

การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่และ
แนวทางเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

A STUDY THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH
LARGE OPENING AND CARBON FIBER STRENGTHENING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-097-093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM WITH LARGE OPENING
AND CARBON FIBER STRENGTHENING

PANAT MEEMUANG

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-097-093

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	การศึกษาพฤติกรรมการคายคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ และแนวทางเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
นักศึกษา	นายปานัสม์ มีเมือง
รหัสประจำตัว	60601121
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อำพน จรัสจรุงเกียรติ

บทคัดย่อ

เนื่องจากความต้องการในการใช้ประโยชน์ช่องเปิดในคาน ซึ่งอาจจะต้องทำการเจาะคาน คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อฝังท่อไม่ว่าจะเป็นท่อสายไฟหรือท่อระบบสุขาภิบาล ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของคานมีค่าลดลงหรือเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิด โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในบริเวณ ตำแหน่งต่างๆของแบบจำลอง ภายใต้การทดสอบการดัดแบบสี่จุดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใน แบบจำลอง

จากนั้นนำแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดมาวิเคราะห์และหาแนวทางเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบช่องเปิดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบผล ที่ได้กับแบบจำลองกรณีไม่มีช่องเปิดและแบบจำลองที่มีช่องเปิดที่ไม่มีการเสริมกำลัง โดยผลที่ได้จาก แบบจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อ วิเคราะห์พิจารณาผลที่เกิดขึ้นถึงความเหมาะสมของการเสริมกำลังได้อย่างปลอดภัย

Thesis Title	A study the behavior of reinforce concrete beam with large opening and carbon fiber strengthening
Student	Mr.Panat Meemuang
Student ID.	60601121
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Amphon Jarasjarungkiat

ABSTRACT

Due to utilization requirements, an opening may be drilled into a reinforced concrete beam, for instance, electrical and sanitary pipes installations, etc. Such opening may lead to a loss in the strength of a beam or even a sudden collapse. By means of a finite element model, this research interests in behaviors of a reinforced concrete beam embedded with an opening small and large in the various locations of the model under the four-point bending condition.

Subsequently, a rectangular carbon fiber sheet was attached around the opening of the reinforced concrete. Results from the former and the latter model were compared to investigate influences of the carbon fiber reinforcement around the hole. Then results from the finite element model were compared with deflection and applied load from theoretical calculations to analyse the results of the appropriatness of the reinforcement safely.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ ให้ความรู้ ให้ง่ายคิดและถ่ายถอดประสบการณ์จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นการพัฒนาตัวข้าพเจ้า ซึ่งข้าพเจ้าได้นำมาใช้ในกระบวนการคิด การทำงานในการค้นคว้าอิสระเล่มนี้

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่เป็นกำลังใจ และคอยให้คำปรึกษา และช่วยสร้างแรงผลักดันในการดำเนินทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และคนรอบข้างของข้าพเจ้าที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจและแรงผลักดันจนทำให้การค้นคว้าอิสระเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และหวังอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้ จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในเนื้อหารายละเอียด และนำไปพัฒนาต่อไป

ปานัสม์ มีเมือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีแรงเฉือน.....	4
2.1.1 หน่วยแรงในคาน.....	4
2.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน.....	5
2.2 พฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิด.....	6
2.2.1 คานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กภายใต้แรงดัด.....	6
2.2.2 คานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กภายใต้แรงเฉือน.....	8
2.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใน 3 ลำดับขั้น.....	9
2.4 การวิจัยการเสริมความแข็งแรงของคานเก่าที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่เกิดการเจาะ และเสริมด้วยแผ่น CFRP Plate ในรูปแบบโครงถัก.....	10
2.5 พฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิด.....	11
2.6 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน ด้วย CFRP	17
2.8 การเสริมความแข็งแรงเสาโดยใช้แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย Fiber Reinforced Polymer	18
2.9 การเสริมความแข็งแรงคานที่มีช่องเปิดบริเวณผิวด้านในของช่องเปิด	20
2.10 เสริมความแข็งแรงคานที่มีช่องเปิดบริเวณผิวด้านข้าง	24
2.11 การเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่น FRP ที่ผิวด้านข้าง	25
2.12 คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP)	26
2.13 ไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง	26
2.14 ความเข้มข้นของความเค้นรอบช่องเปิด (Stress Concentrations at Circular Holes) ...	27
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	34
3.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดแบบยังไม่เสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Plate)	35
3.1.1 ขนาดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	35
3.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ	38
3.1.3 เงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลอง	38
3.2 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Plate)	41
3.2.1 ขนาดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ	42
3.2.3 เงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลอง	43
3.3 แรงกระทำต่อแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	44
3.4 การวิเคราะห์ความไวของเมช	47
3.5 วิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	51
3.5.1 การสร้างแบบจำลองและการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 วิธีระบุค่ารายละเอียดในแบบจำลอง	54
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	56
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	56
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวของแบบจำลอง	56
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ทิศทางของแรงบริเวณช่องเปิด	58
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	60
4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดแบบไม่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ และแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยอภิปรายและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลงานวิจัย	66
5.2 อภิปรายผล	67
5.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	73
ภาคผนวก ข. รายงานโปรแกรม	84
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์โมเมนต์(ตัน-เมตร) และการแอนตัวที่กึ่งกลางคาน.....	13
2.2 ตารางแสดงค่ารับน้ำหนักประลัย และรูปแบบการแตกหักของคานแต่ละแบบ	17
2.3 ตารางแสดงค่าจุดคราก (KN) การรับน้ำหนักประลัย (KN) เปอร์เซนต์ของจุดสูงสุดการรับ น้ำหนักระยะการแอนตัวต่ำสุด และรูปแบบการแตกหัก.....	23
3.1.1 สรุบบนแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและแบบมีช่องเปิดที่ไม่เสริม กำลัง.....	36
3.1.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ	38
3.2.1 สรุบบนแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอน ไฟเบอร์.....	41
3.2.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ	43
3.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกจากทฤษฎี.....	45
3.4.1 ขนาดและจำนวนเอลิเมนต์	47
3.5.1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับแบบจำลอง	53
4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดไม่ เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	58
4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด ขนาดใหญ่และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	61

สารบัญรูป

	หน้า
2.1.1	วิธีของหน่วยแรงในคาน..... 4
2.1.2	กำลังต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก..... 6
2.2.1	คานช่วงเดียวภายใต้การตัด..... 7
2.2.2	หน้าตัดคานเต็มรับการตัด..... 7
2.2.3	หน้าตัดคานมีช่องเปิดรับการตัด..... 8
2.2.4	รูปแบบการวิบัติเฉือนในคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก..... 9
2.3.1	พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใน 3 ลำดับชั้น..... 10
2.5.1	คาน BC-ACI ไม่มีช่องเปิด..... 11
2.5.2	คาน BC-PRA ไม่มีช่องเปิด..... 12
2.5.3	คาน BC-OCT มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิด เท่ากับ 17.50 ซม..... 12
2.5.4	คาน BC-OCB มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 13.50 ซม..... 12
2.5.5	คาน BC-ODT มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 18.50 ซม..... 13
2.5.6	คาน BC-ODB มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 12.00 ซม..... 13
2.5.7	การกระจายความเค้นของคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัยรูป..... 14
2.5.8	การวิบัติของคานที่มีการเจาะรูจากแรงเฉือน..... 15
2.6.1	คานช่องเปิดวงกลม (C-cfrp-f)..... 16
2.6.2	คานช่องเปิดสี่เหลี่ยม (S-cfrp-s)..... 16
2.7.1	รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก..... 17
2.7.2	การเสริมกำลังด้วย CFRP..... 18
2.8.1	รูปแบบของโพลีเมอร์เสริมเส้นใย..... 19
2.8.2	เปรียบเทียบความเค้นและความเครียดของทั้ง 3 วัสดุ..... 19
2.9.1	CFRP wrapping inside the opening 1..... 20
2.9.2	CFRP wrapping inside the opening 2..... 21
2.9.3	CFRP wrapping around the opening 1..... 21
2.9.4	CFRP wrapping around the opening 2..... 21
2.9.5	CFRP wrapping around and inside the opening 1..... 22

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
2.9.6 CFRP wrapping around and inside the opening 2.....	22
2.9.7 CFRP wrapping around the opening by double layer 1.....	22
2.9.8 CFRP wrapping around the opening by double layer 2.....	23
2.10.1 รูปแบบการทดสอบการคาน้ำหนักลงบนคานที่ทำการทดสอบ	24
2.12.1 แสดงการหุ้ม CFRP แบบต่างๆ	26
2.14.1 ชิ้นงานที่ไม่มีขอบเขตกับรูวงกลมขนาดเล็ก	28
2.14.2 แสดงความเค้นเชิงซ้อนบริเวณรอบรูวงกลม	30
2.14.3 การไหลของแรงบริเวณรอบรูวงกลม	31
2.14.4 ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมภายใต้แรงกระทำ 2 ทิศทาง.....	31
2.14.5 ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมภายใต้แรงเฉือน	32
2.14.6 ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมภายใต้แรง 2 มิติ	33
3.1.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีช่องเปิด (BC)	36
3.1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS1).....	36
3.1.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2).....	37
3.1.4 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOM1).....	37
3.1.5 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOM2).....	37
3.1.6 จุดรองรับของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	39
3.1.7 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีช่องเปิด (BC).....	39
3.1.8 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS1)	39
3.1.9 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2)	40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.1.10	การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM1).....	40
3.1.11	การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2).....	41
3.2.1	คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2F).....	42
3.2.2	คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2F).....	42
3.2.3	การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2F).....	43
3.2.4	การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2).....	44
3.3.1	ลักษณะแรงกระทำแบบ Four Point Bending.....	44
3.3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและเส้นความโค้ง.....	46
3.3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณ.....	46
3.4.1	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 1 เท่ากับ 6.01 mm.....	47
3.4.2	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 2 เท่ากับ 6.00 mm.....	48
3.4.3	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 3 เท่ากับ 6.02 mm.....	48
3.4.4	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 4 เท่ากับ 5.45 mm.....	48
3.4.5	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 5 เท่ากับ 6.05 mm.....	49
3.4.6	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 6 เท่ากับ 6.04 mm.....	49
3.4.7	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 7 เท่ากับ 6.03 mm.....	49
3.4.8	ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 8 เท่ากับ 6.05 mm.....	50
3.4.9	ความสัมพันธ์ของจำนวนเอลิเมนต์และการแอ่นตัว.....	50
3.5.1	Geometry ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	52
3.5.2	แสดงการแนวติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบรูเจาะ.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 ความสัมพันธ์ของเค้นและความเครียดของคอนกรีต.....	54
3.5.4 เปรียบเทียบพิกัดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับพิกัดหลัก	54
3.5.5 ตัวอย่างการใส่แรงกระทำต่อแบบจำลองในลักษณะเป็นชั้น.....	55
4.1.1 ค่าการแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีช่องเปิด (BC)	56
4.1.2 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดเล็กบริเวณรับแรงเฉือน (BOS1).....	57
4.1.3 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือน (BOS2)	57
4.1.4 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดเล็กบริเวณรับแรงดัด (BOM1).....	57
4.1.5 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงดัด (BOM2).....	58
4.1.6 ทิศทางความเค้นหลักของแบบจำลอง BOS2	59
4.1.7 ทิศทางความเค้นหลักของแบบจำลอง BOM2.....	59
4.2.1 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือน และเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (BOS2F).....	60
4.2.2 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงดัด และเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (BOM2F).....	60
4.3.1 เปรียบเทียบคานตัวอย่างทั้งหมดของช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงเฉือน	61
4.3.2 เปรียบเทียบคานตัวอย่างทั้งหมดของช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงดัด	62
4.3.3 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงเฉือน	63
4.3.4 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOS2 เท่ากับ 283.95 MPa	63
4.3.5 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOS2F เท่ากับ 279.8 MPa	64
4.3.6 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงดัด	64
4.3.7 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOM2 เท่ากับ 420.79 MPa	65
4.3.8 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOM2F เท่ากับ 284.4 MPa	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทั้งอาคารและบ้านเรือนจำเป็นต้องมีการเดินท่อระบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นท่อระบบไฟฟ้า ท่อระบบสุขาภิบาล เป็นต้น ปกติแล้วระบบท่อต่างๆนั้นจำเป็นต้องเดินท่อลอดใต้ท้องคาน ซึ่งในอาคารขนาดใหญ่การเดินท่อลอดใต้ท้องคานส่งผลให้ความสูงในแต่ละชั้นลดลงได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องมีการเจาะช่องเปิดเพื่อเดินท่อผ่านตัวคาน ในอาคารขนาดใหญ่ที่มีจำนวนชั้นมากจะช่วยประหยัดความสูงและค่าก่อสร้างอาคารได้ ซึ่งในการเจาะช่องเปิดในคานส่งผลให้กำลังรับแรงของคานมีค่าลดลง จึงเป็นที่มาของการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลังกับผลการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดทั้งไม่มีการเสริมกำลังและมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยงานวิจัยนี้จะอ้างอิงผลจากการคำนวณค่าการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกจากทฤษฎีที่มีความน่าเชื่อถือ โดยผู้วิจัยจะมุ่งเน้นในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ANSYS เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ในการสร้างแบบจำลองจะแบ่งเป็นสองกรณี คือ 1.สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีช่องเปิดและแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดโดยไม่มีการเสริมกำลัง 2. สร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดโดยมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยทั้งสองกรณีจะกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ศึกษา ทำการวิเคราะห์แบบจำลองและศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดที่ได้มาเปรียบเทียบกัน จากงานวิจัยนี้อาจเป็นแนวทางในการศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมและปลอดภัยที่สุดในการเจาะช่องเปิดและแนวทางการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามลักษณะการใช้งานต่างๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลของการคำนวณทางทฤษฎี
- 1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลังกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
- 1.2.3 หาตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งที่เหมาะสมในการเสริมแรงด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 วิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS
- 1.3.2 พิจารณาคานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว (Singer Reinforced Beam) ไม่พิจารณาเหล็กปลอก
- 1.3.3 พิจารณาคานช่วงเดียว (Simple Beam)
- 1.3.4 ทำการทดสอบด้วยการดัดแบบ 4 จุด (four-point bending)
- 1.3.5 ใช้ Solid-Element ในการวิเคราะห์แบบจำลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นหาข้อมูลจากการวิจัยเรื่องการเสริมความแข็งแรงของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่เกิดการเจาะและเสริมด้วยแผ่น CFRP Plate รวบรวมแนวคิดในการวิเคราะห์และแนวทางในการทำการวิจัยโครงการ
- 1.4.2 สรุปผลงานวิจัยก่อนหน้าและนำข้อมูลที่ศึกษาเพิ่มเติมมาวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลแล้ววางแผนการดำเนินงานและขั้นตอนการวิจัย
- 1.4.3 ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคำนวณค่าการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกในจุดที่มีนัยสำคัญจากหน้าตัดที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
- 1.4.4 ศึกษาหาข้อมูลและทำความเข้าใจโปรแกรม ANSYS เพื่อใช้ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และกำหนดคุณสมบัติต่างๆของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดทั้งแบบไม่มีการเสริมกำลังโปรแกรม ANSYS โดยแรงกระทำที่ระบุมาจากการคำนวณทางทฤษฎี

1.4.6 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังและศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

1.4.7 หาแนวทางและเสริมกำลังของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังและวิเคราะห์ผล

1.4.8 นำผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกัน

1.4.8 สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงพฤติกรรมของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด

1.5.2 ทราบถึงพฤติกรรมของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

1.5.3 ทราบถึงความเหมาะสมของขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดในตัวคาน

1.5.4 เป็นแนวทางในการตรวจสอบเพื่อหาตำแหน่งที่มีความเหมาะสมที่จะสามารถเจาะช่องเปิดได้อย่างปลอดภัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีแรงเฉือน

2.1.1 หน่วยแรงในคาน

ณ หน้าตัดคานใดๆที่รับโมเมนต์ดัด M และแรงเฉือน V จะเกิดหน่วยแรงตั้งฉาก f และหน่วยแรงเฉือน v คำนวณได้จาก

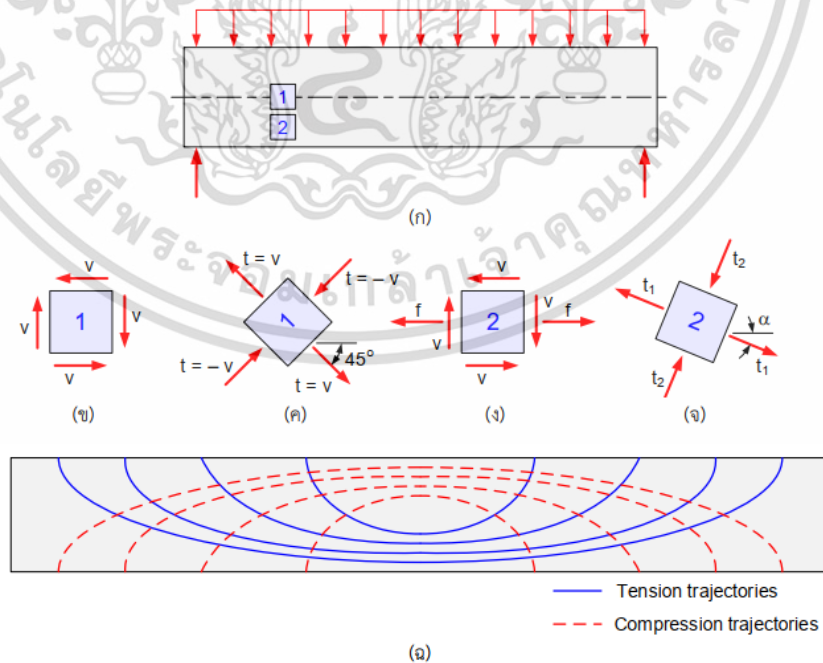
$$F = \frac{My}{I} \quad 2.1$$

$$v = \frac{VQ}{Ib} \quad 2.2$$

เมื่อ y = ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัด

Q = โมเมนต์ของพื้นที่ซึ่งระนาบของหน่วยแรงเฉือนตัดผ่าน

I = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด



รูปที่ 2.1.1 วิธีของหน่วยแรงในคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.2) จะได้ว่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบบนและล่างและมีค่ามากที่สุดที่แกนสะเทินโดยมีการกระจายเป็นรูปพาราโบลา ถ้าเราพิจารณาชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆ (1) บนแกนสะเทินดังในรูปที่ 2.1.1 (ข) จะมีเฉพาแรงเฉือนบนขอบทั้งสองด้านโดยมีขนาดเท่ากันและทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้อยู่ในจุดสมดุล สภาวะหน่วยแรงเฉือนล้วน (Pure Shear) มีถูกหมุนไป 45° จะกลายเป็นหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัด รูปที่ 2.1.1 (ค) ซึ่งหน่วยแรงดึงทแยงมุม (Diagonal Tension) ทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งมีกำลังดึงต่ำกว่ากำลังอัด ดังนั้นรอยร้าวจากการเฉือนล้วนจึงทำมุม 45° สำหรับชิ้นส่วนอื่นที่ไม่ได้อยู่บนแกนสะเทินหรือขอบบนล่าง (2) จะมีทั้งหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงจากการตัดแสดงในรูปที่ 2.1.1 (ง) ซึ่งเราอาจหมุนให้เหลือเพียงหน่วยแรงดึงและอัดเรียกว่าหน่วยแรงหลัก (Principal stress)

2.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน

จากการทดสอบกำลังเฉือนในคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนจำนวนมาก จะได้ผลดังในรูปที่ 2.1.2 พบว่ากำลังเฉือนระบุ (Nominal shear strength) สามารถคำนวณได้จาก

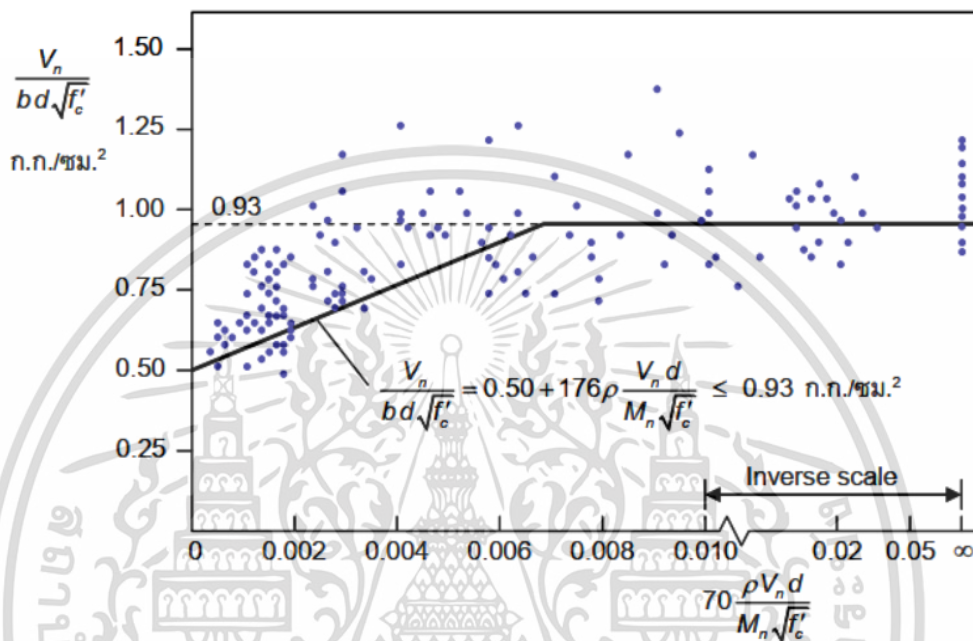
$$\frac{V_n}{bd\sqrt{f'_c}} = 0.50 + 176 \frac{\rho V_{nd}}{M_n \sqrt{f'_c}} \leq 0.93 \quad 2.3$$

ตั้งแต่ปี 1963 *ACI Code* ยอมรับความสัมพันธ์ของสมการ (2.2) ว่าเป็นกำลังเฉือนของคานไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน ดังนั้นจึงนิยาม V_C เป็นกำลังของคานคอนกรีตดังกล่าว โดยใช้ความกว้างของเอวคาน b_w แทน จะได้ว่า

$$V_C = \left(0.50 \sqrt{f'_c} + 176 \frac{\rho_w V_{ud}}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93 \sqrt{f'_c} b_w d \quad 2.4$$

สมการ (2.4) จะเหมาะสำหรับการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์หรือในงานวิจัย แต่สำหรับการคำนวณด้วยมือแล้วจะทำได้ลำบากเพราะค่า ρ_w , V_u และ M_u จะมีค่าไม่คงที่ตลอดช่วงคาน ทำให้ต้องคำนวณ V_c เป็นช่วงๆ ดังนั้น ACI จึงยอมให้ใช้สูตรที่ง่ายกว่าคือ

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad 2.5$$



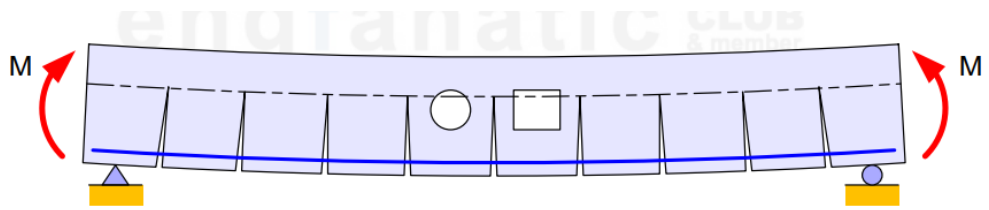
รูปที่ 2.1.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

2.2 พฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิด

ในกรณีที่ช่องเปิดมีขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 25% ของความลึกคาน อาจถือได้ว่าไม่มีผลต่อกำลังของคาน การวิเคราะห์และออกแบบจะเหมือนในกรณีที่ไม่มีช่องเปิดแต่ต้องเสริมเหล็กพิเศษเพื่อช่วยต้านทานการแตกร้าวจากการกระจุกตัวของหน่วยแรง

2.2.1 คานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กภายใต้การตัด

สำหรับคานช่วงเดียวภายใต้การตัดโดยทั่วไปเมื่อหน่วยแรงเกินกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเกิดรอยแตกร้าวแผ่กระจายขึ้นจากท้องคานด้านล่างจนถึงแกนสะเทินดังในรูป 2.2.1



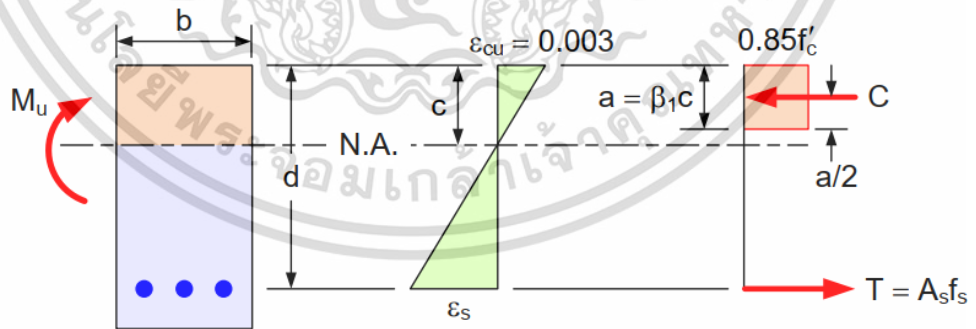
รูปที่ 2.2.1 คานช่วงเดียวภายใต้การค้ำ

สำหรับหน้าตัดคานในรูปที่ 2.2.2 ในกรณีที่เป็น Under RC คือเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนการวิบัติ แรงดึงในเหล็กเสริมและแรงอัดในคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ

$$T = A_s f_y \tag{2.6}$$

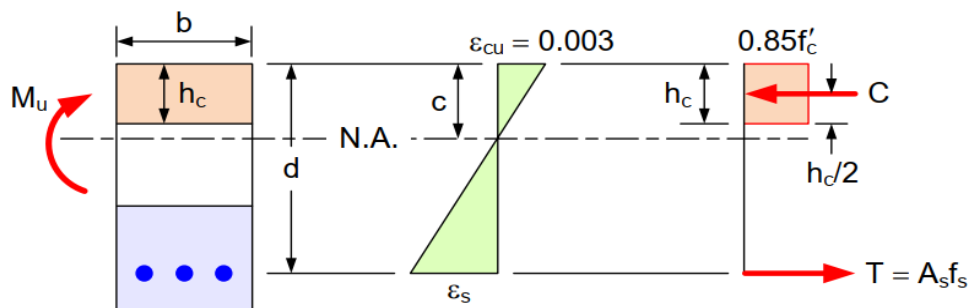
$$C = 0.85 f'_c b a \tag{2.7}$$

- เมื่อ A_s = พื้นที่เหล็กเสริม
- f_y = กำลังครากเหล็กเสริมรับแรงดึง
- f'_c = กำลังอัดประลัยของแท่งกระบอกคอนกรีต
- b = ความกว้างหน้าตัด
- a = ความลึกบล็อกหน่วยแรงอัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.2.2 หน้าตัดคานเต็มรับการค้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.3 หน้าตัดคานมีช่องเปิดรับการดัด

หากพิจารณาหน้าตัดที่มีช่องเปิดดังในรูปที่ 2.2.3 ซึ่งจะเห็นว่าการเจาะช่องเปิดจะไม่ส่งผลกระทบต่อกลไกการรับแรงของหน้าตัดตรงเท่าที่ช่องเปิดอยู่ในโซนแรงดึงของหน้าตัดคานเนื่องจากเป็นโซนที่คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวซึ่งไม่ถูกนำมาคิดในการรับแรงภายในอยู่แล้ว ดังนั้นกำลังโมเมนต์ดัดของคานจึงไม่ได้รับผลกระทบจากช่องเปิดเมื่อความลึกน้อยที่สุดของพื้นที่รับแรงอัด h_c ในรูปที่ 2.2.3 ไม่น้อยกว่าความลึกบล็อกแรงอัด a

$$h_c \geq \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad 2.8$$

ถ้าช่องเปิดเข้ามาในโซนแรงอัด $h_c < a$ จะทำให้พื้นที่รับแรงอัดลดลง ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัด

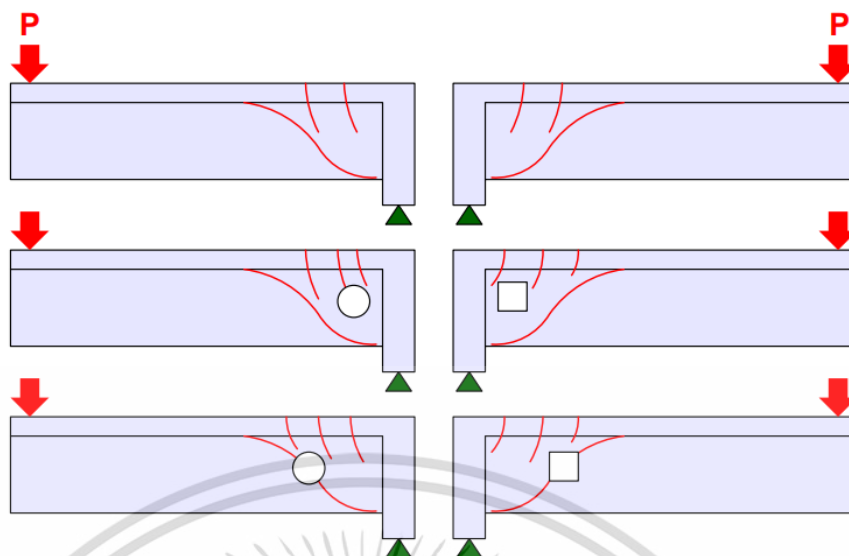
2.2.2 คานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กภายใต้แรงเฉือน

จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีช่องเปิดขนาดเล็กในคาน รูปแบบการวิบัติยังคงเหมือนกับคานหน้าตัดเต็ม แต่เนื่องจากช่องเปิดเป็นส่วนที่อ่อนแอดังนั้นรอยแตกร้าวมักจะผ่านช่องเปิดยกเว้นในกรณีที่ช่องเปิดอยู่ใกล้กับจุดรองรับมาก รูปที่ 2.2.4 แสดงรูปแบบการวิบัติเฉือนของคานที่มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมและวงกลม

กำลังเฉือนคอนกรีต V_c ตามสูตรอย่างง่ายของ ACI คือ

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad 2.9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.4 รูปแบบการวิบัติเฉือนในคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก

ในกรณีของคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก Mansur (1998) เสนอให้เปลี่ยนค่า d ในสมการ (2.2.4) เป็นความลึกสุทธิ $d-d_o$ โดยไม่เกี่ยวกับตำแหน่งของช่องเปิด

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w (d - d_o) \quad 2.10$$

2.3 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใน 3 ลำดับขั้น

คอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วยสองวัสดุ คือ เหล็กและคอนกรีตซึ่งคอนกรีตสามารถเกิดการแตกร้าวหรือไม่เกิดการแตกร้าวก็ได้ และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของทั้งเหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) ข้อต่อไปนี้จะแสดงการตอบสนองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

- ช่วงไม่เกิดการแตกร้าว (Uncracked)

ในคานที่ความยาวสั้นๆ และมีแค่น้ำหนักของตัวคานอาจจะไม่เกิดการแตกร้าว โดยทั่วไปแล้วคานเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติเบื้องต้นของคาน (เหมือนกับไม้หรือคานเหล็ก) และเหล็กเสริมจะไม่นำมาพิจารณา

- ช่วงที่เกิดการแตกร้าวภายใต้แรงกระทำ (Cracked under service)

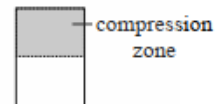
คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ 4000 psi แต่สามารถรับแรงดึงได้เพียง 500 psi โดยทั่วไปแล้วกำลังของคอนกรีตในส่วนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

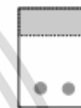
รับแรงดึงจะไม่นำมาพิจารณา คอนกรีตในส่วนที่รับแรงอัดและเหล็กเสริมในส่วนรับแรงดึงจะต้านทานการเปลี่ยนรูปของตัวคาน ความเครียดทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมจะอยู่ต่ำกว่าค่าความต้านทานและจะถูกวิเคราะห์ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic)

- ช่วงกำลังรับน้ำหนักประลัย (Cracked at Ultimate Strength)
เมื่อน้ำหนักกระทำบนคานเข้าใกล้กำลังประลัย

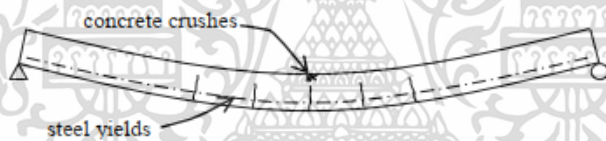
1. Uncracked



2. Cracked under Service Loads



3. Cracked at Ultimate Strength



รูปที่ 2.3.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กใน 3 ลำดับขั้น

2.4 การวิจัยการเสริมความแข็งแรงของคานเก่าที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่เกิดการเจาะและเสริมด้วยแผ่น CFRP Plate ในรูปแบบโครงถัก

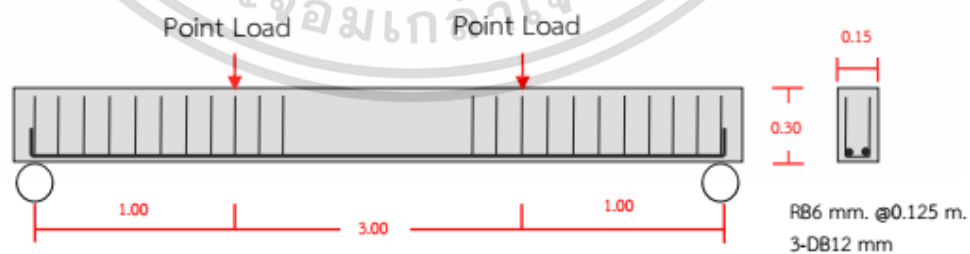
นายภวินท์ วัฒนพิชญ์ไพฑูริย์[2559] ได้ศึกษาพฤติกรรมการศึกษานี้ทำให้เข้าใจข้อแตกต่างของคานที่มีการเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือนหลังจากรับน้ำหนักมาก่อนกับคานใหม่ และหาแนวทางการเสริมความแข็งแรงด้วย Sika CarboDur Plates ซึ่งเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงที่มีความสามารถในการรับแรงได้ดีมีน้ำหนักเบาติดตั้งง่าย การศึกษานี้มุ่งเน้นเพื่อสร้างความมั่นใจในการปรับปรุงอาคารที่มีอายุการใช้งานเป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ผ่านการรับน้ำหนักบรรทุกมาแล้วด้วยน้ำหนักเกิน 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักประลัยของคาน ซึ่งพฤติกรรมของคานไม่ได้อยู่ในช่วงอีลาสติก คือเมื่อคืนสภาพคานไม่สามารถคืนสภาพกลับมาสภาพเดิมก่อนรับน้ำหนักบรรทุก ได้ทำให้ความแข็งแรงของคานมีค่าน้อยกว่าคานที่ผ่านการรับน้ำหนักไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักประลัย ซึ่งอยู่ในช่วงอีลาสติก เมื่อการศึกษานี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานที่ ทำการเจาะช่องเปิดขนาดใหญ่ ในขณะที่คานยังรับน้ำหนักบรรทุกที่ 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักประลัยบริเวณแรงเฉือน มีผลต่อการรับน้ำหนักของคาน และค่าการแอ่นตัวของคาน เนื่องจากการวิบัติด้วยแรงเฉือนจะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจว่าจะหาแนวทางในการเสริมความแข็งแรงอย่างไรให้ใกล้เคียงกับคานที่ไม่ทำการเจาะช่องเปิด ในการศึกษานี้จะเสริมความแข็งแรงด้วย Sika CarboDur Plates ร่วมกับทุกเคมีในการยึดติดกับคาน ก่อนที่จะทำการเจาะช่องเปิด เพื่อจำลองการทดสอบให้เหมือนกับสภาวะใช้งานจริง

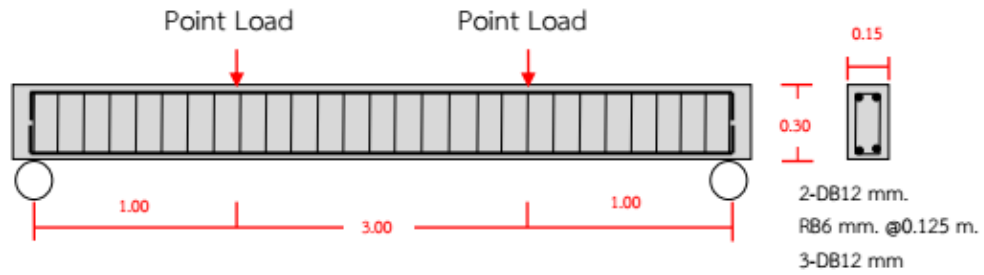
2.5 พฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิด

สหชัย แก่นอากาศ อิทธิพงศ์ พันธนิกุล และ ดร.วนิดา แก่นอากาศ (2545) หัวข้อ พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก จำผลทดลองสรุปได้ว่าช่องเปิดขนาดเล็ก (ไม่เกิน 40% ของความลึกคาน) มีความสามารถในการรับแรงได้ไม่ต่างกับคานที่ไม่มีช่องเปิด แต่ค่าการแอ่นตัวของคานที่มีช่องเปิดอยู่บริเวณเหนือแนวแกนสะเทิน ค่าการแอ่นตัวจะมากกว่าคานปกติ และคานที่มีช่องเปิดใต้แกนสะเทิน เนื่องจากเหนือแกนสะเทินเป็นรูปแบบแรงอัด เมื่อมีช่องเปิดเหนือแกนสะเทิน ทำให้คอนกรีตบริเวณช่องเปิดหายไป ทำให้สูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตไปค่าการแอ่นตัวจึงเพิ่มขึ้น

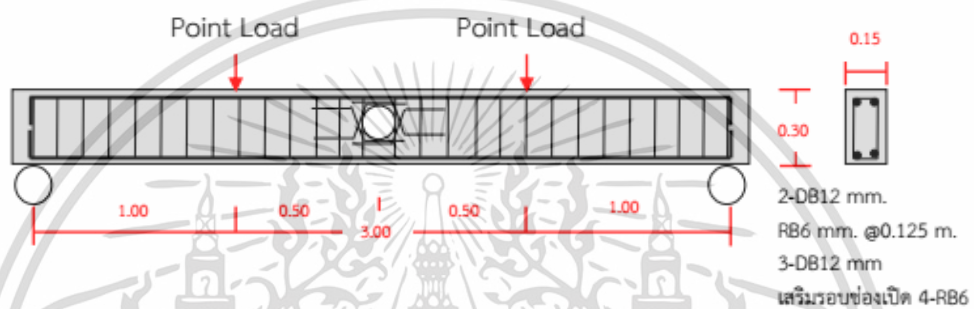


รูปที่ 2.5.1 คาน BC-ACI ไม่มีช่องเปิด

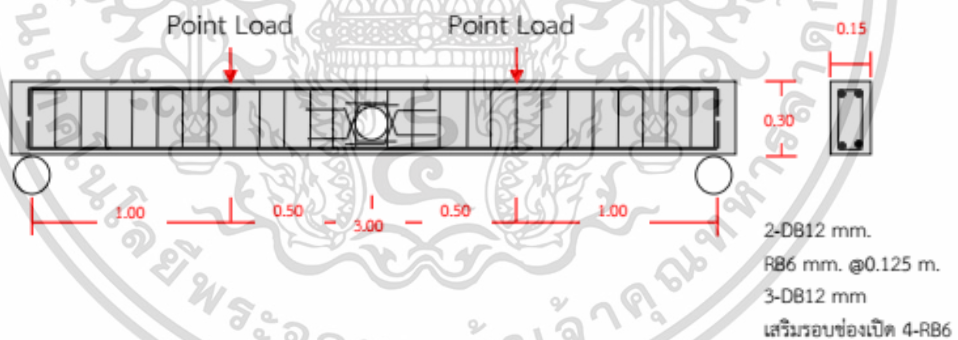
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5.2 คาน BC-PRA ไม่มีช่องเปิด

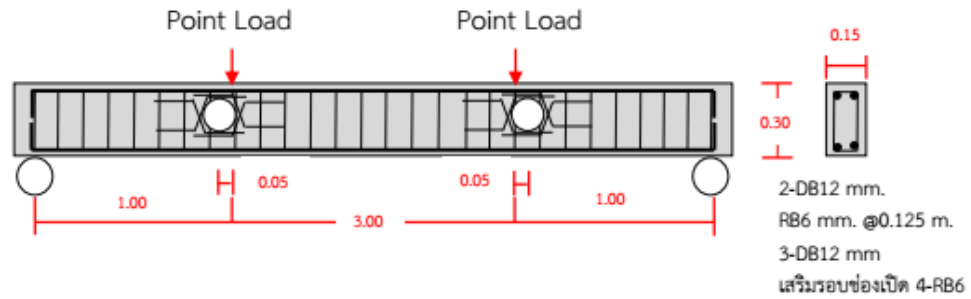


รูปที่ 2.5.3 คาน BC-OCT มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิด เท่ากับ 17.50 ซม

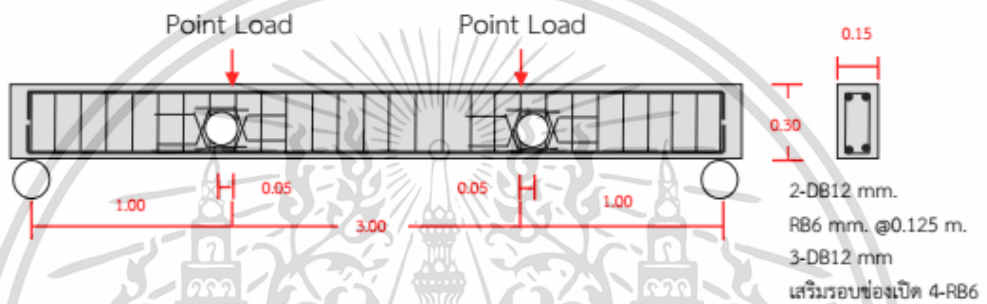


รูปที่ 2.5.4 คาน BC-OCB มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 13.50 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5.5 คาน BC-ODT มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคาน ถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 18.50 ซม.



