



การวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับอาคารสูง
ภายใต้แรงกระทำด้านข้าง

โดย

ทักษิณ เทพชาตรี

โครงการวิจัย เลขที่ 108-MRD-2530
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ฯ

พฤษภาคม 2532

221

38

ก 15 11 100

การวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับอาคารสูงภายใต้แรงกระทำด้านข้าง

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี

วุฒิ
วศ.บ. (เกียรตินิยม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
M.Sc. The University of Illinois, U.S.A.
Ph.D. The University of Texas at Austin, U.S.A.

โครงการวิจัยเลขที่ 108-MRD-2530

ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์



สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

พฤษภาคม 2532

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการวิเคราะห์อย่างง่าย เพื่อหาค่าการกระจายแรงกระทำด้านข้างสำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่สามารถแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูง รวมถึงแรงกระทำด้านข้างที่มีลักษณะสมมาตรและไม่สมมาตร โดยสมมติให้การกระจายของแรงในโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า แทนด้วยแรงเดี่ยวยกระทำเป็นจุดที่ชั้นยอดสุดรวมกับแรงกระจายในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆตลอดความสูง ทั้งนี้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างที่ผ่านตำแหน่งศูนย์กับการเคลื่อนที่ในแนวราบและแรงบิดกับมุมบิด

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นหาได้โดยวิธีการวัดต่อเนื่อง วิธีการขั้นแรกแทนโครงสร้างดิสครีต ด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก จากนั้นอาศัยการสมมติโหมดหลักของการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ทำให้สามารถหาพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในรูปของการเคลื่อนที่ของกล่องในแนวแกน ในแนวราบ รวมถึงมุมที่บิดไป จากนั้นจึงใช้กฎของพลังงานศักย์รวมน้อยที่สุดและวิธีการของริทซ์ ในการหาชุดของสมการพีชคณิตเพื่อหาค่าคงที่ที่ติดอยู่ในฟังก์ชันการเคลื่อนที่และมุมบิดที่สมมติขึ้น ก็จะได้ความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยอาศัยสมการสมดุลงและสมการต่อเนื่องที่ระดับอ้างอิงใดๆที่กำหนดไว้ จะได้สมการในรูปเมตริกซ์ซึ่งใช้หาค่าการกระจายแรงในโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้

วิธีการนี้ให้ค่าที่ถูกต้องพอสมควรเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยของผู้อื่น





Abstract

This research presents a simplified analysis of lateral load for non-uniform frame tube. The analysis is also applicable to Symmetrical and non-symmetrical lateral load. The load distribution on a frame tube is first assumed to be represented by a concentrated load at the top together with a distributed load, in the form of a polynomial, through out the height of the building. This first approximation is obtained by relating the deflection and rotation at any reference level to any particular lateral load component and torsional load component respectively.

The afore mentioned relationship may be obtained by employing a continuum approach. First the discrete structure is replaced by an equivalent orthotropic. By means of simplifying assumptions regarding the principle mode of deformation in the structure, the strain energy is expressed in terms of the warping displacement, lateral displacement and twisting angle. The principle of minimum potential energy and the Ritz method are then applied to yield a set of algebraic equations for determining the undetermined constants in the assumed displacement functions and twisting angle functions. By making use of the equilibrium and compatibility equations at any desired set of reference levels, the desired equations are found in matrix form and the loads on the frame tube together with the responses may be determined.

The results obtained from this method agree reasonably well with solutions obtained by other researchers

