³ | 8.9989e+006 mm ³ | 9.e+006 mm ³ | | |
| Mass | 0.89978 kg | 1.7998 kg | 0.89978 kg | | 1.7998 kg | 0.89978 kg | 1.7998 kg | 1.8 kg | | |
| Centroid X | -1686.8 mm | -1536.8 mm | -1686.8 mm | | 22.203 mm | -127.81 mm | 22.203 mm | -127.81 mm | -429.78 mm | -1031.8 mm |
| Centroid Y | 268.5 mm | -746.53 mm | -949.5 mm | | -543.5 mm | -746.53 mm | -949.5 mm | -1152.5 mm | 268.48 mm | 674.48 mm |
| Centroid Z | 49.998 mm | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 3419.7 kg-mm ² | 6841.6 kg-mm ² | 3419.7 kg-mm ² | | 6841.6 kg-mm ² | 3419.7 kg-mm ² | 6841.6 kg-mm ² | 6843.8 kg-mm ² | | |
| Moment of Inertia Ip2 | 7170.6 kg-mm ² | 54834 kg-mm ² | 7170.6 kg-mm ² | | 54834 kg-mm ² | 7170.6 kg-mm ² | 54834 kg-mm ² | 54844 kg-mm ² | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 9746.6 kg-mm ² | 59988 kg-mm ² | 9746.6 kg-mm ² | | 59988 kg-mm ² | 9746.6 kg-mm ² | 59988 kg-mm ² | 60000 kg-mm ² | | |
| Statistics | | | | | | | | | | |
| Nodes | 1017 | 1347 | 1003 | 1043 | 1051 | 1438 | 1026 | 1080 | 661 | |
| Elements | 520 | 679 | 510 | 536 | 542 | 745 | 523 | 547 | 96 | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | |

TABLE 9
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Lightweight(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| | None | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Lightweight Concrete | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 600. mm | | | | | | | | | | |
| Length Y | 200. mm | | | | | | | | | | |
| Length Z | 75. mm | | | | | | | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 9.e+006 mm ³ | | | | | | | | | | |
| Mass | 1.8 kg | | | | | | | | | | |
| Centroid X | -730.78 mm | -1031.8 mm | -730.78 mm | | -429.78 mm | -1031.8 mm | -730.78 mm | -429.78 mm | -1031.8 mm | -429.78 mm | -1031.8 mm |
| Centroid Y | 471.48 mm | 268.48 mm | 65.48 mm | -340.52 mm | -137.52 mm | | -746.52 mm | -543.52 mm | -949.52 mm | | |
| Centroid Z | 49.998 mm | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 6843.7 kg-mm ² | 6843.8 kg-mm ² | | 6843.7 kg-mm ² | | 6843.8 kg-mm ² | | | | | |
| Moment of Inertia Ip2 | 54844 kg-mm ² | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 60000 kg-mm ² | | | | | | | | | | |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 661 | | | | | | | | | | |
| Elements | 96 | | | | | | | | | | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 10
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Lightweight(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| | None | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Lightweight Concrete | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 600. mm | 200. mm | | | | | | | | | |
| Length Y | 200. mm | | | | | | | | | | |
| Length Z | 75. mm | | | | | | | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 9.e+006 mm ³ | | | | | | | | | | |
| Mass | 1.8 kg | | | | | | | | | | |
| Centroid X | -730.78 mm | -1433.8 mm | -1133.8 mm | -1433.8 mm | -1133.8 mm | -1433.8 mm | -1133.8 mm | -1433.8 mm | -1133.8 mm | -1433.8 mm | -1133.8 mm |
| Centroid Y | -1152.5 mm | 268.48 mm | 471.48 mm | 674.48 mm | -340.52 mm | -137.52 mm | 65.48 mm | -543.52 mm | -746.52 mm | -949.52 mm | -1152.5 mm |
| Centroid Z | 49.998 mm | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 6843.7 kg-mm ² | 2281.3 kg-mm ² | 2281.2 kg-mm ² | 2281.3 kg-mm ² | | | 2281.2 kg-mm ² | 2281.3 kg-mm ² | 2281.2 kg-mm ² | | |
| Moment of Inertia Ip2 | 54844 kg-mm ² | 2281.2 kg-mm ² | | 2281.3 kg-mm ² | 2281.2 kg-mm ² | 2281.3 kg-mm ² | 2281.2 kg-mm ² | | | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 60000 kg-mm ² | | | | | | | | | | |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 661 | | | | | | | | | | |
| Elements | 96 | | | | | | | | | | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 11
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Lightweight(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) |
|----------------------------|------------------|
| State | Meshed |
| Graphics Properties | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Visible | Yes |
| Transparency | 1 |
| Definition | |
| Suppressed | No |
| Stiffness Behavior | Flexible |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) |
| Reference Temperature Behavior | By Environment |
| Material | |
| Assignment | Lightweight Concrete |
| Nonlinear Effects | Yes |
| Thermal Strain Effects | Yes |
| Bounding Box | |
| Length X | 600. mm |
| Length Y | 200. mm |
| Length Z | 75. mm |
| Properties | |
| Volume | 8.9989e+006 mm³ |
| Mass | 1.7998 kg |
| Centroid X | -1536.8 mm |
| Centroid Y | -1152.5 mm |
| Centroid Z | 49.998 mm |
| Moment of Inertia Ip1 | 6841.6 kg-mm² |
| Moment of Inertia Ip2 | 54834 kg-mm² |
| Moment of Inertia Ip3 | 59988 kg-mm² |
| Statistics | |
| Nodes | 1152 |
| Elements | 601 |
| Mesh Metric | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 12
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Glue(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Glue | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 2015. mm | | 3. mm | | | | | 2009. mm | | | |
| Length Y | 20. mm | | 2027. mm | | 3. mm | 2.9999 mm | | | | 3. mm | |
| Length Z | | | | | | | | 75. mm | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 3.0225e+006 mm³ | | 4.5565e+005 mm³ | | | 4.4524e+005 mm³ | | | | 4.5202e+005 mm³ | |
| Mass | 2.418 kg | | 0.36452 kg | | | 0.35619 kg | | | | 0.36162 kg | |
| Centroid X | -832.28 mm | | -1838.3 mm | | 173.72 mm | | | | -832.28 mm | | |
| Centroid Y | -1262.5 mm | 784.48 mm | | -239.02 mm | | 572.98 mm | 166.98 mm | -239.02 mm | -645.02 mm | 369.98 mm | -36.02 mm |
| Centroid Z | | | | | | | 49.998 mm | | | | -442.02 mm |
| Moment of Inertia Ip1 | 1214. kg-mm² | | 1.2498e+005 kg-mm² | | 1.2499e+005 kg-mm² | | | 169.76 kg-mm² | | | 169.78 kg-mm² |
| Moment of Inertia Ip2 | 8.1927e+005 kg-mm² | | | 171.3 kg-mm² | | | | 1.1733e+005 kg-mm² | | | 1.218e+005 kg-mm² |
| Moment of Inertia Ip3 | 8.1822e+005 kg-mm² | | 1.2481e+005 kg-mm² | | 1.2482e+005 kg-mm² | | 1.1717e+005 kg-mm² | | 1.1716e+005 kg-mm² | | 1.2163e+005 kg-mm² |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 2661 | 2721 | 6669 | 6733 | 3007 | 3005 | 3023 | 3007 | 2038 | 1977 | 2038 |
| Elements | 352 | 360 | 2835 | 2860 | 1175 | 1174 | 1181 | 1173 | 310 | 296 | 310 |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 13
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Glue(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Glue | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | 2009. mm | | | | | | | 2. mm | | | |
| Length Y | 3. mm | | | | | | | 200. mm | | | |
| Length Z | | | | | | | | | | 75. mm | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 4.5202e+005 mm³ | | | | | | | 30000 mm³ | | | |
| Mass | 0.36162 kg | | | | | | | 2.4e-002 kg | | | |
| Centroid X | -832.28 mm | | -730.78 mm | -128.78 mm | -730.78 mm | -1332.8 mm | -128.78 mm | -1332.8 mm | -730.78 mm | -1332.8 mm | -128.78 mm |
| Centroid Y | -846.02 mm | | 674.48 mm | | | -137.52 mm | | 268.48 mm | | 674.48 mm | -543.52 mm |
| Centroid Z | | | | | | | 49.998 mm | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 169.78 kg-mm² | 91.25 kg-mm² | 91.252 kg-mm² | | 91.25 kg-mm² | | 91.252 kg-mm² | | 91.25 kg-mm² | 91.251 kg-mm² | 91.25 kg-mm² |
| Moment of Inertia Ip2 | 1.218e+005 | | | | | | 11.258 kg-mm² | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ip2 | kg·mm ² | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 1.2163e+005 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² |
| Statistics | | | | | | | | | | |
| Nodes | 2078 | | | | | | | | | |
| Elements | 326 | | | | | | | | | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | |

