

การศึกษาพฤติกรรมของ Vierendeel สำหรับคานลึก
A STUDY THE BEHAVIOUR OF VIERENDEEL FOR DEEP BEAM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาพฤติกรรมของ Vierendeel สำหรับคานลึก
A STUDY THE BEHAVIOUR OF VIERENDEEL FOR DEEP BEAM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY THE BEHAVIOUR OF VIERENDEEL FOR DEEP BEAM



Kanchanok Meensuk
Kanisorn Slisatakorn
Chatborphit Piamsunrith

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมของ Vierendeel สำหรับคานลึก
A STUDY THE BEHAVIOUR OF VIERENDEEL FOR DEEP BEAM

นักศึกษา นางสาวกานต์ชนก มีนสุข รหัสประจำตัว 57010071
นางสาวคณิศร ศลิษฐ์อรรณกร รหัสประจำตัว 57010135
นายฉัตรบพิตร เปี่ยมสัมฤทธิ์ รหัสประจำตัว 57010226

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ฉิรเศรษฐ์	
ผศ.สมเกียรติ	ขวัญพุกษ์	
อ.ทรงกลด	แซ่อั้ง	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ดร.อัญญวิทย์	สุจริตพงศ์	
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรุงเกียรติ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่..... 4/6/61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมการของ Vierendeel สำหรับคานลิก

นางสาวกานต์ชนก	มีนสุข	รหัสประจำตัว	57010071
นางสาวคณิศร	ศลิษฐ์อรธรกร	รหัสประจำตัว	57010135
นายฉัตรบพิตร	เปี่ยมสัมฤทธิ์	รหัสประจำตัว	57010226

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการของ Vierendeel เพื่อนำไปประยุกต์ใช้แทนคานลิกสำหรับโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากในปัจจุบันคอนกรีตเสริมเหล็กถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง แต่การเพิ่มความหนาหรือความลึกของโครงสร้างส่งผลให้น้ำหนักคงที่ของอาคารมากขึ้นด้วยโครงการพิเศษนี้จึงศึกษาประโยชน์ และความประหยัดวัสดุของระบบโครงสร้างแบบ Vierendeel เมื่อเทียบกับคานลิก เนื่องจาก Vierendeel เป็นโครงสร้างที่มีช่องเปิด สามารถนำช่องว่างไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อีกทั้งยังมีเอกลักษณ์เรื่องความสวยงาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY THE BEHAVIOUR OF VIERENDEEL FOR LONG SPAN STRUCTURE

Miss Kanchanok Meensuk Student ID 57010071

Miss Kanisorn Slisatakorn Student ID 57010135

Mr. Chatborphit Piamsumrith Student ID 57010226

Advisor : Assist.Prof.Dr.Arthit Petchsasithon

Academic Year 2017

ABSTRACT

This study is intended to study the behavior of Vierendeel for deep beam and applied Vierendeel instead of it in field of reinforce concrete. Nowadays, Reinforce Concrete is the most famous material for construction. Increasing depth of structure to improve strength effects building weight therefor this study is expected to decrease weight of structure. In addition, We also consider advantage and economy compare with deep beam due to Vierendeel is an open structure and unique.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศิริธร ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องอีกทั้งให้ความรู้ ความเอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการแก้ปัญหา ให้ประสบการณ์ที่ดี อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงการนี้ พวกเราผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วง ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาท่านอื่น ที่ให้คำแนะนำอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการทำโครงการ รวมถึงการให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ ศึกษาในภาควิชาโยธาจนตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและให้กำลังใจ ในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคุณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

นางสาวกานต์ชนก มินสุข
นางสาวคณิศร ศลิษฐ์อรรถกร
นายฉัตรบพิตร เปี่ยมสัมฤทธิ์

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความเป็นมา.....	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
3. ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
4. วิธีการศึกษา.....	2
5. ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
1. คำจำกัดความและรูปแบบของ Vierendeel.....	3
2. ประวัติศาสตร์ของ Vierendeel.....	4
2.1 การก่อสร้างและพัฒนา Vierendeel.....	5
2.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น.....	8
2.3 การมีส่วนร่วมของชาวอเมริกัน.....	9
3. วิธีการในการวิเคราะห์ Vierendeel Truss.....	12
4. ข้อต่อสำหรับ Vierendeel Truss.....	13
4.1 เปรียบเทียบรอยต่อ.....	14
4.2 วิธีการออกแบบเพื่อกำหนดประเภทข้อต่อของโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก.....	14
4.3 วิธีเสริมคานและเสาเพื่อรับโมเมนต์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	15
5. พฤติกรรมของคานลิก.....	17
6. วิธีการออกแบบโครงสร้าง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	28
1. การวิเคราะห์เพื่อหาแรงและโมเมนต์สูงสุดจากโปรแกรม SAP2000.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.การออกแบบคอนกรีตและเหล็กจากโปรแกรม spColumn.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	46
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	77
1. สรุปผล.....	77
2. ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	80



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	51
ตารางที่ 4.2 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	52
ตารางที่ 4.3 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	53
ตารางที่ 4.4 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	54
ตารางที่ 4.5 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	55
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง.....	56
ตารางที่ 4.7 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	57
ตารางที่ 4.8 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	58
ตารางที่ 4.9 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	59
ตารางที่ 4.10 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	60
ตารางที่ 4.11 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	61
ตารางที่ 4.12 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง.....	62
ตารางที่ 4.13 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง.....	63
ตารางที่ 4.14 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.15 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	65
ตารางที่ 4.16 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	66
ตารางที่ 4.17 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	67
ตารางที่ 4.18 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	68
ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบน้ำหนักคอนกรีตและเหล็กระหว่าง vierendeel และคานลิก	69
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบน้ำหนักคอนกรีตที่หายไปของ vierendeel เมื่อเทียบกับคานลิก (%).....	70
ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบน้ำหนักเหล็กของ vierendeel เมื่อเทียบกับคานลิก (%).....	72
ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel เมื่อเทียบกับคานลิก (%).....	74
ตารางที่ 4.23 แสดงระยะโค้งตัวของ Vierendeel และคานลิก.....	76
ตารางที่ ก-1 ตารางการคำนวณการจัดเรียงเหล็กในคานลิกและน้ำหนักของเหล็ก.....	85
ตารางที่ ก-2 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.50 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	86
ตารางที่ ก-3 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	86
ตารางที่ ก-4 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง	87
ตารางที่ ก-5 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 3 ช่อง	87
ตารางที่ ก-6 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 3 ช่อง	88
ตารางที่ ก-7 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 2 ช่อง	88
ตารางที่ ก-8 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 2 ช่อง	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบทั่วไปของ Vierendeel	3
รูปที่ 2.2 ประเภทของ Vierendeel	4
รูปที่ 2.3 gusset plate	5
รูปที่ 2.4 Lanaye, First bridge on the Albert Canal, 1933.....	5
รูปที่ 2.5 Golden Gate Bridge, SanFrancisco , 1933.....	7
รูปที่ 2.6 Hudson River,proposed suspension bridge, Lindenthal, 1921	8
รูปที่ 2.7 Philadelphia,Medical Research Laboratory,University of Pennsylvania, L. kahn,1959.	9
รูปที่ 2.8 SanDiego, Salk Institute,L. Kahn,1966.	9
รูปที่ 2.9 Chicago Heights, International Agricultural Corporation, Austin Company,1938.	10
รูปที่ 2.10 รอยต่อชนิดหมุน	14
รูปที่ 2.11 รอยต่อแบบยึดแน่น.....	14
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างพฤติกรรมการรับโมเมนต์และการแอนตัวในโครงสร้างข้อต่อแบบ Fixed joint.....	15
รูปที่ 2.13 การหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก.....	15
รูปที่ 2.14 การหุ้มด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	16
รูปที่ 2.15 การเสริมเหล็กรับแรงดึงในคานโดยฝากเข้าหัวเสา	16
รูปที่ 2.16 การเสริมข้อต่อด้วยบังเหล็ก	16
รูปที่ 2.17 ความเค้นตามยาวในคานลึกลับ.....	17
รูปที่ 2.18 รูปแสดงแนวแรงรับแรงอัดและแรงดึงในคาน	17
รูปที่ 2.19 ประเภทการแตกหักจากแรงเฉือนในคานคอนกรีต	17
รูปที่ 2.20 การกระจายความเครียดที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.21 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์การดัดและแรงตามแนวแกน.....	20
รูปที่ 2.22 การกระจายหน่วยการยึดหดตามจุดต่างๆ บนแผนภูมิปฏิสัมพันธ์	21
รูปที่ 2.23 หน่วยการยึดหดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ระหว่างจุดที่ 1 และ 2	21
รูปที่ 2.24 หน่วยแรงในSAP2000	22
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการเลือกใช้ material ในSAP2000	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 2.26	การกำหนดขนาดของวัสดุในSAP2000	23
รูปที่ 2.27	ตัวอย่างซัพพอร์ตทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบในSAP2000.....	24
รูปที่ 2.28	P-M interaction diagrams	28
รูปที่ 2.29	การเลือกใช้ code แต่ละประเภทเพื่อการออกแบบใน spColumn	28
รูปที่ 2.30	การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุใน spColumn.....	29
รูปที่ 2.31	หน่วยน้ำหนักของวัสดุ.....	30
รูปที่ 2.32	น้ำหนักบรรทุกจรตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6.....	31
รูปที่ 2.33	น้ำหนักบรรทุกจร (L_0) ตามข้อกำหนด ASCE 7	32
รูปที่ 3.1	การตั้งค่ารูปแบบเริ่มต้นในการวิเคราะห์.....	33
รูปที่ 3.2	กำหนดจำนวนช่อง Grid ของ Model จาก direction.....	34
รูปที่ 3.3	กำหนดจำนวนช่อง Grid ของ Model จาก Grid System Data	34
รูปที่ 3.4	หน้าตาต่าง Coordinate/Grid Systems.....	35
รูปที่ 3.5	การเปลี่ยนแปลง Grid Line.....	35
รูปที่ 3.6	รูปร่าง Model ที่จะทำการวิเคราะห์.....	36
รูปที่ 3.7	รูปแบบชิ้นส่วนของโครงสร้าง.....	36
รูปที่ 3.8	การกำหนดรูปแบบ Support.....	37
รูปที่ 3.9	การใส่น้ำหนักบรรทุก.....	37
รูปที่ 3.10	การกำหนดให้ Load ทั้งหมดทำงานร่วมกัน.....	38
รูปที่ 3.11	การเพิ่ม Load Case.....	38
รูปที่ 3.12	การ Apply Load ใส่โครงสร้าง.....	39
รูปที่ 3.13	การใส่ประเภทของ Load	39
รูปที่ 3.14	การกำหนดรายละเอียด Load	40
รูปที่ 3.15	การตั้งค่ารายละเอียดของวัสดุ.....	40
รูปที่ 3.16	การกำหนด Property วัสดุ.....	41
รูปที่ 3.17	การกำหนดรายละเอียดของชิ้นส่วน	41
รูปที่ 3.18	การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วน.....	42
รูปที่ 3.19	การกำหนดรายละเอียดและขนาดของหน้าตัด	42
รูปที่ 3.20	การเปลี่ยนขนาดหน้าตัด	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 การเพิ่ม/แก้ไข/ลบหน้าตัด	43
รูปที่ 3.22 การ Run เพื่อ Analyse โครงสร้าง	44
รูปที่ 3.23 การแสดงผลแรงและหน่วยแรงต่างๆ	44
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างค่า Axial Force Diagram ในเสา	45
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างค่า Shear และ Moment Diagram ในคาน	45
รูปที่ 3.26 หน้าตาโปรแกรม spColumn	46
รูปที่ 3.27 การกำหนดค่าเริ่มต้น	46
รูปที่ 3.28 กำหนดคุณสมบัติวัสดุ	47
รูปที่ 3.29 กำหนดขนาดหน้าตัด	47
รูปที่ 3.30 กำหนดมาตรฐานเหล็กเสริมกำลัง	48
รูปที่ 3.31 การวางตำแหน่งของเหล็กเสริม	48
รูปที่ 3.32 การใส่ค่าแรงในแนวแกนและโมเมนต์ของคาน	49
รูปที่ 3.33 การตรวจสอบความสามารถในการรับกำลัง	49
รูปที่ 3.34 การใส่ค่าแรงในแนวแกนและโมเมนต์ของเสา	50
รูปที่ 3.35 การตรวจสอบความสามารถในการรับกำลัง	50
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ vierendeel 2 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	70
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	71
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	71
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ vierendeel 2 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	72
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	73
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	73
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 2 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลิก.....	75
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลิก	75
รูปที่ ก-1 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง.....	81
รูปที่ ก-2 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง.....	81
รูปที่ ก-3 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง.....	81
รูปที่ ก-4 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง.....	82
รูปที่ ก-5 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง.....	82
รูปที่ ก-6 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง.....	82
รูปที่ ก-7 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง.....	83
รูปที่ ก-8 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง.....	83
รูปที่ ก-9 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง.....	83
รูปที่ ก-10 ภาพตัวอย่างที่แสดงว่าหน้าตัดที่ออกแบบใช้งานได้.....	84
รูปที่ ก-11 ภาพตัวอย่างที่แสดงว่าหน้าตัดที่ออกแบบใช้งานไม่ได้.....	84
รูปที่ ก-12 ตัวอย่างการแอนตัวของ Vierendeel แบบ 4 ช่อง.....	89
รูปที่ ก-13 ค่าการแอนตัวของ Vierendeel แบบ 4 ช่อง.....	89
รูปที่ ก-14 การใช้ Solid Model ในการคำนวณการแอนตัวของคานลิก.....	90
รูปที่ ก-15 รูปร่าง Solid Model ของคานลิก.....	90
รูปที่ ก-16 การใส่น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคานลิก.....	91
รูปที่ ก-17 ตัวอย่างการแอนตัวของคานลิก.....	91
รูปที่ ก-18 ตัวอย่างค่าการแอนตัวของคานลิก.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมา

เนื่องจากในปัจจุบันคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในการก่อสร้างองค์อาคารต่างๆ แต่ปัญหาที่สำคัญของโครงสร้างเกิดเนื่องมาจากน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มากเกินไป ทำให้การเพิ่มความหนาหรือความลึกของโครงสร้างส่งผลให้น้ำหนักคงที่ของอาคารมากขึ้นด้วย ในที่นี้จึงศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลงเพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาหาทางแก้ปัญหาเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเลือกใช้ระบบโครงสร้างแบบ Vierendeel มาแก้ปัญหานี้ เนื่องจาก Vierendeel เป็นโครงสร้างที่มีช่องเปิดระหว่างชิ้นส่วนที่ทำมุมฉากต่อกัน ส่วนของคอนกรีตบริเวณของช่องเปิดที่หายไปจึงสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Vierendeel ในโครงสร้างช่วงยาว
2. นำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างระบบคานลึกลง
3. เพื่อพิจารณาว่า Vierendeel ลดน้ำหนักของโครงสร้างได้

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ใช้คานลึกลงเป็นกรณีศึกษาของโครงสร้างช่วงยาว
2. กำหนดให้การเป็น simple span
3. ใช้ขนาดคานลึกลงทั้งหมด 5 ขนาดซึ่งมีความยาวเท่ากับ 5.03 เมตร ขนาดเท่ากับ
 - 0.50 x 3.05 m.
 - 0.45 x 3.05 m.
 - 0.40 x 3.05 m.
 - 0.35 x 3.05 m.
 - 0.30 x 3.05 m.
4. รับน้ำหนักรูปแบบบรรทุกกระจายขนาด 12.5 t.
5. สมมติให้ใช้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดจากการทดสอบรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 280 ksc.
6. เหล็กรับแรงดึงใช้เหล็กเสริมข้ออ้อย SD40 และเหล็กรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเสริม SD30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.ขนาดของ Vierendeel แบ่งพิจารณาเป็นช่องว่าง 2 3 4 ช่องตามลำดับและขนาดตามคานลิก โดยขนาดคานย่อยแบ่งตามความลึกออกเป็น

- 0.70 m.
- 0.60 m.
- 0.50 m.

จึงจะได้ทั้งหมด 45 ตัวอย่าง

4. วิธีการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัย Vierendeel เกี่ยวกับที่มา พฤติกรรม การนำไปประยุกต์ใช้ และวิธีในการวิเคราะห์
2. ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างระบบคานลิก และวิธีในการวิเคราะห์
3. หาข้อมูลสำหรับการศึกษา ข้อกำหนดในการออกแบบ และตัวอย่างที่นำมาศึกษา
4. ศึกษาพฤติกรรมจากข้อมูลและตัวอย่างที่มี โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรม SAP2000 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อใช้โครงสร้างระบบ Vierendeel แบบคอนกรีตเสริมเหล็กแทนคานลิก และสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

5. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำโครงสร้างระบบ Vierendeel ไปประยุกต์ใช้ได้จริง
2. สามารถลดน้ำหนักโครงสร้างช่วงยาวโดยนำระบบโครงสร้างแบบ Vierendeel ไปทดแทนโครงสร้างระบบคานลิก

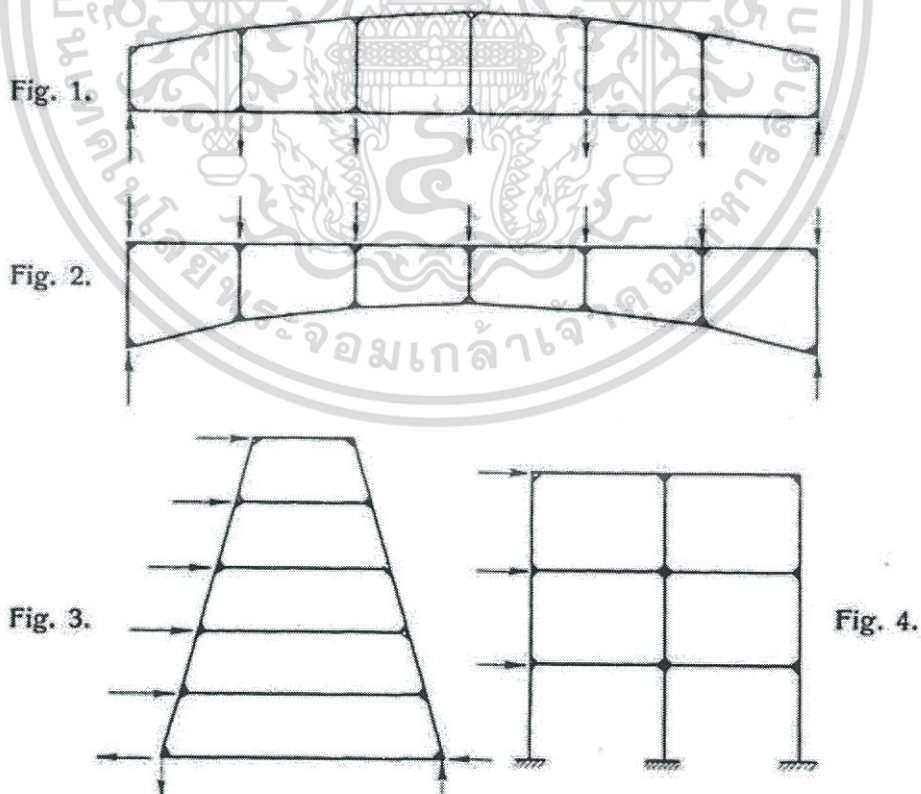
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

1. คำจำกัดความและรูปแบบของ Vierendeel

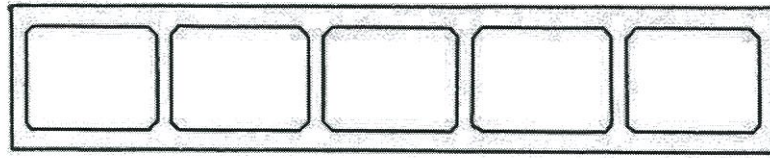
Vierendeel Frame หรือ Vierendeel Truss

คือโครงถักที่ไม่มีชิ้นส่วนทแยงมุมเป็นส่วนประกอบ แต่ละชิ้นส่วนจะมีการส่งผ่านของ bending moment , shear และ direct stress การเชื่อมต่อกันของแต่ละชิ้นส่วนมีการเชื่อมต่อโดยการใช้ข้อต่อแบบ rigid joint ต่างจากโครงถักแบบทั่วไปที่มีชิ้นส่วนทแยงมุมเป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง ใช้การเชื่อมต่อแบบ pin joint ระหว่างชิ้นส่วน และมีแต่ axial stress ภายในชิ้นส่วน ทำให้ชิ้นส่วนที่เหลือของ Vierendeel ต้องรับ shear และ moment สูงมากเมื่อเทียบกับโครงถักทั่วไปที่มีความลึกเท่ากัน ส่งผลให้พฤติกรรมของ Vierendeel มีลักษณะเป็น rigid structure และเป็นโครงสร้างแบบ indeterminate หลายตัวแปร รูปแบบทั่วไปของ Vierendeel แสดงในรูปที่ 1 Fig. 1 และ Fig. 2 เป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับโครงสร้างสะพาน Fig. 3 และ Fig. 4 เป็นรูปแบบทั่วไปของโครงสร้างแบบ rigid frame

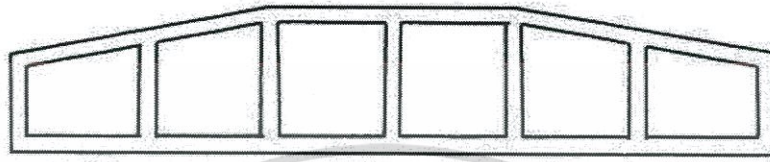


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.1 รูปแบบทั่วไปของ Vierendeel ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

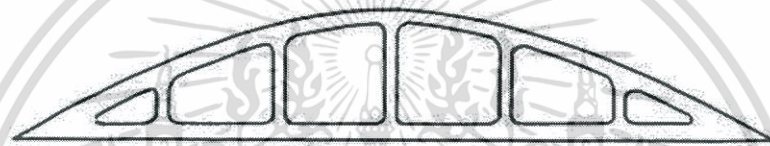
เราสามารถจำแนกประเภทของ Vierendeel ได้ตามรูปร่างที่พบได้ทั่วไปดังรูปที่ 2



a) Parallel chord



b) Curved chord - quadrangular panels



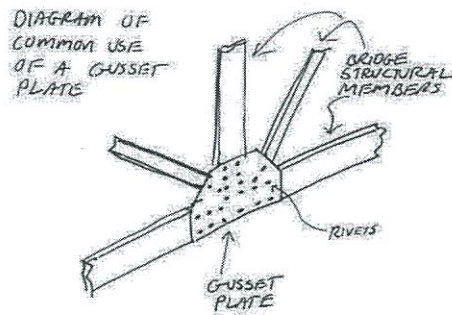
c) Fully curved chord - triangular end panels

รูปที่ 2.2 ประเภทของ Vierendeel

2. ประวัติศาสตร์ของ Vierendeel

Vierendeel เกิดขึ้นครั้งแรกในปี 1896 โดยวิศวกรชาวเบลเยียม Arthur Vierendeel และเป็นศาสตราจารย์แห่งมหาวิทยาลัย Louvain ได้เผยแพร่แนวคิดของเขาในหนังสือ *Longerons en Treillis et Longerons the Arcades* ว่าในขณะนั้นโครงเหล็กจำเป็นต้องมีเพลาขนาดใหญ่เพื่อรองรับกลุ่มหมุดย้า ชิ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่และไม่มีแนวของชิ้นส่วนที่ตัดกัน เมื่อใช้ทฤษฎี pin joint แล้วลองนำผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลจากการวัดภาคสนาม ปรากฏว่าเกิดความผิดพลาดเกือบ 15% ทฤษฎี pin joint จึงไม่ถูกนำมาใช้งานเนื่องจากไม่มีการถ่ายโมเมนต์ที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน ศาสตราจารย์ Vierendeel จึงเสนอให้ใช้ระบบ rigid joint เพื่อแก้ไขความผิดพลาดนั้น ทำให้มีความแน่นอนระหว่างการวิเคราะห์และใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยอาจใช้อัตราส่วนของความปลอดภัยที่น้อยลงเนื่องจากมีความแม่นยำที่มากขึ้น ทำให้โครงสร้างสะพานแบบ Vierendeel ที่เกิดขึ้นในศตวรรษที่ 1900 มีน้ำหนักที่น้อยกว่าโครงเหล็กทางเลือกอื่น ในตอนต้นรูปร่างที่เกิดขึ้นจากการใช้หมุดย้า (rivet) ในการเชื่อมต่อแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน และความต้องการให้เพลา (gusset) ที่รองรับกลุ่มหมุดย้ามีความโค้งเพื่อรองรับหน่วยแรงมหาศาลบริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน (รูปที่ 3) ความโค้งนี้จึงเป็นลักษณะเด่นของ Vierendeel ในช่วงแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 gusset plate

2.1 การก่อสร้างและพัฒนา Vierendeel

ในปี 1897 ได้มีการทดลองสะพาน Vierendeel เกิดขึ้นครั้งแรกที่ Tervueren , Belgium โดยมีช่วงยาว 96 ฟุต ให้สะพานรับ load จากทางรถไฟ ซึ่งกลุ่มหมุดยั่ว(rivet) รับน้ำหนักได้ถึง 2.73 เท่าของการออกแบบจาก live load

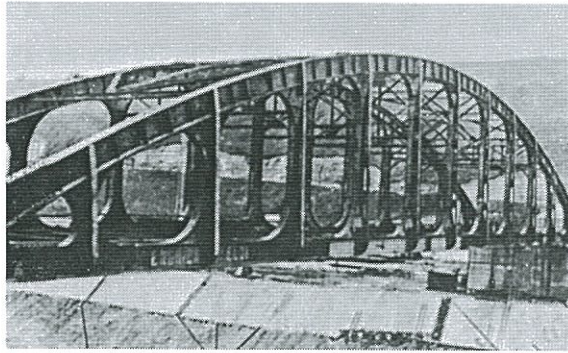
ในปี 1901 มีการนำสะพาน Vierendeel มาใช้งานจริงครั้งแรก โดยมีช่วงยาว 128 ฟุต ก่อสร้างโดยใช้หมุดยั่ว(rivet) ที่ Avelghem , Belgium

ในปี 1910 มีการก่อสร้างสะพานช่วงยาว 136 ฟุตที่ Ousselghemin , Belgium และยังคงใช้หมุดยั่ว(rivet)ในการก่อสร้าง

ในปี 1929 มีการก่อสร้างระบบสะพานข้ามคลองระหว่างเมือง Antwerp และ Liege ที่ Belgium โดยเกือบครึ่งของสะพานทั้งหมดใช้ระบบสะพานแบบ Vierendeel และใช้ระบบการเชื่อมอาร์กไฟฟ้า(electric arc welding) เพื่อปรับปรุงความไม่ต่อเนื่องของชิ้นส่วนจากการใช้หมุดยั่ว รูปแบบของสะพานเป็นแบบ Fully curved chord-triangular panels เพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของ Moment ที่แปรผันตามความยาวของสะพาน

ในปี 1930 มีการก่อสร้างทางรถไฟและสะพานทางหลวงกว่า 30 แห่งใน Belgium และสะพานทางรถไฟกว่า 23 แห่งใน Belgian Congo โดยมีช่วงสั้นๆ 100-300 ฟุต

ในปี 1933 มีการก่อสร้างสะพาน Lanaye (รูปที่ 4) เป็นสะพานข้ามคลอง Albert และเป็นระบบสะพานแบบ Vierendeel สะพานแรกที่ใช้การเชื่อมทั้งหมด (ยกเว้นบริเวณที่ประกบกัน ,splices field) และเป็นสะพานระบบเชื่อมที่ใหญ่ที่สุดในโลกในขณะนั้น โดยมีความยาว 208 ฟุต



รูปที่ 2.4 Lanaye, First bridge on the Albert Canal, 1933

ในปี 1935 ชาวเบลเยียมได้สร้างสะพาน Vierendeel ที่ยาวที่สุดขึ้นที่ Herenthal โดยมี ความยาว 295 ฟุต

แม้ว่าจะได้รับการยอมรับจากทั่วไป แต่ปัญหาทางด้านวิศวกรรมเนื่องจากความหลากหลาย ของตัวแปรในระบบจำเป็นต้องทำการคำนวณอย่างมากและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติในเวลานั้นยัง เป็นที่น่าสงสัยอยู่ ความสงสัยเหล่านั้นได้ถูกคลายโดยการนำเสนอของนักวิชาการศาสตราจารย์ Keelhoof แห่ง Ghent Campus of Liege และ Baes of Brussels ผู้ที่ขยายความรู้เกี่ยวกับ Vierendeel อย่างมากมายโดยการทดสอบรายละเอียดของจุดต่อหลายรูปแบบ มีการถ่ายภาพของ แบบจำลองที่ใช้ศึกษาอย่างต่อเนื่อง และพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่ง่ายยิ่งขึ้นจนในที่สุดศาสตราจารย์ Magne แห่งมหาวิทยาลัย Ghent ได้เผยแพร่แผนภูมิเส้นที่มีอิทธิพลซึ่งปรากฏรูปแบบของหน่วยแรง จากการใส่ unit load (1 kip) ย้ายจากเฟรมหนึ่งไปอีกเฟรมหนึ่ง ในขณะที่เดียวกัน Vierendeel ได้ เผยแพร่ตำราของเขาออกมาในชื่อ *Cour de Stabilités Construction* ในปี 1920 โดยมี รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบ การวิเคราะห์ และการก่อสร้าง

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

เนื่องมาจากเหตุการณ์การถล่มของสะพานยาว 245 ฟุตที่ Hasselt ในปี 1983 ส่งผลและ ความรุนแรงเป็นอย่างมาก ส่วนใหญ่เนื่องมาจากความรู้ที่ไม่เพียงพอของขั้นตอนการเชื่อม ฝีมือในการ เชื่อมที่ไม่ดี และการใช้เหล็กคุณภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดความสงสัยในระบบ Vierendeel คณะกรรมการ ชาวเบลเยียมได้จัดให้มีตรวจสอบการถล่มของสะพานร่วมกับที่ปรึกษาภายนอก สรุปได้ว่าระบบการ เชื่อมของ Vierendeel แม้ว่าจะได้รับการออกแบบมาอย่างเพียงพอ แต่ก็มีความรู้สึกไว (sensitive) ต่ออิทธิพลภายนอก เช่น ความเย็น ความร้อน การสั่นสะเทือน หรือการกระแทก ด้วยความแข็งแกร่ง ของข้อต่อโดยธรรมชาติแล้วทำให้ระบบถูกดึงดูดความเครียดจากภายในที่มีอยู่แล้ว ทำให้ยังต้องใช้ ความรู้ที่แพร่หลายเกี่ยวกับศิลปะการเชื่อมอีกมากในการก่อสร้าง ปัญหาที่คล้ายคลึงกันกับการเชื่อม เพลตของชิ้นส่วนสะพานขนาดใหญ่ก็กำลังเกิดขึ้นในประเทศอื่น ๆ ในยุโรปเช่นกัน เห็นได้ชัดว่า เทคโนโลยีการเชื่อมที่จำเป็นต้องตามทันกับความต้องการของการเชื่อมโลหะ ในปี 1957 G.Willems เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรของรัฐเบลเยียมสะท้อนให้เห็นในหนังสือ *Acier-Stahl-Steel* ว่า “การเชื่อมมีประโยชน์มากมายทางด้านความประหยัด ด้านเทคนิคและความสวยงามแบบธรรมชาติ ข้อเสนอแนะในการละทิ้งมันให้ได้อย่างไรก็เป็นสิ่งที่คิดไม่ถึงเลยทีเดียว” เยอรมนียังคงสร้างสะพานโดยการเชื่อมทั้งหมดพร้อมกับได้ประยุกต์ใช้ประสบการณ์การก่อสร้างในการพัฒนาไปข้างหน้าโดยใช้ข้อเสนอแนะเฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม แต่น่าเสียดายที่สะพาน Vierendeel ส่วนใหญ่ของเบลเยียมมีอายุการใช้งานที่สั้น เนื่องจากการบุกรุกเยอรมันและยึดครองในปี 1939 สะพานเหล่านั้นถูกสร้างขึ้นใหม่แต่ก็ถูกทำลายอีกครั้งในระหว่างการทิ้งระเบิดและการต่อสู้จากผลของวัน D-Day ในปี 1944