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้จากเงินทุนวิจัยคณะฯ ประจำปี พ.ศ. 2531 และนายบรรพต เจริญสัตยธรรม นิสิตปริญญาโทบัณฑิตที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยจนสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract ..	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
รายชื่อตาราง	ง
รายชื่อรูป	จ
รายการสัญลักษณ์	ช
รายการภาคผนวก	ฎ
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 การสำรวจการวิจัยในอดีต	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
2. วิธีการวิเคราะห์	6
2.1 บทนำ	6
2.2 สมมติฐาน	6
2.3 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างขององค์อาคาร	7
2.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของ โครงข้อแข็งรูปกล่อง สี่เหลี่ยมผืนผ้า	7
2.3.1.1 พลังงานศักย์ทั้งหมด (Total Potential Energy) ของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า	8
2.3.1.2 พลังงานศักย์เนื่องจากแรงกระทำภายนอก ..	11
2.3.1.3 วิธีการของริทซ์ (Ritz Method)	11
2.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย	13
3. ขั้นตอนของโปรแกรมวิเคราะห์	19
3.1 โปรแกรมการป้อนข้อมูล	19

3.2	โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล	20
3.3	โปรแกรมแสดงผลผลการวิเคราะห์	21
4	ตัวอย่างและผลการวิเคราะห์	22
4.1	ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดช่วงห่างระหว่าง เสาของสองด้านเท่ากัน ด้านแรงบิดคงที่	22
4.2	ตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดช่วงห่างระหว่าง เสาสองด้านเท่ากัน ด้านแรงกระทำด้านข้างผ่านศูนย์กลางขนาดคงที่ ..	24
4.3	ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดช่วงห่างระหว่าง เสาสองด้านเท่ากัน ด้านแรงกระทำด้านข้างที่ไม่ผ่านศูนย์กลางตามเทคโนโลยี กรุงเทพมหานคร	25
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	27
5.1	สรุปผลการวิจัย	27
5.2	ข้อเสนอแนะ	28
	เอกสารอ้างอิง	29
	รูปภาพประกอบ	31
	ตารางประกอบ	62
	ภาคผนวก	73

รายชื่อตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
1.	คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)	63
2.	คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 1)	64
3.	แสดงค่า Stiffness Factor และ Shear Lag Parameter (ตัวอย่างที่ 1)	65
4.	แสดงค่ามุมบิดที่จุดยอดสุดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)	65
5.	โมเมนต์ดัดของเสาต้นมุมของด้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1)	66
6.	คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 2)	67
7.	คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 2)	68
8.	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแรงในแนวแกนของเสาด้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 2)	69
9.	การเปรียบเทียบผลรวมของแรงเฉือนในคาน 5 ชั้นแรกด้านที่ 2 (ตัวอย่างที่ 2)	70
10.	คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 3)	71
11.	คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 3)	72

รายชื่อรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
	1. การแทนโครงสร้างดิสครีต (Discrete Structure) ด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก	32
	2. ทิศทางของแกน x, y, z ความเค้น การเคลื่อนที่ และขนาดของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก	32
	3. แกนอ้างอิง x, y, z และลักษณะการเคลื่อนที่ของโครงอาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์	33
	4. การแทนแรงกระทำด้านข้าง $P(x)$ ด้วยแรงกระทำเป็นจุดที่จุดยอดสุด และแรงในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ	33
	5. การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E_z ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก	34
	6. การหาค่าโมดูลัสการเฉือน (Shear modulus) G_{zz} ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก	34
	7. แสดงสัญลักษณ์การแปรเปลี่ยนขนาดของชิ้นส่วนตามความสูง	35
	8. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 0.5)	36
	9. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 0.666)	37
	10. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 1.00)	38
	11. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 1.50)	39
	12. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 2.00)	40
	13. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมการป้อนข้อมูล	41
	14. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมการป้อนข้อมูล โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า	42
	15. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล	43
	16. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมแสดงผลลัพท์การวิเคราะห์	44
	17 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นที่ทั่วไปของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)	45