TABLE 14
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Glue(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Glue | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | | | | 2 mm | | | 2009. mm | | | 3. mm | |
| Length Y | | | | 200. mm | | | 3. mm | | | 200. mm | |
| Length Z | | | | | | | 75. mm | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 30000 mm ³ | | | | | 4.4524e+005 mm ³ | | | | | 45000 mm ³ |
| Mass | 2.4e-002 kg | | | | | 0.35619 kg | | | | | 3.6e-002 kg |
| Centroid X | -128.78 mm | -1332.8 mm | -128.78 mm | -1332.8 mm | -730.78 mm | -832.28 mm | -1032.3 mm | -429.28 mm | -1032.3 mm | -1535.3 mm | -1235.3 mm |
| Centroid Y | -137.52 mm | -543.52 mm | | | -949.52 mm | -1051. mm | 65.48 mm | | 471.48 mm | 674.48 mm | 471.48 mm |
| Centroid Z | | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 91.252 kg·mm ² | 91.25 kg·mm ² | 91.252 kg·mm ² | 91.25 kg·mm ² | 169.76 kg·mm ² | | | | 136.88 kg·mm ² | | 136.87 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 11.258 kg·mm ² | | | | | 1.1733e+005 kg·mm ² | | | | | 16.902 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.009 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 80.008 kg·mm ² | 1.1716e+005 kg·mm ² | | | 120.03 kg·mm ² | | |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 89 | | | | | 3015 | | | | | 89 |
| Elements | 8 | | | | | 1177 | | | | | 8 |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 15
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Glue(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | SYS\Solid (URM 4) | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Meshed | | | | | | | | | | |
| Graphics Properties | | | | | | | | | | | |
| Visible | Yes | | | | | | | | | | |
| Transparency | 1 | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | | | | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | | | | | | | | |
| Material | | | | | | | | | | | |
| Assignment | Glue | | | | | | | | | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | | | | | | | | | |
| Bounding Box | | | | | | | | | | | |
| Length X | | | | 3 mm | | | 200. mm | | | 75. mm | |
| Length Y | | | | 200. mm | | | 3 mm | | | 75. mm | |
| Length Z | | | | | | | 75. mm | | | | |
| Properties | | | | | | | | | | | |
| Volume | 45000 mm ³ | | | | | 3.6e-002 kg | | | | | |
| Mass | 3.6e-002 kg | | | | | | | | | | |
| Centroid X | -1535.3 mm | -429.28 mm | -1235.3 mm | -1535.3 mm | -429.28 mm | -1235.3 mm | -429.28 mm | -1032.3 mm | -1235.3 mm | -1032.3 mm | -1535.3 mm |
| Centroid Y | 268.48 mm | 471.48 mm | 65.48 mm | -543.52 mm | -340.52 mm | | | -746.52 mm | | -340.52 mm | -137.52 mm |
| Centroid Z | | | | | | | | | | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 136.88 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.88 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.88 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.87 kg·mm ² | 136.88 kg·mm ² | 136.88 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | | | | | | | | | | | 16.902 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip3 | | | | | | | | | | | 120.03 kg·mm ² |
| Statistics | | | | | | | | | | | |
| Nodes | 89 | | | | | | | | | | |
| Elements | 8 | | | | | | | | | | |
| Mesh Metric | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 16
Model (C2) > Geometry > URM 4 > Glue(URM 4) > Parts

| Object Name | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) | SYS\Solid(URM 4) |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| State | Meshed | | | |
| Graphics Properties | | | | |
| Visible | Yes | | | |
| Transparency | 1 | | | |
| Definition | | | | |
| Suppressed | No | | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System(URM 4) | | | |
| Reference Temperature Behavior | By Environment | | | |
| Material | | | | |
| Assignment | None | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Material | | | |
|------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|
| Assignment | Glue | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 3. mm | | |
| Length Y | 200. mm | | |
| Length Z | 75. mm | | |
| Properties | | | |
| Volume | 45000 mm ³ | | |
| Mass | 3.6e-002 kg | | |
| Centroid X | -1535.3 mm | -429.28 mm | -1032.3 mm |
| Centroid Y | -949.52 mm | -1152.5 mm | |
| Centroid Z | 49.998 mm | | |
| Moment of Inertia Ip1 | 136.88 kg·mm ² | | 136.87 kg·mm ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 16.902 kg·mm ² | | |
| Moment of Inertia Ip3 | 120.03 kg·mm ² | | |
| Statistics | | | |
| Nodes | 89 | | |
| Elements | 8 | | |
| Mesh Metric | None | | |
| Transfer Properties | | | |
| Source | A4::URM 4 | | |
| Read Only | Yes | | |

CFRP Laminate

TABLE 17
Model (C2) > Geometry > CFRP Laminate > Parts

| Object Name | SolidModel.1 | | |
|------------------------|-----------------------------|--|--|
| State | Meshed | | |
| Graphics Properties | | | |
| Visible | Yes | | |
| Transparency | 1 | | |
| Definition | | | |
| Suppressed | No | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | |
| Coordinate System | Default Coordinate System | | |
| Reference Temperature | By Environment | | |
| Behavior | None | | |
| Material | | | |
| Assignment | Composite Material | | |
| Nonlinear Effects | Yes | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 2015. mm | | |
| Length Y | 2067. mm | | |
| Length Z | 1.5 mm | | |
| Properties | | | |
| Volume | 6.2477e+006 mm ³ | | |
| Centroid X | -832.28 mm | | |
| Centroid Y | -239.05 mm | | |
| Centroid Z | 0.75 mm | | |
| Statistics | | | |
| Nodes | 5166 | | |
| Elements | 3280 | | |
| Mesh Metric | None | | |
| Transfer Properties | | | |
| Source | B5::CFRP Laminate | | |

Coordinate Systems

URM 4

TABLE 18
Model (C2) > Coordinate Systems > URM 4 > Coordinate System

| Object Name | Global Coordinate System(URM 4) Coordinate System(URM 4) | | |
|----------------------------------|--|---------------------------|--|
| State | Fully Defined | | |
| Definition | | | |
| Type | Cartesian | | |
| Coordinate System | Program Controlled | | |
| Suppressed | No | | |
| Origin | | | |
| Define By | Global Coordinates | | |
| Origin X | -1100.1 mm | -832.28 mm | |
| Origin Y | -1343.3 mm | -239.02 mm | |
| Origin Z | -842.24 mm | 1.4983 mm | |
| Location | Defined | | |
| Principal Axis | | | |
| Axis | X | | |
| Define By | Fixed Vector | | |
| Orientation About Principal Axis | | | |
| Axis | Y | | |
| Define By | Fixed Vector | | |
| Directional Vectors | | | |
| X Axis Data | [1. 0. 0.] | | |
| Y Axis Data | [0. 1. 0.] | | |
| Z Axis Data | [0. 0. 1.] | | |
| Transformations | | | |
| Base Configuration | Absolute | | |
| Transformed Configuration | [-1100.1 -1343.3 -842.24] | [-832.28 -239.02 1.4983] | |
| Transfer Properties | | | |
| Source | A4::URM 4 | | |
| Read Only | Yes | | |

TABLE 19
Model (C2) > Coordinate Systems > Coordinate System

| Object Name | Global Coordinate System | | |
|----------------------|--------------------------|--|--|
| State | Fully Defined | | |
| Definition | | | |
| Type | Cartesian | | |
| Coordinate System ID | 0. | | |
| Origin | | | |
| Origin X | 0. mm | | |
| Origin Y | 0. mm | | |
| Origin Z | 0. mm | | |
| Directional Vectors | | | |
| X Axis Data | [1. 0. 0.] | | |
| Y Axis Data | [0. 1. 0.] | | |
| Z Axis Data | [0. 0. 1.] | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connections

