ศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารสูงโดยใช้โปรแกรม ETABS และ SAFE

A STUDY OF DESIGN GUIDELINE ON HIGH RISE BUILDING USING ETABS AND SAFE

นายอนุทธ์ โสดโยม

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

ศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารสูงโดยใช้โปรแกรม ETABS และ SAFE

A STUDY OF DESIGN GUIDELINE ON HIGH RISE BUILDING USING ETABS AND SAFE

นายอยุทธ์ โสตโยม

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

A STUDY OF DESIGN GUIDELINE ON HIGH RISE BUILDING USING ETABS AND SAFE

MR.AYUT SOTYOM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารสูงโดยใช้โปรแกรม ETABS และ SAFE
นักศึกษา	นายอยุทธ์ โสตโยม รหัสประจำตัว 53011882
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ สุพจน์ ศรีนิล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรโยธา
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงงานพิเศษ	**ลายมือชื่อ**
รศ.สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์	
อ. ปรีชานันท์ ศรีแก้ว	
อ. ทรงกลด แซ่อึ้ง	
ดร. อัฏฐวิทย์ สุจริตพงศ์	
ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 มีนาคม 2557 เวลา 14.00 – 16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารวิศวกรรมโยธาชั้น 2 (ห้อง CV–201)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ สุพจน์ ศรีนิล)

ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 31 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารสูงด้วยโปรแกรม ETABS และ SAFE
นักศึกษา	นายอยุทธ์ โสตโยม รหัสประจำตัว 53011882
อาจารย์ทีปรึกษา	อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์สุพจน์ ศรีนิล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารด้วยโปรแกรม ETABS และ SAFE เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอาคาร โดยขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วยการศึกษารูปแบบโครงสร้างของอาคารสูงประเภทต่างๆ ข้อกำหนดในการออกแบบอาคาร การสร้างแบบจำลองของอาคารและการใช้คำสั่งในโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบตามข้อกำหนด วิธีการใช้งานโปรแกรมในการวิเคราะห์ ตามด้วยการตรวจสอบแรงกระทำที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน และจากผลการการวิเคราะห์องค์อาคารเพื่อหาปริมาณเปอร์เซ็นเหล็กในโครงสร้างที่ทำการออกแบบ ในโครงงานพิเศษนี้ทางผู้ศึกษาได้เลือกอาคารสูงขนาด 5 ชั้น และ 40 ชั้น เพื่อใช้เป็นตัวอย่าง

Title	A STUDY OF DESIGN GUIDELINE ON HIGH RISE BUILDING USING ETABS AND SAFE
Student	MR.AYUT SOTYOM ID. 53011882
Advisor	MR. SONGKLOD SAE-UENG
Co-advisor	ASST.PROFESSOR SUPOJ SRINIL
Degree	BACHELOR OF ENGINEERING
Year	2013

ABSTRACT

This special project aims to study design guideline on high rise building using ETABS program and SAFE program. This study also contains of two example buildings, five-story building and forty-story buildings. First, the building has to be classified in to the appropriate building type in order to use the proper structure elements. Second, designers have to study how to use ETABS program and SAFE program. SAFE program is used in order to analyze and design slab (or structures that have behavior as plate); on the other hand, ETAB program is used to analyze and design the other structures (beam, column, etc.) After that, designer can define design criteria and parameters, and start modeling structure in ETABS program and SAFE program. Finally, designer can review the analysis results and use the results to design steel percentage that required in the cross section.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้ที่สำเร็จได้ เป็นเพราะการได้รับความกรุณาจากคณะกรรมการในการสอบโครงงานพิเศษและได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ก็คือ ท่านอาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวโครงงานพิเศษนี้จะสำเร็จไปไม่ได้ ถ้าขาด ท่านอาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง ได้ให้ความรู้ความเข้าใจ คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีตลอดมา ต้องขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงในความกรุณาของอาจารย์ที่ทำให้โครงงารพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบรูณ์ที่สุด

รองศาสตรจารย์ สุพจน์ ศรีนิล และรองศาสตรจารย์ สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำให้ความเอาใจใส่ปรึกษาปรับปรุงโครงงานพิเศษให้สมบูรณ์และสามารถใช้งานได้จริง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กล่าวนามมา และอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนวทางการศึกษาด้านวิศวกรรมโยธาและการปฏิบัติตัวให้เป็นวิศวกรที่ดีให้

ขอบพระคุณเป็นพิเศษ สำหรับ บริษัท ซีวิลปาร์ค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่สนับสนุนให้ความรู้ขั้นตอนกระบวนการออกแบบอาคารสูงโดยการใช้โปรแกรม ซึ่งต้องขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง

นอกจากนี้แล้ว ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยถามห่วงใยเรื่องโครงงานพิเศษนี้และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลา 4 ปี รวมทั้งเพื่อน ๆ ในสาขาวิศวกรรมโยธาที่คอยช่วยเหลืองานและคอยเป็นห่วงและคอยสอบถามโครงงานพิเศษนี้ตลอดเวลา

ห้องสมุดสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา,ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์,หอสมุดกลาง ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งเพาะความรู้และเป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญ

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้ามิอาจจะลืมกล่าวถึงขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ จนกระทั่งประสบความสำเร็จได้และเอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นายอยุทธ์ โสตโยม

ผู้จัดทำโครงงานพิเศษ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินโครงงาน	3
1.5 ผลประโยชน์ที่จะได้รับในการดำเนินงานโครงงานพิเศษ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ (Literature Review)	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
3.1 ชนิดของโครงสร้าง	6
3.2 ชนิดรูปแบบของอาคาร	8
3.2.1 ระบบโครงข้อแข็ง	9
3.2.2 ระบบกำแพงรับแรงเฉือน	10
3.2.3 ระบบโครงยึดทะแยง	11
3.2.4 ระบบแบบท่อสองชั้น	12
3.2.5 ระบบแบบท่อและมีค้ำยันในแนวทะแยง	13
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงและข้อกำหนดในการออกแบบ	20

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4 โปรแกรม ETABS เวอร์ชั่น 9.7	20
3.5 โปรแกรม SAFE เวอร์ชั่น 12	23
3.8 ทำไมจึงจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	24
3.9 แบบจำลองลักษณะชิ้นส่วนของโครงสร้าง	25
บทที่ 4 วิธีการใช้งานโปรแกรม	26
4.1 ขั้นตอนการนิยาม (Define)	29
4.1.1 ขั้นตอนการ Define Plan Grids และ Story Data	29
4.1.2 ขั้นตอนการ Define Material Properties	30
4.1.3 ขั้นตอนการ Define Frame Section	31
4.1.4 ขั้นตอนการ Define Slab Section	34
4.1.5 ขั้นตอนการ Define Load Cases	35
4.2 ขั้นตอนการวาดชิ้นส่วน (Draw)	35
4.2.1 การวาด Draw Beam Objects	35
4.2.2 การวาดเสา Draw Column Object (Frame Members)	37
4.3 ขั้นตอนการกำหนด (Assign)	39
4.3.1 ขั้นตอนการ Assign Slab Section	39
4.3.2 ขั้นตอนการ Assign Restrains	41
4.3.3 ขั้นตอนการ Assign Slab Loads	42
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง (Run Analysis)	46
4.4.1 ขั้นตอน Analysis Results Graphically	47
4.5 การออกแบบและตรวจสอบ	50
4.5.1 ขั้นตอนการ Design Concrete Frame Element	50
4.5.2 ขั้นตอน Dynamic Analysis and Design	53
4.6 ขั้นตอนนำข้อมูลมาใช้ใน SAFE	61
4.7 ขั้นตอนการออกแบบเหล็กพื้น	62

สารบัญ(ต่อ)

	เรื่อง	หน้า
บทที่	5 การวิเคราะห์โครงสร้าง	63
	5.1 แบบจำลองอาคาร 5 ชั้น	63
	5.2 แบบจำลองอาคาร 40 ชั้น	76
บทที่	6 สรุปและข้อเสนอแนะ	88
	6.1 สรุปผลการศึกษา	88
	6.2 ข้อเสนอแนะ	88
	หนังสืออ้างอิง	89

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
3.1	วิวัฒนาการของระบบโครงสร้างอาคาร	7
3.2	ชนิดของอาคาร (Building Type)	7
3.3	ระบบโครงข้อแข็ง	8
3.4	ระบบกำแพงรับแรงเฉือน	9
3.5	ระบบโครงยึดทะแยง	10
3.6	ระบบแบบท่อสองชั้น	11
3.7	ระบบแบบท่อและมีค้ำยันในแนวทะแยง	12
3.8	แสดงรูปแบบของโปรแกรม ETABS เวอร์ชัน 9.7	20
3.9	แสดงโมเดลของ ETABS	21
3.10	แสดงโมเดลของ ETABS	21
3.11	แสดงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม ETABS	22
3.12	แสดงรูปของโปรแกรม SAFE เวอร์ชั่น 12	23
3.13	แสดงโมเดลของโปรแกรม SAFE	23
3.14	เอลิเมนต์ 1 มิติ	25
3.15	เอลิเมนต์ 2 มิติ	25
3.16	เอลิเมนต์ 3 มิติ	26
3.17	แสดงตัวอย่างชนิดของเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ	26
4.1	แสดงแปลนอาคาร (ด้านหน้า)	21
4.2	แสดงแปลนอาคาร (ด้านข้าง)	22
5.1	ตัวอย่างโมเดลของอาคาร 5 ชั้น	63
5.2	แสดงค่าโมเมนต์ของจำลองของอาคาร 5 ชั้น	65
5.3	การแอ่นตัวของน้ำหนักกระทำของแบบจำลองอาคาร 5 ชั้น	66
5.4	แสดงน้ำหนักลงสู่ฐานรากแบบจำลองอาคาร 5 ชั้น หน่วยเป็น ตัน	67
5.5	แสดงพื้นที่เหล็กเสริมที่ใช้ในการออกแบบ	68
5.6	แสดงผลวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวจากโปรแกรม SAFE	69

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.7	ตัวอย่างโมเดลของอาคาร 40 ชั้น	76
5.8	ตัวอย่างแบบจำลองของอาคาร 40 ชั้น	77
5.9	แสดงค่าโมเมนต์ของกำแพงรับแรงเฉือน	80
5.10	แสดงพื้นที่เหล็กในกำแพงรับแรงเฉือน	81
5.11	แสดงการแอ่นตัวของพื้นไร้คาน	84
5.12	แสดงตัวอย่างผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ของพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE	85
5.13	แสดงผลวิเคราะห์ตัวอย่างหาปริมาณเหล็กพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE	86
5.14	การใส่เหล็กในเหล็กพื้นไร้คาน	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าน้ำหนักบรรทุกจรตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร	15
3.2	อัตราการลดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารสูง	16
3.3	แรงลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร	17
5.1	แสดงกำลังอัดของคอนกรีตในกำแพงรับแรงเฉือน	69
5.2	แสดงปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือน	82
5.3	แสดงการใส่เหล็กในกำแพงรับแรงเฉือน	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา (Problem Identification)

ประเทศไทยในยุคปัจจุบันนี้ได้นิยมการสร้างอาคารสูงเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้ที่ดิน เนื่องจากที่ดินมีราคาสูง โดยได้มีการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบคำนวณไว้ในหลายรูปแบบ และได้มีการนำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบอย่างแพร่หลาย ซึ่งในปัจจุบันโครงงานพิเศษสำหรับนักศึกษาเกี่ยวกับด้านนี้ยังมีอยู่น้อย ดังนั้นทางผู้ศึกษาจึงมีความตั้งใจในการศึกษาเกี่ยวกับการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปออกแบบอาคารสูง โดยอาคารสูง คือ อาคารที่บุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าใช้สอยได้ที่มีความสูงตั้งแต่ยี่สิบสามเมตรขึ้นไป การวัดความสูงของอาคารให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงพื้นดาดฟ้า สำหรับอาคารทรงจั่วหรือปั้นหยาให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด) โครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยล้วนแล้วแต่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการศึกษาการใช้โปรแกรมETABS และ SAFE ทำให้รู้ถึงความสามารถของโครงสร้างในการรับแรงหรือระบบพิกัดตำแหน่งของน้ำหนักที่กระทำและรู้พฤติกรรมของโครงสร้างว่าจะได้รับผลกระทบจากแรงที่กระทำอย่างไรบ้างและบอกถึงแบบจำลองของการรับน้ำหนักที่กระทำให้เกิดการวิบัติที่ชิ้นส่วนไหนของโครงสร้างข้อดีของการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คือความรวดเร็วแม่นยำในเวลาอันสั้นการคำนวณสามารถทำงานซ้ำไปมาได้ไม่จำกัด ซึ่งเข้ามาแทนจุดด้อยของมนุษย์ แต่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำงานแทนมนุษย์ในด้านการตัดสินใจ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.เพื่อศึกษาถึงรูปแบบโครงสร้างอาคารแบบต่างๆ และข้อกำหนดในการออกแบบอาคารสูง

2.ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลอง และกระบวนการทำงาน ETABS และ SAFE

3.แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงโดยใช้ตัวโปรแกรม ETABS และ SAFE

4.เพื่อให้บุคคลผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การศึกษาแนวทางการออกแบบอาคารสูง โดยใช้โปรแกรม ETABS และ SAFE มีขอบเขตครอบคุมดังนี้

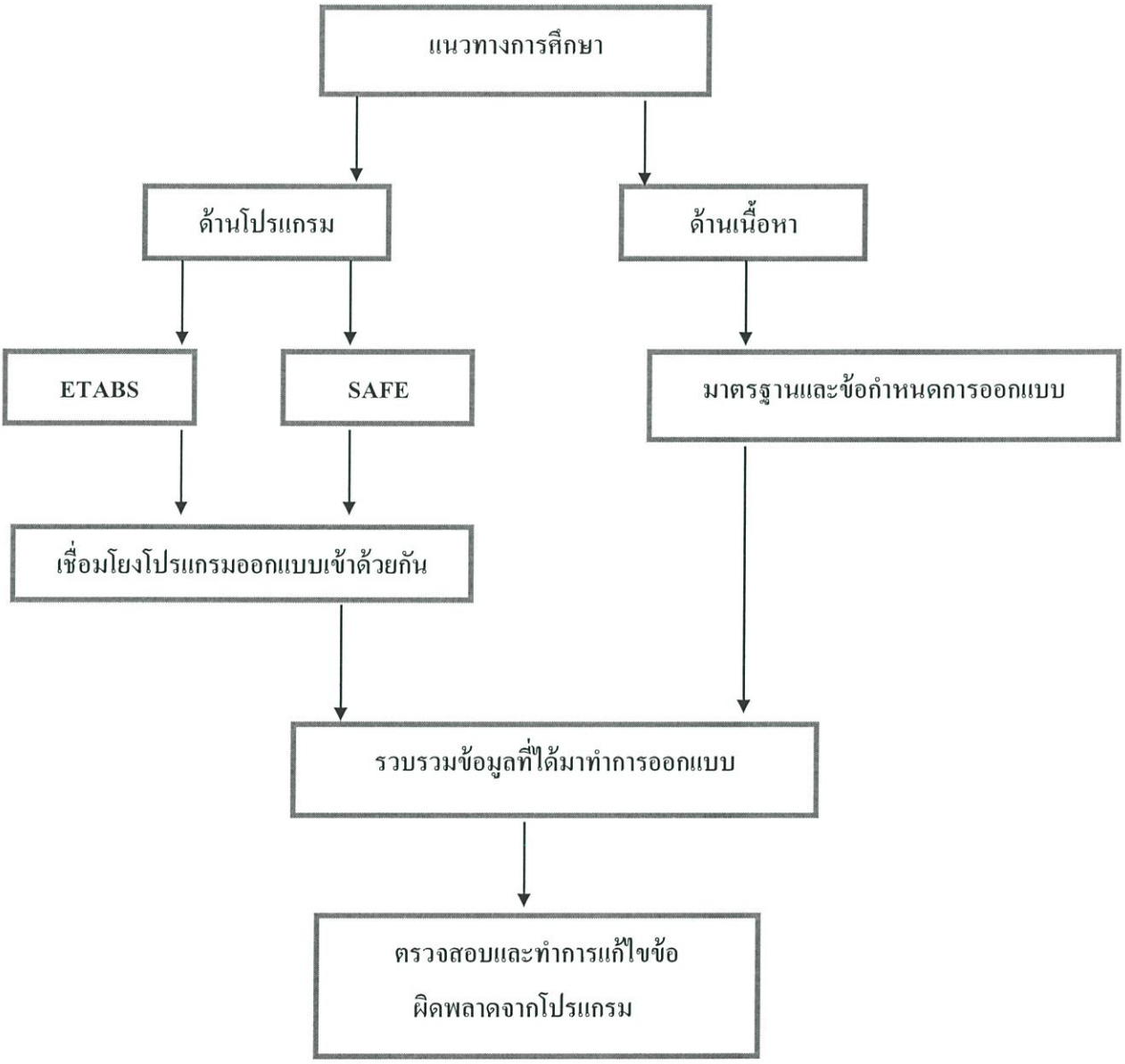
-รวบรวมเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโปรแกรม ETABS และ SAFE

-ศึกษาถึงวิธีการทำงานของตัวโปรแกรม ETABS และ SAFE

-ศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น

-ทำตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงโดยใช้ตัวโปรแกรม ETABS และ SAFE

1.4 วิธีดำเนินโครงงาน



1.5 ผลประโยชน์ที่จะได้รับในการดำเนินงานโครงงานพิเศษ

1.สามารถทราบพฤติกรรมของโครงสร้างจากการวิเคราะห์จากโปรแกรม

2.มีความรู้ความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างได้

3.สามารถนำผลการทดสอบพฤติกรรมการตอบสนองแบบจำลองไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

4.สามารถใช้สื่อการสอนและเป็นแนวทางแก่ผู้สนใจศึกษา

5.เป็นประโยชน์ให้บุคคลผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้

6.สามารถนำโปรแกรมมาใช้ช่วยในการออกแบบทำให้ประหยัดเวลาขึ้นมาก

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

โครงสร้างอาคารสูงอาจนิยามได้ต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับลักษณะงาน ประสบการณ์ และสถานที่ ถ้าพิจารณาตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร จะกำหนดให้อาคารสูงหมายถึงอาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไป ซึ่งก็ประมาณอาคารตั้งแต่ 7 ชั้นขึ้นไป แต่ในมุมมองของวิศวกรโครงสร้างมักจะพิจารณาว่าอาคารใดเป็นอาคารสูงเมื่ออาคารนั้นมีผลกระทบของแรงกระทำด้านข้างมากเมื่อเทียบกับแรงในแนวดิ่ง ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องคำนึงถึงผลกระทบของแรงกระทำด้านข้าง โดยอาจแยกแรงกระทำด้านข้างออกเป็น 2 กลุ่มคือ แรงลมและแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

2.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

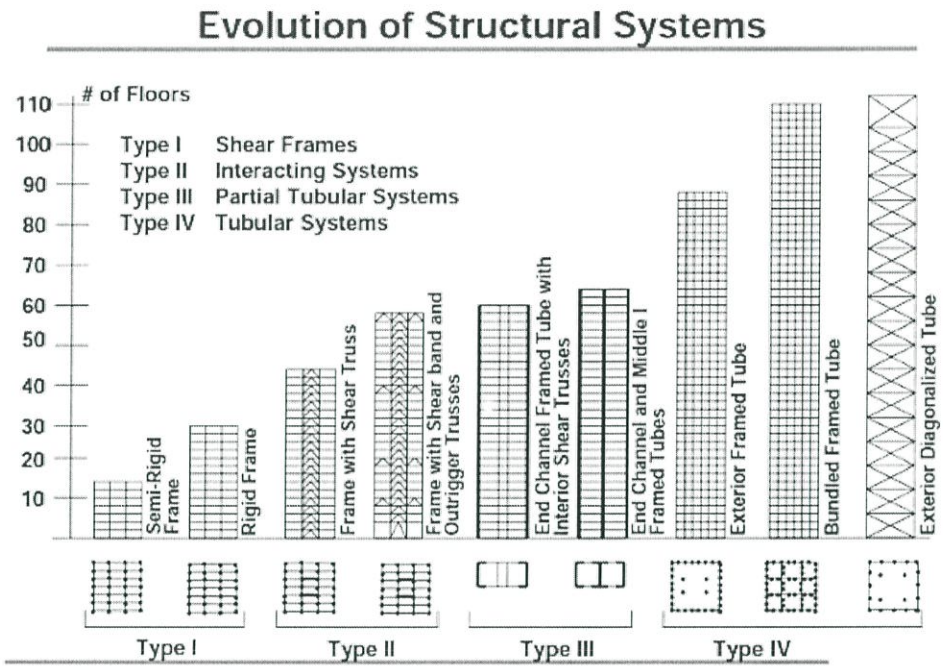
รศ.ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ : จากหนังสือการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กขั้นสูง กล่าวถึงทฤษฎีของการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงมีส่วนที่แตกต่างจากอาคารทั่วไปคือ จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบของแรงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในโครงสร้างอาคารสูง ผลกระทบของ แรงกระทำด้านข้างจะสงผลต่อการออกบบมากกว่าในอาคารที่ไม่สูง โดยแยกออกเป็น 2 กลุ่มของแรงด้านข้าง คือ แรงลมและแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว นอกจากต้องคำนึงถึงลักษณะของแรงที่แตกต่างกันแล้ว เรื่องพฤติกรรมของระบบโครงสร้างที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อการวิเคราะห์และออกแบบอาคารสูง เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว อาคารที่ไม่สูงจะใช้ระบบโครงข้อแข็งเพียงลำพัง แต่ในอาคารสูงมักจะต้องมีองค์อาคารอื่นเข้ามาช่วยในการรับแรงด้านข้างด้วย เช่น กำแพงรับแรงเฉือน เป็นต้น

ดร.ปิยวัชร ชัยเสรี : จากบทความเทคนิคก่อสร้างอาคารสูงพิเศษ (Engineering Techniques for Skyscrapers) อาคารสูงพิเศษจะต้องออกแบบให้รับแรงด้านข้างได้อย่างดี ซึ่งแรงด้านข้างที่กระทำาต่ออาคารก็คือ แรงลม และแรงแผ่นดินไหว สำาหรับหอไอเฟิล ซึ่งเคยเป็นโครงสร้าง ที่สูงที่สุดในโลกเมื่อราว 170 ปีที่แล้วนั้น วิศวกรได้ออกแบบโครงสร้างไปตามแนวโมเมนต์ (Moment Diagram) ทำให้ได้ โครงสร้างที่เบาและประหยัดที่สุด ซึ่งรูปร่างนี้ก็เป็นรูปร่าง เดียวกันกับพระปรางค์ วัดอรุณราชวราราม ซึ่งเคยเป็นโครงสร้างที่สูงที่สุดในประเทศไทยเมื่อราว 170 ปี ก่อนเช่นกันข้อจำ กัดของโครงสร้างประเภทนี้ คือจะต้องมีฐานที่กว้างใหญ่ ซึ่งจะกินพื้นที่ที่ดินมาก ดังนั้นในยุคต่อมาเมื่อมีการสร้างอาคารสูงพิเศษในเขตเมือง ที่มีพื้นที่ก่อสร้างจำกัด โครงสร้างลักษณะอื่นจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อให้ได้โครงสร้างที่สูงชะลูดในพื้นที่ที่จำกัด

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

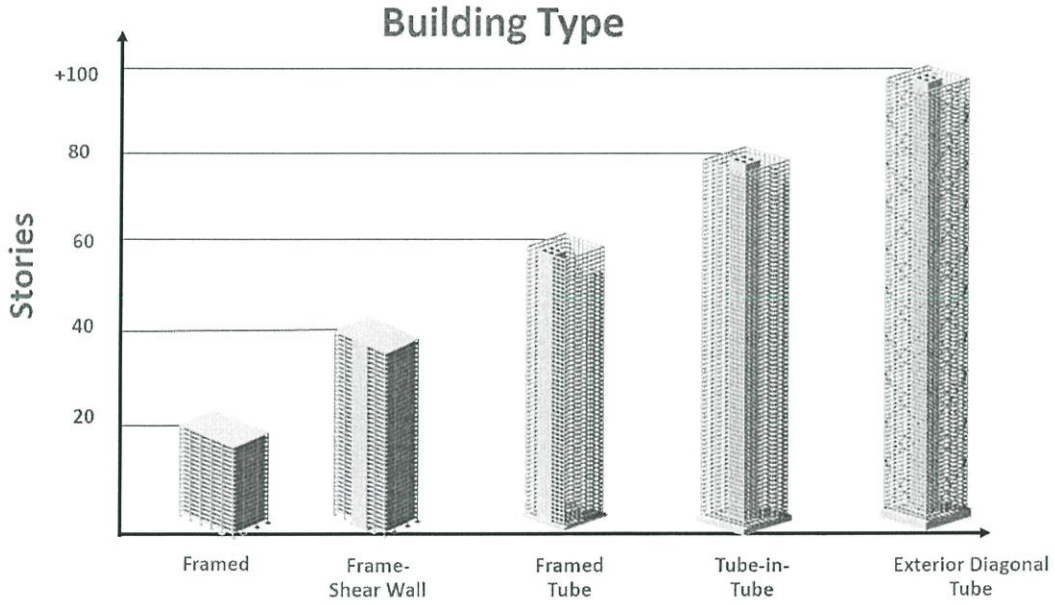
3.1 ชนิดของโครงสร้าง

การจำแนกประเภทระบบโครงสร้างอาคารสูง โดย ฟัซลูร์ ราฮ์มาน ข่าน (Fazlur Khan) ในปี ค.ศ. 1969 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของโครงสร้างและประสิทธภาพของโครงสร้าง สร้างเป็นแผนภาพ เรียกว่า "แผนภาพความสูง สำหรับโครงสร้างประเภทต่างๆ" นี้เป็นจุดเริ่มต้นพัฒนาเข้าสู่ยุคอาคารสูงสมัยใหม่โดยใช้โครงสร้างหลายๆชนิดร่วมกัน หลังจากนั้นก็ได้ทำการปรับปรุงแผนภาพใหม่ในปี ค.ศ. 1972 ฟัซลูร์ ราฮ์มาน ข่าน ได้โต้แย้งว่าโครงข้อแข็งซึ่งถูกใช้ในการออกแบบอาคารสูงเป็นหลักมานาน ไม่ควรใช้เป็นโครงสร้างเพียงอย่างเดียว ที่ใช้สำหรับระบบอาคารสูงเนื่องจากความเข้าใจที่ดีกว่าเดิมของกลศาสตร์วัสดุและพฤติกรรมของชิ้นส่วน (mechanics of material) ได้พัฒนาของยุคใหม่ของการปฏิวัติตึกระฟ้าในแง่ของระบบโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ



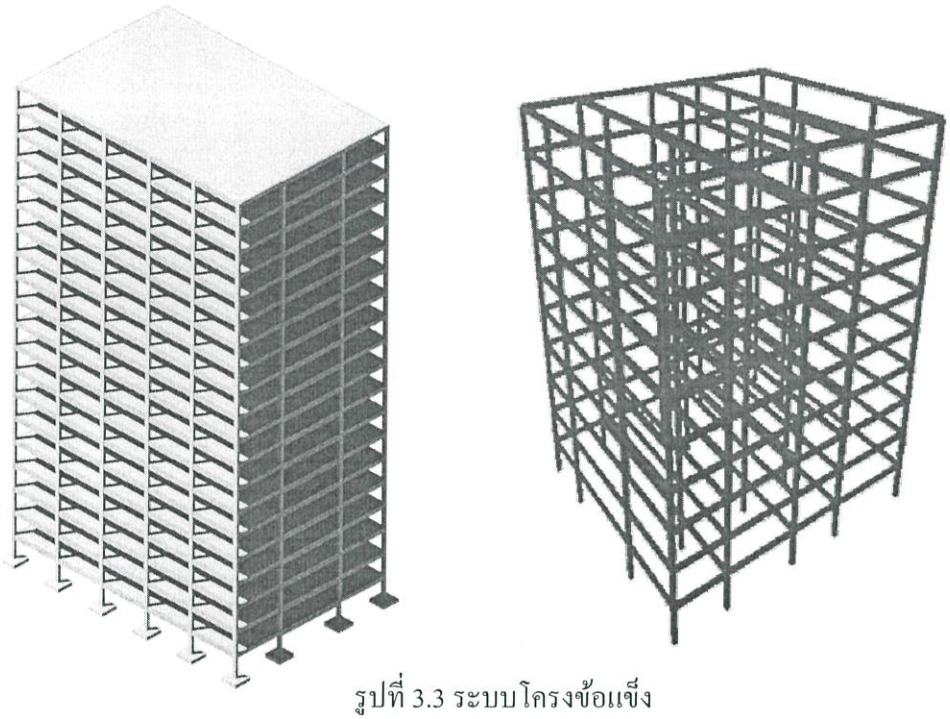
รูปที่ 3.1 วิวัฒนาการของระบบโครงสร้างอาคาร

(ที่มา : หนังสือ Design of Tall Buildings Preliminary Design and Optimization



รูปที่ 3.2 ชนิดของโครงสร้าง (Building Type)

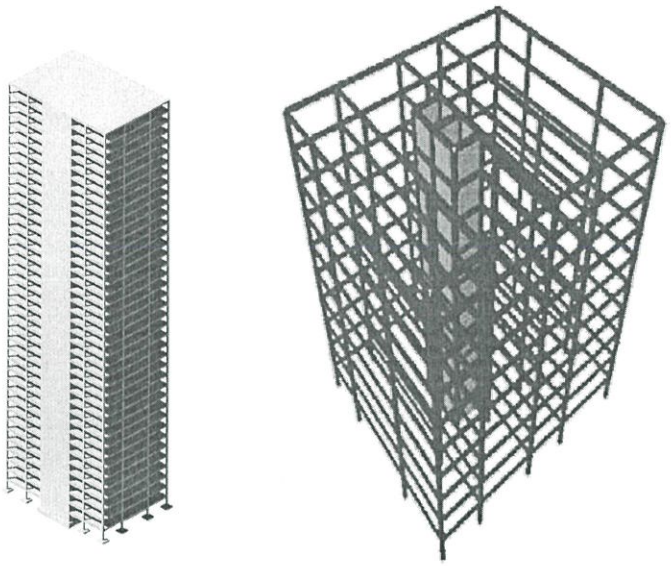
3.2 ชนิดรูปแบบของอาคาร



รูปที่ 3.3 ระบบโครงข้อแข็ง

3.2.1 ระบบโครงข้อแข็ง (Framed Systems)

เมื่อเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมพัฒนาขึ้นจนสามารถก่อสร้างโครงข้อแข็ง (Framed Structure) ได้ อาคารต่างๆ ที่มีความสูงมากขึ้นก็ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วย เหตุที่โครงข้อแข็งสามารถกระจายแรงในรูปต่างๆ ไปได้ทั่วทั้งโครงอาคาร ทำให้ทุกองค์อาคารช่วยกันรับแรงที่มาจากด้านข้างเหล่านั้นไปได้โครงสร้างระบบโครงข้อแข็งสามารถเป็นได้ทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กหรือโครงสร้างเหล็ก ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างอาคารได้สูงถึงประมาณ 50 เมตร เราสามารถพบเห็นโครงข้อแข็งได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยจะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างนั้นประกอบด้วย เสาและคานที่มีขนาดทัดเทียมกันโดยที่เสาและคานหลักจะยึดกันอย่างแข็งแรง น้ำหนักจะถ่ายเทจากคานไปสู่เสาจะซึ่งเกิดโมเมนต์ทั้งในเสาและในคาน จุดเชื่อมต่อระหว่างคานกับเสาร่วมกันเป็นกระบวนสำคัญของระบบการทำงาน โมเมนต์และแรงเฉือนเกิดขึ้นจากแรงกระทำทางด้านข้างจะต้องนำไปคิดรวมกับแรงในแนวดิ่ง