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
17 ข.	แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 1)	45
18.	มุมบิดที่ชั้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 1)	46
19.	แรงในแนวแกนของเสาต้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ตัวอย่างที่ 1)	47
20.	แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ตัวอย่างที่ 1)	48
21.	แสดงการกระจายแรงในแนวแกนของเสาที่เกิดขึ้นจากแรงบิดอย่างเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 1)	49
22 ก.	แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 2)	50
22 ข.	แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 2)	50
23.	แสดงการกระจายแรงในแนวแกนของเสาที่เกิดขึ้นจากแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางเดี่ยว (ตัวอย่างที่ 2)	51
24 ก.	แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 3)	52
24 ข.	แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 3)	52
25.	ระยะเอนที่ระดับชั้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 3)	53
26.	มุมบิดที่ระดับชั้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 3)	53
27.	แรงในแนวแกนของเสาต้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 3)	54
28.	แรงในแนวแกนของเสาต้านที่ 2 (ตัวอย่างที่ 3)	55
29.	แรงในแนวแกนของเสาต้านที่ 3 (ตัวอย่างที่ 3)	56
30.	แรงในแนวแกนของเสาต้านที่ 4 (ตัวอย่างที่ 3)	57
31.	แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 3)	58
32.	แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 2 (ตัวอย่างที่ 3)	59
33.	แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 3 (ตัวอย่างที่ 3)	60
34.	แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 4 (ตัวอย่างที่ 3)	61

รายการสัญลักษณ์

- A_1, A_2 = ค่าคงที่ของฟังก์ชัน ในแนวแกนของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค เนื่องจากแรงกระทำด้านข้างที่ผ่านศูนย์กลางของโครงอาคารและแรงบิด
- A_c, A_{cc} = พื้นที่หน้าตัดของเสาภายในและเสาต้นมุมของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ภาคผนวก ก)
- A_{cc} = พื้นที่หน้าตัด เข้มข้นของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค (ภาคผนวก ก)
- A_{rb}, A_{rc}, A_{rcc} Effective Shear Area ของคาน เสาภายใน และเสาต้นมุมตามลำดับ
- B_1, B_2 = ค่าคงที่ของฟังก์ชัน ในแนวแกนของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค เนื่องจากแรงกระทำด้านข้างที่ผ่านศูนย์กลางของโครงอาคารและแรงบิด
- $2b, 2c$ = ความยาวของด้านที่ 2 และ 1 ของกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิคตามลำดับ
- C_1, C_2 = ค่าคงที่ของฟังก์ชัน ในแนวแกนของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค เนื่องจากและแรงกระทำด้านข้างที่ผ่านศูนย์กลางของโครงอาคารและแรงบิด
- d = ระยะห่างระหว่างเสาของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- d_b, d_c = ความลึกของคานและความกว้างของเสาตามลำดับ
- d_1, d_2 = ระยะห่างระหว่างเสาของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
- E, E_z = โมดูลัสยืดหยุ่นของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค ตามลำดับ
- E_1, E_2, E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่าของด้านที่ 1, 2 และที่มุมของกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค (ภาคผนวก ก) ตามลำดับ
- F = เมตริกซ์การยืดหยุ่นของ โครงอาคาร
- G, G_{zs} = โมดูลัสของการเฉือนของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกล่องเทียบเท่าออร์โธทอปิค ตามลำดับ
- G_1, G_2 = โมดูลัสของการเฉือนเทียบเท่าของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
- H = ความสูงทั้งหมดของ โครงอาคาร
- h = ความสูงระหว่างชั้น
- I_b, I_c, I_{cc} = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน เสาภายในและเสาต้นมุมตามลำดับ
- j = ดัชนีชี้ค่าโครงอาคารตัวที่ j