TABLE 20
Model (C2) > Connections

| | |
|--|---------------|
| Object Name | Connections |
| State | Fully Defined |
| Auto Detection | |
| Generate Automatic Connection On Refresh | Yes |
| Transparency | |
| Enabled | Yes |

URM 4

TABLE 21
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4)

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Object Name | Contacts(URM 4) |
| State | Fully Defined |
| Definition | |
| Connection Type | Contact |
| Scope | |
| Scoping Method | Source Assembly |
| Source Assembly | A4::URM 4 |
| Auto Detection | |
| Tolerance Type | Slider |
| Tolerance Slider | 0. |
| Tolerance Value | 7.5073 mm |
| Use Range | No |
| Face/Face | Yes |
| Face Overlap Tolerance | Off |
| Cylindrical Faces | Include |
| Face/Edge | No |
| Edge/Edge | No |
| Priority | Include All |
| Group By | Bodies |
| Search Across | Bodies |
| Statistics | |
| Connections | 561 |
| Active Connections | 561 |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 22
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region(URM 4) | Contact Region 2 (URM 4) | Contact Region 3 (URM 4) | Contact Region 4 (URM 4) | Contact Region 5 (URM 4) | Contact Region 6 (URM 4) | Contact Region 7 (URM 4) | Contact Region 8 (URM 4) | Contact Region 9 (URM 4) | Contact Region 10 (URM 4) | Contact Region 11 (URM 4) |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 23
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 12 (URM 4) | Contact Region 13 (URM 4) | Contact Region 14 (URM 4) | Contact Region 15 (URM 4) | Contact Region 16 (URM 4) | Contact Region 17 (URM 4) | Contact Region 18 (URM 4) | Contact Region 19 (URM 4) | Contact Region 20 (URM 4) | Contact Region 21 (URM 4) | Contact Region 22 (URM 4) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------------|-----------|
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 24
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 23 (URM 4) | Contact Region 24 (URM 4) | Contact Region 25 (URM 4) | Contact Region 26 (URM 4) | Contact Region 27 (URM 4) | Contact Region 28 (URM 4) | Contact Region 29 (URM 4) | Contact Region 30 (URM 4) | Contact Region 31 (URM 4) | Contact Region 32 (URM 4) | Contact Region 33 (URM 4) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 25
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 34 (URM 4) | Contact Region 35 (URM 4) | Contact Region 36 (URM 4) | Contact Region 37 (URM 4) | Contact Region 38 (URM 4) | Contact Region 39 (URM 4) | Contact Region 40 (URM 4) | Contact Region 41 (URM 4) | Contact Region 42 (URM 4) | Contact Region 43 (URM 4) | Contact Region 44 (URM 4) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 26
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 45 (URM 4) | Contact Region 46 (URM 4) | Contact Region 47 (URM 4) | Contact Region 48 (URM 4) | Contact Region 49 (URM 4) | Contact Region 50 (URM 4) | Contact Region 51 (URM 4) | Contact Region 52 (URM 4) | Contact Region 53 (URM 4) | Contact Region 54 (URM 4) | Contact Region 55 (URM 4) | |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | 2 Faces | | 3 Faces | | 2 Faces | | 3 Faces |
| Target | 1 Face | | | | | 2 Faces | | 4 Faces | | 2 Faces | | 4 Faces |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------------|-----------|
| Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 27
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 56 (URM 4) | Contact Region 57 (URM 4) | Contact Region 58 (URM 4) | Contact Region 59 (URM 4) | Contact Region 60 (URM 4) | Contact Region 61 (URM 4) | Contact Region 62 (URM 4) | Contact Region 63 (URM 4) | Contact Region 64 (URM 4) | Contact Region 65 (URM 4) | Contact Region 66 (URM 4) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 2 Faces |
| Target | 4 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 28
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 67 (URM 4) | Contact Region 68 (URM 4) | Contact Region 69 (URM 4) | Contact Region 70 (URM 4) | Contact Region 71 (URM 4) | Contact Region 72 (URM 4) | Contact Region 73 (URM 4) | Contact Region 74 (URM 4) | Contact Region 75 (URM 4) | Contact Region 76 (URM 4) | Contact Region 77 (URM 4) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 3 Faces | 2 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces |
| Target | 4 Faces | 2 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 29
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 78 (URM 4) | Contact Region 79 (URM 4) | Contact Region 80 (URM 4) | Contact Region 81 (URM 4) | Contact Region 82 (URM 4) | Contact Region 83 (URM 4) | Contact Region 84 (URM 4) | Contact Region 85 (URM 4) | Contact Region 86 (URM 4) | Contact Region 87 (URM 4) | Contact Region 88 (URM 4) |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 2 Faces | 3 Faces | 2 Faces | 3 Faces |
| Target | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 2 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces | 4 Faces |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษา และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Geometric Modification | |
|-----------------------------|-----------|
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 30
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 89 (URM 4) | Contact Region 90 (URM 4) | Contact Region 91 (URM 4) | Contact Region 92 (URM 4) | Contact Region 93 (URM 4) | Contact Region 94 (URM 4) | Contact Region 95 (URM 4) | Contact Region 96 (URM 4) | Contact Region 97 (URM 4) | Contact Region 98 (URM 4) | Contact Region 99 (URM 4) |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 31
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 100 (URM 4) | Contact Region 101 (URM 4) | Contact Region 102 (URM 4) | Contact Region 103 (URM 4) | Contact Region 104 (URM 4) | Contact Region 105 (URM 4) | Contact Region 106 (URM 4) | Contact Region 107 (URM 4) | Contact Region 108 (URM 4) | Contact Region 109 (URM 4) | Contact Region 110 (URM 4) |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 32
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 111 (URM 4) | Contact Region 112 (URM 4) | Contact Region 113 (URM 4) | Contact Region 114 (URM 4) | Contact Region 115 (URM 4) | Contact Region 116 (URM 4) | Contact Region 117 (URM 4) | Contact Region 118 (URM 4) | Contact Region 119 (URM 4) | Contact Region 120 (URM 4) | Contact Region 121 (URM 4) |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Tolerance | |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 33
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 122 (URM 4) | Contact Region 123 (URM 4) | Contact Region 124 (URM 4) | Contact Region 125 (URM 4) | Contact Region 126 (URM 4) | Contact Region 127 (URM 4) | Contact Region 128 (URM 4) | Contact Region 129 (URM 4) | Contact Region 130 (URM 4) | Contact Region 131 (URM 4) | Contact Region 132 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 34
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 133 (URM 4) | Contact Region 134 (URM 4) | Contact Region 135 (URM 4) | Contact Region 136 (URM 4) | Contact Region 137 (URM 4) | Contact Region 138 (URM 4) | Contact Region 139 (URM 4) | Contact Region 140 (URM 4) | Contact Region 141 (URM 4) | Contact Region 142 (URM 4) | Contact Region 143 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 35
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 144 (URM 4) | Contact Region 145 (URM 4) | Contact Region 146 (URM 4) | Contact Region 147 (URM 4) | Contact Region 148 (URM 4) | Contact Region 149 (URM 4) | Contact Region 150 (URM 4) | Contact Region 151 (URM 4) | Contact Region 152 (URM 4) | Contact Region 153 (URM 4) | Contact Region 154 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปตีประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 36
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 155 (URM 4) | Contact Region 156 (URM 4) | Contact Region 157 (URM 4) | Contact Region 158 (URM 4) | Contact Region 159 (URM 4) | Contact Region 160 (URM 4) | Contact Region 161 (URM 4) | Contact Region 162 (URM 4) | Contact Region 163 (URM 4) | Contact Region 164 (URM 4) | Contact Region 165 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 37
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 166 (URM 4) | Contact Region 167 (URM 4) | Contact Region 168 (URM 4) | Contact Region 169 (URM 4) | Contact Region 170 (URM 4) | Contact Region 171 (URM 4) | Contact Region 172 (URM 4) | Contact Region 173 (URM 4) | Contact Region 174 (URM 4) | Contact Region 175 (URM 4) | Contact Region 176 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 38
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 177 (URM 4) | Contact Region 178 (URM 4) | Contact Region 179 (URM 4) | Contact Region 180 (URM 4) | Contact Region 181 (URM 4) | Contact Region 182 (URM 4) | Contact Region 183 (URM 4) | Contact Region 184 (URM 4) | Contact Region 185 (URM 4) | Contact Region 186 (URM 4) | Contact Region 187 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนใต้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 39
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 188 (URM 4) | Contact Region 189 (URM 4) | Contact Region 190 (URM 4) | Contact Region 191 (URM 4) | Contact Region 192 (URM 4) | Contact Region 193 (URM 4) | Contact Region 194 (URM 4) | Contact Region 195 (URM 4) | Contact Region 196 (URM 4) | Contact Region 197 (URM 4) | Contact Region 198 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 40
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 199 (URM 4) | Contact Region 200 (URM 4) | Contact Region 201 (URM 4) | Contact Region 202 (URM 4) | Contact Region 203 (URM 4) | Contact Region 204 (URM 4) | Contact Region 205 (URM 4) | Contact Region 206 (URM 4) | Contact Region 207 (URM 4) | Contact Region 208 (URM 4) | Contact Region 209 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 41
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 210 (URM 4) | Contact Region 211 (URM 4) | Contact Region 212 (URM 4) | Contact Region 213 (URM 4) | Contact Region 214 (URM 4) | Contact Region 215 (URM 4) | Contact Region 216 (URM 4) | Contact Region 217 (URM 4) | Contact Region 218 (URM 4) | Contact Region 219 (URM 4) | Contact Region 220 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Type | Bonded |
| Scope Mode | Automatic |
| Behavior | Program Controlled |
| Trim Contact | Program Controlled |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 42
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 221 (URM 4) | Contact Region 222 (URM 4) | Contact Region 223 (URM 4) | Contact Region 224 (URM 4) | Contact Region 225 (URM 4) | Contact Region 226 (URM 4) | Contact Region 227 (URM 4) | Contact Region 228 (URM 4) | Contact Region 229 (URM 4) | Contact Region 230 (URM 4) | Contact Region 231 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 43
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 232 (URM 4) | Contact Region 233 (URM 4) | Contact Region 234 (URM 4) | Contact Region 235 (URM 4) | Contact Region 236 (URM 4) | Contact Region 237 (URM 4) | Contact Region 238 (URM 4) | Contact Region 239 (URM 4) | Contact Region 240 (URM 4) | Contact Region 241 (URM 4) | Contact Region 242 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 44
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 243 (URM 4) | Contact Region 244 (URM 4) | Contact Region 245 (URM 4) | Contact Region 246 (URM 4) | Contact Region 247 (URM 4) | Contact Region 248 (URM 4) | Contact Region 249 (URM 4) | Contact Region 250 (URM 4) | Contact Region 251 (URM 4) | Contact Region 252 (URM 4) | Contact Region 253 (URM 4) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนตัวที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Target | 1 Face |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) |
| Definition | |
| Type | Bonded |
| Scope Mode | Automatic |
| Behavior | Program Controlled |
| Trim Contact | Program Controlled |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 45
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 254 (URM 4) | Contact Region 255 (URM 4) | Contact Region 256 (URM 4) | Contact Region 257 (URM 4) | Contact Region 258 (URM 4) | Contact Region 259 (URM 4) | Contact Region 260 (URM 4) | Contact Region 261 (URM 4) | Contact Region 262 (URM 4) | Contact Region 263 (URM 4) | Contact Region 264 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 46
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 265 (URM 4) | Contact Region 266 (URM 4) | Contact Region 267 (URM 4) | Contact Region 268 (URM 4) | Contact Region 269 (URM 4) | Contact Region 270 (URM 4) | Contact Region 271 (URM 4) | Contact Region 272 (URM 4) | Contact Region 273 (URM 4) | Contact Region 274 (URM 4) | Contact Region 275 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 47
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 276 (URM 4) | Contact Region 277 (URM 4) | Contact Region 278 (URM 4) | Contact Region 279 (URM 4) | Contact Region 280 (URM 4) | Contact Region 281 (URM 4) | Contact Region 282 (URM 4) | Contact Region 283 (URM 4) | Contact Region 284 (URM 4) | Contact Region 285 (URM 4) | Contact Region 286 (URM 4) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|