หลังจากสงครามบอบช้ำของการก่อสร้างสะพาน Vierendeel Truss ขึ้นใหม่ที่เบลเยียมมีน้อยมาก ภูมิทัศน์ด้านความสวยงามได้รับการนิยามใหม่ด้วยโครงโค้งนูนที่เพริยวบางมากขึ้นโดยไม่ส่งผลต่อเพลทและกล่องคานของสะพาน ช่วงความยาวที่มากขึ้นในประเทศอื่นได้รับการจัดการอย่างดีด้วยระบบกันสะเทือนและระบบสายเคเบิลที่พัฒนาขึ้นใหม่ในเยอรมนี ในขณะที่ฝรั่งเศสกำลังยุ่งอยู่กับสิ่งประดิษฐ์ที่น่าสนใจของตัวเองอยู่นั้นก็คือคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete)

การมีส่วนร่วมของชาวอเมริกัน

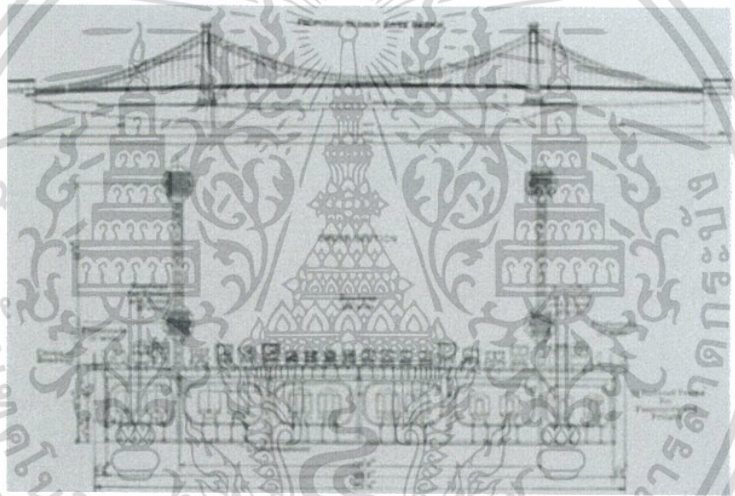
การพัฒนาทางด้านวิศวกรรมโยธาในสหรัฐอเมริกาสำหรับ Vierendeel เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1901 ด้วยชุดหอคอย (tower) ของสะพานแขวนที่ตั้งขึ้นในรูปสะพาน Kinzua สำหรับทางรถไฟ Erie ใน McKean County, Pennsylvania โดยใช้ Vierendeel ที่มีความหนาน้อยลงในแนวดิ่งซึ่งมีความสูงถึง 285 ฟุต การแก้ปัญหาที่แตกต่างจากการออกแบบอาคารในแบบเดิมๆอย่างสิ้นเชิง เช่น การเลือกใช้ข้อต่อแบบ rigid joints โดยวิศวกร C. R. Grimm นอกจากช่วยกำจัดความจำเป็นในการใช้ระบบการค้ำยันในแนวทแยงมุมแล้วยังให้รูปร่างที่สะอาดตาอีกด้วย การใช้ Vierendeels ในรูปแบบหอคอยแนวตั้งที่เกิดขึ้นสำหรับสะพานแขวนหลายแห่งต้องใช้ความแข็งแรงเป็นอย่างมากเพื่อรับแรงด้านข้างและต้องมีความต้านทานการสั่นสะเทือนโดยที่ไม่มีชิ้นส่วนในแนวทแยงมุม

- ตัวอย่างแรกของชาวอเมริกันคือสะพานแขวน Waldo-Hancock ในปี 1929 เหนือแม่น้ำ Penobscot ใกล้ Bucksport รัฐเมน
- สะพานที่คล้ายกันหลายแห่งใช้เทคนิค Vierendeel ในรูปแบบหอคอยแนวตั้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพาน Golden Gate ในเมือง San Francisco (รูปที่ 5)
- มีเพียงสะพาน Vierendeel แห่งเดียวที่ใช้สำหรับช่วงสะพานรูปแบบแนวนอน คือที่ Glendale, California ประกอบด้วยสะพาน 9 ช่วงมีความยาว 95 ฟุตถูกสร้างขึ้นโดยคณะวิศวกรเพื่อข้ามช่องทางการควบคุมน้ำท่วม ซึ่งถูกออกแบบในปี 1937 โดยวิศวกร L.T. Evans ช่องว่างเหล่านั้นเป็นที่น่าพึงพอใจสำหรับผู้ขับขี่เพื่อการมองเห็นที่ดีขึ้นและสามารถกำจัดชิ้นส่วนค้ำยันเหนือหัว(overhead bracing) ออกไปได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 Golden Gate Bridge, San Francisco , 1933



รูปที่ 2.6 Hudson River, proposed suspension bridge, Lindenthal, 1921.

แปลนอย่างละเอียดสำหรับสะพานแขวนเหนือแม่น้ำฮัดสันในปี 1921 โดย G.Lindenthal (รูปที่ 6) มีความตั้งใจที่จะให้การจราจรทางรถไฟจราจรผ่านทางช่องว่างของคานลึกระบบ Vierendeel ภายใต้ถนนหลายเลนส์ แม้จะไม่เคยตระหนักถึงสิ่งนี้ แต่วิสัยทัศน์ของเขาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้สำหรับช่องว่างสี่เหลี่ยมของ Vierendeel ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านสถาปัตยกรรมในเวลาต่อมา ตัวอย่างเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงโอกาสพิเศษที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบ Vierendeel ในอเมริกา

ในทศวรรษที่ 1930 เมื่อความสำคัญทางด้านวิศวกรรมโยธาของ Vierendeel ดูเหมือนจะเสื่อมโทรม ศักยภาพทางสถาปัตยกรรมเพิ่งจะเริ่มต้นทั้งในอเมริกาและต่างประเทศ อีกทั้ง Belgium และ Germany ค้นพบว่าการลดโหลดแบบไดนามิกของ Vierendeel ต้องกำหนดการออกแบบสะพานทำให้เป็นโหลดคงที่ที่พบได้ในอาคารส่วนใหญ่ นั้น สามารถขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

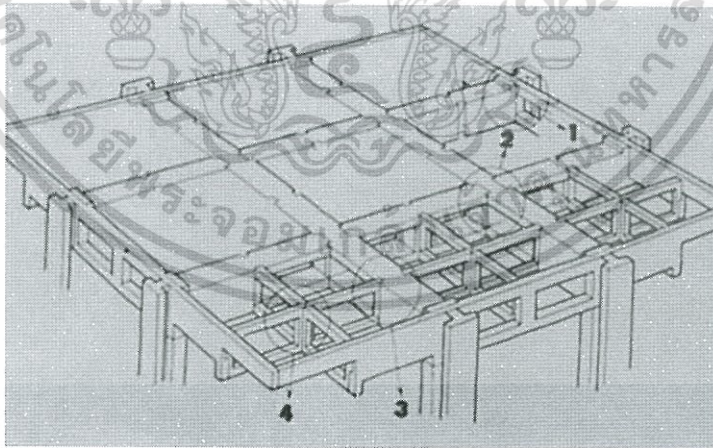
2.2 บทบาทของ Vierendeel

อย่างที่รู้กันดีว่า Vierendeel เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าโครงสร้างที่มีขนาดเท่ากัน แต่เหนือกว่าในด้านพื้นที่หรือช่องว่าง Vierendeel ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีค่า ยากที่จะจำแนกประเภทของการใช้งานได้อย่างเต็มรูปแบบ

ความจำเป็นในการจัดการระบบทางกลที่ซับซ้อนมากๆ เข้ากับการออกแบบอาคารมักจำเป็นต้องใช้ระบบ Vierendeel ในประเภทอาคารเช่น โรงพยาบาล ห้องทดลองหรือโรงเรียนซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสำหรับโครงข่ายทางกลของท่อ ทั้งท่อเก็บสายไฟและท่อร้อยสายต่างๆ จะต้องมี Vierendeel แบบสั้นหรือเต็มรูปแบบที่คั่นระหว่างพื้นทั่วไปเพื่อให้สามารถเข้าถึงช่องเซอร์วิสได้จากด้านบนหรือด้านล่าง

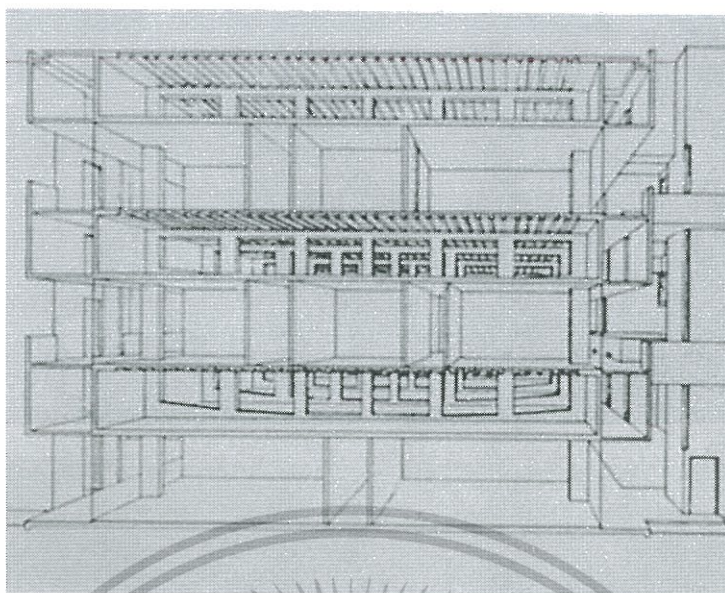
2.3 การนำ Vierendeel ไปประยุกต์ใช้งานในโครงสร้าง

Vierendeel ถูกนำไปใช้งานในระบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสองทิศทางสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัยทางการแพทย์ที่ University of Pennsylvania โดยการออกแบบของ Louis Kahn's มีจุดมุ่งหมายเพื่อรองรับเครือข่ายขนาดใหญ่ของเซอร์วิสเครื่องจักรกล ซึ่งมีความยาว clear spans 47 ฟุต สำหรับพื้นที่ห้องปฏิบัติการ การออกแบบอื่นของ Kahn ที่ Salk Institute เมือง San Diego, California มีการนำ Vierendeel ไปใช้อย่างเต็มรูปแบบระหว่างพื้นที่ห้องปฏิบัติการเพื่อรองรับความยืดหยุ่นทางเชิงกลสำหรับการเปลี่ยนแปลงความต้องการในอนาคต



รูปที่ 2.7 Philadelphia, Medical Research Laboratory, University of Pennsylvania, L. Kahn, 1959.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 SanDiego, Salk Institute, L. Kahn, 1966.

ที่ปรึกษาด้านโครงสร้าง August E. Komendant ได้คิดค้นชิ้นส่วน Vierendeel แบบ pre-cast คอนกรีต ที่มีการเชื่อมจุดต่อเข้าด้วยกันโดยการใช้เทคนิค post-tension ซึ่งทำขนาดชิ้นส่วนให้เหมาะสมและให้มีความต่อเนื่องกับเสา

การเพิ่มขนาดของชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง

Komendant เป็นผู้ให้คำปรึกษาด้านโครงสร้างในการแก้ปัญหาการขยายขนาดกลุ่มของชิ้นส่วนแนวตั้ง(web) และชิ้นส่วนแนวนอนหรือคอร์ดที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบ Vierendeel เพื่อลดการแอ่นตัวหรือระยะโก่ง (deflection) หรืออาจกล่าวได้ว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของโครงสร้างแบบ Vierendeel ขึ้นอยู่กับพื้นที่ระหว่างชิ้นส่วนแนวตั้ง (web) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในช่วงปลายของความยาวและลดการแอ่นตัวของคาน

การประยุกต์ใช้ช่องเปิดในโครงสร้าง

หลายโครงสร้างทั่วโลกนำ Vierendeel ไปประยุกต์ใช้สำหรับพื้นที่ทางกลที่ซับซ้อนทำให้สามารถมั่นใจได้ว่า Vierendeel ยังคงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับอนาคต

การมีช่องเปิดขนาดใหญ่ เพื่อใช้ช่องเปิดนี้สำหรับการใช้งานหรือสามารถจัดวางประตูหน้าต่างได้ตามความสูงที่ต้องการ

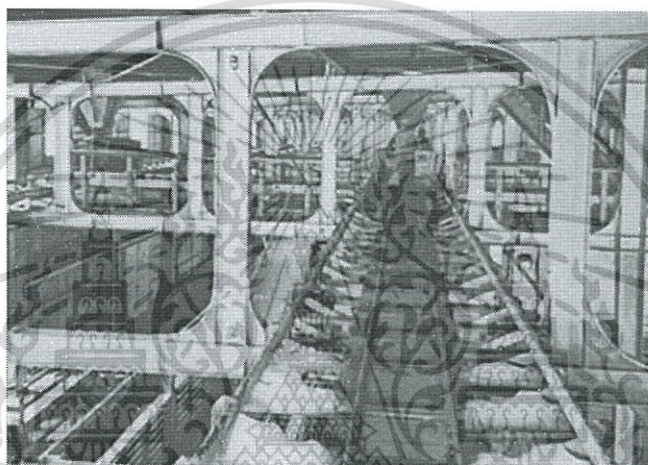
ตัวอย่างที่เก่าแก่ที่สุดคือ Royal Institute of British Architect's Building ที่กรุง London ในปี 1934 คอร์ดล่าง (bottom chord) ของ Vierendeel รองรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากพื้นและคอร์ดบน (top chord) รองรับน้ำหนักหลังคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่ปีต่อมาในปี 1938 Vierendeel ถูกนำไปใช้ในอาคารที่ United States , International Agricultural Corporation ที่เมือง Chicago Heights โดยได้ใช้ประโยชน์จากช่องว่างของ Vierendeel ในการวางเครือข่ายของสายพานลำเลียงและเป็นทางเดินในบางส่วนของช่องเปิด และมีบางส่วนปล่อยว่างไม่ได้ใช้ประโยชน์

ในหลายๆใจกลางเมืองได้มีการปรับปรุงทางเดินเท้าที่ยกระดับขึ้นใหม่เพื่อให้ชาวอเมริกันที่เดินไปทำงานได้ใช้ประโยชน์ในการเดินทางไปทำงาน

Vierendeel จึงเป็นทางเลือกที่ถูกเลือกใช้บ่อยครั้ง เพื่อให้มีการมองเห็นทัศนวิสัยที่สูงและลดอุปสรรคของพื้นที่กลางแจ้ง



รูปที่ 2.9 Chicago Heights, International Agricultural Corporation, Austin Company, 1938.

เป็นโครงสร้างที่ช่วยกำจัดปัญหาเรื่องการทรุดตัวต่างกัน (differential settlement)

ศักยภาพที่สามสำหรับ Vierendeel ในด้านสถาปัตยกรรมยังคงถูกปิดไว้ในรากฐาน หากดินมีความสามารถในการแบกรับต่ำ (low bearing capacity) และดินมีสภาพที่บีบอัดได้สูงพร้อมกับต้องหลีกเลี่ยงการทรุดตัวต่างกัน (differential settlement) ทำให้จำเป็นต้องมีระบบการรองรับที่แข็งแกร่ง ซึ่ง Vierendeel ถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นคอนกรีต (concrete mat) สำหรับคอร์ดล่าง (lower chord) และแผ่นพื้นคอนกรีต (concrete floor slab) สำหรับคอร์ดบน ให้โครงสร้างส่วนมีความแข็งแรงโดยเชื่อมต่อกันด้วยเสาหรือผนังค้ำยัน (bearing walls) ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นส่วนในแนวตั้ง แม้ว่าฐานรากแบบลึกลงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากยิ่งขึ้นแต่ข้อดีของ Vierendeel อีกอย่างหนึ่งคือปล่อยให้พื้นที่ใช้สอยภายในความลึกที่ออกแบบ

ตัวอย่างในการพยายามแก้ปัญหาเรื่องการทรุดตัวดังกล่าวได้เกิดขึ้นในปี 1929 สำหรับอาคาร B ของ บริษัท Bell Telephone ใน Albany, New York (รูปที่ 10) เป็น Vierendeel สองชั้นที่วางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่บนดินเหนียวที่มีความ sensitive สูงเพื่อรองรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนทางโทรศัพท์ (การแลกเปลี่ยนทางโทรศัพท์เป็นระบบโทรคมนาคมที่ใช้ในเครือข่ายโทรศัพท์ระบบสาธารณะหรือในองค์กรขนาดใหญ่ การแลกเปลี่ยนประกอบด้วยส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์และในระบบเก๋ารวมถึงการให้บริการของมนุษย์ซึ่งเชื่อมต่อ (สลับ) สายโทรศัพท์หรือวงจรเสมือนของระบบดิจิทัลเพื่อสร้างการโทรศัพท์ระหว่างผู้สมัครสมาชิก) ที่มีขนาดหนัก จำเป็นต้องมีกลไกที่ละเอียดอ่อนเพื่อกำจัดการทรุดตัวที่ต่างกัน

ประยุกต์ใช้พฤติกรรมเสมือนเป็นโครงสร้างยื่น (cantilevered)

การพัฒนาล่าสุดในการก่อสร้างหลายๆขั้นตอน หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นท่อแบบยื่น (cantilevered tube) อยู่ในประเภทของการใช้งานของ Vierendeel ข้อที่สี่ คืออาคารรอบนอก ประกอบด้วยตาข่ายละเอียดของช่องเปิดสี่เหลี่ยมระหว่างเสาที่มีระยะห่างใกล้เคียงกับความลึกคานช่วงขอบนอก ถือว่าโครงถักมีความแข็งแกร่งอย่างมากเพื่อรองรับแรงด้านข้างเช่นเดียวกับแรงโน้มถ่วง อาคารที่สูงที่สุดในโลกคือ Sears Tower ใน Chicago , World Trade Center ใน New York และ Standard Oil Building ใน Chicago บางแห่งยังคงใช้ระบบนี้ ทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างที่มากที่สุดมาจากท่อที่เป็นของแข็งแต่ต้องบางได้เท่าที่จำเป็น ตาข่ายVierendeelถือเป็นข้อเสนอที่สมเหตุสมผล

ในแนวนอน Vierendeel หลายชั้นถูกใช้เพื่อใช้ประโยชน์จากความแข็งแกร่งที่ได้รับจากความลึกที่เพิ่มขึ้นของระบบ เทคนิคนี้เปิดโอกาสให้พื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่ยังคงแสดงกริดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular grid)หนังสือ Yale's Beinecke ที่หายากและต้นฉบับห้องสมุดโดย Skidmore, Owings และMerrill เป็นปริซึม Vierendeel framed สูงห้าชั้นที่มีฐานสี่เหลี่ยมรองรับ ชั้นล่างจึงกลายเป็นพื้นที่เปิด 130 ฟุต 86 ฟุต กลยุทธ์ที่คล้ายกันนี้สามารถพบได้ที่ตึกสังคมนาฬารของ Cornell's ด้วยข้อได้เปรียบที่ได้รับเพิ่มขึ้นโดยการยื่นที่ปลาย (cantilevering)

เพื่อความสวยงาม

เกี่ยวข้องกับความหลงใหลในช่องว่างของ Vierendeel ใช้กับอาคารที่เน้นด้านความสวยงามเป็นที่ดึงดูดตา เช่น

ในปี 1940 โรงงานเหล็กกล้าใน Italy ที่เมือง Savone อาจเป็นตัวอย่างที่ดีที่สุดในการนำไปใช้งานด้านนี้ การวางตัวของโครงสร้างทั้งแนวนอน แนวตั้งและความชันของโครงสร้างคล้ายมีรังผึ้งภายใน เพื่อที่จะแสดงภาพลักษณ์ที่ทันสมัยของผลิตภัณฑ์ และเหล็กที่มีความพิเศษ ถึงแม้จะมีข้อเสียด้านความประหยัดและประสิทธิภาพ แต่ความสวยงามก็ยังถูกพิจารณาเหนือเหตุผลทั้งหมด

The Boston City Hall and the Santa Cruz County Government Center ใน California ก็แสดงภาพลักษณ์ของ Vierendeel เพื่อจุดประสงค์ของความสวยงามเช่นกัน

มี Vierendeel มากมายที่ถูกปรับปรุงพัฒนาใหม่หรือนำบางส่วนไปประยุกต์ใช้ เช่น ระบบโครงถัก(truss system)ที่ไม่เสถียร ถูกนำไปพัฒนาที่ M.I.T. ในปี 1966 pratt truss ทั้งหมดยังคง

รูปร่างเดิม มีเพียงหนึ่ง rigid panel ที่ถูกนำไปใช้เป็นทางเดิน (corridor) ความคิดนี้ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอาคารอพาร์ทเมนต์ (apartment buildings) และโรงพยาบาลเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพและมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่ยังคงใช้ประโยชน์จากข้อดีของ Vierendeel อยู่เหมือนเดิม

3. วิธีการในการวิเคราะห์ Vierendeel Truss

Vierendeel Truss เป็นโครงสร้าง indeterminate หลายตัวแปร (3 redundant ต่อ 1 panel) ในขั้นตอนการวิเคราะห์เราจะใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีการกระจายโมเมนต์ (moment distribution) เนื่องจากวิธีนี้จะทำให้สมการที่ต้องใช้ในการแก้ปัญหาลดลง โดยที่ไม่พิจารณาการเสีรูปร่างตามแนวแกน(axial deformation) ของชิ้นส่วน J. D. Gedo ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการไม่พิจารณาผลจากการเสีรูปร่างตามแนวแกนกับการพิจารณาผลจากการเสีรูปร่างตามแนวแกน พบว่าไม่ได้ส่งผลต่อหน่วยแรงโดยตรง(direct stress) มากนัก ในขณะที่โมเมนต์สูงสุดของคอร์ดมีข้อผิดพลาดเพียง 5 % เมื่อไม่พิจารณาผลจากการเสีรูปร่างตามแนวแกน ผลกระทบจากแรงเฉือนบิดก็อาจไม่ถูกพิจารณาด้วยในทุกกรณี จะมีผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดก็ต่อเมื่อความลึกของชิ้นส่วนมีขนาดมากกว่าเมื่อเทียบกับความยาวของโครงถัก

ในกรณีของ Vierendeel Truss แบบ quadrangular panels ที่มีสัดส่วนปกติ ผลกระทบจากการเสีรูปร่างตามแนวแกนและแรงเฉือนอาจไม่นำมาพิจารณา การกำหนดรูปแบบที่ไม่เหมาะสมที่สุดคือโครงถักที่มีอัตราส่วนความลึกต่อช่วงกว้างต่ำ แต่ละชิ้นส่วนมี moments of inertia สูง พื้นที่น้อย วิธีการกระจายโมเมนต์ดูเหมือนจะเหมาะสมที่สุดสำหรับ Vierendeel Truss ประเภทนี้ เนื่องจากสามารถลดจำนวนสมการในการแก้ปัญหาเพื่อลดจำนวนของ panel ในโครงถักได้ และไม่จำเป็นต้องใช้สมมติฐานอื่นที่เกี่ยวกับการเสีรูปร่างตามแนวแกน และยังเป็นวิธีที่คุ้นเคยของวิศวกรในปัจจุบันอีกด้วย

วิธีการกระจายโมเมนต์หรือวิธีอื่นที่ไม่พิจารณาการเสีรูปร่างตามแนวแกนไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ Vierendeel Truss แบบ triangular end panels ได้ ในย่านของ triangular panels เพื่อให้เกิดการเสีรูปร่างอย่างสม่ำเสมอ การเสีรูปร่างตามแนวแกนต้องเป็นลำดับเดียวกับการเสีรูปร่างแบบดัด (flexural deformations) ดูเหมือนว่าในกรณีนี้จำเป็นต้องมีการแก้ปัญหาที่แน่นอนซึ่งรวมถึงผลกระทบของการเสีรูปร่างตามแนวแกน

การแก้ปัญหาทั่วไปรวมถึงผลกระทบของการเปลี่ยนรูปร่างตามแนวแกนสำหรับโครงถักที่มีข้อต่อแข็ง(rigid joint) ได้รับการโปรแกรมไว้สำหรับใช้กับคอมพิวเตอร์แบบดิจิทัล นอกจากนี้โปรแกรมสำหรับการแก้ปัญหาหรือสมการ พร้อมสำหรับคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง แม้แต่คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์ที่เล็กที่สุดก็สามารถรองรับสมการได้ถึง 30 สมการ ด้วยการใช้เครื่องมือเหล่านี้ในการแก้ปัญหาที่

แน่นอนของ Vierendeel Truss กับ triangular end panels ทำให้การแก้ปัญหาค่อนข้างง่ายขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ข้อต่อสำหรับ Vierendeel Truss

โครงสร้าง Vierendeel ในปกติจะสร้างโดยใช้วัสดุคือโครงเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในต่างประเทศส่วนมากนิยมสร้างโดยใช้เหล็กเนื่องจากเป็นการก่อสร้างที่รวดเร็วและแข็งแรง โดยปกติแล้วโครงสร้าง Vierendeel จะต้องให้ความสำคัญในการเลือกวัสดุที่สามารถรับโมเมนต์ได้สูง ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับจุดเชื่อมต่อหรือรอยเชื่อมระหว่างวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น

ในการสร้างโครงข้อต่อ Vierendeel ที่ใช้ในอาคารและทางหลวงรวมทั้งแพลตฟอร์มต่างประเทศจะถูกตรวจสอบโดยทั้งวิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างชิ้นงานจำนวนมากที่ใช้เหล็กความแข็งแรงสูงชนิดใหม่ เช่นรับแรงดึงได้ที่ 600 MPa ได้รับการทดสอบภายใต้ภาระแบบกึ่งสถิตแบบไซเคิลเพื่อทำความเข้าใจจุดแข็งของ Vierendeel เช่น ความแข็งแรงในการหมุน ลักษณะการวิบัติข้อต่อ

Vierendeel เมมเบอร์กลางกลมที่แสดงไว้ รูปที่ 1 สามารถพบได้บ่อยในอาคารเหล็กสูงและโครงสร้างเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่และนอกชายฝั่งของเหล็กแพลตฟอร์ม ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเมมเบอร์กลางมีส่วนเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักของโครงสร้าง ส่วนการ Buckling และการโก่งนั้นจะขึ้นอยู่กับแนวแกนทั้งหมดของเมมเบอร์ ในการใช้งานจริงส่วนกลางของข้อต่อ Vierendeel เป็นรอยต่อเพื่อสร้างองค์ประกอบ โครงสร้างรับน้ำหนักหลักของข้อต่อวงกลมแบบรอยต่อต้องอยู่ภายใต้สภาพการโหลดที่เกิดจากโหลดของสิ่งแวดล้อม เช่นแรงแผ่นดินไหวหรือลมแรงสำหรับอาคารและคลื่น กระแสน้ำสำหรับโครงสร้างนอกชายฝั่ง โหลดกระจายจะเกิดขึ้นเมื่อเมมเบอร์กลางกลมได้รับผลจากแผ่นดินไหวและโหลดนี้จะเป็นแรงดัดที่ส่งผลต่อข้อต่อ Vierendeel และความไม่ต่อเนื่องเรขาคณิตทำให้เกิดให้เกิดความเครียดสูงมากในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม Boone et al. (1982) ทำการทดลองคอร์ดแนวแกนและแนวระนาบในข้อต่อ Vierendeel ภายใต้สามเงื่อนไขการโหลดที่ต่างกัน ดำเนินการทดลองเพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของข้อต่อ Vierendeel โดยใช้สภาพการรับแรงรับเช่น Boone et al. (1982) ใช้วิธีการเชิงตัวเลขหาความเค้นคอร์ด

ของ X-joints ภายใต้ความเค้นชนิดแรงดึง รายงานโดย Van der Vegte และ Makino (2001)

Choo et al (2003a, 2003b) เสนอแนวทางในการกำหนดคอร์ดผลกระทบความเครียดบน X-joints

ภายใต้โหลดตามแนวแกน เมื่อเร็ว ๆ นี้ Qian et al (2007) นำเสนอคอร์ดผลกระทบต่อข้อต่อ

Vierendeel ผันงาภายใต้โหลด moment momentum โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พิจารณา

ผลกระทบที่เป็นอันตรายของการบีบอัดคอร์ดความเครียดในฟังก์ชันเดียวสำหรับประเภทของข้อต่อที่

แตกต่างกันและเงื่อนไขการโหลดโดยไม่คิดผลกระทบของแรงดึง แต่ประเด็นทางเทคนิคอื่นที่ยังไม่

เพียงพอการศึกษาของเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงภายใต้เงื่อนไขการรับแรงรับที่แตกต่างกันทฤษฎี

ประสิทธิภาพของ Vierendeel เป็นเรื่องที่ซับซ้อนมาก เพราะมีความเครียดไม่สม่ำเสมอในการ

เชื่อมต่อและรูปทรงเรขาคณิตสามมิติที่ซับซ้อนผลกระทบ งานปัจจุบันที่ทดลองและวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบพฤติกรรมการดัดงอในระนาบของข้อต่อ Vierendeel โดยใช้ส่วนวงกลมที่เป็นเหล็กความแข็งแรงสูงชนิดใหม่ เช่นเหล็กความต้านทานแรงดึงที่ 600 MPa และจากการทดลองตัวอย่างถูกผลิตขึ้นเพื่อให้เป็นไปอย่างมีนัยสำคัญโดยการสร้างต้องเข้าใจจุดแข็งของวัสดุลักษณะความแข็งแรง และโหมดความล้มเหลวของชิ้นส่วน

4.1 เปรียบเทียบรอยต่อ

การใช้ข้อต่อโดยปกติมักนิยมใช้ข้อต่อคือ Hinged joint และ Fixed joint

Hinged joint หรือ รอยต่อชนิดหมุน

รอยต่อชนิดนี้เป็นรอยต่อที่ไม่สามารถเคลื่อนที่เชิงเส้นได้แต่ชิ้นส่วนที่มาต่อสามารถหมุนได้ในแกนใดแกนหนึ่งอย่างอิสระโดยไม่เกิดโมเมนต์ ซึ่งรอยต่อชนิดนี้สามารถส่งถ่ายแรงในแนวแกนได้แต่การส่งถ่ายโมเมนต์ผ่านข้อต่อมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ (ยกเว้นมีโมเมนต์ภายนอกมากกระทำ)