- J = จำนวนโครงอาคารทั้งหมดที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง
 K_1, K_2, K_3 = ค่าคงที่ของฟังก์ชันมุมบิดของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกเนื่องจากแรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลาง
 K_4, K_5, K_6 = ค่าคงที่ของฟังก์ชันระยะเอนของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกเนื่องจากแรงบิด
 m = จำนวนระดับอ้างอิง
 M_T = โมเมนต์บิดเนื่องจากแรงภายนอก
 \tilde{M}_T = เวกเตอร์ของโมเมนต์บิดเนื่องจากแรงภายนอก
 O = ตำแหน่งจุดอ้างอิงในโครงสร้าง
 P = เวกเตอร์ของแรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลาง
 P_i = แรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลางในรูปอนุกรมโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ
 ($i = 0, 1, 2, 3, \dots$)
 P_o = แรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลางเป็นจุดที่จุดยอดสุดในโครงอาคาร
 Q = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในโครงอาคาร
 \tilde{Q} = เวกเตอร์ของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในโครงอาคาร
 Q_{C1}, Q_{C2} = แรงเฉือนของเสาต้นมุมของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 Q_1, Q_2 = แรงเฉือนของเสาภายในของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 S^2 = เมตริกซ์ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่
 T_i = แรงบิดในรูปอนุกรมโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ($i = 0, 1, 2, 3, \dots$)
 T_o = แรงบิดเป็นจุดที่จุดยอดสุดในโครงอาคาร
 t = ความหนาของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก
 t_1, t_2 = ความหนาของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 U = พลังงานความเครียดทั้งหมด
 U_1, U_2, U_C = พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในด้านที่ 1, 2 และที่มุมกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก ตามลำดับ
 V = พลังงานศักย์เนื่องจากแรงภายนอก
 V_1, V_2 = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

- V_P, V_T = พลังงานศักย์เนื่องจากแรงภายนอกที่เป็นแรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลางและแรงบิดตามลำดับ
- u, v, w = การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
- w_c = การเคลื่อนที่ในแนวแกนของมุมกลองเทียบท่าออร์โธทรอปิค
- W_L = แรงเฉือนเนื่องจากแรงภายนอก
- \tilde{W}_L = เวกเตอร์ของแรงเฉือนเนื่องจากแรงภายนอก
- x, y, z = ระบบพิกัดฉาก
- X = ระยะในแนวตั้งจากจุดสูงสุดในโครงอาคาร
- \tilde{Y} = เวกเตอร์ของระยะเอเนในทิศทางของแรงกระทำผ่านศูนย์กลาง
- Z = ระยะของโครงอาคารจากจุดพิกัดเริ่มต้น
- $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ = ความเครียดในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = ความเค้นในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
- γ_{xz}, γ_{yz} = ความเครียดของการเฉือนของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
- τ_{xz}, τ_{yz} = ความเค้นการเฉือนของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
- ϵ_c, σ_c = ความเครียดและความเค้นในแนวแกนของมุมกลองเทียบท่าออร์โธทรอปิคตามลำดับ
- θ = มุมบิดในระนาบราบ
- $\bar{\theta}$ = มุมบิดในรูปของฟังก์ชันที่สมมติขึ้น
- Δ = ระยะเอเนในรูปของฟังก์ชันที่สมมติขึ้น
- ξ = พารามิเตอร์ = z/H

รายชื่อภาคผนวก

ชื่อภาคผนวก

ภาคผนวกที่	หน้า
ก. วิธีการหาค่าต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ของกล่องเทียบเท่า ออร์โธทรอปิค	74
ข. วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ในรูปแรงบิดเดี่ยวยที่จุดยอดสุดและ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับมุมบิดของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า	77
ค. วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเดี่ยวยในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางที่จุดยอดสุด และโพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับระยะ เอนของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า	83
ง. การหาแรงภายในโครงสร้างคัสครีตของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า	90
จ. ตัวอย่างการป้อนข้อมูลและผลลัพธ์การวิเคราะห์	92