เอกสารนี้เป็นเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|-------------------------------|--------------------|---------|
| State | Fully Defined | |
| Scope | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | |
| Contact | 1 Face | 2 Faces |
| Target | 1 Face | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | |
| Definition | | |
| Type | Bonded | |
| Scope Mode | Automatic | |
| Behavior | Program Controlled | |
| Trim Contact | Program Controlled | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | |
| Suppressed | No | |
| Advanced | | |
| Formulation | Program Controlled | |
| Detection Method | Program Controlled | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | |
| Update Stiffness | Program Controlled | |
| Pinball Region | Program Controlled | |
| Geometric Modification | | |
| Contact Geometry Correction | None | |
| Target Geometry Correction | None | |
| Transfer Properties | | |
| Source | A4::URM 4 | |
| Read Only | Yes | |

TABLE 48
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 287 (URM 4) | Contact Region 288 (URM 4) | Contact Region 289 (URM 4) | Contact Region 290 (URM 4) | Contact Region 291 (URM 4) | Contact Region 292 (URM 4) | Contact Region 293 (URM 4) | Contact Region 294 (URM 4) | Contact Region 295 (URM 4) | Contact Region 296 (URM 4) | Contact Region 297 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 49
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 298 (URM 4) | Contact Region 299 (URM 4) | Contact Region 300 (URM 4) | Contact Region 301 (URM 4) | Contact Region 302 (URM 4) | Contact Region 303 (URM 4) | Contact Region 304 (URM 4) | Contact Region 305 (URM 4) | Contact Region 306 (URM 4) | Contact Region 307 (URM 4) | Contact Region 308 (URM 4) | |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | 2 Faces | | | | | | | 1 Face | | | |
| Target | 1 Face | 2 Faces | | | | | | | 1 Face | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 50
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 309 (URM 4) | Contact Region 310 (URM 4) | Contact Region 311 (URM 4) | Contact Region 312 (URM 4) | Contact Region 313 (URM 4) | Contact Region 314 (URM 4) | Contact Region 315 (URM 4) | Contact Region 316 (URM 4) | Contact Region 317 (URM 4) | Contact Region 318 (URM 4) | Contact Region 319 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 51
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 320 (URM 4) | Contact Region 321 (URM 4) | Contact Region 322 (URM 4) | Contact Region 323 (URM 4) | Contact Region 324 (URM 4) | Contact Region 325 (URM 4) | Contact Region 326 (URM 4) | Contact Region 327 (URM 4) | Contact Region 328 (URM 4) | Contact Region 329 (URM 4) | Contact Region 330 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 2 Faces | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Target | 2 Faces | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 52
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 331 (URM 4) | Contact Region 332 (URM 4) | Contact Region 333 (URM 4) | Contact Region 334 (URM 4) | Contact Region 335 (URM 4) | Contact Region 336 (URM 4) | Contact Region 337 (URM 4) | Contact Region 338 (URM 4) | Contact Region 339 (URM 4) | Contact Region 340 (URM 4) | Contact Region 341 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | 2 Faces |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Transfer Properties | |
|---------------------|-----------|
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 53
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 342 (URM 4) | Contact Region 343 (URM 4) | Contact Region 344 (URM 4) | Contact Region 345 (URM 4) | Contact Region 346 (URM 4) | Contact Region 347 (URM 4) | Contact Region 348 (URM 4) | Contact Region 349 (URM 4) | Contact Region 350 (URM 4) | Contact Region 351 (URM 4) | Contact Region 352 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 54
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 353 (URM 4) | Contact Region 354 (URM 4) | Contact Region 355 (URM 4) | Contact Region 356 (URM 4) | Contact Region 357 (URM 4) | Contact Region 358 (URM 4) | Contact Region 359 (URM 4) | Contact Region 360 (URM 4) | Contact Region 361 (URM 4) | Contact Region 362 (URM 4) | Contact Region 363 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 55
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 364 (URM 4) | Contact Region 365 (URM 4) | Contact Region 366 (URM 4) | Contact Region 367 (URM 4) | Contact Region 368 (URM 4) | Contact Region 369 (URM 4) | Contact Region 370 (URM 4) | Contact Region 371 (URM 4) | Contact Region 372 (URM 4) | Contact Region 373 (URM 4) | Contact Region 374 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | 1 Face | | |
| Target | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | 1 Face | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 56
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 375 (URM 4) | Contact Region 376 (URM 4) | Contact Region 377 (URM 4) | Contact Region 378 (URM 4) | Contact Region 379 (URM 4) | Contact Region 380 (URM 4) | Contact Region 381 (URM 4) | Contact Region 382 (URM 4) | Contact Region 383 (URM 4) | Contact Region 384 (URM 4) | Contact Region 385 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | | 1 Face | |
| Target | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | | 1 Face | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 57
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 386 (URM 4) | Contact Region 387 (URM 4) | Contact Region 388 (URM 4) | Contact Region 389 (URM 4) | Contact Region 390 (URM 4) | Contact Region 391 (URM 4) | Contact Region 392 (URM 4) | Contact Region 393 (URM 4) | Contact Region 394 (URM 4) | Contact Region 395 (URM 4) | Contact Region 396 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | 2 Faces | | | | | | | | 1 Face | |
| Target | 1 Face | 2 Faces | | | | | | | | 1 Face | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 58
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 397 (URM 4) | Contact Region 398 (URM 4) | Contact Region 399 (URM 4) | Contact Region 400 (URM 4) | Contact Region 401 (URM 4) | Contact Region 402 (URM 4) | Contact Region 403 (URM 4) | Contact Region 404 (URM 4) | Contact Region 405 (URM 4) | Contact Region 406 (URM 4) | Contact Region 407 (URM 4) |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | 1 Face | |
| Target | | 1 Face | | 2 Faces | | | | | | 1 Face | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนพระองค์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 59
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 408 (URM 4) | Contact Region 409 (URM 4) | Contact Region 410 (URM 4) | Contact Region 411 (URM 4) | Contact Region 412 (URM 4) | Contact Region 413 (URM 4) | Contact Region 414 (URM 4) | Contact Region 415 (URM 4) | Contact Region 416 (URM 4) | Contact Region 417 (URM 4) | Contact Region 418 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 60