รูปที่ 2.10 รอยต่อชนิดหมุน

Fixed joint หรือ รอยต่อแบบยึดแน่น

รอยต่อชนิดนี้และชิ้นส่วนที่มาต่อจะไม่สามารถเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือหมุนได้ ซึ่งรอยต่อชนิดนี้สามารถส่งถ่ายแรงในแนวแกนและส่งถ่ายโมเมนต์ภายในและภายนอกได้

รูปที่ 2.11 รอยต่อแบบยึดแน่น

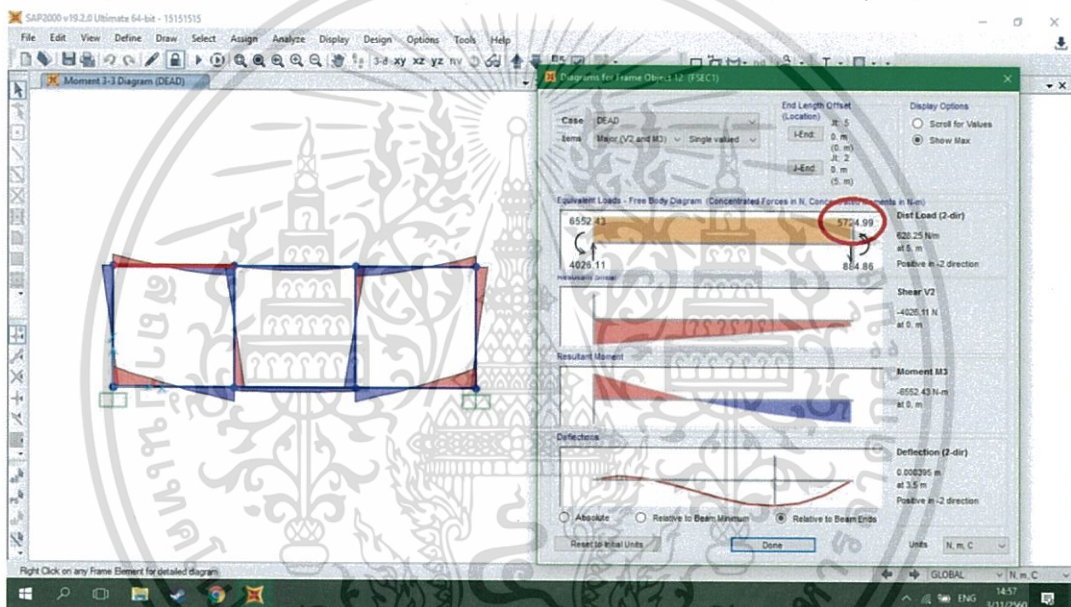
แต่ในทางปฏิบัตินั้น การสร้างคานและเสา คสล.จะเชื่อมต่อกันโดยไม่มีข้อหมุน ดังนั้นคานและเสา คสล.จึงไม่เป็นข้อต่อแบบ Hinged joint โดยสมบูรณ์ แต่จะเป็น Fixed joint นั้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับ การเสริมโครงสร้างเพื่อรับโมเมนต์บริเวณข้อต่อ

4.2 วิธีการออกแบบเพื่อกำหนดประเภทข้อต่อของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

1. หากต้องการให้คานและเสาตล.มีพฤติกรรมใกล้เคียง Hinged joint เราจะคำนวณกำหนดให้ปลายคานไม่รับโมเมนต์และเหล็กเสริมคานเข้าหัวเสาโดยไม่ต้องมีระยะฝังยึดหัวเสา

2. หากต้องการให้คานและเสาตล.มีพฤติกรรมใกล้เคียง Fixed joint เราจำคำนวณกำหนดให้ปลายคานสามารถรับโมเมนต์และเหล็กเสริมคานในส่วนรับแรงดึง เสริมเข้าหัวเสาโดยมีระยะฝังไม่น้อยกว่า $50d$ หรือ $L/4$ หากเป็นคานยื่น แต่เนื่องจากโครงสร้าง Vierendeel Truss เป็นโครงสร้างที่รับโมเมนต์บริเวณข้อต่อเราจึงต้องออกแบบและควบคุมการก่อสร้างให้ข้อต่อเป็นแบบ Fixed joint

ตัวอย่างพฤติกรรมการรับโมเมนต์และการแอ่นตัวในโครงสร้างข้อต่อแบบ Fixed joint



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างพฤติกรรมการรับโมเมนต์และการแอ่นตัวในโครงสร้างข้อต่อแบบ Fixed joint

4.3 วิธีเสริมคานและเสาเพื่อรับโมเมนต์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การเสริมความสามารถในการรับแรงบริเวณข้อต่อของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น

หุ้มด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)



รูป 2.13 การหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีหุ้มด้วยแผ่นเหล็กเป็นวิธีที่สามารถทำได้ไม่ยากมาก โดยช่างก่อสร้างทั่วไปคุ้นเคยวิธีนี้ดีอยู่แล้วและวัสดุที่ใช้ก็หาได้ในประเทศได้แก่ แผ่นเหล็ก ลวดเชื่อม ปูนเกร้าท์ เป็นต้น

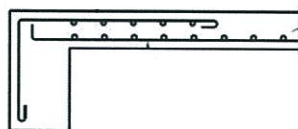
หุ้มด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP Jacketing)



รูป 2.14 การหุ้มด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานต่อการพุกร่อน มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับ การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีข้อเสียคือเป็นวัสดุราคาสูง

เสริมเหล็กรับแรงดึงในคานโดยฝากเข้าหัวเสา

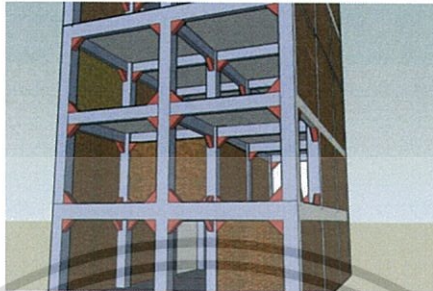


รูป 2.15 การเสริมเหล็กรับแรงดึงในคานโดยฝากเข้าหัวเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสริมเหล็กรับแรงดึง เป็นการเสริมการรับกำลังของคอนกรีตทั้งด้านการรับแรงอัดและแรงดึง แต่ส่วนมากนั้นจะนิยมใช้ในตำแหน่งรับแรงดึงเป็นส่วนมากและได้ผลเป็นอย่างดีจึงนิยมใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งการเสริมกำลังวิธีนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ราคาไม่สูง และมีความคงทนมาก

เสริมข้อต่อด้วยบั้งเหล็ก

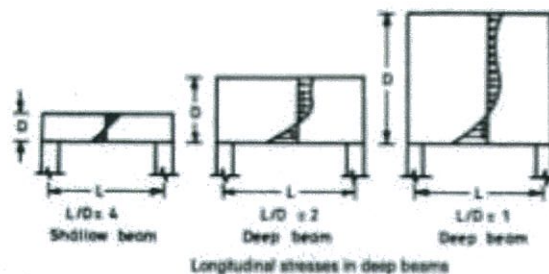


รูป 2.16 การเสริมข้อต่อด้วยบั้งเหล็ก

การเสริมความแข็งแรง ข้อต่อคานเสาโดยการติดบั้งคอนกรีตหรือบั้งเหล็กที่มุมของข้อต่อ เป็นวิธีที่ทำให้ข้อต่อมีขนาดใหญ่และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สามารถรับโมเมนต์มากขึ้นและต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้น

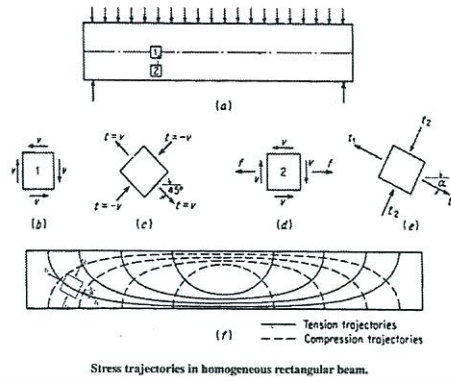
5. พฤติกรรมของคานลึก

คานลึกเป็นโครงสร้างที่มีหน้าที่การรับแรงเหมือนกับคานปกติแต่มีอัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างมากกว่า 5 เท่า การกระจาย stress ของคานโดยปกติมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมักเกิดรอยแตกร้าวบริเวณกลางคานก่อน อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความลึกจะอยู่ที่ประมาณ 3-5 ต่างกับคานลึกที่การกระจายของ stress ของคานมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ลักษณะของ Maximum stress จะเป็นแรงดึงที่ตำแหน่งของโหนดระหว่างด้านบนกับด้านล่างก็จะส่งผลให้เกิด stress ที่ต่างกัน รอยแตกร้าวของคอนกรีตมีทิศทางตั้งฉากกับแรงดึง ยิ่งโหนดมากขึ้นรอยแยกก็จะยิ่งลึกและกว้างขึ้น ขณะเดียวกันยิ่งโหนดน้อยก็จะยิ่งส่งผลให้เกิดแรงต้านน้อยที่บริเวณ support ค่า stress ก็ จะน้อยลง โดยส่วนมากรอยแตกร้าวจะมีทิศแนวตั้งตามทิศทางของแนวแรงกด และมีแนวการวิบัติของแรงเฉือนบริเวณ support



รูปที่ 2.17 ความเค้นตามยาวในคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปแสดงแนวแรงรับแรงอัดและแรงดึงในคาน

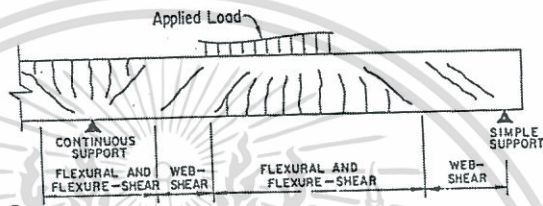


Figure R 11.4.2 Types of cracking in concrete beams

รูปที่ 2.19 ประเภทการแตกหักจากแรงเฉือนในคานคอนกรีต

คานเหล็กเป็นส่วนประกอบที่มีโครงสร้างซึ่งมีพฤติกรรมที่โดดเด่นด้วยแรงเฉือนในทางปฏิบัติ วิศวกรมักจะพบกับคานเหล็กเมื่อออกแบบคานถ่ายแรงสู่ฐานรากโครงสร้างหรือฐานรากสะพาน โครงสร้างขนาดใหญ่ที่รับน้ำหนักมาก มาตรฐานการออกแบบที่ใช้ AASHTO LRFD (2008) และ ACI 318-08, ได้รับการยอมรับว่าใช้วิธีการแบบ strut-and-tie (STM) สำหรับการออกแบบความแข็งแรงของคานเหล็กหรือบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ต่อเนื่องในปี 2537 และปี 2545 ตามลำดับ บนพื้นฐานของทฤษฎี ความเป็นพลาสติก STM เป็นวิธีการออกแบบที่ความคล่องตัว มันคือใช้ได้กับการไหลใด ๆ ก็ได้ อย่างไรก็ตามจุดอ่อนหลักของ STM ก็คือมีความคลุมเครือและไม่สอดคล้องกัน เป้าหมายของ โครงการวิจัยปัจจุบันคือการพัฒนาทฤษฎี STM ที่ง่ายและปลอดภัย

6. วิธีการออกแบบโครงสร้าง

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง

เนื่องจากการศึกษานี้เลือกศึกษา vierendeel ในวัสดุประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กจึงใช้การออกแบบตามมาตรฐานวสท. (1008-38 : วิธีกำลัง)

มาตรฐานของการออกแบบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐาน ACI ซึ่ง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้มาเรียบเรียงเป็นมาตรฐาน วสท.แต่ไม่ได้รับรองโดยกฎหมาย โดยกฎหมายที่รองรับการออกแบบคือพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 วิธี

วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Method, WSM)

วิธีหน่วยแรงใช้งานใช้พื้นฐานของ “ทฤษฎียืดหยุ่น (elastic theory)” เนื่องจากตั้งสมมุติฐานว่า “โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น” วิธีนี้จะจำกัดไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมเกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

วิธีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design, USD)

เป็นวิธีกำลังในอดีตตามมาตรฐานวสท. และยังคงใช้ตามกฎกระทรวงฯ เรียกว่า “วิธีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design, USD)” เนื่องจากพิจารณากำลังของโครงสร้าง ณ ภาวะประลัย (ultimate stage) ซึ่งจะกำหนดให้ “กำลังระบุขององค์อาคาร (nominal strength, R_n)” ซึ่งลดค่าแล้วมีค่ามากกว่า “น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้ว (overload, Q_u)”

การพิจารณาและเลือกใช้วิธีออกแบบ

ในที่นี้จะเลือกใช้การออกแบบโดยวิธีกำลัง เนื่องจากวิธีหน่วยแรงใช้งานนั้น พิจารณาวัสดุให้อยู่ในช่วงยืดหยุ่นแต่ในความเป็นจริงวัสดุที่ใช้งานไม่เป็นช่วงยืดหยุ่นเสมอไปซึ่งจะเราไม่สามารถคำนวณกำลังรับของวัสดุและคำนวณแรงให้ไม่เกิดหน่วยแรงที่ยอมให้ได้ ซึ่งวิธีกำลังสามารถคำนวณกำลังที่แท้จริงของโครงสร้างและกำหนดสัดส่วนความปลอดภัยได้อย่างถูกต้องตามการใช้งาน

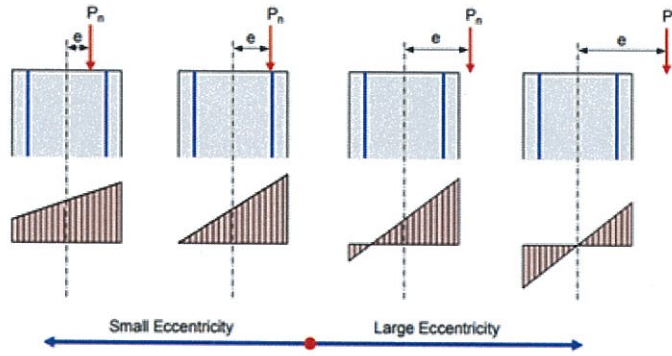
วิธีการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ LRFD (Load & Resistance Factor Design) ปี ค.ศ. 1980 ได้มีการพัฒนาแนวคิดการออกแบบนี้ขึ้น ซึ่งมีหลักการออกแบบโดยการเพิ่มค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม γ_i (Load Factor) และเพิ่มค่าตัวคูณลดกำลังรับแรง ค่าตัวคูณความต้านทาน ϕ (Resistance Factor) โดยมีความสัมพันธ์คือ
$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n$$
 ซึ่ง Q_i จะเป็นน้ำหนักบรรทุกชนิดต่างๆ R_n คือกำลังที่คำนวณได้ (Nominal Strength) ของโครงสร้างแต่ละชนิด ค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก γ_i และค่าตัวคูณความต้านทาน ϕ นั้นมาจาก การวิเคราะห์ Reliability Analysis ที่มีพื้นฐานบนทฤษฎีความน่าจะเป็น ทำให้การออกแบบในภาวะต่างๆ จะมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ใกล้เคียงกันวิธีนี้จะคล้ายกับวิธีการ ออกแบบด้วยวิธีกำลัง (Strength Design Method) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุอื่นๆได้เช่นกัน

ประโยชน์ของวิธีการออกแบบโดยวิธี LRFD (Load & Resistance Factor Design)

1. LRFD เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้ค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม (Load Factor) โดยใช้หลักวิธีการประมาณทางสถิติในการประมาณความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกให้มีเหตุผลสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริงชนิดต่างๆ
2. LRFD เป็นวิธีออกแบบที่อำนวยความสะดวกต่อการรับข้อมูลใหม่ๆ ที่อาจจะมีขึ้นหรือความรู้ใหม่ๆ เามาประยุกต์ใช้ได้ง่าย โดยเฉพาะข้อมูลความน่าจะเป็นที่น้ำหนักบรรทุกจะเกิดขึ้น รวมถึงวิวัฒนาการทางด้านวัสดุศาสตร์
3. LRFD สามารถแก้ไขค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม (Load Factor, γ) และค่าตัวคูณความต้านทาน (Resistance Factor, ϕ) เพื่อให้เข้ากับข้อมูลใหม่ๆ หรือความรู้ใหม่ๆ ที่มีขึ้นได้ในอนาคตได้ง่าย จึงทำให้เป็นการออกแบบที่ทันสมัยตลอดเวลา
4. LRFD เป็นวิธีออกแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทุกชนิดได้ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ในอนาคตข้อกำหนด (Specifications) จะไม่จำกัดเฉพาะวัสดุเหล็กเท่านั้น อาจกำหนดใช้กับวัสดุได้ทุกประเภท เช่น อลูมิเนียม แม้แต่พลาสติก และไม้ก็อาจจะใช้ได้เช่นกัน
5. ถ้าค่าน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) มีค่าไม่เกินค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) แล้วการออกแบบโดย LRFD จะให้ค่าที่ประหยัดกว่า ASD ยกเว้นค่าน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) มีค่า มากกว่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) แล้วอาจจะให้โครงสร้างที่ไม่ประหยัดแต่จะให้ความถูกต้อง และการใช้งานได้ปลอดภัยมากกว่าวิธีของ ASD
6. ความประหยัดของโครงสร้างตามข้อ 5. อันเป็นผลมาจากความชัดเจนของกระบวนการของวิธีการออกแบบโดย LRFD ที่ใช้พฤติกรรมของโครงสร้างที่จุดวิกฤตสูงสุดโดยใช้ค่าของ Load Factor เป็นส่วนของความปลอดภัยของโครงสร้างเพื่อชดเชยความเสี่ยงของความแปรปรวนด้านคุณภาพวัสดุ และคุณภาพของการก่อสร้าง

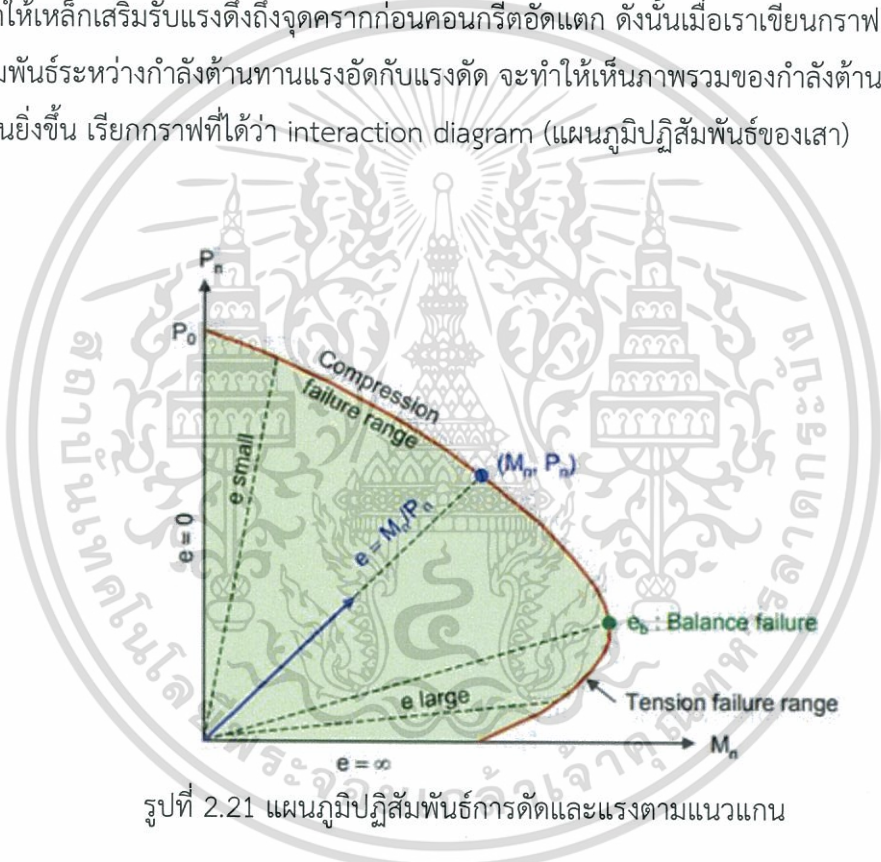
การออกแบบเสารับแรงอัดและแรงดัด

เนื่องจากการออกแบบ Vierendeel เปรียบเสมือนออกแบบคานและเสาที่รับโมเมนต์ได้ การออกแบบจึงต้องคำนวณถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดของเสา เนื่องจากการวิบัติของเสาแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลักและวิบัติแบบแรงดัดเป็นหลัก (แรงที่เกิดจากการเยื้องศูนย์กลางและส่งผลให้เกิดโมเมนต์)



รูปที่ 2.20 การกระจายความเครียดที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

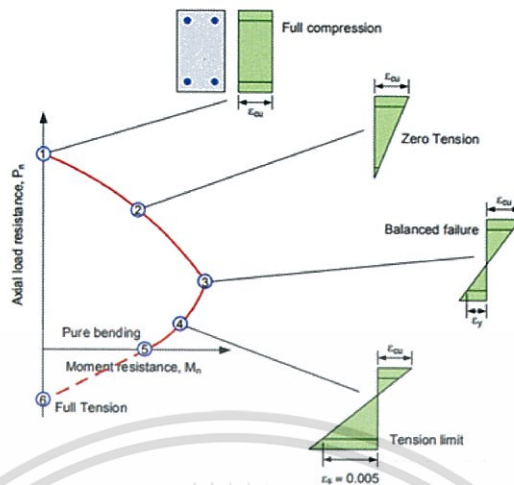
การวิบัติแบบแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะถูกอัดแตกก่อน แต่การวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลักแรงดึงจะทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนคอนกรีตอัดแตก ดังนั้นเมื่อเราเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดกับแรงดัด จะทำให้เห็นภาพรวมของกำลังต้านทานของเสาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เรียกรูปที่ได้อันนี้ว่า interaction diagram (แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสา)



รูปที่ 2.21 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์การดัดและแรงตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

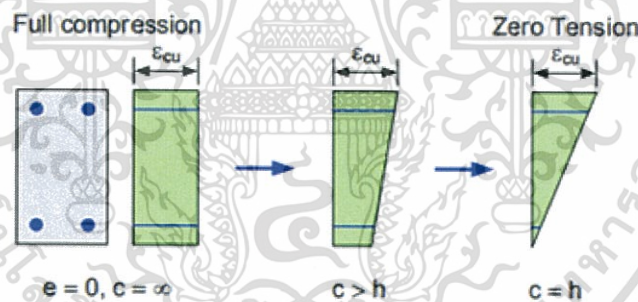
จุดสำคัญของบนแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสา



รูปที่ 2.22 การกระจายหน่วยการยึดหดตามจุดต่างๆ บนแผนภูมิปฏิสัมพันธ์

จุดที่ 1 : Full compression หน้าตัดเสารับเพียงแรงอัดโดยไม่มีโมเมนต์ดัด หน่วยการยึดหดจึง กระจายตัวคงที่ จะเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนมากที่สุดที่หน้าตัดรับได้

จุดที่ 2 : Zero Tension เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นหน่วยการยึดหดจะกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและกลายเป็นรูปสามเหลี่ยมดังในรูป จุดนี้เป็นจุดสุดท้ายซึ่งยังไม่มีแรงดัดบนหน้าตัด



รูปที่ 2.23 หน่วยการยึดหดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ระหว่างจุดที่ 1 และ 2

ช่วง 1-3 : Compression-Controlled Failures เสาที่อยู่ในช่วงบนของแผนภูมิปฏิสัมพันธ์นี้จะวิบัติโดยการบดทลาย (Crushing) ที่ผิวคอนกรีตรับแรงอัดก่อนที่เหล็กเสริมด้านรับแรงดัดจะคราก ดังนั้นจึงเรียกว่า เสาควบคุมโดยการอัด (Compression-controlled column)

จุดที่ 3 : Balanced Failure, Compression-Controlled Limit Strain เป็นจุดที่มีหน่วยการยึดหดด้านรับแรงอัดถึง 0.003 และด้านรับแรงดัดมีหน่วยการยึดหดของเหล็กเสริมถึงจุดคราก ϵ_y พร้อมกัน ในมาตรฐาน ACI เดิมจะใช้ระยะ d จากผิวคอนกรีตรับแรงอัดถึงศูนย์กลางกลุ่มเหล็กเสริมในการพิจารณา แต่ใน ACI ตั้งแต่ปี 2002 เป็นต้นมาจะใช้ระยะ dt ถึงเหล็กเสริมชั้นนอกสุด

จุดที่ 4 : Tensile-Controlled Limit เป็นจุดที่มีหน่วยการยืดหดด้านรับแรงอัดถึง 0.003 และ ด้านรับแรงดึงมีหน่วยการยืดหดของเหล็กเสริมชั้นนอกสุด 0.005 หรือ 2.5 เท่า ϵ_y สำหรับเหล็กเสริม SD40 การวิบัติของเสาจะเป็นแบบเหนียว

ช่วง 3-4 : Transition Region เรียกว่าช่วงเปลี่ยนผ่านเนื่องจากรูปแบบการวิบัติจะเปลี่ยนจาก แบบเปราะแตก(Brittle) ที่จุดที่ 3 มาเป็นแบบเหนียว (Ductile) ค่าตัวคูณลดกำลัง ϕ จะแปรเปลี่ยน จาก 0.7 (เสาปลอกเดี่ยว) หรือ 0.75 (เสาปลอกเกลียว) ที่จุดที่ 3 มาเป็น 0.9 (คาน) ที่จุดที่ 4

จุดที่ 5 : Pure Bending เป็นจุดที่ไม่มีแรงตามแนวแกน มีเฉพาะโมเมนต์ดัด ซึ่งจะคำนวณกำลัง โมเมนต์ดัดตามขั้นตอนในบทเรื่องการดัดโดยอาจคิดเป็นหน้าตัดเสริมเหล็กคู่ (Doubly reinforced section)

จุดที่ 6 : Full Tension เป็นจุดที่หลังดัดรับเพียงแรงดึงตามแนวแกน ซึ่งมักไม่ค่อยเกิดขึ้น กำลังดึง คำนวณจากเหล็กเสริมเท่านั้นคือ $P_n = A_s f_y$ แต่อาจมีประโยชน์ในการสร้างแผนภูมิเนื่องจากจุดที่ 5 ซึ่งต้องคำนวณโมเมนต์ดัดหน้าตัดเสริมเหล็กคู่ (Doubly reinforced section) นั้นค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจากอาจลากเส้นตรงเชื่อมจุดที่ 4 ซึ่งมักอยู่ต่ำหรือใกล้จุดที่ 5 มายังจุดที่ 6 ซึ่งหาได้ง่ายแล้วใช้จุดตัดแกน M_n เป็นจุดที่ 5

การใช้ SAP2000

SAP2000 คือโปรแกรมทางโครงสร้าง finite-element พื้นฐาน ที่ทำงานได้อย่างอิสระ สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบของโครงสร้างภายใน สามารถเชื่อมผู้ใช้กับเครื่องมือมากมาย เพื่อช่วยเหลือในการก่อสร้างที่รวดเร็วและแน่นอนของแบบจำลอง ตามด้วยเทคนิควิเคราะห์แยกแยะสมัยใหม่ที่ต้องการเพื่อทำงานที่ซับซ้อนมาก ซึ่งการใช้ SAP2000 ในการออกแบบจึงเหมาะสำหรับการวิจัยนี้

ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้เพื่อความถูกต้องและปลอดภัยนั้นมีดังนี้

1.การเลือกหน่วยแรง

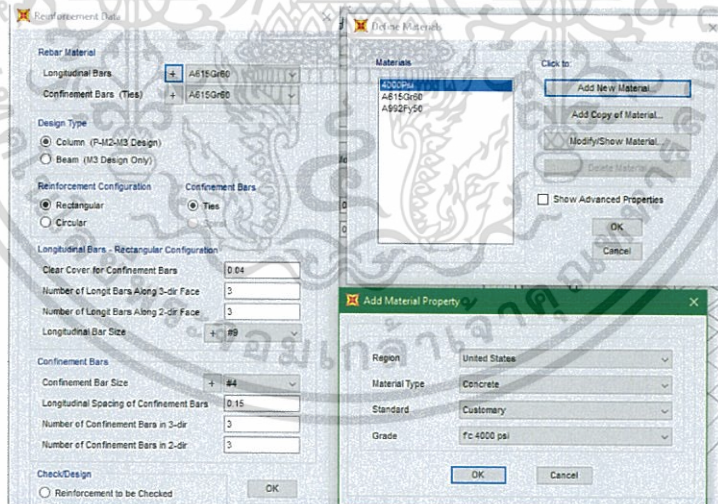
การใช้หน่วยแรงต่างๆในโปรแกรมนั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากหน่วยแรงในโปรแกรม SAP2000 นั้นจะถูกใช้ตลอดการทำงานและจะถูกใช้ตอนสั่งวัสดุเพื่อการก่อสร้าง หน่วยแรงจึงมีความสำคัญเพื่อให้งานถูกต้องตามแบบ

lb, in, F
lb, ft, F
Kip, in, F
Kip, ft, F
KN, mm, C
KN, m, C
Kgf, mm, C
Kgf, m, C
N, mm, C
N, m, C
Tonf, mm, C
Tonf, m, C
KN, cm, C
Kgf, cm, C
N, cm, C
Tonf, cm, C

รูปที่ 2.24 หน่วยแรงในSAP2000

2.การเลือกใช้วัสดุสำหรับโครงสร้างและมาตรฐานต่างๆ

การเลือกใช้วัสดุนั้นมักขึ้นอยู่กับชนิดของงาน ประเภทของงาน ความเร็วในการก่อสร้าง และงบประมาณการก่อสร้าง เช่น ในประเทศไทย การสร้างเสาหรือคานเหล็กจะมีราคาสูงกว่าเสาหรือคานคอนกรีต เป็นต้น แต่ในด้านความเร็วแล้วเสาหรือคานเหล็กจะก่อสร้างได้เร็วกว่าคอนกรีต ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบโครงสร้าง มาตรฐานสำหรับการออกแบบ ในการออกแบบนั้นเพื่อความถูกต้องของวัสดุจึงต้องมีมาตรฐานของวัสดุหรือที่เรียกกันว่า code ซึ่งการเลือกใช้โปรแกรมนั้นจะสามารถเลือกใช้ code ที่มีอยู่หรือเขียน codeนอกเหนือจากที่มีก็ได้