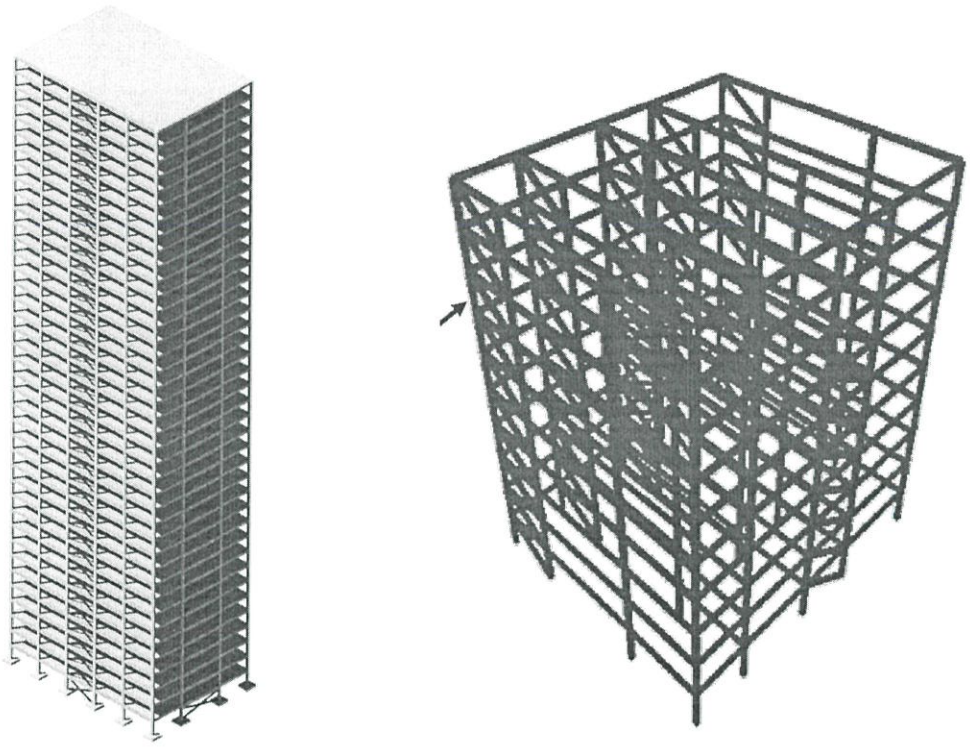
รูปที่ 3.4 ระบบผนังรับแรงเฉือน

3.2.2 วิธีเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแบบกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall System)

การสร้างอาคารแบบนี้จะใช้ผนังรับแรงฉือนไว้ตรงจุดบรรจบตรงกันข้ามกับอาคาร เพื่อช่วยเรื่องความแข็งแรงในทิศทางที่เฉพาะเจาะจง สาหรับอาคารที่มีความสูงมากขึ้น แรงด้านข้างที่กระทำก็ย่อมมีมากขึ้นด้วย โครงสร้างระบบโครงข้อแข็งไม่สามารถรับแรงด้านข้างได้เพียงพอ เราจึงจำเป็นต้องมีระบบโครงสร้างที่มีค่า Moment of Inertia มากกว่าเสาปกติทั่วไป ถ้าพูดง่ายๆ ก็คือ เป็นโครงสร้างที่มีความลึกต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปก็คือ ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆเช่น ผนังลิฟต์ หรือผนังบันไดหนีไฟ เป็นต้น สิ่งสำาคัญก็คือ ผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall) เหล่านี้จะต้องถูกยึดโยง กับองค์อาคารโดยรอบของอาคารนั้นๆ เพื่อเป็นการถ่ายแรง เข้ามา ถ้าผนังรับแรงเฉือนถูกยึดโยงด้วยเสาและคาน ที่เป็นโครงข้อแข็ง ทั้งผนังรับแรงเฉือนและโครงข้อแข็งก็จะช่วยกันรับแรงด้านข้าง แต่ถ้าเป็นโครงสร้างแบบพื้น ไร้คาน โครงสร้างหลักที่รับแรงด้านข้างก็คือ ผนังรับแรงเฉือน โดยแผ่นพื้นที่ค่อนข้างจะบางนั้น จะเป็นเพียงตัวถ่ายแรงด้านข้างจากภายนอกเข้ามาสู่ผนังรับแรงเฉือน กำแพงเป็นส่วนหนึ่งของโครงข้อแข็งทำงานร่วมกันกับชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งผนังรับแรงเฉือนจะมีประโยชน์เป็นพิเศษสำหรับอาคารที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งกำลังแรงลมจะปะทะด้านยาวของอาคารมากกว่าด้านอื่นๆการออกแบบภายในของอาคารจะโปร่งโล่ง วิธีนี้จะช่วยในเรื่องของความทนทานต่อการบิดเบี้ยวได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

-แรงกระทำทางข้างต้านทานโดยกำแพงในรูปแบบของแรงเฉือน

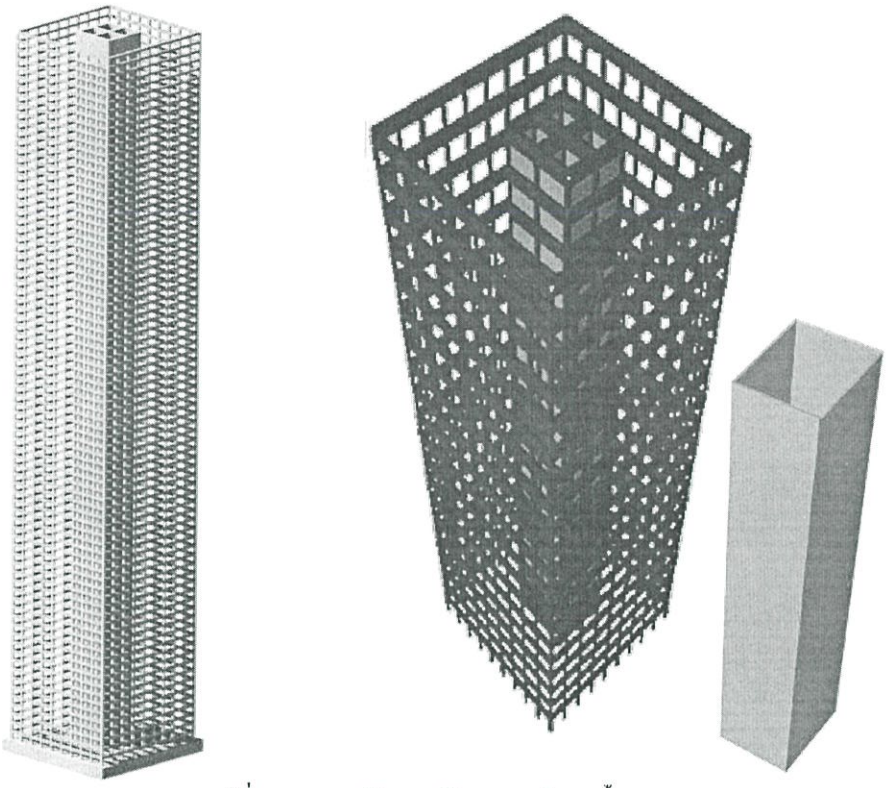
-น้ำหนักบางส่วนจะถูกต้านทานโดยโครงข้อแข็งในรูปของโมเมนต์และแรงเฉื่อน



รูปที่ 3.5 ระบบโครงยึดทะแยง

3.2.3 วิธีเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแบบโครงยึดทะแยง (Braced System)

โครงทรัสส์ หรือโครงยึดทะแยง เป็นโครงสร้างที่ เสริมเข้ามาเพื่อรับแรงด้านข้างโดยเฉพาะ ซึ่งเหมาะสำาหรับ อาคารที่มีขนาด เสา-คาน (โครงข้อแข็ง) และผนังลิฟต์-บันได (ผนังรับแรงเฉือน) ไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องเพิ่มโครงสร้างทรัสส์ หรือโครงยึดทะแยง โดยต้องยึดให้ถึงฐานรากหรือโครงสร้างอาคารในส่วนที่มั่นคงเพียงพอ โดยแรงด้านข้างจะถูกต้านโดยแรงในแนวแกนของชิ้นส่วนค้ำยันของเสาและคานพื้นที่บริเวณที่มีการค้ำยัน โครงข้อแข็งที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่ค้ำยันจะไม่มีโมเมนต์เกิดขึ้นในปริมาณมาก โครงยึดทะแยงไม่จำเป็นที่จะต้องมีทุกๆช่วงของเสา แต่โครงยึดทะแยงควรมีในทุกๆชั้น เช่น อาคารใบหยก 2 และอาคารชาเตอร์สแควร์ ถนนสาทรเหนือ เป็นอาคารที่ใช้ระบบโครงยึดทะแยงเพื่อรับแรงด้านข้าง แต่เราจะมองจากภายนอกไม่เห็นเพราะโครงเหล่านั้นถูกปิด โดยผนังภายนอก แต่สาหรับอาคารที่มีการนำโครงยึดทะแยง นี้มาอยู่ภายนอกให้เห็นอย่างสวยงาม ระบบนี้มีความเบาของตัวอาคารมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบพื้นยึดแน่น เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้พื้นยึดแน่น ระบบโครงค้ำยันนี้จะมีความยากในการก่อสร้างมากกว่ารายละเอียดด้านหน้าของอาคารที่น่าสนใจแต่ให้ราคาที่สูง



รูปที่ 3.6 ระบบโครงสร้างแบบท่อ 2 ชั้น

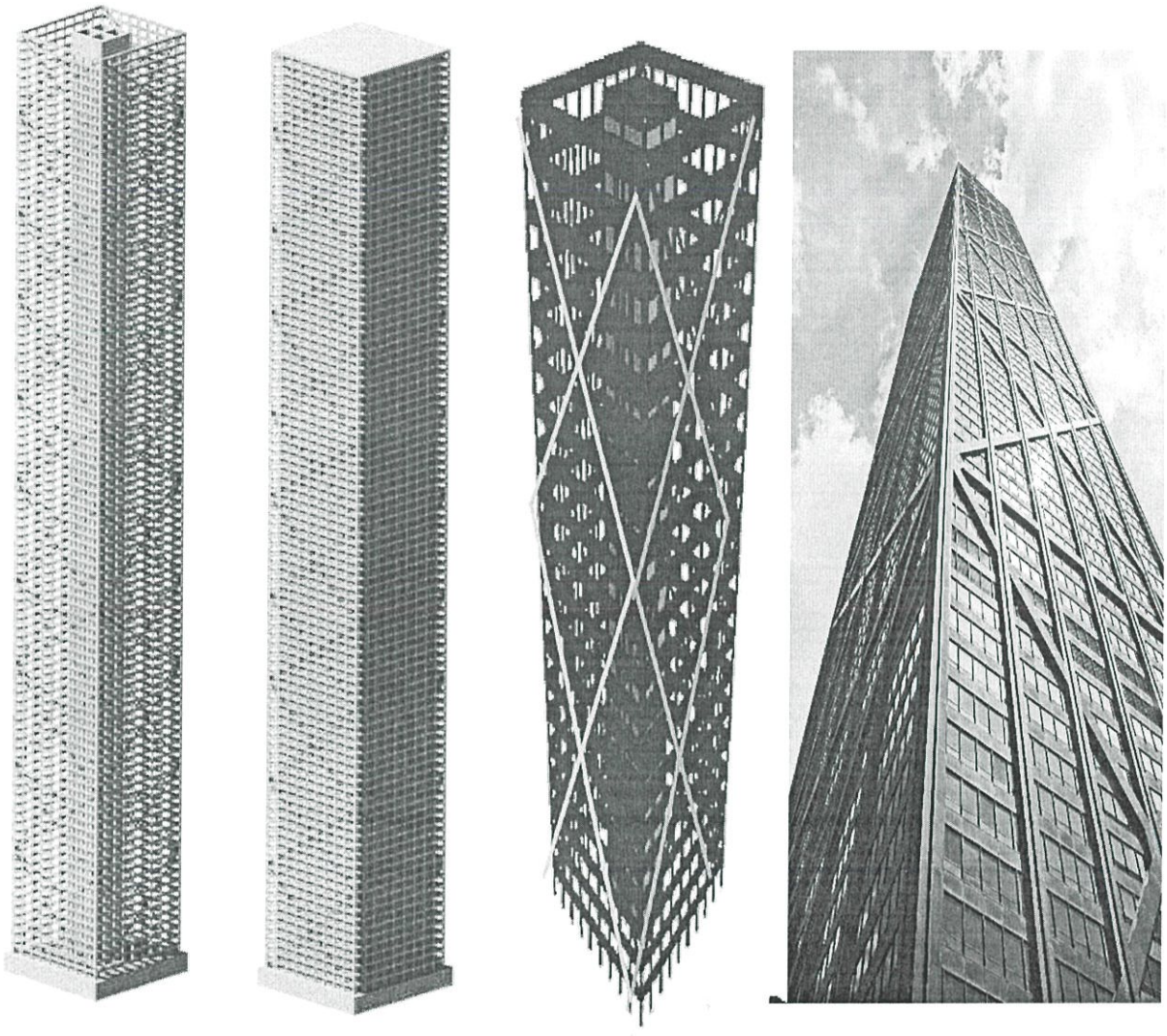
3.2.4 วิธีในการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแบบท่อ 2 ชั้น (Tube in Tube)

เช่นเดียวกับสิ่งต่างๆ ในธรรมชาติเมื่อมีความสูงมาก ก็มักจะต้านทานแรงลมไม่ไหว ในที่สุดก็จะหักโค่นหรือพังทลายลงมา แต่มีสิ่งที่สูงชะลูดและคงทนต่อแรงลมด้านข้าง นั้นก็คือ ต้นไผ่ วิศวกรได้นำแนวคิดจากต้นไผ่มาใช้กับอาคาร สูงพิเศษ โดยทำาเป็นระบบโครงท่อข้อแข็ง ซึ่งประกอบด้วย เสา เรียงเป็นแถวรอบนอกของอาคารและเชื่อมโยงกันด้วย คานขนาดใหญ่เหมือนกับต้นไผ่ ซึ่งมีท่อน้ำาเลี้ยงเล็กๆ อยู่โดยรอบ และมีข้อปล้องรัดอยู่เป็นระยะๆ และโครงสร้างนี้จะมีความคงทนต่อแรงด้านข้าง และมีความอ่อนตัวสามารถโยกเอนได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ระบบนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่างแบบแกนกลางและระบบท่ออุโมงค์ ระบบท่อหรืออุโมงค์นี้ทำให้อาคารมีความแข็งแกร่งในการรับน้ำหนักในทุกทิศทางแถมอาคารยังมีความต้านทานการบิดตัวสูงอีกด้วย

ระบบนี้จะต้องใช้วิธีในการเจาะช่องหน้าต่าง จึงมีข้อจำกัดของจำนวนช่องเปิดรับแสง

-แกนใจกลางของอาคารทำให้เสียพื้นที่ไปมาก

การออกแบบที่แข็งแกร่งเช่นนี้จะใช้กับอาคารที่มีความสูงมากๆ



รูปที่ 3.7 ระบบโครงสร้างแบบท่อและมีค้ำยันในแนวทะแยง

3.2.5 ระบบโครงสร้างแบบท่อและมีค้ำยันในแนวทะแยง (Exterior Diagonal Tube System)

โครงถักจะเชื่อมต่อระหว่างเสาภายนอกทั้งหมดรวมรูปแบบกล่องแข็งโดยจะป้องกันการเฉือนด้านข้าง ชิ้นโครงถัก ส่วนป้องกันแรงดัดและช่องว่างระหว่างเสาค่อนข้างกว้างสามารถทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ที่ชัดเจนในของหน้าต่าง โดยส่วนใหญ่เป็นลักษณะของอาคารเหล็ก ท่อในเส้นทแยงมุมด้านข้างไม่เพียง แต่รูปแบบโครงในแผนแต่ยังมีปฏิสัมพันธ์กับโครงในโครงถักด้านนอกตั้งฉากจะมีผลต่อพฤติกรรมของท่อนี้สร้างรูปแบบ x ระหว่างเสามุมในแต่ละอาคาร

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูงและข้อกำหนดในการออกแบบ

กระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลังต้องเป็นน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า (Factored Load; U) ที่คูณด้วยตัวคูณแรง (Load Factors) แล้ว ตัวคูณเหล่านี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่ใช้

ข้อกำหนดของ ACI 318-99 กำหนดน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่ า (Factored Load; U)

U= 1.4D + 1.7L

U= 0.75(1.4D + 1.7L +1.7W)

U= 0.9D + 1.3L

U= 1.05D + 1.28L +1.40E

U= 0.9D + 1.43E

U= 1.4D + 1.7L +1.7H

U= 0.75(1.4D + 1.7L +1.7L)

U= 1.4(D + T)

แต่ข้อกำหนดของ ACI 318-02 ได้มีการปรับการคำนวณน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า (Factor Load; U) ตามASCE 7-98 โดยใช้ค่าไม่น้อยกว่าสมาการต่อไปนี้

U= 1.4(D + F)

U= 1.2(D + F + T) +1.6(L + H) + 0.5(Lr or S or R)

U= 1.2D + 1.6(Lr or S or R) + (1.0Lr or S or R)

U= 1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(Lr or S or R)

U= 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S

U= 0.9D + 1.6W + 1.6H

U= 0.9D + 1.0E + 1.6H

โดยที่ D = น้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead Load)

L = น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

Lr = น้ำหนักบรรทุกจรบนหลังคา (Roof Live Load)

W = แรงกระทำเนื่องจากแรงลม (Wind)

F = น้ำหนักหรือแรงดันจากดินหรือน้ำใต้ดิน (Fluid)

H = แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว (Soil)

E = แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquake)

T = ผลของอุณหภูมิ การคืบ การหดตัว และการทรุดตัวที่แตกต่างกัน

S = น้ำหนักหิมะ (Snow)

R = น้ำหนักฝน (Rain)

ในการเลือกใช้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า จะต้องเลือกใช้ให้สอดคล้องกับข้อกำหนด ไม่ควรนำมาผสมกันโดยม่มีการศึกษาในรายละเอียด เนื่องจากแต่ละข้อกำหนดอาจมีแนวคิดพื้นฐานที่ต่างกัน เช่น ใน ACI 319-99 และ ACI 318-02 ก็ยังไม่มีส่วนที่แตกต่างกันอยู่มาก ไม่ใช่เพียงน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่าที่แตกต่างกัน ยังมีส่วนเกี่ยวข้องในการเพิ่มน้ำหนักคือการลดกำลังของอาคาร (Strength Reduction) ก็แตกต่างกัน

1.แรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical Force)แรงกระทำในแนวดิ่งหรือน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Load) ซึ่งมีทั้งน้ำหนักตายตัว (Dead Load) ซึ่งเป็นน้ำหนักของตัวโครงสร้างหรืออาคารเอง รวมกับน้ำหนักของสิ่งของที่อยู่ติดกับอาคารน้ำหนักบรรทุกตายตัวนี้มักไม่มีปัญหากับการวิเคราะห์ออกแบบ เนื่องจากมีลักษณะคงที่ ส่วนน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ซึ่งเกิดจากการใช้งาน การอยู่อาศัย ซึ่งสำหรับอาคารสูงจะมีข้อกำหนดบางประการที่ต่างกับอาคารที่ไม่สูง แต่ก็มีส่วนที่เหมือนกับการวิเคราะห์ทั่วไปคือ ต้องพิจารณาถึงรูปแบบการวางน้ำหนักบรรทุกจร (Load Pattern)

ตารางที่ 3.1 ค่าน้ำหนักบรรทุกจรตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร จากกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527)

ประเภทและส่วนต่างๆ ของอาคาร	หน่วยน้ำหนักบรรทุกจร (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
(1) หลังคา	30
(2) กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
(3) ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
(4) ห้องแถว ตึกแถวที่ใช้พักอาศัย อาคารชุด หอพัก โรงแรม และห้องคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
(5) สำนักงาน ธนาคาร	250
(6) (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน โรงพยาบาล	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม สำนักงานและธนาคาร	300
(7) (ก) ตลาด อาคารสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องอ่านหนังสือในห้องสมุดหรือหอสมุด ที่จอดหรือเก็บรถยนต์นั่ง หรือรถจักรยานยนต์	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของอาคาร พาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัยและโรงเรียน	400
(8) (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑ์ อัฒจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด อาคารสรรพสินค้า ห้องประชุม หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องสมุดและหอสมุด	500
(9) ห้องเก็บหนังสือของห้องสมุดหรือหอสมุด	600
(10) ที่จอดหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่า	800

2.น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) น้ำหนักบรรทุกจรสำหรับการใช้งานต่างๆถูกกำหนดตามพฤติกรรมการใช้งานในแต่ละพื้นที่ จึงมีข้อกำหนดที่ยอมให้มีการลดขนาดของน้ำหนักบรรทุกจรเมื่อมีการถ่ายแรงจากชั้นบนลงไปยังชั้นล่างๆ ตาม พ.ร.บ ควบคุมอาคาร ยอมให้ลดน้ำหนักบรรทุก ทั้งนี้การลดน้ำหนักดังกล่าว ควรใช้เมื่อรู้พฤติกรรมอย่างแท้จริง หากไม่มีข้อมูลที่ชัดเจน ไม่ควรใช้การลดน้ำหนักดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่มีโอกาศเกี่ยวข้องกับคนจำนวนมากหรือเป็นอาคารสาธารณะต้องออกแบบให้น้ำหนักบรรทุกเต็มจำนวน

ตารางที่ 3.2 อัตราการลดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารสูง จากกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527)

การรับน้ำหนักของพื้น	อัตราการลดหน่วยน้ำหนักบรรทุกจรบนพื้นแต่ละชั้น เป็นร้อยละ
(1) หลังคาหรือดาดฟ้า	0
(2) ชั้นที่หนึ่งถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	0
(3) ชั้นที่สองถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	0
(4) ชั้นที่สามถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	10
(5) ชั้นที่สี่ถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	20
(6) ชั้นที่ห้าถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	30
(7) ชั้นที่หกถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	40
(8) ชั้นที่เจ็ดถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้าและชั้นต่อลงไป	50

3.แรงลม (Wind Load) การประทะของลมเป็นแรงตามธรรมชาติ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ รูปแบบของอาคารและการไหลเวียนของอากาศ เป็นต้น ในการคำนวณแรงกระทำเนื่องจากการปะทะของลมทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การคำนวณด้วยแรงสถิตเทียบเท่า การคำนวณด้วยวิธีพลศาสตร์และอุโมงค์ลม เป็นต้น ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. ได้กำหนดวิธีการคำนวณแรงลมไว้ 3 วิธี คือ

-วิธีการอย่างง่าย (Main Wind Resistant System ใช้กับโครงสร้างอาคารเตี้ยและอาคารสูงปานกลางที่มีความสูงไม่เกิน 120 เมตร และความสูงไม่เกิน 4 เท่าของความกว้าง

-วิธีอย่างละเอียด ใช้กับโครงสร้างที่มีความสูงเกิน 120 เมตร หรือมีความสูงเกิน 4 เท่าของความกว้างและอาคารที่มีน้ำหนักเบา และมีความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และคุณสมบัติความหน่วง (Damping Properties) ของอาคารต่ำ

-วิธีโดยการทดสอบอุโมงค์ลม ซึ่งใช้กับโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษ หรือกรณีที่ต้องการทราบพฤติกรรมที่แน่ชัดของอาคารภายใต้แรงลม

ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคาร ให้คำนึงถึงแรงลมด้วย หากจำเป็นต้องคำนวณและไม่มีเอกสารที่รับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้ ให้ใช้หน่วยแรงลม ดังต่อไปนี้

ความสูงของอาคารหรือส่วนของอาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อย กิโลปาสกาล (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
(1) ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5 (50)
(2) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8 (80)
(3) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2 (120)
(4) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	1.6 (160)

ตารางที่ 3.3 แรงลมตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร

4. แรงกระทำที่เคลื่อนที่ (Dynamic Load)

Dynamic Load แรงกระทำเกิดขึ้นต่อตัวอาคาร มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างฉับพลัน
แรงกระทำโดยลมอย่างสม่ำเสมอจะไม่ถูกเรียกว่า Dynamic Load
Dynamic Load เป็นแรงลมที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรง อย่างรวดเร็วและหายไป
การระเบิดหรือการที่เครื่องบินชนตึกเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของ Dynamic Load

5. แรงจากแผ่นดินไหว (Earthquake Load)

แผ่นดินไหวเป็นหนึ่งในความหายนะที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำโดยธรรมชาติ ยากที่จะสามารถเตือนภัยล่วงหน้าได้และส่วนใหญ่จะเกิดและสิ้นสุดลงในระยะเวลาประมาณ 10-20 วินาที
อาคารสูงในบางพื้นที่อาจจะไม่ต้องคำนึงถึงแผ่นดินไหว
พื้นที่สถาปนิกและวิศวกรต้องออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับแรงกระทำจากแผ่นดินไหว ได้แก่ แถบ California,Seattle ของอเมริกา แถบอเมริกาใต้ แถบริมมหาสมุทรแปซิฟิก เช่น ชิลี, เปรู, เม็กซิโก หรือแถบทะเลเมดิเตอเรเนียน เช่น โมรอคโค, กรีก, อีตาลี, ตุรกี ฯลฯ รวมไปถึง แถบเทือกเขาหิมาลัย เช่น จีน, อินเดีย และอิหร่าน
สถาปนิก วิศวกร ในเขตดังกล่าวควรจะเข้าใจผลกระทำของแรงจากแผ่นดินไหว เพื่อว่าจะได้ออกแบบโครงสร้างที่แข็งแรงเพียงพอและออกแบบอาคารเผื่อไว้สำหรับการหนีภัยจากแผ่นดินไหว
เปลือกโลกประกอบด้วยแผ่นผิวดินหลายแผ่นที่วางอยู่บนส่วนของเหลวใจกลางโลก แต่ละแผ่นเปลือกดินมีการเคลื่อนที่เล็กน้อยประมาณ 3 นิ้วทุกปี ระหว่างรอยต่อของเปลือกโลกที่เคลื่อนที่ในอัตราที่ต่างกันจะเกิดการเสียดทานและเกิดแรงดัน เกิดการเลื่อนตัวอย่างฉับพลันรุนแรงเป็นแผ่นดินไหว แรงกระทำต่ออาคารมักจึงเป็นแรงในแนวนอนอย่างฉับพลันเป็นหลัก
อาคารอาจจะใช้หลักการเดียวกับการออกแบบโครงสร้างเพื่อรับแรงลมหรือแรงกระทำในแนวนอนอื่นๆ แต่รุนแรง ฉับพลันกว่า เช่น Bracing หรือ Damper
ความถี่ในรูปแบบคลื่นจะน้อยลงเมื่อห่างจากจุดกำเนิดคลื่นมากขึ้น ดังนั้นอาคารสูงจึงได้รับผลกระทบจาก แผ่นดินไหวน้อยกว่าอาคารไม่สูง รวมทั้งอาคารมีการออกแบบเผื่อแรงกระทำแนวนอนอยู่แล้วด้วย
มาตราส่วนวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีหน่วยเป็น ริกเตอร์ โดยแต่ละริกเตอร์มีความแตกต่างกันประมาณ 32 เท่า มีระดับอยู่ระหว่าง 3-9
แผ่นดินไหวในระดับ 4-5 ริกเตอร์ ทำความเสียหายแก่อาคารเล็กน้อย มากกว่า 6 ริกเตอร์ถือว่ามีความรุนแรงในขณะ ที่ถ้ามากกว่า 8 ริกเตอร์ถึงว่าเป็นแผ่นดินไหวครั้งใหญ่

6. แรงกระทำที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Load)

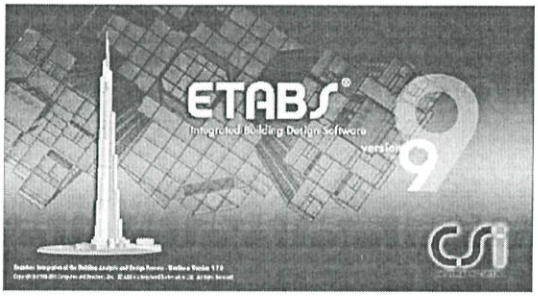
แรงกระทำนี้เกิดขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในแต่ละฤดูหรือแต่ละช่วงเวลา เมื่อโครงสร้างของอาคารได้รับความร้อนในแต่ละจุดไม่เท่ากันจะเกิดการขยายตัวไม่เท่า สามารถเป็นปัญหาใหญ่ต่อระบบโครงสร้างโดยรวมได้โดยเฉพาะอาคารสูง

ภายในอาคารถูกออกแบบให้มีอุณหภูมิคงที่เพื่อความสบายในการอยู่อาศัย ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นที่อยู่ภายนอกหรือติดกับภายนอกมีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดเวลา ทำให้สองส่วนนี้มีการขยายหรือหดตัวไม่เท่ากันส่วนประกอบของโครงสร้างอาคารหลายๆ ส่วนจึงควรออกแบบให้เผื่อการขยายหรือหดตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดมโบราณมีการขยายตัวของส่วนฐานทำให้เกิดรอยแยก อาจจะต้องมีการออกแบบวงแหวนยึดรอบฐาน

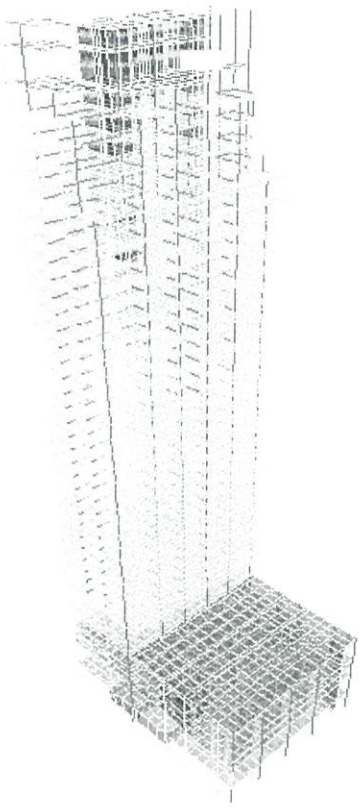
ในอาคารสูงเสาที่อยู่ภายในและภายนอกจะมีการขยายและหดตัวไม่เท่ากัน เพื่อป้องกันการแตกร้าวหรือเสียหาย รอยต่อระหว่างเสาและคานอาจจะออกแบบให้สามารถเคลื่อนตัวได้

3.4 โปรแกรม ETABS เวอร์ชั่น 9.7

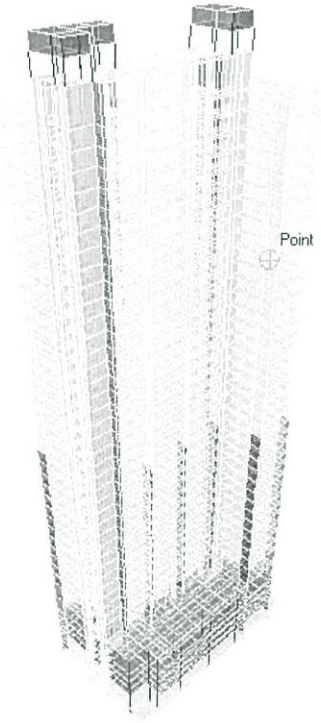
การที่จะสร้างแบบจำลองที่มีความซับซ้อนแบบสามมิตินั้นเป็นเรื่องที่ยากมากถ้าหากไม่นำเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัยมาช่วย ดังนั้นจึงได้นำโปรแกรม ETABS เวอร์ชั่น 9.7 มาช่ายในการสร้างแบบจำลองหลัก วิเคราะห์และออกแบบแบบจำลองหลักของอาคารส่วนแบบจำลองของส่วนประกอบที่เป็นพื้นและผนังได้นำโปรแกรม SAFE เวอร์ชั่น 12 มาใช้ในสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์ และออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบต่างๆนั้นได้ทำการเชื่อมโยงกับแบบจำลองหลักเพื่อป้องกันการผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบต่างๆ โดยใช้การเชื่อมกันของโปรแกรมETABS เป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพื้นฐานของไฟไนต์อิลิเมนต์ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในการออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ระบบอาคาร