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 419 (URM 4) | Contact Region 420 (URM 4) | Contact Region 421 (URM 4) | Contact Region 422 (URM 4) | Contact Region 423 (URM 4) | Contact Region 424 (URM 4) | Contact Region 425 (URM 4) | Contact Region 426 (URM 4) | Contact Region 427 (URM 4) | Contact Region 428 (URM 4) | Contact Region 429 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 61
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 430 (URM 4) | Contact Region 431 (URM 4) | Contact Region 432 (URM 4) | Contact Region 433 (URM 4) | Contact Region 434 (URM 4) | Contact Region 435 (URM 4) | Contact Region 436 (URM 4) | Contact Region 437 (URM 4) | Contact Region 438 (URM 4) | Contact Region 439 (URM 4) | Contact Region 440 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Method | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 62
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 441 (URM 4) | Contact Region 442 (URM 4) | Contact Region 443 (URM 4) | Contact Region 444 (URM 4) | Contact Region 445 (URM 4) | Contact Region 446 (URM 4) | Contact Region 447 (URM 4) | Contact Region 448 (URM 4) | Contact Region 449 (URM 4) | Contact Region 450 (URM 4) | Contact Region 451 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 63
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 452 (URM 4) | Contact Region 453 (URM 4) | Contact Region 454 (URM 4) | Contact Region 455 (URM 4) | Contact Region 456 (URM 4) | Contact Region 457 (URM 4) | Contact Region 458 (URM 4) | Contact Region 459 (URM 4) | Contact Region 460 (URM 4) | Contact Region 461 (URM 4) | Contact Region 462 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 64
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 463 (URM 4) | Contact Region 464 (URM 4) | Contact Region 465 (URM 4) | Contact Region 466 (URM 4) | Contact Region 467 (URM 4) | Contact Region 468 (URM 4) | Contact Region 469 (URM 4) | Contact Region 470 (URM 4) | Contact Region 471 (URM 4) | Contact Region 472 (URM 4) | Contact Region 473 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 65
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 474 (URM 4) | Contact Region 475 (URM 4) | Contact Region 476 (URM 4) | Contact Region 477 (URM 4) | Contact Region 478 (URM 4) | Contact Region 479 (URM 4) | Contact Region 480 (URM 4) | Contact Region 481 (URM 4) | Contact Region 482 (URM 4) | Contact Region 483 (URM 4) | Contact Region 484 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 66
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 485 (URM 4) | Contact Region 486 (URM 4) | Contact Region 487 (URM 4) | Contact Region 488 (URM 4) | Contact Region 489 (URM 4) | Contact Region 490 (URM 4) | Contact Region 491 (URM 4) | Contact Region 492 (URM 4) | Contact Region 493 (URM 4) | Contact Region 494 (URM 4) | Contact Region 495 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 67
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 496 (URM 4) | Contact Region 497 (URM 4) | Contact Region 498 (URM 4) | Contact Region 499 (URM 4) | Contact Region 500 (URM 4) | Contact Region 501 (URM 4) | Contact Region 502 (URM 4) | Contact Region 503 (URM 4) | Contact Region 504 (URM 4) | Contact Region 505 (URM 4) | Contact Region 506 (URM 4) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Type | Bonded |
| Scope Mode | Automatic |
| Behavior | Program Controlled |
| Trim Contact | Program Controlled |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 68
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 507 (URM 4) | Contact Region 508 (URM 4) | Contact Region 509 (URM 4) | Contact Region 510 (URM 4) | Contact Region 511 (URM 4) | Contact Region 512 (URM 4) | Contact Region 513 (URM 4) | Contact Region 514 (URM 4) | Contact Region 515 (URM 4) | Contact Region 516 (URM 4) | Contact Region 517 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 69
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 518 (URM 4) | Contact Region 519 (URM 4) | Contact Region 520 (URM 4) | Contact Region 521 (URM 4) | Contact Region 522 (URM 4) | Contact Region 523 (URM 4) | Contact Region 524 (URM 4) | Contact Region 525 (URM 4) | Contact Region 526 (URM 4) | Contact Region 527 (URM 4) | Contact Region 528 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYS:Solid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 70
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 529 (URM 4) | Contact Region 530 (URM 4) | Contact Region 531 (URM 4) | Contact Region 532 (URM 4) | Contact Region 533 (URM 4) | Contact Region 534 (URM 4) | Contact Region 535 (URM 4) | Contact Region 536 (URM 4) | Contact Region 537 (URM 4) | Contact Region 538 (URM 4) | Contact Region 539 (URM 4) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนใต้หลักการบริหารงานเพื่อการศึกษาและวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Target | 1 Face |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) |
| Definition | |
| Type | Bonded |
| Scope Mode | Automatic |
| Behavior | Program Controlled |
| Trim Contact | Program Controlled |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm |
| Suppressed | No |
| Advanced | |
| Formulation | Program Controlled |
| Detection Method | Program Controlled |
| Penetration Tolerance | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Program Controlled |
| Update Stiffness | Program Controlled |
| Pinball Region | Program Controlled |
| Geometric Modification | |
| Contact Geometry Correction | None |
| Target Geometry Correction | None |
| Transfer Properties | |
| Source | A4::URM 4 |
| Read Only | Yes |

TABLE 71
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 540 (URM 4) | Contact Region 541 (URM 4) | Contact Region 542 (URM 4) | Contact Region 543 (URM 4) | Contact Region 544 (URM 4) | Contact Region 545 (URM 4) | Contact Region 546 (URM 4) | Contact Region 547 (URM 4) | Contact Region 548 (URM 4) | Contact Region 549 (URM 4) | Contact Region 550 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 72
Model (C2) > Connections > URM 4 > Contacts(URM 4) > Contact Regions

| Object Name | Contact Region 551 (URM 4) | Contact Region 552 (URM 4) | Contact Region 553 (URM 4) | Contact Region 554 (URM 4) | Contact Region 555 (URM 4) | Contact Region 556 (URM 4) | Contact Region 557 (URM 4) | Contact Region 558 (URM 4) | Contact Region 559 (URM 4) | Contact Region 560 (URM 4) | Contact Region 561 (URM 4) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| State | Fully Defined | | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Contact | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Target | 1 Face | | | | | | | | | | |
| Contact Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Target Bodies | SYSSolid(URM 4) | | | | | | | | | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Type | Bonded | | | | | | | | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | | | | | | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | | | | | | | | | | |
| Advanced | | | | | | | | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | | | | | | | | |
| Geometric Modification | | | | | | | | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | | | | | | | | |
| Transfer Properties | | | | | | | | | | | |
| Source | A4::URM 4 | | | | | | | | | | |
| Read Only | Yes | | | | | | | | | | |