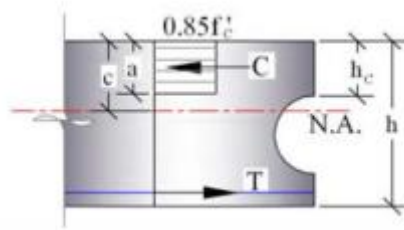
รูปที่ 2.5.6 คาน BC-ODB มีช่องเปิดสูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 12.00 ซม.

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์โมเมนต์(ตัน-เมตร) และการแอนตัวที่กึ่งกลางคาน

โมเมนต์ (ตัน-เมตร)	การแอนตัวที่กึ่งกลางคาน (มิลลิเมตร)					
	BC-ACI	BC-PRA	BC-OCT	BC-OCB	BC-ODT	BC-CDB
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.83	1.13	1.41	2.71	0.65	1.30	1.20
1.34	2.54	2.56	4.12	2.37	3.88	3.56
1.85	4.81	5.85	7.10	4.40	6.81	6.47
2.36	7.46	8.14	11.66	7.92	9.68	9.18
2.87	17.16	16.21	15.95	17.65	25.72	14.84
2.97	30.39	36.05	27.12	33.39	44.00	19.75
3.08	31.66	-	40.57	-	-	30.70
3.18	52.60	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย ความลึกที่เป็นส่วนพื้นที่รับความเค้นอัดของคานเท่ากับ ระยะ a ตามรูป



รูปที่ 2.5.7 การกระจายความเค้นของคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัยรูป

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b} \quad 2.11$$

โดยที่ A_s = พื้นที่เหล็กเสริมรับแรงดึง (cm^2)

f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม

f_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

b = ความกว้างของคาน (cm)

อธิบายค่า h_c = ความกว้างของบนคานถึงช่องเปิด

a = ความลึกของหน้าตัดคานส่วนรับแรงอัด

เนื่องจากค่า $h_c > a$ จึงไม่จำเป็นต้องลดกำลังคาน

$$h_c > \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b} \quad 2.12$$

และสามารถหาค่า

$$M_n = 0.85 f_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad 2.13$$

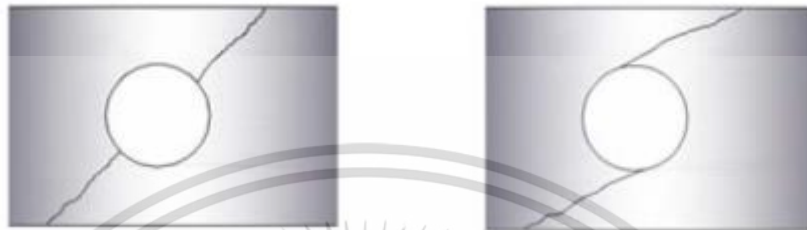
หาก $h_c < a$ จำเป็นต้องลดกำลังของคานโดยใช้ M_n ตามนี้

$$M_n = 0.85 f_c b a \left(d - \frac{h_c}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{h_c}{2} \right) \quad 2.14$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mansur อธิบายว่าคานที่รับแรงเฉือนมีลักษณะการวิบัติ 2 แบบ

1. วิบัติแบบคาน คือ มีรอยร้าวเข้าสู่ศูนย์กลางวงกลม
2. วิบัติแบบโครงข้อแข็ง คือ มีรอยร้าวไม่เข้าสู่ศูนย์กลางวงกลมมีรูปแบบการแตกอิสระ



การวิบัติแบบคาน

การวิบัติแบบโครงข้อแข็ง

รูปที่ 2.5.8 การวิบัติของคานที่มีการเจาะรูจากแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c ที่รับได้เมื่อมีช่องเปิด

$$V_c = 0.35\sqrt{f_c}b(d - d_o) \quad 2.15$$

โดย d_o = ขนาดของช่องเปิด(cm)

กำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก V_s กรณีการวิบัติแบบคาน

$$V_c = V_{sv} + V_{sd} = \frac{A_v f_{yv}}{s} (d_v - d_o) + A_d f_{yd} \sin \alpha \quad 2.16$$

ตามกำลังแรงเฉือนของคาน ACI

$$V_n = V_c + V_s \quad 2.17$$

รับแรงดึงต่ำจะเกิดการแตกร้าวขึ้นเมื่อหน่วยแรงดึงมีค่าเกินกำลังดึง ตำแหน่งและทิศทางของรอยแตกร้าวจะขึ้นกับหน่วยแรงหลัก มีชื่อเรียกตามตำแหน่งและลักษณะของรอยร้าว \times = ห้ามใช้และ \checkmark = ใช้ได้

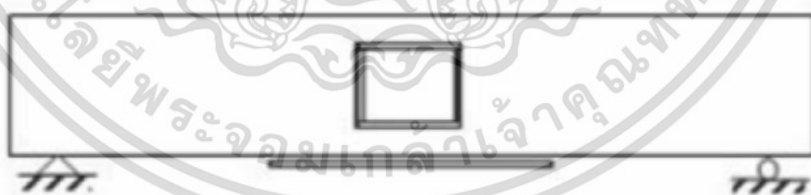
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

S.C.Chin N.Shafiq และ M.F.Nuruddin (2011) ในหัวข้อ Strengthening of RC Beams Containing Large Opening at Flexure with CFRP laminates [4] ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วย CFRP (คาร์บอนไฟเบอร์) โดยศึกษาช่องเปิดขนาดใหญ่ บริเวณกึ่งกลางคาน ซึ่งเป็นส่วนรับแรงดัดสูงสุด จากการทดสอบจะเห็นว่าช่องเปิดวงกลม มีความแข็งแรงมากกว่าช่องเปิดสี่เหลี่ยม เนื่องจากช่องเปิดสี่เหลี่ยมมีมุม ที่เป็นจุดอ่อนแอของช่องเปิด ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของช่องเปิดสี่เหลี่ยมน้อยกว่าวงกลม ส่วนการเสริมความแข็งแรงด้วย CFRP ผลที่ออกมาที่แตกต่างกันมากนั้น น่าจะเกิดจากการเสริมความแข็งแรงที่ต่างกันโดยการเสริมบริเวณผิวข้างคานสามารถเพิ่มกำลังได้มากกว่าเสริมภายในช่องเปิด



รูปที่ 2.6.1 คานช่องเปิดวงกลม (C-cfrp-f)



รูปที่ 2.6.2 คานช่องเปิดสี่เหลี่ยม (S-cfrp-s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

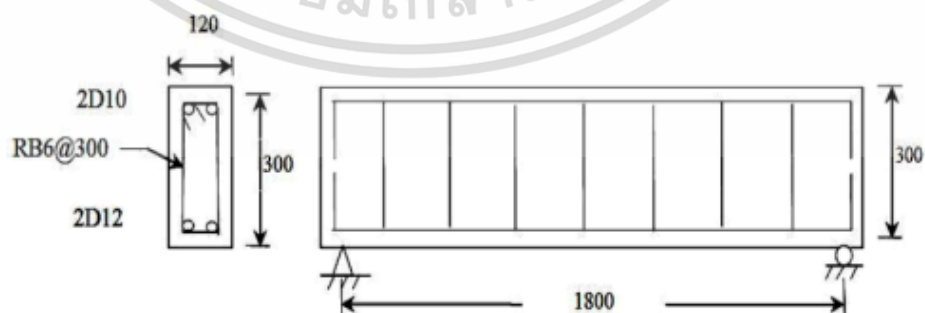
SUMMARY OF TEST RESULTS

Beam Specimens	Ultimate Load, P_u (kN)	Failure Mode
Control beam, CB	115.67	Shear
C-con-f	96.57	Flexure at opening
S-con-f	78.14	Flexure at opening
C-cfrp-f	164.4	Shear at opening
S-cfrp-s	86.07	Flexure at opening

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่ารับน้ำหนักประลัย และรูปแบบการแตกหักของคานแต่ละแบบ

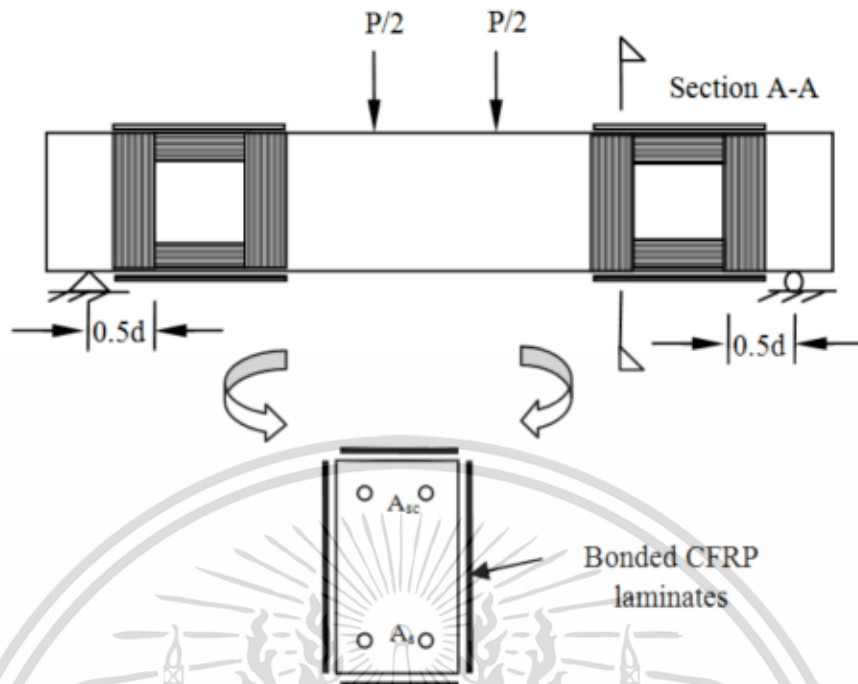
2.7 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือนด้วย CFRP

S.C.Chin, N.Shafiq, M.F.Nuruddin และ S.A.Farhan (2012) ในหัวข้อ Strengthening of RC Beams with Large Openings in Shear by CFRP Laminates ได้ศึกษาการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน จากการทดสอบด้วยการตัดแบบ 4 จุด ที่หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 120 มม. X 300 มม. ยาว 2000 มม. มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 2 ช่อง ที่ตำแหน่งห่างจากจุดรองรับเล็กน้อย ผลปรากฏว่าคานที่ไม่เสริมกำลังสูญเสียกำลังรับแรงเฉือนไปเป็นอย่างมาก และหลังจากเสริมกำลังด้วย CFRP ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น 54% สรุปว่า CFRP สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับคานคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถลดการแตกร้าวและการโก่งตัวอีกด้วย



รูปที่ 2.7.1 รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7.2 การเสริมกำลังด้วย CFRP

2.8 การเสริมความแข็งแรงเสาโดยใช้แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer)

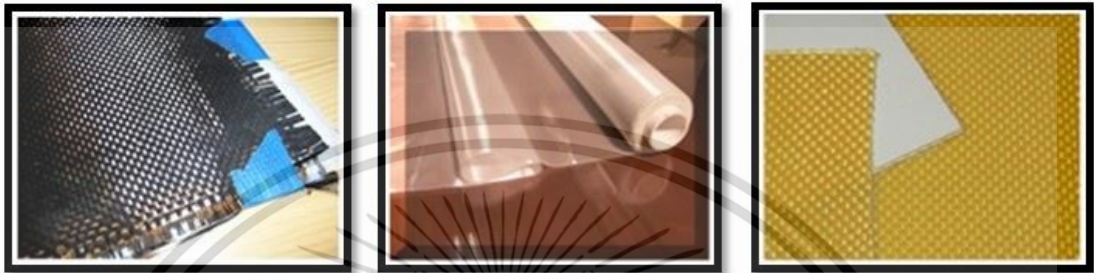
อมร พิมาณมาศ กล่าวว่าแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย เป็นวัสดุใหม่ที่ได้นำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธาเมื่อไม่นานมานี้ โดยนำมาใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างเดิม แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย ทำขึ้นจากเส้นใยที่มีกำลังรับแรงดึงสูงฝังตัวอยู่ในโพลีเมอร์เรซิน ซึ่งทำหน้าที่ประสานเส้นใยให้ทำงานร่วมกัน เส้นใยที่นำมาใช้ในแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยมีหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิต และเส้นใยแก้ว ซึ่งเส้นใยทั้งสามมีความแตกต่างกันในด้านกำลังรับน้ำหนัก ความคงทน และ ราคา เป็นอย่างมาก การเลือกใช้เส้นใยประเภทใดนั้น จึงควรต้องศึกษาให้รอบคอบ

ข้อดีของแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย คือเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานต่อการผุกร่อน มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีข้อเสียคือมีขี้ผึ้งราคาแพงอยู่

การใช้งานวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย นิยมใช้งานใน 3 รูปแบบได้แก่ 1. แบบเพลทหรือลามิเนต (FRP Plate หรือ FRP Laminate) เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 1.0-1.5 มม. เหมาะสำหรับ

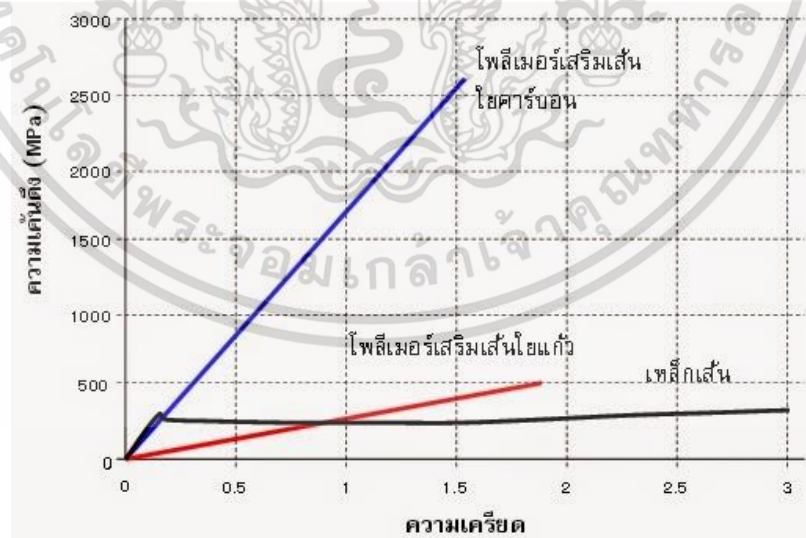
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสริมกำลังพื้นและคานโดยการติดแผ่นเข้ากับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง 2. แบบชีทหรือฟาบริค (FRP Sheet หรือ FRP Fabric) เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 0.1-0.2 มม. ซึ่งถือว่าเป็นแผ่นบางจึงสามารถนำไปพันรอบโครงสร้างได้ และ 3. แบบแท่ง (FRP Rod) มีลักษณะเป็นแท่งกลมคล้ายเหล็กเส้นแต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าเหล็กเส้นทั่วไป



รูปที่ 2.8.1 รูปแบบของโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

หากเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงระหว่างแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็กเส้นทั่วไป จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.8.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในด้านกำลังรับแรงดึง โพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีกำลังสูงสุด รองลงมาคือโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็กเส้นตามลำดับ



รูปที่ 2.8.2 เปรียบเทียบความเค้นและความเครียดของทั้ง 3 วัสดุ

สำหรับการนำแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใย นิยมใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดชีทหรือฟาบริค มาพันหุ้มรอบเสาโดยใช้กาวอีพอกซีเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับเสาอาคารเดิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่นิยมใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เนื่องจาก คาร์บอนมีกำลังรับแรงดึงสูงและมีความคงทนมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการใช้เส้นใยประเภทต่าง ๆ มากขึ้นเช่นเส้นใยแก้ว ซึ่งมีราคาถูกกว่าเส้นใยคาร์บอนมาก แต่อาจมีปัญหาเรื่องความคงทนในระยะยาว การเลือกใช้เส้นใยประเภทใดนั้น ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังนี้ 1. ความแข็งแรง และกำลังรับน้ำหนัก 2. ความคงทน และ 3. ราคา

2.9 การเสริมความแข็งแรงคานที่มีช่องเปิดบริเวณผิวด้านในของช่องเปิด

Rakesh Diggikar Shivaraj Mangalagi และ Rajendrakumar Harsoor (2013) หัวข้อ Behavior of R.C.C. Beam With Rectangular Opening Strengthened by CFRP And GFRP Sheets ได้ศึกษาแนวทางการเสริมความแข็งแรงภายในและด้านข้างช่องเปิดด้วย CFRP และ GFRP ผลที่ออกมาการเสริมความแข็งแรงด้วย CFRP และ GFRP ด้านข้างของคานสามารถเพิ่มกำลังคานได้มากกว่าการเสริมข้างในช่องเปิด อีกทั้ง CFRP สามารถเสริมความแข็งแรงได้มากกว่า GFRP



รูปที่ 2.9.1 CFRP wrapping inside the opening 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9.2 GFRP wrapping inside the opening 2



รูปที่ 2.9.3 CFRP wrapping around the opening 1



รูปที่ 2.9.4 GFRP wrapping around the opening 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9.5 CFRP wrapping around and inside the opening 1



รูปที่ 2.9.6 CFRP wrapping around and inside the opening 2



รูปที่ 2.9.7 CFRP wrapping around the opening by double layer 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9.8 CFRP wrapping around the opening by double layer 2

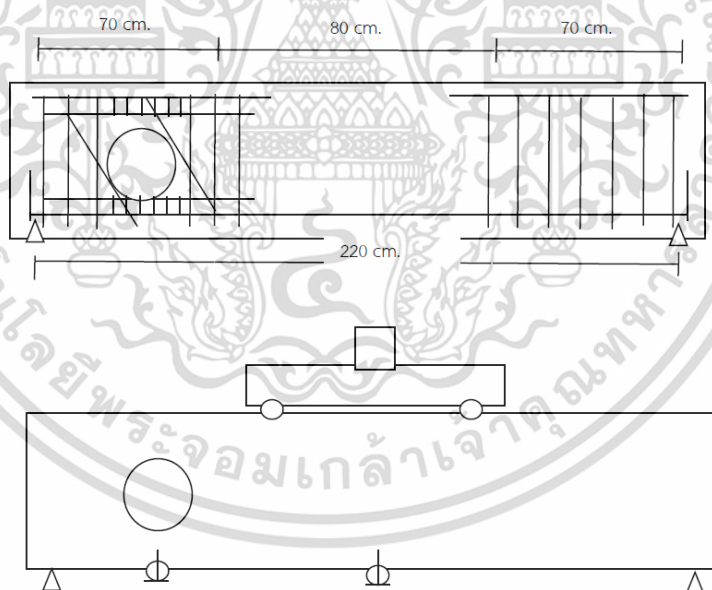
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าจุดคราก (KN) การรับน้ำหนักประลัย (KN) เปอร์เซนต์ของจุดสูงสุดการรับน้ำหนักระยะการแอ่นตัวต่ำสุด และรูปแบบการแตกหัก

Designation on Beam	Type of Strengthened	Initial Crack Load in KN	Ultimate Failure Load in KN	Increase in load carrying capacity in %	Maximum Deflection	Mode of Failure
B1	Control beam	27.10	79.75	-	10.895	Flexure
B2	Non Strengthened Control beam(post opening)	14.14	43.30	-	6.415	Shear
B3	Strengthened around by CFRP	15.76	54.64	26.18	8.550	Shear
B4	Strengthened around by GFRP	15.76	52.21	20.57	8.200	Shear
B5	Strengthened inside by CFRP	17.38	47.35	9.35	6.975	Shear
B6	Strengthened inside by GFRP	17.38	44.92	3.74	6.890	Shear
B7	Strengthened around and inside by CFRP	19.00	65.17	50.50	10.390	Flexure
B8	Strengthened around and inside by GFRP	17.38	59.50	37.41	9.205	Flexure
B9	Strengthened around with double layer by CFRP	19.00	61.12	41.15	9.725	Flexure
B10	Strengthened around with double layer by GFRP	17.38	58.69	35.54	10.510	Flexure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เสริมความแข็งแรงคานที่มีช่องเปิดบริเวณผิวด้านข้าง

Mohammed J. Abed K. Nasharuddin M.A. AlamZakaria CM และ Moatasem M. Fayyadh หัวข้อ DAMAGED RC BEAMS WITH CIRCULAR WEB OPENING REPAIRED USING DIFFERENT CONFIGURATION OF BONDING STEEL PLATE (2012) ได้ศึกษาแนวทางการเสริมความแข็งแรงของคาน ที่มีช่องเปิดวงกลมบริเวณรับแรงเฉือน ด้วยแผ่นเหล็กติดตั้งบริเวณผิวด้านข้าง รอบช่องเปิดของคาน เพื่อศึกษาการเสริมความแข็งแรง ในแนวตั้งกับแนวทแยง ผลเนื่องจากผลการทดลองคานที่มีการเสริมเหล็กแผ่นในแนวตั้ง กับเสริมเหล็กแผ่นในแนวทแยง การวิบัติด้วยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน แต่ลักษณะความเสียหายต่างกันความเสียหาย ที่เกิดขึ้นจากการเสริมเหล็กแผ่นในแนวตั้ง จะเสียหายบริเวณช่องเปิด ส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเสริมเหล็กแผ่นในแนวทแยง จะเสียหายบริเวณคาน ซึ่งเกิดจากการวิบัติของคานเองทำให้คาดการณ์ได้ว่าการเสริมความแข็งแรงในแนวทแยงสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือน ได้ดีกว่าแนวตั้งเนื่องจากมุมใกล้เคียงกับแนวแรงเฉือนทแยง







รูปที่ 2.10.1 รูปแบบการทดสอบการกदन้หนักลงบนคานที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความสามารถของวัสดุแต่ละชนิด และแบบการเสริมเพื่อทำการทดสอบ และ ตารางแสดงค่าการรับน้ำหนักก่อนและหลังของคานาที่ถูกเสริมแต่ละชนิด

Material	Diameter (mm)	Compressive strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa) $\times 10^3$
Concrete	–	26	–	20
Steel bars	12	–	406	200
	10	–	400	200
CFRP	6	–	380	200
	–	–	2800	165
Steel plate	–	–	380	200

Table 2 Configuration types and dimensions

Beam	Repair material	Configuration	Plate Thickness (mm)	plate Width (mm)
B1	CFRP		1.2	100
B2	Steel plate		2	100
B3	Steel plate		3	100
B4	Steel plate		4	100

2.11 การเสริมกำลังของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่น FRP ที่ผิวด้านข้าง

R.A. Hawileh, H.A.Musto, J.A.Abdalla และ M.Z.Naser หัวข้อ Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened on Flexure with Side-boned FRP Laminates (2019) ได้ศึกษาการเสริมกำลังภายนอกคานาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP ด้านข้าง เพิ่มศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่าง ปรากฏว่าการเสริมกำลังด้วยการติดแผ่น FRP ที่ผิวด้านข้างสามารถปรับปรุงความสามารถต้านทานแรงดัดได้ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อประสิทธิภาพในการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP)

สิทธิชัย แสงอาทิตย์(2545) โดยทั่วไปวัสดุ CFRP จะมีคุณสมบัติด้าน รับแรงดึงได้สูงกว่า เหล็กมาก แต่คุณสมบัติด้านการรับแรงอัดจะต่ำกว่าหลายเท่า ซึ่งสามารถเพิ่ม Flexural Capacity และ Shear Capacity ให้กับโครงสร้างคอนกรีตได้โดยตรง แต่การพันรอบเพื่อเพิ่ม Confinement ก็ สามารถเพิ่ม Compressive Strength และ Ductility ให้กับโครงสร้างเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในโครงสร้างคานและพื้น เหล็กเสริมจะทำหน้าที่รับแรงดึง ขณะที่คอนกรีตรับแรงอัดวัสดุ CFRP จะใช้เสริมกำลังด้านรับแรงดึงเช่นเดียวกับเหล็กเสริมการออกแบบจะต้องคำนึงถึง Stress และ Strain ในคอนกรีตและเหล็กเสริมเดิม เนื่องจากน้ำหนักเดิมที่มีอยู่ซึ่งแตกต่างกับการออกแบบใหม่

การเสริมกำลังเอ็นของคานหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการหุ้มแผ่นเส้นใยเสริมแรงอาจทำเป็น 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.12.1

การหุ้ม 4 ด้าน อย่างสมบูรณ์จะให้ประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนการหุ้มที่ลักษณะรูปตัวยูหรือ การหุ้ม 3 ด้าน และ การหุ้ม 2 ด้าน จะให้ประสิทธิภาพรองลงมาตามลำดับ



รูปที่ 2.12.1 แสดงการหุ้ม CFRP แบบต่างๆ

2.13 ไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลัง

ไฟเบอร์กลาส F.R.P. (Fiber glass Reinforced Plastic) คือ ใยแก้วชนิดพิเศษ ให้ ความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile Strength) ได้สูงเมื่อนำมาประสานเข้ากับสารสังเคราะห์ พลาสติก ชนิด Polyester Resin หรือ Epoxy Resin ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มีคุณสมบัติ เฉพาะตัว มีความแข็งแรงยืดหยุ่นได้ น้ำหนักเบา บาง ทนทานการผุกร่อนต่อฤทธิ์สารเคมี กรด ต่าง ทนทานต่อ สภาพอากาศไม่เป็นสนิม อายุการใช้งานยาวนานกว่าวัสดุชนิดอื่น ใช้เป็นภาชนะบรรจุของเหลว, เคมี,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหาร, ยา, ใช้เคลือบผิวโลหะ, ปูนซีเมนต์และไม้ สามารถทำรูปร่างซับซ้อน ขนาดใหญ่ ซ่อมแซม และดัดแปลงได้มีมาตรฐานการควบคุมและการระบุใช้ที่แน่นอน

การเสริมกำลังโดยใช้วัสดุ FRP (Fiber Reinforced Polymer) สามารถทำได้โดยไม่ทำให้พื้นที่ใช้สอยเดิมถูกเปลี่ยนแปลงและไม่จำเป็นต้อง เพิ่มเสา FRP composite เป็นวัสดุที่มีกำลังสูงกว่าเหล็กหรือคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณน้ำ หนักเท่าๆกัน FRP Composite ประกอบด้วยสองส่วนคือ เส้นใย(ที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด คือ Carbon Fiber, Glass Fiber และ Aramid Fiber) และกาว (ที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด Epoxy, Vinylester and Polyester) โดยทั่วไปแผ่น FRP Composite มีความหนาตั้งแต่ 0.1 mm. จนถึง 10 mm. ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของ Fiber ที่ใช้

การเสริมกำลังโครงสร้างโดยใช้ FRP Composites คือ การนำแผ่น FRP ไปยึดติดกับส่วนต่างๆของโครงสร้างที่ต้องการเพิ่มกำลังโดยใช้กาวพิเศษในการ ยึดติดแผ่น FRP ก่อนการเสริมกำลังโครงสร้างเดิมต้องได้รับการวิเคราะห์โดยวิศวกรผู้ เชี่ยวชาญก่อน เพื่อที่เลือกชนิดของ Fiber, ชนิดของ Resin, ทิศทางของ Fiber, ความยาวของแผ่น FRP, จำนวนชั้นของแผ่น FRP ที่ต้องยึดติดซ้อนกัน รวมถึงตำแหน่งโครงสร้างที่ยึดติดแผ่น FRP ให้เหมาะสม

2.14 ความเข้มข้นของความเค้นรอบช่องเปิด (Stress Concentrations at Circular Holes)

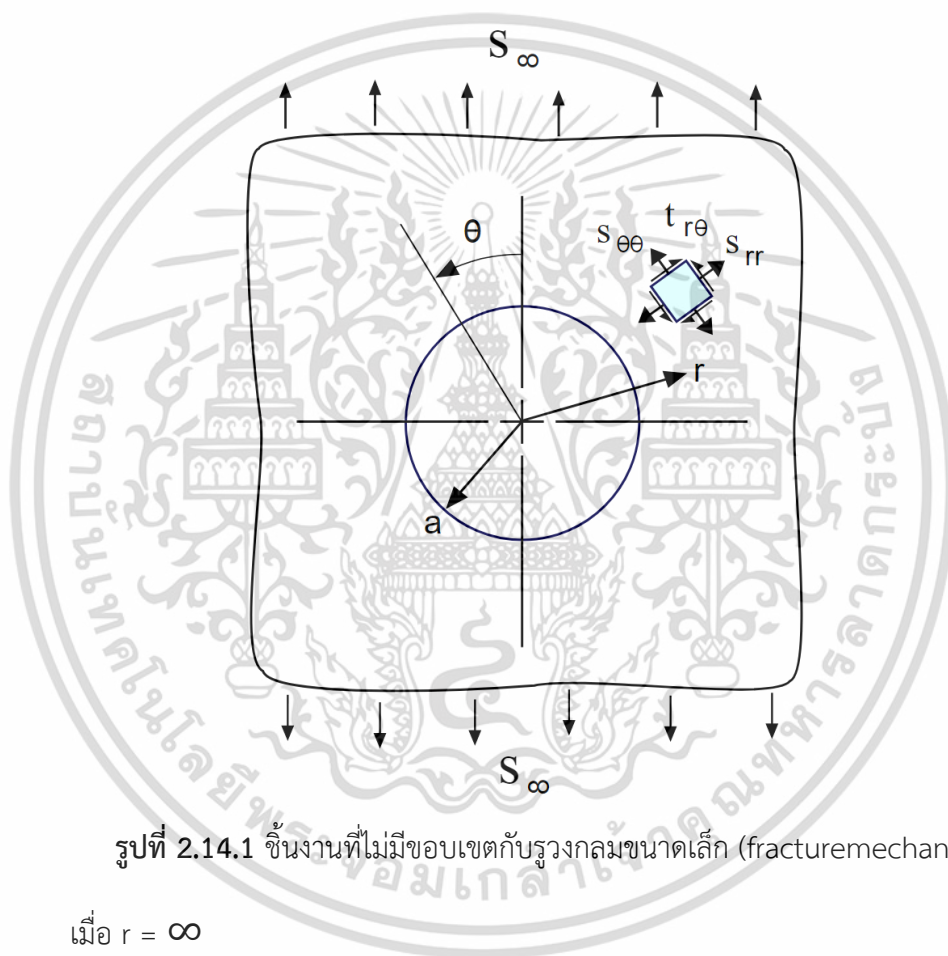
การวิเคราะห์ความเข้มข้นของความเค้นเริ่มศึกษาในช่วงต้นปี พ.ศ. 2441 โดย Ernst Gustav Kirsch's การหาคำตอบในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Solution) ของความเค้นบริเวณรอบรูในชิ้นงานที่ไม่มีขอบเขต (Infinite Plate) อธิบายการหาค่าความเข้มข้นของความเค้นกล่าวถึงความเค้นจาก 3 ปัจจัยที่รู้จักกันดี บริเวณรูวงกลมภายใต้แรงตามแนวแกน และกล่าวอีกว่าในความเป็นจริงความเข้มข้นของความเค้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่สองถึงสี่สำหรับเงื่อนไขแรงที่ซับซ้อน การแก้ปัญหาของ Kirsch ในขั้นพื้นฐานเริ่มต้นด้วยแรงดึงตามแนวแกนเดียว จากนั้นจึงใช้เทคนิคการซ้อนทับ (Superposition) สำหรับกรณีที่ชิ้นงานอยู่ภายใต้แรงดึงและแรงเฉือนที่ซับซ้อน

วิธีการแก้ปัญหาของ Kirsch สำหรับความเค้นที่รูวงกลมในกรณีแรงดึงแกนเดียวในชิ้นงานที่ไม่มีขอบเขต แรงดึงแกนเดียวแสดงในรูปแบบของความเค้น (σ). รัศมีของรูวงกลม (a). รัศมีของพิกัดที่สนใจ (r). และ $\theta = 0$ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ขนานไปกับแรงดึง ดังรูปที่ 2.14.1 เราจะเห็นว่าความเค้นต่างๆ เกิดขึ้นที่ $\theta = \pm 90^\circ$ การหาค่าความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{\infty}}{2} \left(1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) + \frac{\sigma_{\infty}}{2} \left(1 - 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \quad 2.18$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{\infty}}{2} \left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) - \frac{\sigma_{\infty}}{2} \left(1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \quad 2.19$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_{\infty}}{2} \left(1 + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \sin 2\theta \quad 2.20$$



รูปที่ 2.14.1 ชิ้นงานที่ไม่มีขอบเขตกับรูวงกลมขนาดเล็ก (fracturemechanics.org)

เมื่อ $r = \infty$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{\infty}}{2} + \frac{\sigma_{\infty}}{2} \cos 2\theta \quad 2.21$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{\infty}}{2} - \frac{\sigma_{\infty}}{2} \cos 2\theta \quad 2.22$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_{\infty}}{2} \sin 2\theta \quad 2.23$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\sigma_{rr} = \sigma_{\infty}$ เมื่อ $\theta = 0^\circ$ และ 180° ในขณะที่ $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\infty}$ เมื่อ $\theta = \pm 90^\circ$ ส่วนความเค้นเฉือน (Shear Stress $\tau_{r\theta}$) เป็นเพียงผลจากการแปลงพิกัด