รูปที่ 3.8 แสดงรูปของโปรแกรม **ETABS เวอร์ชั่น 9.7**

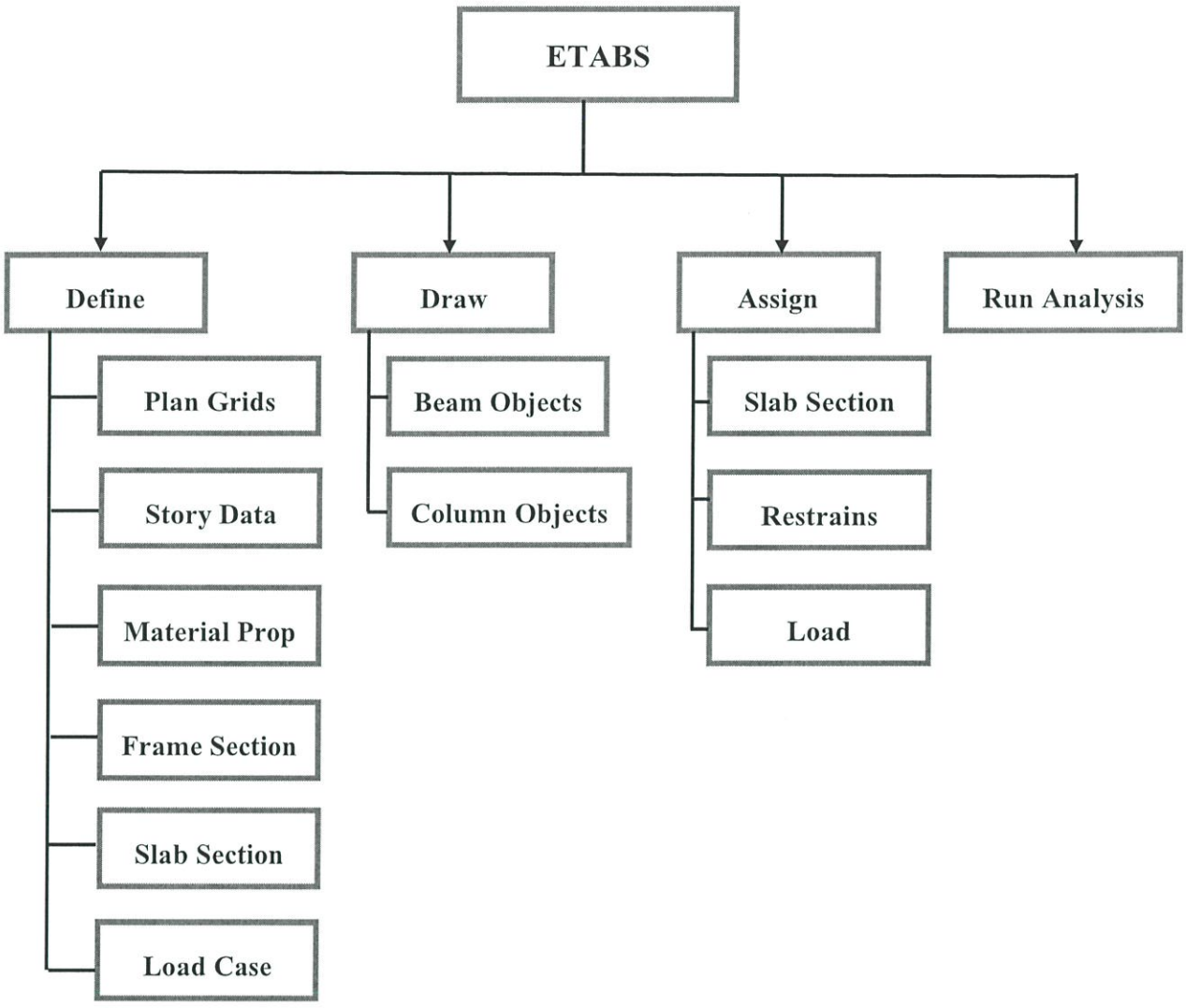


รูปที่ 3.9 แสดงโมเดลของโปรแกรม ETABS



รูปที่ 3.10 แสดงโมเดลของโปรแกรม ETABS

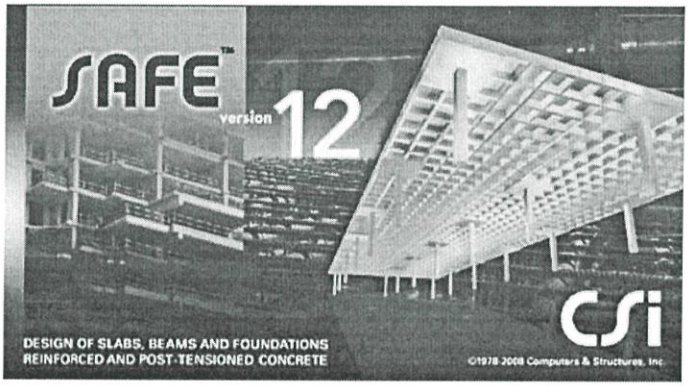
ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม ETABS เวอร์ชั่น 9.7



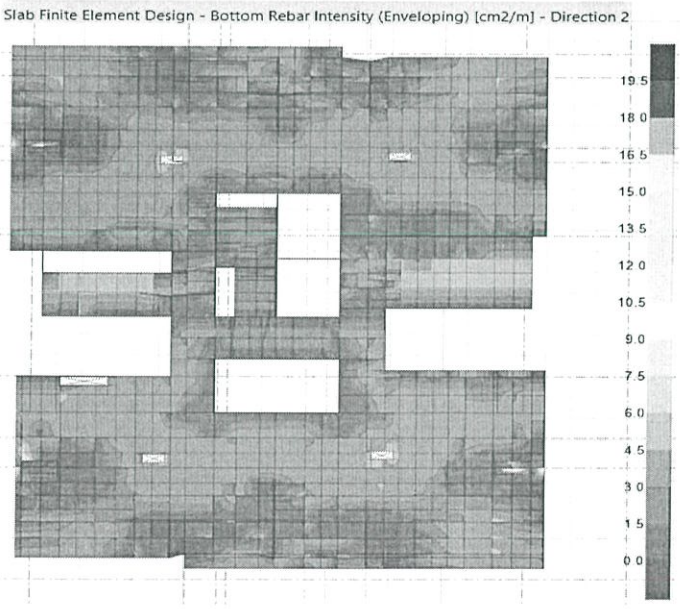
รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม ETABS

3.5 โปรแกรม SAFE เวอร์ชั่น 12

SAFE เป็นโปรแกรมวิเคราะห์สำหรับออกแบบพื้นคอนกรีต เขียนแบบรายละเอียดระบบพื้นคอนกรีต คานและฐานราก ระบบพื้นมีทั้งแบบพื้น-คาน, พื้นไร้คาน, พื้นวาฟเฟิลและพื้นระบบตงในโมเดลอาจมีเสา องค์อาคารยึดโยง ผนัง และบันได การสร้างโมเดลสามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือที่ช่วยในการวาดซึ่งเราสามารถนำเข้าโมเดล(Import Model)จาก ETABS ,AutoCADและโปรแกรมฐานข้อมูลฐานรากแพ(Mat foundation)สามารถคิดแรงดันขึ้นของดินแบบ nonlinear ส่วนพื้นก็สามารถวิเคราะห์การแตกร้าว แบบ nonlinear



รูปที่ 3.12 แสดงรูปของโปรแกรม SAFE เวอร์ชั่น 12



รูปที่ 3.13 แสดงโมเดลของโปรแกรม SAFE

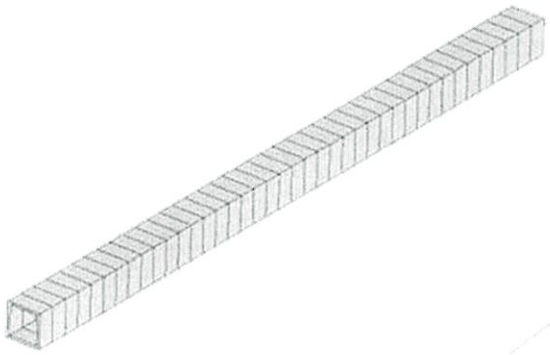
3.6 ทำไมจึงจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง เราจำเป็นต้องรู้ขีดความสามารถในการรับภาระ ของชิ้นส่วนนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วๆไปที่ไม่ซับซ้อน เราก็สามารถคำนวณหา คำตอบที่แน่แท้ได้ (analytical solution) และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) แต่ถ้ารูปทรงของชิ้นส่วนซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่างๆทำให้พื้นที่หน้าตัดส่วนโค้งไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ยิอยได้ เราจำเป็นต้องใช้ วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ทีสามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยแก้ระบบสมาการเชิงพีชคณิต เพื่อช่วยในการคำนวณหาค่าความเค้น (stress) ความเครียด (strain) หรือการเสียรูปทรง (deformation) ของชิ้นส่วนนั้นได้ แนวคิดเบื้องต้นของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เริ่มมาจาก การหาวิธีการ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

3.7 แบบจำลองลักษณะของชิ้นส่วนโครงสร้าง

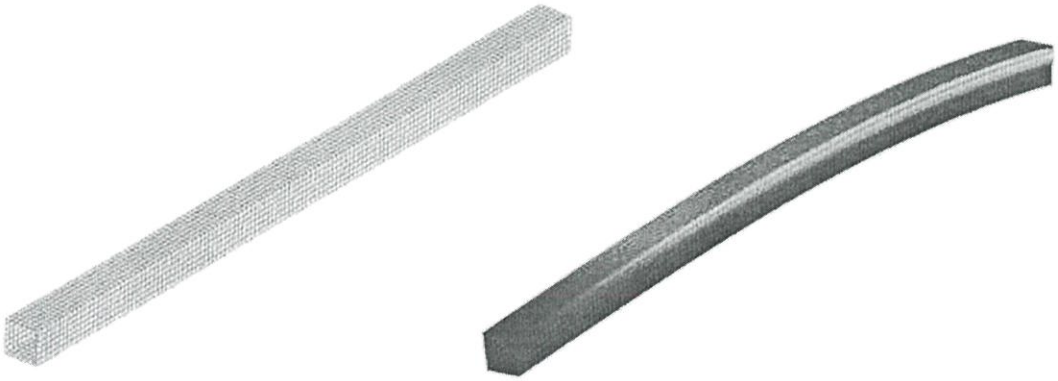
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์ให้เหมาะสมับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามมิติคือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ

-เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโก่งตัวของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียว



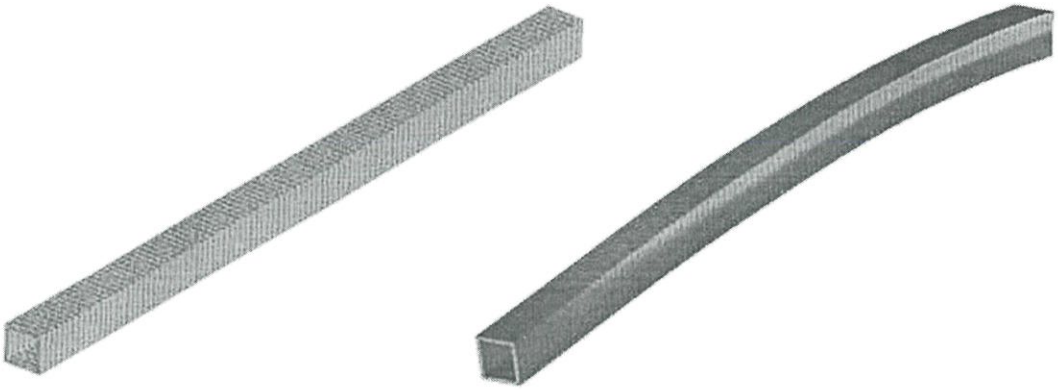
รูปที่ 3.14 เอลิเมนต์ 1 มิติ

-เอลิเมนต์สองมิติมักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น (stress) ความเครียดแนวระนาบ(strain) โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะรูปสามเหลี่ยม ที่ประกอบด้วยด้านที่ เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง



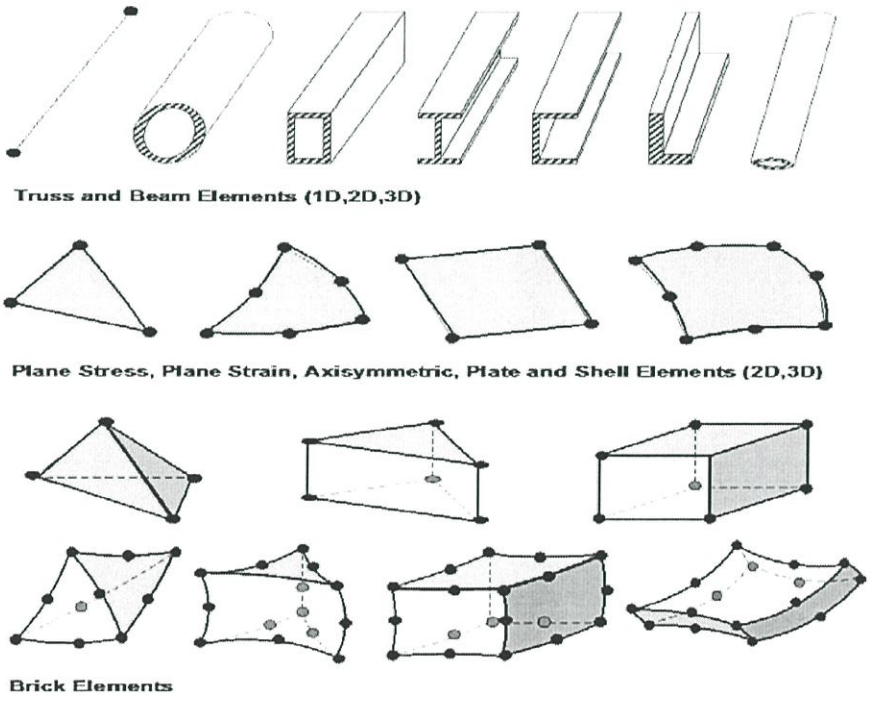
รูปที่ 3.15 เอลิเมนต์ 2 มิติ

-เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วๆไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะแบ่งเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.16 เอลิเมนต์ 3 มิติ

เพื่อที่จะวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างของอาคารให้ถูกต้องจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองให้ตรงกับลักษณะจริงของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น คาน เสา จะสร้างแบบจำลองที่เป็นชิ้นส่วนแบบหนึ่งมิติ พื้นและผนังจะสร้างแบบจำลองเป็นชิ้นส่วนแบบสองมิติดังแสดงในรูป



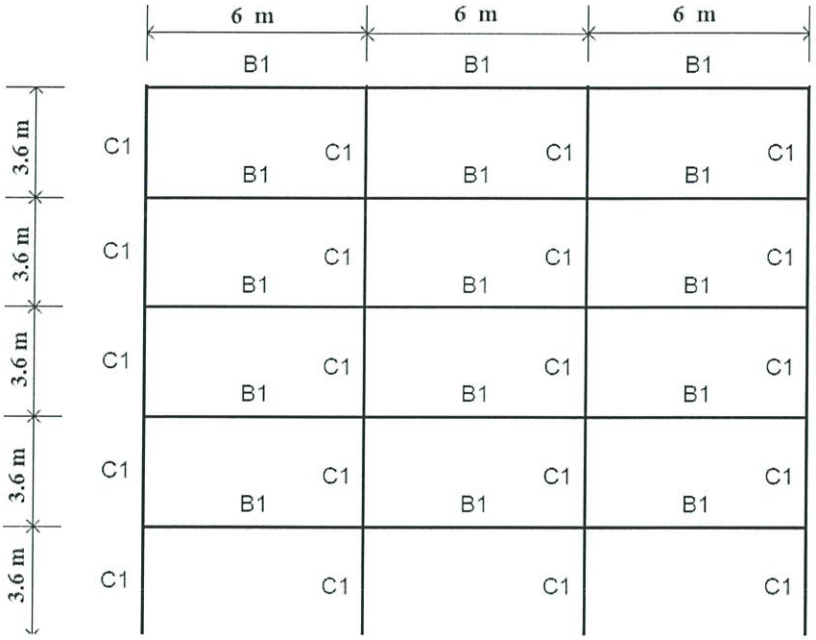
รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างชนิดของเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ

บทที่ 4
วิธีการใช้งานโปรแกรม ETABS

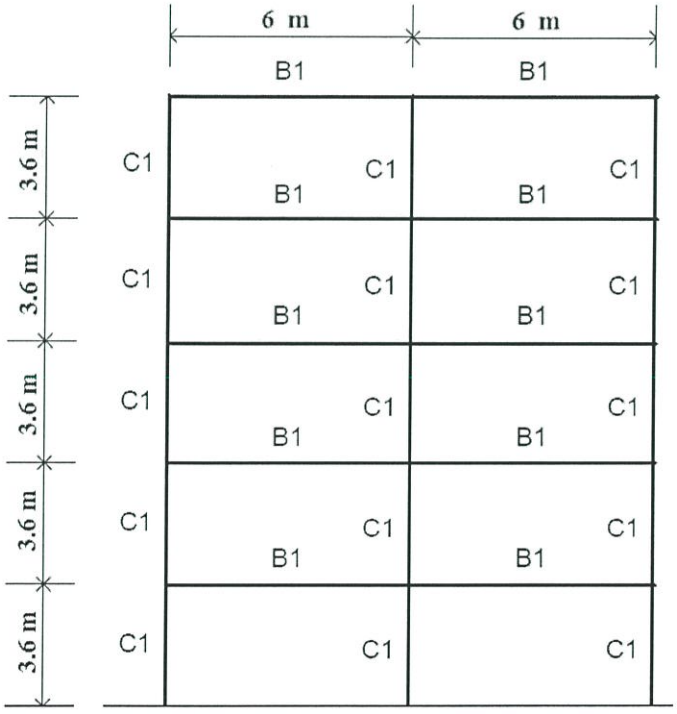
กล่าวนำ

ETABS เป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพื้นฐานของไฟไนต์อิลิเมนต์ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในการออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ระบบอาคารมีระบบการใช้งานที่เรียบง่ายใช้งานสะดวก มีการใช้วิธีคำนวณเชิงเลขที่มีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการออกแบบ และมาตรฐานการออกแบบที่หลากหลายให้เลือกหลายรูปแบบ เช่นการออกแบบโครงข้อแข็งสองมิติทั่วๆไป การวิเคราะห์แบบสถิติศาสตร์ จนกระทั้งการวิเคราะห์พลศาสตร์ของอาคารสูงที่ซับซ้อน

ตัวอย่างแบบแปลนอาคาร

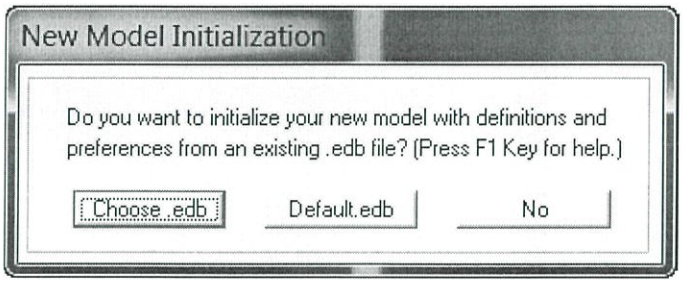


รูปที่ 4.1.1 แปลนอาคารด้านหน้า



รูปที่ 4.1.2 แปลนอาคารด้านข้าง

4.1.1 ขั้นตอนการ Define Plan Grids and Story Data



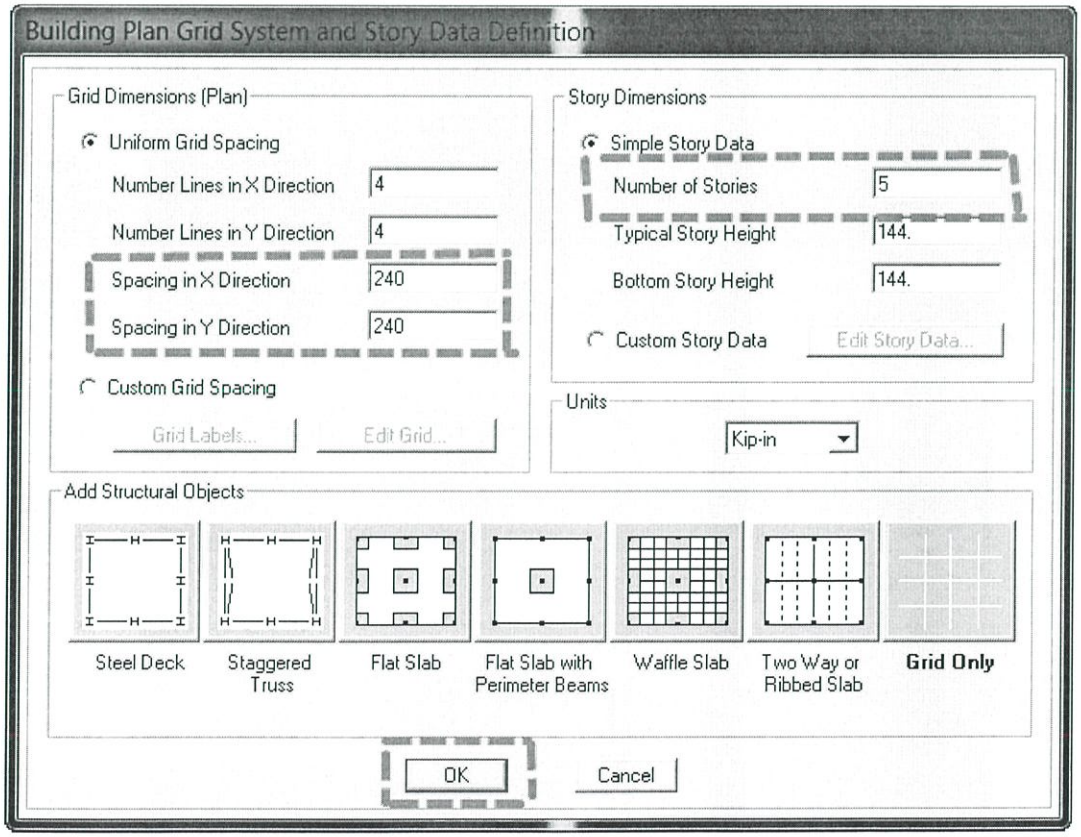
ขั้นตอนการสร้าง new shortcut **File > New Model**

หน้าต่างกำหนดแปลนอาคารสูงของแต่ละชั้น และชนิดโครงสร้างจะแสดงขึ้นมา

รูปแสดง Grid Dimension (Plan) ตัวช่วยกำหนดกริดในแนวราบของโมเดล มี 2 รูปแบบ

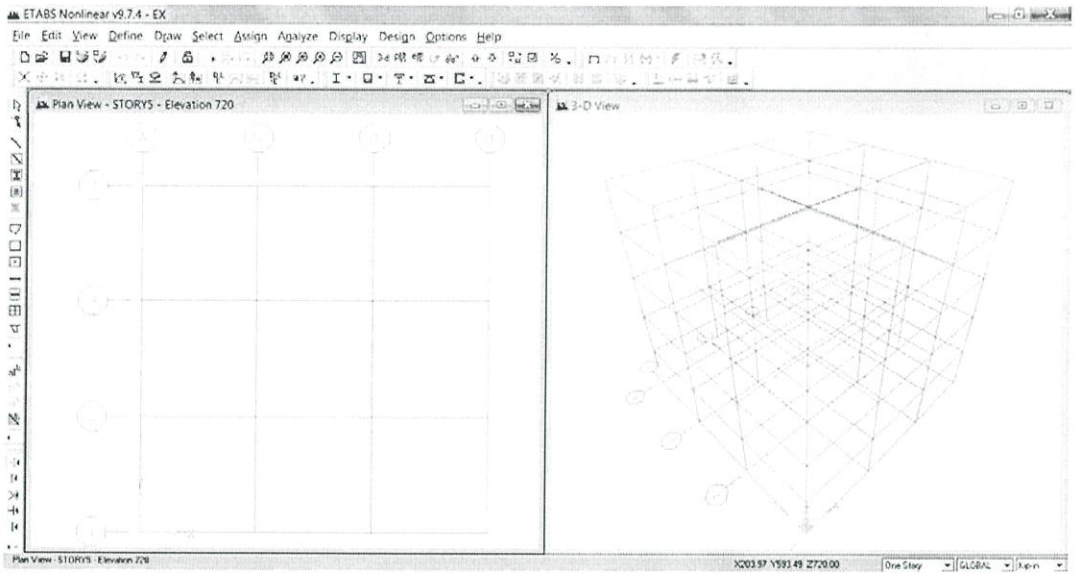
Uniform Grid Spacing จะกำหนดให้ระยะห่างกริดเท่ากัน

Custom Grid Spacing คือให้เรากำหนดระยะห่างได้เอง



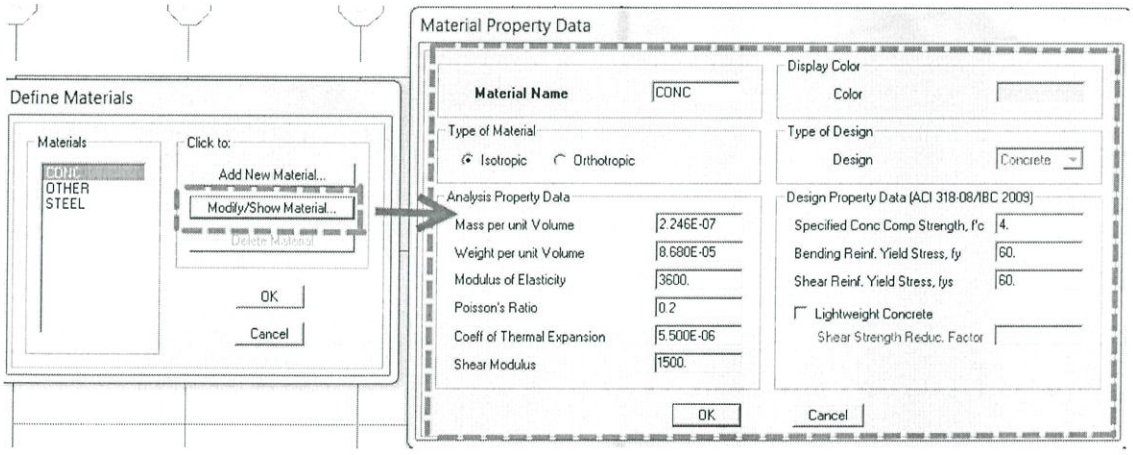
ขั้นตอน1-2 กำหนดระยะ Spacing in X Direction และ Spacing in Y Direction,

"5" ใน Number of Stores, เลือก **Grid Only** จาก Add Structural Objects and click OK



ขั้นตอน1-3: เลือก **OK**, ETABS จะแสดง "Plan View" และ "3-D View" ในหน้าต่าง

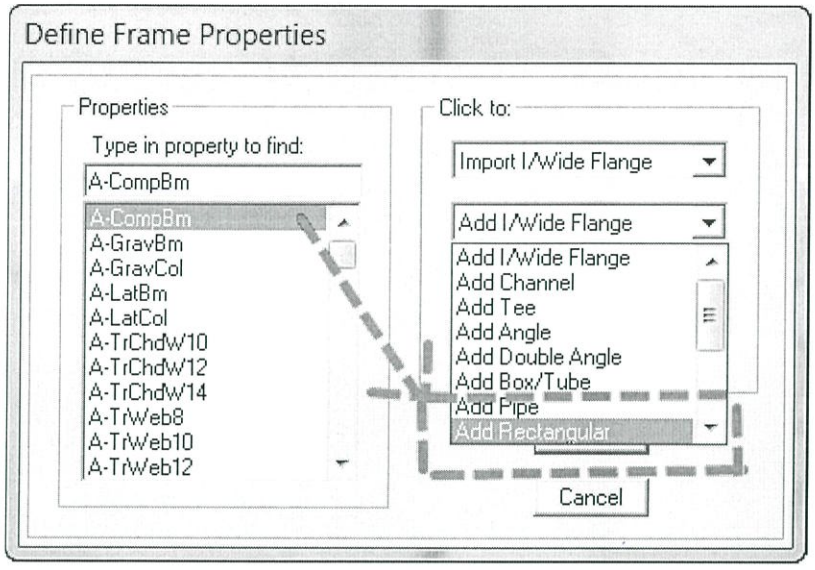
4.1.2ขั้นตอนการ Define Material Properties



ขั้นตอนที่ 2-1: **Define > Material Properties**

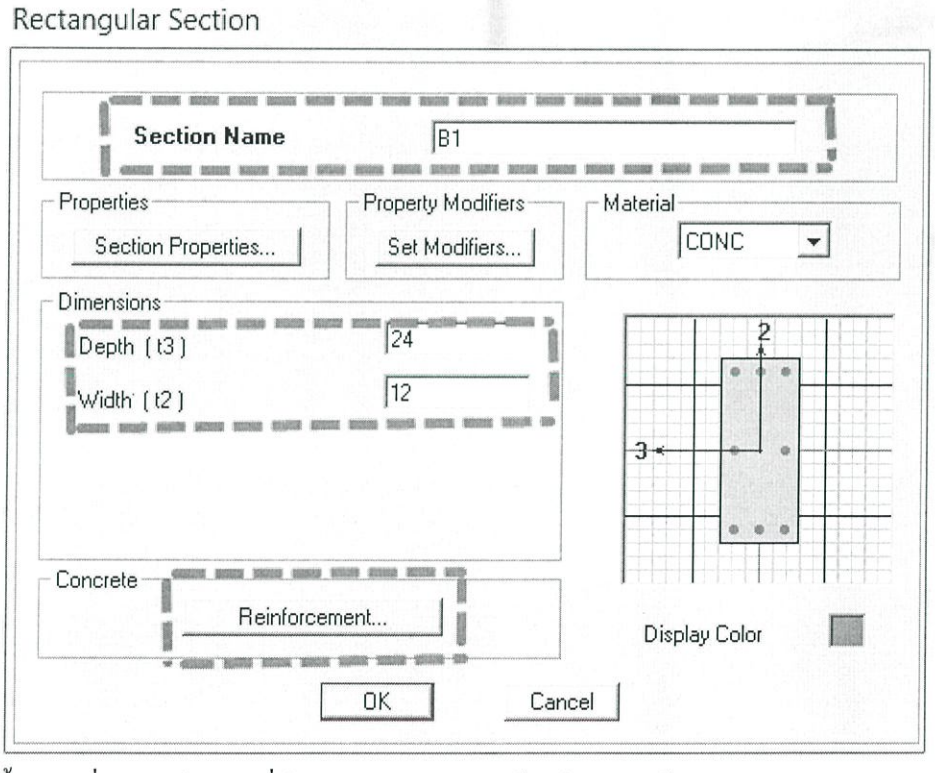
จากนั้นเลือก **CONC** แล้วเลือก **Modify/Show Material** ใส่ค่าตามรูป **material properties**