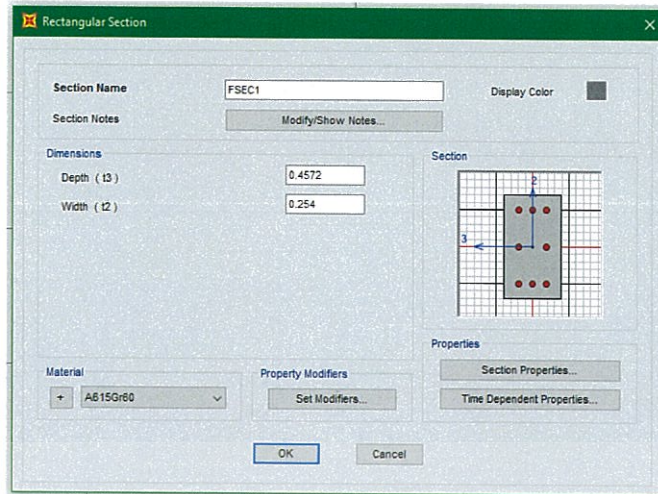


รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการเลือกใช้ material ใน SAP2000

3.การเลือกขนาดของวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบ

โดยปกติการออกแบบขนาดของวัสดุถือว่ามีความสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งเลยก็ว่าได้ เพราะความสามารถในการคงรูปโดยไม่พังทลายจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงและส่วนสำคัญคือความกว้างและความลึกของวัสดุด้วย

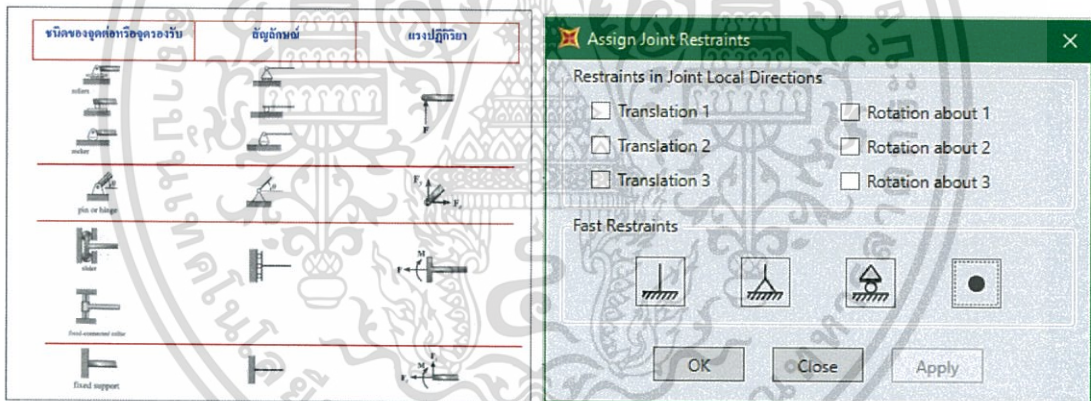
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การกำหนดขนาดของวัสดุใน SAP2000

4. การเลือกใช้และตำแหน่งของซีฟพอร์ด

การเลือกใช้ซีฟพอร์ดนั้นจะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของแรงในโครงสร้างเช่นการแอ่นตัวหรือการหมุนเป็นต้นซึ่งลักษณะการถ่ายแรงและลักษณะทางกายภาพจะเป็นไปตามประเภทซีฟพอร์ดนั้นๆ และตำแหน่งก็มีผลต่อปริมาณการรับแรงในโครงสร้างเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างซีฟพอร์ดทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบใน SAP2000

5. การรับน้ำหนักและค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง

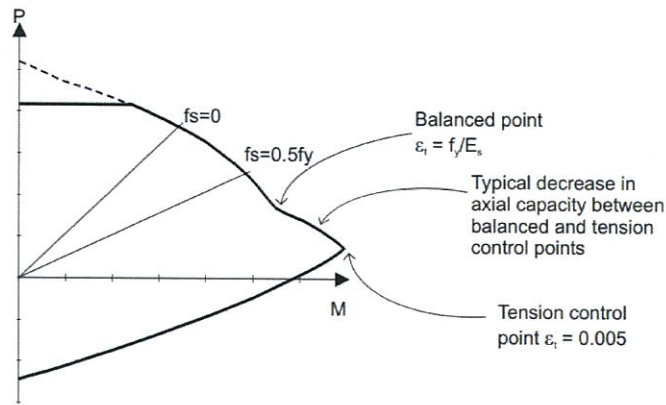
โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างกับการก่อสร้างจริงมักจะมีคลาดเคลื่อนเนื่องจากความผิดพลาดระหว่างก่อสร้างโดยมนุษย์หรือธรรมชาติ การออกแบบอาคารจึงต้องมีค่าความปลอดภัยเพื่อเป็นการเผื่อสำหรับความผิดพลาดนั้น สูตรต่างๆที่ใช้การคำนวณออกแบบจะต้องมีการอ้างอิงที่มา ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นไปตามมาตรฐาน หรือข้อกำหนดในการออกแบบของแต่ละประเทศ ข้อกำหนดเหล่านี้ถูกจัดทำขึ้นโดยองค์กรต่างๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการออกแบบโดยอาจแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ ข้อกำหนดที่มีผลบังคับใช้ทางกฎหมายและข้อกำหนดที่แนะนำโดยองค์กรวิชาชีพ ข้อกำหนดที่มีผลบังคับใช้ทางกฎหมายเป็นข้อบังคับที่มีไว้เพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัย ของสาธารณชนซึ่งผู้ออกแบบจะต้องปฏิบัติตาม มิฉะนั้นจะมีความผิดตามกฎหมาย ข้อกำหนด ประเภทนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแตกต่างกันไปตามพื้นที่ สำหรับประเทศไทยมีพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร(พ.ศ.2522) มีกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527)กฎกระทรวง ฉบับที่ 49 (พ.ศ.2540) และข้อกำหนดในแต่ละท้องถิ่นที่เช่น ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานครหรือเทศบัญญัติ และมาตรฐานของกรมโยธาธิการ และผังเมืองสำหรับองค์กรวิชาชีพในประเทศไทยที่ออกข้อกำหนดทางด้านวิศวกรรมคือ วิศวกรรม สถานแห่ง ประเทศไทย (วสท.)โดยข้อกำหนดที่เกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสองฉบับคือ มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (วสท. 1007-34) และ มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (วสท. 1008-38) โดยข้อกำหนดที่ใช้จะนำมาจาก Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary ของ American Concrete Institute (ACI) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและก่อสร้างอาคารโครงสร้างคอนกรีตจะอยู่ในความดูแลของ ACI Committee 318 ซึ่งจะพัฒนาปรับปรุงมาตรฐานออกมาเป็นระยะๆคือ โดยมีเลข สองตัวสุดท้ายคือปีที่เริ่มใช้ เช่น ACI 318-89 เริ่มใช้ในปี ค.ศ. 1989 ซึ่งจะตรงกับของ วสท.1008-38 จากนั้นก็จะเป็น ACI 95-318 จนมาถึง ACI 318-05 ในปัจจุบันนี้สำนักบรรทุกข้อกำหนดเกี่ยวกับสำนักบรรทุกในสหรัฐอเมริกาจะระบุอยู่ใน Building Code ของแต่ละพื้นที่ซึ่งอาจจะแตกต่างกันไปสำหรับสหรัฐอเมริกาจะใช้ตามมาตรฐาน Uniform Building Code (UBC) ซึ่งตั้งแต่ปี ค.ศ.2000 ได้เปลี่ยนชื่อเป็น International Building Code (IBC) และ ASCE Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7) สำหรับประเทศไทยมีการกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรรยาบรรณบ้างในกฎกระทรวงฉบับที่ 6 แต่เป็นการกำหนดไว้มาแล้ว ดังนั้นจึงค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความเป็นจริงในปัจจุบัน ดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรพิจารณาควร ใช้วิจรรย์ณญานประกอบตามความเหมาะสม

การใช้โปรแกรม spColumn

โปรแกรม spColumn คือเป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบและการตรวจสอบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับเสาหรือคานโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงในแนวแกนและแรงดัด โดยโปรแกรมจะสามารถออกแบบเสาหรือคานได้หลากหลายชนิดอาทิเช่น เสาเหล็กรูปประพรม เสาคอนกรีตเสริมเหล็กทรงสี่เหลี่ยมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลมหรือเป็นหน้าตัดแบบไม่สม่ำเสมอ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กทรงกระบอก เป็นต้น ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือน สะพานท่าเรือ รวมถึงโครงถักแบบทั่วไป สำหรับองค์ประกอบในอาคาร spColumn สามารถตรวจสอบหน้าตัดที่ไม่สามารถหาได้ในแผนภูมิการออกแบบหรือทำโดยการคำนวณมือ เราสามารถดู P-M interaction diagrams จากการประมวลผลของแกนเดียวหรือทั้งสองแกนได้เช่นกัน ตลอดจนแผนภาพ Mx-My moment จากการประมวลผลทั้งสองแกน นอกจากนี้ โปรแกรม spColumn ยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมอื่นๆได้อีกด้วย เช่น โปรแกรม spSlab เป็นต้น การใช้งานโปรแกรมspColumnนั้นจะมีเงื่อนไขคือต้องรู้ค่าคุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

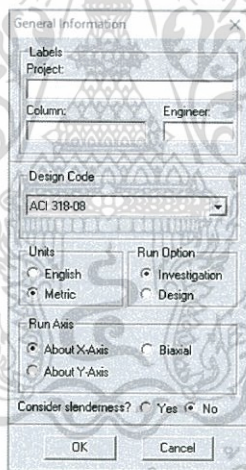


รูปที่ 2.28 P-M interaction diagrams

ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบในการใช้งานโปรแกรม spColumn มีดังนี้

1.Code for design คือการเลือกใช้ code แต่ละประเภทเพื่อการออกแบบ เช่น ACI 318-08 , ACI 318-05 เป็นต้น

Code นั้นมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆในการออกแบบเนื่องจากเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณแรงต่างๆ โดยทั่วไปแล้วประเทศไทยนั้นนิยมใช้ ACI 318 เป็นหลัก และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป



รูปที่ 2.29 การเลือกใช้ code แต่ละประเภทเพื่อการออกแบบใน spColumn

2.Material Properties คือค่าในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุมีดังนี้

2.1.Strength ของคอนกรีตและเหล็กเสริมกำลัง

การกำหนดค่าความแข็งแรงของคอนกรีตและเหล็กเสริมกำลังนั้นมาความสำคัญมากเนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดการพังทลายของวัสดุ ซึ่งค่าที่เราใช้เราจะนำมาจากค่า Yield strength อาทิเช่น ค่า Strength ของคอนกรีตเราอาจเลือกใช้เป็น $f'c = 280 \text{ ksc}$ เป็นต้น หากมีการเลือกใช้ค่าที่ผิดพลาดอาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายเนื่องจากไม่สามารถรับกำลังได้และพังทลายในที่สุด

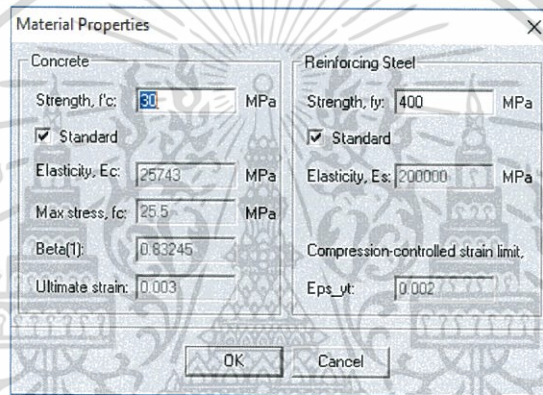
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.Elasticity ของคอนกรีตและเหล็กเสริมกำลัง

Elasticity หรือที่เรียกกันในชื่อ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ นั้นมีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้างเนื่องจากวัสดุแต่ละประเภทมีความยืดหยุ่นที่ไม่เท่ากันทำให้มีจุดแตกหักพังทลายที่ไม่เท่ากันด้วยดังนั้นค่าดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการออกแบบเป็นอย่างมาก

2.3.Ultimate Strain ของคอนกรีตและเหล็กเสริมกำลัง

Ultimate Strain หรือที่เรียกว่า ค่าความเครียดของวัสดุ ค่าความเครียดของวัสดุ นั้นจะบ่งบอกการยืดหดตัวของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำโดยส่วนมากจะมีค่าอยู่ที่ 0.003 เป็นมาตรฐานที่ใช้โดยทั่วกัน และค่าความเครียดมีส่วนสำคัญอย่างมากในการออกแบบการรับกำลังของโครงสร้าง



รูปที่ 2.30 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุใน spColumn

ประเภทแรงที่กระทำ

น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Loads)

น้ำหนักบรรทุกคงที่หรือน้ำหนักบรรทุกตายตัวคือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ น้ำหนักตัวโครงสร้างเอง และน้ำหนักวัสดุที่ถูกติดตั้งถาวรกับโครงสร้างเช่น ผนัง วัสดุปูพื้น วัสดุผนังหลังคา ฝ้าเพดาน

น้ำหนักวัสดุ	ก.ก./ม.³
คอนกรีต	2,320
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2,400
ไม้	500-1,200
เหล็ก	7,850
น้ำหนักวัสดุปูผิว	ก.ก./ม.²
กระเบื้องลอนคู่	14
กระเบื้องซีแพคโมเนีย	50
เหล็กกรีดลอน, สังกะสี	5
ซีเมนต์ขัดมันหนา 2.5 ซม.	50
กระเบื้องปูพื้น	100
พื้นปูหินอ่อน, หินแกรนิต	150
น้ำหนักผนัง	ก.ก./ม.²
ผนังอิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบปูน	180
ผนังอิฐมวลเบาเต็มแผ่นฉาบปูน	360
ผนังอิฐบล็อกหนา 7 ซม.	120
ผนังอิฐบล็อกหนา 9 ซม.	160

รูปที่ 2.31 หน่วยน้ำหนักของวัสดุ

น้ำหนักบรรทุกจร (Live Loads) เนื่องจากการใช้งาน

ในข้อกำหนดอาคารส่วนใหญ่จะมีตารางน้ำหนักจรให้เพื่อความสะดวกในการออกแบบโดยจะระบุ เป็นน้ำหนักแผ่คงที่ต่อพื้นที่อาคาร ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 น้ำหนักบรรทุกจรในอาคารจะขึ้นกับลักษณะการใช้งาน

ประเภทและส่วนต่างๆของอาคาร	น้ำหนักจร (กก./ตร.ม.)
(1) หลังคา	30
(2) กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
(3) ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
(4) ห้องแถว ตึกแถวที่ใช้พักอาศัย อาคารชุด หอพัก โรงแรม และ ห้องคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
(5) สำนักงาน ธนาคาร	250
(6) (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน และโรงพยาบาล	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม สำนักงาน และธนาคาร	300
(7) (ก) ตลาด อาคารสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในห้องสมุดหรือหอสมุด ที่จอดหรือเก็บรถยนต์นั่งหรือจักรยานยนต์	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	500
(8) (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา ฟิสิทริคัล อิมเจอร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด อาคารสรรพสินค้า ห้องประชุม หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องสมุด และหอสมุด	500
(9) ห้องเก็บหนังสือของห้องสมุดหรือหอสมุด	600
(10) ที่จอดหรือเก็บรถบรรทุกเปล่า	800

รูปที่ 2.32 น้ำหนักบรรทุกจรตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการใช้งาน	น้ำหนักแผ่ ก.ก./ม. ²	น้ำหนักเป็นจุด ก.ก.
ที่พักอาศัย	200	
อาคารสำนักงาน		
ลิ้อบปีและทางเดินชั้นแรก	500	900
สำนักงาน	250	900
ทางเดินชั้นบน	400	900
โรงเรียน		
ห้องเรียน	200	450
ทางเดินชั้นบน	400	450
ทางเดินชั้นแรก	500	450
บันไดและทางออก	500	
โกดังเก็บสินค้า		
สินค้าเบา	600	
สินค้าหนัก	1,200	

รูปที่ 2.33 น้ำหนักบรรทุกจร (L_0) ตามข้อกำหนด ASCE 7

แรงลม (Wind Loads)

แรงลมเป็นน้ำหนักบรรทุกจากสิ่งแวดล้อม (Environmental Load) โดยแรงดันลมที่บนผิวอาคารแนวดิ่งเกิดขึ้นจะเป็นไปตามความเร็วลมยกกำลังสอง

$$q = 0.5 \rho V^2$$

น้ำหนักบรรทุกรวม (Load Combinations) มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลังของ วสท. 38-1008 กำหนดให้กำลังที่ ต้องการ U สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ D (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร L (Life Load) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า

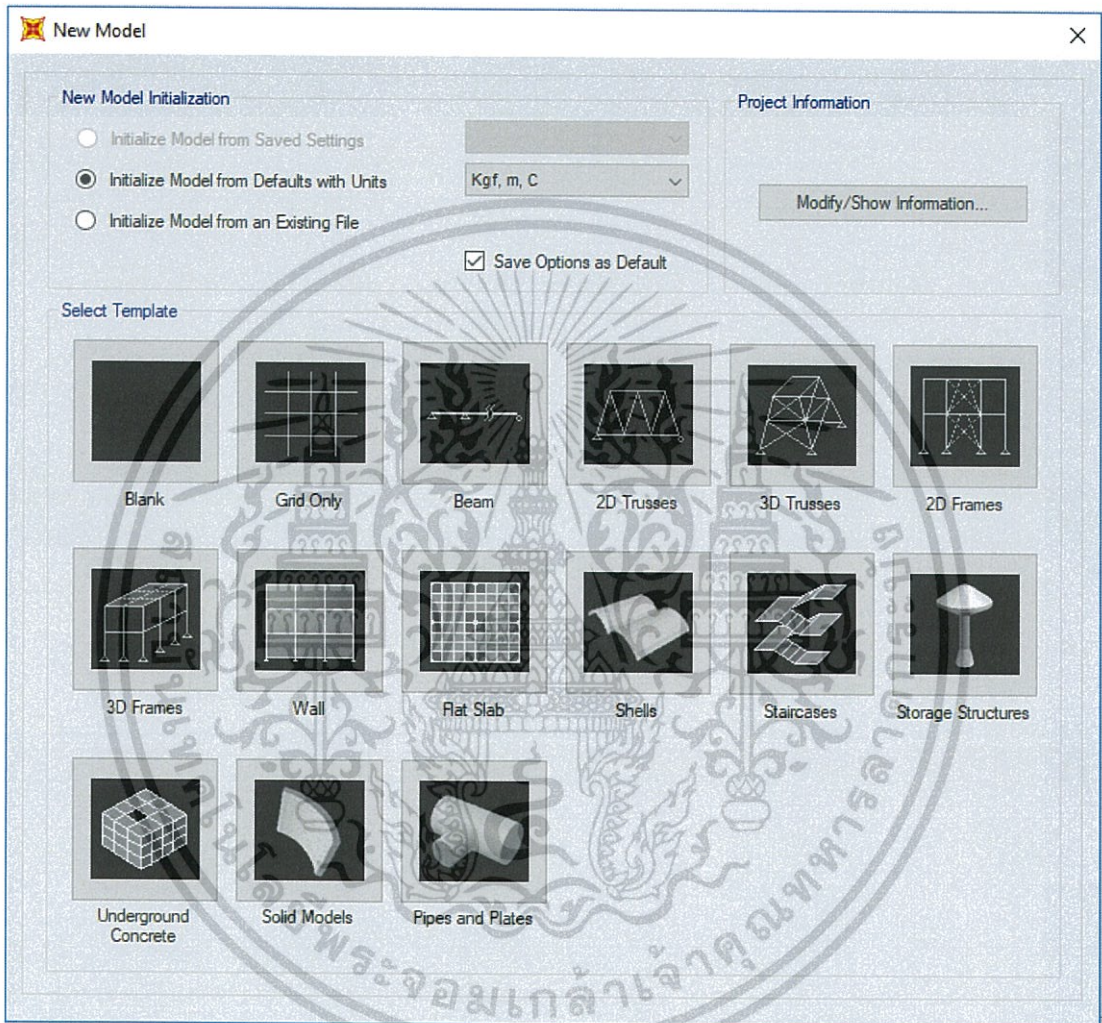
$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

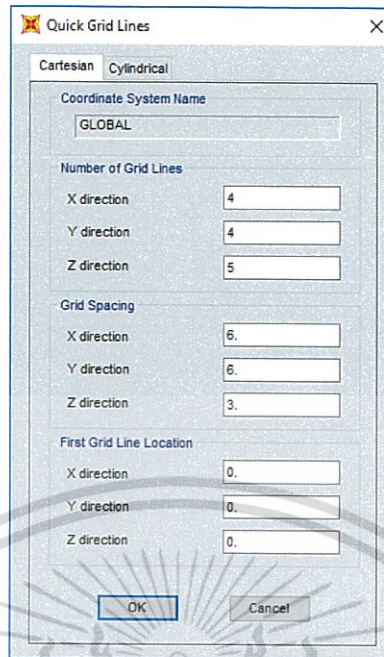
1. การวิเคราะห์เพื่อหาแรงและโมเมนต์สูงสุดจากโปรแกรม SAP2000



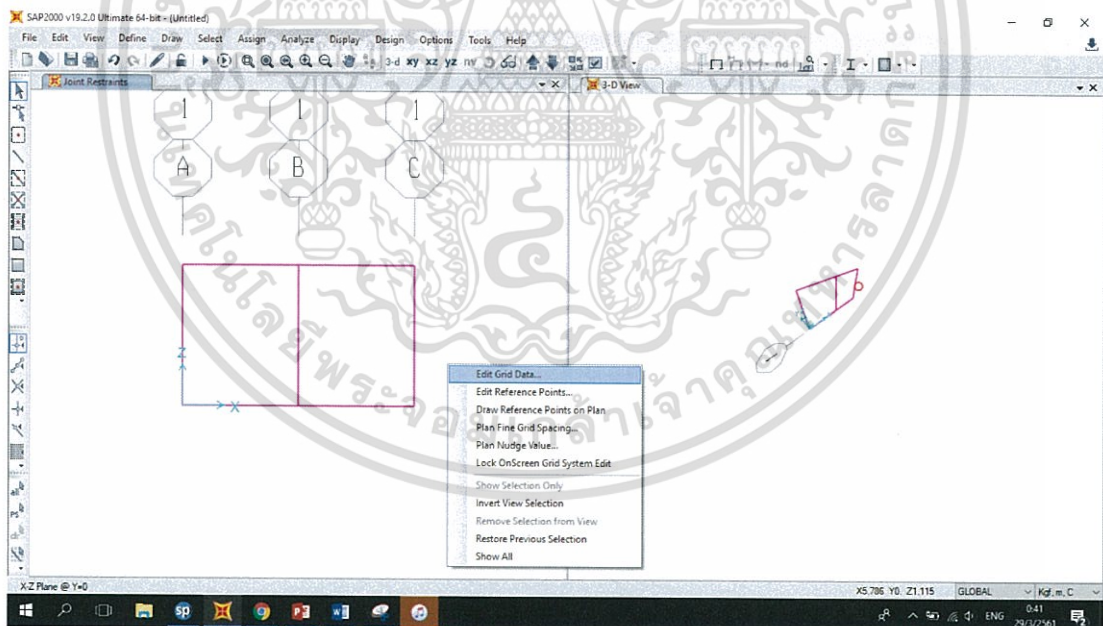
รูปที่ 3.1 การตั้งค่ารูปแบบเริ่มต้นในการวิเคราะห์

เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา ไปที่ File → New Model → เลือก Initialize Model from Default with Units โดยเลือกหน่วยเริ่มต้นเป็น Kgf,m,C จากนั้นเลือก Template เป็น Grid Only

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



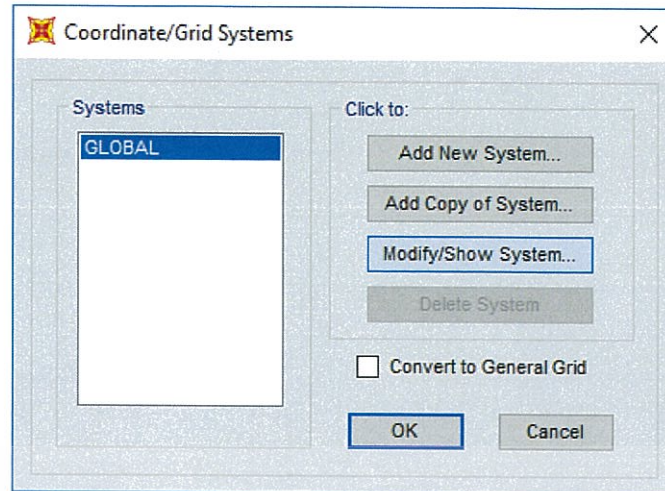
รูปที่ 3.2 กำหนดจำนวนช่อง Grid ของ Model จาก direction โดยการกำหนดจาก direction ของแกน X , Y และ Z เป็นจำนวนช่องที่ต้องการ



รูปที่ 3.3 กำหนดจำนวนช่อง Grid ของ Model จาก Grid System Data

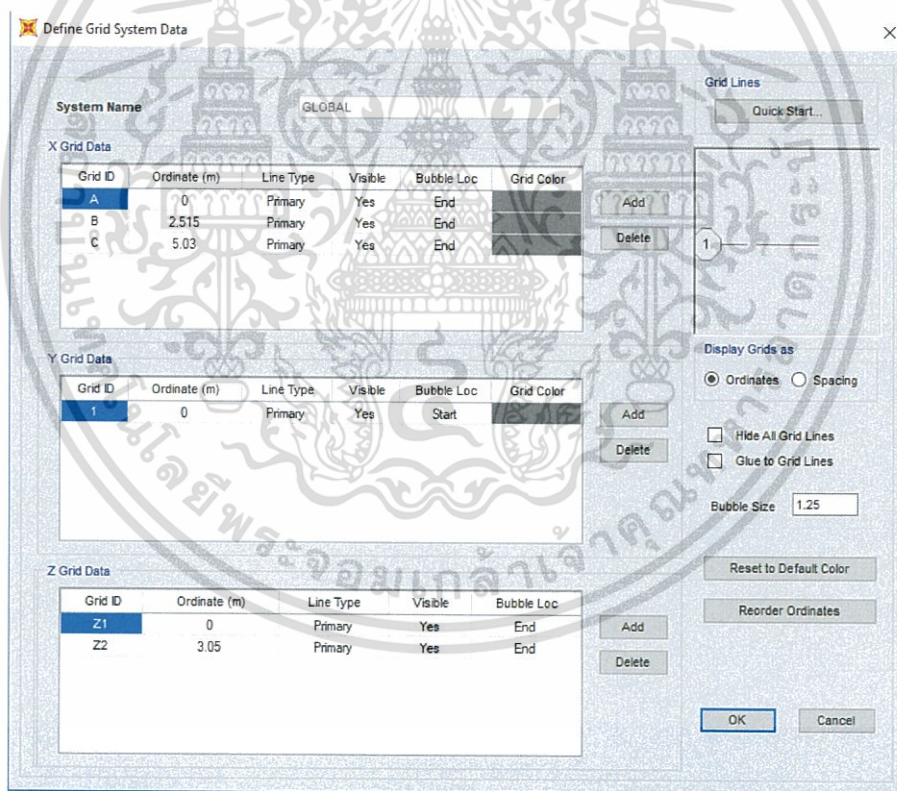
เราสามารถแก้ไขช่องและระยะห่างของ Grid Line ที่กำหนดไปแล้วได้จากการคลิกขวาเข้าไปที่ Edit Grid Data จากนั้นจะมีหน้าต่าง Coordinate/Grid Systems ปรากฏขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 หน้าต่าง Coordinate/Grid Systems

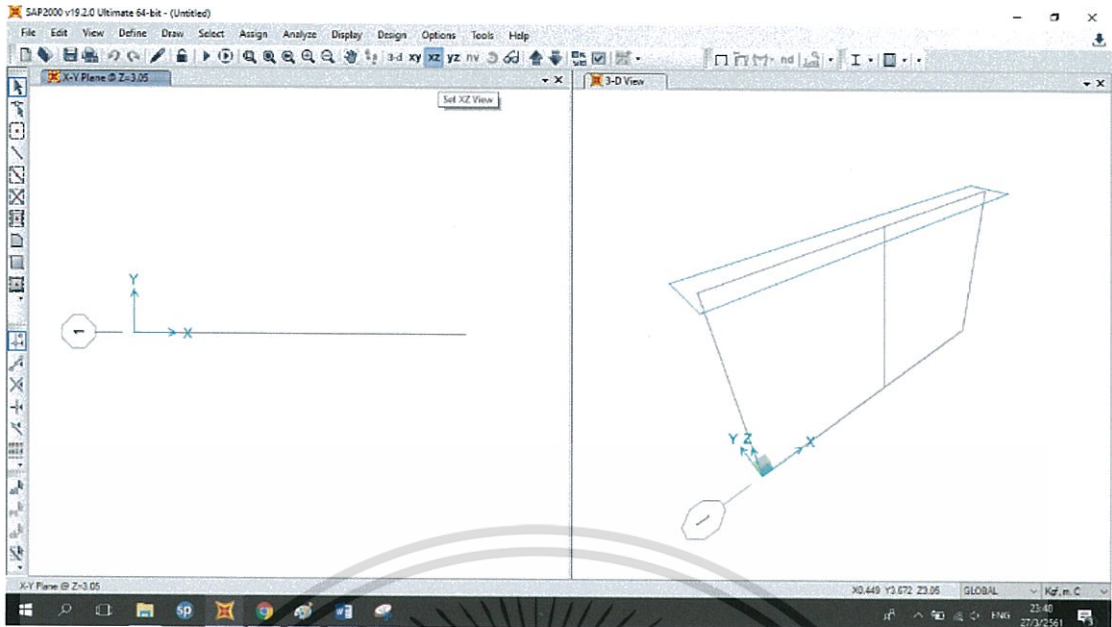
กดเข้าไปที่ Modify/Show System จากนั้นจะมีหน้าต่าง Define Grid System Data ปรากฏขึ้น



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลง Grid Line

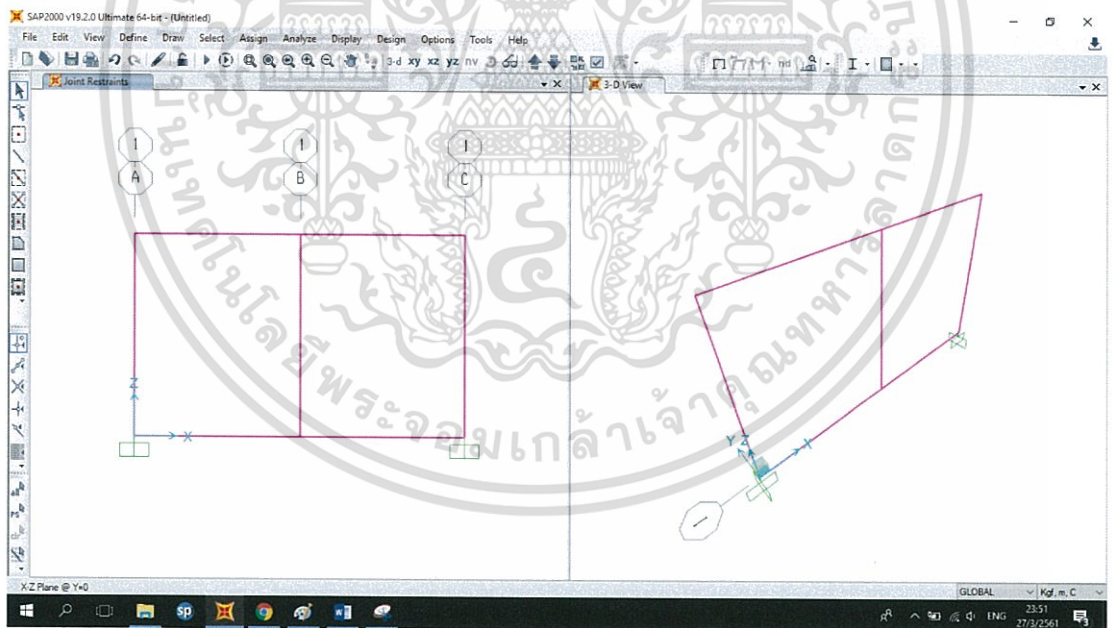
จะปรากฏหน้าต่าง Define Grid System Data ทำให้สามารถทำการแก้ไขเพิ่มหรือลบเส้น Grid และกำหนดระยะห่างของชิ้นส่วนที่จะสร้างใหม่ได้ โดยการ Add หรือ Delete ค่าของแต่ละแกน X,Y และ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 รูปร่าง Model ที่จะทำการวิเคราะห์