เมื่อ $r = a$

$$\sigma_{rr} = 0 \quad 2.24$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\infty}(1 - 2 \cos 2\theta) \quad 2.25$$

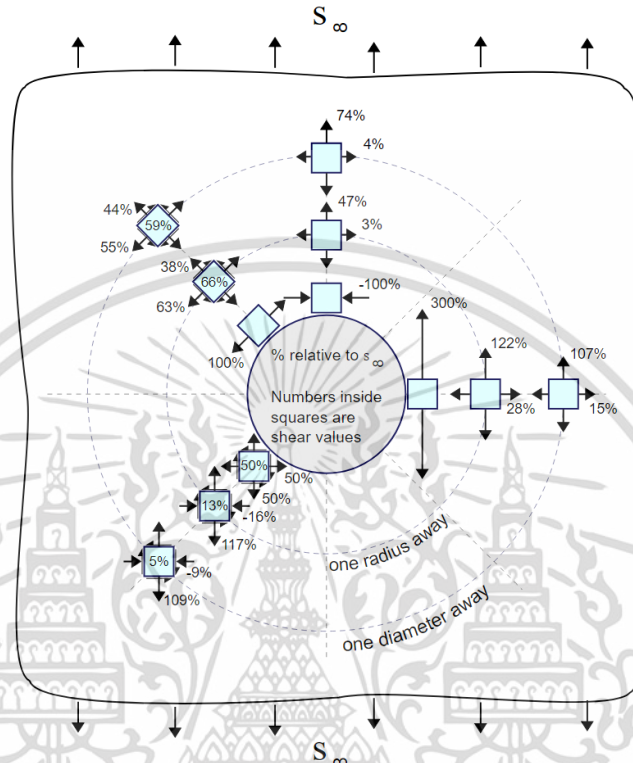
$$\tau_{r\theta} = 0 \quad 2.26$$

โดย σ_{rr} และ $\tau_{r\theta}$ จะเท่ากับ 0 ที่รูวงกลม เพราะเป็นพื้นผิวอิสระ (Free Surface) จากสมการ 2.24 ถึง 2.26 กล่าวได้ว่าที่ตำแหน่ง $\theta = 0$ จะได้ $\sigma_{\theta\theta} = -\sigma_{\infty}$ เครื่องหมายลบแสดงถึงความเค้นในทิศทางที่เป็นแรงอัด และที่ $\theta = \pm 90^\circ$ จะได้ $\sigma_{\theta\theta} = 3\sigma_{\infty}$ นี่คือนิวตันที่มีความเค้นมากที่สุดบริเวณรอบรูวงกลม ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปเปรียบเทียบกับจุดครากของวัสดุ จากสถานะนี้ความเค้นที่ได้จากแรงดึงแกนเดียว จะเป็น effective หรือ von mises stress ที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับจุดคราก (Yield Strength) ได้โดยตรง

รูปที่ 2.14.2 แสดงถึงความเค้นเชิงซ้อนรอบรูวงกลม ที่ห่างออกไปในระยะ one radius away และ one diameter away ตามภาพ ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) จะมีความสมมาตรด้านซ้ายและขวา ดังนั้นในเงื่อนไขความเค้นที่ด้านใดด้านหนึ่งจะมีผลกับอีกด้านหนึ่งด้วย จึงสะท้อนให้เห็นในสมการ $\cos 2\theta = \cos(-2\theta)$ ส่วนความเค้นเฉือนที่ด้านหนึ่งจะเป็นค่าลบของอีกด้านหนึ่งดัง polar สมการ $\sin 2\theta = -\sin(-2\theta)$

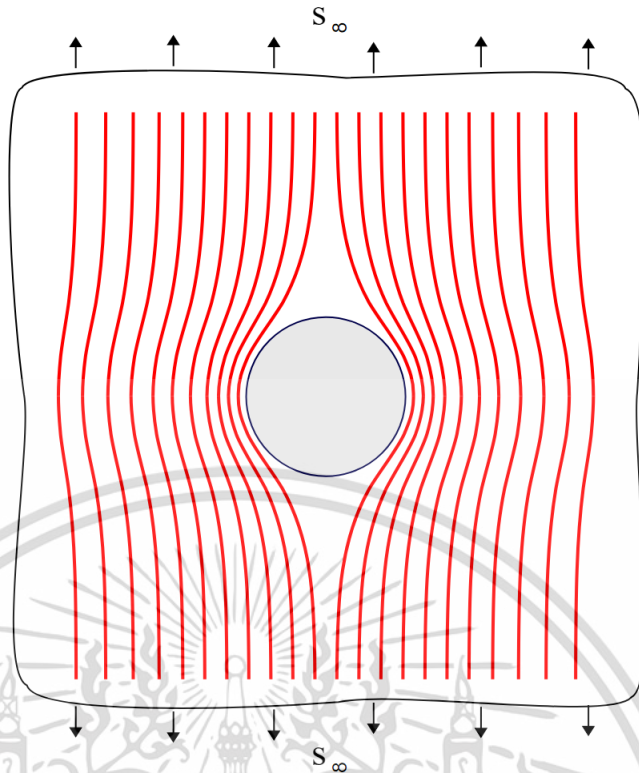
จากรูปไม่มีความเค้นเฉือนที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ดังนั้นความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) จะเป็นความเค้นหลัก (Principal Stress) ในมุมที่กล่าวมานี้ ส่วนที่ตำแหน่ง $\theta = 45^\circ, 135^\circ$, ก็เช่นเดียวกัน คือมีค่าความเค้นหลักเหมือนกัน มีเพียงการแสดงผลเท่านั้นที่ต่างกันเนื่องจากทิศทางที่แตกต่างกันของระบบพิกัด สะท้อนให้เห็นถึงทิศทางของชิ้นส่วนที่เปลี่ยนที่พิจารณา ในตำแหน่ง 45° เมื่อเทียบกับรูวงกลม ดังนั้นระบบพิกัดจะเป็นระบบเชิงขั้ว (Polar Coordinate) ความเค้นที่อยู่

ตำแหน่ง $\theta = 135^\circ$ ทิศทางของสี่เหลี่ยมไม่ได้ขนาดไปกับรูวงกลม ดังนั้นระบบพิกัดจะแสดงใน รูปแบบ x, y และ z



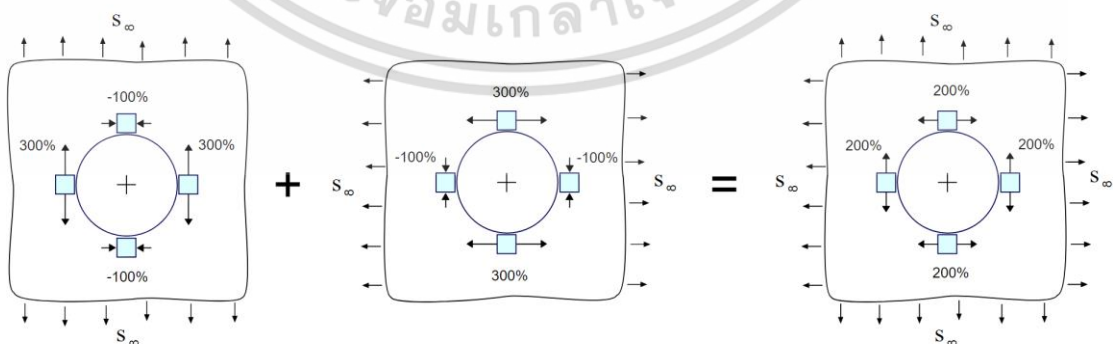
รูปที่ 2.14.2 แสดงความเค้นเชิงซ้อนบริเวณรอบรูวงกลม (fracturemechanics.org)

รูปที่ 2.14.3 แสดงถึงขนาดของรูวงกลมว่าไม่อิทธิพลต่อความเค้นบริเวณรอบรูวงกลม รูวงกลมขนาดเล็กจะมีความเข้มของความเค้นเท่ากับรูวงกลมขนาดใหญ่ เส้นโค้งสีแดงในภาพแสดงการไหลของแรงบริเวณรอบรูวงกลมคล้ายกับการไหลของกระแสลม ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างเส้นโค้งจะอยู่ที่บริเวณข้างรูวงกลมหมายถึงค่าความเค้นมีข้างมาก ความสูงของรูวงกลมจะทำให้การไหลของแรงเกิดการเบี่ยงเบนไปรอบรูวงกลมการไหลต้องเปลี่ยนเส้นทางมากขึ้นสำหรับรูที่กว้างขึ้นแต่ในส่วนของรูวงกลมเมื่อความกว้างมากขึ้นความสูงก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ทำยที่สุดแล้วความเข้มของความเค้นจะมีค่าเท่าเดิมเสมอ



รูปที่ 2.14.3 การไหลของแรงบริเวณรอบรูวงกลม (fracturemechanics.org)

ในสถานะสมดุลจะประกอบไปด้วยแรงดึงที่เท่ากันทั้งในทิศทางแกน x และ y ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมสามารถหาได้ด้วยวิธีการซ้อนทับกัน (Superposition Solution) ซึ่งทำได้เนื่องจากมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14.4 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของความเค้นบริเวณรูวงกลมที่อยู่ภายใต้แรงดึงแบบสมดุลเพียง 2 เท่า ไม่ใช่ 3 เท่าในกรณีแรงดึงลักษณะนี้

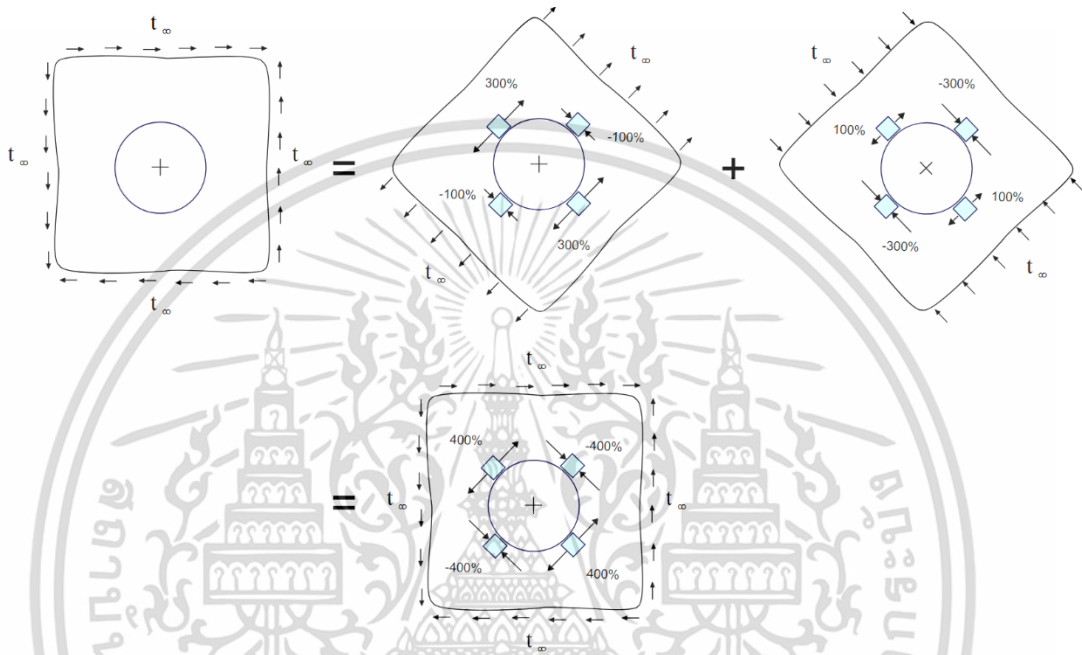


รูปที่ 2.14.4 ความเค้นบริเวณรูวงกลมภายใต้แรงกระทำ 2 ทิศทาง

(fracturemechanics.org)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้แรงเฉือนผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถกำหนดได้โดยวิธีการซ้อนทับกันของความเค้นหลัก รูปที่ 2.14.5 แสดงสองค่าความเค้นหลัก (Principal Stress) ในทิศทาง $\pm 45^\circ$ อันแรกจะมีค่าเป็นบวกและเป็นตัวเลขเท่ากับค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) อันที่สองมีค่าเป็นลบผลที่ได้คือแรงเฉือนนำไปสู่ความเข้มข้นของความเค้น ที่ 4 เท่า บริเวณรอบรูวงกลมดังรูป



รูปที่ 2.14.5 ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมภายใต้แรงเฉือน (fracturemechanics.org)

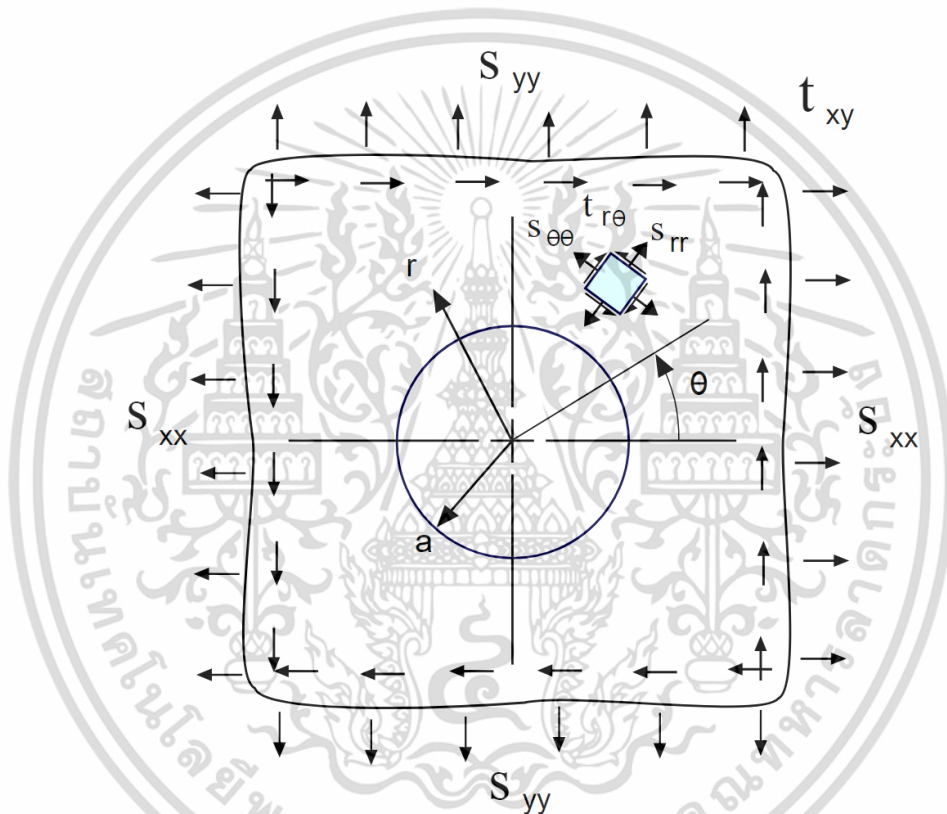
ภายใต้แรงกระทำ 2 มิติ คือทั้งแรงดึงและแรงเฉือนการหาด้วยวิธีการซ้อนทับกันก็สามารถใช้วิเคราะห์ในกรณีนี้ได้เช่นกัน ในกรณีนี้ σ_∞ จะถูกแทนที่ด้วย σ_{xx} และ σ_{yy} และในที่สุดความเค้นหลักทั้งทิศทางบวกและลบ จะเท่ากับค่าความเค้นเฉือน

$\theta = 0^\circ$ จะสอดคล้องกับ σ_{xx} แล้ว $\theta + 90^\circ$ จะแทนที่ในส่วนของ θ และ $\sigma_\infty = \sigma_{yy}$
ในแกน $\theta = \pm 45^\circ$ ใช้กับความเค้นหลัก τ_{xy}

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \left(1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right) + \left(1 - 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right) \quad 2.27$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \left(1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2\right) - \left(1 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right) \quad 2.28$$

$$\tau_{r\theta} = \left(1 + 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\right) \quad 2.29$$



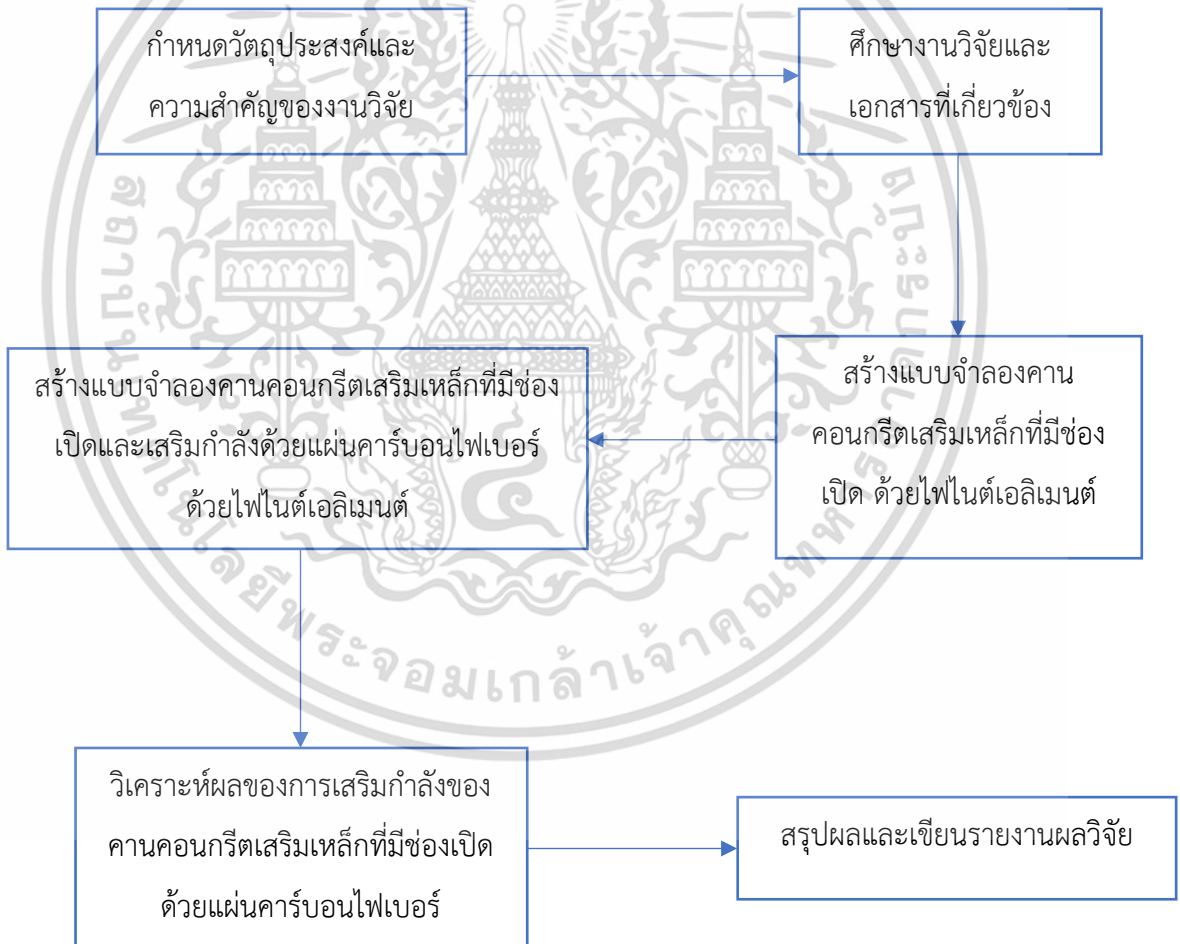
รูปที่ 2.14.6 ความเค้นบริเวณรอบรูวงกลมภายใต้แรง 2 มิติ (fracturemechanics.org)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกคือการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด ส่วนที่สองคือการหารแนวทางเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(CFRP Plate) ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทางผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม ANSYS (Static Structural Analysis) ในการวิเคราะห์ ซึ่งรายละเอียดต่างๆกล่าวถึงในลำดับถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดแบบยังไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Plate)

3.1.1 ขนาดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก มีหน้าตัดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 210 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 210 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เสริมเหล็กรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย DB20 ชั้นคุณภาพ SD40 กำลังครากมีค่าไม่น้อยกว่า 4000 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงดึงประลัยไม่น้อยกว่า 5700 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ลักษณะของช่องเปิดที่พิจารณาเป็นลักษณะวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร โดยแบบจำลองทั้งหมดจะมีทั้งหมด 5 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

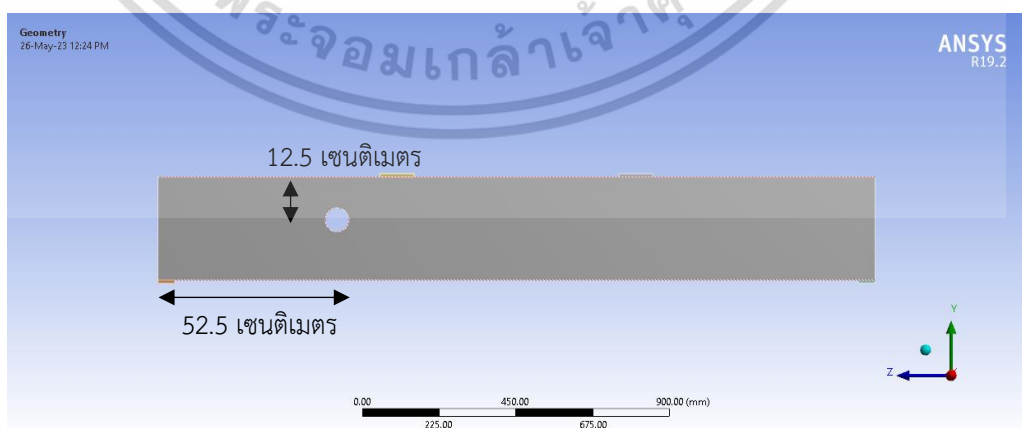
1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิด (BC)
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็กหรือไม่เกิน 25% ของความสูงคานคอนกรีตที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS1)
3. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หรือเกิน 25% ของความสูงคานคอนกรีตที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2)
4. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็กหรือไม่เกิน 25% ของความสูงคานคอนกรีตที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM1)
5. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หรือเกิน 25% ของความสูงคานคอนกรีตที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2)

ตารางที่ 3.1.1 สรุปแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและแบบมีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลัง

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ขนาดช่องเปิด	ตำแหน่งช่องเปิด	หมายเหตุ
1	BC	-	-	-
2	BOS1	75 mm	525 mm จากขอบคานคอนกรีต	Shear Zone
3	BOS2	150 mm	525 mm จากขอบคานคอนกรีต	Shear Zone
4	BOM1	75 mm	กึ่งกลางคาน	Bending Zone
5	BOM2	150 mm	กึ่งกลางคาน	Bending Zone

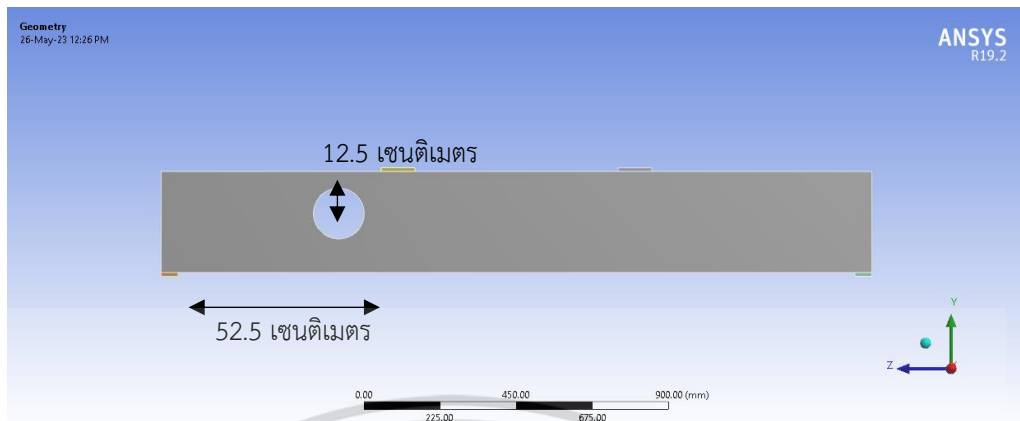


รูปที่ 3.1.1 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิด (BC)

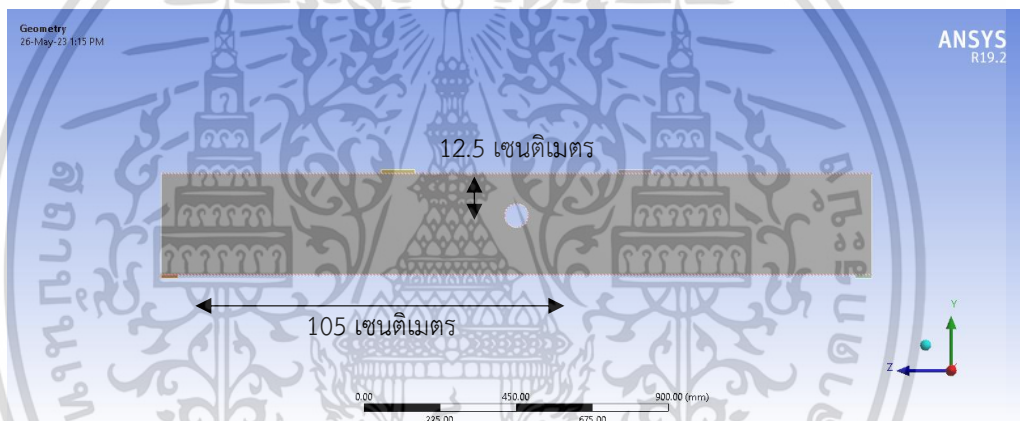


รูปที่ 3.1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2)



รูปที่ 3.1.4 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOM1)



รูปที่ 3.1.5 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOM2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 คุณสมบัติของวัสดุ

ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E), โมดูลัสของแรงเฉือน (shear Modulus, G), อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio, ν), และความหนาแน่นของวัสดุ (Density, ρ) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ

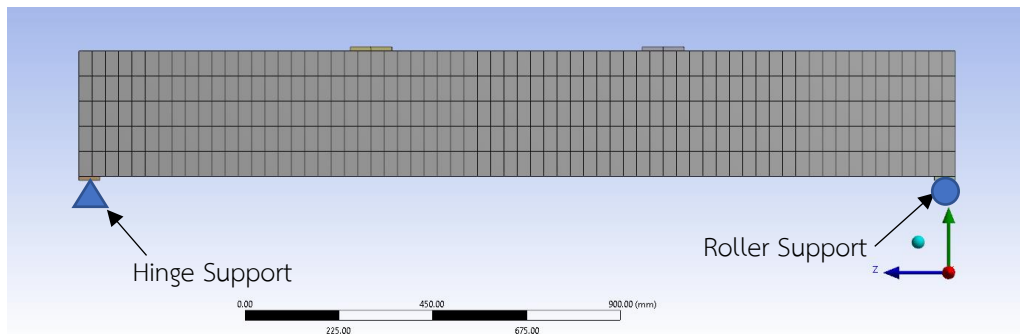
วัสดุ	E (MPa)	G (Mpa)	ν	ρ (kg/m ³)
คอนกรีต	25000	9615	0.30	2300
เหล็กเสริม	200000	76923	0.30	7850

3.1.3 เงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลอง

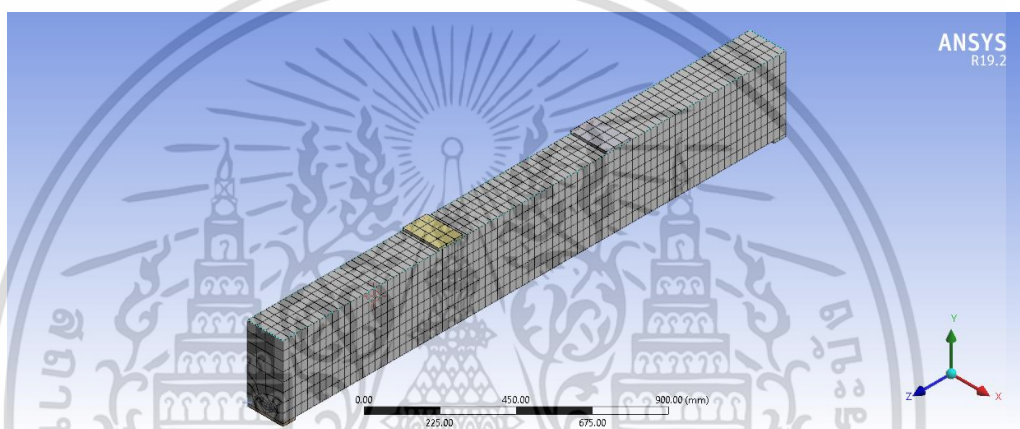
แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึง กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) โดยมีฐานรองรับ 2 จุด จุดแรกอยู่ด้านซ้ายของแบบจำลองกำหนดเป็นแบบยึดหมดเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge Support) จุดที่สองด้านขวาของแบบจำลองเป็นแบบเคลื่อนที่ได้ในแนวยาวของตัวคาน (Roller Support) และในการวิเคราะห์จะเปรียบเสมือนว่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) เท่านั้น

ส่วนของการเชื่อมต่อของผิวสัมผัสระหว่างวัสดุแต่ละชนิด เป็นแบบ “Bonded” ที่เชื่อมต่อกันสมบูรณ์ และกำหนดค่า Face Mesh Type เป็นแบบ “All Quad”

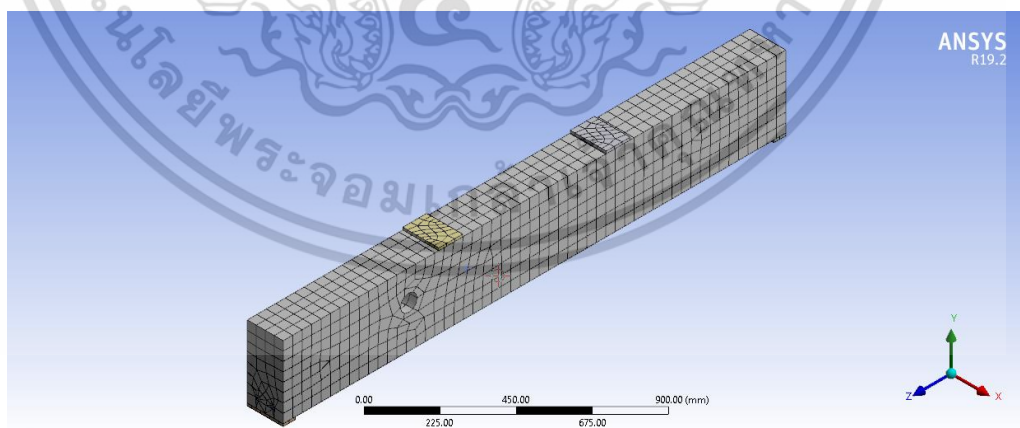
ในแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กนี้ทำการวิเคราะห์ Static Structural Analysis ได้ใช้จำนวน Element และ Node ทั้งหมด 9,394 Element 22,463 Node สำหรับคานตัวอย่าง BC, 13,115 Element 34,332 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOS1, 12,776 Element 33,673 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOS2, 13,002 Element 34,298 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOM1, 13,097 Element 34,351 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOM2



รูปที่ 3.1.6 จุดรองรับของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

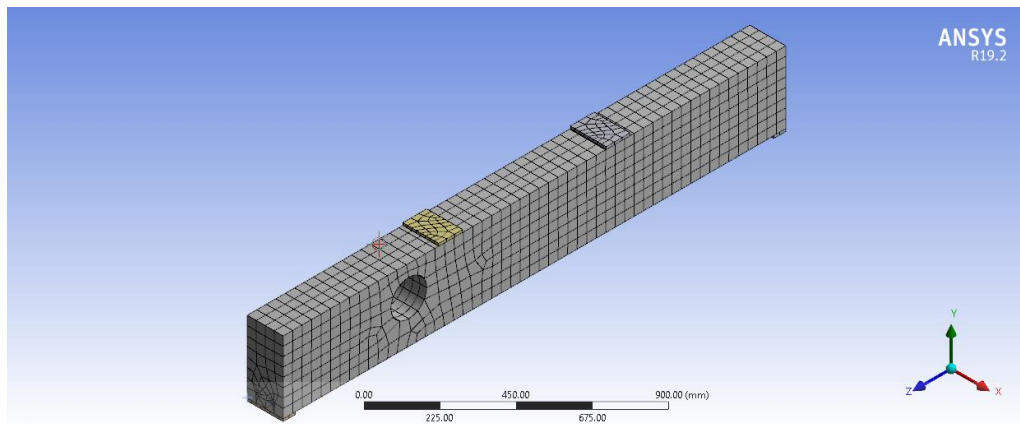


รูปที่ 3.1.7 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีช่องเปิด (BC)

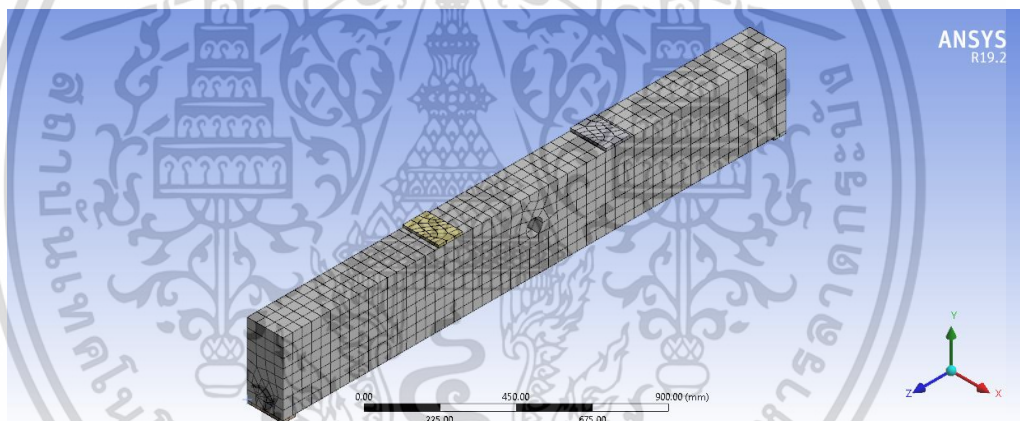


รูปที่ 3.1.8 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็กร 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

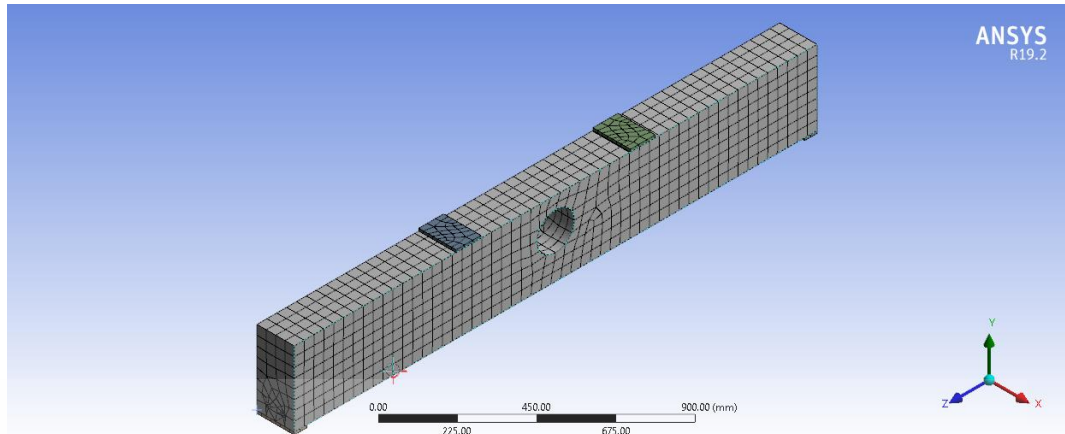


รูปที่ 3.1.9 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2)



รูปที่ 3.1.10 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก 75 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.11 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2)

3.2 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Plate)

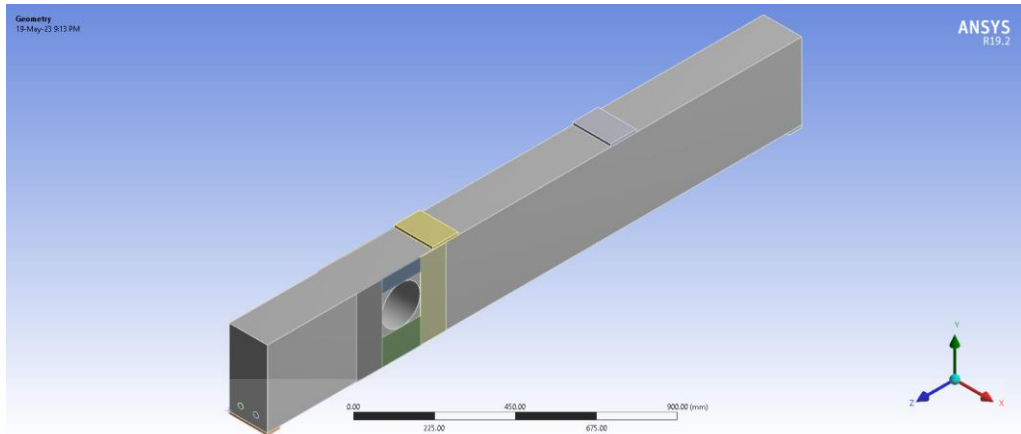
3.2.1 ขนาดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดัดอย่างเดียวแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ใช้รูปแบบและเงื่อนไขเหมือนกับหัวข้อที่ 3.1 แต่จะมีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งในตำแหน่งรับแรงเฉือนและตำแหน่งรับแรงดัด โดยจะนำตัวอย่างจากหัวข้อที่ 3.1 (ตัวอย่าง BOS2 และ BOM2) มาเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นตัวอย่าง 1.BOS2F และ BOM2F