4.1.3 ขั้นตอนการ Define Frame Sections



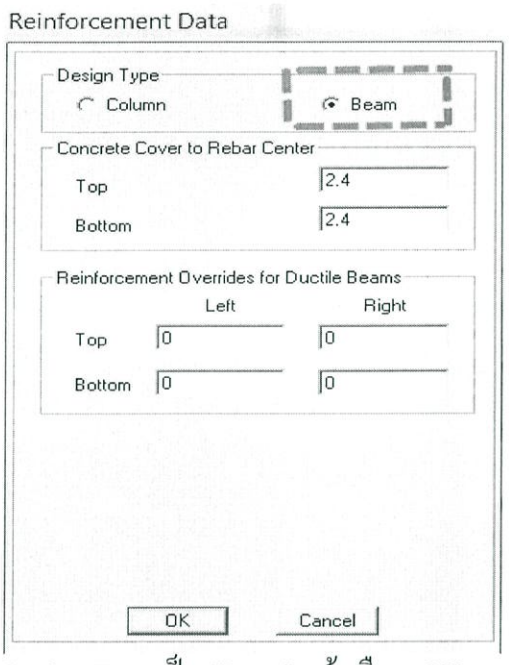
ขั้นตอนที่ 3-1: **Define > Frame Sections**

แล้วเลือก “Add Rectangular” ทำการกำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดเสา

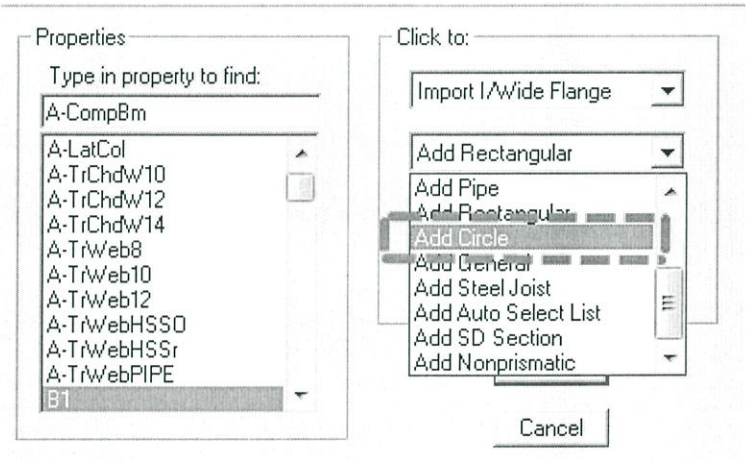


ขั้นตอนที่ 3-2: ใส่ “B1” ที่ช่อง **Section Name** แล้วใส่ขนาดหน้าตัด

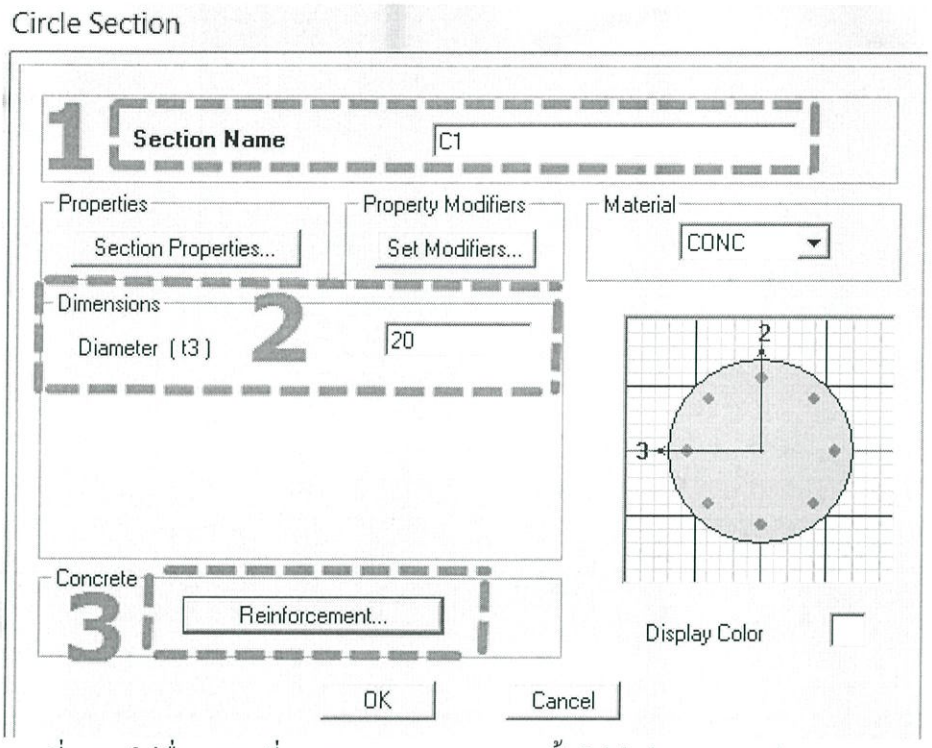
จากนั้นเลือก **Reinforcement**



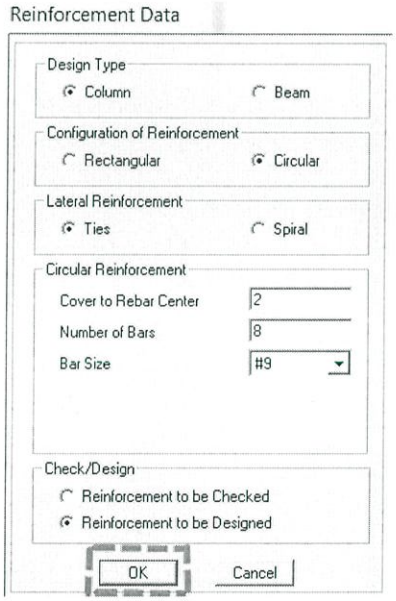
ขั้นตอนที่ 3-3: เลือก **Design Type** เป็น "Beam" แล้วเลือก **OK**
จากนั้นให้กลับไปที่ หน้าต่าง "**DefineFrame Properties**"



ขั้นตอนที่ 3-4: กำหนด "**Define Frame Properties**" แล้วเลือก "B1"
จากนั้นให้เลือก "**Add Circle**" เป็นการเพิ่มหน้าตัดเสา

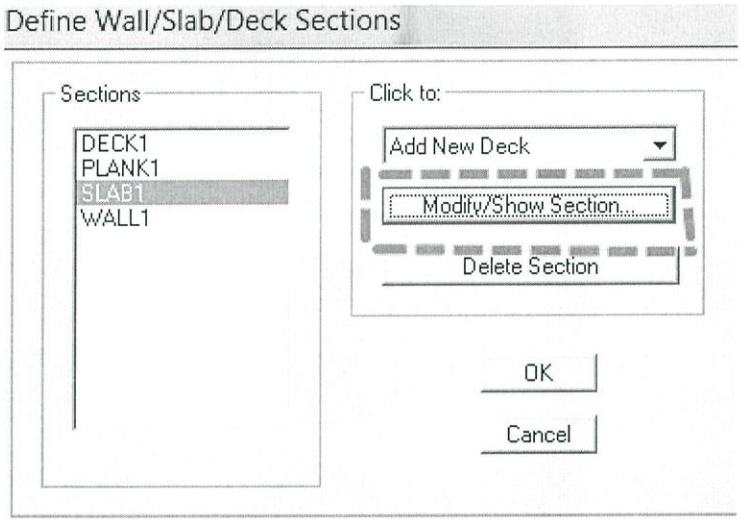


ขั้นตอนที่ 3-5 : ใส่ชื่อ “C1” ที่ **section properties** จากนั้นใส่ค่าต่างๆ ตามรูป แล้วเลือก **Reinforcement**

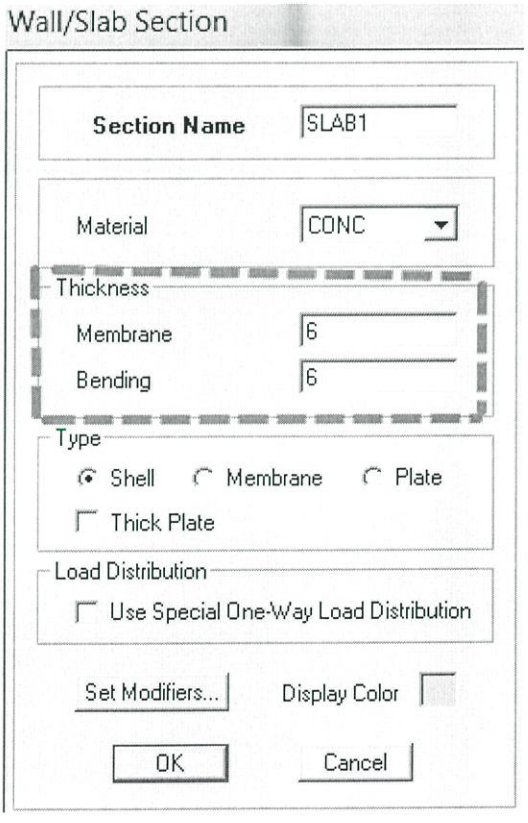


ขั้นตอนที่ 3-6: กำหนด **Design Type** เข้าไปที่ **Design Type** เลือก “Column” แล้วกด **OK**

4.1.4 ขั้นตอนการ Define Slab Sections

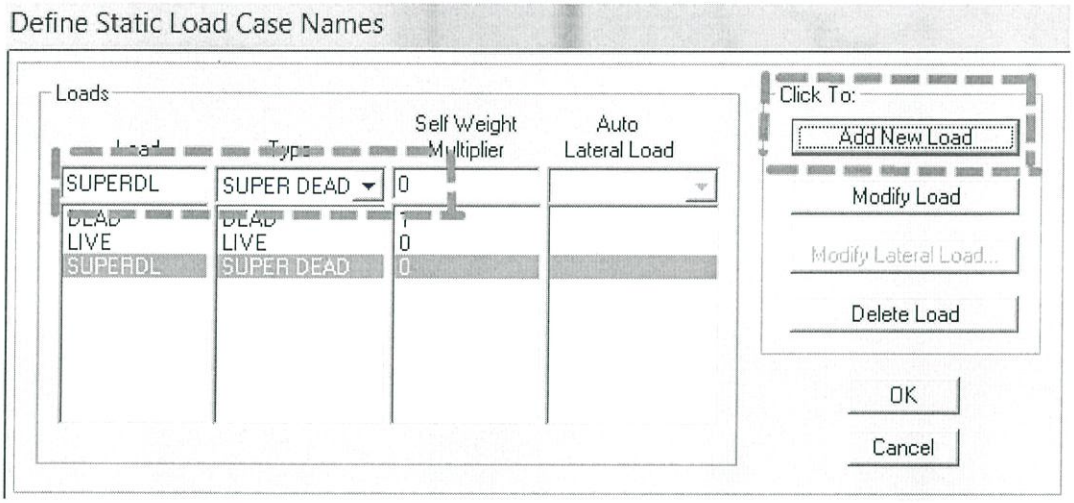


ขั้นตอนที่ 4-1 : **Define** > **Wall/Slab/Deck Sections** > "SLAB1" แล้วจากนั้นเลือก **Modify/Show Section**



ขั้นตอนที่ 4-2 : กำหนด **Thickness** = "6" ใน **Membrane** และ **Bending** แล้วกด **OK**

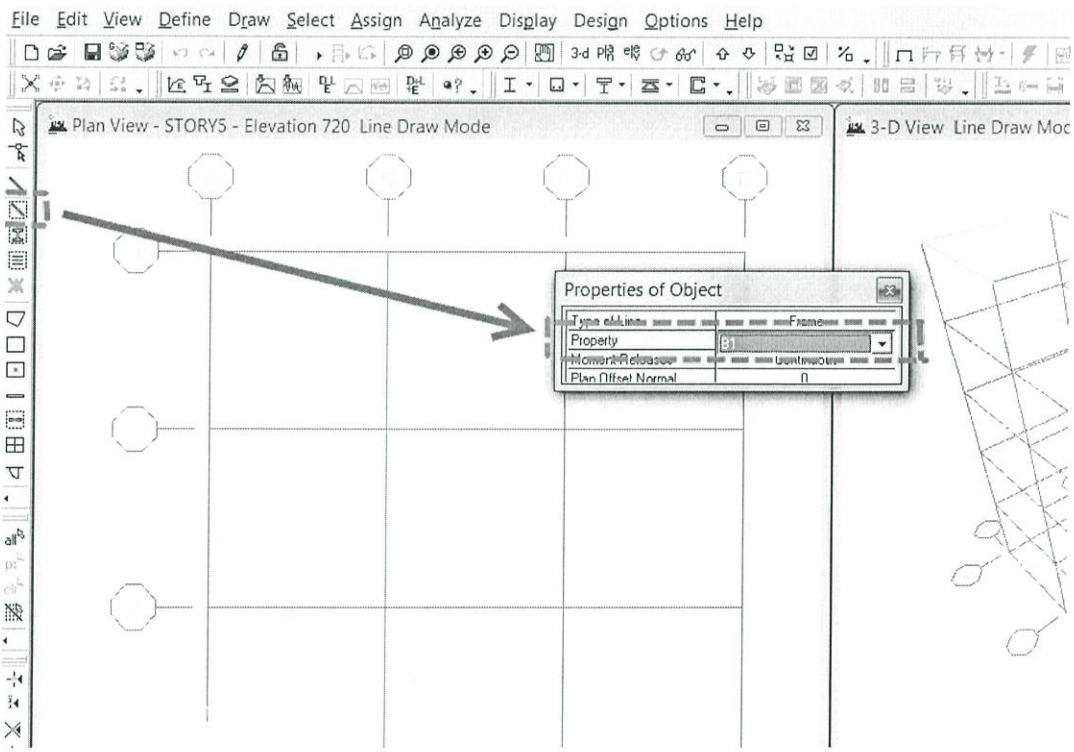
4.1.5 ขั้นตอนการ Define Load Cases



ขั้นตอนที่**5-1:** การเพิ่ม "SUPERDL" **Define > Load Cases**

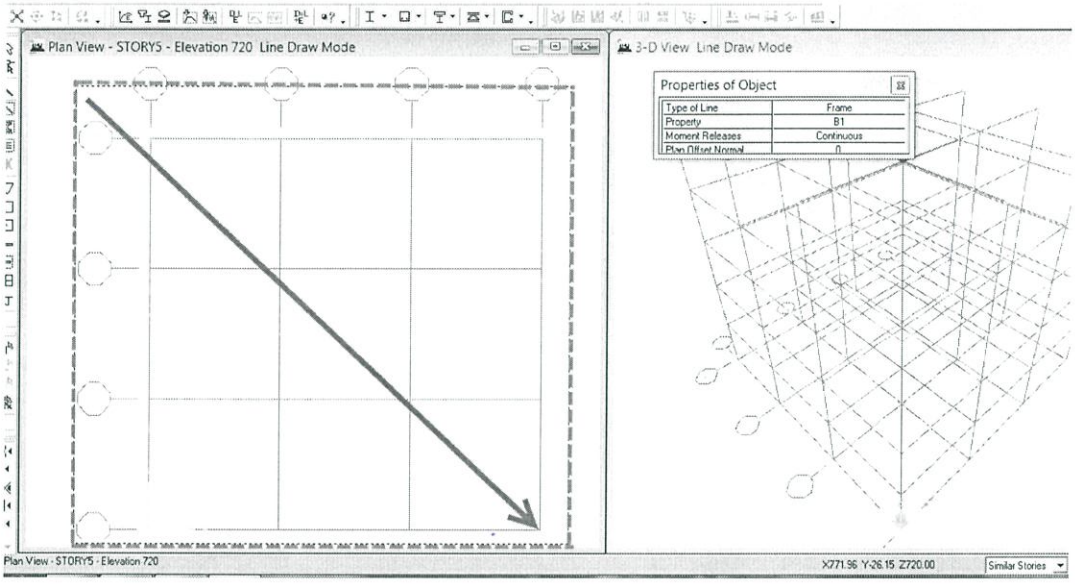
พิมพ์ "Load" = "SUPERDL", "Type" = "SUPER DEAD" และ "Self Weight Multiplier" = "0". แล้วคลิก **Add New Load** แล้วคลิก **OK**

4.2.1 การวาด Draw Beam Objects (Frame Members)

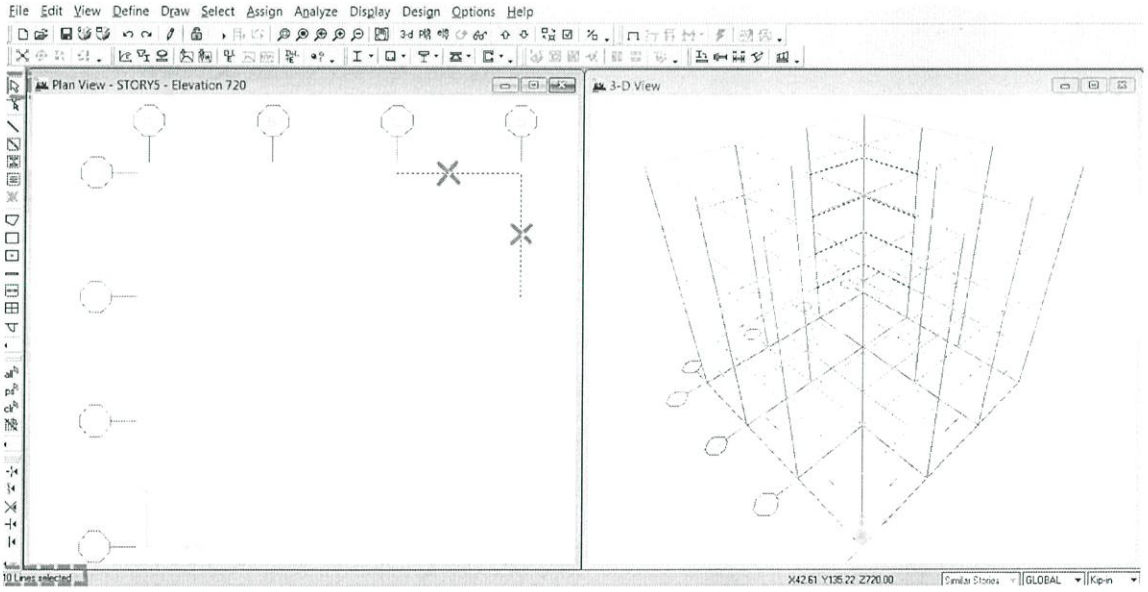


ขั้นตอนที่ 6-2: เลือก "The properties of Object" เลือกชนิด **Property** เป็น "B1".

ขั้นตอนที่ 6-3: การวาดคาน “B1” ในทุก spans ของโมเดล
โดยกำหนดให้ เป็นเหมือนทุกๆ ชั้น Similar Stories

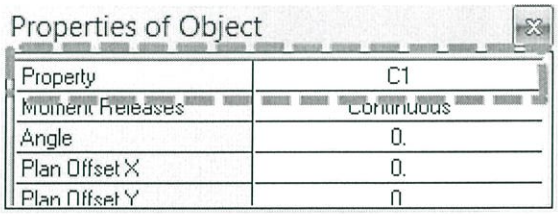


ขั้นตอนที่ 6-4: การลบคานด้านบนขวา โดยคลิกที่ 2 เส้นกด delete
ที่มุมซ้ายด้านล่างจะแสดง **“10 Lines selected” (2 bays x 5 floors)**

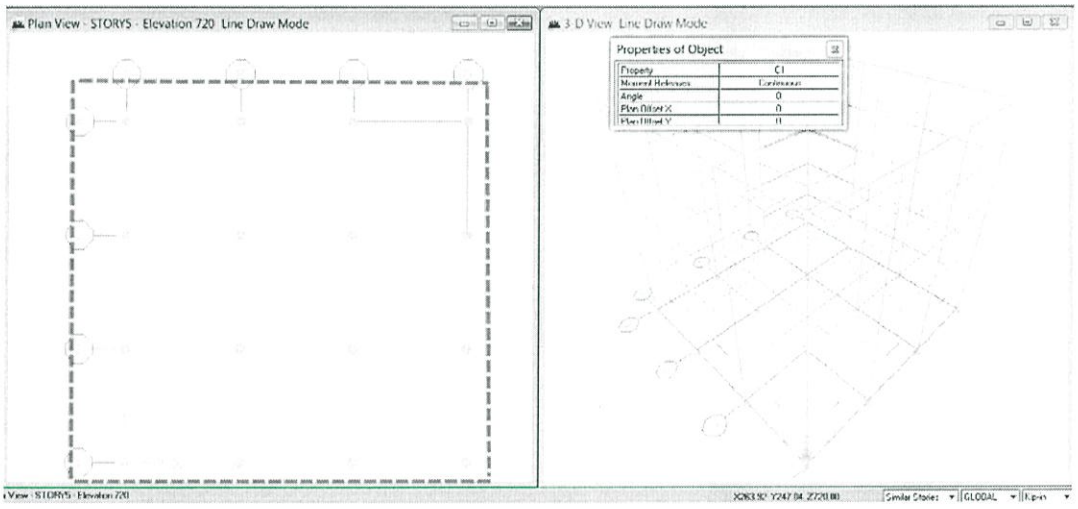


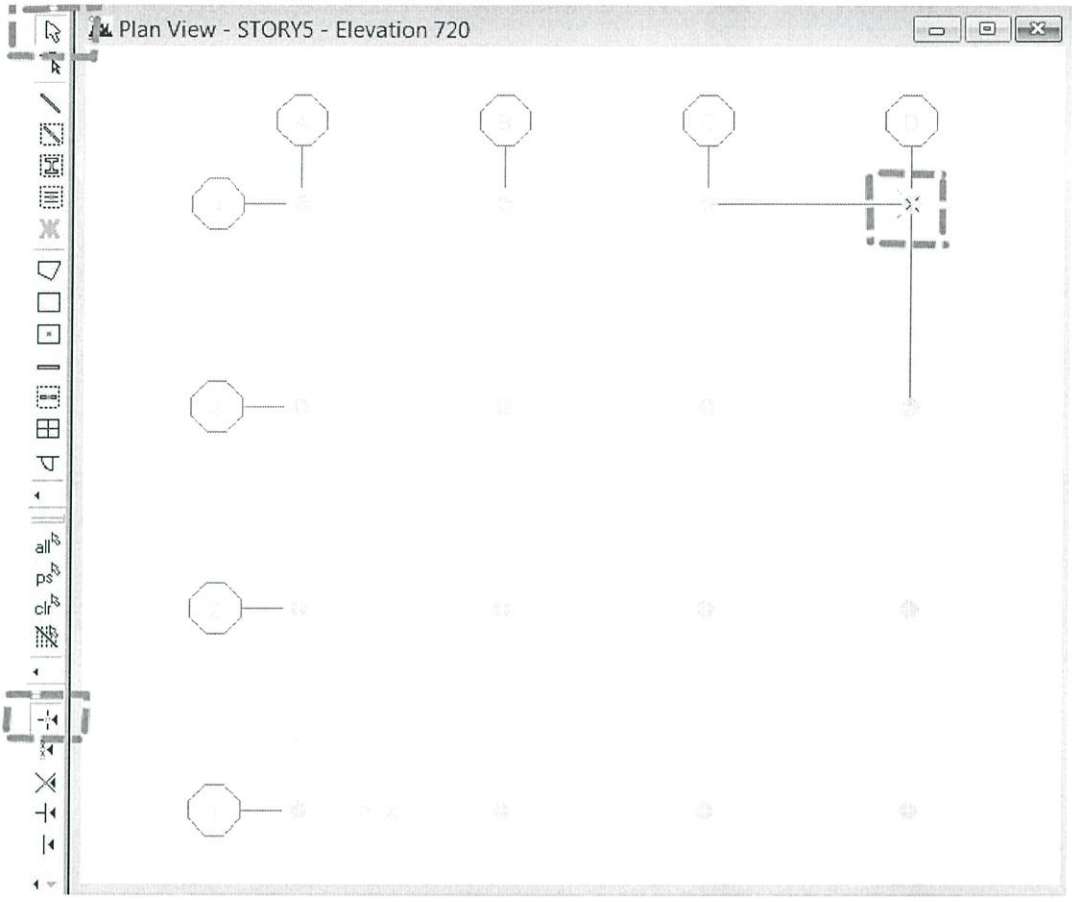
4.2.2 การวาดเสา Draw Column Objects (Frame Members)

ขั้นตอนที่ 7-1: เลือก ที่ช่อง **Property** ให้ใช้ "C1"



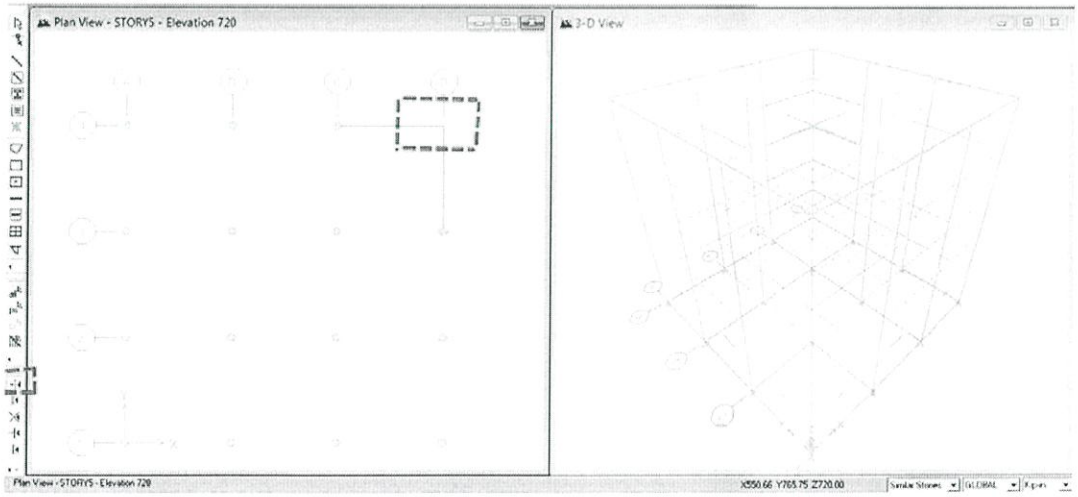
ขั้นตอนที่ 7-2: การใส่เสา "C1", โดยลากเมาส์ ตามรูป เราจะเห็นเสาในโมเดล 3-D





ขั้นตอนที่ 7-3: การลบเสาต้นที่ไม่ต้องการออก

โดยกด “Snap to Grid Intersections and Points”. แล้วให้คลิกที่ช่อง grid line D

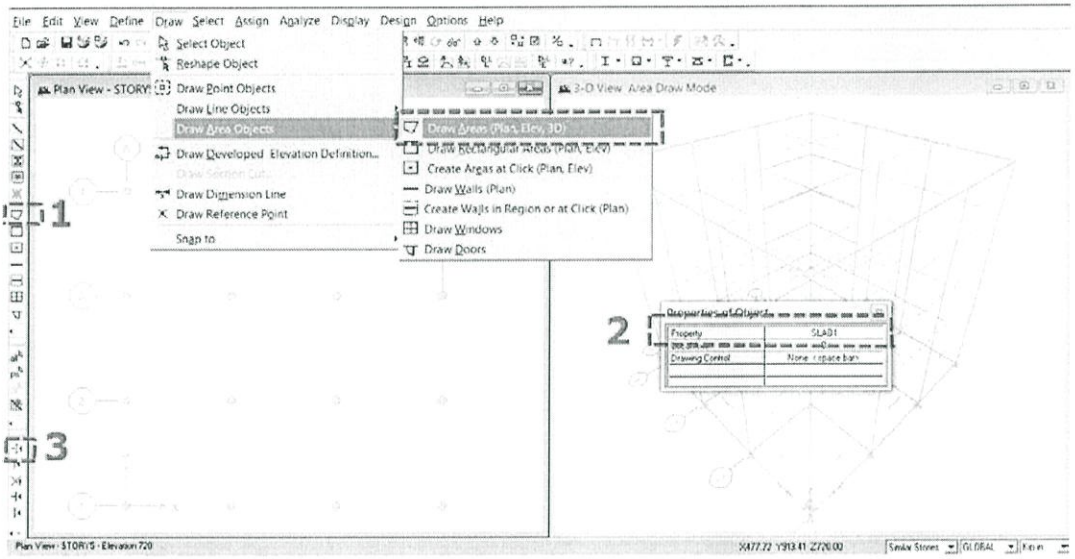


ขั้นตอนที่7-4 : “Selection List” หน้าต่างจะโชว์ตำแหน่งของบริเวณเสา ให้คลิกที่ “COLUMN” ให้เลือกเสา “5 Lines Selected” (1 column line x 5 floors) ด้านซ้ายล่าง กด **Delete** หรือ **Edit > Delete**

4.3.1 ขั้นตอนการ Assign Slab Sections

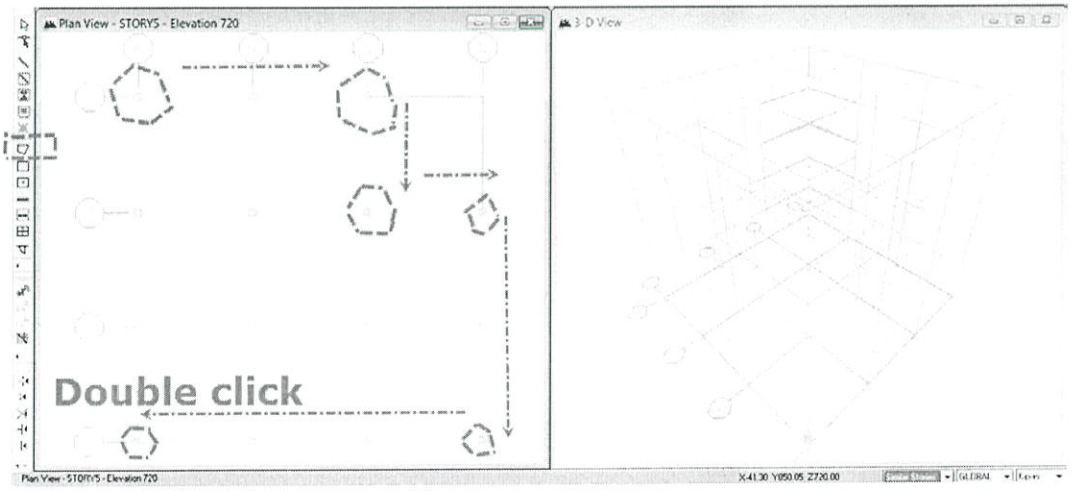
ขั้นตอนที่ **8-1:** **Draw > Draw Areas Objects >Draw Areas**

ไปที่เมนูเลือก **Property** เป็น “SLAB1” จากหน้าต่าง Properties

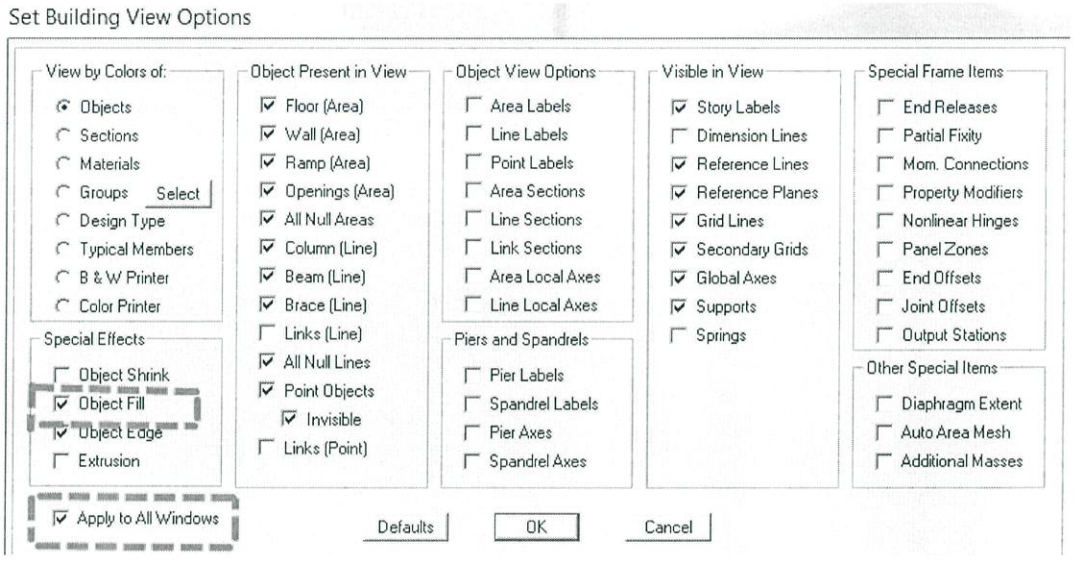


ขั้นตอนที่ **8-2:** ให้เลือก “Snap to Grid Intersections and Points”

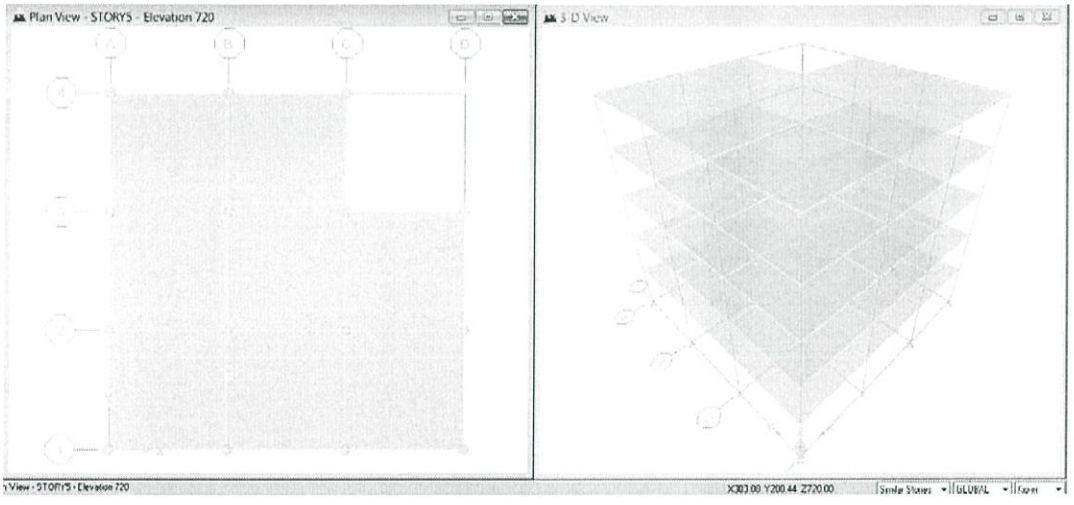
จากนั้นให้ทำตามรูปที่แสดง



ขั้นตอนที่ **8-3: View > Set Building View Options**, เลือก "Object Fill" จากนั้นเลือก "Apply to All Windows" แล้วกด **OK**.