TABLE 73
Model (C2) > Connections > Contacts

| Object Name | Contacts |
|-------------|---------------|
| State | Fully Defined |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Definition | |
|------------------------|--------------------|
| Connection Type | Contact |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| Auto Detection | |
| Tolerance Type | Slider |
| Tolerance Slider | 0. |
| Tolerance Value | 7.5073 mm |
| Use Range | No |
| Face/Face | Yes |
| Face Overlap Tolerance | Off |
| Cylindrical Faces | Include |
| Face/Edge | No |
| Edge/Edge | No |
| Priority | Include All |
| Group By | Bodies |
| Search Across | Assemblies |
| Statistics | |
| Connections | 4 |
| Active Connections | 4 |

TABLE 74
Model (C2) > Connections > Contacts > Contact Regions

| Object Name | Contact Region | Contact Region 2 | Contact Region 3 | Contact Region 4 |
|-----------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
| State | Fully Defined | | | |
| Scope | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | |
| Contact | 1 Face | 4 Faces | | 1 Face |
| Target | 1 Face | 2 Faces | | 1 Face |
| Contact Bodies | SYSISolid(URM 4) | | | |
| Target Bodies | SolidModel.1 | | | |
| Definition | | | | |
| Type | Bonded | | | |
| Scope Mode | Automatic | | | |
| Behavior | Program Controlled | | | |
| Trim Contact | Program Controlled | | | |
| Trim Tolerance | 7.5073 mm | | | |
| Suppressed | No | | | |
| Advanced | | | | |
| Formulation | Program Controlled | | | |
| Detection Method | Program Controlled | | | |
| Penetration Tolerance | Program Controlled | | | |
| Elastic Slip Tolerance | Program Controlled | | | |
| Normal Stiffness | Program Controlled | | | |
| Update Stiffness | Program Controlled | | | |
| Pinball Region | Program Controlled | | | |
| Geometric Modification | | | | |
| Contact Geometry Correction | None | | | |
| Target Geometry Correction | None | | | |

Mesh

TABLE 75
Model (C2) > Mesh

| Object Name | Mesh |
|----------------|------------|
| State | Solved |
| Display | |
| Display Style | Body Color |
| Quality | |
| Mesh Metric | None |
| Statistics | |
| Nodes | 128906 |
| Elements | 41518 |
| Model Assembly | |
| Read Only | Yes |

TABLE 76
Model (C2) > Imported Plies

| Object Name | Imported Plies |
|------------------------|----------------|
| State | Solved |
| Definition | |
| Type | Imported Plies |
| Suppressed | No |
| Material | |
| Nonlinear Effects | Yes |
| Thermal Strain Effects | Yes |

CFRP Laminate

SolidModel.1.h5(CFRP Laminate)

LAYERS(CFRP Laminate)

Angle 40.04(CFRP Laminate)

P1_Angle 0(CFRP Laminate)

TABLE 77
Model (C2) > Imported Plies > CFRP Laminate > SolidModel.1.h5(CFRP Laminate) > LAYERS(CFRP Laminate) > Angle 40.04(CFRP Laminate) > P1_Angle 0(CFRP Laminate) > P1L1_Angle 40.04(CFRP Laminate)

| Object Name | P1L1_Angle 40.04(CFRP Laminate) |
|---------------------|---------------------------------|
| State | No State |
| Definition | |
| Name in Source | P1L1_Angle 40.04 |
| ID in Source | P1L1_Angle 40.04 |
| Material | Epoxy Carbon UD Prepreg |
| Thickness | 0.75 mm |
| Angle | 40.04 ° |
| Number of Elements | 1640. |
| Transfer Properties | |
| Source | B5::CFRP Laminate |

Angle 133.31(CFRP Laminate)

P1_Angle 90(CFRP Laminate)

TABLE 78
Model (C2) > Imported Plies > CFRP Laminate > SolidModel.1.h5(CFRP Laminate) > LAYERS(CFRP Laminate) > Angle 133.31(CFRP Laminate) > P1_Angle 90(CFRP Laminate) > P1L1_Angle 133.31(CFRP Laminate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ทำซ้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| State | No State |
| Definition | |
| Name in Source | P1L1 Angle 133.31 |
| ID in Source | P1L1 Angle 133.31 |
| Material | Epoxy Carbon UD Prepreg |
| Thickness | 0.75 mm |
| Angle | 133.31 ° |
| Number of Elements | 1640. |
| Transfer Properties | |
| Source | B5:CFRP Laminate |

Named Selections

CFRP Laminate

TABLE 79
Model (C2) > Named Selections > CFRP Laminate > Named Selections

| | | |
|------------------------------|--|--|
| Object Name | SOLIDMODEL_1_ALL_ELEMENTS_BOT(CFRP Laminate) | SOLIDMODEL_1_ALL_ELEMENTS_TOP(CFRP Laminate) |
| State | Fully Defined | |
| Scope | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | |
| Geometry | 1 Face | |
| Definition | | |
| Send to Solver | Yes | |
| Visible | Yes | |
| Program Controlled Inflation | Exclude | |
| Statistics | | |
| Type | Imported | |
| Total Selection | 1 Face | |
| Surface Area | 4.165e+006 mm ² | |
| Suppressed | 0 | |
| Used by Mesh Worksheet | No | |
| Transfer Properties | | |
| Source | B5:CFRP Laminate | |

Static Structural (C3)

TABLE 80
Model (C2) > Analysis

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Object Name | Static Structural (C3) |
| State | Solved |
| Definition | |
| Physics Type | Structural |
| Analysis Type | Static Structural |
| Solver Target | Mechanical APDL |
| Options | |
| Environment Temperature | 22. °C |
| Generate Input Only | No |

TABLE 81
Model (C2) > Static Structural (C3) > Analysis Settings

| | |
|---------------------------------|--|
| Object Name | Analysis Settings |
| State | Fully Defined |
| Step Controls | |
| Number Of Steps | 1. |
| Current Step Number | 1. |
| Step End Time | 1. s |
| Auto Time Stepping | Program Controlled |
| Solver Controls | |
| Solver Type | Program Controlled |
| Weak Springs | Off |
| Solver Pivot Checking | Program Controlled |
| Large Deflection | Off |
| Inertia Relief | Off |
| Rotordynamics Controls | |
| Coriolis Effect | Off |
| Restart Controls | |
| Generate Restart Points | Program Controlled |
| Retain Files After Full Solve | No |
| Combined Restart Files | Program Controlled |
| Nonlinear Controls | |
| Newton-Raphson Option | Program Controlled |
| Force Convergence | Program Controlled |
| Moment Convergence | Program Controlled |
| Displacement Convergence | Program Controlled |
| Rotation Convergence | Program Controlled |
| Line Search | Program Controlled |
| Stabilization | Off |
| Output Controls | |
| Stress | Yes |
| Strain | Yes |
| Nodal Forces | No |
| Contact Miscellaneous | No |
| General Miscellaneous | No |
| Store Results At | All Time Points |
| Analysis Data Management | |
| Solver Files Directory | C:\Users\ADMIN\Desktop\Assembly Masonry & CFRP Run optimize 2_files\dp0\SYS-1MECH\ |
| Future Analysis | None |
| Scratch Solver Files Directory | |
| Save MAPDL db | No |
| Delete Unneeded Files | Yes |
| Nonlinear Solution | No |
| Solver Units | Active System |
| Solver Unit System | nmm |

TABLE 82
Model (C2) > Static Structural (C3) > Loads

| | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|--------------|----------------|
| Object Name | Remote Displacement 3 | Remote Displacement 4 | Remote Displacement 5 | Force | Displacement | Displacement 2 |
| State | Fully Defined | | | | | |
| Scope | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | |
| Geometry | 1 Face | | | | | |
| Coordinate System | Global Coordinate System | | | | | |
| X Coordinate | -1864.8 mm | -832.28 mm | 200.22 mm | | | |
| Y Coordinate | | -1272.5 mm | | | | |
| Z Coordinate | | 49.998 mm | | | | |
| Location | Defined | | | | | |
| Definition | | | | | | |
| Type | Remote Displacement | | | Force | Displacement | |
| X Component | 0. mm (ramped) | | | | Free | |
| Y Component | 0. mm (ramped) | | | | Free | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|-------------------|------|-----------------|------------------|--------------------------|
| Z Component | | 0. mm (ramped) | | 0. mm (ramped) |
| Rotation X | Free | | | |
| Rotation Y | Free | | | |
| Rotation Z | Free | | | |
| Suppressed | | No | | |
| Behavior | | Deformable | | |
| Rotation X | | Free | | |
| Rotation Y | | Free | | |
| Rotation Z | | Free | | |
| Rotation X | | | Free | |
| Rotation Y | | | Free | |
| Rotation Z | | | Free | |
| Define By | | | Vector | Components |
| Magnitude | | | 4530. N (ramped) | |
| Direction | | | Defined | |
| Coordinate System | | | | Global Coordinate System |
| | | Advanced | | |
| Pinball Region | | All | | |