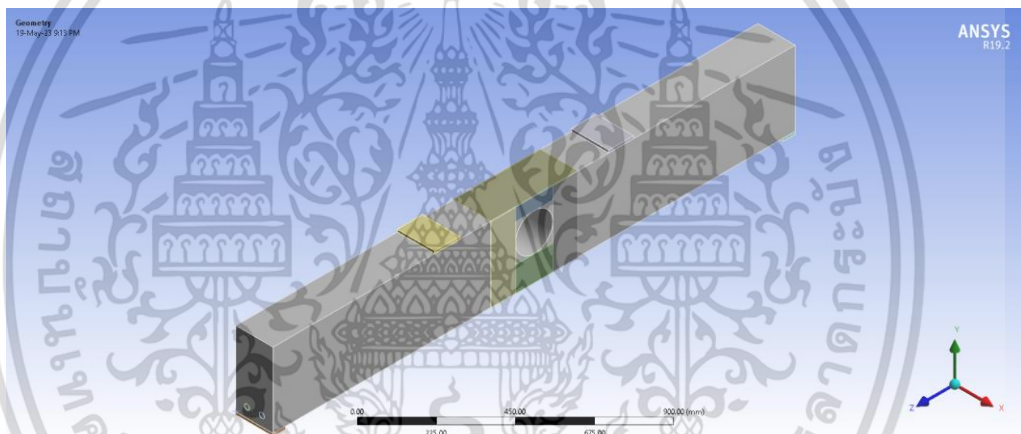
ตารางที่ 3.2.1 สรุปรูปแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ขนาดช่องเปิด	ตำแหน่งช่องเปิด	ลักษณะการเสริม CFRP Plate	หมายเหตุ
1	BOS2F	150 mm	525 mm จากขอบคานคอนกรีต	ติดแผ่น CFRP บริเวณด้านข้างช่องเปิดทั้ง 2 ด้าน	ดังรูปที่ 3.9
2	BOM2F	150 mm	กึ่งกลางคาน	ติดแผ่น CFRP บริเวณรอบตัวคานบริเวณช่องเปิด	ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2F)



รูปที่ 3.2.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2F)

3.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

ค่าคุณสมบัติของวัสดุของแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้ประกอบด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E), โมดูลัสของแรงเฉือน (shear Modulus, G), อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio, ν), และความหนาแน่นของวัสดุ (Density, ρ) ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ส่วนค่าคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมอ้างอิงจากหัวข้อที่ 3.1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

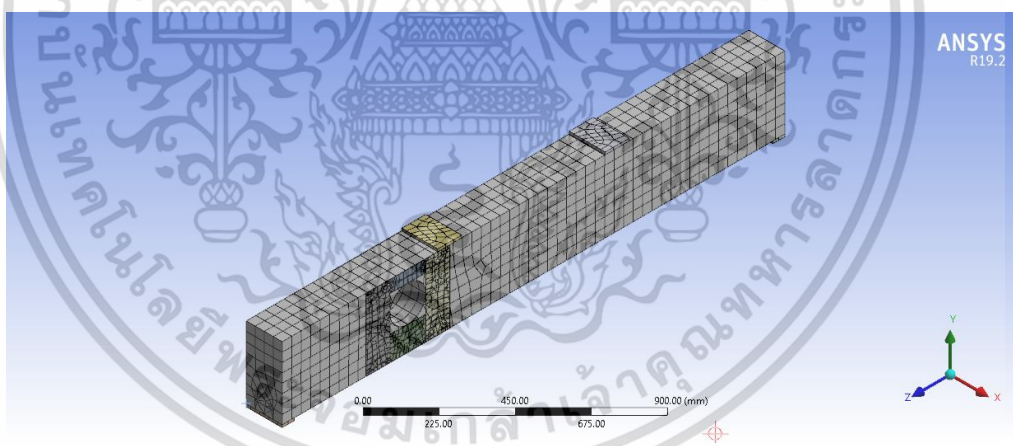
ตารางที่ 3.2.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	E (MPa)	G (Mpa)	ν	ρ (kg/m ³)
แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	$E_x=121000$	$G_{xy}=4700$	$\nu_{xy}=0.27$	1490
	$E_y=8600$	$G_{yz}=3100$	$\nu_{yz}=0.40$	
	$E_z=8600$	$G_{xz}=4700$	$\nu_{xz}=0.27$	

3.2.3 เงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลอง

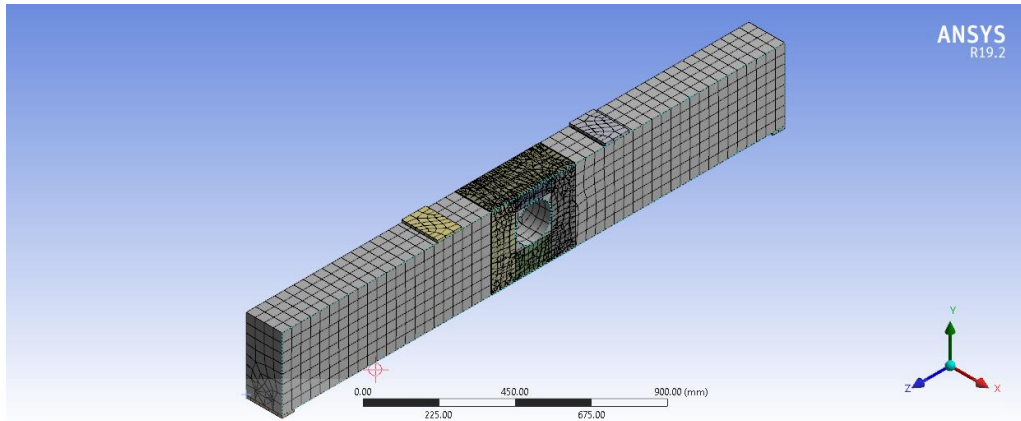
แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีเงื่อนไขทั่วไปเหมือนกันแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่เสริมกำลัง

ในแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นี้ทำการวิเคราะห์ Static Structural Analysis ได้ใช้จำนวน Element และ Node ทั้งหมด 15,297 Element 40,697 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOS2F, 18,722 Element 48,675 Node สำหรับคานตัวอย่าง BOMF2



รูปที่ 3.2.3 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงเฉือน (BOS2F)

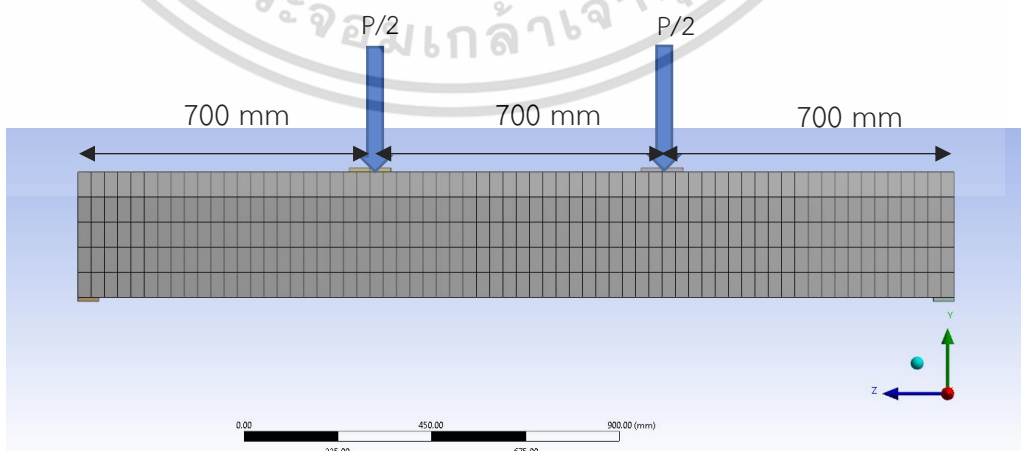
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.4 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 150 มิลลิเมตร และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงดัด (BOM2)

3.3 แรงกระทำต่อแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการระบุแรงกระทำต่อแบบจำลอง จะระบุแรงกระทำแบบ 2 จุด (Four Point Bending) โดยตำแหน่งของแรงกระทำแต่ละจุดจะห่างจากจัตวรองรับทั้งสองข้าง 700 มิลลิเมตร โดยจะระบุแรงเป็น 5 ระดับ คือ 1. จุดเริ่มต้นแรงกระทำ (Start of Loading) 2. ก่อนถึงจุดแตกร้าว (Just- Before Cracking) 3. หลังจุดแตกร้าว (Just After Cracking) 4. 70% ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Concrete Reaches $0.7F_c'$) 5. กำลังรับแรงอัดเชิงทฤษฎี (Nominal Strength) ซึ่งจะพิจารณาในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) เท่านั้น โดยแรงกระทำแต่ละระดับนั้นจะนำหน้าตัดของแบบจำลองคานคอนกรีตมาคำนวณจากทฤษฎีการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อหาว่าแรงกระทำแต่ละระดับนั้นมีค่าเป็นเท่าใด ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3.1 ลักษณะแรงกระทำแบบ Four Point Bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกจากทฤษฎี

Stage	น้ำหนักบรรทุก P (kN)	ค่าโก่งตัว δ (mm)
Start of Load	0.00	0.00
Just Before Craking	22.97	0.53
Just After Craking	22.97	0.53
Concrete Reaches $0.7F_c'$	93.37	3.38
Nominal Strength	149.98	5.46

การคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับต่างๆ
หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

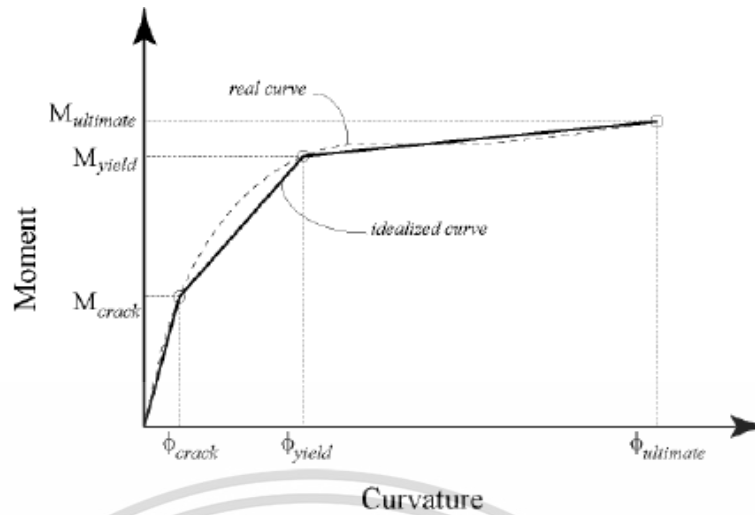
$$M = \frac{\sigma I}{y} \quad (3.1)$$

เมื่อ M = แรงดัด
 σ = ความเค้น
 I = โมเมนต์อินทิเซีย
 y = ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัด

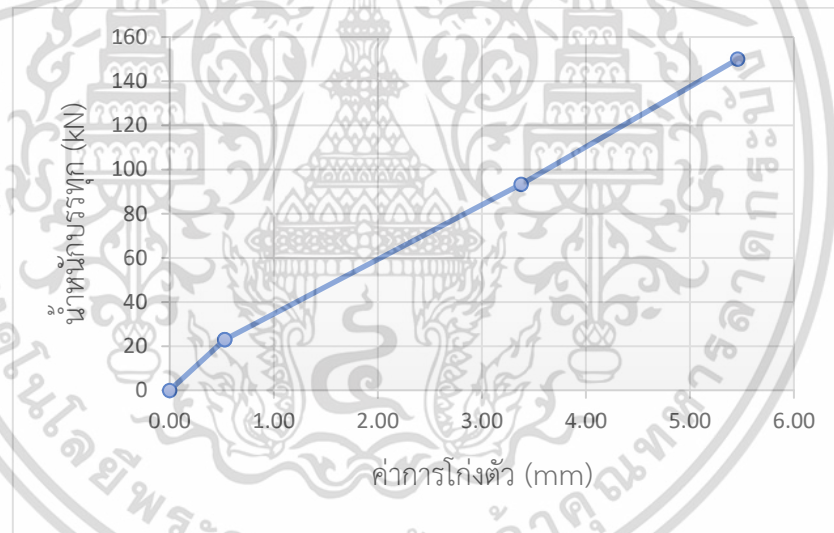
$$\phi = \frac{\epsilon}{y} \quad (3.2)$$

เมื่อ ϕ = โมเมนต์ความโค้ง
 ϵ = ความเครียด
 y = ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและเส้นความโค้ง



รูปที่ 3.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกจากการคำนวณ

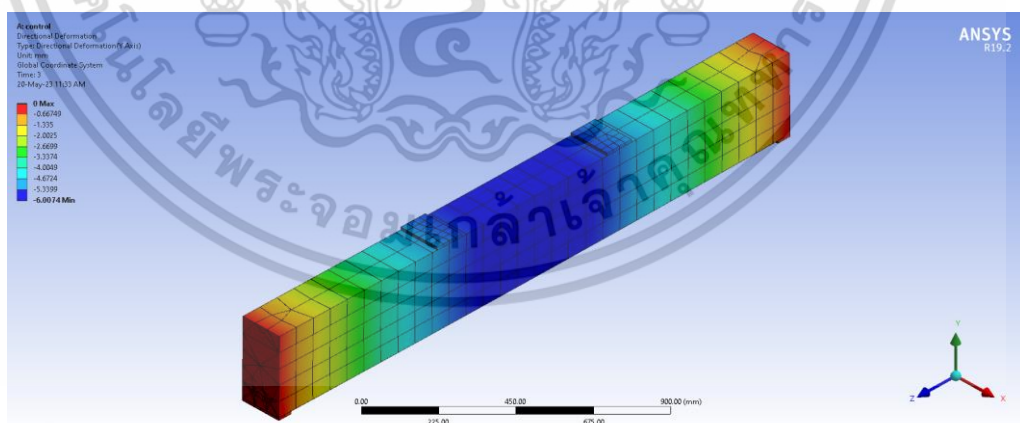
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ความไวของเมช (Mesh Sensitivity Analysis)

ขั้นตอนนี้คือการวิเคราะห์หาความไวของเมชที่มีผลต่อการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยการวิเคราะห์นี้จะเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์จากใหญ่จนถึงขนาดเล็กเพื่อหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยนี้ ซึ่งการแบ่งขนาดของเอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 3.4.1

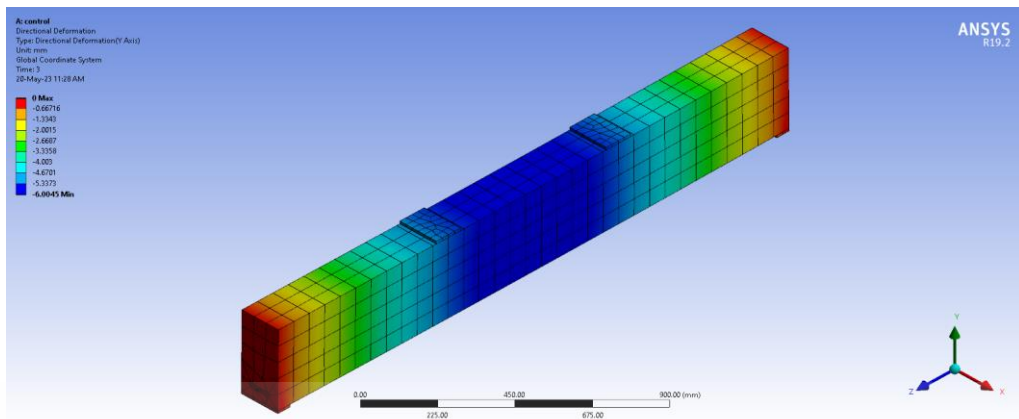
ตารางที่ 3.4.1 ขนาดและจำนวนเอลิเมนต์

แบบจำลอง	ขนาดเอลิเมนต์ (mm)	จำนวนเอลิเมนต์
1	70	9226
2	64	8841
3	58	9473
4	52	9980
5	46	12054
6	40	12786
7	35	12753
8	30	14413

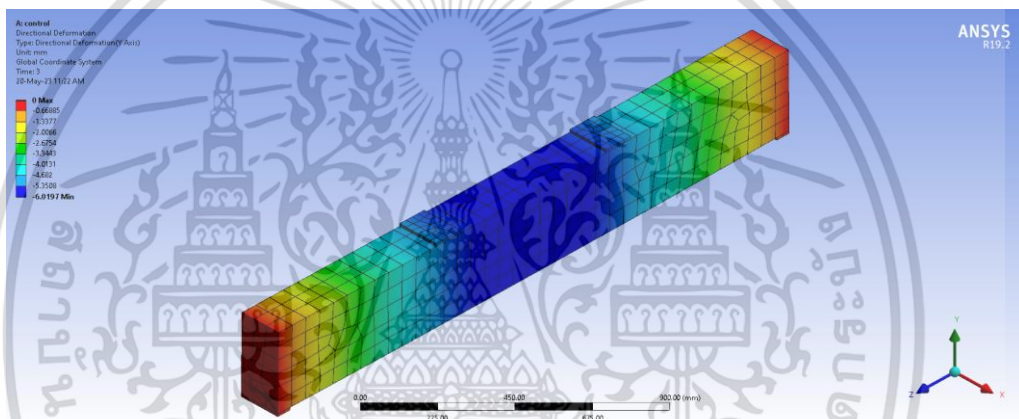


รูปที่ 3.4.1 ค่าการแอ่นตัวของ แบบจำลองที่ 1 เท่ากับ 6.01 mm.

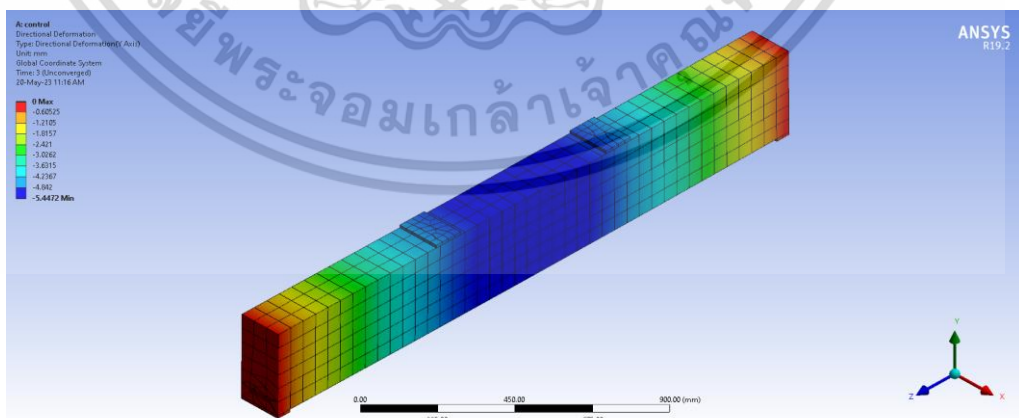
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.2 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 2 เท่ากับ 6.00 mm.

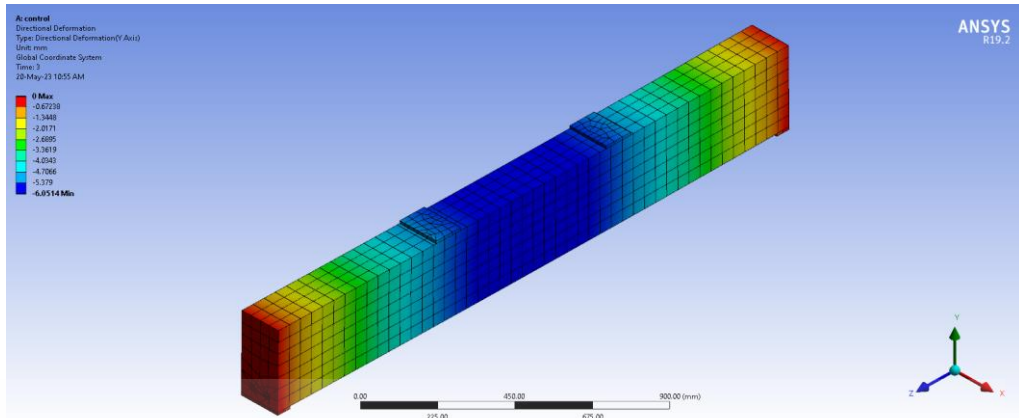


รูปที่ 3.4.3 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 3 เท่ากับ 6.02 mm.

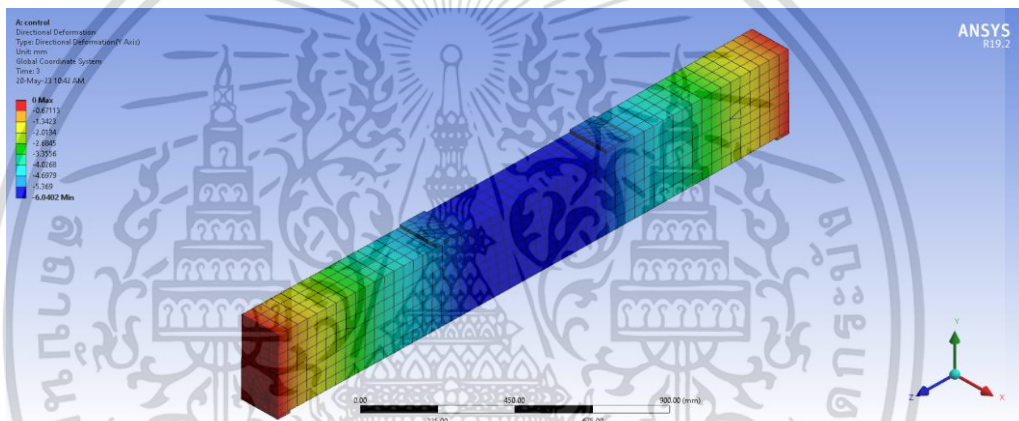


รูปที่ 3.4.4 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 4 เท่ากับ 5.45 mm.

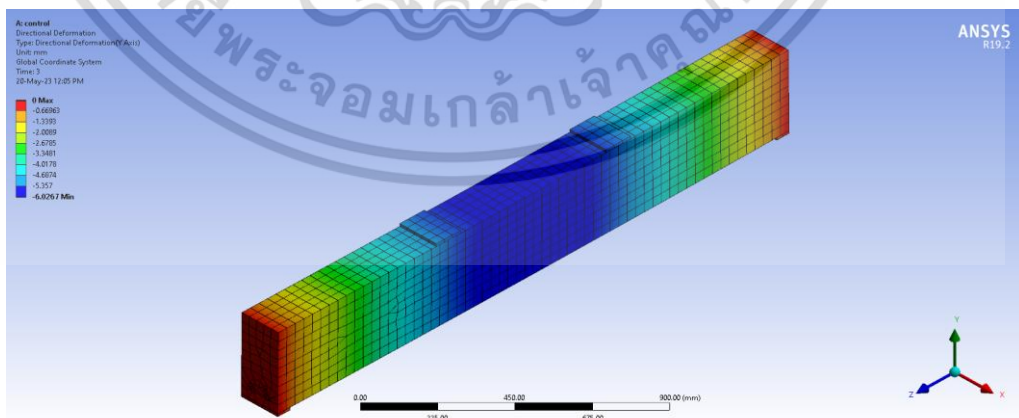
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.5 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 5 เท่ากับ 6.05 mm.

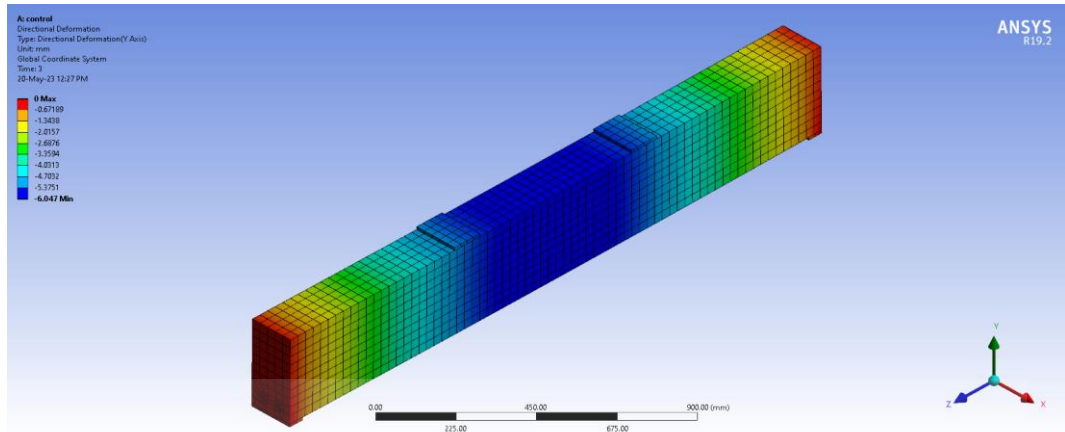


รูปที่ 3.4.6 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 6 เท่ากับ 6.04 mm.



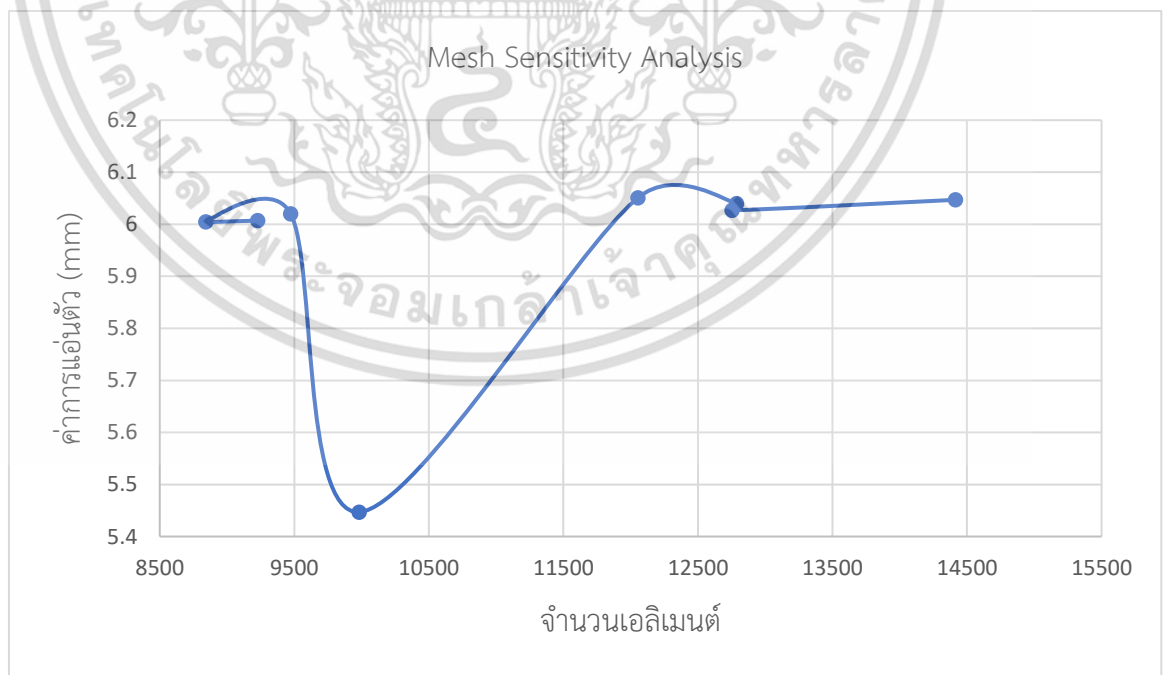
รูปที่ 3.4.7 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 7 เท่ากับ 6.03 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.8 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่ 8 เท่ากับ 6.05 mm.

จากการวิเคราะห์โดยใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน 8 แบบจำลอง ผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ในแบบจำลองที่ 6, 7 และ 8 การแอ่นตัวของแบบจำลองเริ่มคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ 40 mm ของแบบจำลองที่ 6 ในการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป



รูปที่ 3.4.9 ความสัมพันธ์ของจำนวนเอลิเมนต์และการแอ่นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

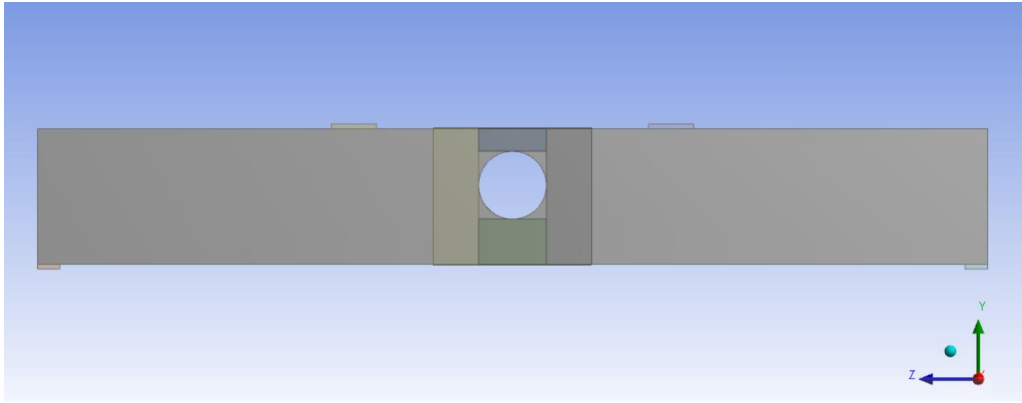
ขั้นตอนนี้เป็นารแสดงวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys โดยจากยกตัวอย่างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่ตำแหน่งรับแรงดัด, BOM2F โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. การสร้างแบบจำลองและการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ
2. วิธีระบุค่ารายละเอียดต่างในแบบจำลอง เช่น การกำหนดค่าเมช, กำหนดจุดรองรับของคานตัวอย่าง, และการกำหนดแรงกระทำต่อแบบจำลอง

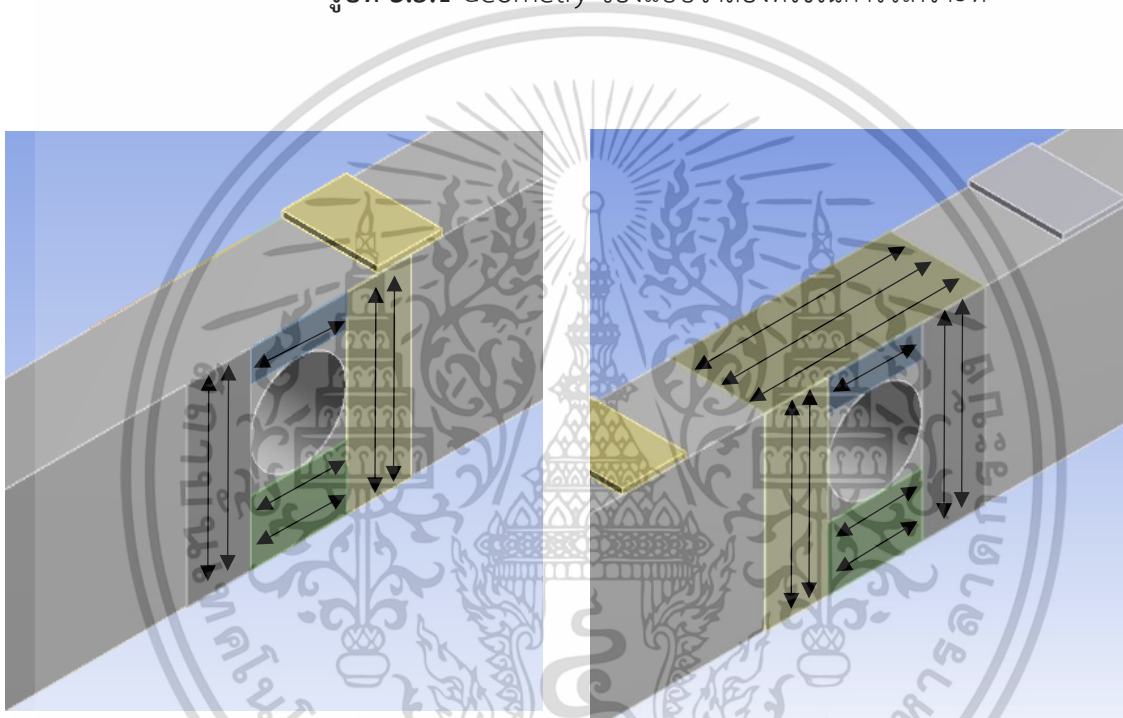
3.5.1 การสร้างแบบจำลองและการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ

ในการวิเคราะห์ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Ansys (Static Structural) ในการวิเคราะห์ สร้างแบบจำลองด้วย Geomtry in Designmodeler โดยสร้างคานตัวอย่างขนาดหน้าตัด 15x30 เซนติเมตร ลึก 210 เซนติเมตร มีเหล็กเสริม DB20 จำนวน 2 เส้นห่างกันเป็นระยะ 60 มิลลิเมตรและสูงจากขอบล่างของหน้าตัดคาน 40 มิลลิเมตร โดยที่จุดรองรับทั้งสองด้านใช้เหล็กแผ่นขนาด 10x50x150 มิลลิเมตร เป็นจุดรองรับ และจุดที่ให้แรงกระทำใช้แผ่นเหล็กขนาด 10x100x150 มิลลิเมตร เป็นจุดรับแรงกระทำ และสร้างช่องเปิดที่กึ่งกลางคานลักษณะวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร อยู่ด้านล่างขอบด้านบนคานคอนกรีตระยะ 125 มิลลิเมตร

ลักษณะของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์หน้า 1.2 มิลลิเมตร ติดบริเวณรอบรูเจาะทั้งสองด้านของแบบจำลองรวมถึงด้านบนและด้านล่างของแบบจำลอง เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะรับแรงกระทำแบบ 1 ทิศทาง ดังตารางที่ 3.2.2 ในการติดตั้งนั้นจะติดตั้งตามแนวรับแรงที่แสดงในรูปที่ 3.5.2



รูปที่ 3.5.1 Geometry ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.5.2 แสดงทิศทางการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบรูเจาะ

ค่าคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีต เหล็กเส้น เหล็กแผ่นและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แสดงดังตาราง

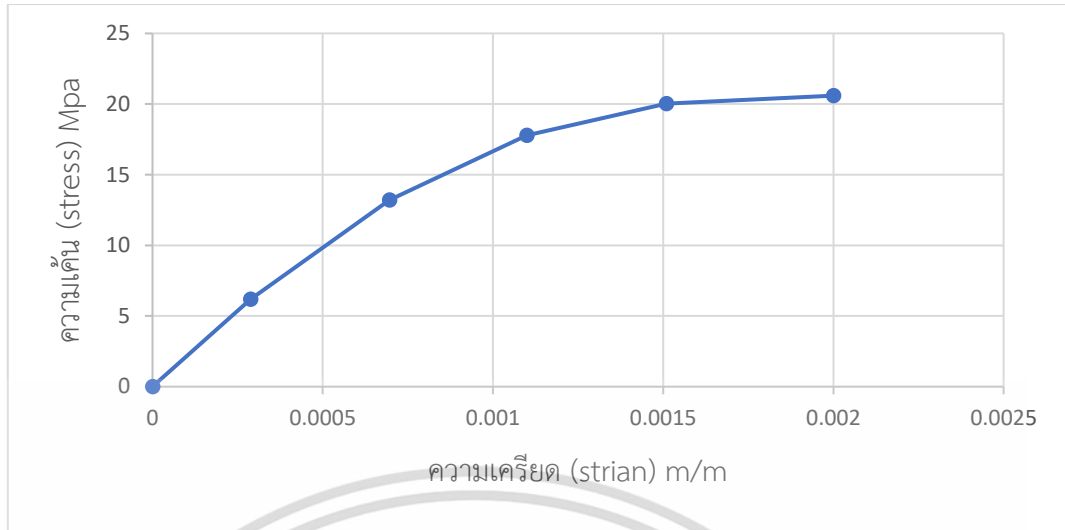
ที่ 3.5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5.1 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับแบบจำลอง

material	Material properties	
Concrete	Linear Isotropic	
	E	25000 Mpa
	v	0.3
	Multi-linear Isotropic	
	Strian	Stress Mpa
	0.000000	0.007
	0.000288	6.178
	0.000696	13.210
	0.001100	17.788
	0.001510	20.036
0.002000	20.595	
Steel Reinforcement	Linear Isotropic	
	E	20000 Mpa
	v	0.3
	Bilinear Isotropic	
	Yield Stress	60000 Psi
Tangential Modulus	2900 Psi	
Steel Plate	Linear Isotropic	
	E	20000 Mpa
	v	0.3
CFRP Plate	Linear Orthotropic	
	E_x	121000 Mpa
	E_y	8600 Mpa
	E_z	8600 Mpa
	v_{xy}	0.27
	v_{yz}	0.40
v_{xz}	0.27	

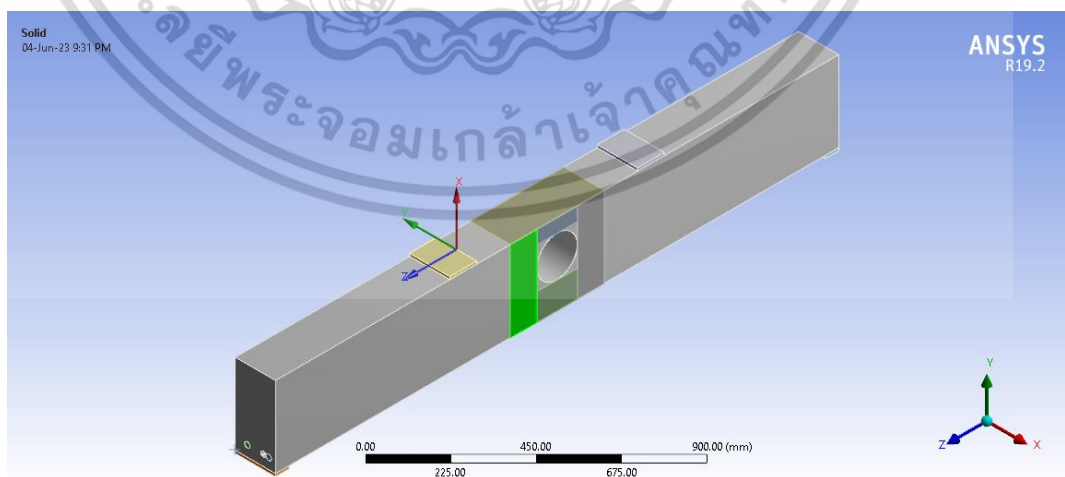
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5.3 ความสัมพันธ์ของเค้นและความเครียดของคอนกรีต