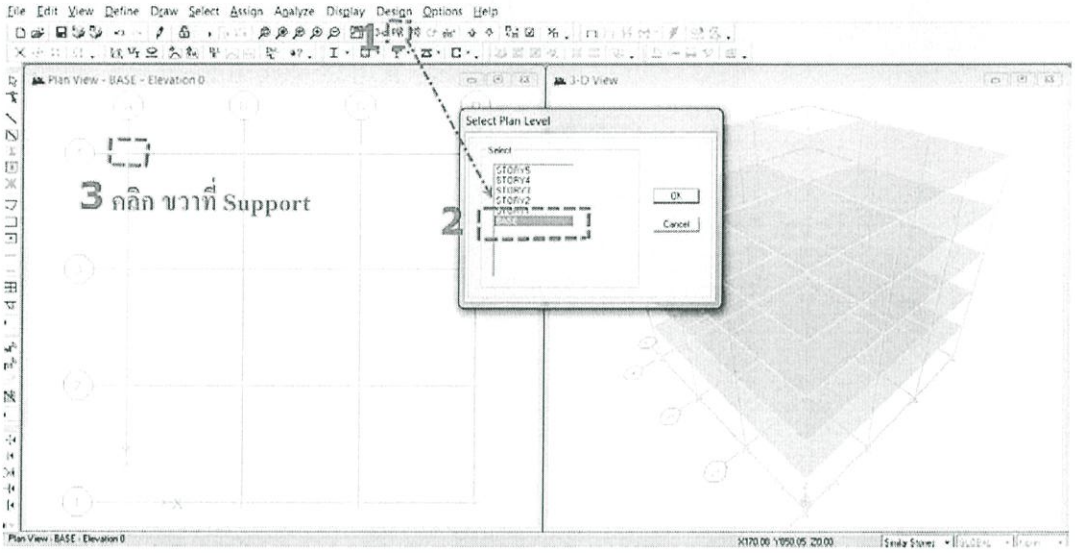
ขั้นตอนที่ **8-4:** หน้าต่างจะเปิด plan และ 3-D views ปรากฏให้เห็น



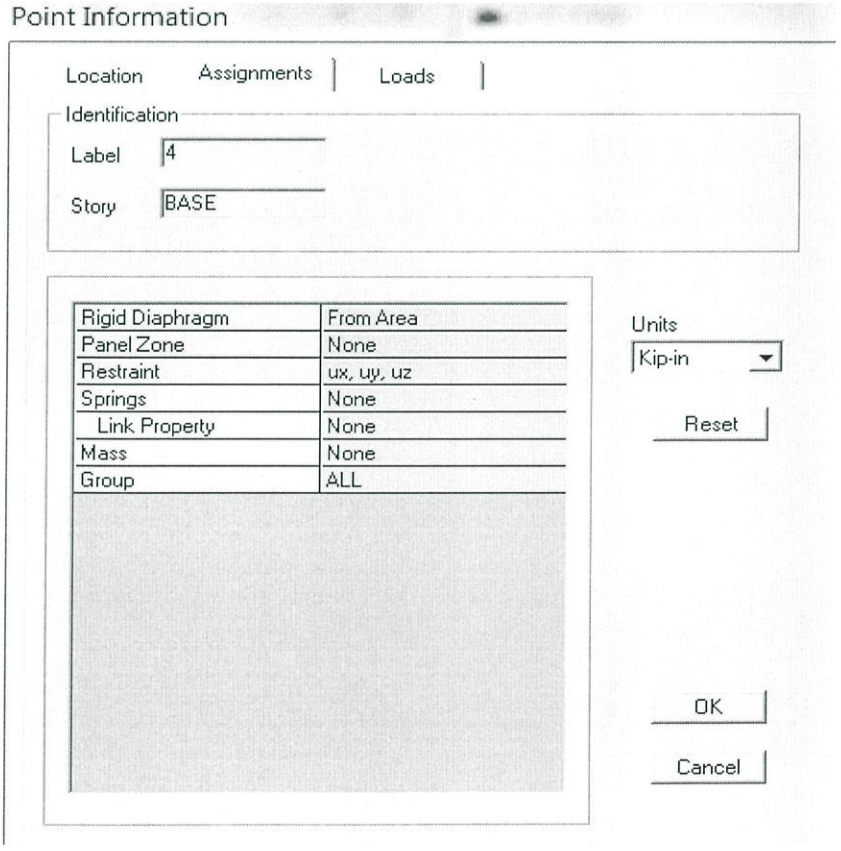
4.3.2 ขั้นตอนการ Assign Restrains

ขั้นตอนที่ **9-1:** เปลี่ยน Elevation View ไปเป็น Plan View

โดยคลิกตามรูป “BASE” จากนั้นคลิกขวาที่ joint ดังรูป

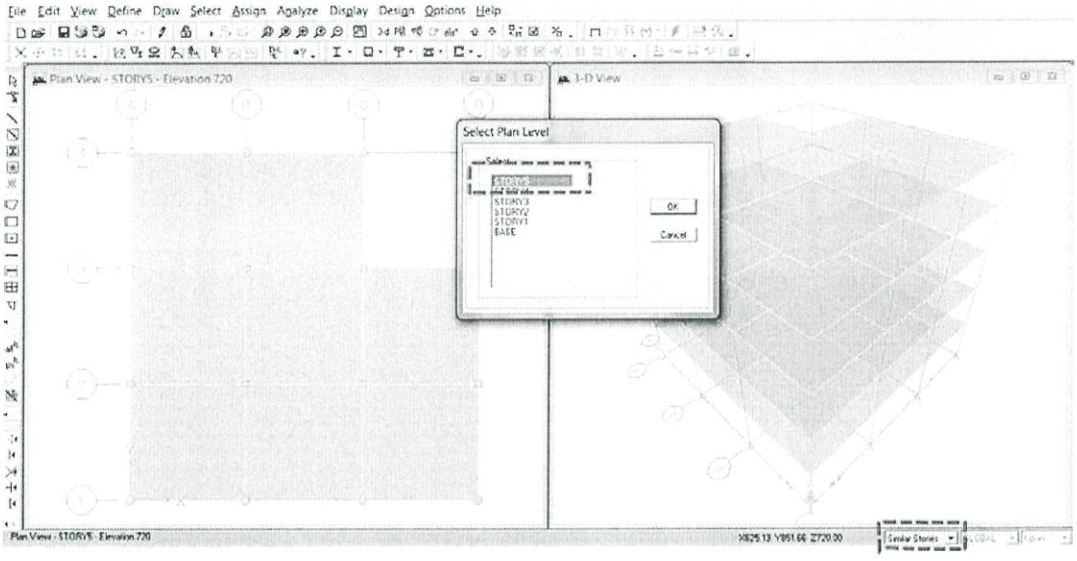


ขั้นตอนที่ **9-2:** หน้าต่างจะโชว์ Point Information ดังรูป

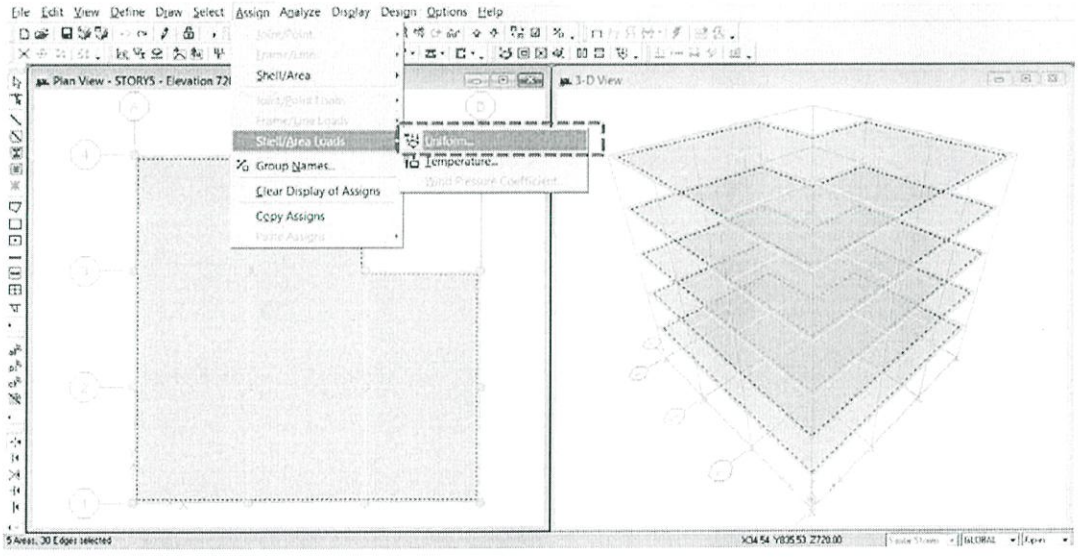


4.3.3 ขั้นตอนการ Assign Slab Loads

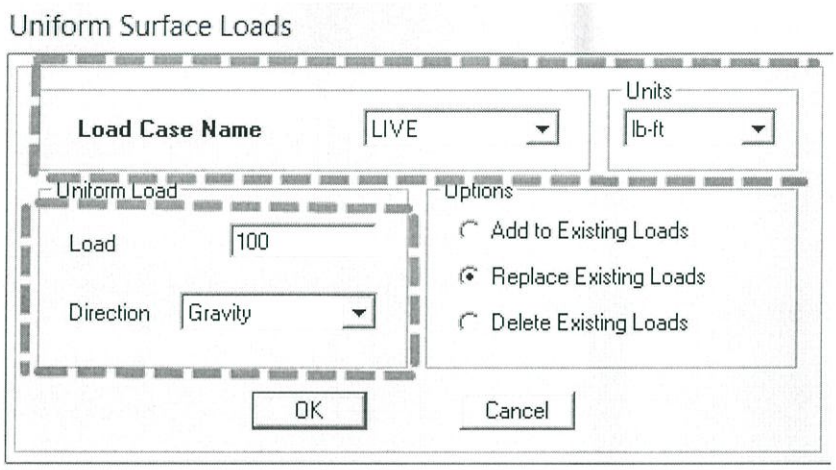
ขั้นตอนที่ **10-1:** เปลี่ยน “Elevation View” เป็น“Plan View” โดยเลือก Plan “STORY5” จาก list. แล้วเลือก "Similar Stories"



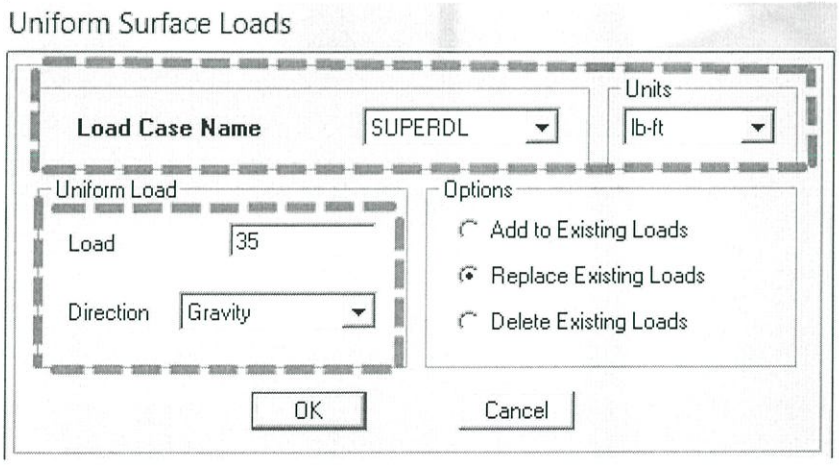
จากนั้นให้คลิกที่พื้นที่ Slab จะโชว์ "5 Areas,30 Edges selected" (1 areas x 5 floors) สังเกตจากมุมซ้ายล่าง นั้นเลือก **Assign > Shell/Area Loads > Uniform**



ขั้นตอนที่ **10-2:** หน้าต่าง "Uniform Surface Loads" ให้เลือก **Load Case Name** เป็น "LIVE", เลือก **Unit** = "lb-ft", เลือก **Direction** = "Gravity", เลือก **Load** = "100" แล้วกด **OK**.

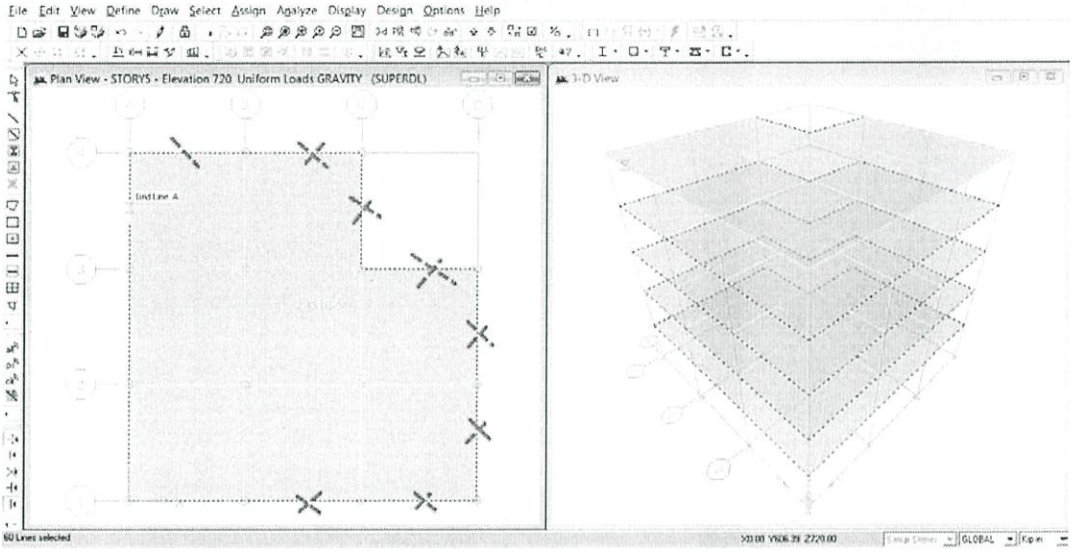


ขั้นตอนที่ **10-3 :** หน้าต่าง "Uniform Surface Loads" ให้เลือก **Load Case Name** เป็น "SUPERDL", เลือก **Unit** = "lb-ft", เลือก **Direction** = "Gravity", เลือก **Load** = "35" แล้วกด **OK**.



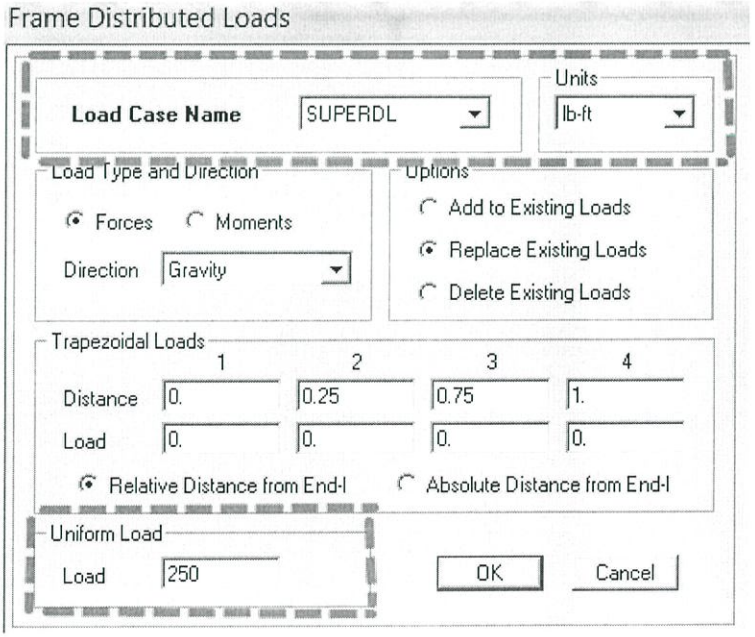
ขั้นตอนที่ **10-4:** ให้ไปที่ **Draw > Snap to > Lines and Edges**.

ลากเมาส์ ตามรูปมุมซ้ายล่างจะขึ้น "60 Lines selected" (12 bays x 5 floors).



ขั้นตอนที่ **10-5:** คลิกที่ **Assign > Frame/Line Loads > Distributed**

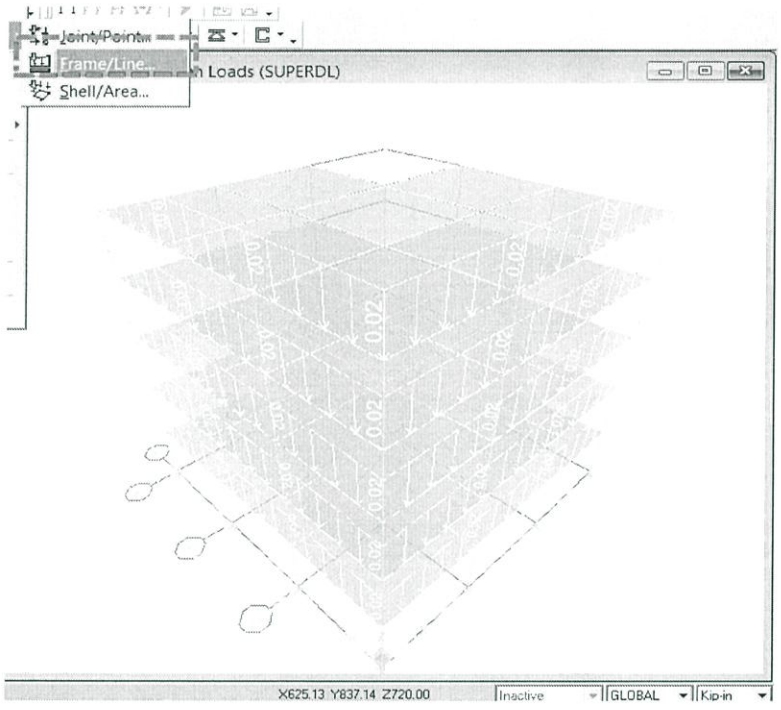
เลือก **Load Case Name** = "SUPERDL", **Units** = "lb-ft" and **Uniform Load** = "250" แล้วกด **OK**.



ขั้นตอนที่**10-6:** การดูน้ำหนักกระจายลงที่คาน ที่หน้าต่าง "3D View"

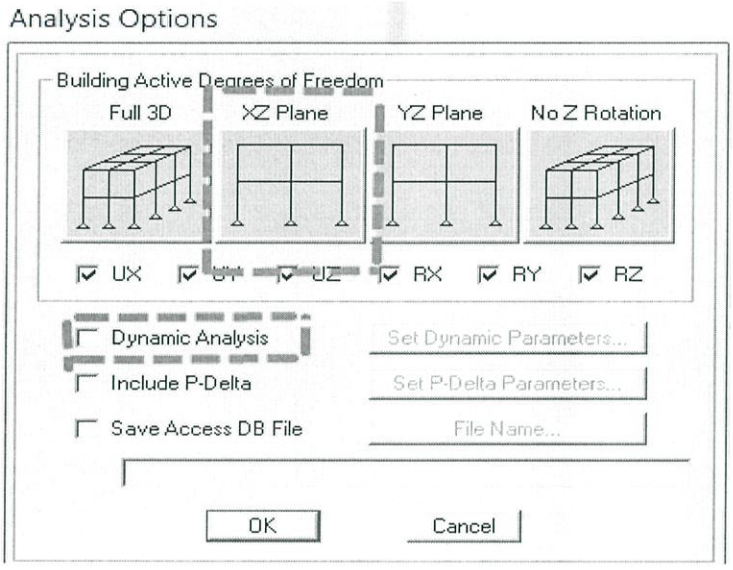
เลือก **Display** > **Show Loads** >**Frame/Line** จากนั้นเลือก Load case = "SUPERDL"

แล้วกด OK กด เพื่อกลับเข้าสู่ normal display mode

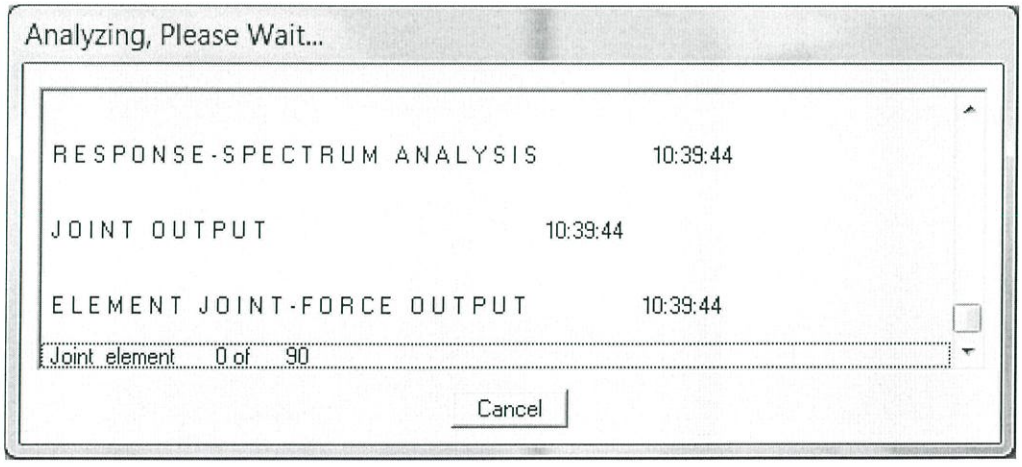


4.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง (Run Analysis)

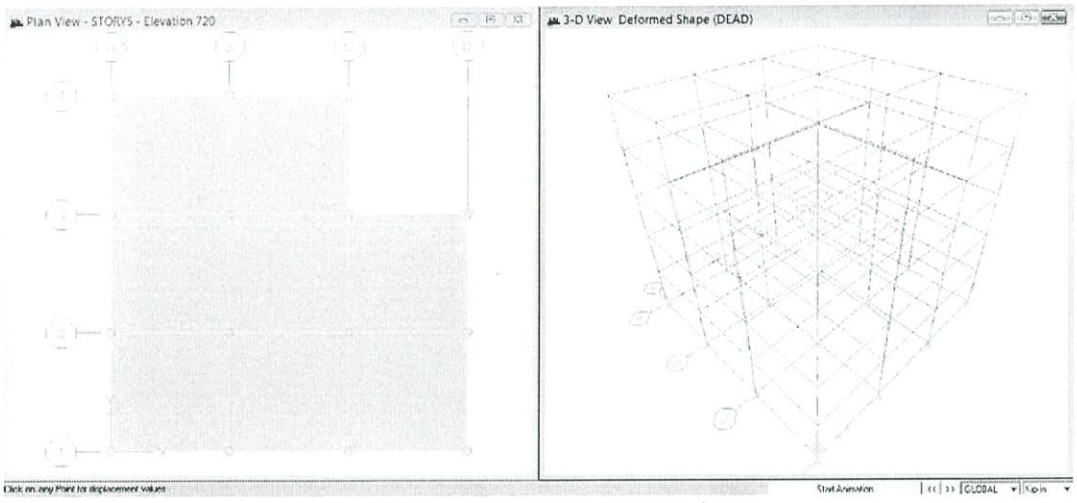
ขั้นตอนที่ **12-1:** ไปที่ **Analysis** > **Set Analysis Options**, เลือก "Full 3D", แล้วไม่เลือกเอา "Dynamic Analysis" แล้วคลิก **OK**



ขั้นตอนที่ **12-2: Analysis** > **Run Analysis**, เลือก **Run** จนขึ้นหน้าต่าง "ANALYSIS COMPLETE" แล้วกด OK



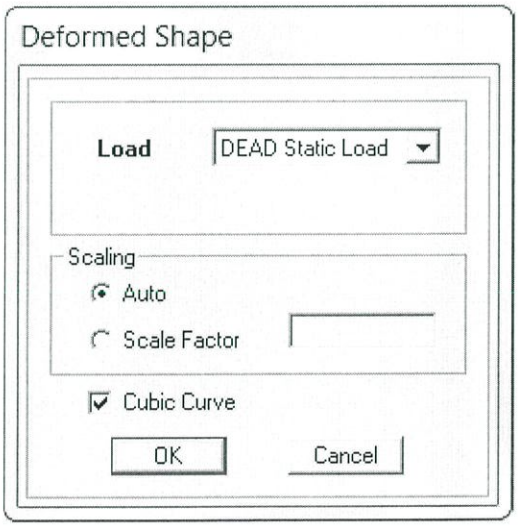
ขั้นตอนที่ **12-3:** เมื่อวิเคราห์เสร็จจะขึ้น โมเดลดังรูป



4.4.1 ขั้นตอน Analysis Results Graphically

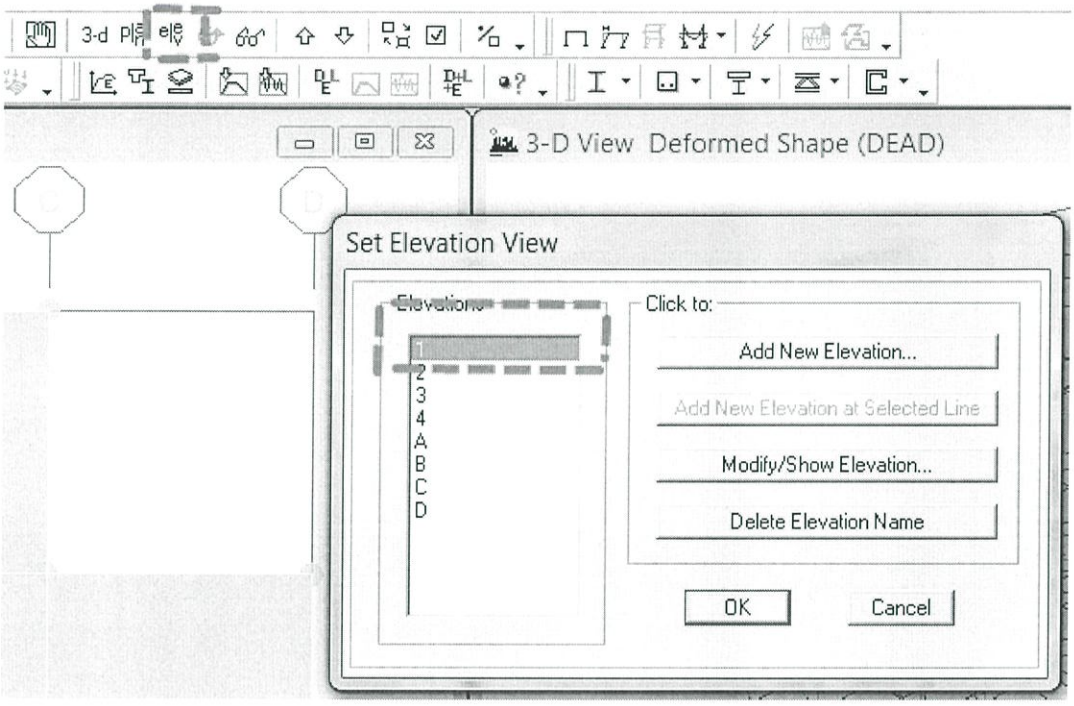
ขั้นตอนที่ **13-1**

แล้วเลือกตามรูป แล้วกด ปุ่ม OK

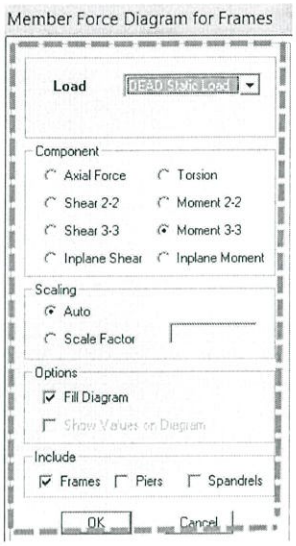


Start Animation. ที่มุมขวาล่าง กด เพื่อกลับเข้าสู่ normal display mode

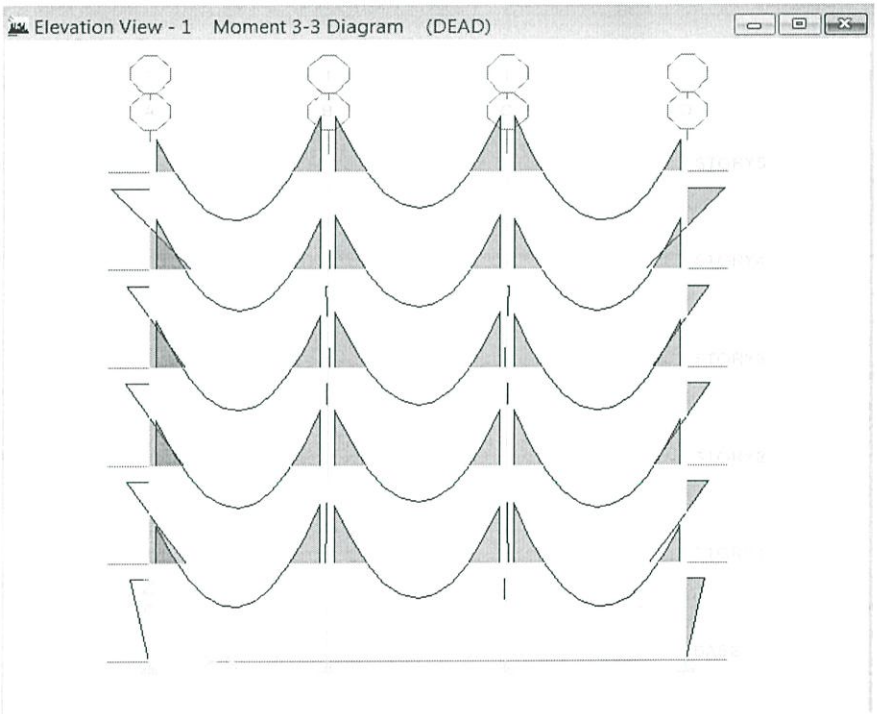
ขั้นตอนที่ **13-3:** ทำการ Set "Plan View" เปลี่ยนเป็น "Elevation View" ดังรูปแล้วเลือก **Elevation** = "1".