บทที่ 1

บทนำ

บทนำทั่วไป

ในโครงสร้างอาคารสูง แรงกระทำด้านข้างอันเกิดจากแรงลมหรือแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวจัด ได้ว่ามีความสำคัญอย่างหนึ่ง ในการออกแบบ นอกเหนือจากแรงกระทำในแนวตั้ง ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักจร โดยปกติโครงสร้างอาคารสูงที่มีจำนวนชั้นไม่เกิน 20 ชั้น โครงอาคารประเภทโครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยวย หรือผนังต้านแรงเฉือนคู่ ก็มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้ เมื่อจำนวนชั้นของอาคารเกิน 40 ชั้นขึ้นไป การที่จะใช้โครงอาคารประเภทดังกล่าว ย่อมก่อให้เกิดความไม่เหมาะสมและไม่ประหยัด เนื่องจากสติฟเนสของ โครงอาคารมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความชะลุดของอาคาร ทำให้การเคลื่อนที่ในแนวราบสูงเกินกว่าที่ยอมให้ในการออกแบบ ดังนั้น โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็น โครงอาคารประเภทหนึ่งที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ต้านทานแรงกระทำด้านข้าง เมื่อจำนวนชั้นสูงขึ้น โดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านรูปร่างของ โครงอาคารที่ให้มีสติฟเนสสูง ซึ่งโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประกอบด้วยเสาอบนอกที่มีการจัดวางระยะห่างใกล้เคียงกันพอสมควรและยึดด้วยคานที่แข็งแรงในแต่ละชั้น ทำให้มีพฤติกรรมเหมือน โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยทั่วไประยะห่างของช่วงเสามีค่า 1.22 ม. ถึง 4.50 ม. และความกว้างของคานยึดมีค่า 0.60 ม. ถึง 1.22 ม. ส่วนความลึกของคาน มีค่า 0.25 ม. ถึง 1.00 ม. ในโครงสร้างอาคารสูง อาจจะใช้ประกอบด้วย โครงอาคารหลายระบบดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าต่างๆเพื่อใช้ในการออกแบบ สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ละเอียด โดยการ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น SAP IV, ETABS เป็นต้น แต่มีความยุ่งยากและใช้เวลาในการป้อนข้อมูลมาก รวมทั้งเสียค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการออกแบบขั้นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์โดยประมาณที่ให้ค่าถูกต้องและง่ายต่อการใช้งาน ย่อมเหมาะที่จะใช้ในการออกแบบขั้นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาวิธีการวิเคราะห์อย่างง่ายของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้น โดยการ ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ค่าถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยวิธีเดียวกันนี้ สามารถที่จะนำไป

วิเคราะห์ร่วมกับโครงสร้างอาคารที่อาจจะประกอบไปด้วย โครงข้อแข็ง หรือผนังต้านแรงเฉือน เดี่ยว หรือผนังต้านแรงเฉือนคู่ เป็นต้น

1.2 การสำรวจการวิจัยในอดีต

วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้มีการค้นคว้า กันมาเป็นจำนวนมาก แต่ก็มีข้อจำกัดในแต่ละวิธีการวิเคราะห์ ทั้งในด้านการแปรเปลี่ยนขนาด ของชิ้นส่วน การคำนวณหาค่าแรงหรือระยะเอน ชนิดของแรงกระทำด้านข้าง เป็นต้น อย่างเช่น

Coull และ Subedi [1] ได้เสนอวิธี โครงข้อแข็งระนาบเทียบเท่า (Equivalent Plane Frame) โดยอาศัยลักษณะการต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่สำคัญ และความสมมาตรของโครงสร้าง ทำให้สามารถจำลอง โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 มิติ เป็นโครงข้อแข็งด้านที่ขนาน เชื่อมต่อกับ โครงข้อแข็งด้านที่ตั้งฉากกับทิศทางของแรงกระทำด้านข้าง ด้วยองค์อาคารที่ถ่ายเฉพาะแรงเฉือนในแนวตั้งเท่านั้น วิธีนี้สามารถประยุกต์กับโปรแกรม วิเคราะห์โครงข้อแข็งที่มีอยู่แล้ว ซึ่งค่าความถูกต้องขึ้นอยู่กับสตีเฟนสขององค์อาคารที่ เชื่อมต่อ แต่ก็ศึกษา เฉพาะกรณีแรงดัดที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำด้านข้างเท่านั้น ในลักษณะวิธีการที่ คล้ายคลึงกัน Rutenberg [2] ได้ศึกษารวมถึงแรงดัดและแรงบิด ที่ต้านทานโดย โครงข้อแข็ง รูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Khan และ Amin [3] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยประมาณ อาศัยผลจากการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สูง 10 ชั้น ด้วยการ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ โดยการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนสตีเฟนสของเสา และคาน รวมถึงอัตราส่วนความกว้างของด้านตั้งฉากและด้านขนานกับแรงกระทำด้านข้าง และนำผลของการวิเคราะห์มาจัดทำเป็นกราฟที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ทำให้สามารถ หาค่าแรงในแนวแกนของเสาและแรงเฉือนในคานได้ โดยอาศัยกราฟที่ได้จัดทำไว้ รวมถึง การพิจารณาลักษณะของการเคลื่อนที่ที่สำคัญทำให้สามารถหาค่าระยะเอนได้ แต่ก็มีข้อจำกัด ใช้ได้เฉพาะกรณีแรงกระทำด้านข้างที่มีการกระจายคงที่ตลอดความสูง