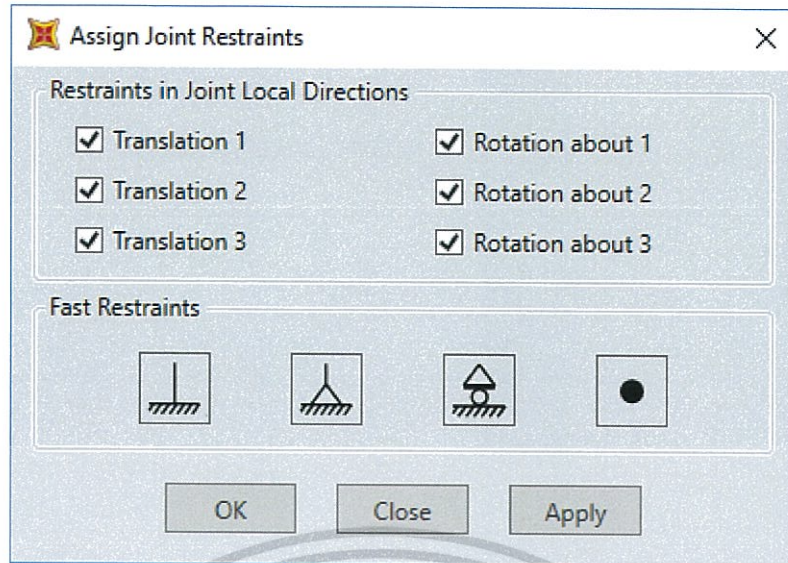
จะปรากฏมุมมองทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ โดยเราจะใช้มุมมองใน 2 มิติ จาก XZ Plane จากนั้นจึงวาดชิ้นส่วนของโครงสร้างขึ้นมา



รูปที่ 3.7 รูปแบบชิ้นส่วนของโครงสร้าง

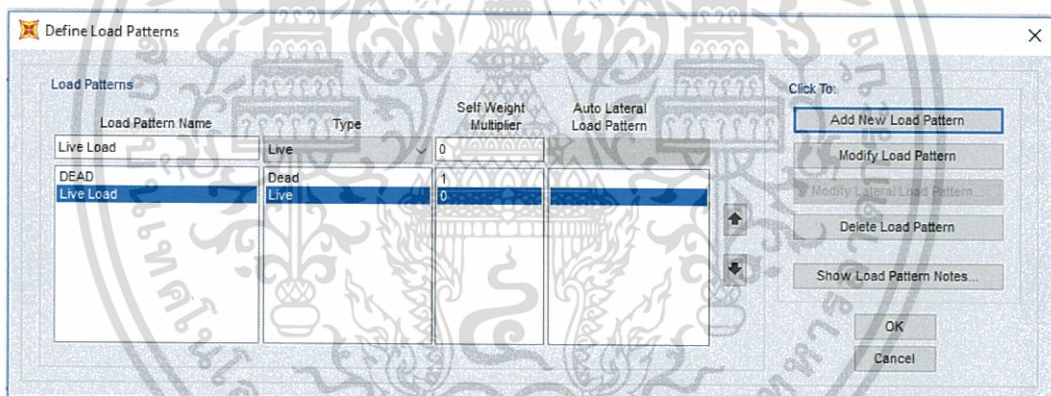
วาดชิ้นส่วนของโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์หลังจากกำหนด Grid Line โดยไปที่ Draw Frame/Cable แล้ววาดชิ้นส่วนที่ต้องการ จากนั้นจะปรากฏเส้นที่มีสีขึ้นมา แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างของเสาและคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การกำหนดรูปแบบ Support

ในการวิเคราะห์โครงสร้างระบบ Vierendeel ในที่นี้จะกำหนดรูปแบบของ Support เป็น Fixed Support (ขั้วมือสุดในรูป)

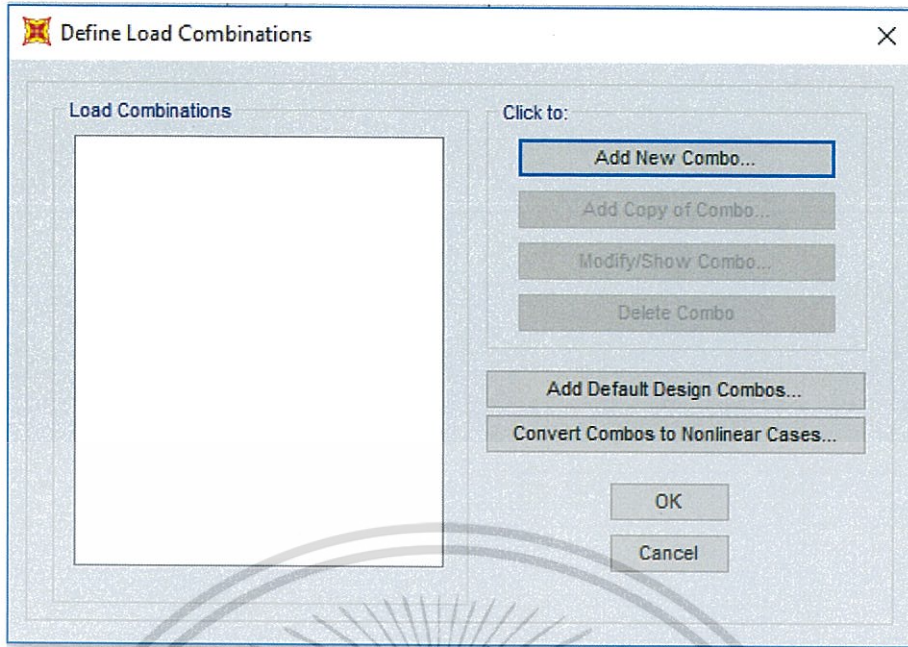


รูปที่ 3.9 การใส่น้ำหนักบรรทุก

ทำการใส่น้ำหนักบรรทุกโดยการเข้าไปที่ Define → Load Patterns → Add New Load Pattern

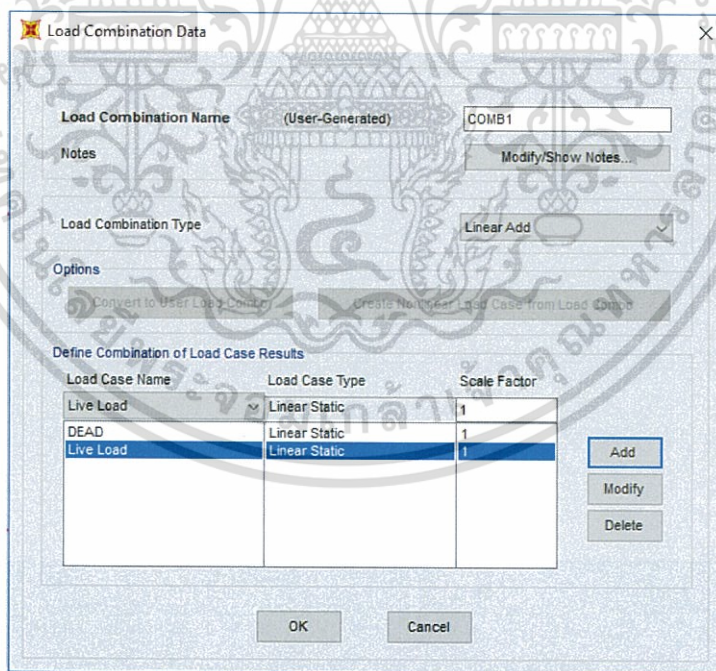
โดยการตั้งชื่อ Load และ Type กำหนดให้มีค่า Dead Load = 1 ซึ่งก็คือน้ำหนักตัวมันเอง และ Live Load ตามประเภทของโครงสร้าง แต่ในที่นี้มีค่า = 0 เนื่องจากตัวมันเองไม่มี Live Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การกำหนดให้ Load ทั้งหมดทำงานร่วมกัน

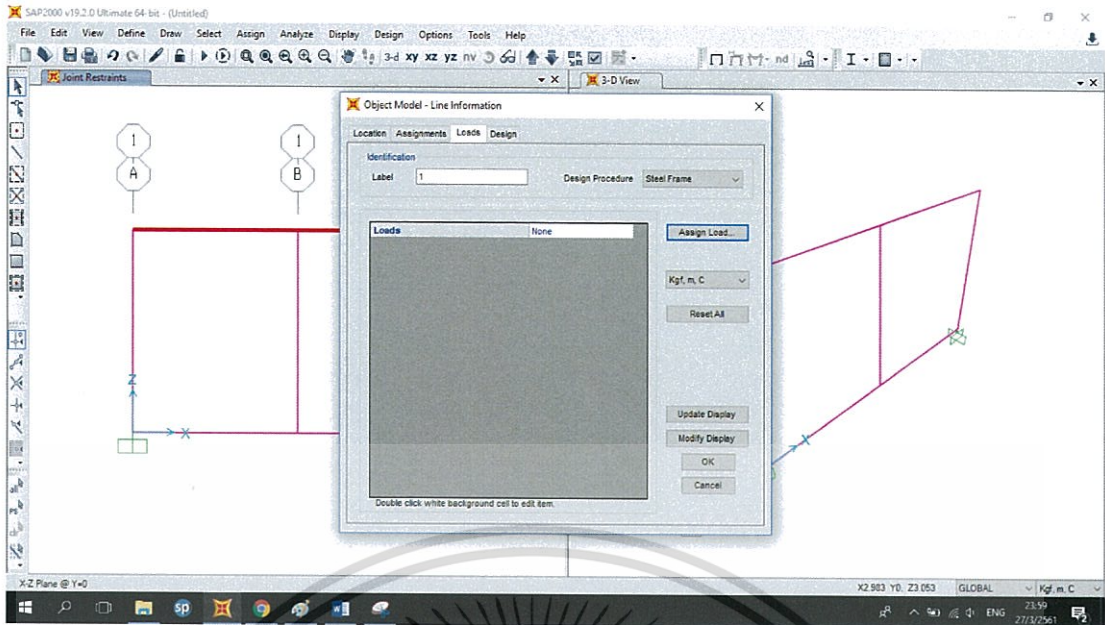
การกำหนดให้ Load ทำงานร่วมกันบน Model โดยเข้าไปที่ Define → Load Combinations → Add New Combo...



รูปที่ 3.11 การเพิ่ม Load Case

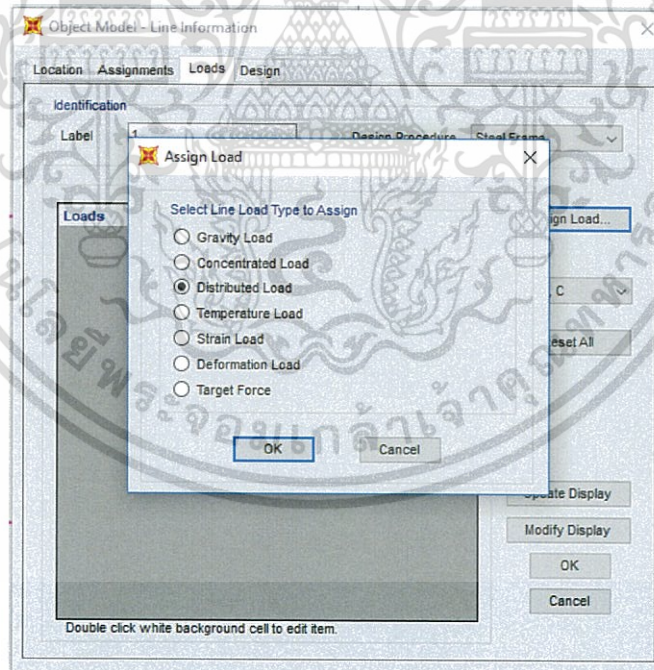
จะปรากฏหน้าต่าง Load Combination Data ให้เลือก Load Case Name โดยเลือกทั้ง Live Load และ Dead Load จากนั้นกด Add เพื่อเพิ่ม Load ที่ใช้ เมื่อเพิ่ม Load ครบทั้งคู่นี้แล้ว กด OK เพื่อทำการยืนยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การ Apply Load ใส่โครงสร้าง

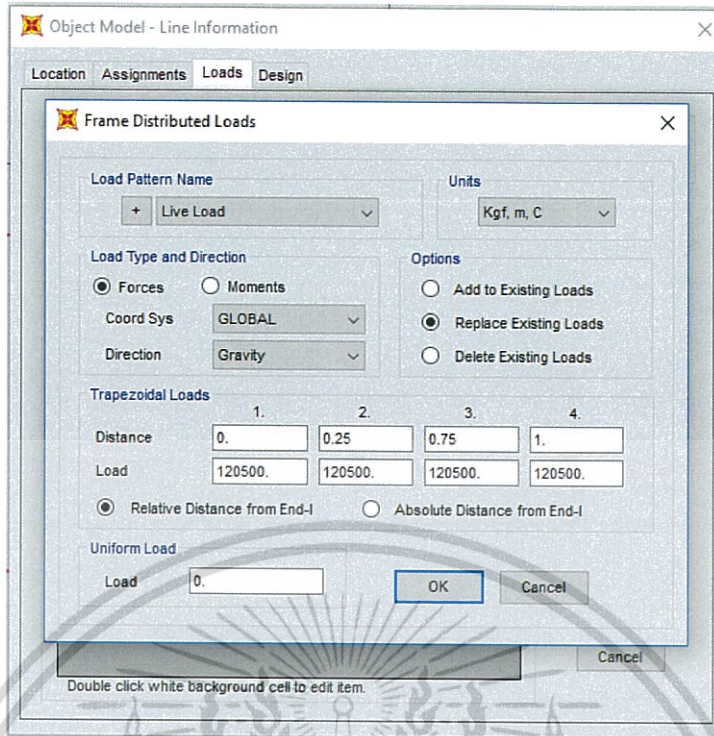
กดคลิกขวานบนชิ้นส่วนที่ต้องการใส่ Load จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้กดที่ Load
 → Assign Load เพื่อเพิ่ม Load ที่ต้องการ



รูปที่ 3.13 การใส่ประเภทของ Load

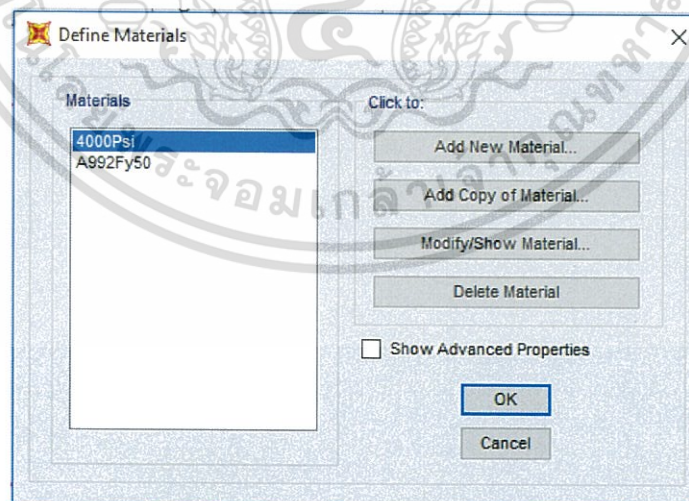
คลิกเลือก Load Type ที่ต้องการ ในที่นี้เราเลือกใช้ Distributed Load หรือน้ำหนักแผ่กระจายลงบนชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การกำหนดรายละเอียด Load

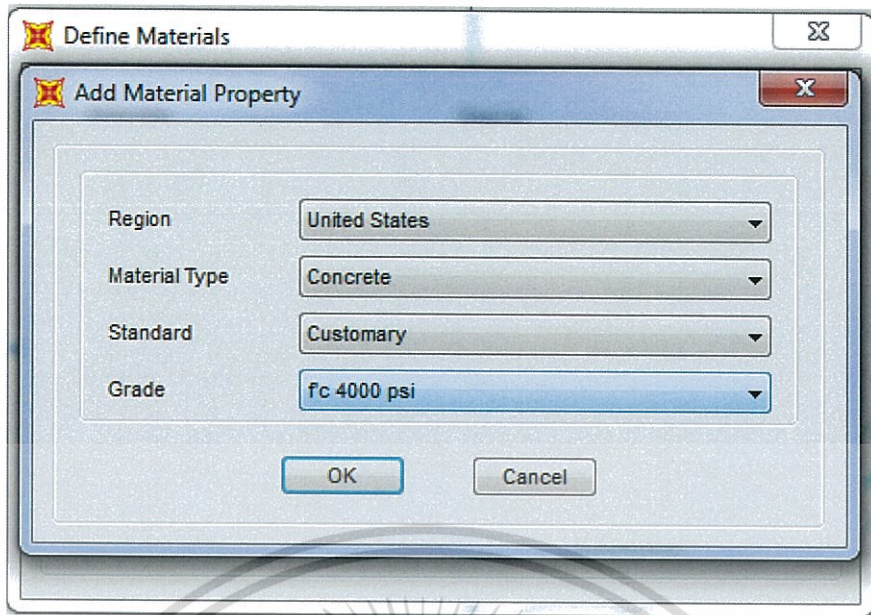
ทำการใส่ Live Load ในหน่วย Kgf,m,C เลือก Load Type and Direction เป็น Force
 → Global → Gravity(ทิศทางแรงโน้มถ่วง) → Add to Existing Loads(กรณีที่ยกก่อนหน้าไม่มี Load) หรือ Replace Existing Loads(กรณีต้องการใส่ Load ใหม่แทนที่ Load ที่มีอยู่ก่อนหน้า)
 จากนั้นใส่ Load ในช่อง Uniform Load = 120500 kg



รูปที่ 3.15 การตั้งค่างรายละเอียดของวัสดุ

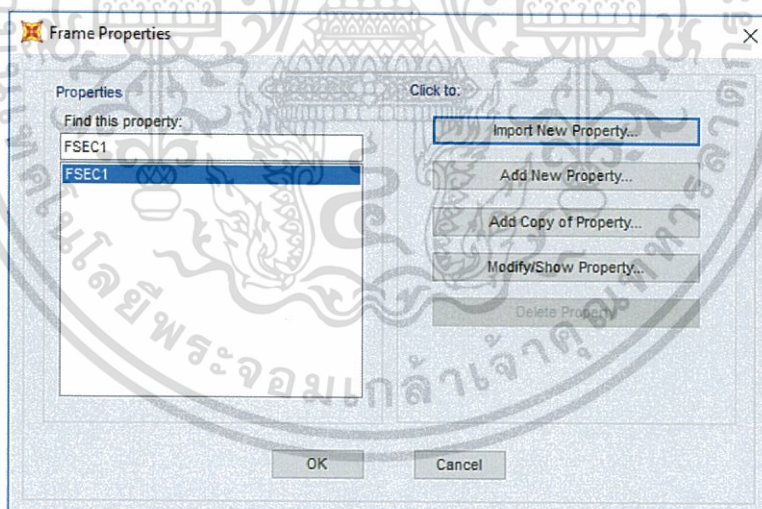
เข้าไปที่ Define → Materials → Add New Material จะปรากฏหน้าต่าง Add Material Property ขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การกำหนด Property วัสดุ

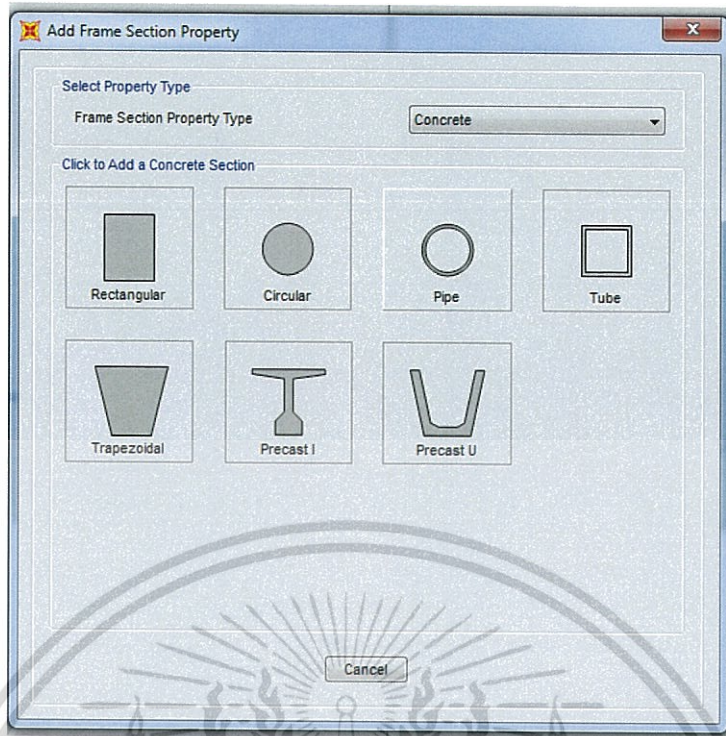
กำหนดรายละเอียดของวัสดุโดยที่ Region เลือก United States → Material Type เลือก Concrete → Standard เลือก Customary → Grade เลือก f'c 4000 psi จากนั้นกด OK เพื่อยืนยัน



รูปที่ 3.17 การกำหนดรายละเอียดของชิ้นส่วน

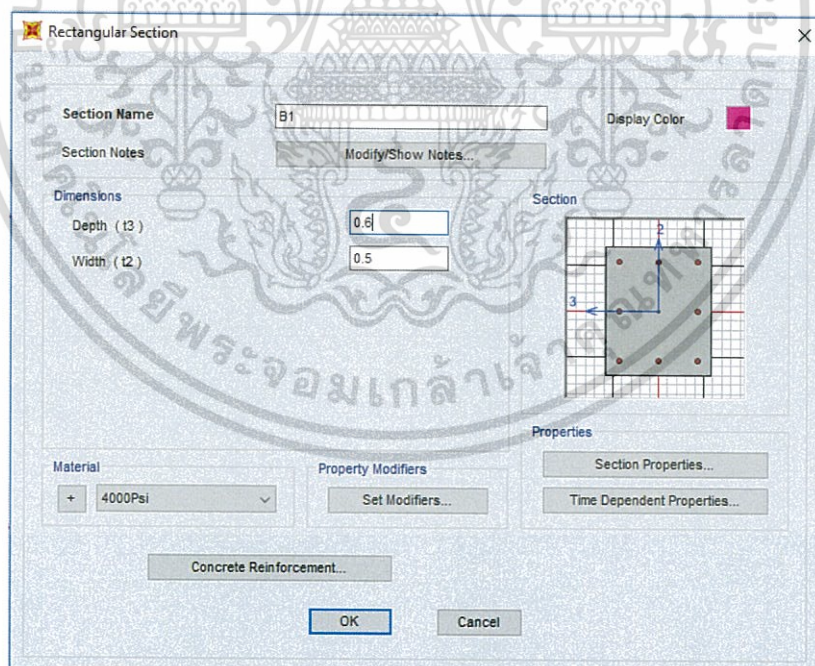
ตั้งค่าขนาดและวัสดุของชิ้นส่วนโดยการเข้าไปที่ Define → Section Properties → Frame Section จะปรากฏหน้าต่าง Frame Property ขึ้นมา → Add New Property จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาให้กำหนดรายละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วน

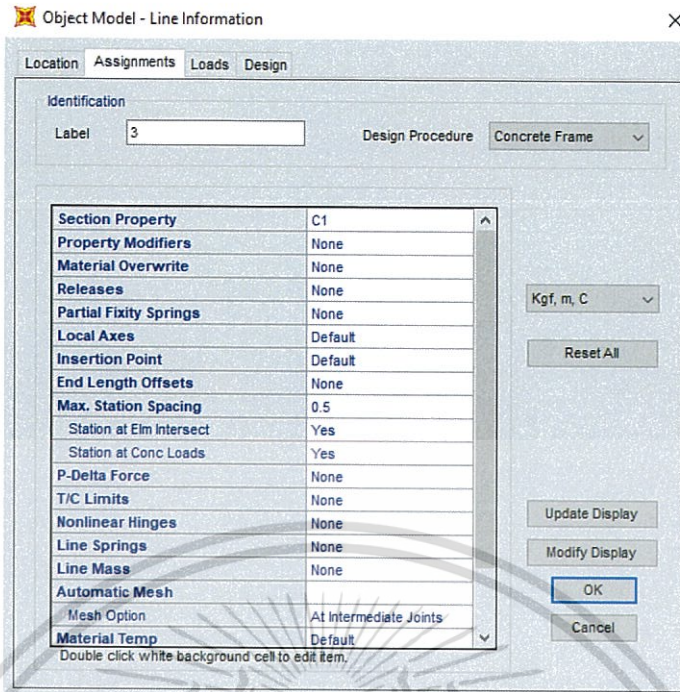
เลือกประเภทวัสดุที่ Select Property Type เป็น Concrete → Rectangular



รูปที่ 3.19 การกำหนดรายละเอียดและขนาดของหน้าตัด

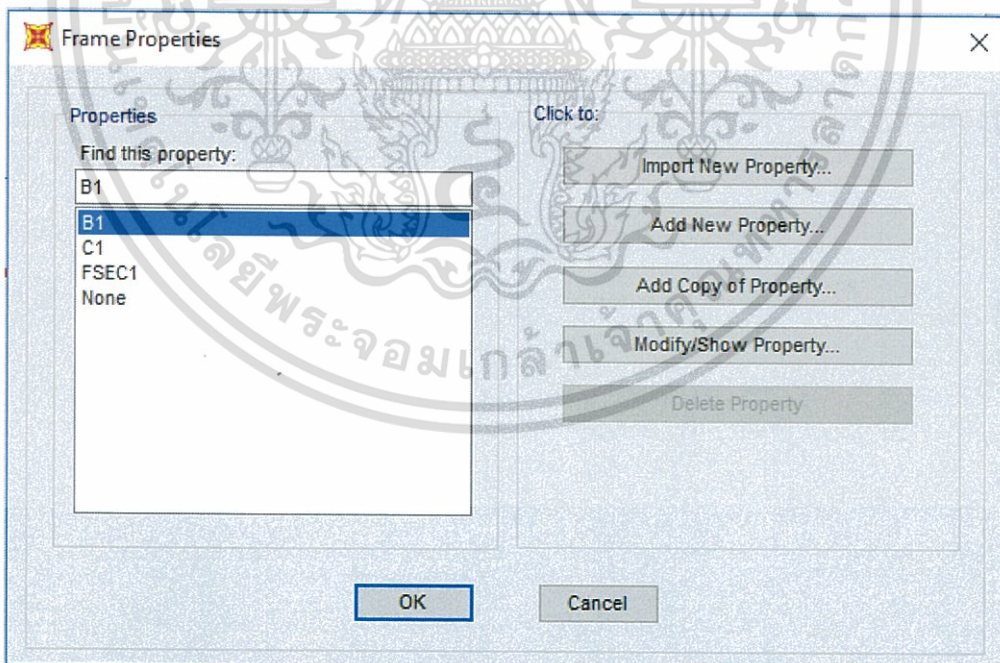
ตั้งชื่อหน้าตัดที่ Section Name จากนั้นกำหนดขนาดหน้าตัดที่ Dimensions แล้วเลือกประเภทวัสดุที่ใช้ในช่อง Material เป็น 4000Psi และเลือกการเสริมเหล็กในช่อง Concrete Reinforcement กด OK เพื่อยืนยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การเปลี่ยนขนาดหน้าตัด

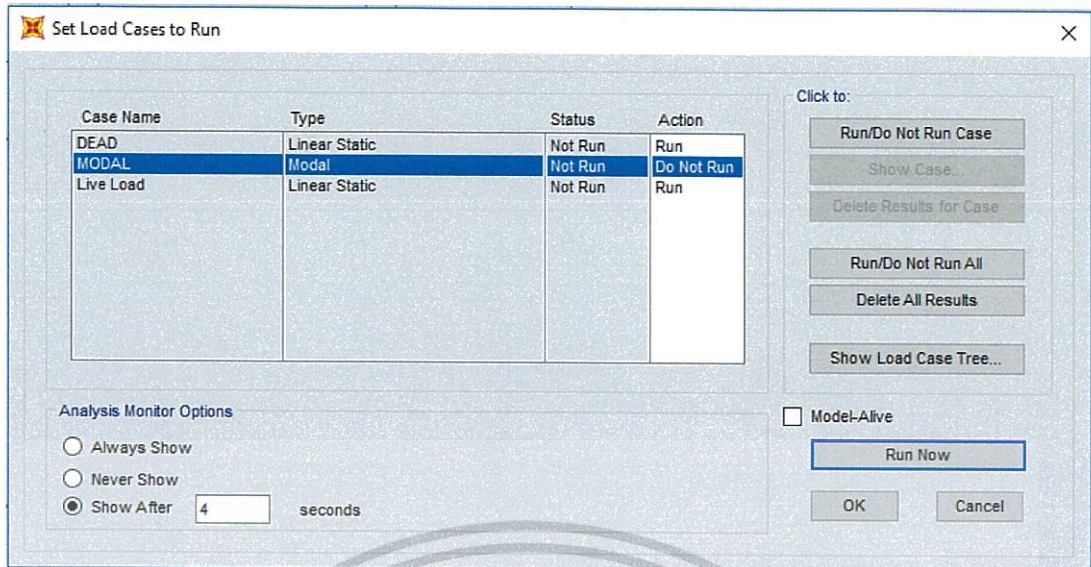
เมื่อต้องการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนใดๆ คลิกขวาที่ชิ้นส่วนนั้น → แก้ไข section property → เปลี่ยนขนาดหน้าตัด