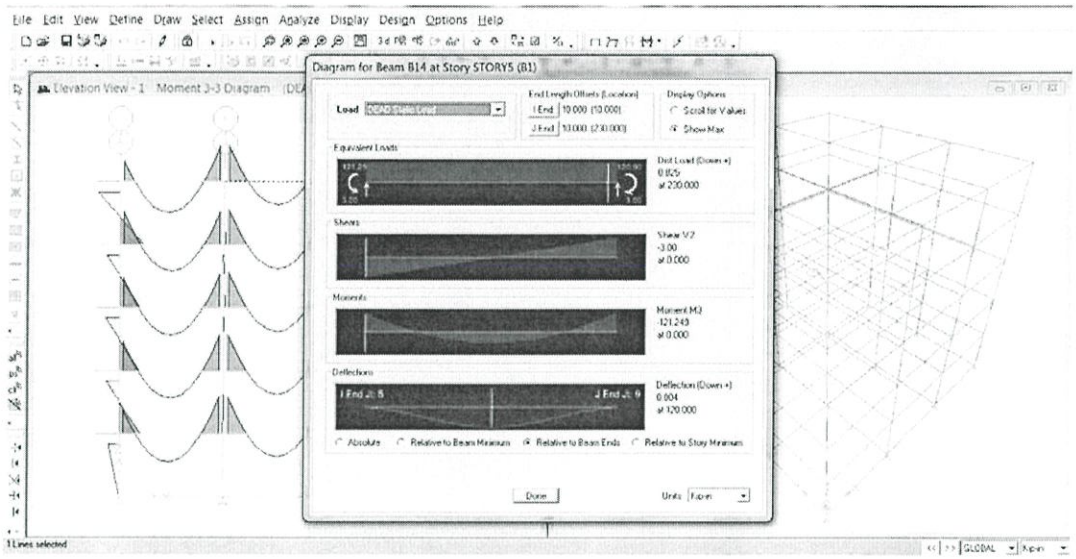
ขั้นตอนที่ **13-4:** Analysis results โดยคลิกที่ . แล้วเลือกตามรูป



ขั้นตอนที่ **13-5:** ไปที่ **Options** แล้วเลือก **Moment Diagrams on Tension Side.** แล้วคลิกขวาระหว่าง กริด โปรแกรมจะโชว์ display analysis result details.

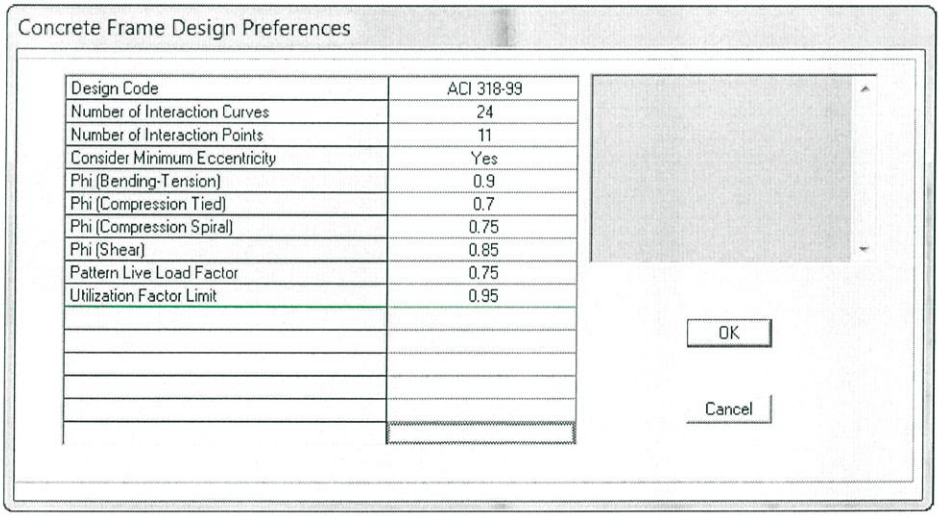


ขั้นตอนที่ **13-6 :** แสดง Loads, shears, moments และ deflections โดย คลิกขวา ที่คาน กด เพื่อกลับเข้าสู่ normal display mode



4.5.1 ขั้นตอนการ Design Concrete Frame Elements

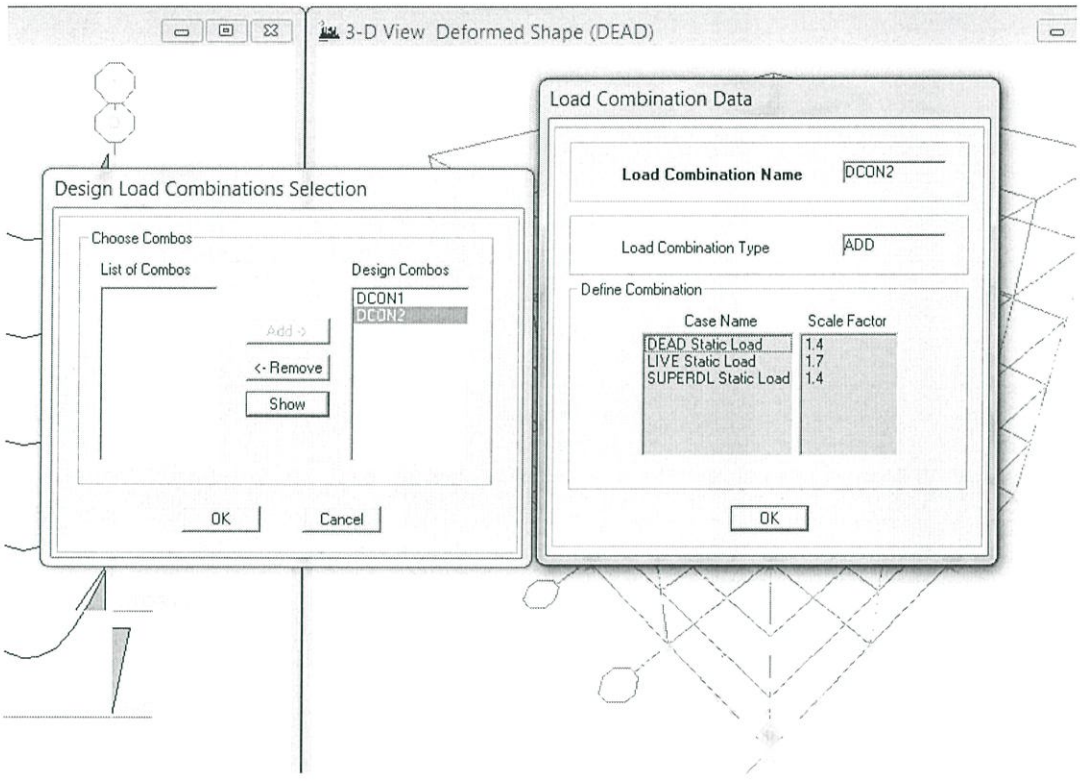
ขั้นตอนที่ **14-1:** เลือก design code ไปที่ **Options** > **Preferences** > **Concrete Frame Design** จากนั้นเลือก "ACI 318-99" กด **OK**



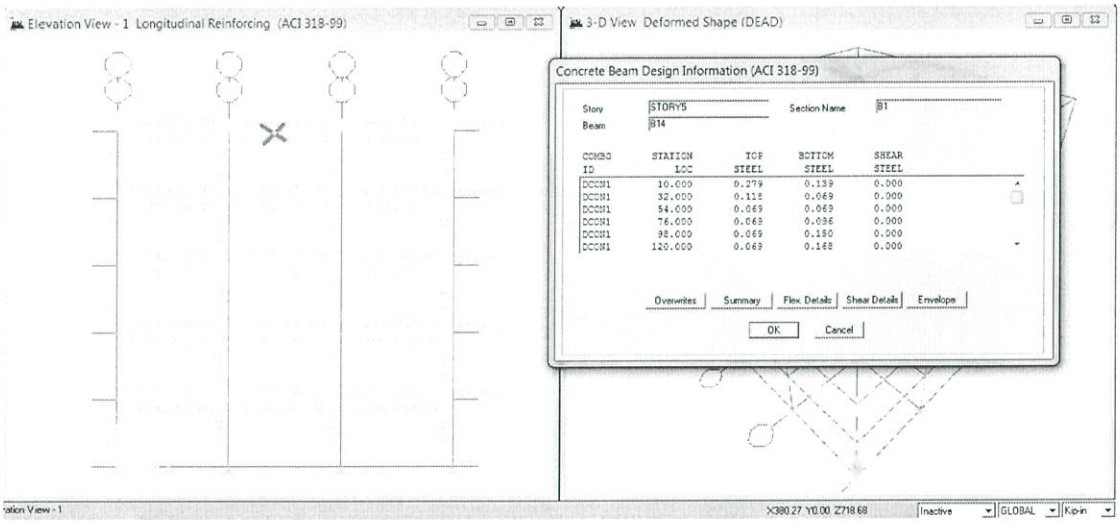
ขั้นตอนที่ **14-2:** การกำหนด load combination ของการออกแบบ

Design > Concrete Frame Design > Design Combo.

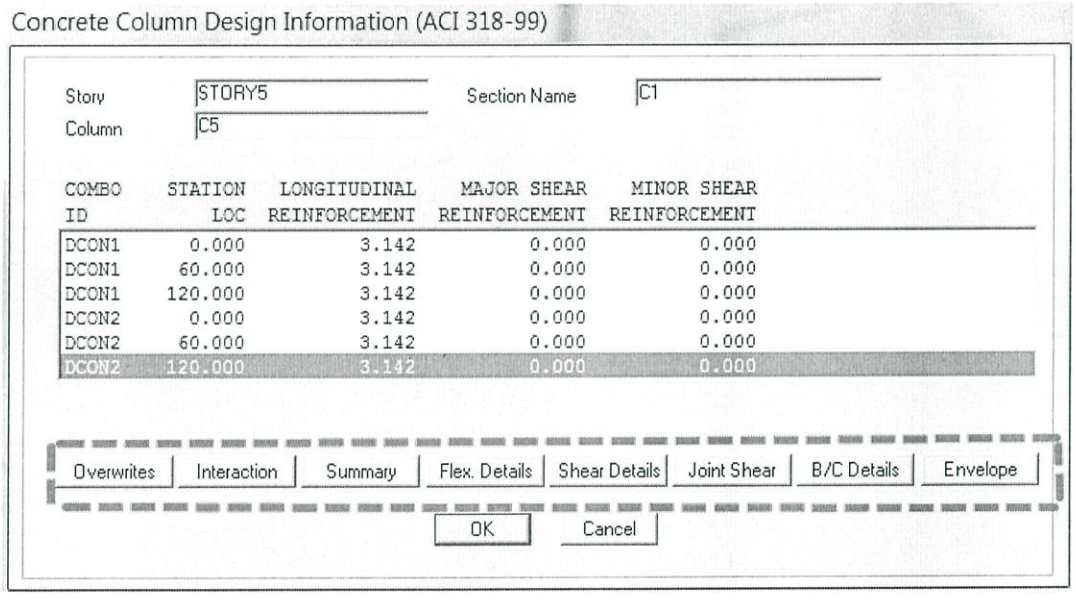
เลือก "DCON2" แล้วกด **Show** คลิก OK



ขั้นตอนที่ **14-3:** ให้กดปุ่ม จะทำการวิเคราห์หาพื้นที่เหล็ก แล้วให้คลิกขวาคานที่ต้องการคำนวณ หาปริมาณเหล็กเสริม

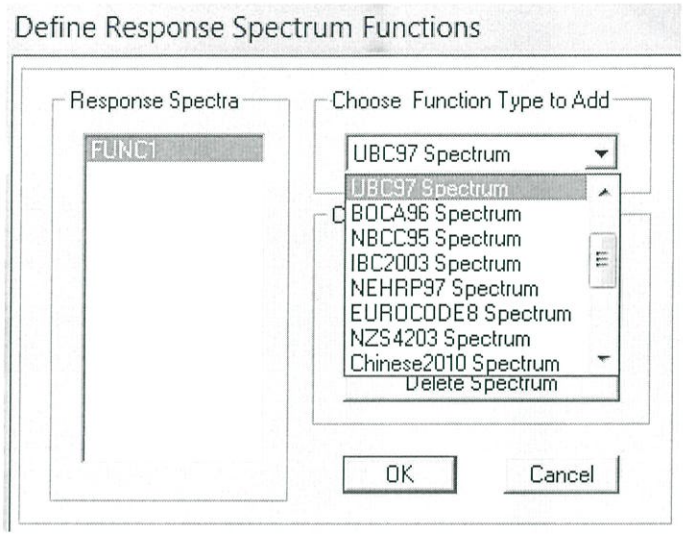


ขั้นตอนที่ **14-4:** คลิกขวาบริเวณ เสาที่ต้องการหาปริมาณเหล็กเสริม

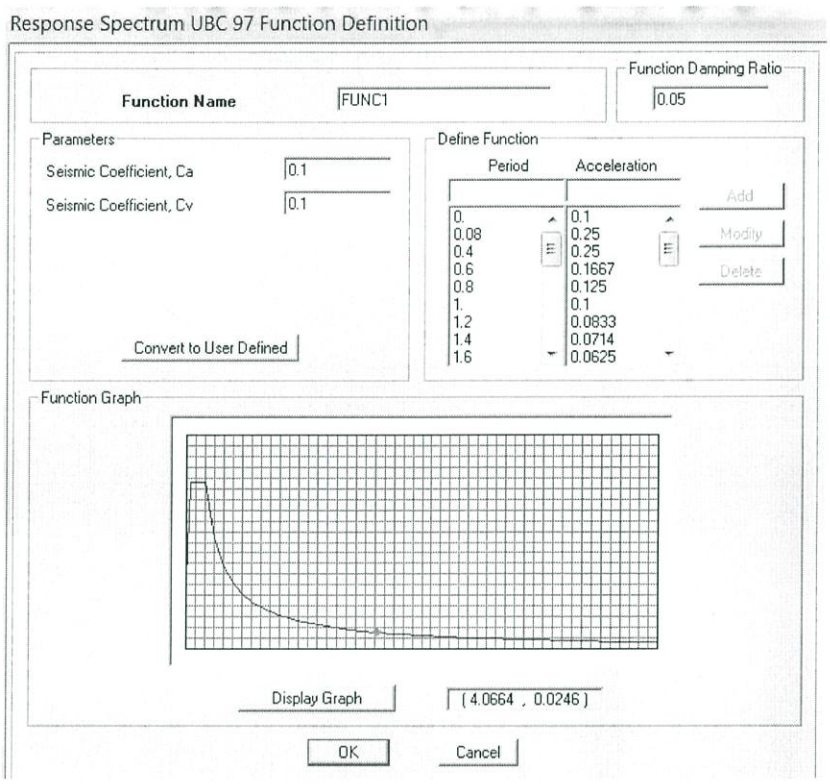


4.5.2 ขั้นตอน Dynamic Analysis and Design

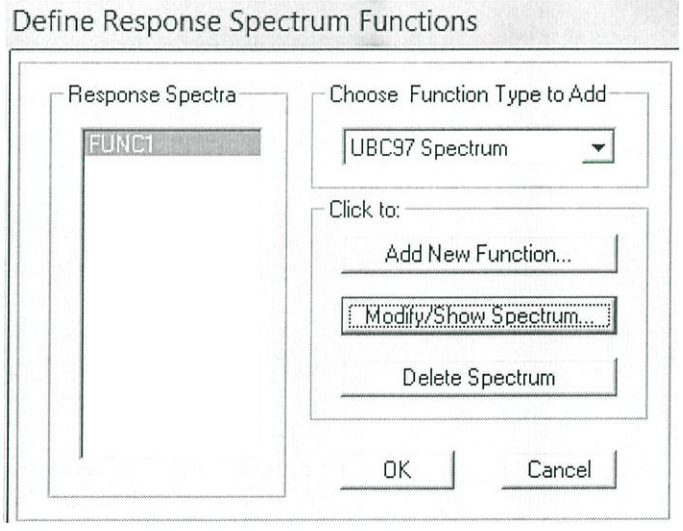
ขั้นตอนที่ 13-1 Design > Concrete Frame Design > Display Design Results



แสดงการวิเคราะห์ “UBC97”

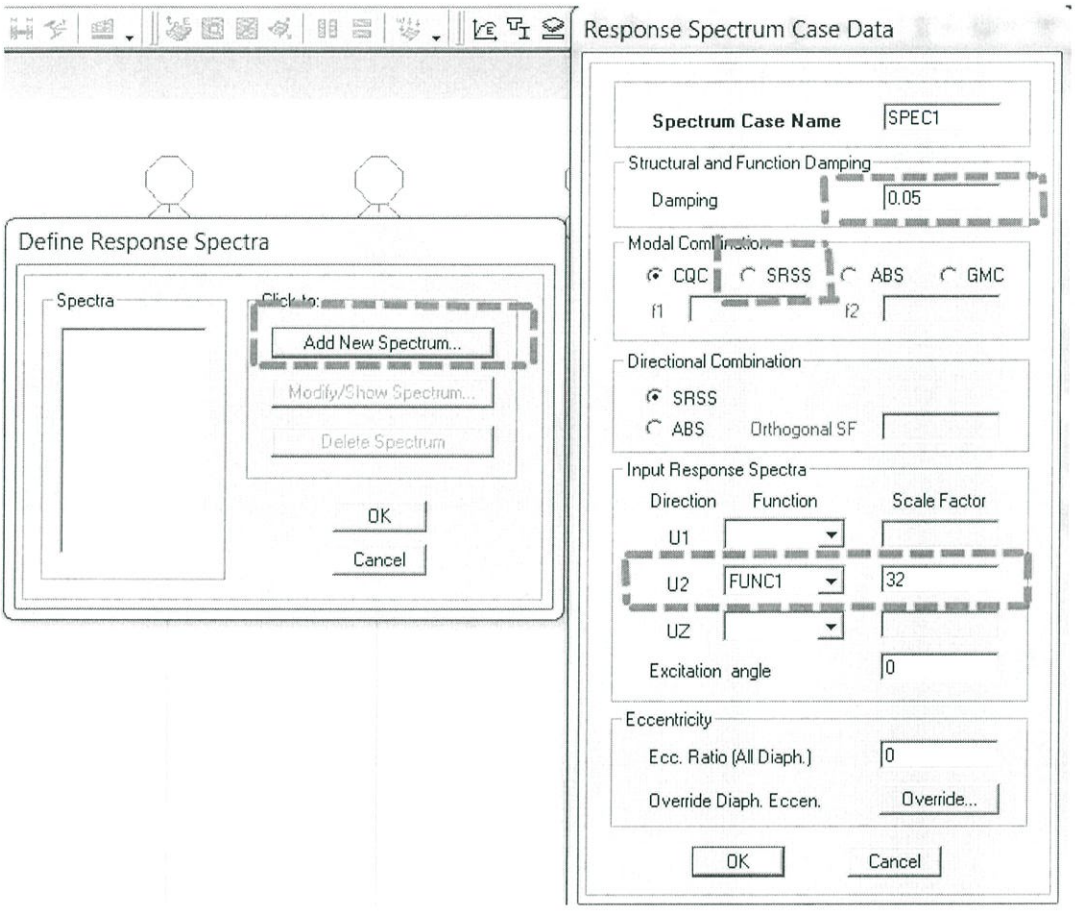


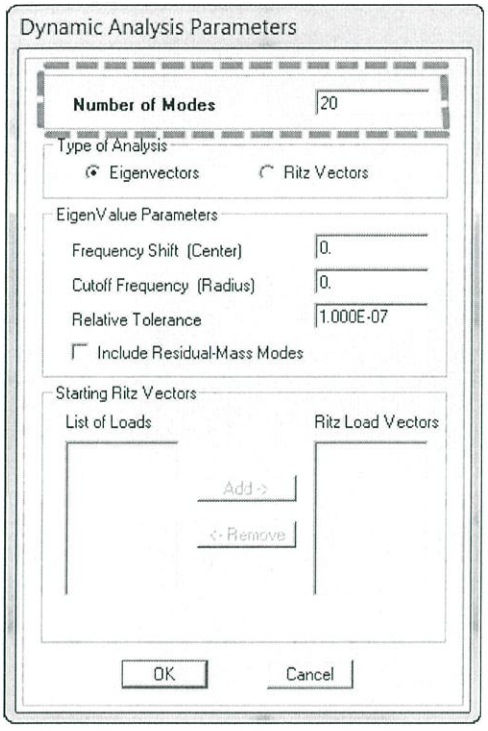
ให้เลือก “FUNC1” แล้วเลือก **OK**



Define > Response Spectrum Cases แล้วกด Add New Spectrum.

ใส่เลขตามรูปแล้วกด **OK**

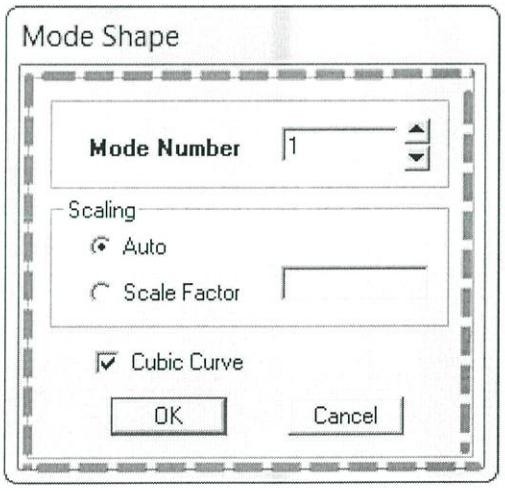




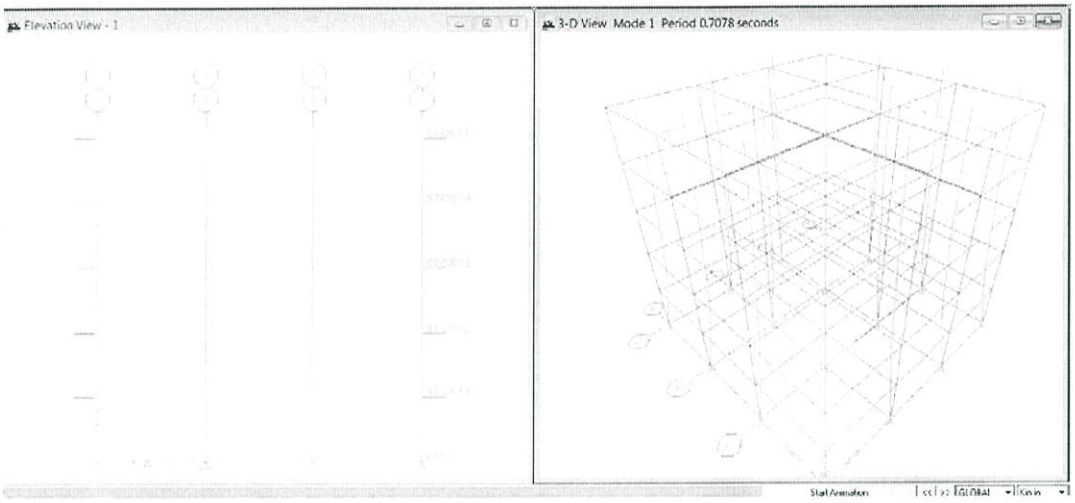
Analysis > **Set Analysis Options** แล้วคลิก **Set Dynamic Parameters**

Number of Modes = "20" แล้วกด OK

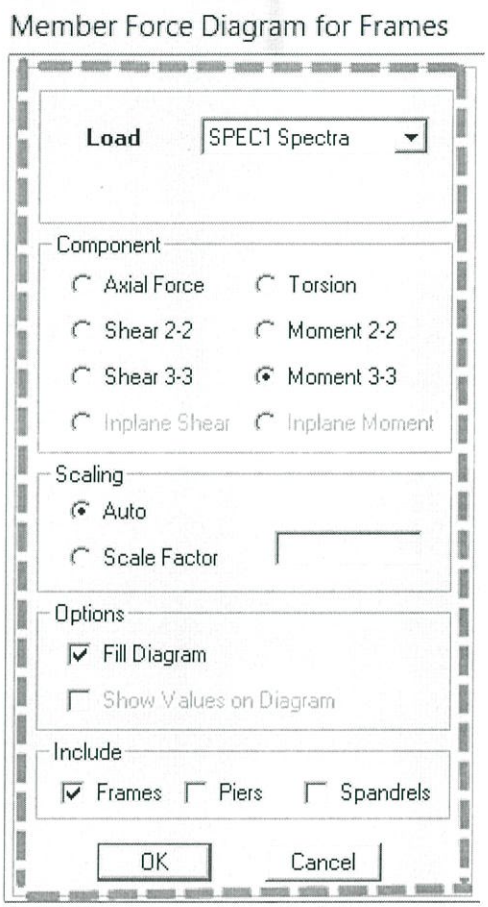
Analysis > Run Analysis จากนั้นใส่ **Display** > **Show Mode Shape**, ใส่ค่า **Mode Number** ตามรูป



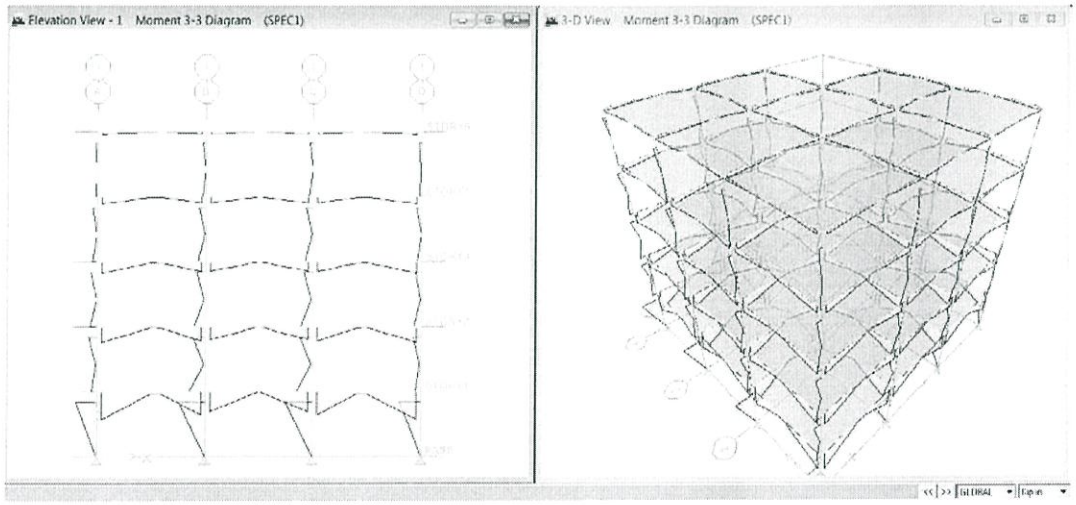
คลิกที่ **Start Animation**. ที่ปุ่มด้านขวาล่าง



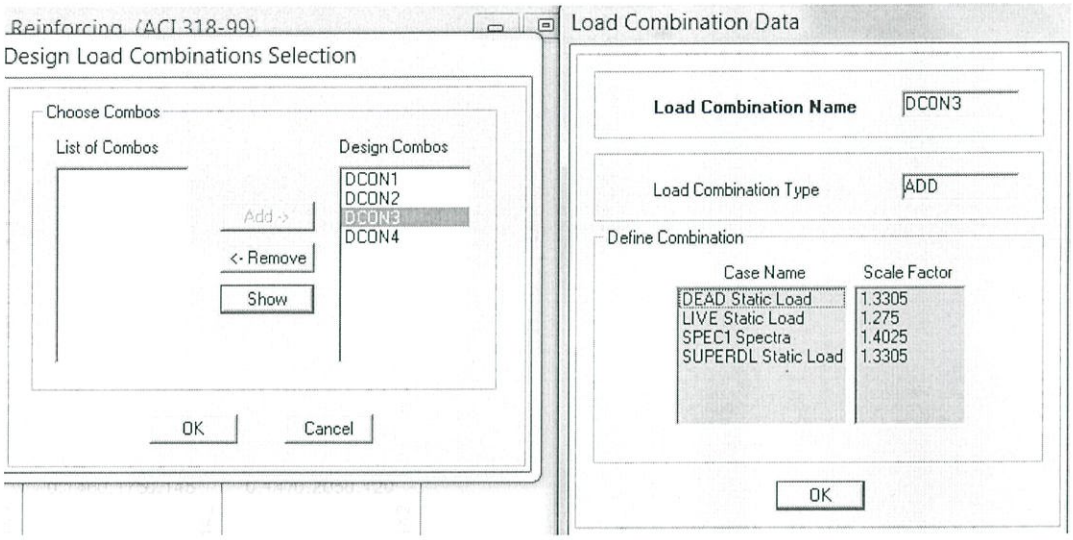
“SPEC1 Spectra” ใส่ค่า แล้วเลือก**OK**.



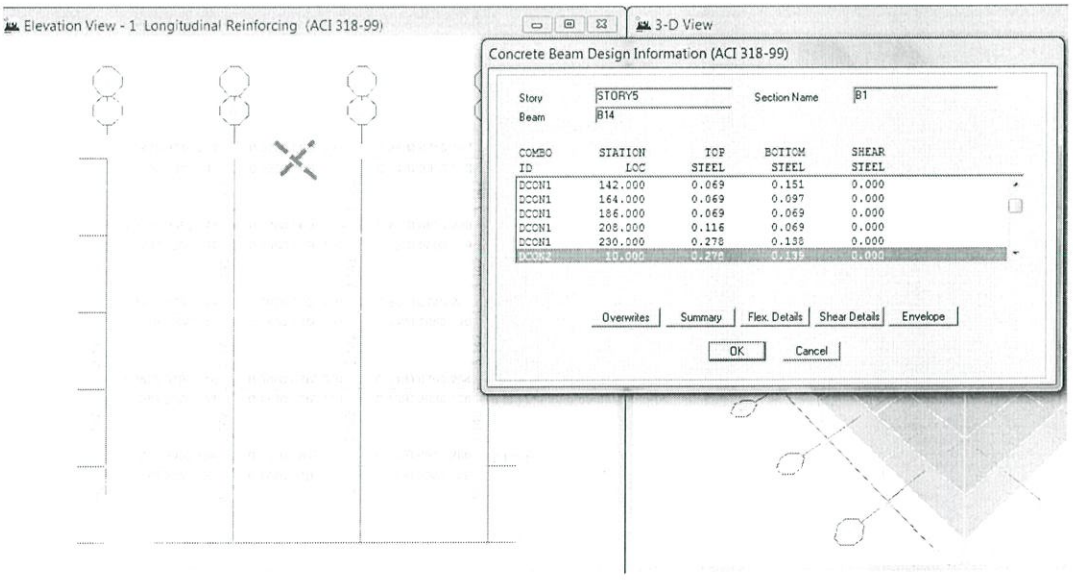
แสดงการวิเคราะห์ Dynamic



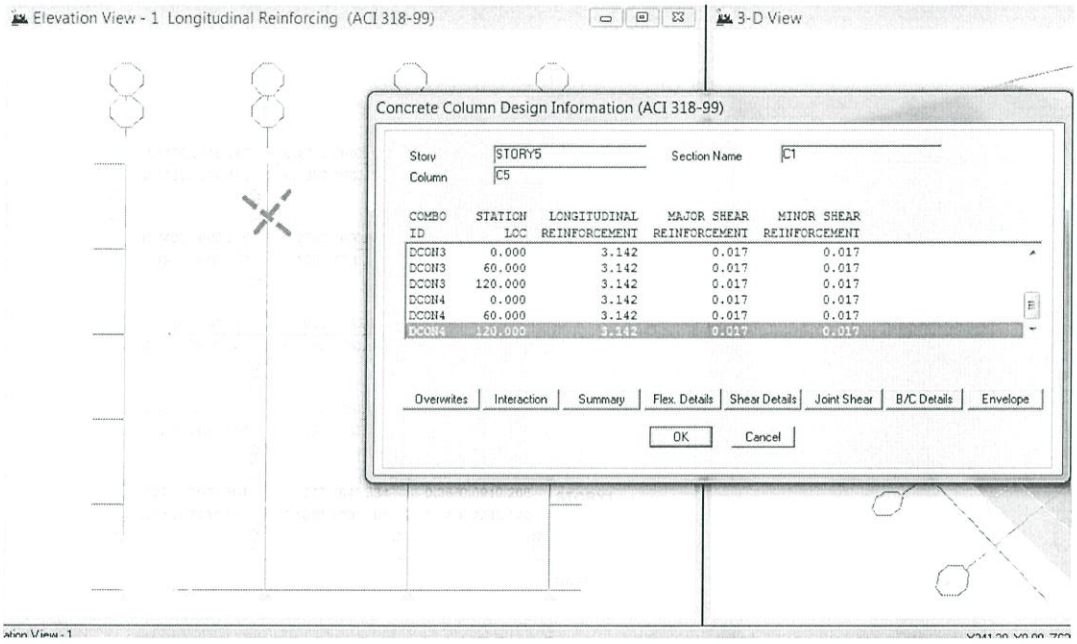
เลือก Scale Factor for each load cases แล้วกด **OK**.