Coull และ Bose [4,5] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยประมาณที่ด้านทานแรงดัดและแรงบิดที่เกิดขึ้น โดยการแทนโครงสร้างดิสครีต (Discrete Structure) ด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิก (Equivalent Orthotropic Tube) ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ในแนวราบและแนวตั้งเทียบเท่ากับสตีฟเนสของเสาและคาน รวมถึงค่าโมดูลัสของการเฉือน (Shear Modulus) ที่เทียบเท่ากับสตีฟเนสของการเฉือนของหน่วยโครงข้อแข็ง โดยการสมมติการกระจายหน่วยแรงในแนวแกนของกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิก หาค่าพลังงานความเครียดทั้งหมด (Total Strain Energy) แล้วใช้หลักพลังงานศักย์รวมน้อยที่สุด (Principle of Minimum Total Potential Energy) ทำให้หาค่าคงที่ของฟังก์ชันที่สมมติขึ้นได้ แทนค่าต่างๆในสมการทำให้สามารถหาค่าแรงที่เกิดขึ้นได้ ส่วนการเคลื่อนที่ที่สืบมาจากวิธีการที่เสนอโดย Coull และ Ahmed [6] แต่ก็ได้ใช้กับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีขนาดของคานและเสาคงที่ตลอดความสูงเท่านั้น

สุธรรม [7] ได้เสนอวิธีสำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งด้านทานแรงกระทำด้านข้างที่สมมาตร อาจเป็นแรงกระจายขนาดคงที่ตลอดความสูง รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยการสมมติการกระจายของหน่วยยึดหดในเสาอบนอก จากนั้นใช้ทฤษฎีความสมดุลย์และสมมติฐานของการเคลื่อนที่ของหน่วยเล็ก ๆ แต่ละหน่วย ทำให้สามารถหาพลังงานภายในที่เกิดจากการโค้งสำหรับโครงข้อแข็งด้านขนานกับแรงด้านข้าง และพลังงานจากการยืดหรือหดของเสาในเทอมความสูงได้ และใช้วิธีการของริทซ์ (Ritz) สามารถหาค่าคงที่ที่สมมติขึ้นได้ จากนั้นหาค่าแรงและการเคลื่อนที่ของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งวิธีการนี้ใช้ได้กับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดได้

พลสวัสดิ์ [8] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งด้านทานแรงบิด โดยนำเอาวิธีการของ Coull และ Bose มาค้นคว้าต่อและใช้วิธีการเดียวกัน แต่ต่างกันที่การสมมติการเคลื่อนที่ที่สำคัญแทนการสมมติการกระจายหน่วยแรงของกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิก ทำให้สามารถหาพลังงานภายในที่เกิดขึ้นในรูปของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และมุมที่บิดไปของกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิก จากนั้นจึงใช้หลักพลังงานศักย์รวมน้อยที่สุด และวิธีการของริทซ์ ในการหากลุ่มของสมการเส้นตรงทางพีชคณิต เพื่อหาค่าคงที่ที่ติดอยู่ในฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ซึ่งสมมติขึ้น แต่ก็ทดสอบผลเฉพาะกรณีแรงบิดที่มีขนาดคงที่

ตลอดความสูง วิธีนี้ใช้ได้กับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดของเสาและคานตามความสูงได้

สำหรับการวิเคราะห์โดยการจำลองแรงด้านข้างที่มากกระทำต่อโครงสร้างนั้น ได้มีการศึกษากันมาเฉพาะกรณีโครงสร้างประกอบด้วย โครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว และผนังต้านแรงเฉือนคู่ เป็นต้น อย่างเช่น

Coull และ Adams [9] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์โครงอาคารที่ประกอบด้วย ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว โดยการแทนแรงที่ต้านทานโดยโครงอาคารด้วยแรงกระทำในรูปโพลีโนเมียลแล้วสมมติว่าโครงอาคารทั้งสองต่อกันเป็นจุดๆ โดยที่จำนวนจุดต่อขึ้นอยู่กับอันดับสูงสุดของโพลีโนเมียล ทำให้สามารถตั้งสมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลได้ แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะลู่ออก (Diverge) เมื่อใช้ค่ากำลังสูงสุดของโพลีโนเมียล ต่อมา Coull และ Mohammed [10] ก็ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับโครงอาคารที่ประกอบด้วย โครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว ผนังต้านแรงเฉือนคู่ และ Shear Core โดยใช้หลักการเดียวกันต่างกันที่เพิ่มแรงที่ต้านโดยโครงอาคารด้วย แรงเดี่ยวที่จุดยอดสุด แต่ก็ไม่ได้แปรเปลี่ยนขนาดของโครงอาคาร โดยใช้หลักการเดียวกับของ Coull และ Mohammed ซีรศักดิ์ [11] ได้นำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การวิเคราะห์สะดวกและรวดเร็ว นอกเหนือจากนี้ยังได้เพิ่มเติมในส่วนที่โครงอาคารสามารถแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูงได้ เช่น โครงข้อแข็ง ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว เป็นต้น ซึ่งค่าความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับ การใช้อันดับสูงสุดของโพลีโนเมียล ตำแหน่งของระดับอ้างอิง (Reference Level) เป็นต้น แต่ก็ได้ผลที่น่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการออกแบบขั้นต้นได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่สามารถแปรเปลี่ยนขนาดของเสาและคานตามความสูงได้ รวมถึงแรงกระทำด้านข้างที่มีการกระจายในรูปแบบต่างๆ และวิเคราะห์ร่วมกับโครงอาคารประเภทอื่นๆ ที่ใช้ต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้อีกด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงข้อแข็งรูปกล่อง

สี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้งการสมมาตรและไม่สมมาตรของแรงกระทำด้านข้าง

1.3.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้นของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์หาค่าการกระจายของแรงกระทำด้านข้างสำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีขอบเขตดังนี้

1.4.1 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีระยะห่างของช่วงเสาในแต่ละด้านคงที่ทั้งในแนวราบและแนวตั้งตามความสูง โดยที่ระยะห่างของช่วงเสาในแต่ละด้านเท่ากันหรือแตกต่างกันก็ได้ และมีการแปรเปลี่ยนขนาดของชิ้นส่วนของเสาและคานตามความสูง

1.4.2 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีแรงกระทำด้านข้าง ที่อาจก่อให้เกิดแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างและแรงบิด

1.4.3 วิเคราะห์หาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้น โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่วิเคราะห์ละเอียด และงานวิจัยที่ผ่านมา