3.5.2 วิธีระบุค่ารายละเอียดในแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์แบบจำลองจำเป็นต้องระบุค่าต่างๆให้กับโปรแกรมเพื่อที่จะวิเคราะห์แบบจำลองได้ซึ่งสิ่งที่ต้องระบุก็ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้เช่น คุณสมบัติของวัสดุ คอนกรีต เหล็กเสริม เหล็กแผ่นและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ในกรณีของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จำเป็นต้องกำหนดพิกัด (Coordinate) ใหม่เนื่องจากคุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เป็นลักษณะ Linear Orthotropic ซึ่งระยะพิกัดจะแตกต่างจากพิกัดหลัก (Global Coordinate)



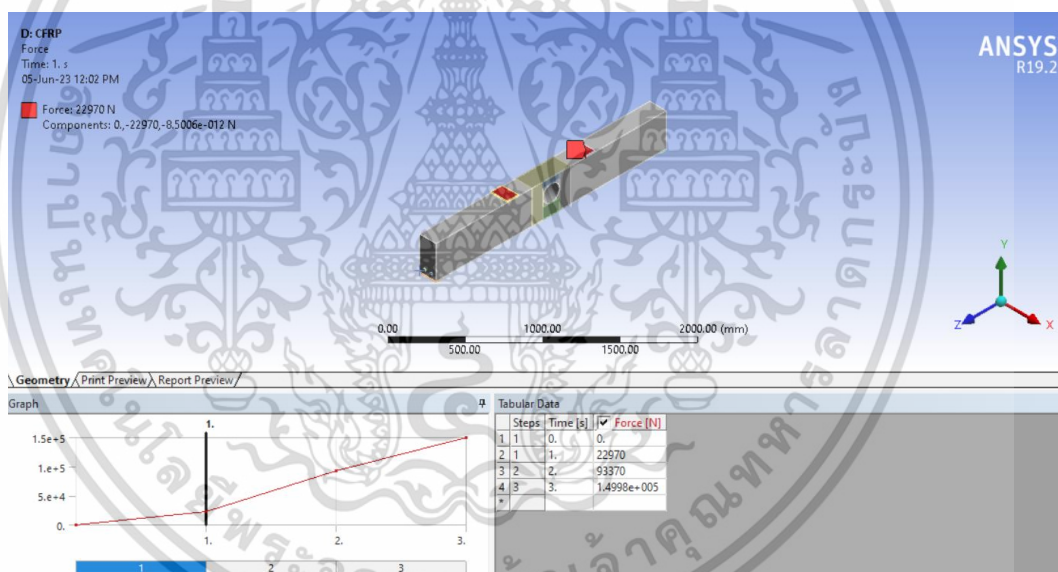
รูปที่ 3.5.4 เปรียบเทียบพิกัดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับพิกัดหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าเมชผู้ทำวิจัยจะกำหนดขนาดเมชเท่ากับ 40 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ความไวของเมชในหัวข้อที่ 3.4 และกำหนดค่า Free Face Mesh Type เป็น All Quad เป็นการกำหนดรูปร่างของเมชให้เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมทั้งหมด

ในการวิเคราะห์นี้กำหนดให้แบบจำลองเป็นแบบ Simple Support มีจุดรองรับสองจุด คือ ด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนแบบเคลื่อนที่ได้ (Roller Support) และอีกด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนแบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge Support)

แรงกระทำต่อแบบจำลองจะนำแรงจากการคำนวณดังตารางที่ 3.3.1 มากระทำต่อเหล็กแผ่นที่สร้างขึ้นสำหรับรับแรงกระทำโดยกระทำเป็น 2 จุด (Four Point Bending) แรงกระทำนั้นต้องสร้างขึ้นในรูปแบบของแบ่งแรงกระทำเป็นขั้นๆ เนื่องจากต้องอ้างอิงแรงกระทำที่ได้จากการคำนวณเพื่อที่จะเปรียบเทียบกันได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.5.5 ตัวอย่างการใส่แรงกระทำต่อแบบจำลองในลักษณะเป็นขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

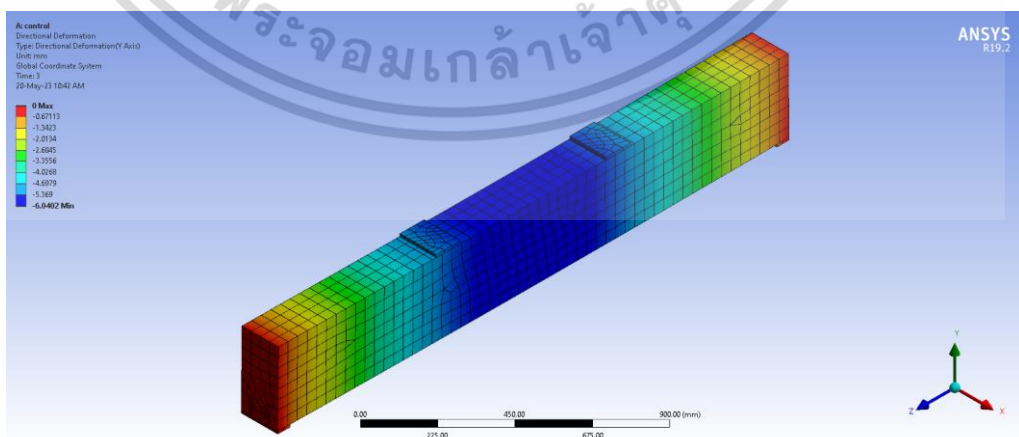
ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1.ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 2. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench (Static Structural Analysis) 3.เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมด

4.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

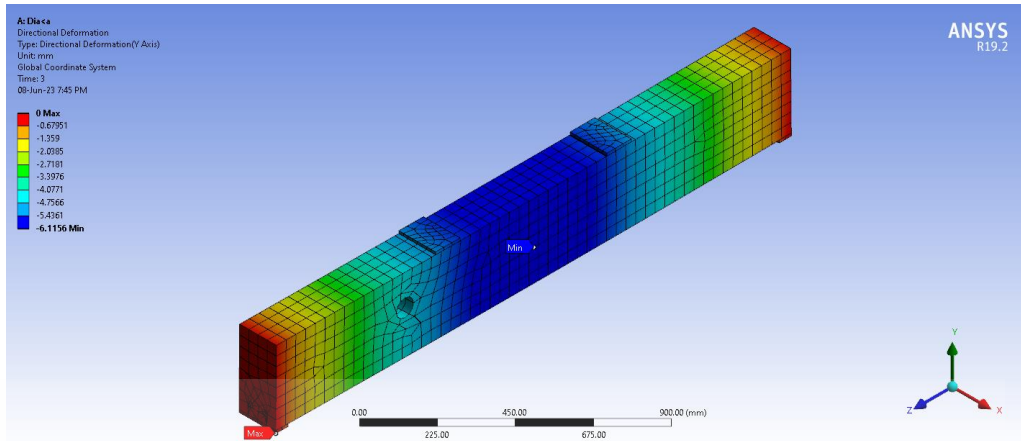
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลอง

ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตตามตัวอย่างทั้งหมดในหัวข้อ 3.1.1 พบว่าตัวอย่าง BC, BOS1 และ BOM1 มีค่าการแอ่นตัวใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎีมาก ส่วนตัวอย่าง BOS2 และ BOM2 มีค่าการแอ่นตัวที่มากกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีมากพอสมควร แสดงดังตารางที่ 4.1

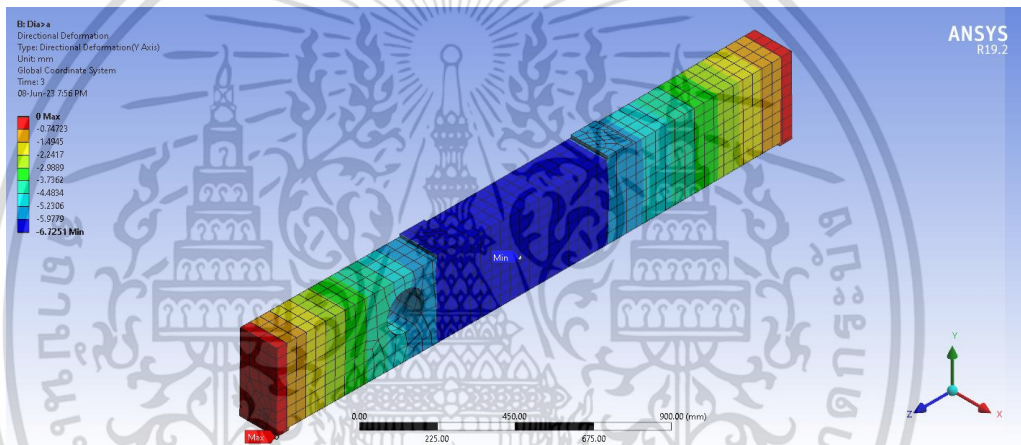


รูปที่ 4.1.1 ค่าการแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิด (BC)

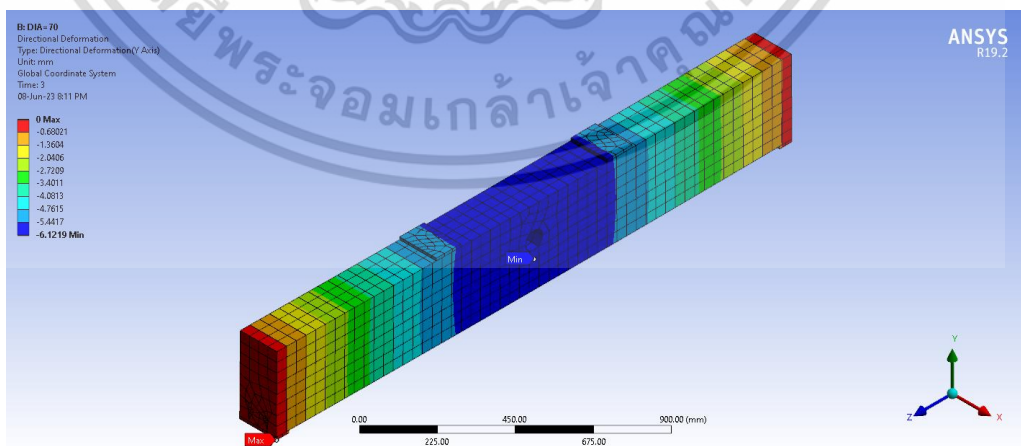
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.2 ค่าแอนตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดเล็กบริเวณรับแรงเฉือน (BOS1)

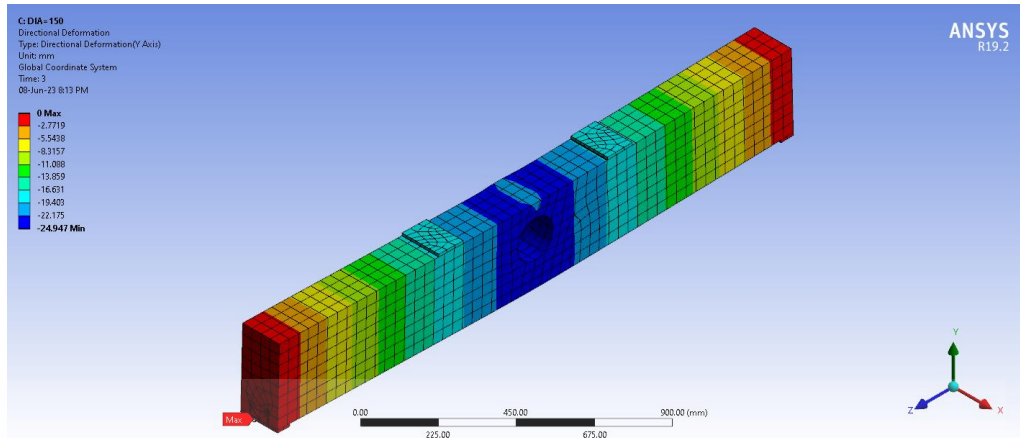


รูปที่ 4.1.3 ค่าแอนตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือน (BOS2)



รูปที่ 4.1.4 ค่าแอนตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดเล็กบริเวณรับแรงดัด (BOM1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.5 ค่าแอนตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงดัด (BOM2)

ตารางที่ 4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิดไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

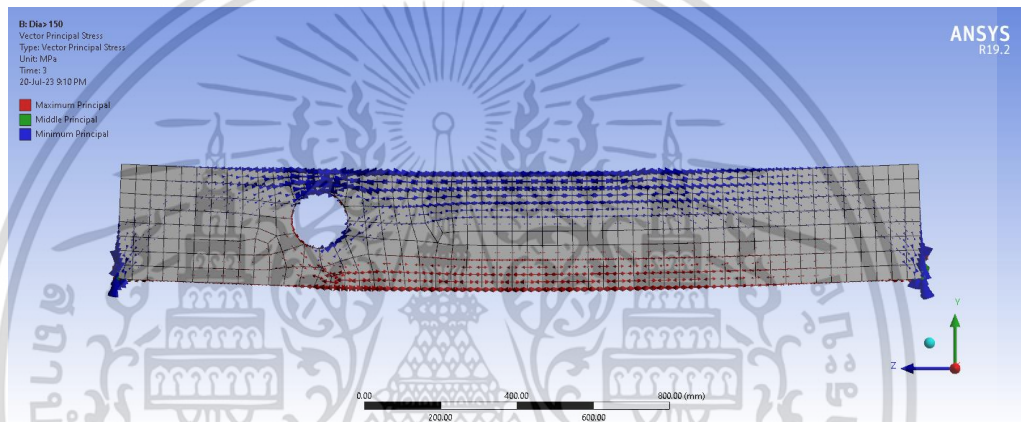
Stage	BC		BOS1		BOS2		BOM1		BOM2	
	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	P (kN)
Start of Loading	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Just before cracking	0.85	22.97	0.86	22.97	0.89	22.97	0.86	22.97	0.91	22.97
Concrete reaches 0.7f'c	3.56	93.37	3.58	93.37	3.75	93.37	3.59	93.37	3.89	93.37
Nominal Strength	6.04	149.98	6.12	149.98	6.73	149.98	6.12	149.98	24.95	149.98

4.1.2 วิเคราะห์ทิศทางของความเค้น (vector stress) บริเวณช่องเปิดเพื่อหาแนวทางการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

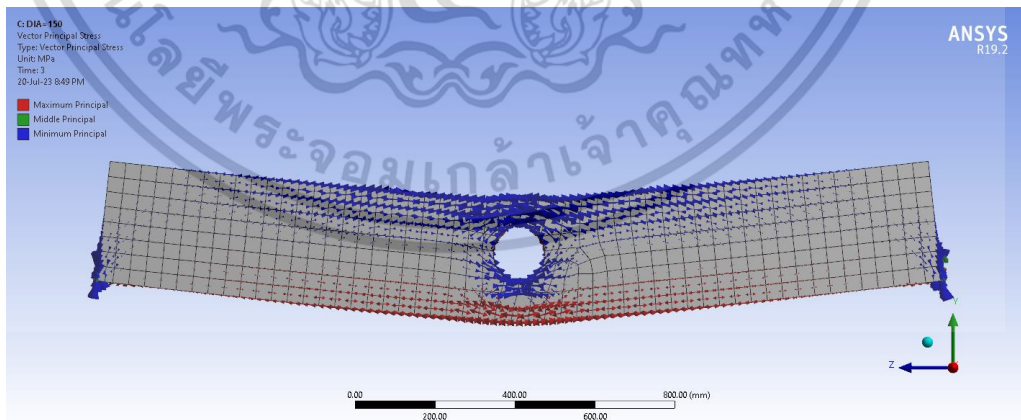
เปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตที่ไม่มีช่องเปิดและแบบมีช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงเฉือน สังเกตได้ว่าแบบจำลอง BOS2 มีค่าการแอนตัวที่มากขึ้นกว่าแบบจำลอง BC และแบบจำลอง BOS1 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะเดียวกันเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตที่ไม่มีช่องเปิดและแบบมีช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงดัดสังเกตได้ว่าแบบจำลอง BOM2 มีค่าการแอนตัวที่มากขึ้นกว่าแบบจำลอง BC และแบบจำลอง BOM1 เป็นอย่างมาก เนื่องจากแบบจำลอง BOS2 และแบบจำลอง BOM2 มีค่าการแอนตัวที่มากขึ้นหมายความว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกลดลง จึงต้องหาแนวทางเสริมกำลังแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง ในรูปที่ 4.1.6 และ รูปที่ 4.1.7 แสดงทิศทางของความเค้นบริเวณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบช่องเปิด สังเกตได้ว่าบริเวณด้านบนบนช่องเปิดทิศทางของแรงมีลักษณะเป็นแรงอัดขนานกับความยาวของแบบจำลอง บริเวณด้านล่างช่องเปิดทิศทางของแรงมีลักษณะเป็นแรงดึงขนานกับความยาวของแบบจำลอง

เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีคุณสมบัติการรับแรงแบบ Orthotropic ในการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับแบบจำลองจำเป็นต้องดูทิศทางการกระจายตัวของความเค้นของแบบจำลองแล้วทำการวิเคราะห์หาแนวทางการติดตั้งที่เหมาะสม ซึ่งการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ควรจะติดตั้งขนานกับแนวของแรงภายในที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.1.6 ทิศทางความเค้นหลักของแบบจำลอง BOS2

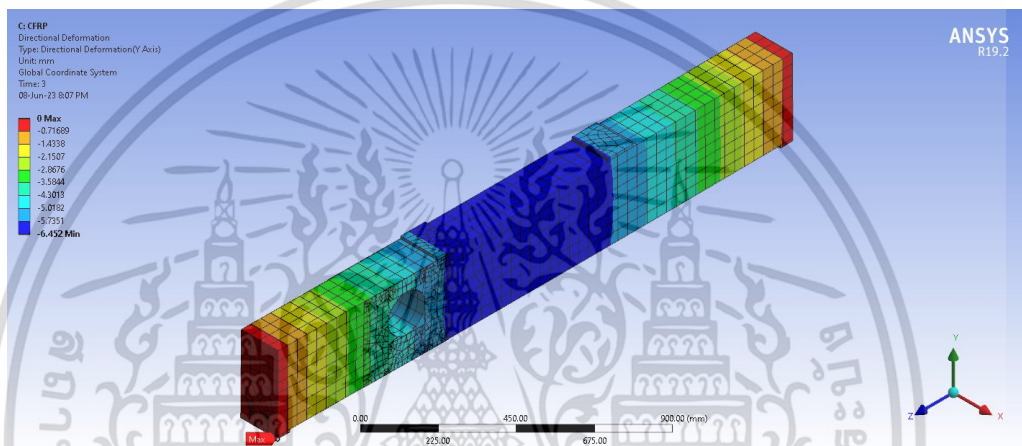


รูปที่ 4.1.7 ทิศทางความเค้นหลักของแบบจำลอง BOM2

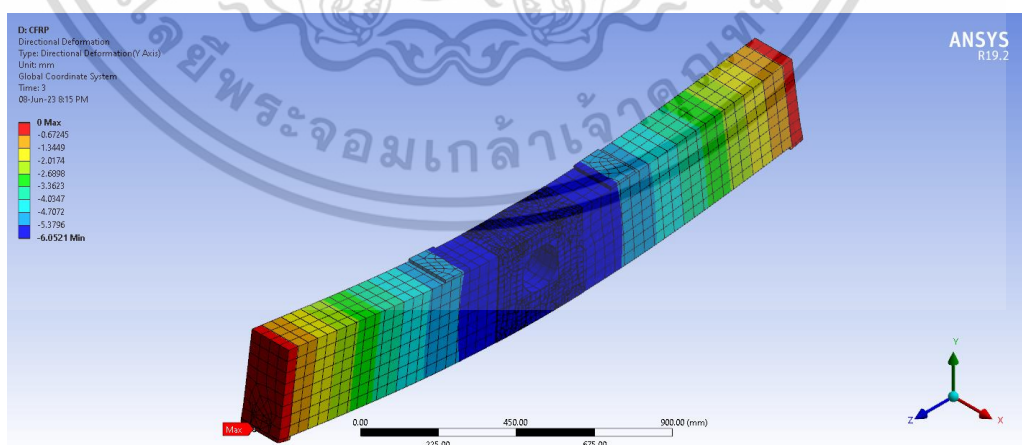
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ผลของการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตตามตัวอย่างในหัวข้อ 3.2.1 โดยการนำคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งในตำแหน่งรับแรงเฉือนและแรงดัดมาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อดูพฤติกรรมในการรับแรงและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด ผลวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2.1 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือนและเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (BOS2F)



รูปที่ 4.2.2 ค่าแอ่นตัวแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงดัดและเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (BOM2F)

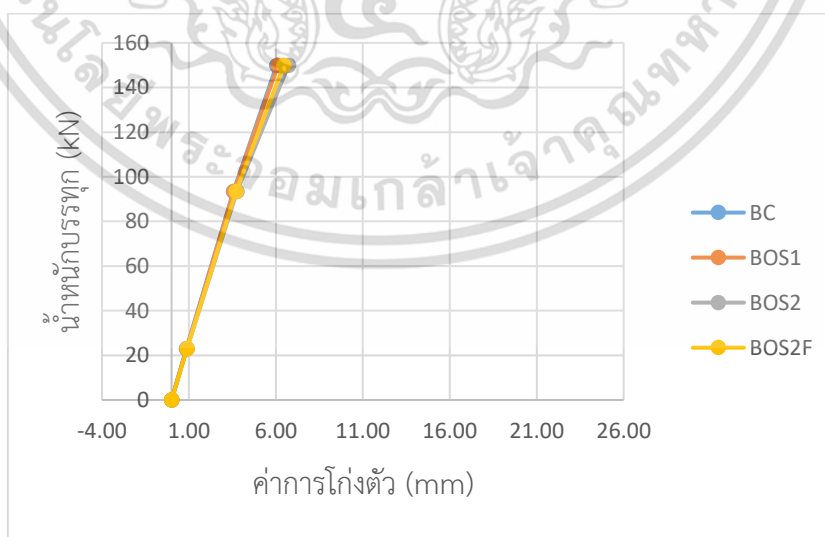
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Stage	BOS2F		BOM2	
	δ (mm)	P (kN)	δ (mm)	P (kN)
Start of Loading	0.00	0.00	0.00	0.00
Just before cracking	0.89	22.97	0.84	22.97
Concrete reaches 0.7f'c	3.71	93.37	3.52	93.37
Nominal Strength	6.45	149.98	6.05	149.98

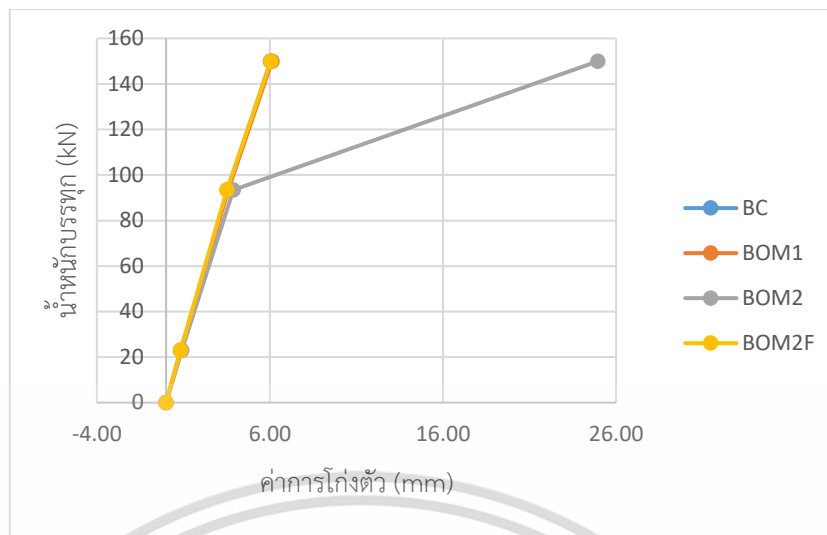
4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดแบบไม่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ และแบบเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 สามารถนำผลการเอนต์มาเปรียบเทียบกันได้ระหว่างคานคอนกรีตแบบไม่มีช่องเปิด (BC) และคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แบบเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ทั้งในตำแหน่งรับแรงเฉือนและตำแหน่งรับแรงดัด สรุปในรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.3.1 เปรียบเทียบคานตัวอย่างทั้งหมดของช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงเฉือน

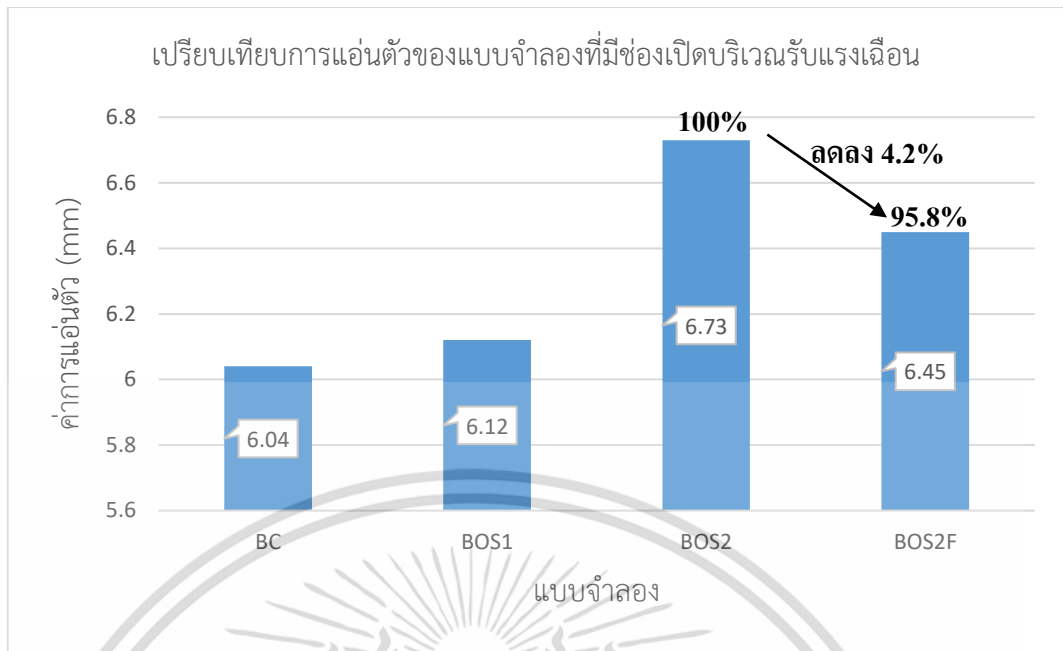
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



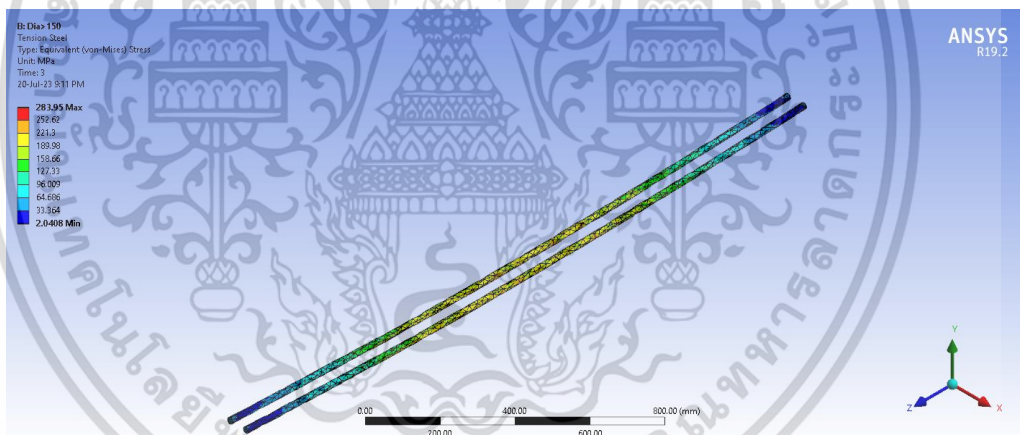
รูปที่ 4.3.2 เปรียบเทียบคานตัวอย่างทั้งหมดของช่องเปิดในตำแหน่งรับแรงดัด

ขั้นตอนต่อจากนี้แสดงผลการวิเคราะห์ต่างๆ คือค่าการแอ่นตัวและความเค้นในเหล็กเสริมของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงเฉือนและแรงดัดเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

ในส่วนของผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงเฉือน การแอ่นตัวของแบบจำลอง BC = 6.04 mm., BOS1 = 6.12 mm., BOS2 = 6.73 mm. และแบบจำลอง BOS2F = 6.45 mm. แบบจำลอง BOS1 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.08 mm. หรือ 1.3% แบบจำลอง BOS2 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.69 mm. หรือ 11.4% เมื่อนำแบบจำลอง BOS2 มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่าการแอ่นตัวลดลง 0.28 mm. หรือลดลง 4.2% เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และค่าความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมในแบบจำลองที่เปิดช่องเปิดขนาดใหญ่ (BOS2) เท่ากับ 283.95 MPa และเมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ค่าความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมมีค่าลดลงคือเท่ากับ 279.8 ดังรูป 4.3.4 และ 4.3.5 ตามลำดับ

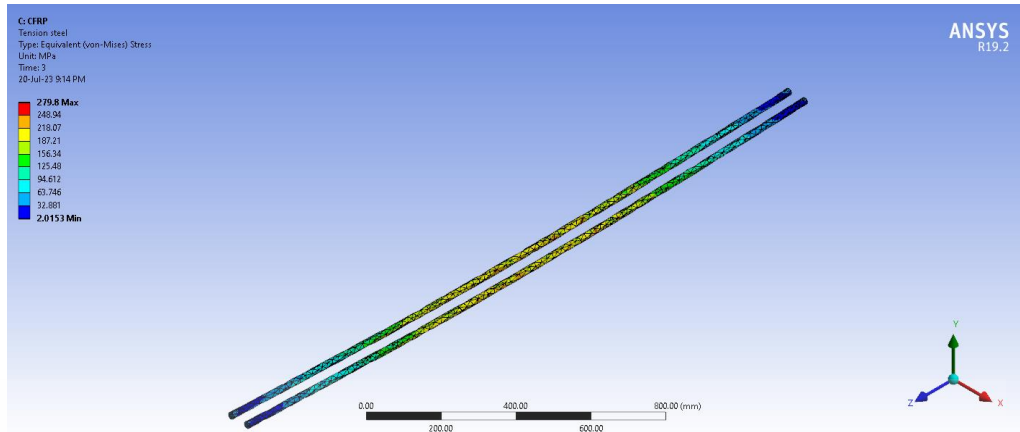


รูปที่ 4.3.3 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงเฉือน



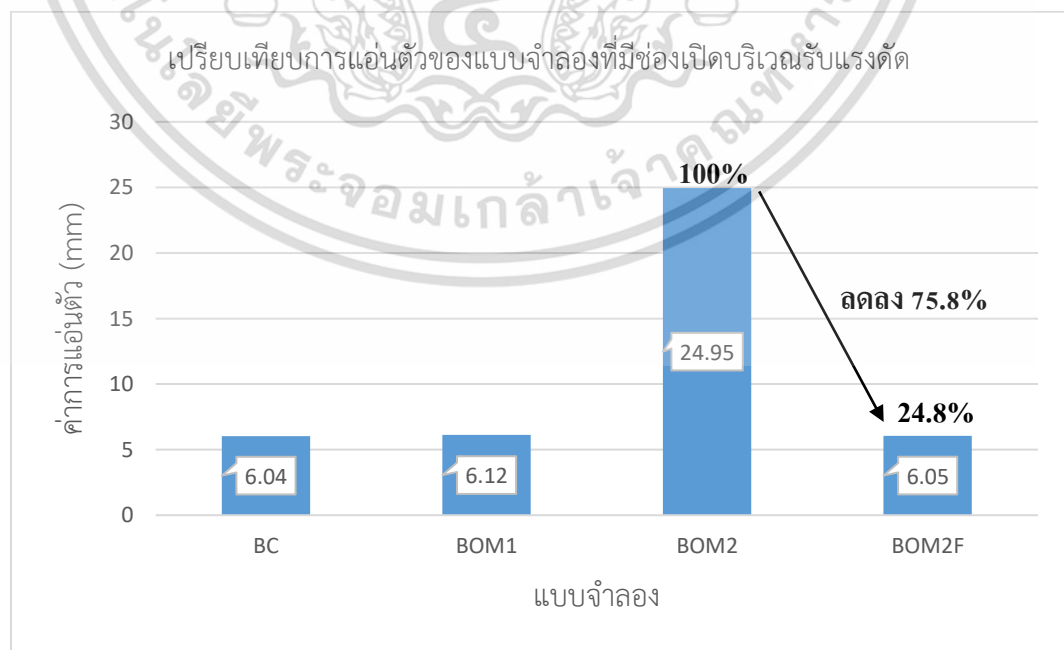
รูปที่ 4.3.4 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOS2 เท่ากับ 283.95 Mpa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



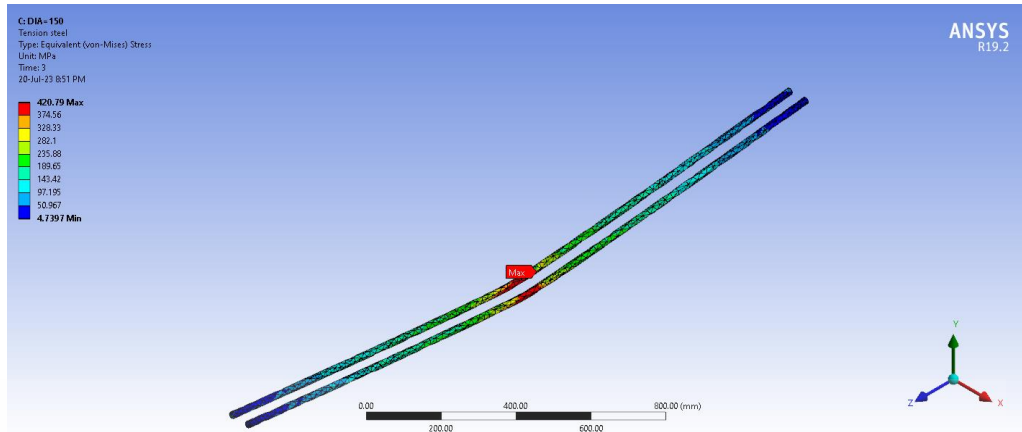
รูปที่ 4.3.5 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOS2F เท่ากับ 279.8 Mpa

ในส่วนของผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงดัด การแอ่นตัวของแบบจำลอง BC = 6.04 mm., BOM1 = 6.12 mm., BOM2 = 24.95 mm. และแบบจำลอง BOM2F = 6.05 mm. แบบจำลอง BOM1 มีค่าเพิ่มขึ้น 0.08 mm. หรือ 1.3% แบบจำลอง BOM2 มีค่าเพิ่มขึ้น 18.91 mm. หรือ 313.1% เมื่อนำแบบจำลอง BOM2 มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ มีค่าการแอ่นตัวลดลง 18.90 mm. หรือลดลง 75.8% เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และค่าความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมในแบบจำลองที่เปิดช่องเปิดขนาดใหญ่ (BOM2) เท่ากับ 420.79 MPa และเมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ค่าความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมมีค่าลดลงคือเท่ากับ 284.4 ดังรูป 4.3.7 และ 4.3.8 ตามลำดับ

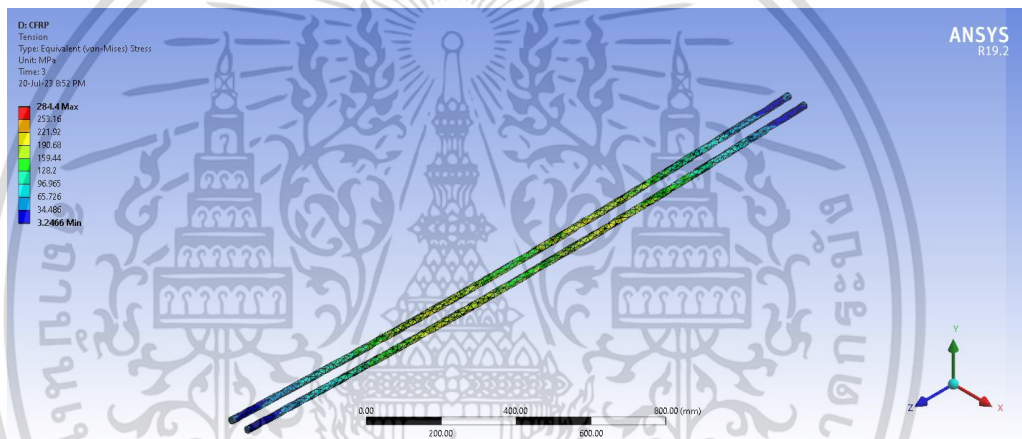


รูปที่ 4.3.6 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองที่มีช่องเปิดบริเวณรับแรงดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในเชิงวิชาการเพื่อใช้เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบปะกันนี้ให้รีบแจ้งให้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.7 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOM2 เท่ากับ 420.79 Mpa