เลือก เพื่อให้แสดงปริมาณเหล็ก



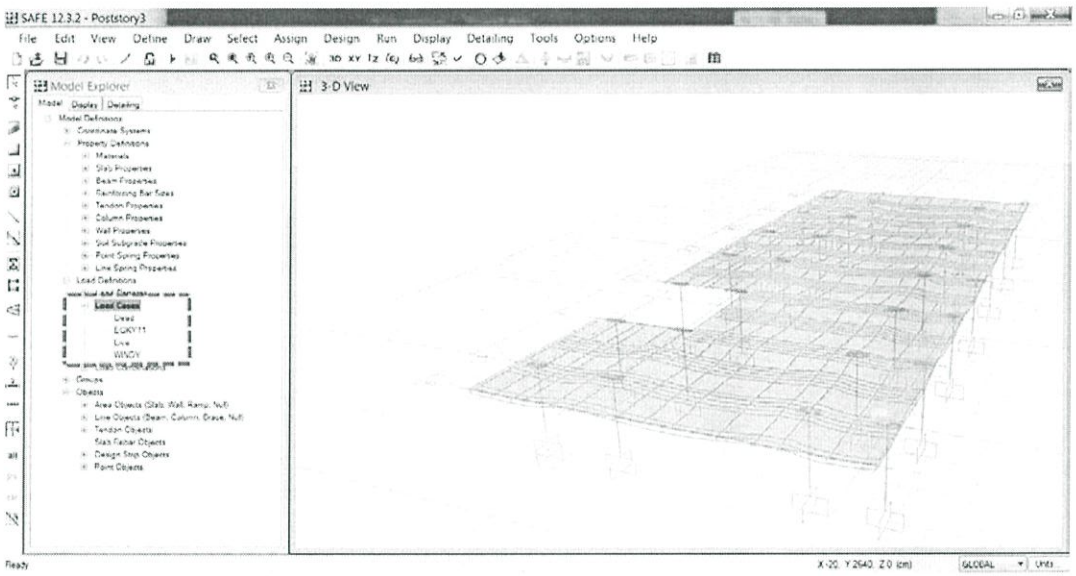
คลิกขวา ที่เสา โปรแกรม ETABS จะโชว์ปริมาณเหล็กของเสา



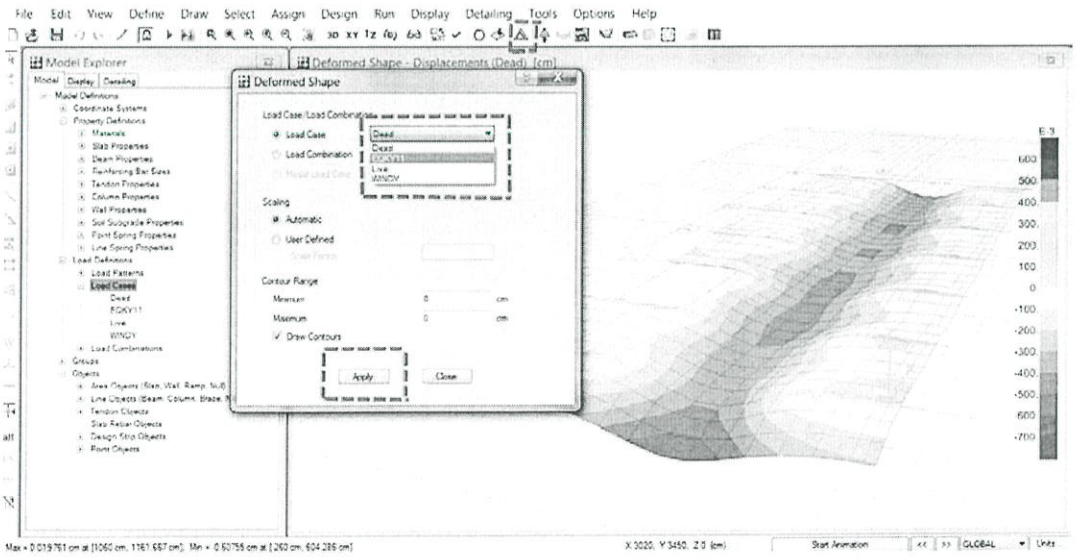
4.6 ขั้นตอนการนำข้อมูลมาใช้งานใน SAFE

แสดงการ import ETABS ไปยัง SAFE

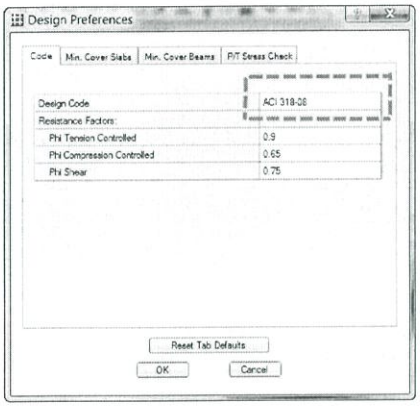
โดยจากโปรแกรม ETABS เมนู File > Import > SAFE> .F2K File เปิดไฟล์ FlatSlab3F.FDB ในหน้าต่าง Model Explore ที่รายการ Load Case ดูกรณีน้ำหนักที่ นำเข้ามาก จากนั้น สั่ง RUN



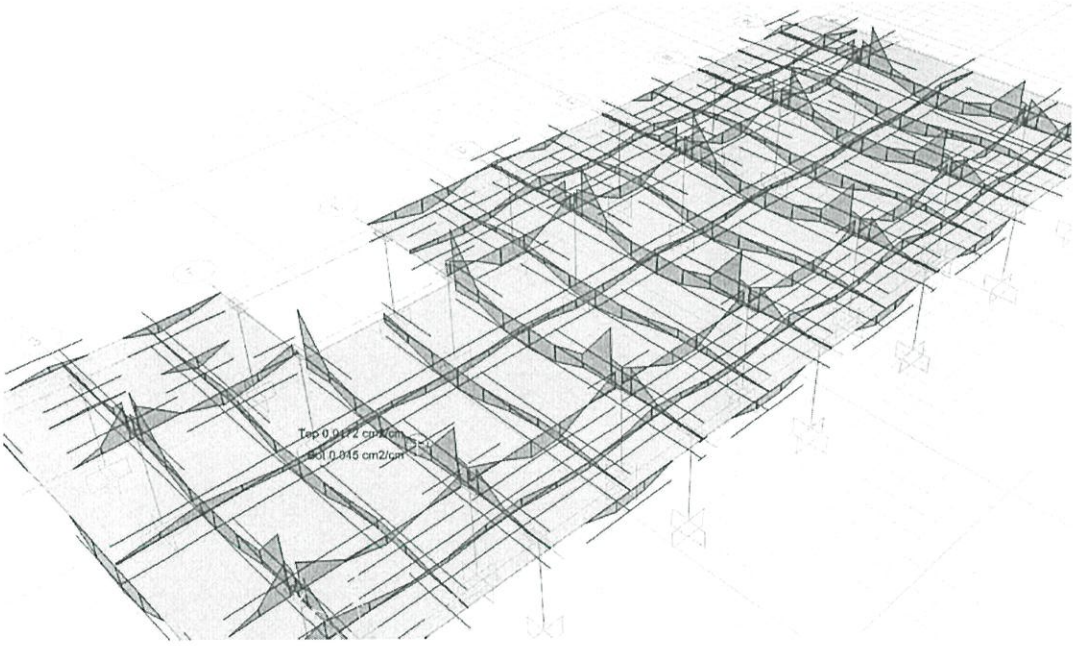
Show Deformed Shape เลือกกรณีน้ำหนักบรรทุก



4.7 ขั้นตอนการออกแบบเหล็กพื้น



สั่งเมนู Design > Design Preferences... เพื่อกำหนด Design Code



สั่งเมนู Run > Run Analysis & Design

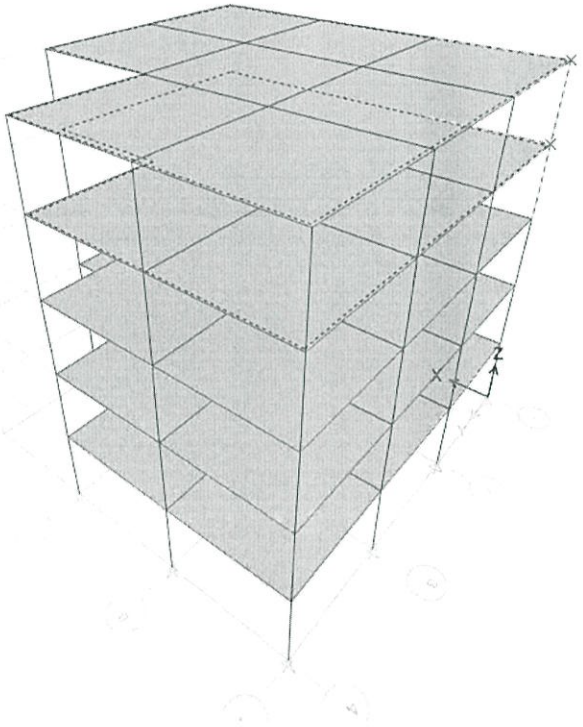
แล้วเลือกเมนู Display > Show Slab Design เลือก Strip Based แล้วแสดง Layer A และ B

บทที่ 5

การวิเคราะห์โครงสร้าง

โดยใช้โปรแกรม ETABS และ SAFE

5.1 แบบจำลองอาคาร 5 ชั้น



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างโมเดลของอาคาร 5 ชั้น

อาคาร 5 ชั้นสูงชั้นละ 3.6 เมตร ระยะคาน (Clear span) 6 เมตร จำนวนช่วงด้านละ 3 ช่วง

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

-<u>คอนกรีต</u> กำลังอัดประลัย $f'_c = 240 \frac{kg}{cm^2}$,

กำลังอัดที่ยอมให้ $f_c = 108 \frac{kg}{cm^2}$,

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_s = 235{,}632 \frac{kg}{cm^2}$

-<u>เหล็กเสริม</u> เหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR 24 กำลังจุดคลาก = 2,400 $\frac{kg}{cm^2}$

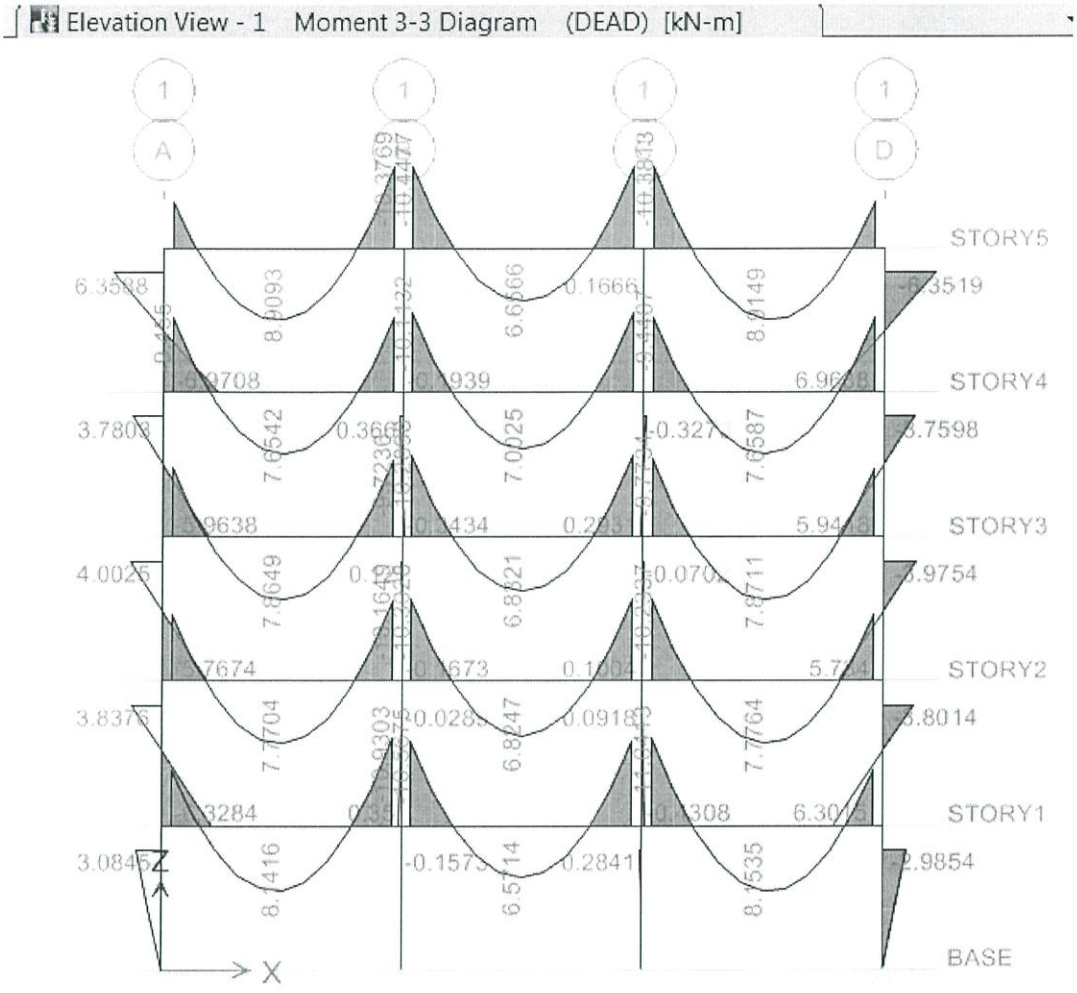
กำลังดึงประลัย = 3,900 $\frac{kg}{cm^2}$

เหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SD 40 กำลังจุดคลาก = 4,000 $\frac{kg}{cm^2}$

กำลังดึงประลัย = 5,700 $\frac{kg}{cm^2}$

-<u>น้ำหนักบรรทุกจร</u> (LIVE LOAD) = 300 $\frac{kg}{m^2}$

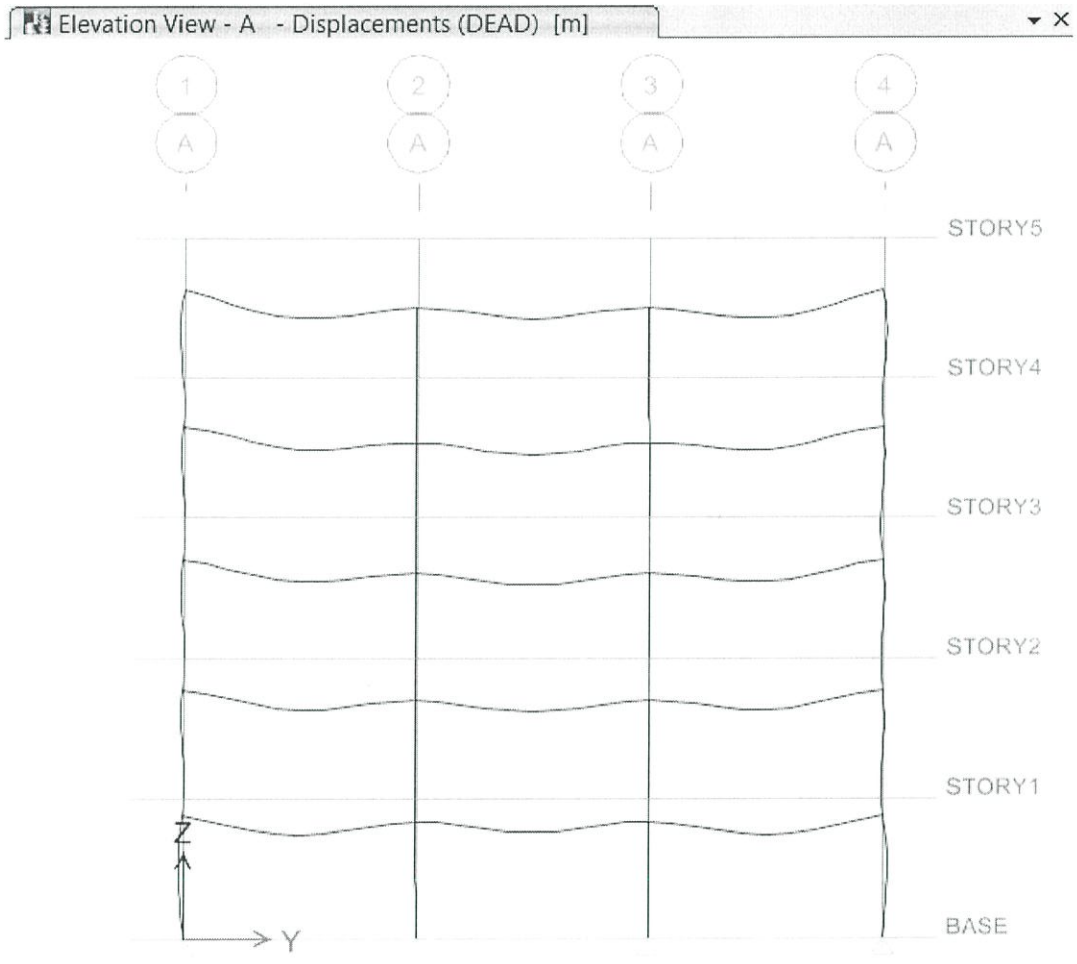
ผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ จากแบบจำลองของอาคาร 5 ชั้น



รูปที่ 5.2 แสดงค่าโมเมนต์ของจำลองของอาคาร 5 ชั้น

ค่าโมเมนต์มากสุดที่กึ่งกลางคานมีค่าคือ M_{max}= 8.9149 kN-m

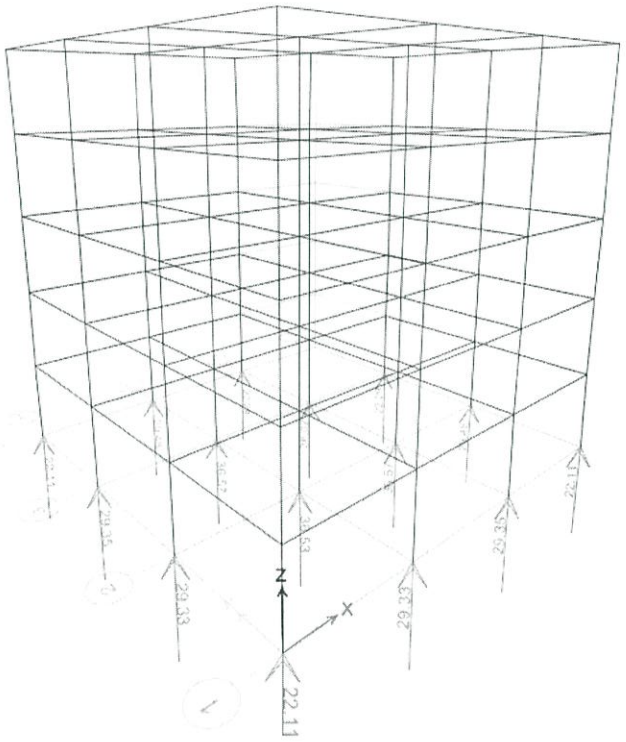
ผลวิเคราะห์การเซจากน้ำหนักกระทำ จากแบบจำลองของอาคาร 5 ชั้น



รูปที่ 5.3 การแอ่นตัวของน้ำหนักกระทำของแบบจำลองอาคาร 5 ชั้น

จากรูปการแอ่นตัว พบว่าการเซไปในแนวแกน Y มีค่ามากสุด เท่ากับ 0.0126 mm

ผลวิเคราะห์แสดงน้ำหนักลงสู่ฐานราก



รูปที่ 5.4 แสดงน้ำหนักบรรทุกลงสู่ฐานรากแบบจำลองอาคาร 5 ชั้น หน่วยเป็น ตัน

โครงสร้างมีน้ำหนักบรรทุกเสาต้นใน มีความใกล้เคียงกัน

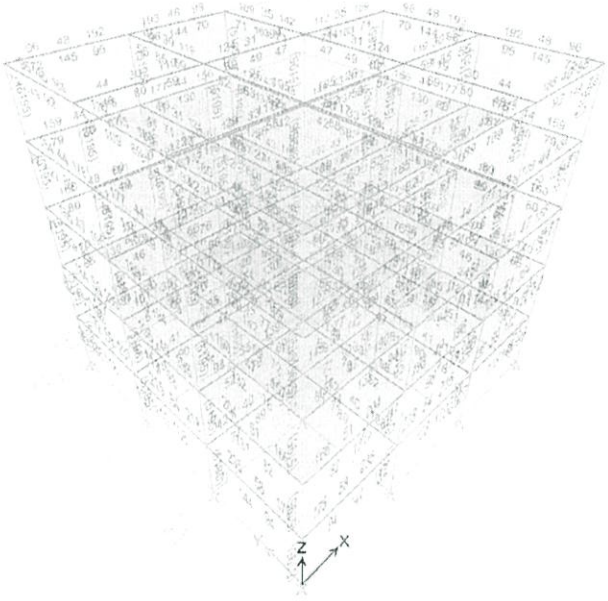
จากรูปน้ำหนักลงสู่ฐานรากมากที่สุดที่ตำแหน่ง กริด 2- C เท่ากับ 36.57 ตัน

น้ำหนักลงสู่ฐานรากที่ตำแหน่ง กริด 3- B เท่ากับ 36.57 ตัน

น้ำหนักลงสู่ฐานรากที่ตำแหน่ง กริด 2- B เท่ากับ 36.53 ตัน

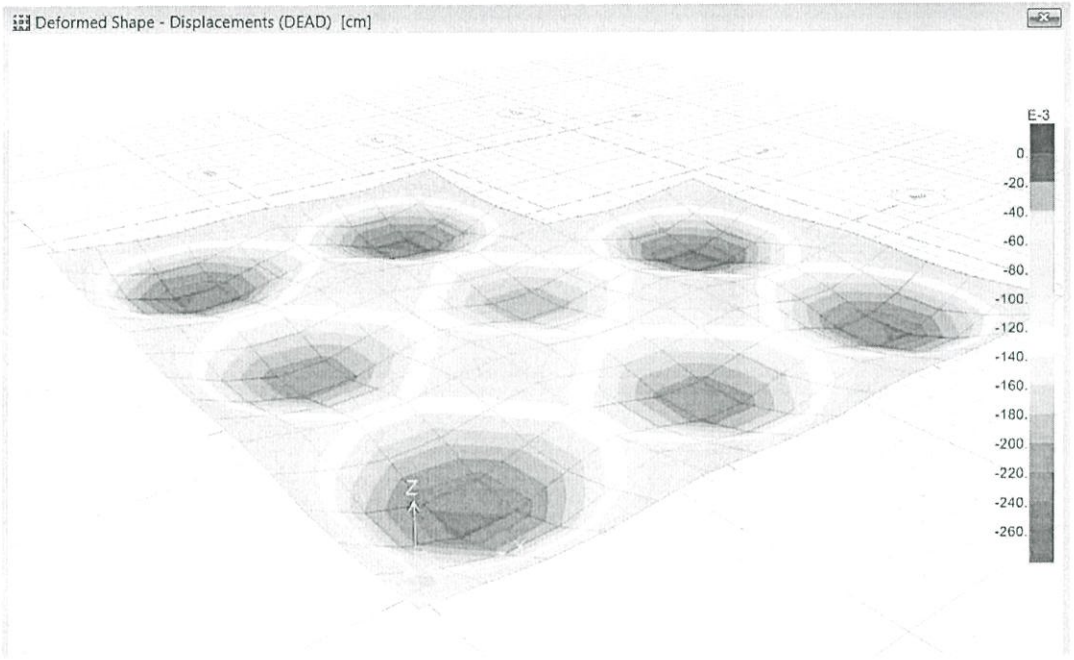
น้ำหนักลงสู่ฐานรากที่ตำแหน่ง กริด 3- C เท่ากับ 36.02 ตัน

ผลการวิเคราะห์ออกแบบปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ของชิ้นส่วนโครงสร้างอาคาร



รูปที่ 5.5 แสดงปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากการออกแบบ

ผลวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวจากโปรแกรม SAFE

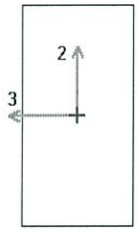


รูปที่ 5.6 แสดงผลวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัวจากโปรแกรม SAFE

จากรูปการแอ่นตัว พบว่าการแอ่นตัวของพื้น มีค่ามากสุด เท่ากับ 0.210979 cm

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กเสริมของคาน

ACI 318-08 Beam Section Design



Beam Element Details (Summary)

Level	Element	Section ID	Combo ID	Station Loc	Length (mm)	LLRF	Type
STORY5	B22	B1	DCON2	230	6096	1	Sway Special

Section Properties

b (mm)	h (mm)	b_f (mm)	d_s (mm)	d_{ct} (mm)	d_{cb} (mm)
300	600	300	0	60	60

Material Properties

E_c (MPa)	f'_c (MPa)	Lt.Wt Factor (Unitless)	f_y (MPa)	f_{ys} (MPa)
24821.13	24.00	1	413.69	413.69

Design Code Parameters

Φ_T	Φ_{CTied}	$\Phi_{CSpiral}$	Φ_{Vns}	Φ_{Vs}	Φ_{Vjoint}
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85

Design Moment and Flexural Reinforcement for Moment, M_{u3}

	Design -Moment kN-m	Design +Moment kN-m	-Moment Rebar mm²	+Moment Rebar mm²	Minimum Rebar mm²	Required Rebar mm²
Top (+2 Axis)	-29.1503	0	144	0	192	192
Bottom (-2 Axis)	0	14.5751	0	72	95	95

Shear Force and Reinforcement for Shear, V_{u2}

Shear V_{u2} kN	Shear ΦV_c kN	Shear ΦV_s kN	Shear V_p kN	Rebar A_v/S mm²/m
34.0612	109.3812	0	12.034	0

Torsion Force and Torsion Reinforcement for Torsion, T_u

ΦT_u kN-m	Tcr kN-m	Area A_o cm²	Perimeter, p_h mm	Rebar A_t/s mm²/m	Rebar A_l mm²/m
0.6949	6.2702	955.6	1473.2	0	0

Design Code Parameters

Φ_T	Φ_{CTied}	$\Phi_{CSpiral}$	Φ_{Vns}	Φ_{Vs}	Φ_{Vjoint}
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85

Shear/Torsion Design for V_{u2} and T_u

Rbar A_{vs} mm²/m	Rbar A_t/S mm²/m	Rbar A_l mm²	Design V_{u2} kN	Design T_u kN-m	Design M_{u3} kN-m	Design P_u kN
0	0	0	34.0612	0.6949	-29.1503	0

Design Forces

Design V_{u2} kN	Design M_{u3} kN-m
34.0612	-29.1503

Design Basis

Design V_{u2} kN	Conc.Area A_c cm²	Area A_g cm²	Tensn.Reinf A-st mm²	Strength f_{ys} MPa	Strength f_{cs} MPa	LtWt.Reduc Factor Unitless
34.0612	1672.3	1858.1	192	413.69	27.58	1

Shear Rebar Design

Stress v MPa	Conc.Capacity v_c MPa	Uppr.Limit v_{max} MPa	Conc.Capacity Φv_c MPa	Uppr.Limit Φv_{max} MPa	RebarArea A_v/s mm²/m	Shear ΦV_c kN	Shear ΦV_s kN	Shear ΦV_n kN
0.2	0.87	4.36	0.65	3.27	0	109.3812	0	109.3812

Torsion Capacity

Torsion T_u kN-m	Critical ΦT_{cr} kN-m	Conc.Area A_{cp} cm²	Conc.Area A_{oh} cm²	Conc.Area A_o cm²	Perimeter P_{cp} mm	Perimeter P_h mm
0.6949	6.2702	1858.1	1124.2	955.6	1828.8	1473.2

Design Code Parameters

Φ_T	Φ_{CTied}	$\Phi_{CSpiral}$	Φ_{Vns}	Φ_{Vs}	Φ_{Vjoint}
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85

Flexural Reinforcement for Moment, M_{u3}

	Required Rebar mm²	+Moment Rebar mm²	-Moment Rebar mm²	Minimum Rebar mm²
Top (+2 Axis)	192	0	144	192
Bottom (-2 Axis)	95	72	0	95

Design Moments, M_{u3}

Design +Moment kN-m	Design -Moment kN-m
14.5751	-29.1503

Flexural Reinforcement for Major Axis Moment, M_{u3}

	End-I Rebar Area mm²	End-I Rebar %	Middle Rebar Area mm²	Middle Rebar %	End-J Rebar Area mm²	End-J Rebar %
Top (+2 Axis)	96	0.05	48	0.03	192	0.1
Bot (-2 Axis)	72	0.04	145	0.08	95	0.05

Flexural Design Moment, M_{u3}

	End-I Design M_u kN-m	End-I Station Loc mm	Middle Design M_u kN-m	Middle Station Loc mm	End-J Design M_u kN-m	End-J Station Loc mm
Top (+2 Axis)	-14.6405	254	-7.2876	4165.6	-29.1503	5842
Combo	DCON3		DCON2		DCON2	
Bot (-2 Axis)	10.9967	1371.6	22.1566	3048	14.5751	5842
Combo	DCON2		DCON2		DCON2	

Shear Reinforcement for Major Shear, V_{u2}

End-I Rebar A_v /s mm²/m	Middle Rebar A_v /s mm²/m	End-J Rebar A_v /s mm²/m
0	0	0

Design Shear Force for Major Shear, V_{u2}

End-I Design V_u kN	End-I Station Loc mm	Middle Design V_u kN	Middle Station Loc mm	End-J Design V_u kN	End-J Station Loc mm
39.3384	254	0.6731	4165.6	44.4043	5842
DCON3		DCON3		DCON3	

Torsion Reinforcement

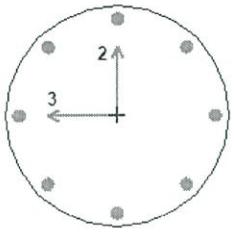
Shear Rebar A_t /s mm²/m	Longitudinal Rebar A_l mm²
0	0

Design Torsion Force

Design T_u kN-m	Station Loc mm	Design T_u kN-m	Station Loc mm
0.6949	5842	0.6949	5842
DCON2		DCON2	

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กเสริมของเสา

ACI 318-08 Column Section Design



Column Element Details (Summary)

Level	Element	Section ID	Combo ID	Station Loc	Length (cm)	LLRF	Type
STORY1	C4	C1	DCON2	0	365.76	1	Sway Special

Section Properties

d (cm)	h_0 (cm)	dc (cm)	Cover (Torsion) (cm)
50.8	47.752	3.048	-0.936

Material Properties

E_c (kN/cm²)	f'_c (kN/cm²)	Lt.Wt Factor (Unitless)	f_y (kN/cm²)	f_{ys} (kN/cm²)
2482.113	2.758	1	41.369	41.369