FIGURE 1
Model (C2) > Static Structural (C3) > Remote Displacement 3

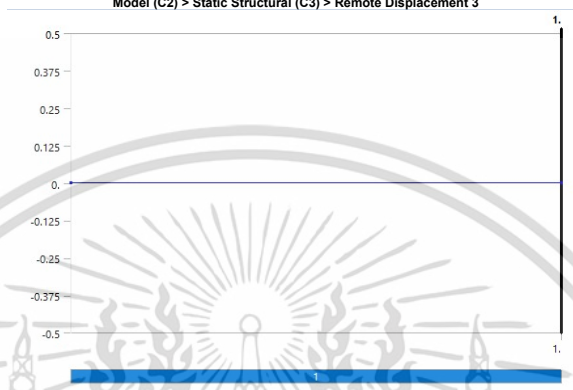


FIGURE 2
Model (C2) > Static Structural (C3) > Remote Displacement 4



FIGURE 3
Model (C2) > Static Structural (C3) > Remote Displacement 5

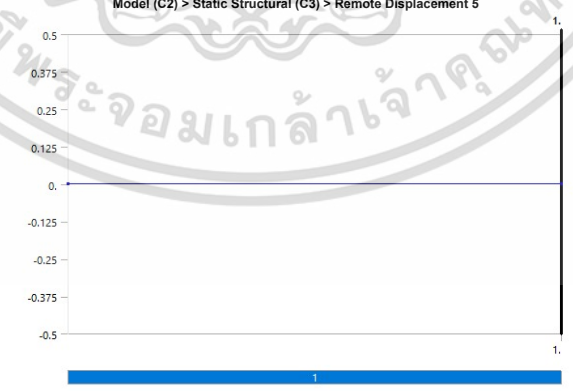


FIGURE 4
Model (C2) > Static Structural (C3) > Force

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

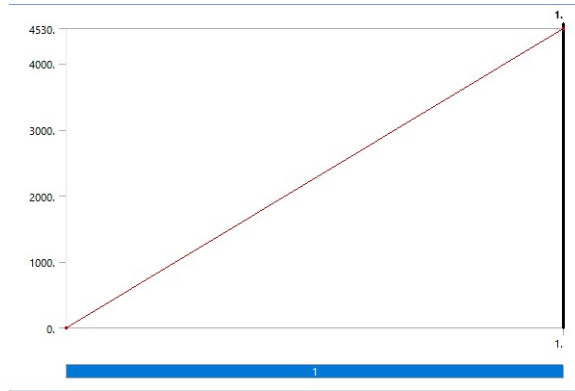


FIGURE 5
Model (C2) > Static Structural (C3) > Displacement

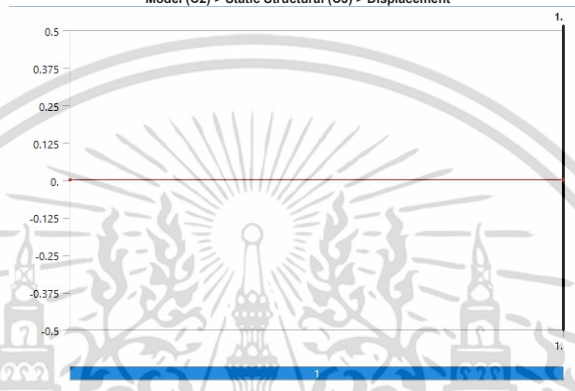
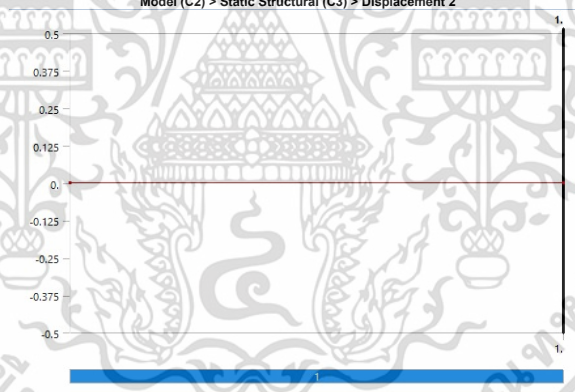


FIGURE 6
Model (C2) > Static Structural (C3) > Displacement 2



Solution (C4)

TABLE 83
Model (C2) > Static Structural (C3) > Solution

| Object Name | Solution (C4) |
|---------------------------------|---------------|
| State | Solved |
| Adaptive Mesh Refinement | |
| Max Refinement Loops | 1. |
| Refinement Depth | 2. |
| Information | |
| Status | Done |
| MAPDL Elapsed Time | 2 m 9 s |
| MAPDL Memory Used | 2.4209 GB |
| MAPDL Result File Size | 77.063 MB |
| Post Processing | |
| Beam Section Results | No |

TABLE 84
Model (C2) > Static Structural (C3) > Solution (C4) > Solution Information

| Object Name | Solution Information |
|---------------------------------|----------------------|
| State | Solved |
| Solution Information | |
| Solution Output | Solver Output |
| Newton-Raphson Residuals | 0 |
| Identify Element Violations | 0 |
| Update Interval | 2.5 s |
| Display Points | All |
| FE Connection Visibility | |
| Activate Visibility | Yes |
| Display | All FE Connectors |
| Draw Connections Attached To | All Nodes |
| Line Color | Connection Type |
| Visible on Results | No |
| Line Thickness | Single |
| Display Type | Lines |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 85
Model (C2) > Static Structural (C3) > Solution (C4) > Results

| | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Object Name | Total Deformation | Maximum Principal Stress | Vector Principal Stress |
| State | Solved | | |
| Scope | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | |
| Geometry | All Bodies | | |
| Sub Scope By | Layer | | |
| Layer | Entire Section | | |
| Position | Top/Bottom | | |
| Definition | | | |
| Type | Total Deformation | Maximum Principal Stress | Vector Principal Stress |
| By | Time | | |
| Display Time | Last | | |
| Calculate Time History | Yes | | |
| Identifier | | | |
| Suppressed | No | | |
| Results | | | |
| Minimum | 2.8556e-003 mm | -2.4045 MPa | |
| Maximum | 1.0366 mm | 10.202 MPa | |
| Minimum Occurs On | SYSISolid(URM 4) | | |
| Maximum Occurs On | SYSISolid(URM 4) | | |
| Information | | | |
| Time | 1. s | | |
| Load Step | 1 | | |
| Substep | 1 | | |
| Iteration Number | 1 | | |
| Integration Point Results | | | |
| Display Option | | | Averaged |
| Average Across Bodies | | | No |

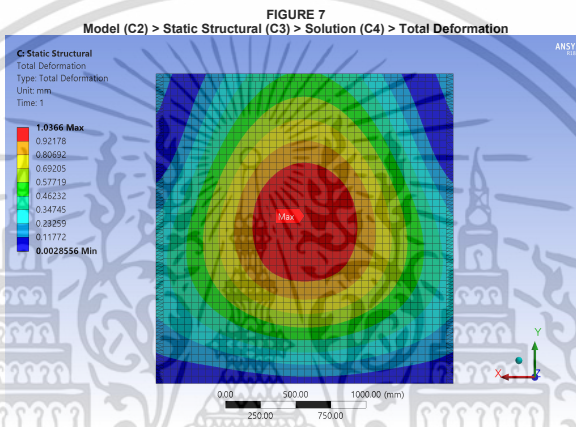


TABLE 86
Model (C2) > Static Structural (C3) > Solution (C4) > Total Deformation

| Time [s] | Minimum [mm] | Maximum [mm] |
|----------|--------------|--------------|
| 1. | 2.8556e-003 | 1.0366 |