รูปที่ 4.3.8 ความเค้นสูงสุดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง BOM2F เท่ากับ 284.4 Mpa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดเพื่อหาแนวทางการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งในตำแหน่งรับแรงเฉือนและตำแหน่งรับแรงดัด โดยคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัวจากหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจารณาจากสูตรคำนวณเชิงทฤษฎี แล้วนำค่าน้ำหนักบรรทุกในแต่ละช่วงพฤติกรรมของคานไปใส่เป็นน้ำหนักบรรทุกที่พิจารณาของแบบจำลองทั้งหมด จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ไม่มีช่องเปิด มีค่าการแอ่นตัว 6.04 mm. แบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดเล็กหรือไม่เกิน 25% ของความสูงคานบริเวณรับแรงเฉือนมีค่าการแอ่นตัว 6.12 mm. หรือเพิ่มขึ้น 0.08 mm. แบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงเฉือนมีค่าการแอ่นตัว 6.73 mm. หรือเพิ่มขึ้น 0.69 mm. สังเกตได้ว่าแบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นมากพอสมควรเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีช่องเปิด เมื่อนำแบบจำลองนี้มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะหุ้ม 2 ด้าน บริเวณด้านข้างของแบบจำลอง โดยให้ทิศทางการรับแรงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ขนานไปกับทิศทางการกระจายตัวของความเค้น (vector stress) ที่กล่าวได้หัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าค่าการแอ่นตัวจาก 6.73 mm. ลดลง 0.28 mm เหลือ 6.45 mm. หรือลดลง 4.2% แล้วค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กเสริมในแบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มีค่า 283.95 MPa เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ค่าความเค้นสูงสุดลดลงเหลือ 279.8 MPa

และจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดเล็กหรือไม่เกิน 25% ของความสูงคานบริเวณรับแรงดัดมีค่าการแอ่นตัว 6.12 mm. หรือเพิ่มขึ้น 0.08 mm. แบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณรับแรงดัดมีค่าการแอ่นตัว 24.95 mm. หรือเพิ่มขึ้น 18.91 mm. สังเกตได้ว่าแบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีช่องเปิด เมื่อนำแบบจำลองนี้มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะหุ้ม ทั้ง 4 ด้าน บริเวณด้านข้าง ด้านบนและด้านล่างของแบบจำลอง โดยให้ทิศทางการรับแรงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ขนานไปกับทิศทางการกระจายตัวของความเค้น (vector stress) ที่กล่าวได้หัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าค่าการแอ่นตัวจาก 25.95 mm. ลดลงถึง 18.90 mm เหลือ 6.05 mm. หรือลดลง 75.8% แล้วค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นสูงสุดของเหล็กเสริมในแบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มีค่า 420.79 MPa เมื่อเสริมกำลังรับด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ค่าความเค้นสูงสุดลดลงเหลือ 284.4 MPa

5.2 อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมดกล่าวได้ว่าในคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก (ไม่เกิน 25% ของความสูงคาน) ทั้งในตำแหน่งรับแรงเฉือนและตำแหน่งรับแรงดัดค่าการแอ่นตัวลดลงเพียงเล็กน้อยหรือใกล้เคียงกับการแอ่นตัวของคานที่ไม่มีช่องเปิด หมายความว่าความสามารถกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตสูญเสียไปเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่สูญเสียกำลังรับน้ำหนักเลย เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์ออกแบบคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็กในตำแหน่งรับแรงเฉือนและแรงดัดสามารถออกแบบได้เหมือนในกรณีของคานคอนกรีตที่ไม่มีช่องเปิด แต่ในความหมายของช่องเปิดขนาดเล็กที่ไม่เกิน 25% ของความสูงคานคอนกรีตจุดศูนย์กลางของช่องเปิดต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของความสูงคานคอนกรีตเพราะช่องเปิดนี้จะไม่อยู่ในบริเวณรับแรงอัดของหน้าตัดคานคอนกรีตทำให้น้ำหนักคานคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดได้เหมือนในกรณีคานคอนกรีตที่ไม่มีช่องเปิด

ในกรณีของคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในตำแหน่งรับแรงเฉือนมีค่าการแอ่นตัว 6.73 mm. แอ่นตัวเพิ่มขึ้น 0.69 mm. เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีช่องเปิด เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ค่าการแอ่นตัวจาก 6.73 mm. ลดลง 0.28 mm. เหลือ 6.45 mm. และค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กเสริมจาก 283.95 MPa ลดลงเหลือ 279.8 MPa กรณีของคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในตำแหน่งรับแรงดัดมีค่าการแอ่นตัว 24.95 mm. แอ่นตัวเพิ่มขึ้น 18.91 mm. เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีช่องเปิด เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ค่าการแอ่นตัวจาก 24.95 mm. ลดลง 18.90 mm. เหลือ 6.05 mm. และค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กเสริมจาก 490.79 MPa ลดลงเหลือ 284.4 MPa จากผลที่ได้คานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในตำแหน่งรับแรงเฉือนและตำแหน่งรับแรงดัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ในตำแหน่งรับแรงดัดที่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้น ถึง 18.91 mm. หมายความว่าคานคอนกรีตสูญเสียกำลังรับน้ำหนักไปมาก ค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กเสริมถึงจุดคราก (yield strength) 420.79 MPa เมื่อมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ค่าการแอ่นตัวจาก 24.95 mm. ลดลง 18.90 mm. เหลือ 6.05 mm. แสดงถึงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น และมีค่าความเค้นสูงสุด 284.4 MPa แสดงว่าแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตได้ สืบเนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดที่

ลดลงของเหล็กเสริม อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์นี้ผู้วิจัยวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมดในช่วงยึดหยุ่นเชิงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้น (Linear Elastic) เท่านั้น ทำให้ค่าการแอ่นตัวของแบบจำลองคานคองกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ บริเวณรับแรงดัด มีค่าที่สูงเป็นอย่างมากคือ 24.95 mm. หรือเพิ่มขึ้น 18.91 mm. เมื่อเทียบกับคานคองกรีตที่ไม่มีช่องเปิด เป็นเพราะความสภาวะความเป็นจริงคานดังกล่าวอาจเกิดการพังเสียหายไปแล้ว แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ วิเคราะห์ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น และไม่ได้ระบุการวิเคราะห์แบบเกิดการแตกหัก (Crack Model) ทำให้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวไปเรื่อยๆ ตามแรงกระทำที่ระบุ จึงทำให้ค่าการแอ่นตัวในแบบจำลองนี้มีค่ามากถึง 24.95 mm.

5.3 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

ผลการวิจัยนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการหาแนวทางการเสริมกำลังคานคองกรีตเสริมเหล็กที่สูญเสียกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่มีช่องเปิดในส่วนรับแรงเฉือนและแรงดัดด้วยการเสริมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ทั้งนี้หากคานคองกรีตรับแรงกระทำในลักษณะอื่นที่ไม่ใช่แรงกระทำแบบ four point bending หรือขนาดและตำแหน่งแตกต่างกันออกไป อาจทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าที่ต่างกันไป ผู้วิจัยต้องออกแบบลักษณะกับตำแหน่งการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของชิ้นงาน

บรรณานุกรม

- Mongmol Jirawacharadet 2015. “คู่มือการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขั้นสูง (Advanced RC Concrete Design)”
- ภวินท์ วัฒนเพ็ญไพบูลย์ 2559. “การเสริมความแข็งแรงของคานเก่าที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่เกิดการเจาะและเสริมด้วยแผ่น CFRP Plate ในรูปแบบโครงถัก” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 สงขลาประเทศไทย
- สหชัย แก่นอากาศ อธิพิงศ์ พันธุ์นิกุล และ ดร.วนิดา แก่นอากาศ 2545. “พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก”
- S.C.Chin N.Shafiq และ M.F.Nuruddin 2011. “Strengthening of RC Beams Containing Large Opening at Flexure with CFRP laminates” . World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:5, No:12, 2011.
- S.C.Chin N.Shafiq M.F.Nuruddin และ S.A.Farhan 2012. “Strengthening of RC Beams with Large Openings in Shear by CFRP laminates”. International Conference on Civil, Offshore, & Environmental Engineering (ICCOEE 2012),At: KLCC, Kuala Lumpur.
- อมร พิมาณมาศ. “การเสริมความแข็งแรงอาคารเก่าต้านแผ่นดินไหว”
- Rakesh Diggikar Shivaraj Mangalagi และ Rajendrakumar Harsoor 2013. “Behavior of R.C.C. Beam With Rectangular Opening Strengthened by CFRP And GFRP Sheets”
- Mohammed J.Abed K.Nassharuddin M.A.AlamZakaria CM และ Moatasem M.Fayyadh 2012. “DAMAGED RC BEAMS WITH CIRCULAR WEB OPENING REPAIRED USING DIFFERENT CONFIGURATION OF BONDING STEEL PLATE” . International Journal of Civil Engineering and Technology Volume 3, Issue 2, July - December 2012, Pages 70-83, Page Count - 14
- R.A. Hawileh, H.A.Musto, J.A.Abdalla และ M.Z.Naser 2019. “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened on Flexure with Side-boned FRP Laminates”. Composites Part B. Vol. 173, 106952.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Prof.S.S Deshpande, P.N. Desai, K.P. Pandey และ N.P.Pangarkar 2016. “**Detailed Studies on Stress Concentration by Classical and Finite Element Analysis**”. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). Volume 7, Issue 2, March-April 2016, pp. 148-167, Article ID: IJMET_07_02_017.
- A.P. Boresi, R.J. Schmidt และ O.M. Sidebottom. “**Advanced Mechanics of Materials**”. Includes Bibliographical References and Index. ISBN 0-471-55157-0.
- Yucheng Liu, PhD, PE. “**Choose The Best Element Size to Yield Accurate FEA Results While Reduce FE Model’s Complexity**”. British Journal of Engineering and Technology. Vol. 1, No. 7, pp 13-28, MAY 2013.
- T. Almusallam, Y Al-Salloum, H. Elsanadedy, A. Alshenawy and R. Iqbal. “**Behavior of FRP-Strengthened RC Beam with Large Rectangular Web Openings in Flexure Zone: Experimental and Numerical Study**”. International Journal of Concrete Structures and Materials (2018) 12:47.
- Said M. Allam. “**Strengthening of RC Beam with Large Opening in The Shear Zone**”. Alexandria Engineering Journal, Vol 44 (2005), No. 1, 59-78.
- Ashraf Mohamed Mahmoud. “**Strengthening of concrete beams having shear zone openings using orthotropic CFRP modeling**”. Ain Shams Engineering Journal (2012) 3, 177-190.
- Asst.Lect. Mohammad Zohair Yousif. “**R.C. Beam Strengthening by Carbon Fiber Reinforced Polymer Against Two Points Load Divergence**”. Journal of Engineering and Development, Vol. 16, No. 2, June 2012 ISSN 1813-7822.
- Dr. Latha M S and Naveen Kumar B M. “**Behavior of Reinforced Concrete Beam with Opening**”. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). Volume 8, Issue 7. July 2017, pp.581-893.
- Abdulsamee Halahla. “**Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis**”. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE’18). Budapest, Hungary – April 8 - 10, 2018. Paper No. ICSENM 103.

บรรณานุกรม (ต่อ)

Guray Arslan. “Diagonal Tension Failure of RC Beams without Stirrups”. Journal of Civil Engineering and Management. ISSN 1392-3730 Print/ISSN 1822-3605 online 2012 Volume 18(2): 217-226.

ผศ.ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว. “Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Laminates: Experiment and Analysis by Detailed Finite Element Models”. 2558.

Bob McGinty, PFD, PE. “www.fracturemechanics.org”.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23
23rd National Convention on Civil Engineering

STR30
ID263

A comparison in flexural behaviors of a reinforced concrete beam with openings and carbon fiber strengthening

Panat Meemuang 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

Due to utilization requirements, an opening may be drilled into a reinforced concrete beam, for instance, electrical and sanitary pipes installations, etc. Such opening may lead to a loss in the strength of a beam or even a sudden collapse. By means of a finite element model, this research interests in behaviors of a reinforced concrete beam embedded with an opening in the vicinity of a support under the four-point bending condition.

Subsequently, a rectangular carbon fiber sheet was attached around the opening of the reinforced concrete. Results from the former and the latter model were compared to investigate influences of the carbon fiber reinforcement around the hole. Then results from the finite element model were compared with those of the experiment for a verification purpose. Later, the researcher will analyze to determine an optimal position to drill an opening with a certain degree of safety.

Keywords : reinforced concrete beams with openings, carbon fiber plate, four-point bending test.

การเปรียบเทียบพฤติกรรมการค้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ปานัดมีเมือง* และ อัมพณ จรัสจรวงศ์เกียรติ :

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานก่อสร้างมีการเจาะช่องเปิดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อนำท่อไม่ต่างจะเป็นท่อสายไฟหรือท่อระบบสุขาภิบาล ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของคานมีค่าลดลงงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิด โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดและทำการทดสอบการค้ำแบบสี่จุดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองจากนั้นนำแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดมาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบช่องเปิดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบผลที่ได้กับกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังโดยผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อพิจารณาตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไปทางผู้วิจัยจะวิเคราะห์ตรวจสอบว่าตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสามารถเจาะช่องเปิดได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ : คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิด, คาร์บอนไฟเบอร์, ทดสอบการค้ำแบบสี่จุด



การเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

A comparison in flexural behaviors of a reinforced concrete beam with openings and carbon fiber strengthening

ปณัสน์ มีเมือง¹ และ อำนวย จรัสจรัสเกียรติ^{2*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานก่อสร้างมีการเจาะช่องเปิดในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อฝังท่อไม่ว่าจะเป็นท่อสายไฟหรือท่อระบบสุขาภิบาล ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของคานมีค่าลดลง งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิด โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดและทำการทดสอบการดัดแบบสี่จุดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลอง จากนั้นนำแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิดมาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณรอบช่องเปิด เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบผลที่ได้กับกรณีที่มีการเสริมกำลัง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกเปรียบเทียบับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อพิจารณาตรวจสอบผลที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนต่อไปทางผู้วิจัยจะวิเคราะห์ตรวจสอบว่าตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสามารถเจาะช่องเปิดได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเจาะช่องเปิด, คาร์บอนไฟเบอร์, ทดสอบการดัดแบบสี่จุด

Abstract

Due to utilization requirements, an opening may be drilled into reinforced concrete beam, for instance, electrical and sanitary pipes installations, etc. Such opening may lead to a loss in the strength of a beam or even a sudden collapse. By means of a finite element model, this research interests in behaviors of a reinforced concrete beam embedded with an opening in the vicinity of a support under the four-point bending condition.

Subsequently, a rectangular carbon fiber sheet was attached around the opening of the reinforced concrete. Results from the former and the latter model were compared to investigate

influences of the carbon fiber reinforcement around the hole. Then results from the finite element model were compared with those of the experiment for a verification purpose. Later, the researcher will analyze to determine an optimal position to drill an opening with a certain degree of safety.

Keywords: reinforced concrete beams with openings, carbon fiber plate, four-point bending test.

1. บทนำ

ปัจจุบันทั้งอาคารและบ้านเรือนจำเป็นต้องมีการเดินท่อระบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นท่อระบบไฟฟ้า ท่อระบบ สุขาภิบาล เป็นต้น ปกติแล้วระบบท่อต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องเดินลอดใต้ท้องคาน ซึ่งในอาคารขนาดใหญ่การเดินท่อลอดใต้ท้องคานส่งผลให้ในแต่ละชั้นของอาคารมีความสูงลดลง[1] ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องมีการเจาะช่องเปิดเพื่อเดินท่อผ่านคานอาคารขนาดใหญ่ที่มีจำนวนชั้นมากจะช่วยประหยัดความสูงและค่าก่อสร้างอาคารได้ ซึ่งในการเจาะช่องเปิดในคานส่งผลให้กำลังรับแรงของคานมีค่าลดลง[2] ภวิทร์(2016)[3] จึงได้ทำการทดลองศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่และหาแนวทางในการเสริมกำลัง ซึ่งวัสดุที่นำมาเสริมกำลังคือแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายอย่างคือมีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูงสามารถนำมาเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตได้[4] จึงเป็นที่มาของการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยผลของการทดสอบจะอ้างอิงจากงานวิจัยของ ภวิทร์(2016)[3] ส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาได้จากงานวิจัยนี้

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของการแ่นตัวที่กึ่งกลางคานระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยการทดลองการดัดแบบ 4 จุด ในการ

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะใช้เอลิเมนต์ชนิดแข็ง Solid-Element ในการสร้างแบบจำลอง โดยคุณสมบัติของเหล็กเสริมและคอนกรีตจะเป็นคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic material) ส่วนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีคุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันในแต่ละแกนหลัก (Orthotropic)

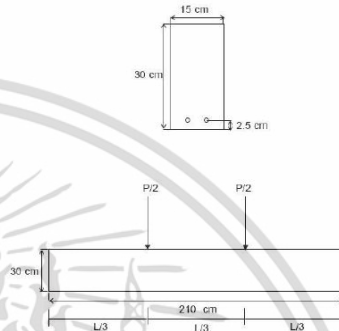
กรณีที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าตัดขนาด 30×15 ซม. ยาว 2.1 ม.เหล็กเสริมในคาน ใช้เหล็ก DB 20 จำนวน 2 เส้น เหล็กปลอก RB 6 ระยะห่าง 13 เซนติเมตร โดยเว้นช่วงกลางไว้ 45 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 คานคอนกรีตที่มีการเจาะช่องเปิดเพื่อการวางท่อในระบบสุขาภิบาล

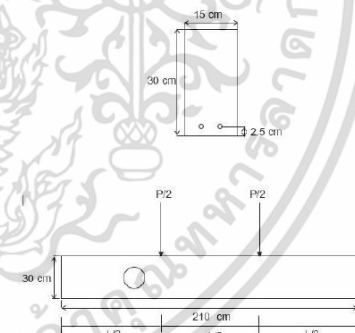


รูปที่ 2 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลัง



รูปที่ 3 ขนาดและรายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

กรณีที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด ทำการเจาะช่องเปิดที่ระยะ L/4 จากปลายคาน โดย L คือความยาวคาน และช่องเปิดมีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ใช้เหล็ก DB 20 จำนวน 2 เส้น เหล็กปลอก RB 6 ระยะห่าง 13 เซนติเมตร โดยเว้นช่วงกลางไว้ 45 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขนาดและรายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด

กรณีที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ทำการเจาะช่องเปิดที่ระยะ L/4 จากปลายคาน โดย L คือความยาวคาน ใช้เหล็ก DB 20 จำนวน 2 เส้น เหล็กปลอก RB 6 ระยะห่าง 13 เซนติเมตร โดยเว้นช่วงกลางไว้ 45 เซนติเมตร ทำการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รอบบริเวณช่องเปิดเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมและยึดติดกันด้วยพุกขนาด 1/2 นิ้ว ทั้งสองด้านของคาน โดยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีขนาด 5×25 ซม. ทน 1.2 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกคือการทำทดสอบในห้องปฏิบัติการและส่วนที่สองคือการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์

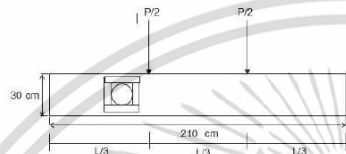
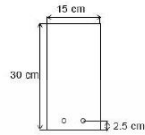
2.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการใช้วิธีการทดสอบการดัดแบบสี่จุด (Four point bending test) ซึ่งเป็นทดสอบแบบสถิตย์ศาสตร์ โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบ

2.1.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแบ่งเป็น 3 กรณี คือ 1.คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2.คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด 3.คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งรูปแบบขนาดต่างๆของแต่ละกรณี แสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ขนาดและรายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ติดตั้งชิ้นงานที่ทดสอบกับเครื่องทดสอบพร้อมเครื่องมือวัดระยะ แอนตัวที่กึ่งกลางคานบนชุดทดสอบการดัดแบบสี่จุด โดยระยะห่างของแรงกระทำเท่ากับ L/3 ของความยาวคาน ดังแสดงในรูปที่ 6 ดำเนินการทดสอบโดยใช้มีไฮดรอลิกอัดค้ำหมันไฮดรอลิกไปยังเครื่องตะบันหน้าอย่างช้าๆ บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัวของคาน ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องโดยค่อยๆเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างสม่ำเสมอจนคานวิบัติ วิธีและผลการทดสอบอ้างอิงจาก ภวนันท์(2016)[3]



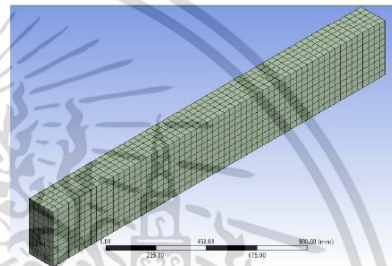
รูปที่ 6 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์วัดระยะแอ่นตัวบนเครื่องทดสอบการดัดแบบสี่จุด[3]

2.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

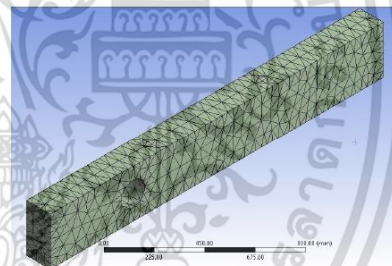
ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์โดยกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตกับเหล็กเสริมแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic material) และกำหนดคุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบแตกต่างกันในแต่ละแกนหลัก (Orthotropic material) โดยคุณสมบัติวัสดุแสดงในตารางที่ 1 และ 2

2.2.1 การสร้างจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS

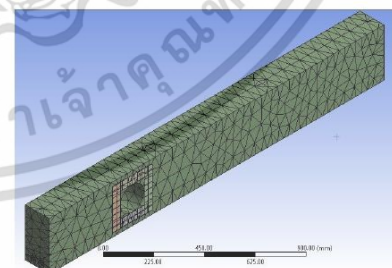
การสร้างแบบจำลองจะสร้างแบบ Solid-element โดยรูปทรงของเอลิเมนต์ของกรณีที่ 1 จะเป็นทรงสี่เหลี่ยมทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่ในกรณีที่ 2 และ 3 รูปทรงเอลิเมนต์ของคอนกรีตจะเป็นทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากค่าความเค้นการบิดมีการเจาะช่องเปิดจะทำให้เอลิเมนต์มีการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 8,9 ตามลำดับ กำหนดการเชื่อมต่อกันของวัสดุระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม และคอนกรีตกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นแบบ Bonded เชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์



รูปที่ 7 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 8 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด



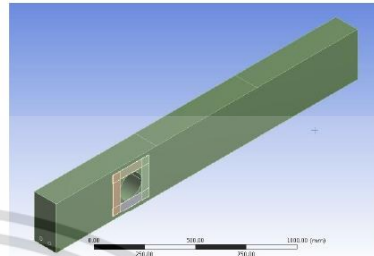
รูปที่ 9 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย CFRP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเงื่อนไขของวัสดุคือ 1. คอนกรีต มีค่ากำลังรับแรงอัด 210 กก/ซม²(ksc) 2. เหล็กเสริม มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 4000 กก/ซม²(ksc) กำลังรับแรงดึงที่จุดประลัย 5700 กก/ซม²(ksc) 3. คาร์บอนไฟเบอร์ มีกำลังรับแรงดึง 2800 นิวตัน/มม²(N/mm²)

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมและคอนกรีต Isotropic material[3]

วัสดุ	E(MPa)	G(MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
คอนกรีต	22029	9.3×10^3	0.18	2400
เหล็กเสริม	1.96×10^5	7.5×10^4	0.3	7850

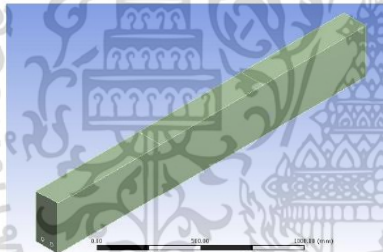


รูปที่ 12 แบบจำลองคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วย CFRP

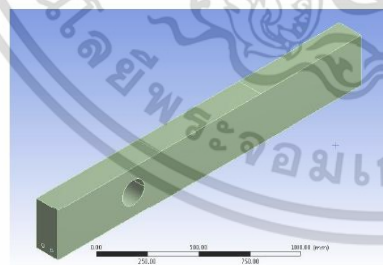
ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ Orthotropic material[3][5]

วัสดุ	E(MPa)	G(MPa)	ν	ρ (kg/m ³)
คาร์บอนไฟเบอร์	$E_x=1.65 \times 10^5$ $E_y=1.65 \times 10^5$ $E_z=1.65 \times 10^4$	$G_{xy}=6.3 \times 10^4$ $G_{yz}=9.6 \times 10^3$ $G_{xz}=9.6 \times 10^3$	$\nu_{xy}=0.04$ $\nu_{yz}=0.3$ $\nu_{xz}=0.3$	1600

กำหนดให้ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น, G คือ โมดูลัสแรงเฉือน, ν คือ อัตราส่วนปัวซอง, ρ คือ หน่วยน้ำหนัก



รูปที่ 10 แบบจำลองคานาคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 11 แบบจำลองคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด

2.2.2 เงื่อนไขการจำกัดขอบเขตของแบบจำลองแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีเงื่อนไขโดยให้จุดรองรับด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนแบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge Support) อีกด้านหนึ่งเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller Support) ดังแสดงในรูปที่ 13 และในการวิเคราะห์จะเปรียบเสมือนว่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic)



รูปที่ 13 แบบจำลองและเงื่อนไขการจำกัดขอบเขต

2.2.3 การให้แรงกระทำต่อแบบจำลอง

การให้แรงกระทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะอ้างอิงจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะนำกำลังรับน้ำหนักที่จุดประลัยในแต่ละกรณี มากำหนดแรงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบค่อยๆ เพิ่มแรงกระทำ โดยจะทำการเพิ่มแรงกระทำทีละ 10 กิโลนิวตัน(KN) จนกว่าจะถึงกำลังบรรทุกประลัยในแต่ละกรณี

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.ผลจากห้องปฏิบัติการ 2. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

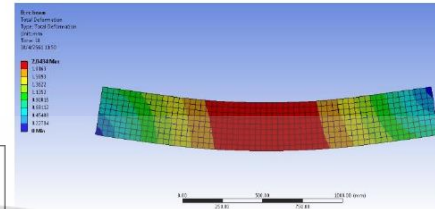
จากการทดสอบการให้แรงกระทำการตัดแบบสี่จุด[3] พบว่าในกรณีคานาคอนกรีตเสริมเหล็กกำลัง ค่ารับกำลังประลัยเฉลี่ยคือ 95.50 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานาเฉลี่ยคือ 3.06 มม. ในกรณีคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดค่ารับกำลังประลัยเฉลี่ยคือ 81.00 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานาเฉลี่ยคือ 4.90 มม. และในกรณีคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไฟเบอร์ ค้ำรับกำลังประลัยเฉลี่ยคือ 90.50 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเฉลี่ยคือ 7.99 มม. ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ

คานทดสอบ	กำลังบรรทุกประลัยเฉลี่ย กิโลนิวตัน(KN)	ระยะการแอ่นตัว เฉลี่ยที่น้ำหนัก บรรทุกประลัย มม. (mm)
กรณีที่ 1	95.50	3.06
กรณีที่ 2	81.00	4.90
กรณีที่ 3	90.50	7.99

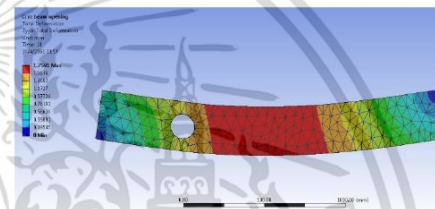


รูปที่ 15 ผลการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกประลัยตัวของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 14 แสดงถึงลักษณะการแตกร้าวบริเวณของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด ซึ่งเกิดรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือนโดยรอยแตกร้าวทำมุม 45 องศา กับคานคอนกรีตผ่าช่องเปิด



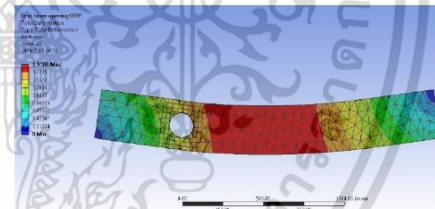
รูปที่ 14 ลักษณะของรอยแตกร้าวบริเวณรอบช่องเปิด



รูปที่ 16 ผลการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกประลัยตัวของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิด

3.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการกำหนดคุณสมบัติวัสดุไอโซทรอปิก Isotropic material พบว่าผลของระยะแอ่นตัวของคานทดสอบที่แรงกระทำเท่ากัน ในแต่ละกรณีมีค่าค่อนข้างต่างจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังประลัยเฉลี่ยคือ 95.50 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเฉลี่ยคือ 2.06 มม. ในกรณีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดกำลังประลัยเฉลี่ยคือ 81.00 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเฉลี่ยคือ 1.77 มม. และในกรณีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ กำลังประลัยเฉลี่ยคือ 90.50 กิโลนิวตัน ระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเฉลี่ยคือ 1.97 มม. ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 17 ผลการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกประลัยตัวของแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมด้วย CFRP

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

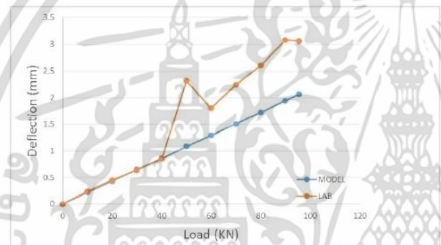
คานทดสอบ	กำลังบรรทุกประลัย กิโลนิวตัน(KN)	ระยะการแอ่นตัว มม. (mm)
กรณีที่ 1	95.50	2.06
กรณีที่ 2	81.00	1.77
กรณีที่ 3	90.50	1.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

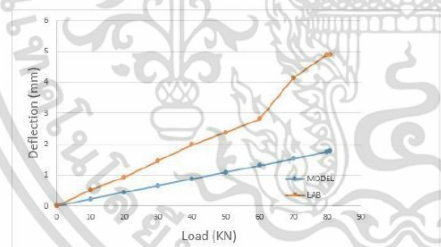
4. เปรียบเทียบผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่าความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะแอ่นตัวมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในกรณีที่ 1 ส่วนในกรณีที่ 2 และ 3 ระยะการแอ่นตัวแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังแสดงใน รูปที่ 17,18,19 ตามลำดับ

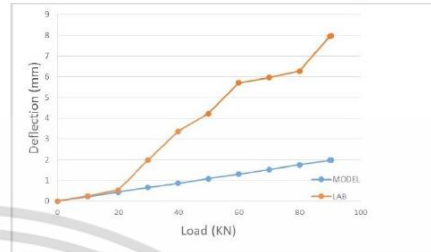
รูปที่ 18,19,20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยกำหนด MODEL คือผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ LAB คือผลที่ได้จากการทดลอง สังเกตได้ว่าในแต่ละกรณีช่วงแรกของการทดสอบระยะการแอ่นตัวมีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นค่าการแอ่นตัวระหว่างการทดลองกับแบบจำลองมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัว ในกรณีที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัว ในกรณีที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด

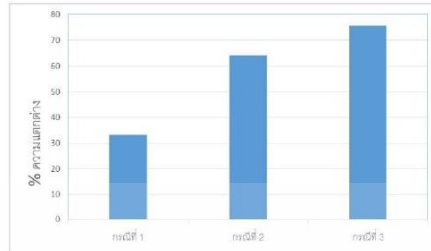


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการแอ่นตัว ในกรณีที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดเสริม CFRP

ในกรณีที่ 1 ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าที่กึ่งกลางคาน ประลัยเฉลี่ย 95.5 กิโลนิวตัน ผลของระยะแอ่นตัวจากการทดสอบมีค่า 3.06 มม. ผลของระยะแอ่นตัวจากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่า 2.06 มม. มีค่าต่างกัน 1.00 มม. คิดเป็น 32.68% กรณีที่ 2 ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดพบว่าที่กึ่งกลางคานประลัยเฉลี่ย 81 กิโลนิวตัน ผลของระยะแอ่นตัวจากการทดสอบมีค่า 4.90 มม. ผลของระยะแอ่นตัวจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่า 1.77 มม. มีค่าต่างกัน 3.13 มม. คิดเป็น 63.88% กรณีที่ 3 ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เจาะช่องเปิดเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์พบว่าที่กึ่งกลางคานประลัยเฉลี่ย 90.50 กิโลนิวตัน ผลของระยะแอ่นตัวจากการทดสอบมีค่า 7.99 มม. ผลของระยะแอ่นตัวจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่า 1.97 มม. มีค่าต่างกัน 6.02 มม. คิดเป็น 75.34% ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลของระยะการแอ่นตัวระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองในแต่ละกรณี

กรณีทดสอบ	กำลังบรรทุกประลัย (KN)	ระยะการแอ่นตัวของการทดสอบ (mm)	ระยะการแอ่นตัวของแบบจำลอง (mm)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%)
1	95.50	3.06	2.06	32.68
2	81.00	4.90	1.77	63.88
3	90.50	7.99	1.97	75.34



รูปที่ 21 แผนภูมิแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของผลการทดลอง ระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลอง

5. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ผลของการแฉกตัวของ การทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบการตัดแบบสี่จุดและวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีที่ 1 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกัน 32.68% ของผลการทดลอง ในกรณีที่ 2 และ 3 พบว่าค่าการแฉกตัวแตกต่างกันค่อนข้างมากที่ 63.88% และ 75.34% ของผลจากการทดลอง เหตุที่ผลการทดลองมีค่าแตกต่างกันมากเพราะในการทดลองมีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือทดสอบ และในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์สมมุติให้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) เท่านั้น ซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) และไม่เป็นอีลาสติก (inelastic) จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าการแฉกตัวมีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก จากผลการทดลองนี้พบว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของคานาได้เล็กน้อย และสามารถใช้โปรแกรม ANSYS จำลองพฤติกรรมของคานาคอนกรีตได้ในช่วงอีลาสติกเนื่องจากผลทดสอบของการทดลองและวิเคราะห์แบบจำลอง มีค่าใกล้เคียงกันในช่วงแรก แต่ในช่วงไม่เป็นอีลาสติก (inelastic) ต้องมีการศึกษาต่อไป

โดยในชั้นเรียนศึกษาต่อไป จะพัฒนาการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองการแตกร้าว (Crack Model) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ตรงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น และศึกษาผลของการจัดวางตำแหน่งของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ต้องขอขอบคุณครอบครัวของผู้เขียนและผู้สนับสนุนทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือส่งเสริมจนทำให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] มงคล จีระวิเศษ (2558).คู่มือการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขั้นสูง.

- [2] สหชัย แก่นอากาศ อิทธิพงษ์ พันธุ์นิกุล และ ดร.วนิดา แก่นอากาศ. พฤติกรรมคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก
- [3] ภวิทร์ วิวัฒน์เพ็ญไพบูลย์(2559).การเสริมความแข็งแรงของคานาเก่าที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ที่เกิดการเจาะและเสริมด้วยแผ่น CFRP Plate ในรูปแบบโครงถัก.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21,สงขลา,28-30 มิถุนายน 2559.
- [4] S.C.Chin, N.Shafiq and M.F.Nuruddin(2012).Strengthening of RC Beams with Large Openings in Shear by CFRP Laminates: Experiment and 2D Nonlinear Finite Element Analysis. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:6, No:2.
- [5] S.C.Chin, N.Shafiq and M.F.Nuruddin(2011).Strengthening of RC Beams Containing Large Opening at Flexure with CFRP Laminates. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:5, No:12.



ภาคผนวก ข.

รายงานโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

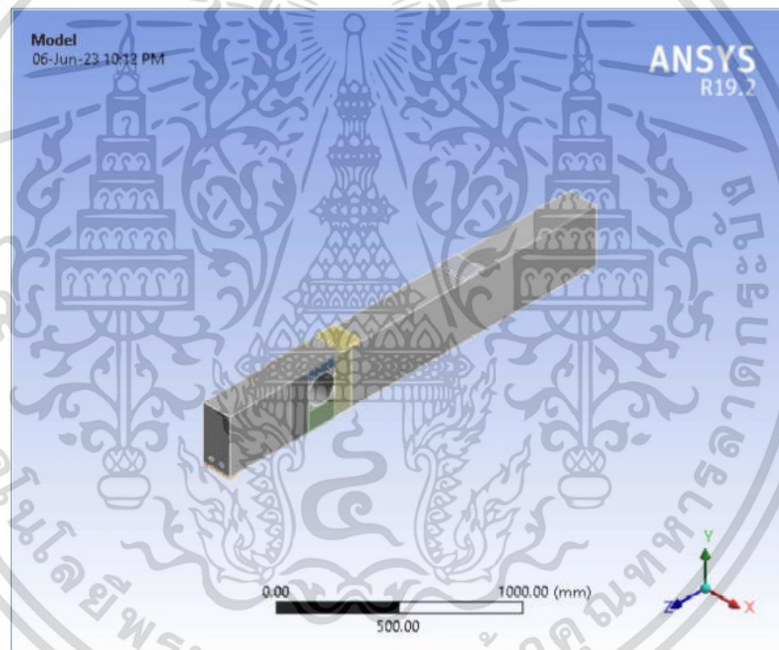
Project

Page 1 of 27



Project

First Saved	Monday, June 29, 2020
Last Saved	Thursday, October 29, 2020
Product Version	19.2 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents

- **Units**
- **Model (C4)**
 - Geometry
 - Parts
 - Materials
 - Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg
 - Concrete
 - Structural Steel NL
 - Structural Steel
 - Concrete NL
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Contacts
 - Contact Regions
 - Mesh
 - Hex Dominant Method
 - **Static Structural (C5)**
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (C6)
 - Solution Information
 - Results
 - Chart
 - concrete-cfrp
- **Material Data**
 - Concrete NL
 - Structural Steel NL
 - Structural Steel
 - Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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 (C4)

Geometry

TABLE 2
Model (C4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\boy\Documents\เล่ม Thesis\2023-06-06\Shear Zone_files\dp0\SYS-8

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	DMISYS-8.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	152.4 mm
Length Y	320. mm
Length Z	2100. mm
Properties	
Volume	9.2497e+007 mm ³
Mass	222.4 kg
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	15
Active Bodies	15
Nodes	40697
Elements	15297
Mesh Metric	None
Update Options	
Assign Default Material	No
Basic Geometry Options	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Analysis Type	3-D
Clean Bodies On Import	No
Stitch Surfaces On Import	No
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (C4) > Geometry > Parts

Object Name	concrete	steel	steel	plate	plate	plate	plate	CFRPy	CFRPy	CFRPz	CFRPz
State	Meshed										
Graphics Properties											
Visible	Yes										
Transparency	1										
Definition											
Suppressed	No										
Stiffness Behavior	Flexible										

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coordinate System	Default Coordinate System						y	z		
Reference Temperature	By Environment									
Behavior	None									
Material										
Assignment	Concrete NL	Structural Steel NL	Structural Steel			Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg				
Nonlinear Effects	Yes									
Thermal Strain Effects	Yes									
Bounding Box										
Length X	150. mm	20. mm	150. mm			1.2 mm				
Length Y	300. mm	20. mm	10. mm		300. mm	50. mm	100. mm			
Length Z	2100. mm		50. mm	100. mm			150. mm			
Properties										
Volume	9.053e+007 mm ³	6.5973e+005 mm ³	75000 mm ³	1.5e+005 mm ³	36000 mm ³	9000. mm ³	18000 mm ³			
Mass	208.22 kg	5.1789 kg	0.58875 kg	1.1775 kg	5.364e-002 kg	1.341e-002 kg	2.682e-002 kg			
Centroid X	75. mm	105. mm	45. mm	75. mm		150.6 mm				
Centroid Y	150.87 mm	40. mm	-5. mm	305. mm	150. mm	275. mm	50. mm			
Centroid Z	-1065.3 mm	-1050. mm	-25. mm	-2075. mm	-700. mm	-1400. mm	-650. mm	-400. mm	-525. mm	
Moment of Inertia Ip1	7.8619e+007 kg·mm ²	1.8937e+006 kg·mm ²	127.56 kg·mm ²	991.06 kg·mm ²	447. kg·mm ²	27.937 kg·mm ²	72.637 kg·mm ²			
Moment of Inertia Ip2	7.7431e+007 kg·mm ²	1.8937e+006 kg·mm ²	1226.6 kg·mm ²	3189.1 kg·mm ²	44.706 kg·mm ²	25.145 kg·mm ²	50.29 kg·mm ²			
Moment of Inertia Ip3	1.9744e+006 kg·mm ²	256.33 kg·mm ²	1108.8 kg·mm ²	2217.6 kg·mm ²	402.3 kg·mm ²	2.7953 kg·mm ²	22.353 kg·mm ²			
Statistics										
Nodes	26337	3191	3163	165	325	327	1203	1162	412	709
Elements	10546	1022	1016	16	78	82	436	420	139	251
Mesh Metric	None									

TABLE 4
Model (C4) > Geometry > Parts

Object Name	CFRPy	CFRPz	CFRPz
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Transparency	1		
Definition			
Suppressed	No		
Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	y	z	
Reference Temperature	By Environment		
Behavior	None		
Material			
Assignment	Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg		
Nonlinear Effects	Yes		
Thermal Strain Effects	Yes		
Bounding Box			
Length X	1.2 mm		
Length Y	300. mm	50. mm	100. mm

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Length Z	100. mm	150. mm	
Properties			
Volume	36000 mm ³	9000. mm ³	18000 mm ³
Mass	5.364e-002 kg	1.341e-002 kg	2.682e-002 kg
Centroid X	-0.6 mm		
Centroid Y	150. mm	275. mm	50. mm
Centroid Z	-400. mm	-650. mm	-525. mm
Moment of Inertia Ip1	447. kg·mm ²	27.938 kg·mm ²	72.638 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	44.706 kg·mm ²	25.145 kg·mm ²	50.291 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	402.31 kg·mm ²	2.7954 kg·mm ²	22.353 kg·mm ²
Statistics			
Nodes	1167	1203	433
Elements	426	438	145
Mesh Metric	None		

Coordinate Systems

TABLE 5
Model (C4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	Global Coordinate System	z	y
State	Fully Defined		
Definition			
Type	Cartesian		
Coordinate System ID	0.		
Coordinate System	Program Controlled		
APDL Name			
Suppressed	No		
Origin			
Origin X	0. mm	150. mm	
Origin Y	0. mm	300. mm	150. mm
Origin Z	0. mm	-1050. mm	0. mm
Define By	Geometry Selection		
Geometry	Defined		
Directional Vectors			
X Axis Data	[1. 0. 0.]	[0. 0. 1.]	[0. -1. 0.]
Y Axis Data	[0. 1. 0.]		[1. 0. 0.]
Z Axis Data	[0. 0. 1.]	[-1. 0. 0.]	[0. 0. 1.]
Principal Axis			
Axis		X	Y
Define By		Global Z Axis	Global X Axis
Orientation About Principal Axis			
Axis		Y	X
Define By		Default	
Transformations			
Base Configuration	Absolute		
Transformed Configuration	[150. 300. -1050.] [150. 150. 0.]		

Connections

TABLE 6
Model (C4) > Connections

Object Name	Connections
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 7
Model (C4) > Connections > Contacts

Object Name	Contacts
State	Fully Defined
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0.
Tolerance Value	5.3243 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	22
Active Connections	22

TABLE 8
Model (C4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	Contact Region 2	Contact Region 3	Contact Region 4	Contact Region 5	Contact Region 6	Contact Region 7	Contact Region 8	Contact Region 9	Contact Region 10	Contact Region 11
State	Fully Defined									
Scope										
Scoping Method	Geometry Selection									
Contact	1 Face									
Target	1 Face									
Contact Bodies	concrete									
Target Bodies	steel	plate				CFRPy	CFRPz	CFRPy		
Protected	No									
Definition										
Type	Bonded									
Scope Mode	Automatic									
Behavior	Program Controlled									
Trim Contact	Program Controlled									
Trim Tolerance	5.3243 mm									
Suppressed	No									
Advanced										

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Formulation	Program Controlled
Small Sliding	Off
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

TABLE 9
Model (C4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	Contact Region 12	Contact Region 13	Contact Region 14	Contact Region 15	Contact Region 16	Contact Region 17	Contact Region 18	Contact Region 19	Contact Region 20	Contact Region 21	Contact Region 22
State	Fully Defined										
Scope											
Scoping Method	Geometry Selection										
Contact	1 Face										
Target	1 Face										
Contact Bodies	concrete					CFRPy					
Target Bodies	CFRPy					CFRPz					
Protected	No										
Definition											
Type	Bonded										
Scope Mode	Automatic										
Behavior	Program Controlled										
Trim Contact	Program Controlled										
Trim Tolerance	5.3243 mm										
Suppressed	No										
Advanced											
Formulation	Program Controlled										
Small Sliding	Off										
Detection Method	Program Controlled										
Penetration Tolerance	Program Controlled										
Elastic Slip	Program Controlled										

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 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

Mesh

TABLE 10
Model (C4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	40.0 mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	2
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	2129.7 mm
Average Surface Area	34328 mm ²
Minimum Edge Length	1.2 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	No
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	40697
Elements	15297

TABLE 11
Model (C4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	Hex Dominant Method
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	15 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Method	Hex Dominant
Element Order	Use Global Setting
Free Face Mesh Type	All Quad
Control Messages	Yes, Click To Display...

Static Structural (C5)

TABLE 12
Model (C4) > Analysis

Object Name	Static Structural (C5)
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22. °C
Generate Input Only	No

TABLE 13
Model (C4) > Static Structural (C5) > Analysis Settings

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	5.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	5.
Minimum Substeps	5.
Maximum Substeps	25.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Combine 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\boy\Documents\เล่ม Thesis\2023-06-06\Shear Zone_files\dp0\SYS-8\MECH
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 14
Model (C4) > Static Structural (C5) > Analysis Settings
Step-Specific "Step Controls"

Step	Step End Time	Auto Time Stepping	Define By	Initial Substeps	Minimum Substeps	Maximum Substeps
1	1. s	On	Substeps	5.	5.	25.
2	2. s	Program Controlled				
3	3. s					
4	4. s					
5	5. s					

TABLE 15
Model (C4) > Static Structural (C5) > Loads

Object Name	Displacement	Displacement 2	Force
State	Fully Defined		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Edge	2 Faces	
Definition			
Type	Displacement	Force	
Define By	Components	Vector	
Coordinate System	Global Coordinate System		
X Component	0. mm (ramped)		

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y Component	0. mm (ramped)		
Z Component	0. mm (ramped)	Free	
Suppressed			No
Magnitude			Tabular Data
Direction			Defined
Tabular Data			
Independent Variable			Time

FIGURE 1
Model (C4) > Static Structural (C5) > Displacement

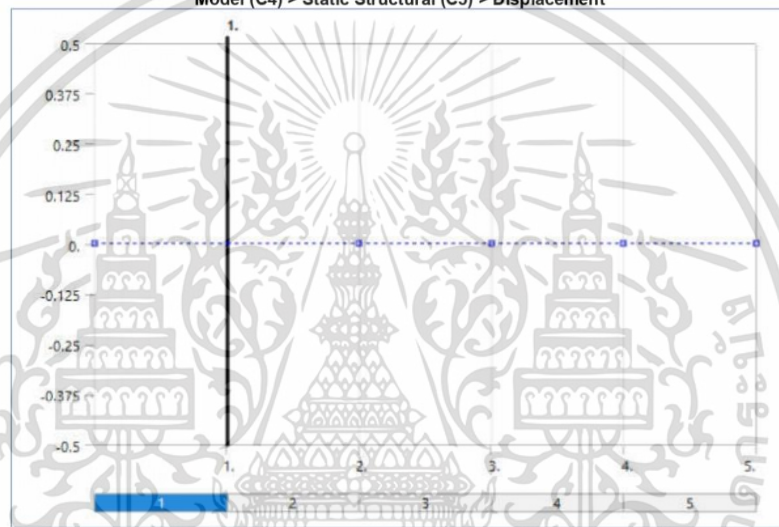


FIGURE 2
Model (C4) > Static Structural (C5) > Displacement 2

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

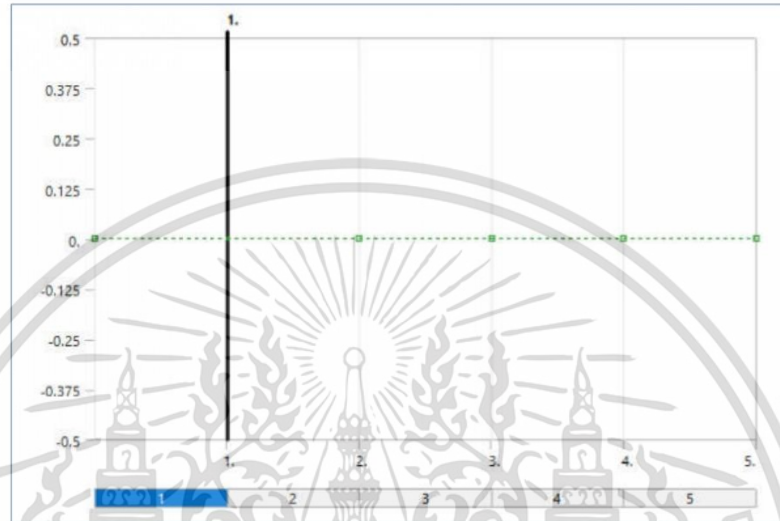


FIGURE 3
Model (C4) > Static Structural (C5) > Force

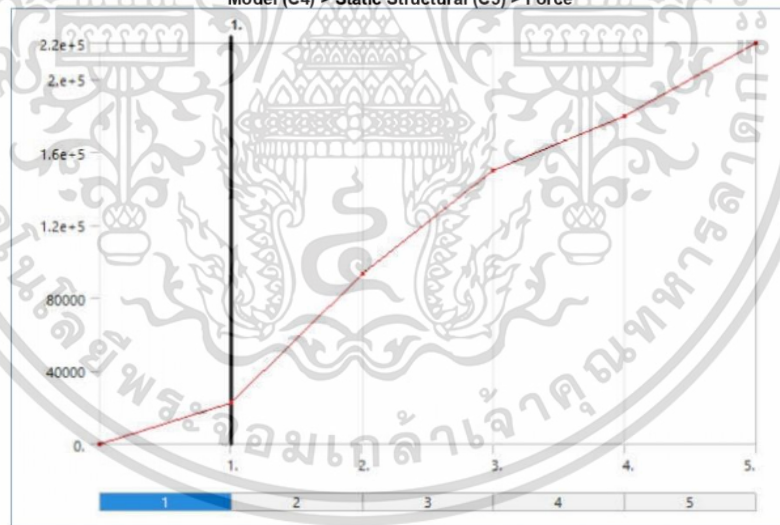


TABLE 16
Model (C4) > Static Structural (C5) > Force

Steps	Time [s]	Force [N]
1	0.	0.
	1.	22970

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2	2.	93370
3	3.	1.4998e+005
4	4.	1.8e+005
5	5.	2.2e+005

Solution (C6)

TABLE 17
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution

Object Name	Solution (C6)
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.
Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	10 m 29 s
MAPDL Memory Used	1.1758 GB
MAPDL Result File Size	395.06 MB
Post Processing	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

TABLE 18
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > 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

TABLE 19
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Results

Object Name	Tension steel	Compressive stress	Directional Deformation	Equivalent Stress	Equivalent Elastic Strain	stress concrete	stressCFRP	Vector Principal Stress
State	Solved							
Scope								
Scoping Method	Geometry Selection							
Geometry	2 Bodies	All Bodies		1 Body	All Bodies	1 Body	8 Bodies	1 Body
Definition								
Type	Equivalent (von-Mises) Stress	Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress		Vector Principal Stress	

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

By	Time						
Display Time	Last						
Calculate Time History	Yes						
Identifier							
Suppressed	No						
Orientation	Y Axis						
Coordinate System	Global Coordinate System						
Integration Point Results							
Display Option	Averaged			Averaged			
Average Across Bodies	No			No			
Results							
Minimum	4.9641 MPa	6.7738e-002 MPa	-13.806 mm	6.7738e-002 MPa	2.7095e-006 mm/mm	6.7738e-002 MPa	0.90227 MPa
Maximum	419.86 MPa	1113.5 MPa	0. mm	20.6 MPa	4.9182e-002 mm/mm	20.6 MPa	1113.5 MPa
Average	213.77 MPa	64.128 MPa	-9.0518 mm	12.536 MPa	1.3973e-003 mm/mm	12.536 MPa	120.84 MPa
Minimum Occurs On	steel		concrete			CFRPy	
Maximum Occurs On	steel	CFRPz	plate	concrete	CFRPy	concrete	CFRPz
Minimum Value Over Time							
Minimum	6.3474e-002 MPa	2.9804e-004 MPa	-13.806 mm	2.9804e-004 MPa	1.0854e-007 mm/mm	2.9804e-004 MPa	1.8429e-002 MPa
Maximum	4.9641 MPa	6.7738e-002 MPa	-0.17563 mm	6.7738e-002 MPa	2.7095e-006 mm/mm	6.7738e-002 MPa	0.90227 MPa
Maximum Value Over Time							
Minimum	7.9209 MPa		0. mm	1.0813 MPa	2.768e-004 mm/mm	1.0813 MPa	5.8698 MPa
Maximum	443.24 MPa	1113.5 MPa	0. mm	20.6 MPa	4.9182e-002 mm/mm	20.6 MPa	1113.5 MPa
Information							
Time	5. s						
Load Step	5						
Substep	4						
Iteration Number	55						

FIGURE 4
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Tension steel

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

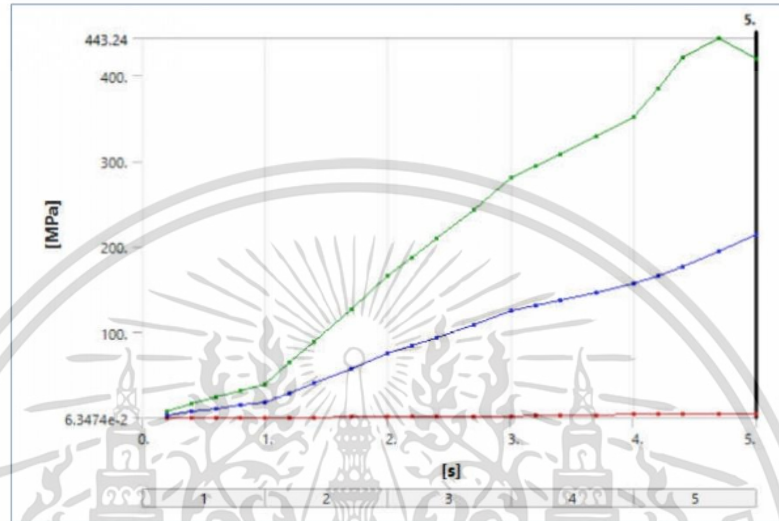


TABLE 20
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Tension steel

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	6.3474e-002	7.9209	3.5868
0.4	0.13582	15.9	7.2051
0.6	0.20889	23.881	10.824
0.8	0.28211	31.862	14.444
1.	0.35574	39.845	18.065
1.2	0.57101	64.322	29.167
1.4	0.75501	88.876	40.301
1.7	0.97655	126.82	57.316
2.	1.1097	165.95	74.759
2.2	1.165	187.25	84.254
2.4	1.2005	209.13	93.926
2.7	1.3208	243.19	108.87
3.	2.0153	279.8	124.79
3.2	2.4065	293.33	130.69
3.4	2.833	307.16	136.77
3.7	3.5611	328.39	146.24
4.	3.8421	351.56	156.44
4.2	3.9623	384.29	166.14
4.4	4.2051	420.83	176.69
4.7	4.5309	443.24	194.28
5.	4.9641	419.86	213.77

FIGURE 5
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Compressive stress

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

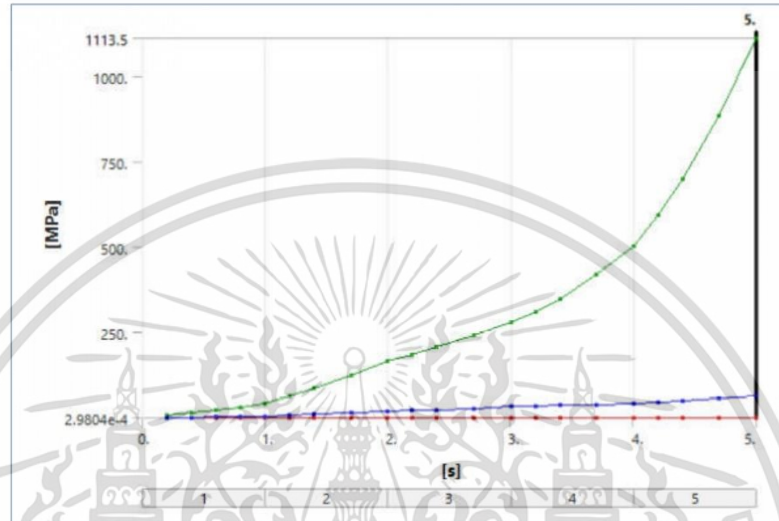


TABLE 21
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Compressive stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	2.9804e-004	7.9209	0.92318
0.4	8.4058e-004	15.9	1.8522
0.6	1.3749e-003	23.881	2.7813
0.8	1.8678e-003	31.862	3.7106
1.	2.3159e-003	39.845	4.64
1.2	3.4338e-003	64.322	7.4914
1.4	7.1549e-003	88.876	10.359
1.7	1.4835e-002	126.82	14.735
2.	2.5583e-002	165.95	19.221
2.2	2.4059e-002	187.25	21.679
2.4	2.9218e-002	209.13	24.195
2.7	2.696e-002	243.19	28.156
3.	4.1729e-002	279.8	32.543
3.2	3.6892e-002	309.92	34.258
3.4	4.5655e-002	348.25	36.087
3.7	4.8745e-002	418.63	39.078
4.	5.1981e-002	504.22	42.437
4.2	5.4965e-002	593.86	45.788
4.4	5.7972e-002	699.73	49.595
4.7	6.2701e-002	885.83	56.213
5.	6.7738e-002	1113.5	64.128

FIGURE 6
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Directional Deformation

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

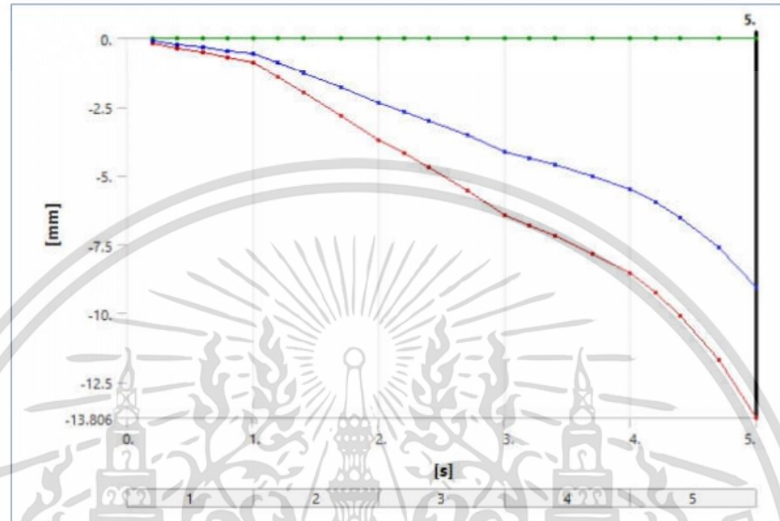


TABLE 22
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Average [mm]
0.2	-0.17563		-0.11128
0.4	-0.35295		-0.22364
0.6	-0.5303		-0.33603
0.8	-0.70769		-0.44844
1.	-0.88511		-0.56088
1.2	-1.4296		-0.90609
1.4	-1.9786		-1.2543
1.7	-2.8288		-1.7927
2.	-3.7112		-2.3526
2.2	-4.1992		-2.6633
2.4	-4.7089		-2.9883
2.7	-5.5284		-3.5144
3.	-6.452		-4.1143
3.2	-6.8112		-4.3502
3.4	-7.1946		-4.6027
3.7	-7.8219		-5.019
4.	-8.5411		-5.4977
4.2	-9.2672		-5.9825
4.4	-10.109		-6.5483
4.7	-11.68		-7.6095
5.	-13.806		-9.0518

FIGURE 7
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Stress

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

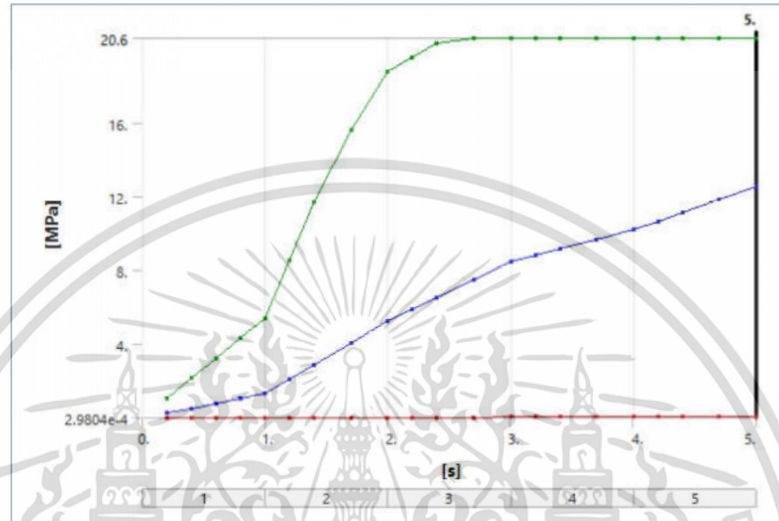


TABLE 23
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	2.9804e-004	1.0813	0.26074
0.4	8.4058e-004	2.1634	0.52062
0.6	1.3749e-003	3.2457	0.78054
0.8	1.8678e-003	4.3282	1.0405
1.	2.3159e-003	5.408	1.3005
1.2	3.4338e-003	8.5528	2.0976
1.4	7.1549e-003	11.667	2.8958
1.7	1.4835e-002	15.601	4.0976
2.	2.5583e-002	18.809	5.283
2.2	2.4059e-002	19.515	5.9132
2.4	2.9218e-002	20.31	6.5457
2.7	2.696e-002		7.504
3.	4.1729e-002		8.4753
3.2	3.6892e-002		8.8187
3.4	4.5655e-002		9.1625
3.7	4.8745e-002	20.6	9.6799
4.	5.1981e-002		10.202
4.2	5.4965e-002		10.667
4.4	5.7972e-002		11.133
4.7	6.2701e-002		11.836
5.	6.7738e-002		12.536

FIGURE 8
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Elastic Strain

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

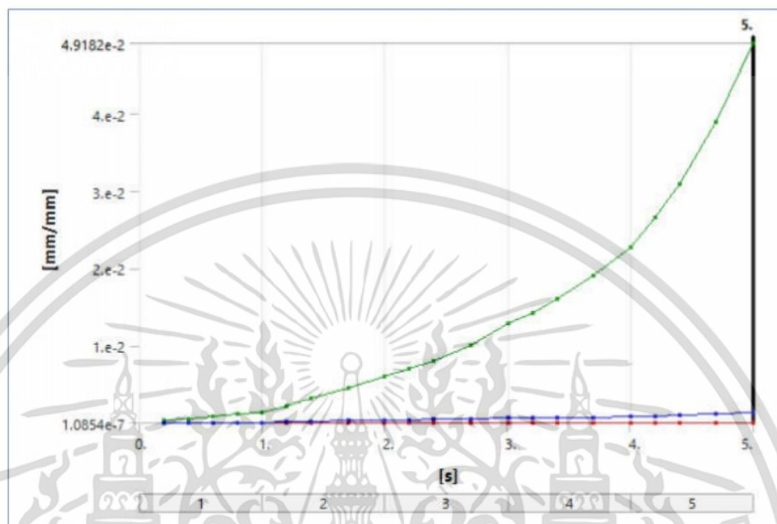


TABLE 24
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]	Average [mm/mm]
0.2	1.0854e-007	2.768e-004	1.6394e-005
0.4	1.9183e-007	5.5527e-004	3.2847e-005
0.6	2.2884e-007	8.3374e-004	4.9302e-005
0.8	3.0705e-007	1.1122e-003	6.576e-005
1.	3.5949e-007	1.3907e-003	8.222e-005
1.2	5.265e-007	2.2521e-003	1.3274e-004
1.4	6.9746e-007	3.1529e-003	1.8374e-004
1.7	9.5155e-007	4.5501e-003	2.6156e-004
2.	1.2084e-006	6.1057e-003	3.4134e-004
2.2	1.3466e-006	7.0419e-003	3.8529e-004
2.4	1.483e-006	8.0532e-003	4.3048e-004
2.7	1.687e-006	9.9886e-003	5.0347e-004
3.	1.8867e-006	1.284e-002	5.8838e-004
3.2	1.9554e-006	1.4279e-002	6.2327e-004
3.4	2.0223e-006	1.5985e-002	6.6159e-004
3.7	2.1228e-006	1.9061e-002	7.2678e-004
4.	2.2223e-006	2.271e-002	8.0321e-004
4.2	2.3102e-006	2.6542e-002	8.833e-004
4.4	2.4017e-006	3.1007e-002	9.7903e-004
4.7	2.5529e-006	3.8997e-002	1.1582e-003
5.	2.7095e-006	4.9182e-002	1.3973e-003

FIGURE 9
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > stress concrete

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

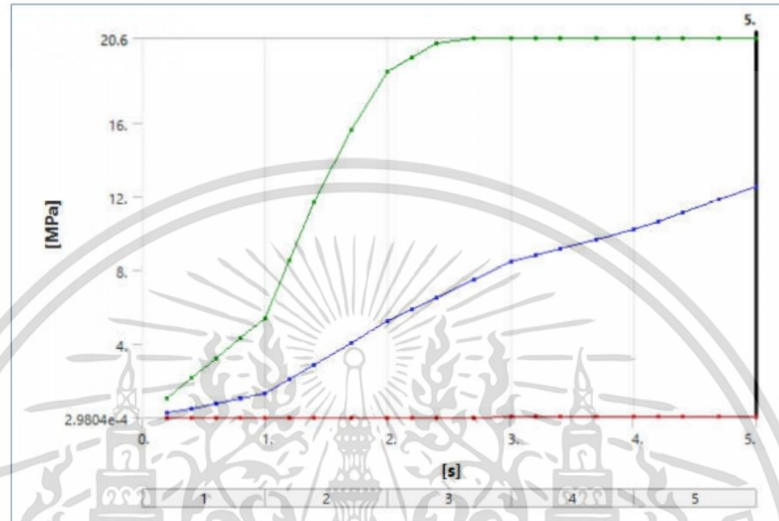


TABLE 25
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > stress concrete

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	2.9804e-004	1.0813	0.26074
0.4	8.4058e-004	2.1634	0.52062
0.6	1.3749e-003	3.2457	0.78054
0.8	1.8678e-003	4.3282	1.0405
1.	2.3159e-003	5.408	1.3005
1.2	3.4338e-003	8.5528	2.0976
1.4	7.1549e-003	11.667	2.8958
1.7	1.4835e-002	15.601	4.0976
2.	2.5583e-002	18.809	5.283
2.2	2.4059e-002	19.515	5.9132
2.4	2.9218e-002	20.31	6.5457
2.7	2.696e-002		7.504
3.	4.1729e-002		8.4753
3.2	3.6892e-002		8.8187
3.4	4.5655e-002		9.1625
3.7	4.8745e-002		9.6799
4.	5.1981e-002	20.6	10.202
4.2	5.4965e-002		10.667
4.4	5.7972e-002		11.133
4.7	6.2701e-002		11.836
5.	6.7738e-002		12.536

FIGURE 10
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > stressCFRP

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

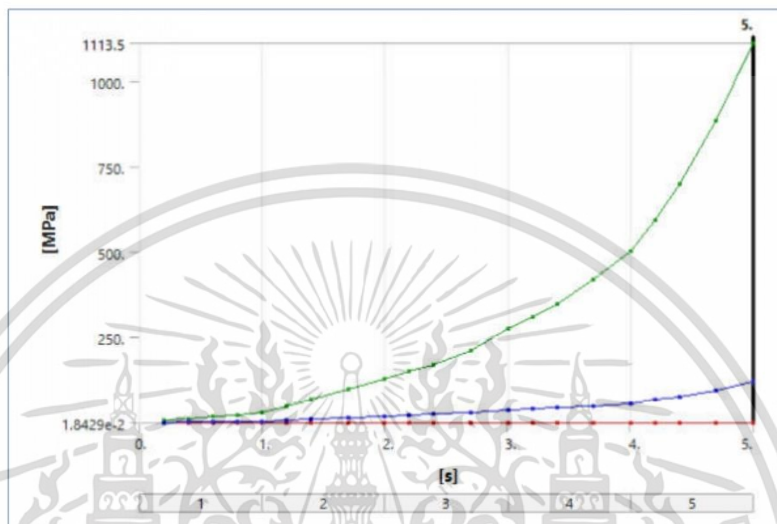


TABLE 26
Model (C4) > Static Structural (C5) > Solution (C6) > stressCFRP

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	1.8429e-002	5.8698	0.96878
0.4	3.7192e-002	11.765	1.9453
0.6	5.596e-002	17.66	2.9219
0.8	7.4733e-002	23.555	3.8985
1.	9.3514e-002	29.449	4.8752
1.2	0.15106	47.651	7.8761
1.4	0.20827	66.853	10.934
1.7	0.2941	96.627	15.645
2.	0.37967	130.24	20.619
2.2	0.42513	150.36	23.454
2.4	0.47017	172.19	26.429
2.7	0.53545	213.38	31.46
3.	0.59713	278.05	37.946
3.2	0.61786	309.92	40.925
3.4	0.63785	348.25	44.402
3.7	0.66791	418.63	50.705
4.	0.67448	504.22	58.454
4.2	0.73253	593.86	66.858
4.4	0.77106	699.73	77.117
4.7	0.83645	885.83	96.102
5.	0.90227	1113.5	120.84

Chart

FIGURE 11
Model (C4) > Chart

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

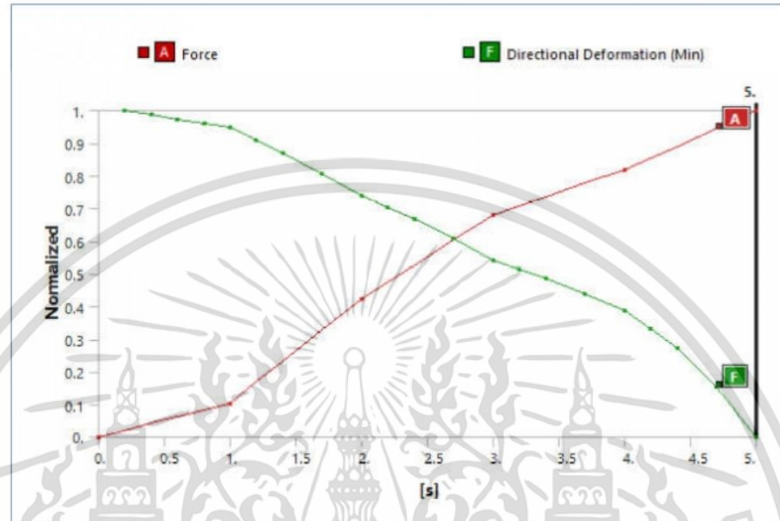


TABLE 27
Model (C4) > Chart

Steps	Time [s]	[A] Force [N]	[F] Directional Deformation (Min) [mm]
	0.	0.	
1	0.2	= 4594.	-0.17563
	0.4	= 9188.	-0.35295
	0.6	= 13782	-0.5303
	0.8	= 18376	-0.70769
	1.	22970	-0.88511
2	1.2	= 37050	-1.4296
	1.4	= 51130	-1.9786
	1.7	= 72250	-2.8288
3	2.	93370	-3.7112
	2.2	= 1.0469e+005	-4.1992
	2.4	= 1.1601e+005	-4.7089
	2.7	= 1.33e+005	-5.5284
4	3.	1.4998e+005	-6.452
	3.2	= 1.5598e+005	-6.8112
	3.4	= 1.6199e+005	-7.1946
	3.7	= 1.7099e+005	-7.8219
5	4.	1.8e+005	-8.5411
	4.2	= 1.88e+005	-9.2672
	4.4	= 1.96e+005	-10.109
	4.7	= 2.08e+005	-11.68
	5.	2.2e+005	-13.806

concrete-cfrp

FIGURE 12
Model (C4) > concrete-cfrp

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

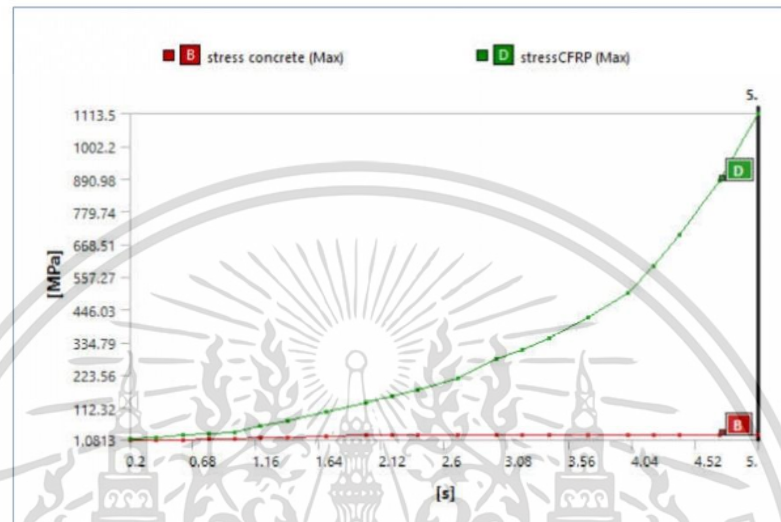


TABLE 28
Model (C4) > concrete-cfrp

Steps	Time [s]	[B] stress concrete (Max) [MPa]	[D] stressCFRP (Max) [MPa]
1	0.2	1.0813	5.8698
	0.4	2.1634	11.765
	0.6	3.2457	17.66
	0.8	4.3282	23.555
	1.	5.408	29.449
2	1.2	8.5528	47.651
	1.4	11.667	66.853
	1.7	15.601	96.627
	2.	18.809	130.24
3	2.2	19.515	150.36
	2.4	20.31	172.19
	2.7		213.38
	3.		278.05
4	3.2		309.92
	3.4		348.25
	3.7		418.63
	4.	20.6	504.22
5	4.2		593.86
	4.4		699.73
	4.7		885.83
	5.		1113.5

Material Data

Concrete NL

TABLE 29

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Concrete NL > ConstantsDensity | 2.3e-006 kg mm⁻³**TABLE 30**
Concrete NL > Drucker-Prager Strength Piecewise

Pressure P MPa	Yield Stress Y MPa
-4	0
0	10
15	40
50	44

TABLE 31
Concrete NL > Tensile Pressure FailureMaximum Tensile Pressure MPa
-4**TABLE 32**
Concrete NL > Crack Softening FailureFracture Energy Gf mJ mm⁻²
0.1**TABLE 33**
Concrete NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
25000	0.3	20833	9615.4	