Design Code Parameters

Φ_T	Φ_{CTied}	$\Phi_{CSpiral}$	Φ_{Vns}	Φ_{Vs}	Φ_{Vjoint}
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85

Axial Force and Biaxial Moment Design For P_u , M_{u2} , M_{u3}

Design P_u kN	Design M_{u2} kN-cm	Design M_{u3} kN-cm	Minimum M_2 kN-cm	Minimum M_3 kN-cm	Rebar % %	Capacity Ratio Unitless
449.2622	0	1369.351	1369.351	1369.351	16.53	0.13

Axial Force and Biaxial Moment Factors

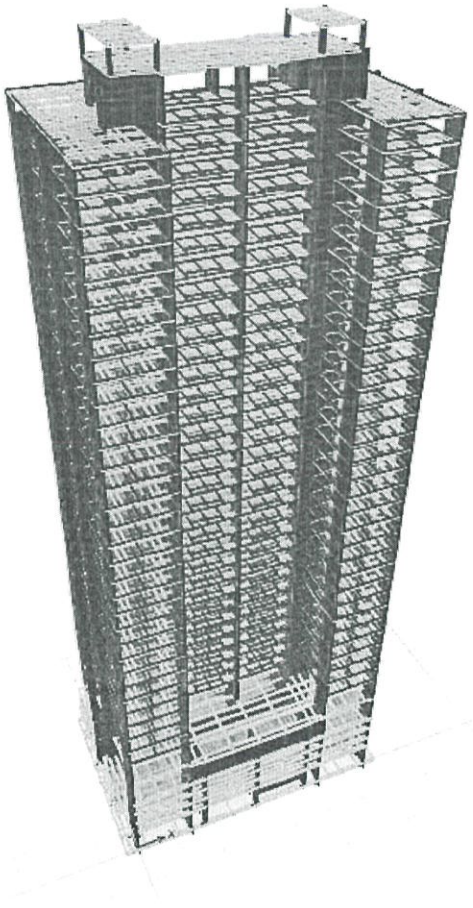
	C_m Factor Unitless	δ_{ns} Factor Unitless	δ_s Factor Unitless	K Factor Unitless	Length cm
Major Bend(M3)	0.6	1	1	1	304.8
Minor Bend(M2)	0.6	1	1	1	304.8

Shear Design for V_{u2} , V_{u3}

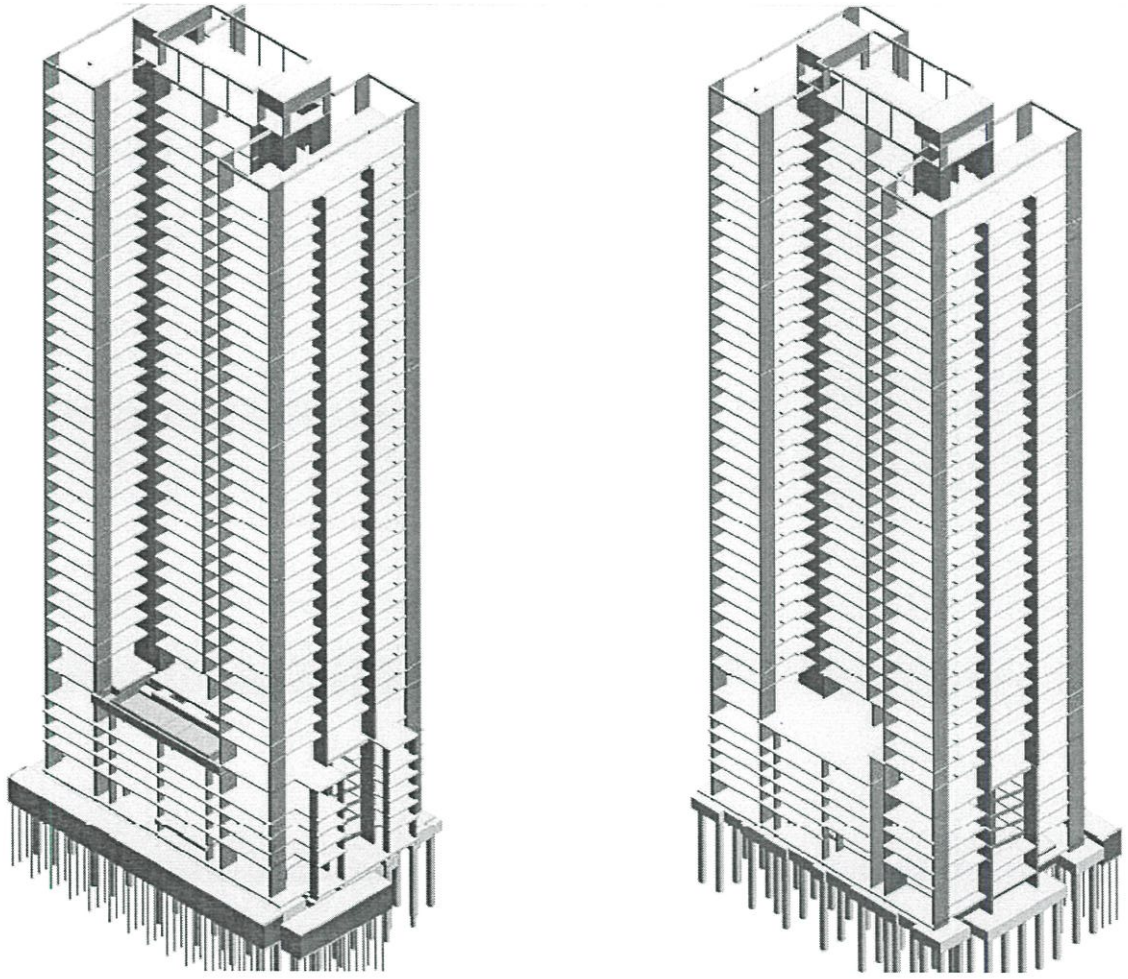
	Shear V_u kN	Shear ΦV_c kN	Shear ΦV_s kN	Shear ΦV_p kN	Rebar A_v /s cm^2/cm
Major, V_{u2}	2.4722	153.8841	0	0	0
Minor, V_{u3}	2.4038	153.8841	0	13.6289	0

5.2 แบบจำลองอาคาร 40 ชั้น

อาคาร 40 ชั้นสูงชั้นละ 3.2 เมตร



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างโมเดลของอาคาร 40 ชั้น



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างแบบจำลองของอาคาร 40 ชั้น

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

-<u>คอนกรีต</u> กำลังอัดประลัย $f'_c = 240\ \frac{kg}{cm^2}$, $280\ \frac{kg}{cm^2}$, $320\ \frac{kg}{cm^2}$, $400\ \frac{kg}{cm^2}$, $500\ \frac{kg}{cm^2}$

-<u>เหล็กเสริม</u> เหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR 24 กำลังจุดคลาก = $2{,}400\ \frac{kg}{cm^2}$

กำลังดึงประลัย = $3{,}900\ \frac{kg}{cm^2}$

เหล็กเส้น ชั้นคุณภาพ SD 40 กำลังจุดคลาก = $4{,}000\ \frac{kg}{cm^2}$

กำลังดึงประลัย = $5{,}700\ \frac{kg}{cm^2}$

ตารางที่ 5.1 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตในกำแพงรับแรงเฉือน

COMPONENTS	ชั้นที่(FLOOR)	กำลังอัดคอนกรีต	REBAR GRADE	หมายเหตุ
กำแพงรับแรงเฉือน	L25-หลังคา	fc' = 280 ksc	fy = 4,000 KSC	คอนกรีตทรงกระบอก กำลังอัดที่ 28 วัน
	L20-L25	fc' = 400 ksc	fy = 4,000 KSC	
	L15-L20	fc' = 500 ksc	fy = 4,000 KSC	
	L01-L15	fc' = 500 ksc	fy = 5,000 KSC	

-น้ำหนักบรรทุกจรของสำนักงาน (Office) $= 200\ \frac{kg}{m^2}$

-น้ำหนักบรรทุกจรของลานจอดรถ (Car park) $= 300\ \frac{kg}{m^2}$

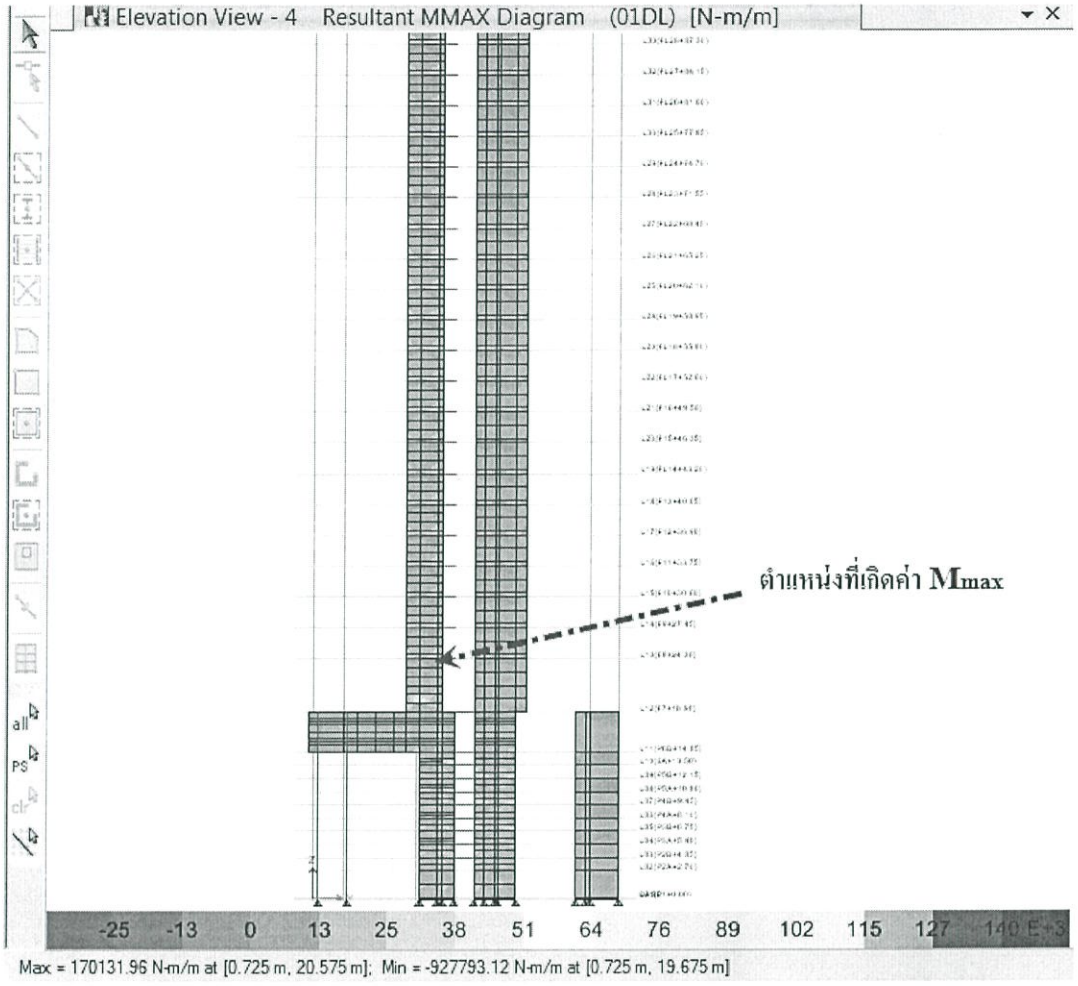
-แรงลม Wind Load Cases (UBC97)

Parameter	Load Case	
	WINDX	WINDY
ทิศทางแรงลม	X	Y
ความเร็วลม	90 mph	
ประเทของดิน	E (ดินอ่อน)	
ตัวประกอบสำคัญ	1.5	

- แรงแผ่นดินไหว (Equivalent Static Force Parameters) IBC 2000

Parameter	**Values**	**Remark**
Time Period (T)	1.47	(C_t = 0.020)
Response Modification Factor (R)	5.5	Dual System: Ordinary RC Shear Wall
Seismic Group	I	
Site Class	E	(ดินอ่อน Soft Clay)
Response Acceleration at Short Period (S_S)	0.45	
Response Acceleration at 1 Second (S_1)	0.18	

ตัวอย่างผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ในกำแพงรับแรงเฉือน

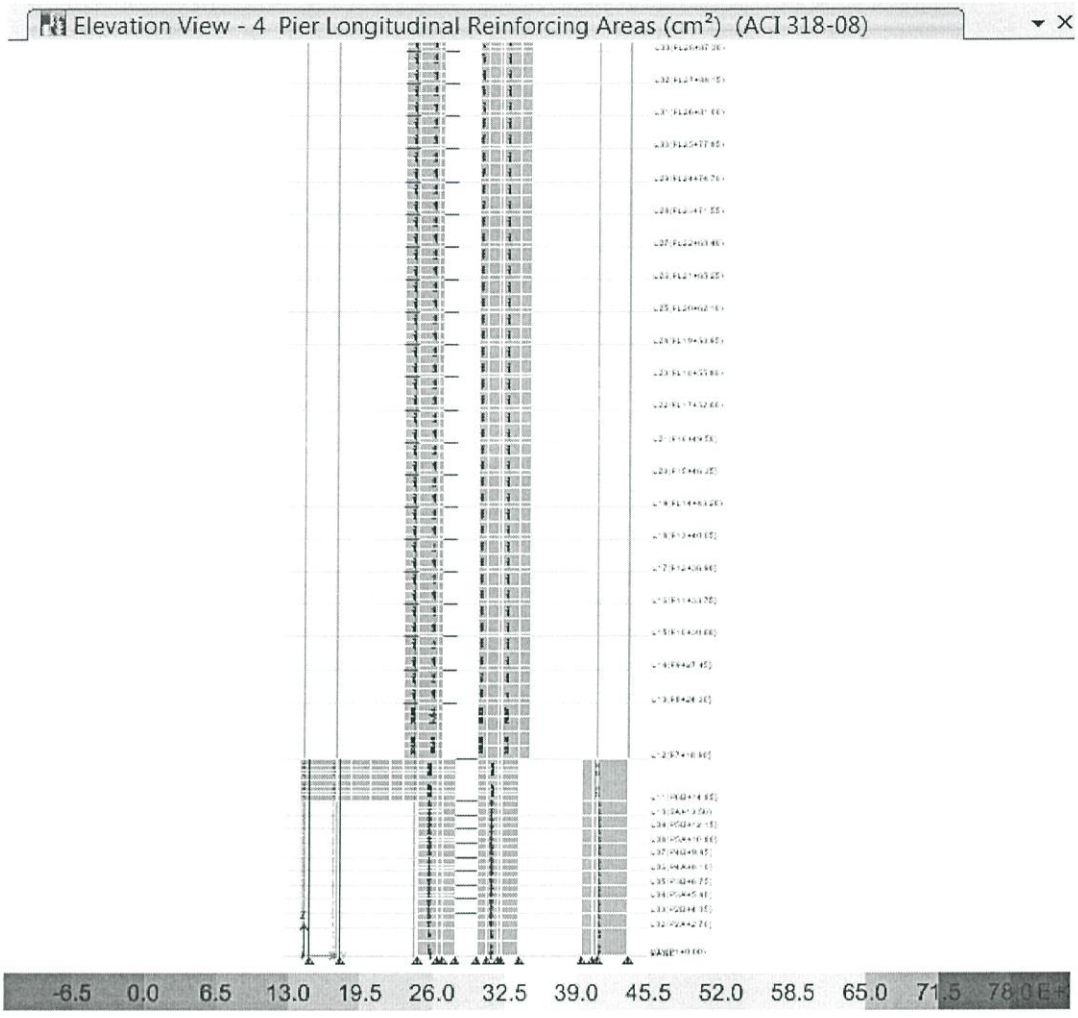


รูปที่ 5.9 แสดงค่าโมเมนต์ของกำแพงรับแรงเฉือน

ค่าโมเมนต์มากสุดในกำแพงรับแรงเฉือน คือ M_{max}= 170,131 N-m

เกิดขึ้นที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชั้น 12 กับ ชั้น 13 ที่ความสูง 20.575 เมตร

ตัวอย่างแสดงพื้นที่หน้าตัดเหล็กในการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือน



รูปที่ 5.10 แสดงพื้นที่เหล็กในกำแพงรับแรงเฉือน

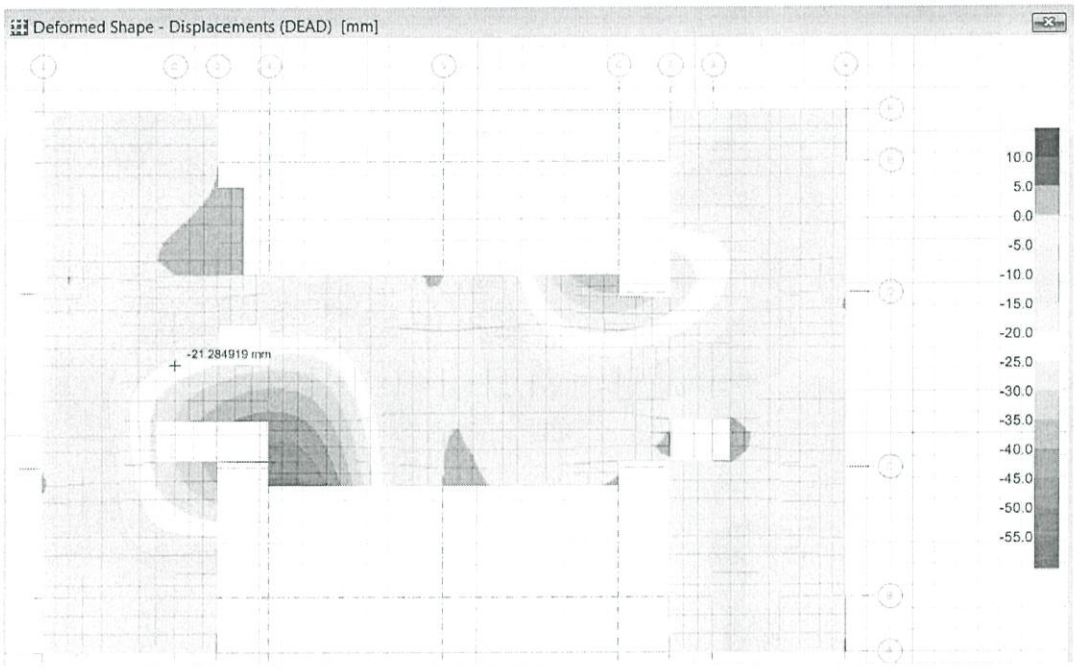
ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือน

Story	Pier Label	Station	Design Type	Edge Rebar	End Rebar	Rebar Spacing	Required Reinf	Current Reinf	Pier Leg	Leg X	Leg Y	Leg X	Leg Y	Shear Rebar
L05(P3B+6.75)	P05	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	0
L05(P3B+6.75)	P05	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	3000
L04(P3A+5.40)	P05	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	0
L04(P3A+5.40)	P05	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	3000
L03(P2B+4.05)	P05	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	0
L03(P2B+4.05)	P05	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	3000
L02(P2A+2.70)	P05	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	0
L02(P2A+2.70)	P05	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	3000
L01(P1+0.00)	P05	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	0
L01(P1+0.00)	P05	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23099.9	30800.1	23099.9	30800.1	3000
L05(P3B+6.75)	P06	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	0
L05(P3B+6.75)	P06	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	3000
L04(P3A+5.40)	P06	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	0
L04(P3A+5.40)	P06	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	3000
L03(P2B+4.05)	P06	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	0
L03(P2B+4.05)	P06	Bottom	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Bottom Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	3000
L02(P2A+2.70)	P06	Top	Uniform	DB20	DB20	250	0.25	0.92	Top Leg 1	23100.1	27799.7	23100.1	27799.7	0

ตารางที่ 5.3 แสดงการใส่เหล็กในกำแพงรับแรงเฉือน

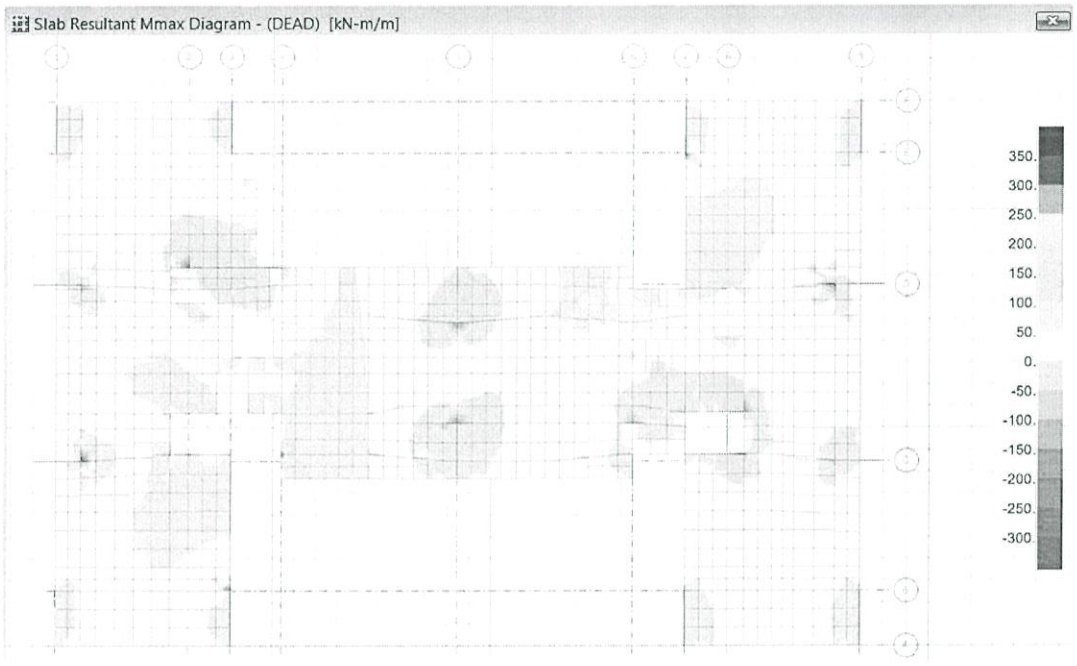
F01 - F02	F02 - F04	F04 - F07	F07 - F09
Size : 3150 x 500 MB = 18-DB20 S : DB12@150 (1H) TB : DB12@300 (7T)	Size : 3150 x 500 MB = 18-DB20 So : DB12@200 (1H) TB : DB12@300 (7T)	Size : 3150 x 500 MB = 18-DB20 So : DB12@200 (1H) TB : DB12@300 (7T)	Size : 3150 x 500 MB = 18-DB20 So : DB12@200 (1H) TB : DB12@300 (7T)

ผลวิเคราะห์ตัวอย่างการแอ่นตัวของพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE



รูปที่ 5.11 แสดงการแอ่นตัวของพื้นไร้คาน

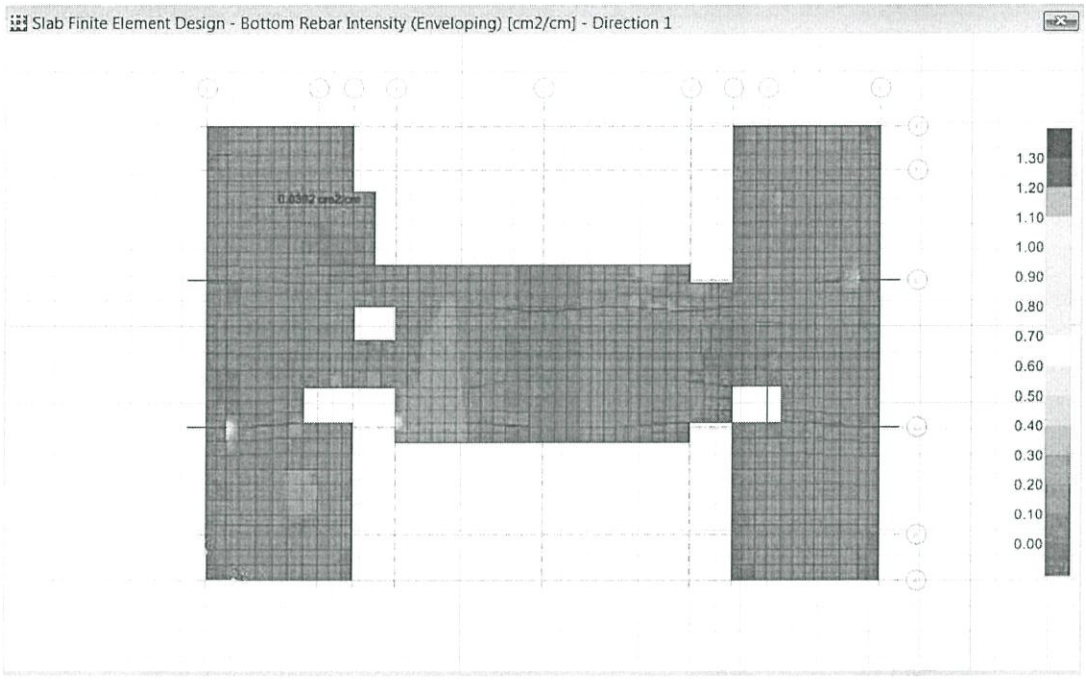
ผลวิเคราะห์ตัวอย่างผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ของพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม **SAFE**



รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างผลวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ของพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE

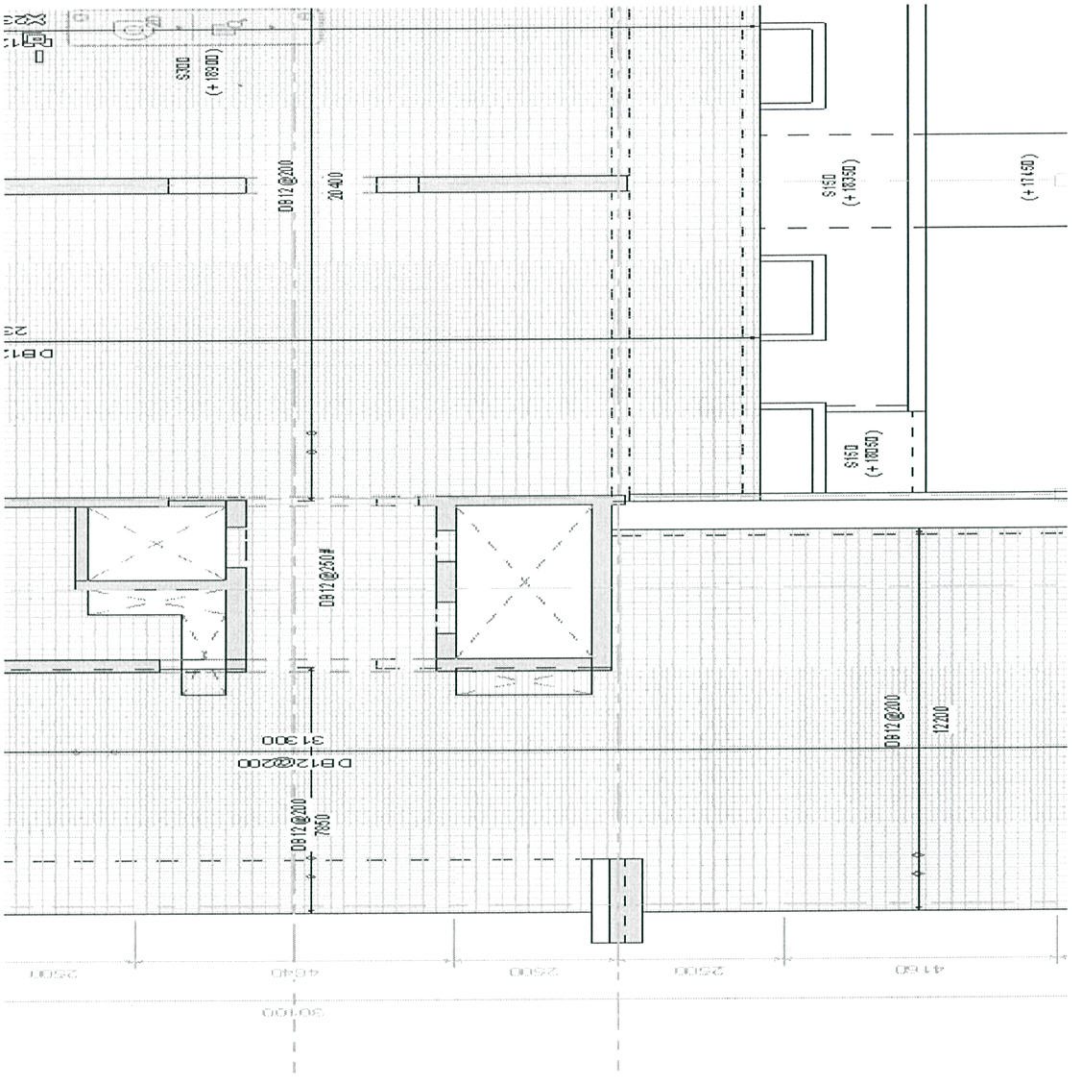
ค่าโมเมนต์มากสุดที่บริเวณเส้นกริด **4-C** มีค่าคือ M_{max}= 303.7345 kN-m

ผลวิเคราะห์ตัวอย่างหาปริมาณเหล็กพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE



รูปที่ 5.13 แสดงผลวิเคราะห์ตัวอย่างหาปริมาณเหล็กพื้นไร้คาน ด้วยโปรแกรม SAFE

ตัวอย่างแสดงการใส่เหล็กในเหล็กพื้นไร้คาน



รูปที่ 5.14 แสดงการใส่เหล็กในเหล็กพื้นไร้คาน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

โครงงานพิเศษนี้เป็นโครงงานที่ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างอาคารชนิดต่างๆและข้อกำหนดในการออกแบบอาคาร โดยคำนึงถึงแรงกระทำต่างๆที่มีผลต่อการออกแบบ

จากการสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม ETABS สามารถคำนวณวิเคราะห์หาแรงกระทำของน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัวและค่าโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วนต่างๆไม่ว่าจะเป็น คาน เสา กำแพงรับแรงเฉือน โดยโปรแกรม ETABS ใช้วิเคราะห์หาปริมาณการเสริมเหล็กในเสา คานและกำแพงรับแรงเฉือน ส่วนโปรแกรม SAFE จะใช้คำนวณหาปริมาณการเสริมเหล็กในพื้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์โครงสร้างควรศึกษาข้อกำหนดและการคำนวณออกแบบให้ดีก่อนนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม โดยตัวโปรแกรมอาจจะมีผลให้ความผิดพลาดได้ อันเนื่องมาจากการใส่แรงกระทำที่ไม่ตรงกับชิ้นส่วนของโครงสร้าง หรืออาจจะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบ ทำให้โครงสร้างรับแรงกระทำได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงทำให้เกิดการวิบัติในชิ้นส่วนของโครงสร้าง

บรรณานุกรม

ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555. **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพบูลย์ ปัญญาคะโป, 2545. **การออกแบบอาคาร.** กรุงเทพฯ : ไลบราลี่นาย

เดช พุทธเจริญทอง, 2548. **การวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์.** กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ

นายธีระพล เรามานะชัย,นางสาวนพรัตน์ ไตรถาวร,นายสกฤษดิ์ อุดมสุวรรณกุล, 2551. **การเปรียบเทียบมูลค่าทางโครงสร้างของอาคารสูง 23 ชั้น และ 36 ชั้น ในกรณีออกแบบเพื่อรับแรงลม และกรณีออกแบบเพื่อรับแรงกระทบจากแผ่นดินไหว.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เดช พุทธเจริญทอง, 2548. **การวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์.** กรุงเทพฯ : ไลบราลี่นาย

Rajasekarah, S., 2008. **Finite element analysis : in engineering.** n.p.

ปิยวัชร ชัยเสรี, 2554. **เทคนิคการก่อสร้างอาคารสูงพิเศษ. บทความวิชการ**