รูปที่ 3.21 การเพิ่ม/แก้ไข/ลบหน้าตัด

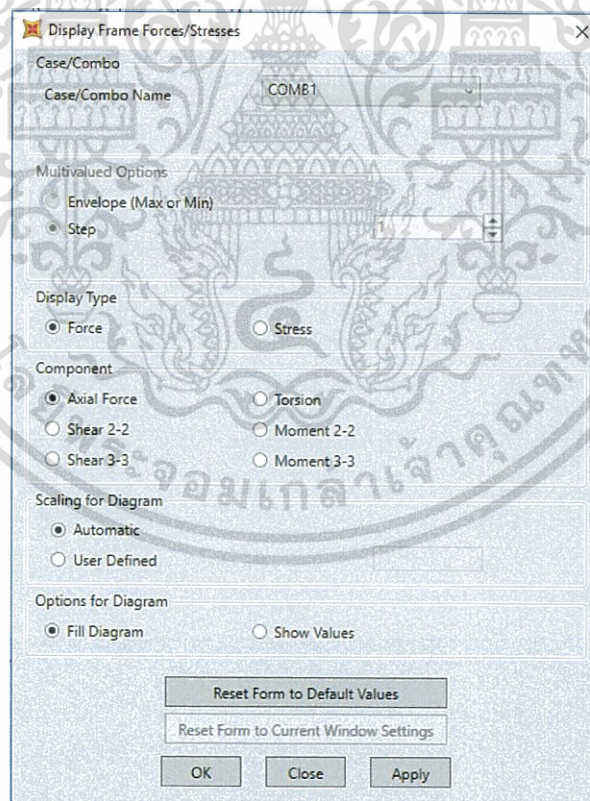
หากต้องการแก้ไขขนาดหน้าตัด → Modify/Show Property หรือต้องการเพิ่ม/ลบขนาดหน้าตัด → Add/Delete Property

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การ Run เพื่อ Analyse โครงสร้าง

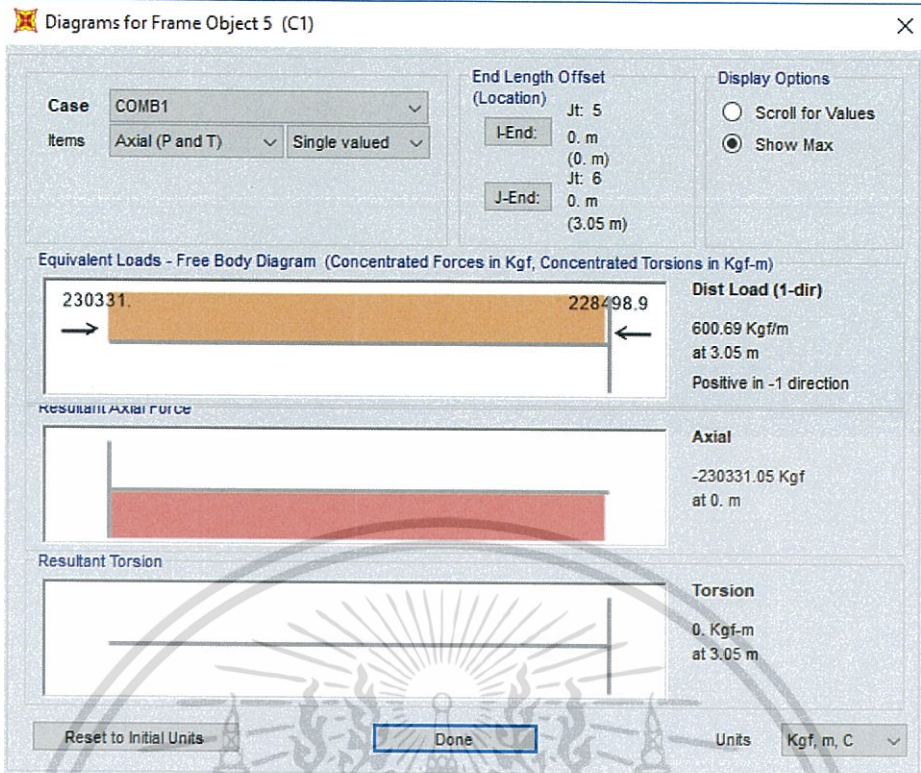
ให้กด F5 เพื่อ Run Case ของ DEAD และ Live Load และกด Do Not Run Case ของ MODAL → Run Now



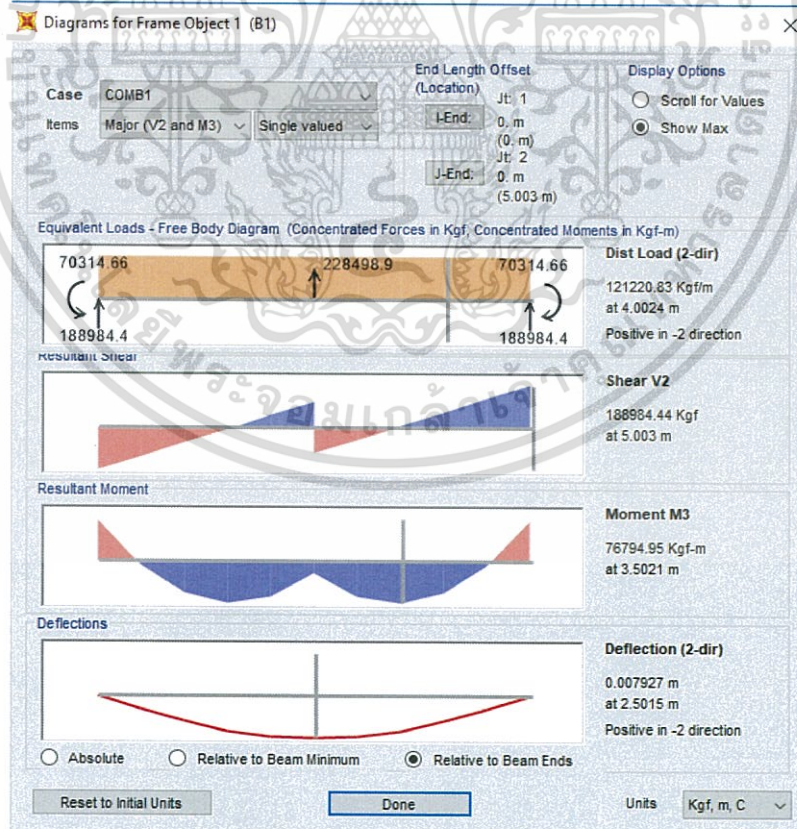
รูปที่ 3.23 การแสดงผลแรงและหน่วยแรงต่างๆ

กด F8 จะปรากฏหน้าต่างการแสดงผลแรงและหน่วยแรง โดยในที่นี้ เราสนใจแค่ Axial Force , Shear 2-2 และ Moment 3-3 เพื่อที่จะนำค่าสูงสุดไปออกแบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



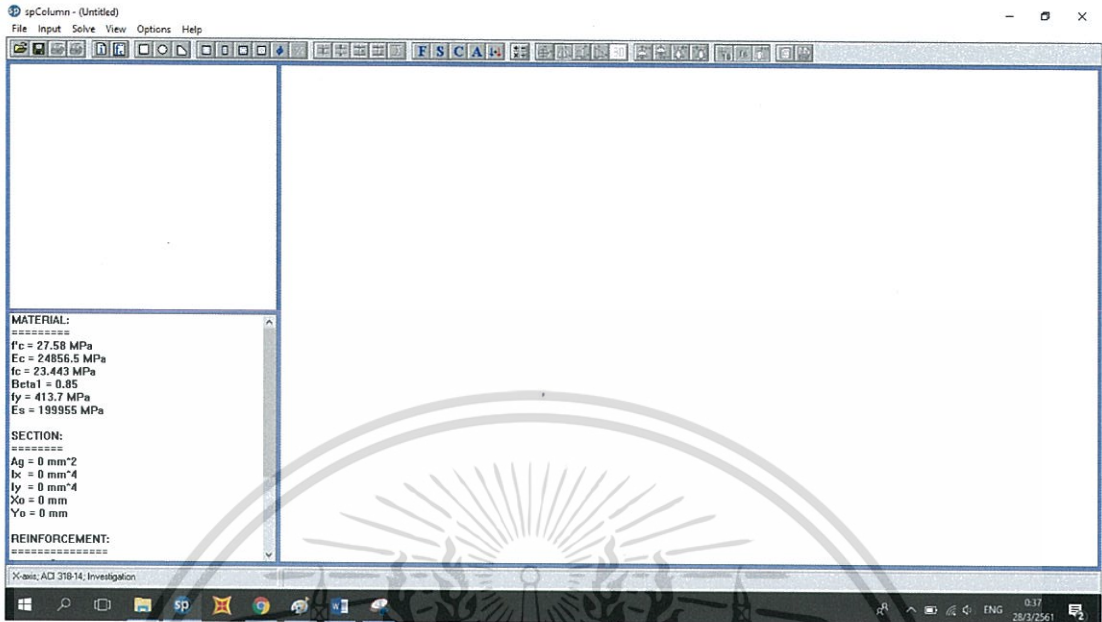
รูปที่ 3.24 ตัวอย่างค่า Axial Force Diagram ในเสา



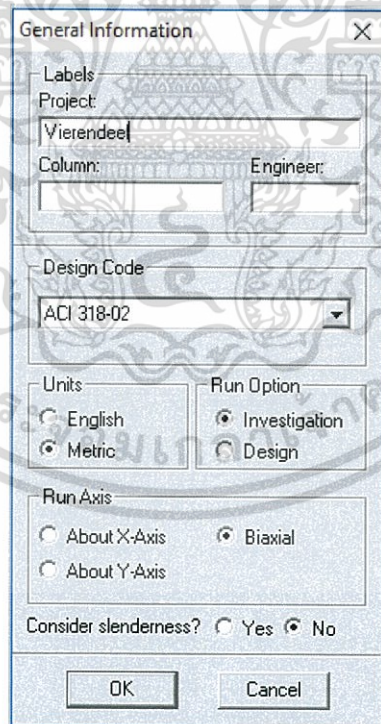
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างค่า Shear และ Moment Diagram ในคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การออกแบบคอนกรีตและเหล็กจากโปรแกรม spColumn



รูปที่ 3.26 หน้าตาโปรแกรม spColumn



รูปที่ 3.27 การกำหนดค่าเริ่มต้น

ตั้งชื่อ Project เป็น Vierendeel, กำหนด Design Code เป็น ACI 318-08, Units เป็น Metric, Run Option เป็น Investigation, Run Axis เป็น Biaxial, และ Not Consider slenderness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Material Properties

Concrete	Reinforcing Steel
Strength, f'_c : 27.4586 MPa	Strength, f_y : 392.266 MPa
<input checked="" type="checkbox"/> Standard	<input checked="" type="checkbox"/> Standard
Elasticity, E_c : 24628.4 MPa	Elasticity, E_s : 200000 MPa
Max stress, f_c : 23.3398 MPa	Compression-controlled strain limit:
Beta(1): 0.85	Eps_yt: 0.00196133
Ultimate strain: 0.003	

OK Cancel

รูปที่ 3.28 กำหนดคุณสมบัติวัสดุ

กำหนดค่าความแข็งแรงของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม
กำลังในหน่วย MPa

Rectangular Section

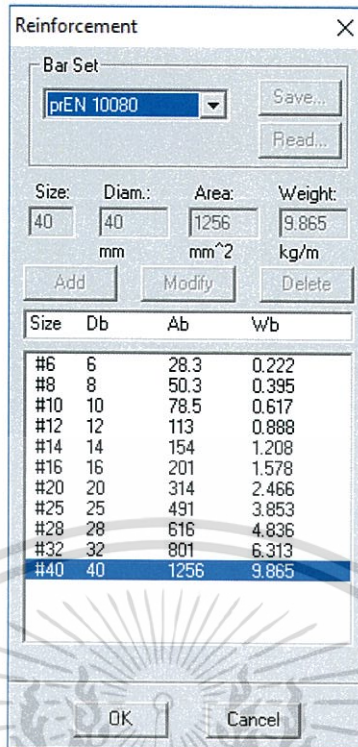
Width (along X):	100	mm
Depth (along Y):	0	mm

OK Cancel

รูปที่ 3.29 กำหนดขนาดหน้าตัด

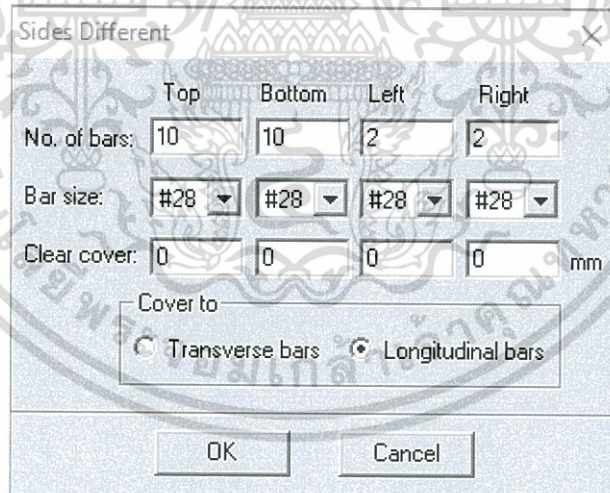
กำหนดขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนที่ต้องการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 กำหนดมาตรฐานเหล็กเสริมกำลัง

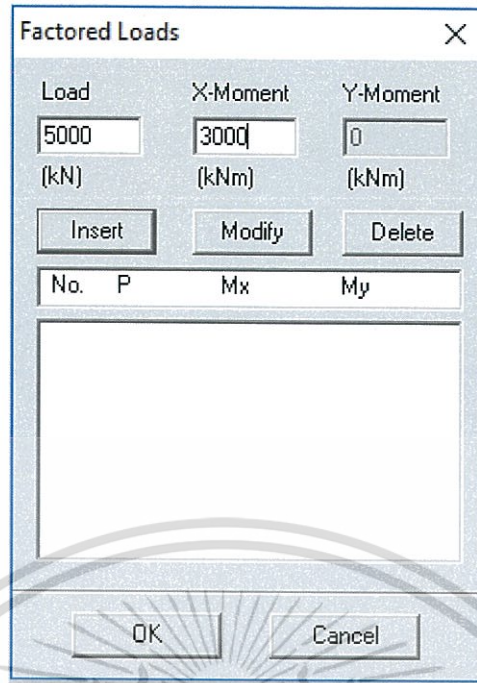
เลือกมาตรฐานเหล็กที่ Bar Set จากนั้นเลือก prEN 10080 จะปรากฏรายละเอียดของเสริม



รูปที่ 3.31 การวางตำแหน่งของเหล็กเสริม

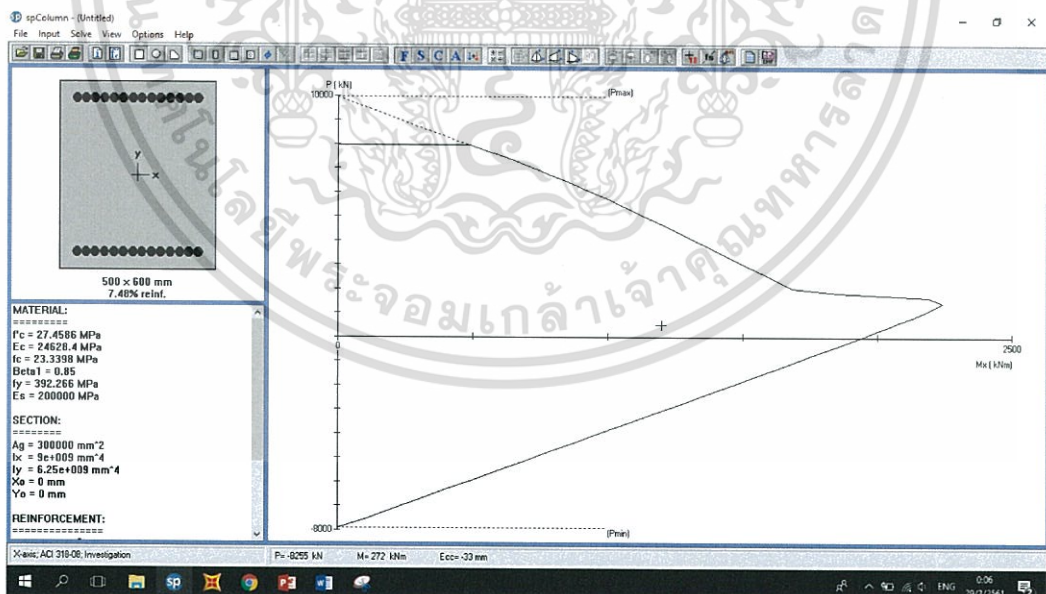
คลิกช่อง No. of bars เพื่อเลือกปริมาณเหล็กเสริม คลิกช่อง Bar size เพื่อเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมและคลิกช่อง Clear cover เพื่อเลือกระยะห่างของเหล็กเสริมจากผิวชิ้นส่วน และคลิกค่าเป็น Longitudinal bars

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 การใส่ค่าแรงในแนวแกนและโมเมนต์ของคาน

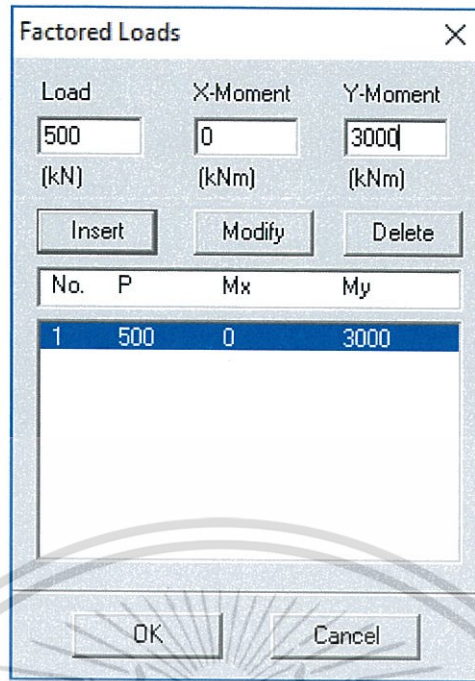
คลิกที่ช่องว่างด้านล่าง Load เพื่อใส่แรงในแนวแกน และด้านล่าง X-Moment เพื่อใส่โมเมนต์ที่มากที่สุดในส่วนคานนั้นๆ ซึ่งทั้งสองค่าจะได้ค่าจากโปรแกรม SAP 2000 จากนั้นคลิก Insert และ OK เพื่อยืนยันค่า



รูปที่ 3.33 การตรวจสอบความสามารถในการรับกำลัง

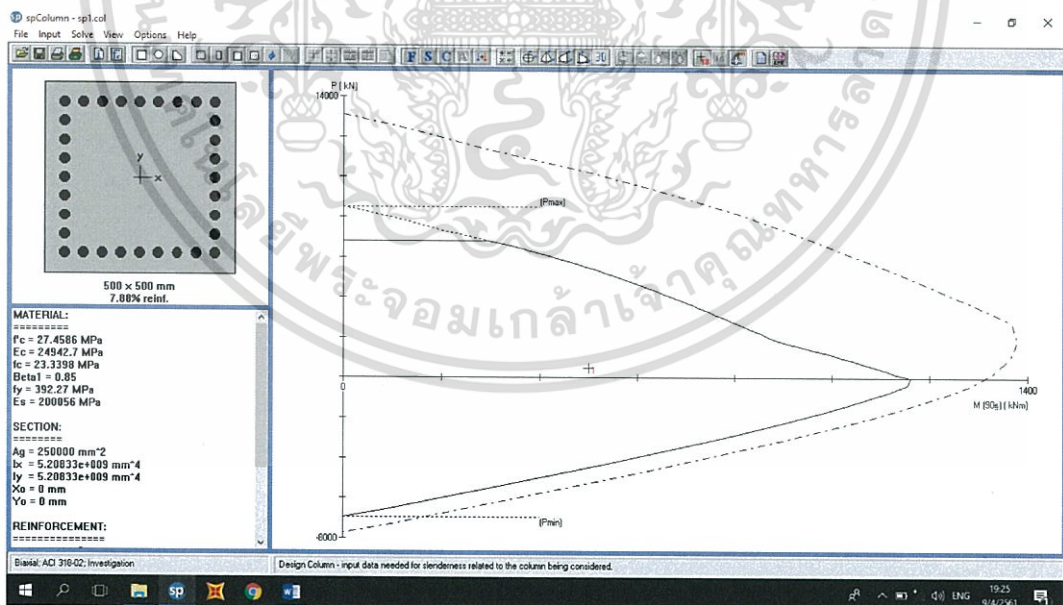
หลังจากยืนยันการใส่แรงต่างๆแล้ว กด F5 เพื่อ ประมวลผล จากนั้น เลือก P-M Diagram positive moments จะปรากฏหน้าจอตั้งรูปที่ หากจุดของการรับแรงอยู่ในกราฟถือว่าวัสดุสามารถรับแรงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 การใส่ค่าแรงในแนวแกนและโมเมนต์ของเสา

คลิกที่ช่องว่างด้านล่าง Load เพื่อใส่แรงในแนวแกน และด้านล่าง Y-Moment เพื่อใส่โมเมนต์ที่มากที่สุดในส่วนเสานั้นๆ ซึ่งทั้งสองค่าจะได้ค่าจากโปรแกรม SAP 2000 จากนั้นคลิก Insert และ OK เพื่อยืนยันค่า



รูปที่ 3.35 การตรวจสอบความสามารถในการรับกำลัง

หลังจากยืนยันการใส่แรงต่างๆแล้ว กด F5 เพื่อ ประมวลผล จากนั้น เลือก P-M Diagram positive moments จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ หากจุดของการรับแรงอยู่ในกราฟถือว่าวัสดุสามารถรับแรงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

คานความลึก 0.50 ม. ช่องว่าง 2 ช่อง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม. ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

Beam	0.50*0.50	0.45*0.50	0.40*0.50	0.35*0.50	0.3*0.50
Axial (kg.)	43830	38286	31973	25145	18253
M (kg.-m.)	136700	142966	149986	157444	164790
V (kg.)	197785	192376	186386	180066	173853
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
Vc (kg)	19732.6	17759.4	15786.1	13812.8	11839.6
Vs (kg)	181012	177281	172968	168325	163789
S (cm)	7.56	7.72	7.91	8.13	8.36

หมายเหตุ ช่องที่แรงอาจหมายถึงระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 10 ซม. ซึ่งไม่สามารถสร้างได้ หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.50 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	215401	225568	236934	248997	260882
M (kg.-m.)	91339	79383	66002	51709	37416
V (kg.)	43830	38286	31973	25145	18253
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	-166950	133560	103880	-77910	55650
Vs (kg.)	-115385	-88518	-66265	-48328	-34176
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.60 ม. ช่องว่าง 2 ช่อง

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม. ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

beam	0.50*0.60	0.45*0.60	0.40*0.60	0.35*0.60	0.30*0.60
Axial (kg.)	34216	28799	23114	17459	12200
M (kg.-m.)	147073	152773	158167	164244	169215
V (kg.)	190039	185030	179925	175010	170636
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.56	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
Vc (kg.)	24166.92	21750.23	19333.54	16916.85	14500.15
Vs (kg.)	169497.1	166542.3	163491.5	160630.7	158310.9
S (cm)	10.3	10.06	10.25	10.43	10.59

หมายเหตุ หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

หน้าตัดเหล็ก 12.56 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 2DB20

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.60 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	231496	240804	250339	259532	267679
M (kg.-m.)	71240	59673	47691	35892	25004
V (kg.)	34216	28799	23114	17459	12200
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	-166950	-133560	-103880	-77910	-55650
Vs (kg.)	-126696	-99679	-76687	-57370	-41297
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.70 ม. ช่องว่าง 2 ช่อง

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม. ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

beam	0.50*0.70	0.45*0.70	0.40*0.70	0.35*0.70	0.30*0.70
Axial (kg.)	26607	21777	16997	12507	8543
M (kg.-m.)	154198	158807	163187	167054	170112
V (kg.)	184877	180685	176694	173129	170225
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5
Vc (kg.)	28601.2	25741.1	22881	20020.9	17160.7
Vs (kg.)	160566	158805	157245	156111	155638
S (cm)	12.35	12.49	12.61	12.7	12.74

หมายเหตุ หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.70 ม.ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	242425	250038	257286	263718	268864
M (kg.-m.)	55361	45101	35059	25705	17505
V (kg.)	26607	21777	16997	12507	8543
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-135648	-107940	-83884	-63196	-45599
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.5 ม. ช่องว่าง 3 ช่อง

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

beam	0.50*0.50	0.45*0.50	0.40*0.50	0.35*0.50	0.30*0.50
Axial (kg.)	64748	56723	47558	37571	27391
M (kg.-m.)	138135	146228	155436	165410	175478
V (kg.)	167483	161700	155239	157741	164115
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
Vc (kg.)	19732.6	17759.4	15786.1	13812.8	11839.6
Vs (kg.)	177306	172476	166848	171765	181237
S (cm)	7.71	7.93	8.2	7.96	7.55

หมายเหตุ ช่องที่แรงหมายถึงระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 10 ซม. ซึ่งไม่สามารถสร้างได้
หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	169315	163184	156411	156683	163209
M (kg.-m.)	65093	56829	47510	37450	27266
V (kg.)	33574	29354	24566	19373	14096
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-127451	-99026	-74979	-55118	-39067
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.60 ม. ช่องว่าง 3 ช่อง

ตารางที่ 4.9 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม. ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

beam	0.50*0.60	0.45*0.60	0.40*0.60	0.35*0.60	0.30*0.60
Axial (kg.)	50668	42723	34356	25992	18173
M (kg.-m.)	152488	160165	168188	176108	183355
V (kg.)	158905	154389	159387	164311	168786
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.06	12.06	8.04	8.04	8.04
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
Vc (kg.)	24166.9	21750.2	19333.5	16916.9	14500.2
Vs (kg.)	138363	135901	142954	149932	156461
S (cm)	12.11	12.33	7.81	7.45	7.14

หมายเหตุ ช่องที่แรเงาหมายถึงระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 10 ซม. ซึ่งไม่สามารถสร้างได้

หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

หน้าตัดเหล็ก 8.04 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 2DB16

ตารางที่ 4.10 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.60 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	160738	154901	157548	163042	167698
M (kg.-m.)	51275	43153	34659	26208	18330
V (kg.)	26081	21921	17572	13251	9233
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-136266	-107771	-83207	-62321	-44788
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.70 ม. ช่องว่าง 3 ช่อง

ตารางที่ 4.11 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

beam	0.50*0.70	0.45*0.70	0.40*0.70	0.35*0.70	0.30*0.70
Axial (kg.)	39279	32150	25086	18437	12560
M (kg.-m.)	163302	169815	176169	182002	186935
V (kg.)	156311	160277	164139	167654	170572
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	8.04	12.06	12.06	12.06	8.04
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5
Vc (kg.)	28601.2	25741.1	22881	20020.9	17160.7
Vs (kg.)	132000	138397	144690	150636	155985
S (cm)	10.02	14.33	13.71	13.17	8.48

หมายเหตุ ช่องที่แรงหมายถึงระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 10 ซม. ซึ่งไม่สามารถสร้างได้

หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

หน้าตัดเหล็ก 8.04 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 2DB16

ตารางที่ 4.12 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.70 ม.ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	154642	158374	162447	166174	169303
M (kg.-m.)	40185	32868	25644	18858	12864
V (kg.)	19992	16295	12662	9267	6284
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-143430	-114389	-88984	-67008	-48257
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.5 ม. ช่องว่าง 4 ช่อง

ตารางที่ 4.13 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.50 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

beam	0.50*0.50	0.45*0.50	0.40*0.50	0.35*0.50	0.30*0.50
Axial (kg.)	63598	56120	47477	37909	27969
M (kg.-m.)	132241	141617	152533	164345	176596
V (kg.)	162371	168363	175214	182640	190073
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	18.84	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	44.5	44.5	44.5	44.5	44.5
Vc (kg.)	19732.6	17759.4	15786.1	13812.8	11839.6
Vs (kg.)	145598	153268	161796	170899	180009
S (cm)	14.68	8.93	8.46	8	7.6

หมายเหตุ ช่องที่แรงหมายถึงระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 10 ซม. ซึ่งไม่สามารถสร้างได้

หน้าตัดเหล็ก 18.84 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB20

หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

ตารางที่ 4.14 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.50 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.45*0.45	0.30*0.30
Axial (kg.)	148289	141125	139806	147039	153723
M (kg.-m.)	63164	55580	46882	37314	27429
V (kg.)	39538	34831	29414	23437	17246
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-120435	-92582	-69275	-50337	-35361
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.60 ม. ช่องว่าง 4 ช่อง

ตารางที่ 4.15 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.60 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

beam	0.50*0.60	0.45*0.60	0.40*0.60	0.35*0.60	0.30*0.60
Axial (kg.)	50669	43091	34988	26744	18891
M(kg.-m.)	148723	157822	167495	177231	186332
V(kg.)	171816	177208	182866	188424	193395
Fc(ksc)	280	280	280	280	280
Fy(ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av(cm ²)	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06
B(cm)	50	45	40	35	30
D(cm)	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
Vc(kg.)	24166.9	21750.2	19333.5	16916.9	14500.2
Vs(kg.)	151274	158720	166433	174045	181070
S(cm)	11.07	10.55	10.07	9.63	9.26

หมายเหตุ หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.60 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	139449	137732	142688	147142	150546
M (kg.-m.)	49710	42068	33986	25844	18158
V (kg.)	31220	26462	21410	16304	11470
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-130221	-102428	-78692	-58729	-42156
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานความลึก 0.70 ม. ช่องว่าง 4 ช่อง

ตารางที่ 4.17 แสดงผลของแรงภายในคานและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน 0.70 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

beam	0.50*0.70	0.45*0.70	0.40*0.70	0.35*0.70	0.30*0.70
Axial (kg.)	39911	32942	25928	19217	13190
M (kg.-m.)	161633	169581	177490	184916	191379
V (kg.)	178325	182701	186965	190819	193943
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
Av (cm ²)	12.06	12.06	12.06	12.06	12.06
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5
Vc (kg.)	28601.2	25741.1	22881	20020.9	17160.7
Vs (kg.)	154014	160821	167516	173801	179356
S (cm)	12.87	12.33	11.84	11.41	11.05

หมายเหตุ หน้าตัดเหล็ก 12.06 ตร.ซม. คือเหล็กปลอก 3DB16

ตารางที่ 4.18 แสดงผลของแรงภายในเสาและการหาเหล็กปลอกของ Vierendeel ที่มีความลึกคาน
0.70 ม.ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

Pile	0.50*0.50	0.45*0.45	0.40*0.40	0.35*0.35	0.30*0.30
Axial (kg.)	135150	138648	141759	144177	145590
M (kg.-m.)	38474	31560	24688	18186	12406
V (kg.)	24290	19961	15641	11541	7886
Fc (ksc)	280	280	280	280	280
Fy (ksc)	3000	3000	3000	3000	3000
B (cm)	50	45	40	35	30
D (cm)	45	40	35	30	25
Vc (kg.)	166950	133560	103880	77910	55650
Vs (kg.)	-138374	-110076	-85479	-64332	-46372
S (m)	0.25	0.225	0.2	0.175	0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