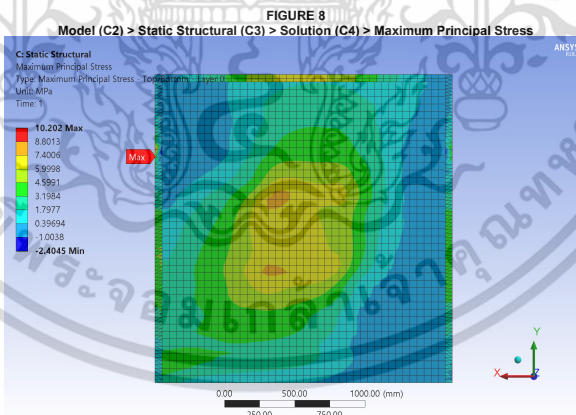


TABLE 87
Model (C2) > Static Structural (C3) > Solution (C4) > Maximum Principal Stress

| Time [s] | Minimum [MPa] | Maximum [MPa] |
|----------|---------------|---------------|
| 1. | -2.4045 | 10.202 |

Material Data

Structural Steel

TABLE 88
Structural Steel > Constants

| | |
|---|---|
| Density | 3.14e-006 kg mm ⁻³ |
| Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion | 1.2e-005 C ⁻¹ |
| Specific Heat | 4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹ |
| Isotropic Thermal Conductivity | 6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹ |
| Isotropic Resistivity | 1.7e-004 ohm mm |

TABLE 89
Structural Steel > Appearance

| | | |
|-----|-------|------|
| Red | Green | Blue |
| 132 | 139 | 179 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ปลอดภัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| |
|-----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength MPa |
| 0 |

TABLE 91
Structural Steel > Compressive Yield Strength

| |
|--------------------------------|
| Compressive Yield Strength MPa |
| 250 |

TABLE 92
Structural Steel > Tensile Yield Strength

| |
|----------------------------|
| Tensile Yield Strength MPa |
| 250 |

TABLE 93
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

| |
|-------------------------------|
| Tensile Ultimate Strength MPa |
| 460 |

TABLE 94
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

| |
|---|
| Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C |
| 22 |

TABLE 95
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

| Alternating Stress MPa | Cycles | Mean Stress MPa |
|------------------------|---------|-----------------|
| 3999 | 10 | 0 |
| 2827 | 20 | 0 |
| 1896 | 50 | 0 |
| 1413 | 100 | 0 |
| 1069 | 200 | 0 |
| 441 | 2000 | 0 |
| 262 | 10000 | 0 |
| 214 | 20000 | 0 |
| 138 | 1.e+005 | 0 |
| 114 | 2.e+005 | 0 |
| 86.2 | 1.e+006 | 0 |

TABLE 96
Structural Steel > Strain-Life Parameters

| Strength Coefficient MPa | Strength Exponent | Ductility Coefficient | Ductility Exponent | Cyclic Strength Coefficient MPa | Cyclic Strain Hardening Exponent |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 920 | -0.106 | 0.213 | -0.47 | 1000 | 0.2 |

TABLE 97
Structural Steel > Isotropic Elasticity

| Temperature C | Young's Modulus MPa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus MPa | Shear Modulus MPa |
|---------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 80000 | 0.12 | 35088 | 35714 | |

TABLE 98
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

| |
|-----------------------|
| Relative Permeability |
| 10000 |

TABLE 99
Plastering > Constants

| |
|---|
| Density [8.5e-007 kg mm ⁻³] |
|---|

TABLE 100
Plastering > Appearance

| Red | Green | Blue |
|-----|-------|------|
| 235 | 209 | 184 |

TABLE 101
Plastering > Isotropic Elasticity

| Temperature C | Young's Modulus MPa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus MPa | Shear Modulus MPa |
|---------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 800 | 5.e-002 | 296.3 | 380.95 | |

TABLE 102
Lightweight Concrete > Constants

| |
|--|
| Density [2.e-007 kg mm ⁻³] |
|--|

TABLE 103
Lightweight Concrete > Appearance

| Red | Green | Blue |
|-----|-------|------|
| 184 | 235 | 197 |

TABLE 104
Lightweight Concrete > Isotropic Elasticity

| Temperature C | Young's Modulus MPa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus MPa | Shear Modulus MPa |
|---------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 600 | 6.e-002 | 227.27 | 283.02 | |

TABLE 105
Glue > Constants

| |
|--|
| Density [8.e-007 kg mm ⁻³] |
|--|

TABLE 106
Glue > Appearance

| Red | Green | Blue |
|-----|-------|------|
| 222 | 222 | 222 |

TABLE 107
Glue > Isotropic Elasticity

| Temperature C | Young's Modulus MPa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus MPa | Shear Modulus MPa |
|---------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 720 | 5.e-002 | 266.67 | 342.86 | |

TABLE 108
Epoxy Carbon UD Prepreg > Density

| |
|-----------------------------|
| Density kg mm ⁻³ |
| 6.16e-007 |

TABLE 109
Epoxy Carbon UD Prepreg > Orthotropic Elasticity

| Young's Modulus X direction MPa | Young's Modulus Y direction MPa | Young's Modulus Z direction MPa | Poisson's Ratio XY | Poisson's Ratio YZ | Poisson's Ratio XZ | Shear Modulus XY MPa | Shear Modulus YZ MPa | Shear Modulus XZ MPa |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 83600 | 3780 | 3780 | 0.11 | 0.16 | 0.11 | 2200 | 1560 | 2200 |

Plastering

Lightweight Concrete

Glue

Epoxy Carbon UD Prepreg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้แก้ไขหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 110
Epoxy Carbon UD Prepreg > Orthotropic Strain Limits

| Tensile X direction | Tensile Y direction | Tensile Z direction | Compressive X direction | Compressive Y direction | Compressive Z direction | Shear XY | Shear YZ | Shear XZ |
|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|
| 9.2e-003 | 3.1e-003 | 0 | -5.3e-003 | -1.72e-002 | 0 | 1.6e-002 | 0 | 0 |

TABLE 111
Epoxy Carbon UD Prepreg > Orthotropic Stress Limits

| Tensile X direction
MPa | Tensile Y direction
MPa | Tensile Z direction
MPa | Compressive X direction
MPa | Compressive Y direction
MPa | Compressive Z direction
MPa | Shear XY
MPa | Shear YZ
MPa | Shear XZ
MPa |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1979 | 26 | 26 | -893 | -139 | -139 | 100 | 50 | 100 |

TABLE 112
Epoxy Carbon UD Prepreg > Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

| Temperature C | Coefficient of Thermal Expansion X direction
C ⁻¹ | Coefficient of Thermal Expansion Y direction
C ⁻¹ | Coefficient of Thermal Expansion Z direction
C ⁻¹ |
|--|---|---|---|
| | -4.e-007 | 3.e-005 | 3.e-005 |
| Zero-Thermal-Strain Reference Temperature
C | 20 | | |

TABLE 113
Epoxy Carbon UD Prepreg > Puck Constants

| Compressive Inclination XZ | Compressive Inclination YZ | Tensile Inclination XZ | Tensile Inclination YZ |
|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.3 | 0.25 | 0.35 | 0.25 |

TABLE 114
Epoxy Carbon UD Prepreg > Additional Puck Constants

| Interface Weakening Factor | Degradation Parameter s | Degradation Parameter M |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0.8 | 0.5 | 0.5 |

TABLE 115
Epoxy Carbon UD Prepreg > Tsai-Wu Constants

| Temperature C | Coupling Coefficient XY | Coupling Coefficient YZ | Coupling Coefficient XZ |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | -1 | -1 | -1 |

TABLE 116
Epoxy Carbon UD Prepreg > Appearance

| Red | Green | Blue |
|-----|-------|------|
| 130 | 177 | 176 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายปิติ กิตติวิทยารัตน์

วัน เดือน ปีเกิด 18 ตุลาคม พ.ศ.2537 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี

ที่อยู่ 2 ซอยรัตนาธิเบศร์ 18 แยก 2 หมู่ 8 ตำบลบางกระสอบ อำเภอเมือง
จังหวัดนนทบุรี 11000 โทร 099-439-3444

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2561-2562 DESIGN ENGINEER บริษัท เอ็น อาร์ เอส คอนซัลติ้ง จำกัด

พ.ศ. 2562-2564 CIVIL ENGINEER บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อบเมนต์ จำกัด (มหาชน)

พ.ศ. 2564-ปัจจุบัน วิศวกรระบบงานโครงสร้างและรางวิ่ง (สายสีม่วง)
บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพจำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้