TABLE 34
Concrete NL > Color

Red	Green	Blue
235	222	222

TABLE 35
Concrete NL > Tensile Yield StrengthTensile Yield Strength MPa
0**TABLE 36**
Concrete NL > Multilinear Isotropic Hardening

Stress MPa	Plastic Strain mm mm ⁻¹	Temperature C
6.895e-003	0	22
6.1777	2.88e-004	22
13.21	6.96e-004	22
17.19	1.1e-003	22
20.04	1.51e-003	22
20.6	2.e-003	22
20.6	2.5e-003	22
20.6	3.e-003	22

TABLE 37
Concrete NL > Compressive Yield StrengthCompressive Yield Strength MPa
15**TABLE 38**
Concrete NL > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0

TABLE 39
Concrete NL > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa	20.6
-----------------------------------	------

Structural Steel NL

TABLE 40
Structural Steel NL > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat Constant Pressure	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 41
Structural Steel NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923	

TABLE 42
Structural Steel NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
400	1450	

TABLE 43
Structural Steel NL > Color

Red	Green	Blue
182	229	228

TABLE 44
Structural Steel NL > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa	570
-------------------------------	-----

Structural Steel

TABLE 45
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat Constant Pressure	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 46
Structural Steel > Color

Red	Green	Blue
132	139	179

TABLE 47
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
1.e+005	0.3	83333	38462	

TABLE 48
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability	
-----------------------	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10000

Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg

TABLE 49
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Density

Density kg mm ⁻³
1.49e-006

TABLE 50
Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
1.21e+005	8600	8600	0.27	0.4	0.27	4700	3100	4700

TABLE 51
Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
1.67e-002	3.2e-003	3.2e-003	-1.08e-002	-1.92e-002	-1.92e-002	1.2e-002	1.1e-002	1.2e-002

TABLE 52
Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
2231	29	29	-1082	-100	-100	60	32	60

TABLE 53
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Coefficient of Thermal Expansion X direction C ⁻¹	Coefficient of Thermal Expansion Y direction C ⁻¹	Coefficient of Thermal Expansion Z direction C ⁻¹	Temperature C
-4.7e-007	3.e-005	3.e-005	
Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C			20

TABLE 54
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Puck Constants

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

TABLE 55
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Additional Puck Constants

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

TABLE 56
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Tsai-Wu Constants

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

TABLE 57
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Color

--	--	--

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Red	Green	Blue
130	181	143



file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

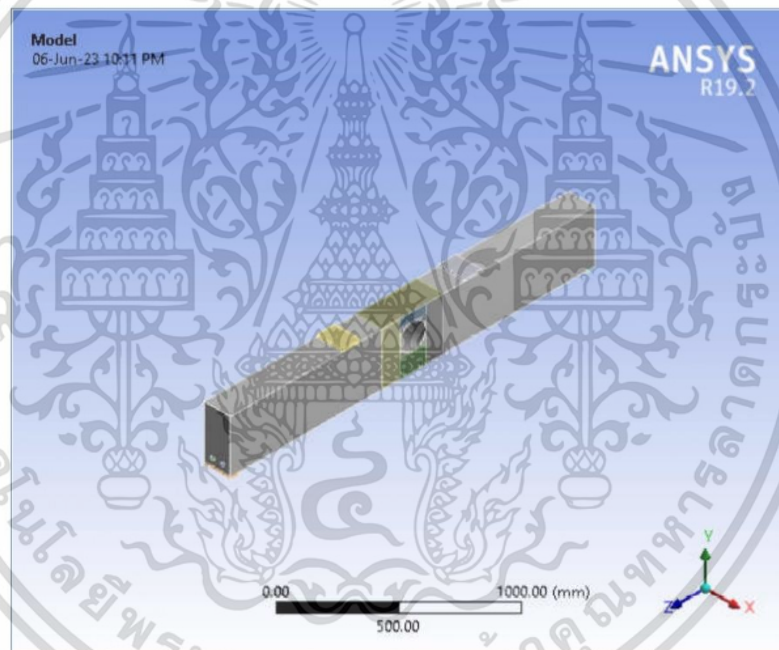
Project

Page 1 of 24



Project

First Saved	Wednesday, July 1, 2020
Last Saved	Saturday, May 20, 2023
Product Version	19.2 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contents

- Units
- Model (D4)
 - Geometry
 - concrete
 - Body Groups
 - Parts
 - Parts
 - Parts
 - Materials
 - Concrete NL 2
 - Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg
 - Concrete
 - Structural Steel
 - Structural Steel NL
 - Concrete NL
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Contacts
 - Contact Regions
 - Mesh
 - Hex Dominant Method
 - Static Structural (D5)
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (D6)
 - Solution Information
 - Results
 - Chart
- Material Data
 - Concrete NL
 - Structural Steel NL
 - Structural Steel
 - Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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 (D4)

Geometry

TABLE 2
Model (D4) > Geometry

--

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\boy\Documents\เล่ม Thesis\2023-06-06\Bending Zone_files\dp0\SYS-9\DM\SYS-9.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	152.4 mm
Length Y	320. mm
Length Z	2100. mm
Properties	
Volume	9.2623e+007 mm ³
Mass	222.59 kg
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	17
Active Bodies	17
Nodes	48675
Elements	18722
Mesh Metric	None
Update Options	
Assign Default Material	No
Basic Geometry Options	
Parameters	Independent
Parameter Key	
Attributes	Yes
Attribute Key	
Named Selections	Yes
Named Selection Key	
Material Properties	Yes
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	Yes
Coordinate System Key	
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	Yes
Compare Parts On Update	No
Analysis Type	3-D
Clean Bodies On Import	No
Stitch Surfaces On Import	No
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (D4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>concrete</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Behavior	None
Material	
Assignment	Concrete NL
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	150. mm
Length Y	300. mm
Length Z	2100. mm
Properties	
Volume	9.053e+007 mm ³
Mass	208.22 kg
Centroid X	75. mm
Centroid Y	150.87 mm
Centroid Z	-1050. mm
Moment of Inertia Ip1	8.0339e+007 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	7.9151e+007 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	1.9744e+006 kg·mm ²
Statistics	
Nodes	26941
Elements	10836
Mesh Metric	None

TABLE 4
Model (D4) > Geometry > Body Groups

Object Name	bar	plate	CFRP
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Definition			
Suppressed	No		
Assignment	Structural Steel NL	Structural Steel	Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg
Coordinate System	Default Coordinate System		Multiple Coordinate Systems
Bounding Box			
Length X	80. mm	150. mm	152.4 mm
Length Y	20. mm	320. mm	302.4 mm
Length Z	2100. mm		350. mm
Properties			
Volume	1.3195e+006 mm ³	4.5e+005 mm ³	3.24e+005 mm ³
Mass	10.358 kg	3.5325 kg	0.48276 kg
Centroid X	75. mm		
Centroid Y	40. mm	201.67 mm	145.83 mm
Centroid Z	-1050. mm		
Moment of Inertia Ip1	3.7875e+006 kg·mm ²	1.6033e+006 kg·mm ²	12463 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	3.7968e+006 kg·mm ²	1.5344e+006 kg·mm ²	7636.9 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	9834.7 kg·mm ²	82091 kg·mm ²	8902.8 kg·mm ²
Statistics			
Nodes	6420	990	14324
Elements	2067	194	5625
Mesh Metric	None		

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAD Attributes			
DMBodyGroup	2	3	4

TABLE 5
Model (D4) > Geometry > bar > Parts

Object Name	bar	bar
State	Meshed	
Graphics Properties		
Visible	Yes	
Transparency	1	
Definition		
Suppressed	No	
Stiffness Behavior	Flexible	
Coordinate System	Default Coordinate System	
Reference Temperature Behavior	By Environment None	
Material		
Assignment	Structural Steel NL	
Nonlinear Effects	Yes	
Thermal Strain Effects	Yes	
Bounding Box		
Length X	20. mm	
Length Y	20. mm	
Length Z	2100. mm	
Properties		
Volume	6.5973e+005 mm ³	
Mass	5.1789 kg	
Centroid X	105. mm	45. mm
Centroid Y	40. mm	
Centroid Z	-1050. mm	
Moment of Inertia Ip1	1.8937e+006 kg·mm ²	
Moment of Inertia Ip2	1.8937e+006 kg·mm ²	
Moment of Inertia Ip3	256.33 kg·mm ²	
Statistics		
Nodes	3330	3090
Elements	1120	947
Mesh Metric	None	

TABLE 6
Model (D4) > Geometry > plate > Parts

Object Name	plate	plate	plate	plate
State	Meshed			
Graphics Properties				
Visible	Yes			
Transparency	1			
Definition				
Suppressed	No			
Stiffness Behavior	Flexible			
Coordinate System	Default Coordinate System			
Reference Temperature Behavior	By Environment None			
Material				
Assignment	Structural Steel			
Nonlinear Effects	Yes			
Thermal Strain Effects	Yes			

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bounding Box		
Length X	150. mm	
Length Y	10. mm	
Length Z	50. mm	100. mm
Properties		
Volume	75000 mm ³	1.5e+005 mm ³
Mass	0.58875 kg	1.1775 kg
Centroid X	75. mm	
Centroid Y	-5. mm	305. mm
Centroid Z	-25. mm	-2075. mm
Moment of Inertia Ip1	127.56 kg·mm ²	991.06 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	1226.6 kg·mm ²	3189.1 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	1108.8 kg·mm ²	2217.6 kg·mm ²
Statistics		
Nodes	165	323 337
Elements	16	76 86
Mesh Metric	None	

TABLE 7
Model (D4) > Geometry > CFRP > Parts

Object Name	Solid	Solid	Solid	Solid	Solid	Solid	Solid	Solid	Solid	
State	Meshed									
Graphics Properties										
Visible	Yes									
Transparency	1									
Definition										
Suppressed	No									
Stiffness Behavior	Flexible									
Coordinate System	y		Z		y		Z			
Reference Temperature	By Environment									
Behavior	None									
Material										
Assignment	Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg									
Nonlinear Effects	Yes									
Thermal Strain Effects	Yes									
Bounding Box										
Length X	1.2 mm								150. mm	
Length Y	300. mm	50. mm	100. mm	300. mm	50. mm	100. mm	300.6 mm	100. mm	1.2 mm	
Length Z	100. mm	150. mm	100. mm	100. mm	150. mm	100. mm	300.6 mm	150. mm	350. mm	
Properties										
Volume	36000 mm ³	9000. mm ³	18000 mm ³	36000 mm ³	9000. mm ³	18000 mm ³	63000 mm ³			
Mass	5.364e-002 kg	1.341e-002 kg	2.682e-002 kg	5.364e-002 kg	1.341e-002 kg	2.682e-002 kg	9.387e-002 kg			
Centroid X	150.6 mm						-0.6 mm		75. mm	
Centroid Y	150. mm	275. mm	50. mm	150. mm	275. mm	50. mm	300.6 mm	100. mm	-0.6 mm	
Centroid Z	-925. mm	-1175. mm	-1050. mm	-1175. mm	-925. mm	-1050. mm				
Moment of Inertia Ip1	447. kg·mm ²	27.937 kg·mm ²	72.637 kg·mm ²	447. kg·mm ²	27.937 kg·mm ²	72.637 kg·mm ²	958.26 kg·mm ²	958.27 kg·mm ²		
Moment of Inertia Ip2	44.706 kg·mm ²	25.145 kg·mm ²	50.29 kg·mm ²	44.706 kg·mm ²	25.145 kg·mm ²	50.291 kg·mm ²	1134.3 kg·mm ²			

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Moment of Inertia Ip3	402.3 kg-mm ²	2.7953 kg-mm ²	22.353 kg-mm ²	402.31 kg-mm ²	2.7954 kg-mm ²	22.353 kg-mm ²	176.02 kg-mm ²
Statistics							
Nodes	1406	1472	635	835	1537	1710	734
Elements	508	548	226	307	585	655	267
Mesh Metric	None						

Coordinate Systems

TABLE 8
Model (D4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	Global Coordinate System	Z	y
State	Fully Defined		
Definition			
Type	Cartesian		
Coordinate System ID	0.		
Coordinate System	Program Controlled		
APDL Name			
Suppressed	No		
Origin			
Origin X	0. mm		75. mm
Origin Y	0. mm		310. mm
Origin Z	0. mm		-750. mm
Define By	Geometry Selection		
Geometry	Defined		
Directional Vectors			
X Axis Data	[1. 0. 0.]	[0. 0. 1.]	[0. 1. 0.]
Y Axis Data	[0. 1. 0.]		[-1. 0. 0.]
Z Axis Data	[0. 0. 1.]	[0. -1. 0.]	[0. 0. 1.]
Principal Axis			
Axis	X		
Define By	Global Z Axis	Global Y Axis	
Orientation About Principal Axis			
Axis	Y		
Define By	Default		
Transformations			
Base Configuration	Absolute		
Transformed Configuration	[75. 310. -750.]		

Connections

TABLE 9
Model (D4) > Connections

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

TABLE 10
Model (D4) > Connections > Contacts

Object Name	Contacts
State	Fully Defined
Definition	

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0.
Tolerance Value	5.3243 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	16
Active Connections	16

TABLE 11
Model (D4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	Contact Region 2	Contact Region 3	Contact Region 4	Contact Region 5	Contact Region 6	Contact Region 7	Contact Region 8	Contact Region 9	Contact Region 10	Contact Region 11
State	Fully Defined									
Scope										
Scoping Method	Geometry Selection									
Contact	1 Face									
Target	1 Face									
Contact Bodies	concrete									
Target Bodies	bar		plate						Solid	
Protected	No									
Definition										
Type	Bonded									
Scope Mode	Automatic									
Behavior	Program Controlled									
Trim Contact	Program Controlled									
Trim Tolerance	5.3243 mm									
Suppressed	No									
Advanced										
Formulation	Program Controlled									
Small Sliding	Off									
Detection Method	Program Controlled									
Penetration Tolerance	Program Controlled									
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled									

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 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

TABLE 12
Model (D4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	Contact Region 12	Contact Region 13	Contact Region 14	Contact Region 15	Contact Region 16
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Contact	1 Face				
Target	1 Face				
Contact Bodies	concrete				
Target Bodies	Solid				
Protected	No				
Definition					
Type	Bonded				
Scope Mode	Automatic				
Behavior	Program Controlled				
Trim Contact	Program Controlled				
Trim Tolerance	5.3243 mm				
Suppressed	No				
Advanced					
Formulation	Program Controlled				
Small Sliding	Off				
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 13
Model (D4) > Mesh

Object Name	Mesh
State	Solved
Display	
Display Style	Use Geometry Setting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project

Page 10 of 24

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	40.0 mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	2
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	2129.7 mm
Average Surface Area	29897 mm ²
Minimum Edge Length	1.2 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	No
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	48675
Elements	18722

TABLE 14
Model (D4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	Hex Dominant Method
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	17 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Method	Hex Dominant
Element Order	Use Global Setting
Free Face Mesh Type	All Quad
Control Messages	Yes, Click To Display...

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Static Structural (D5)

TABLE 15
Model (D4) > Analysis

Object Name	Static Structural (D5)
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22. °C
Generate Input Only	No

TABLE 16
Model (D4) > Static Structural (D5) > Analysis Settings

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	3.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	5.
Minimum Substeps	5.
Maximum Substeps	25.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Combine 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	

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solver Files Directory	C:\Users\boy\Documents\เล่ม Thesis\2023-06-06\Bending Zone_files\dp0\SYS-9\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Contact Summary	Program Controlled
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 17
Model (D4) > Static Structural (D5) > Analysis Settings
Step-Specific "Step Controls"

Step	Step End Time	Auto Time Stepping	Define By	Initial Substeps	Minimum Substeps	Maximum Substeps
1	1. s	On	Substeps	5.	5.	25.
2	2. s	Program Controlled				
3	3. s					

TABLE 18
Model (D4) > Static Structural (D5) > Loads

Object Name	Displacement	Displacement 2	Force
State	Fully Defined		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Edge	2 Faces	
Definition			
Type	Displacement	Force	
Define By	Components		Vector
Coordinate System	Global Coordinate System		
X Component	0. mm (ramped)		
Y Component	0. mm (ramped)		
Z Component	0. mm (ramped)	Free	
Suppressed	No		
Magnitude	Tabular Data		
Direction	Defined		
Tabular Data			
Independent Variable	Time		

FIGURE 1
Model (D4) > Static Structural (D5) > Displacement

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

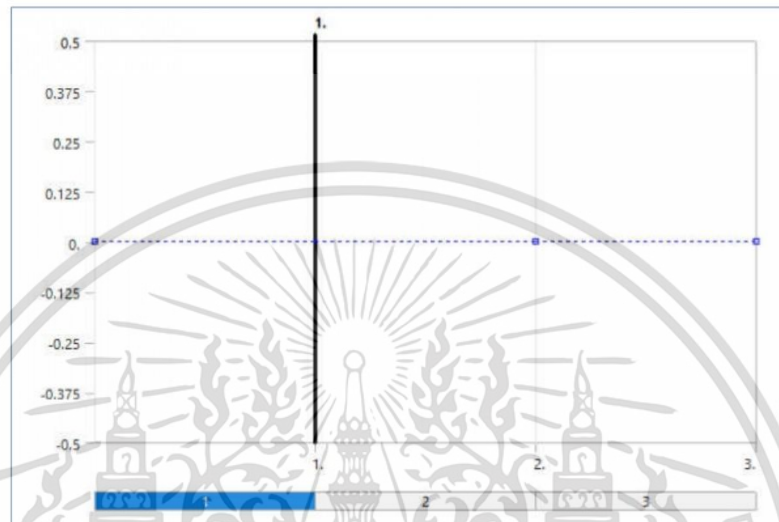


FIGURE 2
Model (D4) > Static Structural (D5) > Displacement 2

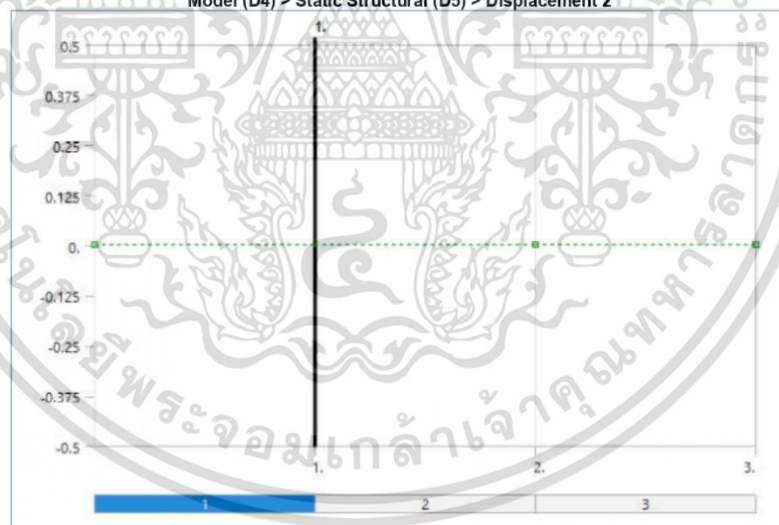


FIGURE 3
Model (D4) > Static Structural (D5) > Force

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

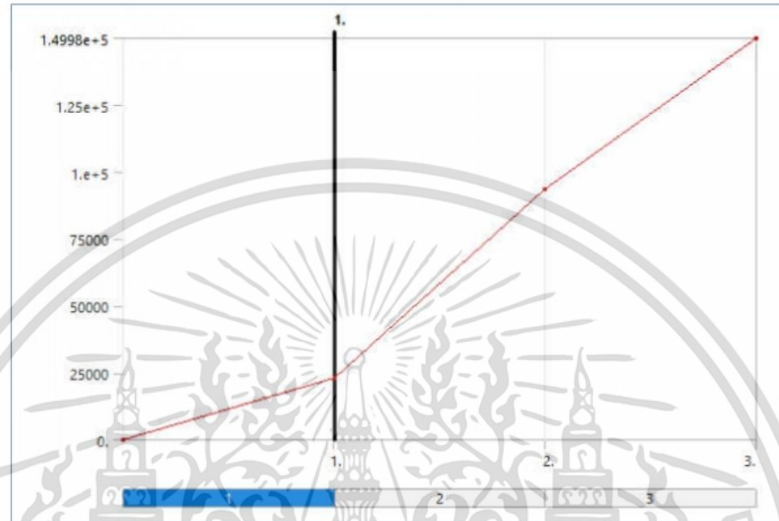


TABLE 19
Model (D4) > Static Structural (D5) > Force

Steps	Time [s]	Force [N]
0.	0.	0.
1.	1.	22970
2.	2.	93370
3.	3.	1.4998e+005

Solution (D6)

TABLE 20
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution

Object Name	<i>Solution (D6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.
Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
MAPDL Elapsed Time	8 m 52 s
MAPDL Memory Used	1.4414 GB
MAPDL Result File Size	293.94 MB
Post Processing	
Beam Section Results	No
On Demand Stress/Strain	No

TABLE 21
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	

TABLE 22
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Results

Object Name	Tension	Compressive	Directional Deformation	Equivalent Stress	Equivalent Elastic Strain
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	2 Bodies	All Bodies		1 Body	All Bodies
Definition					
Type	Equivalent (von-Mises) Stress		Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain
By			Time		
Display Time			Last		
Calculate Time History			Yes		
Identifier					
Suppressed	No				
Orientation			Y Axis		
Coordinate System			Global Coordinate System		
Integration Point Results					
Display Option	Averaged			Averaged	
Average Across Bodies	No			No	
Results					
Minimum	3.2466 MPa	4.1839e-002 MPa	-6.0521 mm	4.1839e-002 MPa	1.8836e-006 mm/mm
Maximum	284.4 MPa	375.04 MPa	0. mm	20.595 MPa	1.9319e-002 mm/mm
Average	123.33 MPa	49.65 MPa	-4.4199 mm	8.0911 MPa	8.7125e-004 mm/mm
Minimum Occurs On	bar	concrete	Solid	concrete	
Maximum Occurs On	bar	Solid	plate	concrete	Solid
Minimum Value Over Time					
Minimum	7.8038e-002 MPa	2.2567e-003 MPa	-6.0521 mm	2.2567e-003 MPa	1.0867e-007 mm/mm
Maximum	3.2466 MPa	4.1839e-002 MPa	-0.16713 mm	4.1839e-002 MPa	1.8836e-006 mm/mm
Maximum Value Over Time					
Minimum	8.1419 MPa	9.3686 MPa	0. mm	1.1448 MPa	4.8887e-004 mm/mm

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maximum	284.4 MPa	375.04 MPa	0. mm	20.595 MPa	1.9319e-002 mm/mm
Information					
Time	3. s				
Load Step	3				
Substep	4				
Iteration Number	33				

FIGURE 4
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Tension

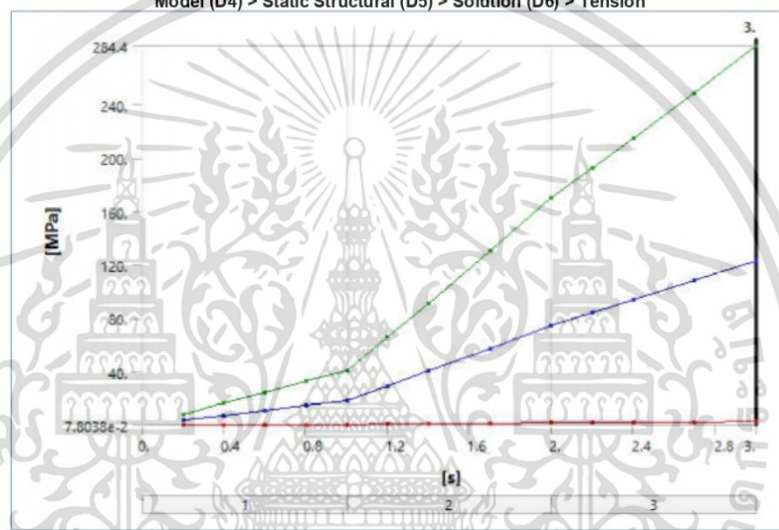


TABLE 23
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Tension

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	7.8038e-002	8.1419	3.5965
0.4	0.15608	16.345	7.2254
0.6	0.23533	24.549	10.855
0.8	0.31355	32.753	14.485
1.	0.39333	40.959	18.116
1.2	0.63434	66.121	29.248
1.4	0.86137	91.393	40.408
1.7	1.1911	130.19	57.343
2.	1.5319	170.23	74.671
2.2	1.7348	192.16	84.119
2.4	1.9739	214.32	93.667
2.7	2.4715	248.19	108.22
3.	3.2466	284.4	123.33

FIGURE 5
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Compressive

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

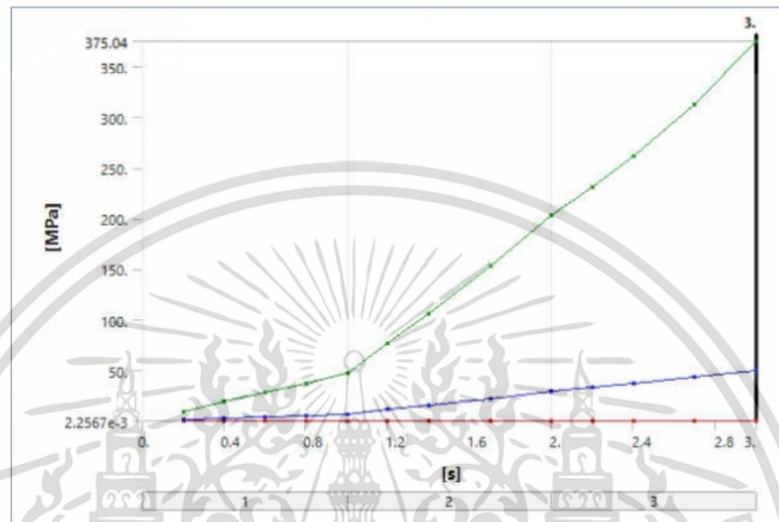


TABLE 24
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Compressive

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	2.2567e-003	9.3686	1.3921
0.4	3.2719e-003	18.781	2.7924
0.6	4.4166e-003	28.194	4.1929
0.8	5.6055e-003	37.608	5.5935
1.	6.7872e-003	47.024	6.9944
1.2	1.0473e-002	75.972	11.292
1.4	1.4289e-002	105.81	15.629
1.7	1.9888e-002	153.27	22.303
2.	2.5602e-002	202.25	29.117
2.2	2.8687e-002	230.77	32.889
2.4	3.1811e-002	262.07	36.802
2.7	3.6647e-002	312.81	42.92
3.	4.1839e-002	375.04	49.65

FIGURE 6
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Directional Deformation

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

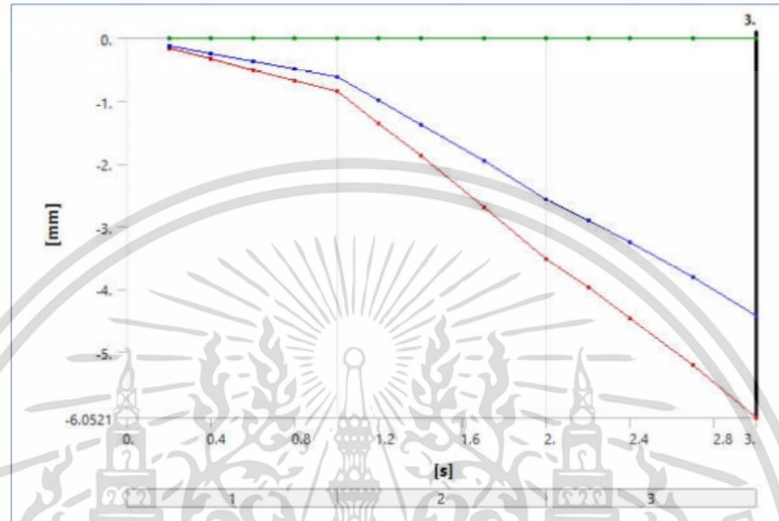


TABLE 25
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Average [mm]
0.2	-0.16713	0.	-0.12212
0.4	-0.33582	0.	-0.24541
0.6	-0.50454	0.	-0.36874
0.8	-0.67329	0.	-0.49208
1.	-0.84207	0.	-0.61545
1.2	-1.36	0.	-0.99404
1.4	-1.883	0.	-1.3762
1.7	-2.6892	0.	-1.9642
2.	-3.5201	0.	-2.5706
2.2	-3.9829	0.	-2.9082
2.4	-4.4617	0.	-3.2573
2.7	-5.2182	0.	-3.8095
3.	-6.0521	0.	-4.4199

FIGURE 7
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

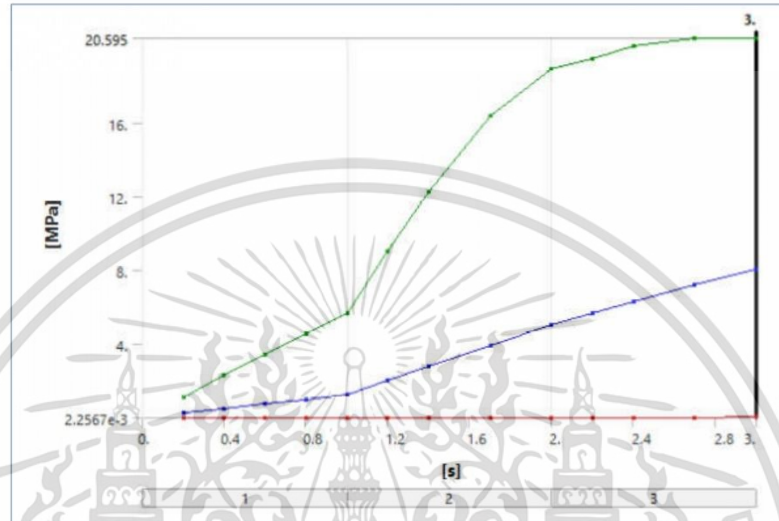


TABLE 26
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0.2	2.2567e-003	1.1448	0.25038
0.4	3.2719e-003	2.2903	0.49984
0.6	4.4166e-003	3.436	0.74935
0.8	5.6055e-003	4.5813	0.99892
1.	6.7872e-003	5.7054	1.2485
1.2	1.0473e-002	9.0349	2.0134
1.4	1.4289e-002	12.236	2.779
1.7	1.9888e-002	16.357	3.9313
2.	2.5602e-002	18.896	5.0727
2.2	2.8687e-002	19.486	5.6774
2.4	3.1811e-002	20.153	6.2792
2.7	3.6647e-002	20.595	7.182
3.	4.1839e-002		8.0911

FIGURE 8
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Equivalent Elastic Strain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

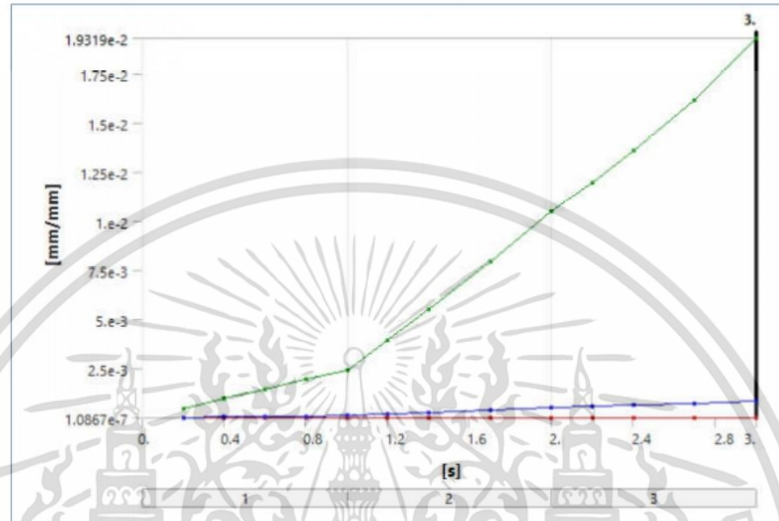


TABLE 27
Model (D4) > Static Structural (D5) > Solution (D6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]	Average [mm/mm]
0.2	1.0867e-007	4.8887e-004	2.4227e-005
0.4	1.9185e-007	9.8019e-004	4.8556e-005
0.6	2.2859e-007	1.4716e-003	7.2888e-005
0.8	3.0678e-007	1.9631e-003	9.7223e-005
1.0	3.5921e-007	2.4546e-003	1.2156e-004
1.2	5.2569e-007	3.9656e-003	1.9622e-004
1.4	6.9567e-007	5.5186e-003	2.7186e-004
1.7	9.4992e-007	7.9794e-003	3.8863e-004
2.0	1.2064e-006	1.0505e-002	5.0749e-004
2.2	1.3437e-006	1.1971e-002	5.7357e-004
2.4	1.48e-006	1.3574e-002	6.4237e-004
2.7	1.6839e-006	1.6161e-002	7.5062e-004
3.0	1.8836e-006	1.9319e-002	8.7125e-004

Chart

FIGURE 9
Model (D4) > Chart

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

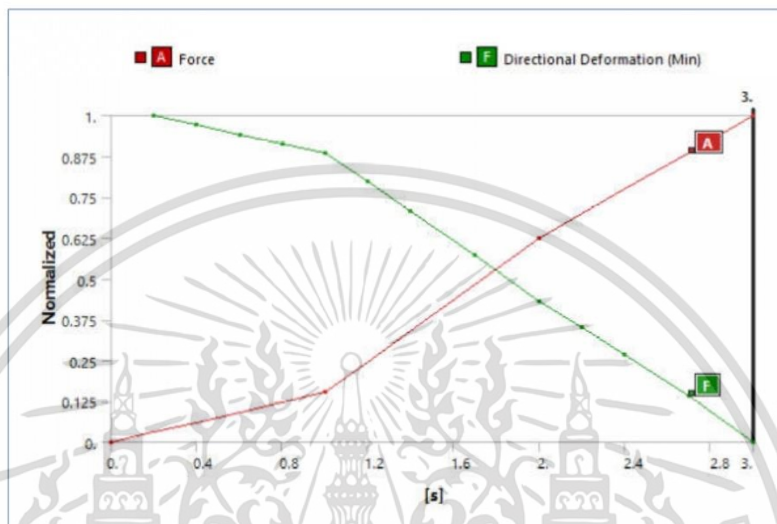


TABLE 28
Model (D4) > Chart

Steps	Time [s]	[A] Force [N]	[F] Directional Deformation (Min) [mm]
1	0.	0.	
	0.2	= 4594.	-0.16713
	0.4	= 9188.	-0.33582
	0.6	= 13782	-0.50454
	0.8	= 18376	-0.67329
2	1.	22970	-0.84207
	1.2	= 37050	-1.36
	1.4	= 51130	-1.883
	1.7	= 72250	-2.6892
	2.	93370	-3.5201
3	2.2	= 1.0469e+005	-3.9829
	2.4	= 1.1601e+005	-4.4617
	2.7	= 1.33e+005	-5.2182
	3.	1.4998e+005	-6.0521

Material Data

Concrete NL

TABLE 29
Concrete NL > Constants
Density | 2.3e-006 kg mm⁻³

Concrete NL > Drucker-Prager Strength Piecewise

Pressure P MPa	Yield Stress Y MPa
-4	0

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical_Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	10
15	40
50	44

TABLE 31
Concrete NL > Tensile Pressure Failure

Maximum Tensile Pressure MPa	-4
------------------------------	----

TABLE 32
Concrete NL > Crack Softening Failure

Fracture Energy Gf mJ mm ⁻²	0.1
--	-----

TABLE 33
Concrete NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
25000	0.3	20833	9615.4	

TABLE 34
Concrete NL > Color

Red	Green	Blue
235	222	222

TABLE 35
Concrete NL > Multilinear Isotropic Hardening

Stress MPa	Plastic Strain mm mm ⁻¹	Temperature C
6.8948e-003	0	22
6.1777	2.88e-004	22
13.21	6.96e-004	22
17.788	1.1e-003	22
20.036	1.51e-003	22
20.595	2.e-003	22

TABLE 36
Concrete NL > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa	2
----------------------------	---

Structural Steel NL

TABLE 37
Structural Steel NL > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat Constant Pressure	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 38
Structural Steel NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923	

TABLE 39
Structural Steel NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
400	1450	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 40
Structural Steel NL > Color

Red	Green	Blue
182	229	228

TABLE 41
Structural Steel NL > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
570

Structural Steel

TABLE 42
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat Constant Pressure	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 43
Structural Steel > Color

Red	Green	Blue
132	139	179

TABLE 44
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
1.e+005	0.3	83333	38462	

TABLE 45
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg

TABLE 46
Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Density

Density kg mm ⁻³
1.49e-006

TABLE 47
Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
1.21e+005	8600	8600	0.27	0.4	0.27	4700	3100	4700

TABLE 48
Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
1.67e-002	3.2e-003	3.2e-003	-1.08e-002	-1.92e-002	-1.92e-002	1.2e-002	1.1e-002	1.2e-002

TABLE 49

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Epoxy Carbon UD (230 GPa) 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
2231	29	29	-1082	-100	-100	60	32	60

TABLE 50**Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

Coefficient of Thermal Expansion X direction C ⁻¹	Coefficient of Thermal Expansion Y direction C ⁻¹	Coefficient of Thermal Expansion Z direction C ⁻¹	Temperature C
-4.7e-007	3.e-005	3.e-005	
Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C			
20			

TABLE 51**Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Puck Constants**

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

TABLE 52**Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Additional Puck Constants**

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

TABLE 53**Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Tsai-Wu Constants**

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

TABLE 54**Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg > Color**

Red	Green	Blue
130	181	143

file:///C:/Users/boy/AppData/Roaming/Ansys/v192/Mechanical_Report/Mechanical Repo... 06-Jun-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายปานัสม์ มีเมือง

วัน เดือน ปีเกิด 12 ตุลาคม พ.ศ.2537 ที่จังหวัดอ่างทอง

ที่อยู่ 124 หมู่ 2 ตำบล รำมะสัก อำเภอบางโพธิ์ทอง จังหวัด อ่างทอง 14120

โทร 097-0300-109

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ทำงาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้