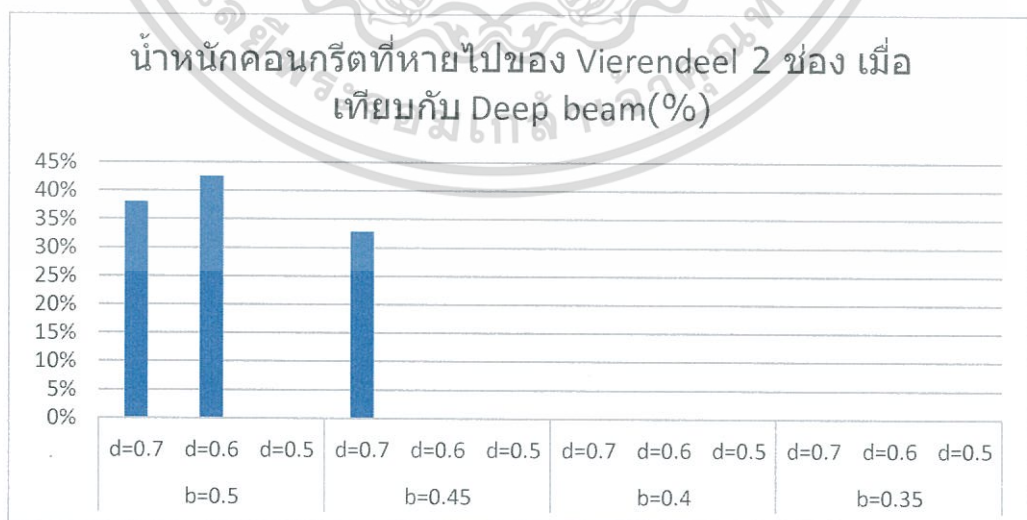
		vierendeel									deep beam	
		ช่องว่าง	Ws(kg)	Wc (kg)	ช่องว่าง	Ws(kg)	Wc (kg)	ช่องว่าง	Ws(kg)	Wc (kg)	Ws(kg)	Wc
		4ช่อง	4ช่อง	4ช่อง	3ช่อง	3ช่อง	3ช่อง	2ช่อง	2ช่อง	2ช่อง	2708	18410
d=0.5	b=0.5	0.6325*2.	3831	12186								
d=0.6		0.6325*1.	2910	12793.2	1.01*1.85	2985	11683.2	1.765*1.8	3777	10573.2		
d=0.7		0.6325*1.	2488	13400.4	1.01*1.65	2202	12410.4	1.84*1.85	2913	11420.4		
d=0.5	b=0.45										2683	16569
d=0.6		0.695*1.8	3413	11014.3	1.07*1.85	3223	10155.2					
d=0.7		0.695*1.8	2738	11614.8	1.07*1.65	2591	10848.6	1.84*1.65	3085	11123.4		
d=0.5	b=0.4										2659	14728
d=0.6												
d=0.7		0.7575*1.	2954	9928.32	1.14*1.65	1568	9310.56					
d=0.5	b=0.35										2426	12887
d=0.6												
d=0.7		0.82*1.65	3050	8340.78	1.21*1.65	2898	7855.68					

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบน้ำหนักคอนกรีตและเหล็กระหว่าง Vierendeel และคานลึก

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบน้ำหนักคอนกรีตที่หายไปของ Vierendeel เมื่อเทียบกับคานลึก (%)

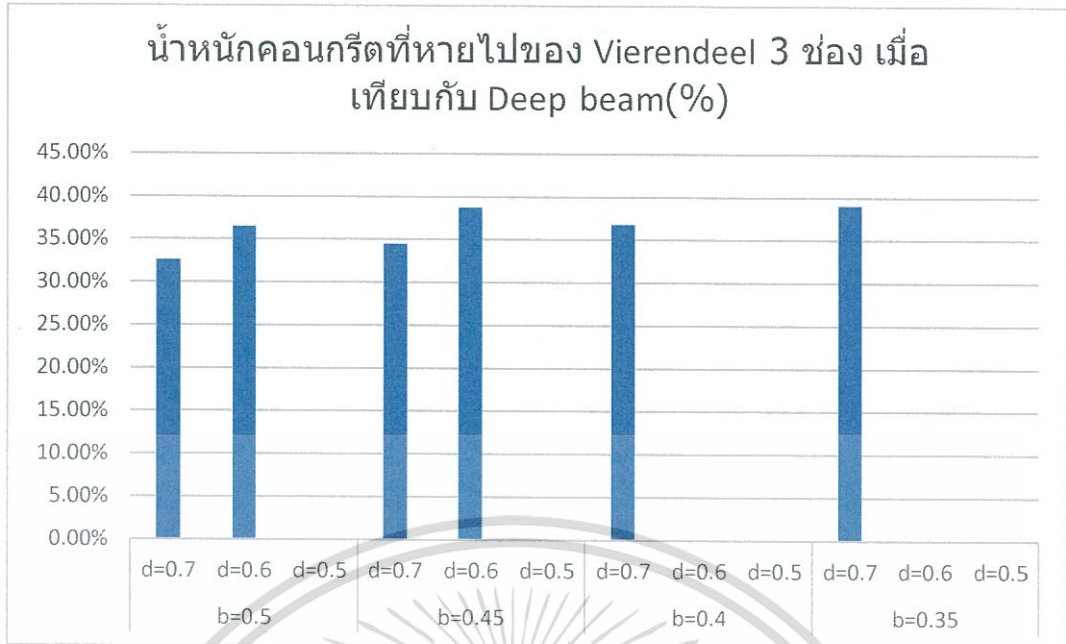
		น้ำหนัก คอนกรีต% (2ช่อง)	น้ำหนัก คอนกรีต% (3ช่อง)	น้ำหนัก คอนกรีต% (4ช่อง)
b=0.5	d=0.7	38%	32.60%	27.20%
	d=0.6	42.60%	36.50%	30.50%
	d=0.5	N/A	N/A	33.80%
b=0.45	d=0.7	32.90%	34.50%	29.90%
	d=0.6	N/A	38.70%	33.50%
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.4	d=0.7	N/A	36.80%	32.60%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.35	d=0.7	N/A	39%	35.30%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ ช่องที่แรเงาหมายถึงชิ้นงานที่ประหยัดคอนกรีตที่สุด

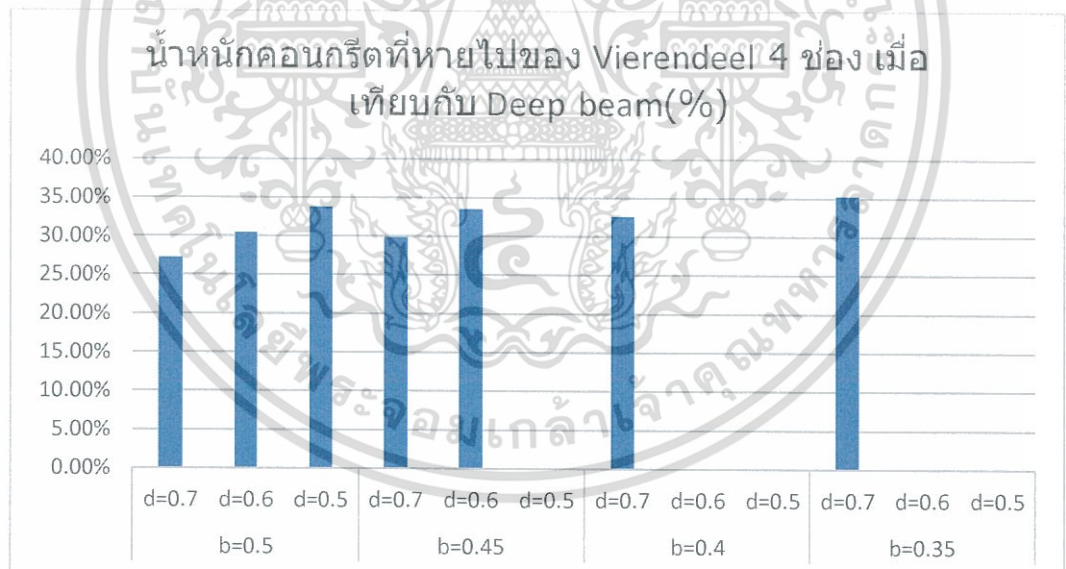


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ Vierendeel 2 ช่อง
เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก



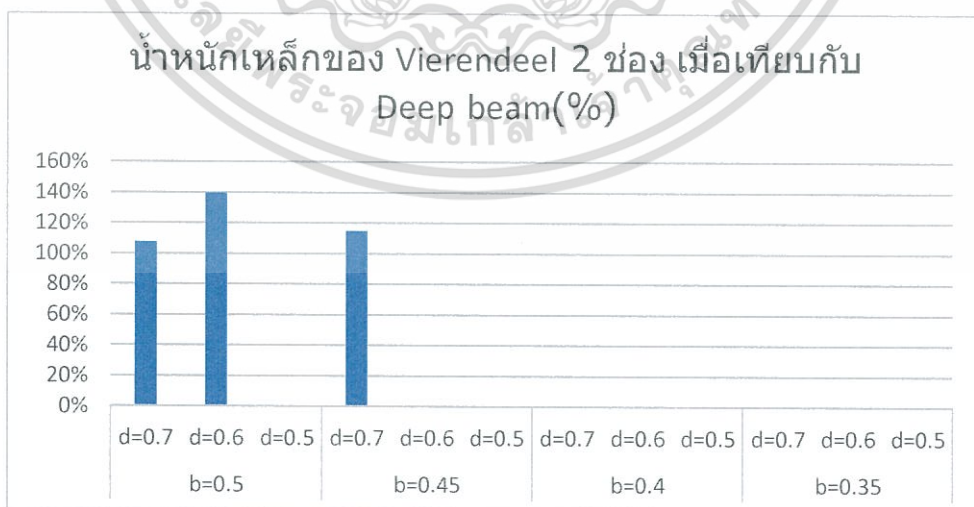
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตที่หายไปของ Vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบน้ำหนักเหล็กของ Vierendeel เมื่อเทียบกับคานลึก (%)

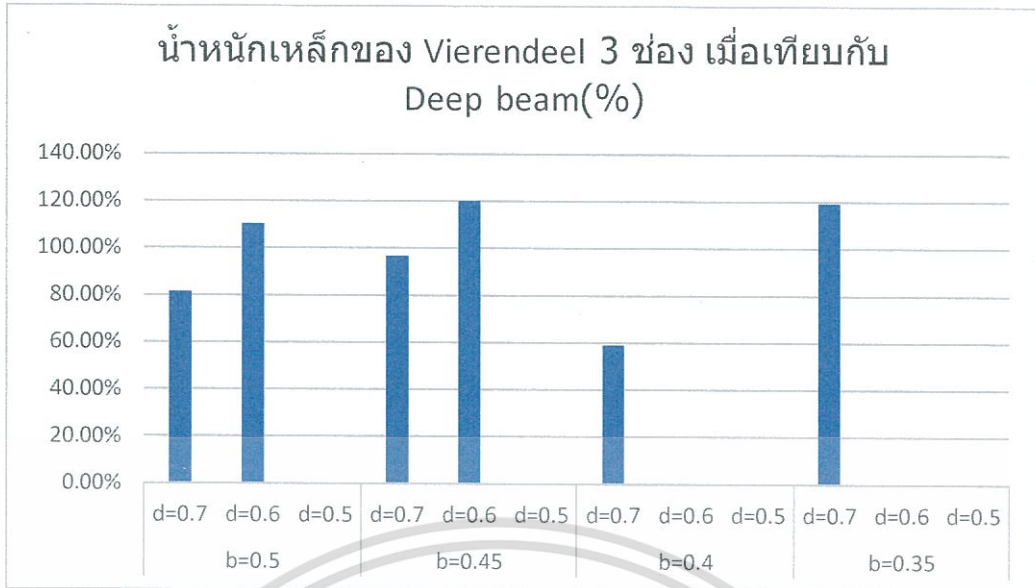
		น้ำหนักเหล็ก% (2ช่อง)	น้ำหนักเหล็ก% (3ช่อง)	น้ำหนักเหล็ก% (4ช่อง)
b=0.5	d=0.7	108%	81.31%	91.88%
	d=0.6	139.48%	110.23%	107.46%
	d=0.5	N/A	N/A	141.47%
b=0.45	d=0.7	114.98%	96.57%	102.05%
	d=0.6	N/A	120.13%	127.21%
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.4	d=0.7	N/A	58.97%	111.09%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.35	d=0.7	N/A	119%	125.72%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ ช่องที่แรเงาหมายถึงชิ้นงานที่ประหยัดเหล็กที่สุด

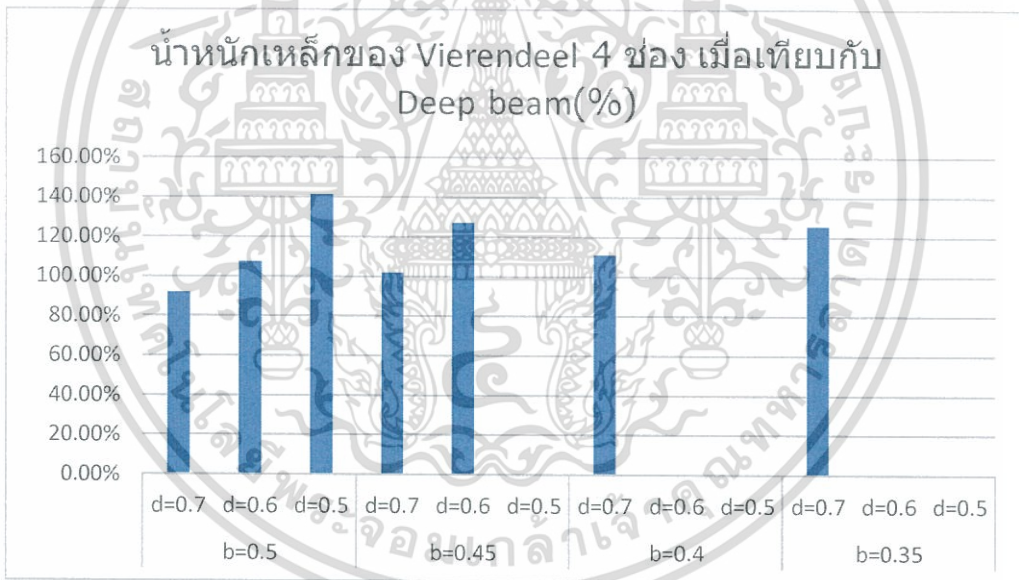


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ Vierendeel 2 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ Vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก



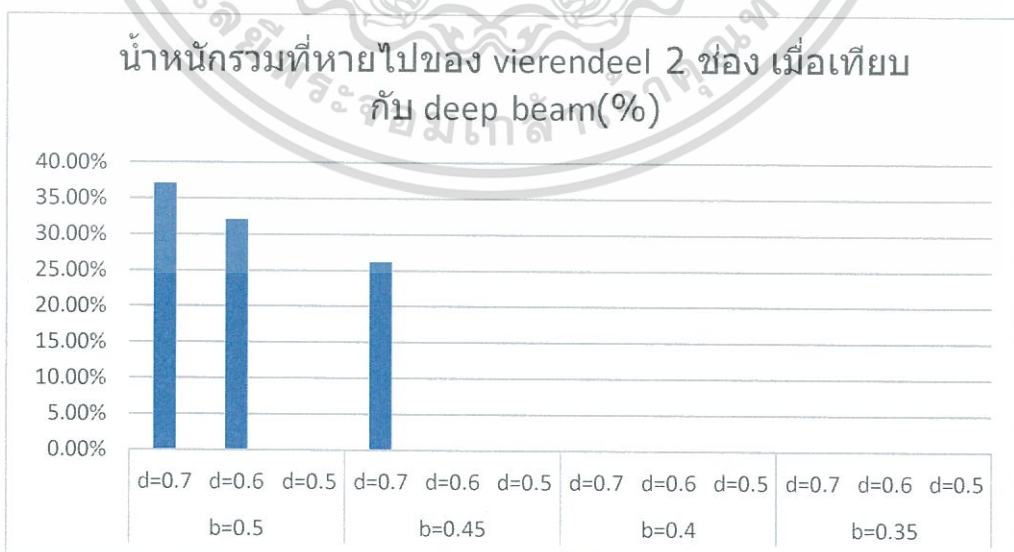
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักของเหล็กของ Vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel เมื่อเทียบกับคานลึก (%)

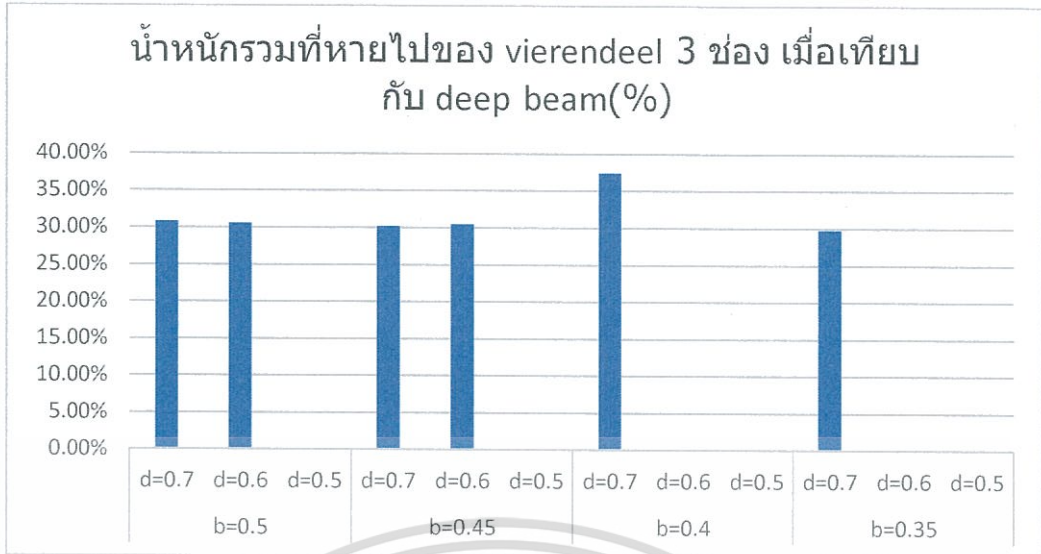
		น้ำหนัก เหล็ก% (2ช่อง)	น้ำหนัก เหล็ก% (3ช่อง)	น้ำหนัก เหล็ก% (4ช่อง)
b=0.5	d=0.7	37.13%	30.81%	24.77%
	d=0.6	32.05%	30.54%	25.64%
	d=0.5	N/A	N/A	24.16%
b=0.45	d=0.7	26.20%	30.19%	25.45%
	d=0.6	N/A	30.51%	25.06%
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.4	d=0.7	N/A	37.43%	25.91%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A
b=0.35	d=0.7	N/A	29.78%	25.61%
	d=0.6	N/A	N/A	N/A
	d=0.5	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ ช่องที่แรเงาหมายถึงชิ้นงานที่น้ำหนักรวมเบาที่สุด

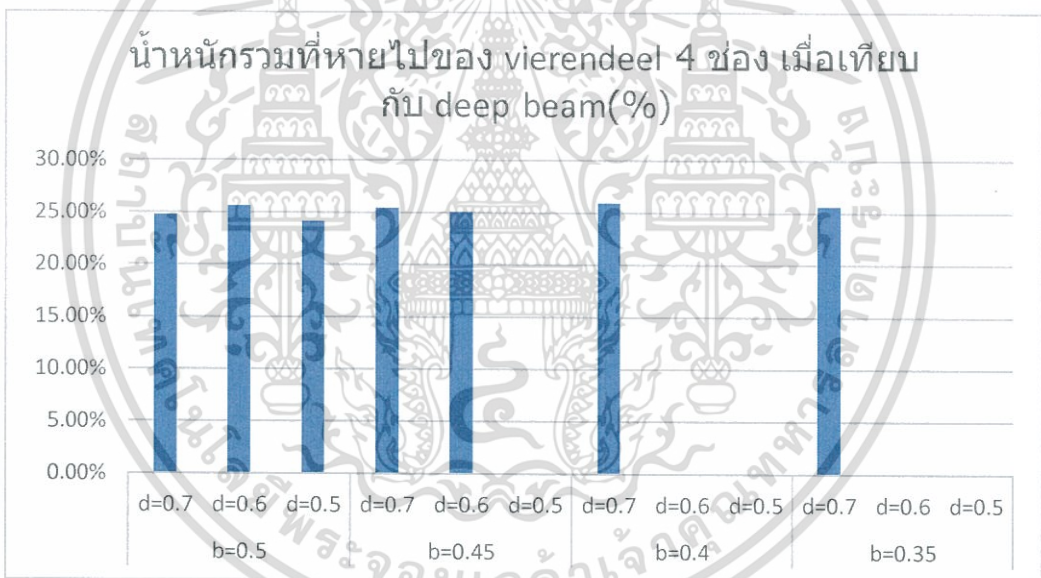


รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 2 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 3 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักรวมที่หายไปของ Vierendeel 4 ช่อง เมื่อเปรียบเทียบกับคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 แสดงระยะโก่งตัวของ Vierendeel และคานลึก

		ระยะ โก่งตัว (2ช่อง) mm.	ระยะ โก่งตัว (3ช่อง) mm.	ระยะ โก่งตัว (4ช่อง) mm.	ระยะโก่งตัว ของคานลึก จากสูตร (mm.)	ระยะโก่งตัว ของคานลึก จาก โปรแกรม (mm.)
		Vierendeel			Deep beam	
b=0.5	d=0.7	5.7	4.4	4.1	0.3358	1.1
	d=0.6	8.1	5.9	7.2		
	d=0.5	N/A	N/A	N/A		
b=0.45	d=0.7	6.7	5.2	4.8	0.3731	1.2
	d=0.6	N/A	7.2	5.3		
	d=0.5	N/A	N/A	N/A		
b=0.4	d=0.7	N/A	6.1	5.7	0.4197	1.3
	d=0.6	N/A	N/A	N/A		
	d=0.5	N/A	N/A	N/A		
b=0.35	d=0.7	N/A	7.3	7	0.4769	1.5
	d=0.6	N/A	N/A	N/A		
	d=0.5	N/A	N/A	N/A		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผล

โครงสร้างระบบ Vierendeel ประหยัดคอนกรีตมากกว่าโครงสร้างระบบคานลึกลง โดยประมาณ 30-40% แต่ในทางกลับกัน ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในระบบ Vierendeel มีทั้งปริมาณที่มากกว่าและน้อยกว่าระบบคานลึกลงโดยขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนช่องว่างระหว่างเสากับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากผลของโมเมนต์และแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง ทำให้ต้องออกแบบปริมาณคอนกรีตและปริมาณเหล็กเสริมให้เพียงพอต่อการรับแรงเพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพียงพอ นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงความประหยัดของโครงสร้างเพื่อให้การออกแบบมีทั้งประสิทธิภาพและประสิทธิผล ในที่นี้โครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุดในขอบเขตที่ทำการศึกษาคือโครงสร้างที่มีช่องว่างระหว่างคานกับเสา 3 ช่องประกอบไปด้วยคานขนาด 0.4×0.7 ม. และเสาคานขนาด 0.4×0.4 ม. เนื่องจากประหยัดปริมาณคอนกรีต 36.80% ปริมาณเหล็กเสริม 41.03% และปริมาณน้ำหนักโดยรวมที่หายไปเป็น 37.43% โดยประมาณ ซึ่งเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนความลึกต่อความยาวของคานลึกลงเท่ากับ 3.05 : 5.03 ควรมีช่องว่าง 3 ช่องจึงจะประหยัดและรับแรงได้ดีที่สุด

เพราะฉะนั้นจากสมมติฐานเราจะสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้าง Vierendeel สามารถลดน้ำหนักโครงสร้างช่วงยาวและสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างได้จริงโดยมีระยะโก่งตัวของชิ้นส่วนใน Vierendeel เป็น 6.1 มม. และของคานลึกลงมีค่าเท่ากับ 1.3 มม. เมื่อคำนวณจากสูตรและ 0.4197 มม. เมื่อคำนวณจากโปรแกรม ในตัวอย่างที่ประหยัดที่สุด

2. ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษารายละเอียดการใช้งานของโปรแกรมให้เข้าใจและนำข้อมูลในงานวิจัยนี้ไปปรับใช้ตามความเหมาะสม เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาในขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่กระทำและประเภทของโครงสร้างและในผลการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงเทคนิคในการก่อสร้างซึ่งหากนำไปใช้งานอาจต้องพิจารณาถึงรูปแบบ รายละเอียดในการก่อสร้างรวมถึงรูปแบบของข้อต่อที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงและน้ำหนักของโครงสร้างต่อไป

จากขนาดที่กำหนดเลือกใช้ มีขนาดสั้นเกินไป จึงทำให้พฤติกรรมของคานลึกลงไม่เป็นไปตามพฤติกรรมของ Vierendeel การศึกษานี้จึงเป็นเพียงการลดน้ำหนักของคานลึกลงเท่านั้น

บรรณานุกรม

- เจยวัฒน์ สมรศาสตร์ และผู้แต่งคนอื่นๆ. (2555). การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ทฤษฎี
โครงสร้าง. ปริญญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Maugh, L.C. (1935). The analysis of vierendeel trusses by successive approximations.
[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bse-me001:1935:3::21>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 ตุลาคม 2560).
- Vierendeel bridge. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก
https://en.m.wikipedia.org/wiki/Vierendeel_bridge.
(วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 ตุลาคม 2560).
- Richard Denis Pearson. (1959). Design of Vierendeel Trusses. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=6535&context=masters_theses (วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 ตุลาคม 2560).
- David J. Wickersheimer. (1976). The Vierendeel. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpk/aaresearch-2012/12-student-files/Vierendeel.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 ตุลาคม 2560).
- PROFESSOR F.K.KONG. (2002). Reinforced concrete deep beams. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
cvl.araku.ac.ir/download/deep-beam. (วันที่สืบค้นข้อมูล : 1 ตุลาคม 2560).
- Dr.Mongkol JIRAWACHARADET. เสารับแรงอัดและดัด. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
[file:///C:/Users/Administrator/Downloads/C12%20Axial_Bending%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Administrator/Downloads/C12%20Axial_Bending%20(1).pdf).
(วันที่สืบค้น : 5 ตุลาคม 2560)

Pin connections and failure of bolted joints. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

http://www.idconline.com/technical_references/pdfs/civil_engineering/Pin_connections_and_Failure_of_Bolted_Joints.pdf. (วันที่สืบค้น : 5 ตุลาคม 2560)

คู่มือวิศวกร และช่างเทคนิค. เสริมกำลัง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

http://www.thaiseismic.com/wp-content/uploads/2016/09/%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81_rev05_chapter06.pdf. (วันที่สืบค้น : 5 ตุลาคม 2560)

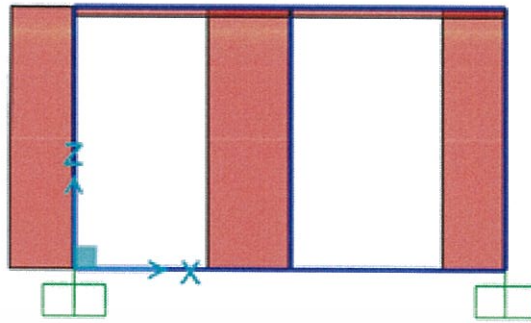


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

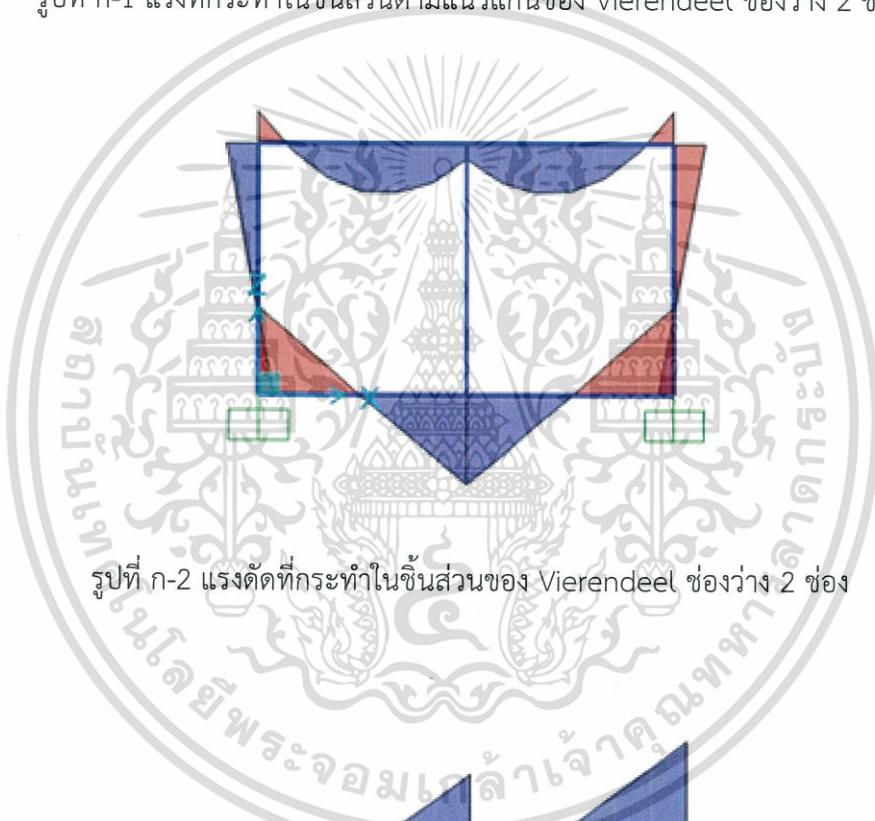


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

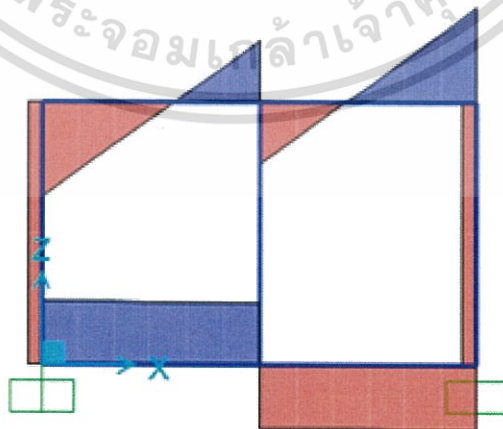
ตัวอย่างแรงในชิ้นส่วน Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง



รูปที่ ก-1 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง



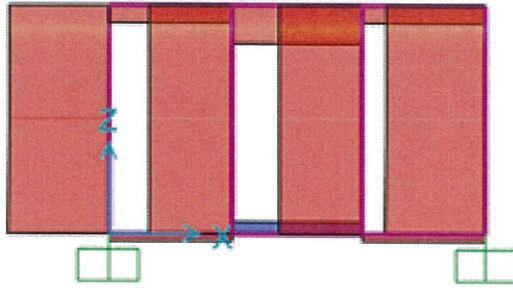
รูปที่ ก-2 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง



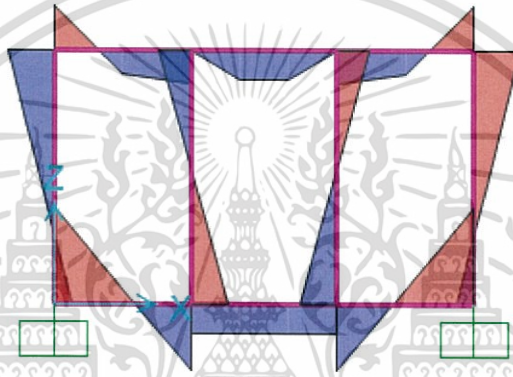
รูปที่ ก-3 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 2 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

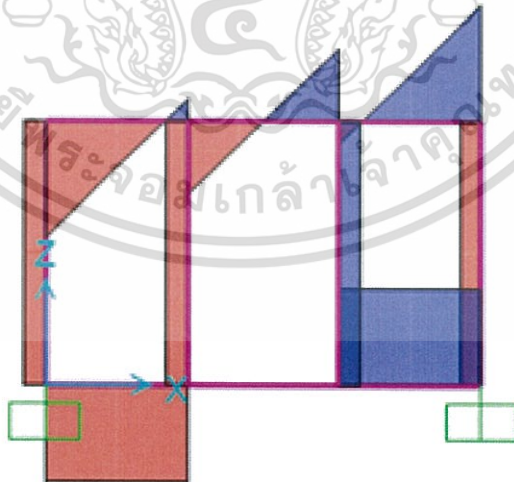
ตัวอย่างแรงในชิ้นส่วน Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง



รูปที่ ก-4 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง



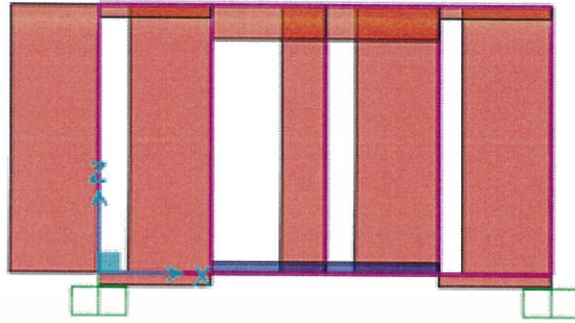
รูปที่ ก-5 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง



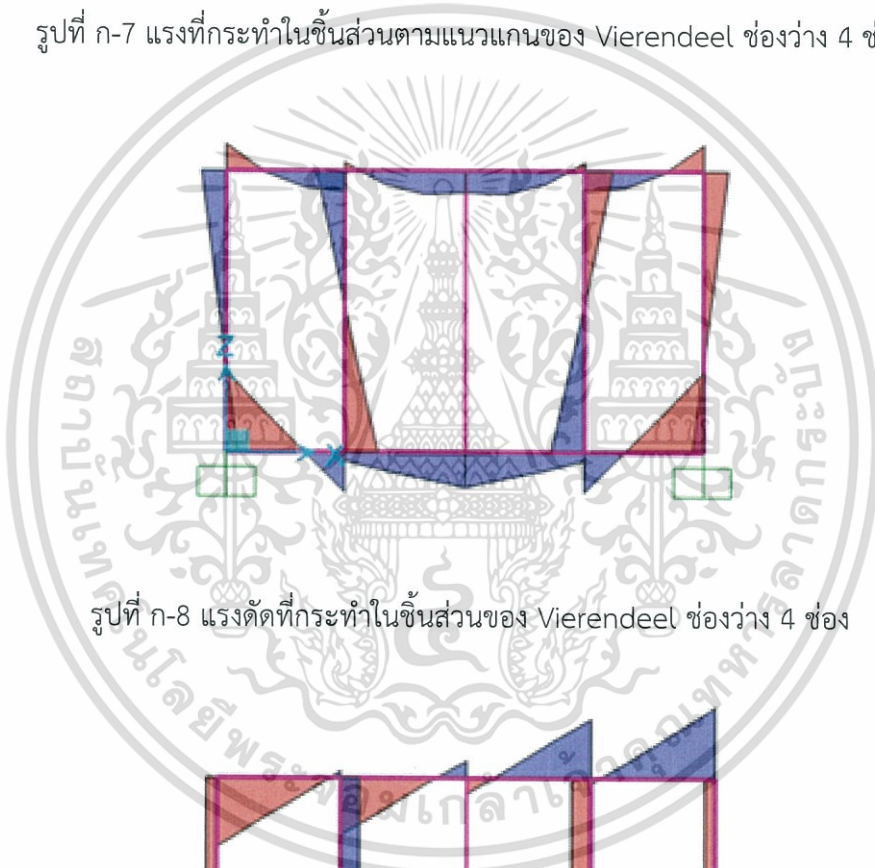
รูปที่ ก-6 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 3 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

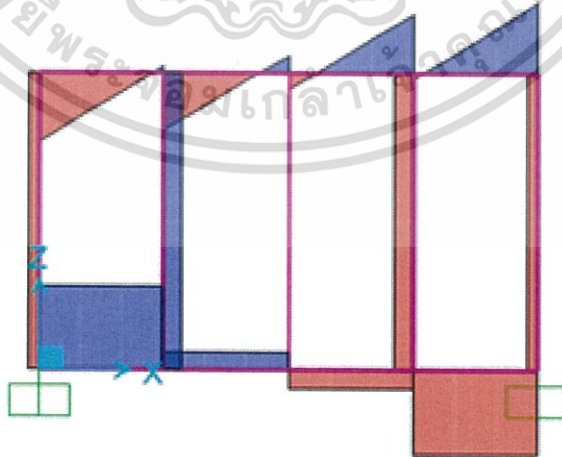
ตัวอย่างแรงในชิ้นส่วน Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง



รูปที่ ก-7 แรงที่กระทำในชิ้นส่วนตามแนวแกนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง



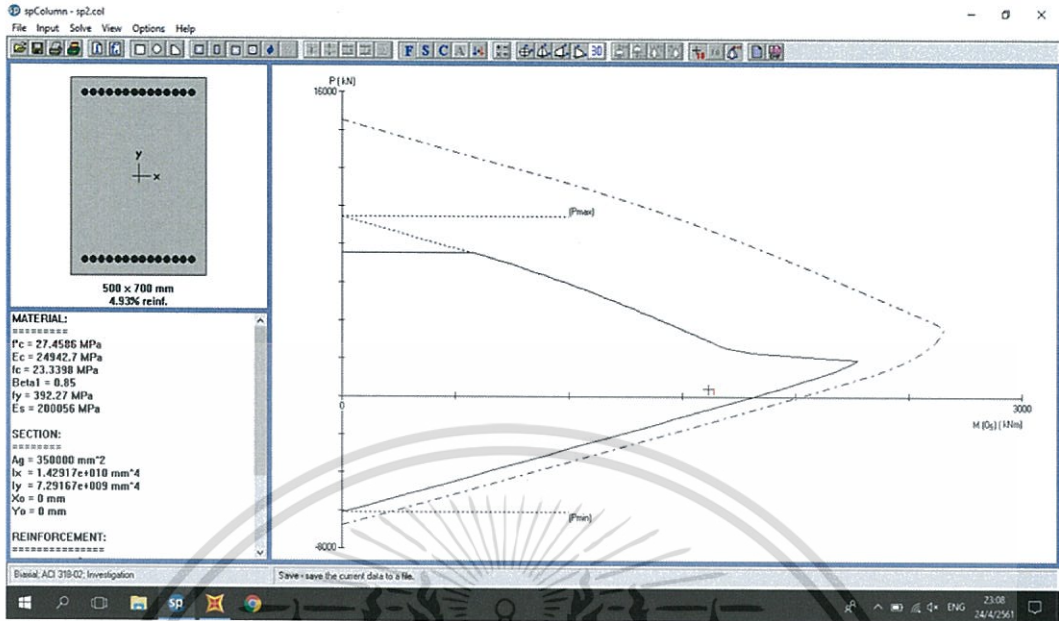
รูปที่ ก-8 แรงดัดที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง



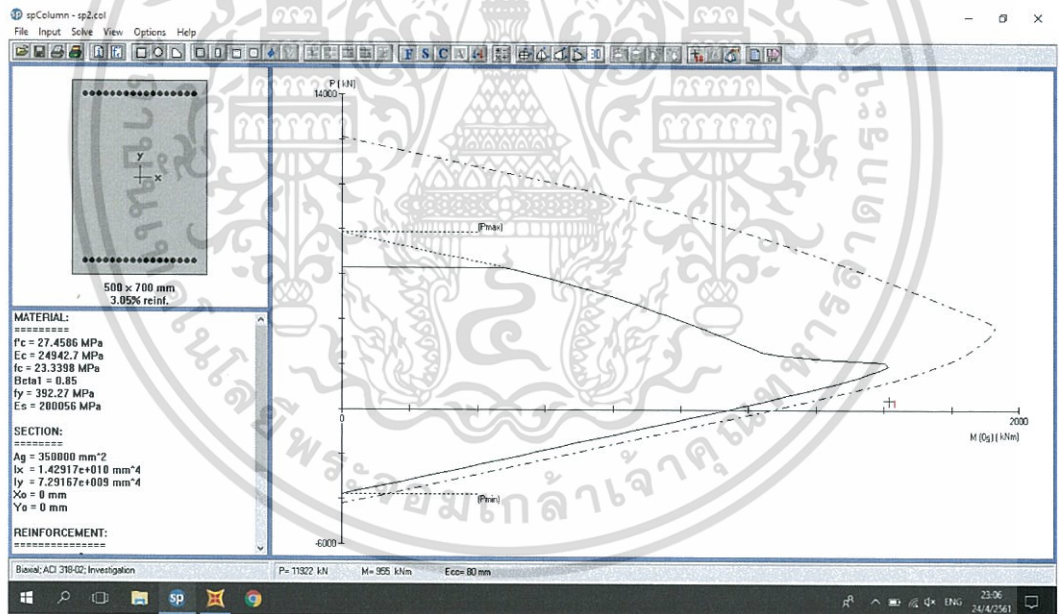
รูปที่ ก-9 แรงเฉือนที่กระทำในชิ้นส่วนของ Vierendeel ช่องว่าง 4 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างภาพแสดงถึงผลการคำนวณของโปรแกรมในรูปแบบ Interaction diagram



รูปที่ ก-10 ภาพตัวอย่างที่แสดงว่าหน้าตัดที่ออกแบบใช้งานได้



รูปที่ ก-11 ภาพตัวอย่างที่แสดงว่าหน้าตัดที่ออกแบบใช้งานไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการคำนวณคานลิก

ตารางที่ ก-1 ตารางการคำนวณการจัดเรียงเหล็กในคานลิกและน้ำหนักของเหล็ก

	0.35*3.05	0.40*3.05	0.45*3.05	0.50*3.05
Wu	195874.4	196313.6	196752.8	197192
Mmax	315932.2	316640.6	317349	318057.4
Vmax	344836.9	345610.1	346383.3	347156.5
b	0.35	0.4	0.45	0.5
d	3.05	3.05	3.05	3.05
l	5.03	5.03	5.03	5.03
0.15l	0.7545	0.7545	0.7545	0.7545
Fc	280	280	280	280
Fy	4000	4000	4000	4000
jd	2.226	2.226	2.226	2.226
Vc	9943.365	9946.897	9950.429	9953.962
Vs	449839.1	450866.6	451894	452921.4
Av	6.158	6.158	6.158	6.158
Sv	0.16701	0.166629	0.166251	0.165873
p	5.768618	5.047541	4.486703	4.038033
Asm	77.30294	77.47627	77.6496	77.82294
Nam	12.55325	12.5814	12.60955	12.6377
y	0.511	0.511	0.511	0.511
Wc	12886.86	14727.84	16568.82	18409.8
Wsv	1117.621	1134.056	1150.492	1166.928
Wsh	676.1799	892.4531	900.6709	908.8887
Wsm	632.1905	632.1905	632.1905	632.1905
Ws	2425.991	2658.7	2683.353	2708.007

โดย

Wu คือ line load

Mmax คือ โมเมนต์ที่มากที่สุด

Vmax คือ แรงเฉือนที่มากที่สุด

B คือ ความกว้างคาน

D คือ ความลึกคาน

L คือ ความยาวคาน

Fc คือ กำลังรับแรงของคอนกรีต

Fy คือ กำลังรับแรงของ

Jd คือ แขนของโมเมนต์

Vc คือ แรงเฉือนที่คอนกรีตรับ

Vs คือ แรงเฉือนที่เหล็กรับ

Av คือ หน้าตัดของเหล็กรับแรงเฉือน

Sv คือ ระยะห่างการวางเหล็ก

P คือ ความหนาแน่นของเหล็กต่อหน้าตัด

Asm คือ หน้าตัดของเหล็กรับโมเมนต์

Nam คือ จำนวนเหล็กรับโมเมนต์

Y คือ ระยะในการเสริมเหล็กโมเมนต์

Wc คือ น้ำหนักคอนกรีต

Wsv คือ น้ำหนักเหล็กรับแรงเฉือนแนวตั้ง

Wsh คือ น้ำหนักรับแรงเฉือนแนวนอน

Wsm คือ น้ำหนักเหล็กรับโมเมนต์

Ws คือ น้ำหนักเหล็กรวม

ตารางการคำนวณน้ำหนักของ Vierendeel

หมายเหตุ ตารางช่องที่แรเงาหมายถึงเลือกใช้ตามน้ำหนักเหล็กที่น้อยที่สุดและน้ำหนักรวมของเหล็ก

ตารางที่ ก-2 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.50 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

4 ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	ราคาเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	ททช่องว่าง
D = 0.5													
0.5*0.5	DB32	11.0.11	6.313	698.5966	0.5*0.5	DB16	14.12	1.578	250.2708	4927.332	2598.81048	12186	4*(0.6325*2.05)
	DB28	15.0.15	4.834	729.4506		DB20	9.7	2.466	240.6816	4738.539	1225.11		
	DB25	18.0.18	3.853	697.7012		DB25	7.5	3.853	282.0396	5552.796	7.155		
						DB28	6.4	4.834	294.874	5805.479	3831.07548		
						DB32	5.3	6.313	308.0744	6065.369			

ตารางที่ ก-3 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

4 ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	ราคาเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	ททช่องว่าง
D = 0.6													
0.5*0.6	DB32	10.0.10	6.313	635.088	0.5*0.5	DB16	9.7	1.578	154.013	3032.2	1945.45676	12793.2	4*(0.6325*1.85)
	DB28	13.0.13	4.834	632.191		DB20	6.4	2.466	150.426	2961.59	958.16		
	DB25	16.0.16	3.853	620.179		DB25	4.2	3.853	141.02	2776.4	6.36		
						DB28	4.2	4.834	176.924	3483.29	2909.97676		
						DB32	3.1	6.313	154.037	3032.68			
0.45*0.6	DB25	18.0.18	3.853	697.701	0.45*0.45	DB16	11.9	1.578	192.516	3790.26	2324.22112	11014.38	4*(0.695*1.85)
	DB28	14.0.14	4.834	680.821		DB20	8.6	2.466	210.596	4146.22	1083.14		
	DB32	11.0.11	6.313	698.597		DB25	6.4	3.853	235.033	4627.33	5.79555		
						DB28	5.3	4.834	235.899	4644.38	3413.15667		
						DB32	4.2	6.313	231.056	4549.03			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 4 ช่อง

4 ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ค้อนเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ค้อนเมตร	นนเหล็ก	ราคาเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	ทพช่องว่าง
D = 0.7													
0.5*0.7	DB32	9.0.9	6.313	571.579	0.5*0.5	DB16	5.3	1.578	77.0064	1516.1	1528.19004	13400.4	4*(0.6325*1.65)
	DB28	12.0.12	4.834	583.56		DB20	4.2	2.466	90.2556	1776.95	954.37		
	DB25	15.0.15	3.853	581.418		DB25	3.1	3.853	94.0132	1850.93	5.565		
						DB28	3.1	4.834	117.95	2322.19	2488.12504		
						DB32	2(0)	6.313	77.0186	1516.34			
0.45*0.7	DB32	10.0.10	6.313	635.088	0.45*0.45	DB16	7.5	1.578	115.51	2274.15	1817.90576	11614.86	4*(0.695*1.65)
	DB28	13.0.13	4.834	632.191		DB20	5.3	2.466	120.341	2369.27	914.61		
	DB25	16.0.16	3.853	620.179		DB25	4.2	3.853	141.02	2776.4	5.1516		
						DB28	3.1	4.834	117.95	2322.19	2737.66736		
						DB32	3.1	6.313	154.037	3032.68			
0.4*0.7	DB32	11.0.11	6.313	698.597	0.4*0.4	DB16	8.6	1.578	134.761	2653.18	1991.68612	9928.32	4*(0.7575*1.65)
	DB28	14.0.14	4.834	680.821		DB20	6.4	2.466	150.426	2961.59	958.16		
	DB25	17.0.17	3.853	658.94		DB25	4.2	3.853	141.02	2776.4	4.5792		
						DB28	4.2	4.834	176.924	3483.29	2954.42532		
						DB32	3.1	6.313	154.037	3032.68			
0.35*0.7	DB32	11.0.11	6.313	698.597	0.35*0.35	DB16	9.7	1.578	154.013	3032.2	2131.70512	8340.78	4*(0.82*1.65)
	DB28	14.0.14	4.834	680.821		DB20	7.5	2.466	180.511	3553.9	914.61		
						DB25	5.3	3.853	188.026	3701.86	3.8955		
						DB28	4.2	4.834	176.924	3483.29	3050.21062		
						DB32	3.1	6.313	154.037	3032.68			

ตารางที่ ก-5 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

3ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ค้อนเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ค้อนเมตร	นนเหล็ก	ราคาเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	ทพช่องว่าง
D=0.6													
0.5*0.6	DB28	11.8.11	4.834	729.4506	0.5*0.5	DB20	7.5	2.466	180.5112	3553.905	2104.89076	11683.2	3(1.01*1.85)
	DB32	9.4.9	6.313	698.5966		DB25	5.3	3.853	188.0264	3701.864	874.84		
						DB28	4.2	4.834	176.9244	3483.288	5.088		
						DB32	4.2	6.313	231.0558	4549.027	2984.81876		
0.45*0.6	DB28	12.6.12	4.834	729.4506	0.45*0.45	DB20	9.7	2.466	240.6816	4738.539	2383.1244	10155.24	3(1.07*1.85)
	DB32	9.6.9	6.313	762.1054		DB25	6.4	3.853	235.033	4627.33	835.08		
						DB28	5.3	4.834	235.8992	4644.383	4.63644		
						DB32	4.2	6.313	231.0558	4549.027	3222.84084		
0.4*0.6					0.4*0.4								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 3 ช่อง

3ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	ราคาเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	พทช่องว่าง
D=0.7													
0.5*0.7	DB32	9.2.9	6.313	635.088	0.5*0.5	DB20	4.2	2.466	90.2556	1776.95	1475.1954	12410.4	3(1.01*1.65)
	DB28	11.2.11	4.834	583.56		DB25	3.1	3.853	94.0132	1850.93	722.09		
	DB28	12.0.12	4.834	583.56		DB16	6.4	1.578	96.258	1895.13	4.452		
						DB28	3.1	4.834	117.95	2322.19	2201.7374		
						DB32	2(0)	6.313	77.0186	1516.34			
0.45*0.7	DB25	12.10.12	3.853	658.94	0.45*0.45	DB16	8.6	1.578	134.761	2653.18	1803.4258	10848.6	3(1.07*1.65)
	DB28	12.2.12	4.834	632.191		DB20	6.4	2.466	150.426	2961.59	783.95		
	DB32	10.0.10	6.313	635.088		DB25	4.2	3.853	141.02	2776.4	4.12128		
						DB28	4.2	4.834	176.924	3483.29	2591.4971		
						DB32	3.1	6.313	154.037	3032.68			
0.4*0.7	DB28	12.2.12	4.834	632.1905	0.4*0.4	DB16	10.8	1.578	173.2644	3411.23	752.1056	9310.56	3*(1.14*1.65)
	DB32	10.0.10	6.313	635.0878		DB20	7.5	2.466	180.5112	3553.905	812.35		
						DB25	5.3	3.853	188.0264	3701.864	3.66336		
						DB28	4.2	4.834	176.9244	3483.288	1568.11896		
						DB32	4.2	6.313	231.0558	4549.027			
0.35*0.7	DB28	12.6.12	4.834	729.4506	0.35*0.35	DB16	11.9	1.578	192.516	3790.255	2119.23796	7855.68	3*(1.21*1.65)
	DB32	10.2.10	6.313	698.5966		DB20	7.5	2.466	180.5112	3553.905	775.43		
						DB25	5.3	3.853	188.0264	3701.864	3.1164		
						DB28	5.3	4.834	235.8992	4644.383	2897.78436		
						DB32	4.2	6.313	231.0558	4549.027			

ตารางที่ ก-7 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.60 เมตร ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

2ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	นน.ต่อเมตร	นนเหล็ก	นนเหล็กรวม	นนคอนกรีต	พทช่องว่าง
D = 0.6												
0.5*0.6	DB32	10.2.10	6.313	698.5966	0.5*0.5	DB28	8.6	4.834	412.8236	2666.37136	10573.2	2(1.765*1.85)
	DB28	15.0.15	4.834	729.4506		DB32	7.5	6.313	462.1116	1106.74		
	DB28	11.8.11	4.834	729.4506		DB25	10.8	3.853	423.0594	3.816		
										3776.92736		

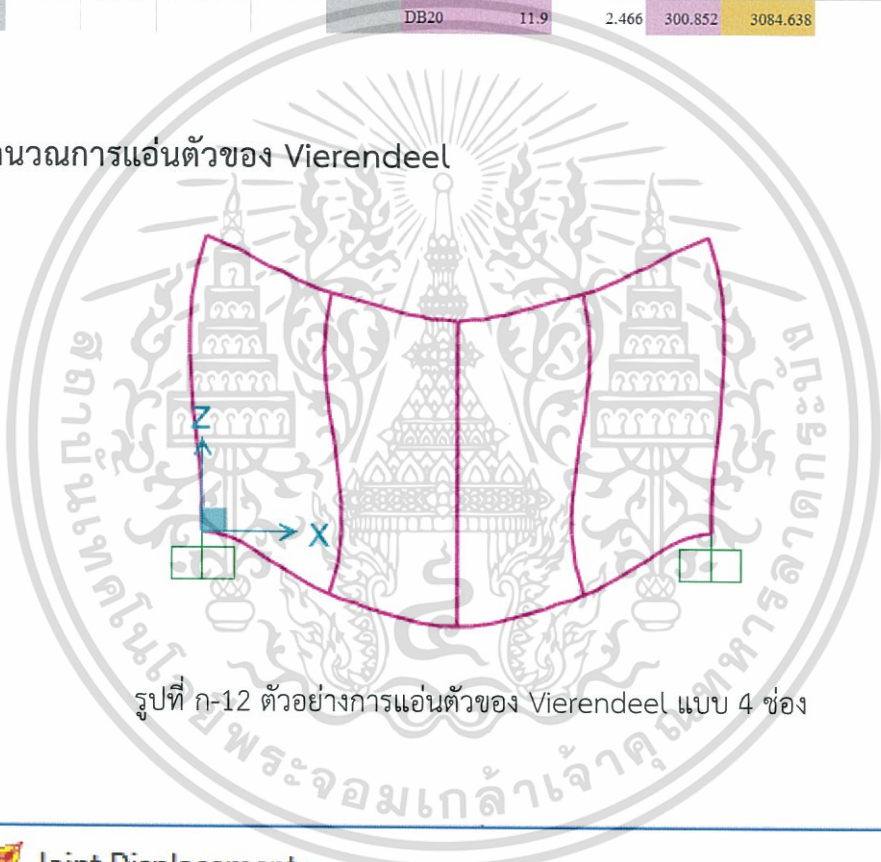
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-8 ตารางการคำนวณน้ำหนักเหล็กและคอนกรีตของ Vierendeel

ขนาดความลึกคานย่อย 0.70 เมตร ที่ช่องว่าง 2 ช่อง

2ช่อง	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	น.น.ต่อเมตร	น.น.เหล็ก	PILE	เหล็กที่ใช้	จัดเรียง	น.น.ต่อเมตร	น.น.เหล็ก	น.น.เหล็กรวม	น.น.คอนกรีต	ทพช่องว่าง
D = 0.7												
0.5*0.7	DB32	9.0.9	6.313	571.579	0.5*0.5	DB25	7.5	3.853	282.0396	1955.45844	11420.4	2(1.765*1.65)
	DB32	8.2.8	6.313	571.579		DB28	6.4	4.834	294.874	954.37		
	DB28	12.0.12	4.834	583.5605		DB20	10.8	2.466	270.7668	3.339		
	DB28	10.4.10	4.834	583.5605						2913.16744		
0.45*0.7	DB28	10.6.10	4.834	632.1905	0.45*0.45	DB32	6.4	6.313	385.093	2166.93704	11123.4	2(1.84*1.65)
	DB25	12.10.12	3.853	658.9401		DB28	7.5	4.834	353.8488	914.61		
						DB25	8.6	3.853	329.0462	3.09096		
						DB20	11.9	2.466	300.852	3084.638		

การคำนวณการแอ่นตัวของ Vierendeel



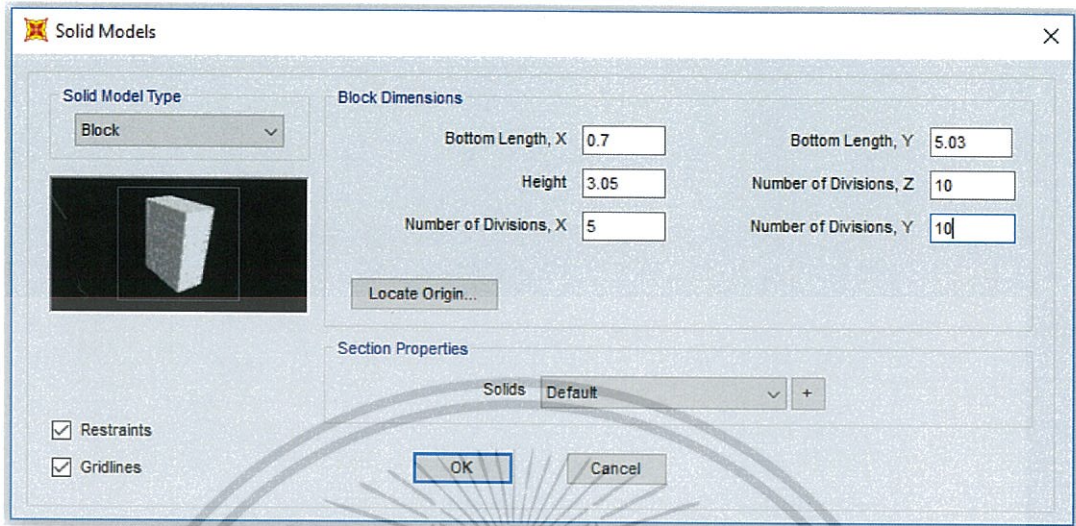
รูปที่ ก-12 ตัวอย่างการแอ่นตัวของ Vierendeel แบบ 4 ช่อง

Joint Displacements						
Joint	Object	Joint Element			8	8
		1	2	3		
Trans		0.	0.	-1.524E-04		
Rotn		0.	0.	0.		

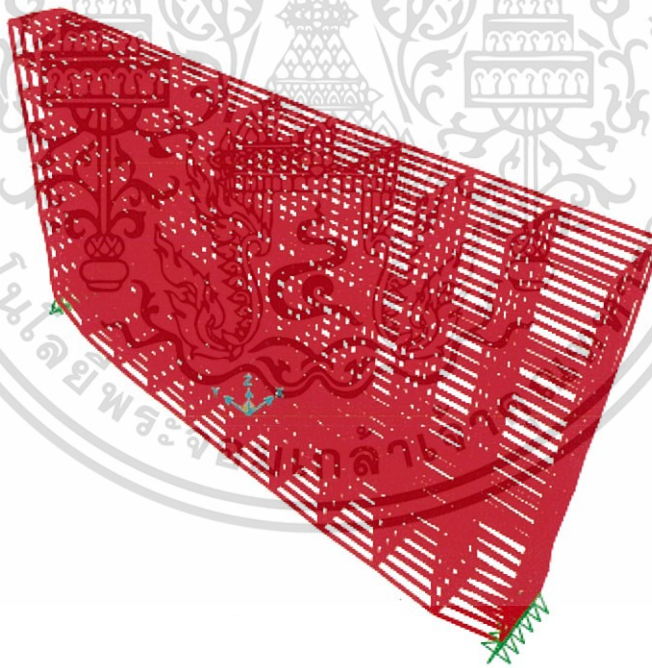
รูปที่ ก-13 ค่าการแอ่นตัวของ Vierendeel แบบ 4 ช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการแอ่นตัวของคานเหล็ก



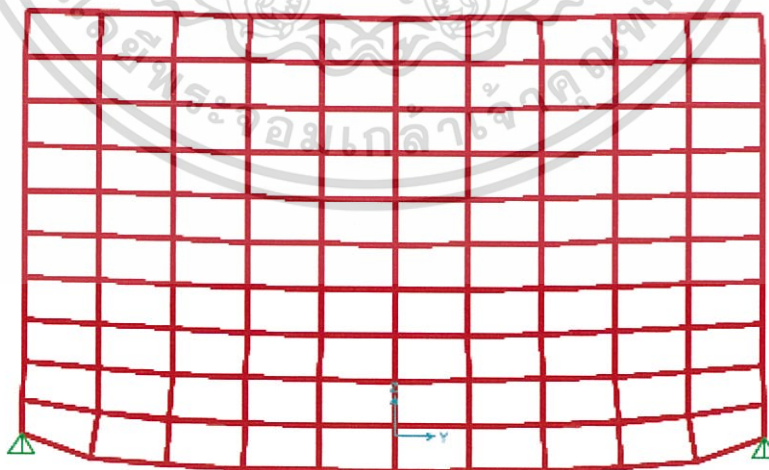
รูปที่ ก-14 การใช้ Solid Model ในการคำนวณการแอ่นตัวของคานเหล็ก



รูปที่ ก-15 รูปร่าง Solid Model ของคานเหล็ก

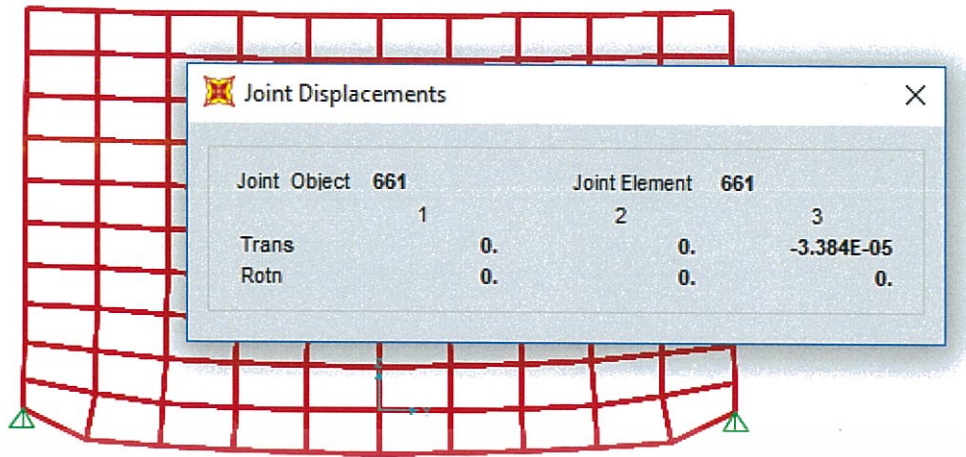
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-16 การใส่หน้าหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคานลึก



รูปที่ ก-17 ตัวอย่างการแอนตัวของคานลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-18 ตัวอย่างค่าการแอนตัวของคานลิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้