วิธีการวิเคราะห์

2.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์ใช้แนวความคิดที่เสนอโดย Coull และ Mohammed [10] เมื่อโครงสร้างของอาคารสูงรับแรงกระทำด้านข้าง ที่อาจก่อให้เกิดแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างและแรงบิด โดยการแทนที่แรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างและแรงบิด ที่กระทำต่อโครงสร้างของอาคารซึ่งอาจประกอบไปด้วย โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผนังต้านแรงเฉือนเดี่ยว ผนังต้านแรงเฉือนคู่ โครงข้อแข็ง ด้วยแรงเดี่ยวกระทำที่จุดยอดสุดรวมกับแรงกระจายในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ หรือแรงบิดเดี่ยวกระทำที่จุดยอดสุดรวมกับแรงบิดกระจายในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ จากนั้นนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างกับระยะ เอนและแรงบิดกับมุมบิดของโครงสร้างแต่ละตัวมารวมกัน อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างที่ต้านทานโดยโครงสร้างทั้งหมด ต่อแรงกระทำภายนอกที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง และความสมดุลระหว่างแรงบิดที่ต้านทานโดยโครงสร้างทั้งหมดต่อแรงบิดที่กระทำภายนอก ซึ่งในที่สุดจะได้สมการแสดงความสมดุลของแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างกับระยะ เอนและแรงบิดกับมุมบิดของโครงสร้าง เมื่อคำนวณหาค่าระยะ เอนและมุมบิดของแต่ละโครงสร้างได้ ก็สามารถที่จะหาแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างและแรงบิดของแต่ละโครงสร้างที่ต้องต้านทานได้ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดของขั้นตอนการวิเคราะห์คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ผ่านศูนย์กลางกับระยะ เอน และแรงบิดกับมุมบิดของแต่ละโครงสร้าง ซึ่งจะ ได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2 สมมติฐาน

พฤติกรรมภายใต้แรงกระทำด้านข้างของ โครงสร้าง

ในงานวิจัยนี้อาศัย

ข้อสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

2.2.1 โครงอาคารใดๆประกอบด้วยองค์อาคารที่มีเนื้อวัสดุประเภทเดียวกัน

2.2.2 ภายใต้อิทธิพลกระทำด้านข้าง โครงสร้างมีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติก

(Elastic Range)

2.2.3 ระยะโก่งของอาคาร ระยะเอน และมุมบิดของโครงสร้างมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของโครงอาคาร

2.2.4 ระบบพื้นมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) ในระนาบของระบบพื้นสูง

2.2.5 จุดดัดกลับของเสาและคานในโครงข้อแข็งอยู่ที่จุดกึ่งกลางของชั้นและจุดกึ่งกลางช่วงคาน เพื่อให้การจำลองหน่วยโครงข้อแข็งเป็นหนึ่งเทียบเท่ากระทำได้ง่าย และถูกต้องตามสภาพจริงของโครงสร้าง

2.2.6 แต่ละหน่วยของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประกอบด้วยช่วงเสาที่มีระยะห่างใกล้เคียงกัน และมีคานยึดต่อกันแข็งแรงเพียงพอ ทำให้สามารถแทนด้วยหนึ่งเทียบเท่าที่มีพฤติกรรมเหมือนกัน โดยมีอัตราส่วนระยะห่างช่วงเสาต่อความยาวในแต่ละด้านมีค่า 0.05 ถึง 0.10 และอัตราส่วนความสูงในแต่ละชั้นต่อความสูงทั้งหมดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่า 0.01 ถึง 0.05

2.2.7 การยึดหดของรอยต่อ (Joints) น้อยมากไม่นำมาพิจารณา

2.2.8 ผลเนื่องจากการเคลื่อนที่นอกระนาบ (Out of Plane Effects) น้อยมาก

2.3 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างขององค์อาคาร

2.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ผ่านศูนย์กลางและระยะเอน หรือแรงบิด และมุมบิดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้วิธีที่เสนอโดย พูลสวัสดิ์ กล่าวคือวิธีการ Continuum Approach ได้ถูกนำมาใช้ โดยการแทนโครงสร้างดิสครีตด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก (รูปที่ 1) และอาศัยการสมมติการเคลื่อนที่ที่สำคัญที่เกิดขึ้นจากแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง หรือแรงบิด ที่เกิดจากแรงกระทำภายนอกของโครงสร้างจากนั้นจึงหาพลังงานภายในที่เกิดขึ้นในรูปของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและระยะเอน หรือมุมที่บิดไปของโครงสร้าง และใช้หลักของพลังงานศักย์รวมน้อยที่สุด (Principle of Minimum Total

Potential Energy) และวิธีการของวิธึ เพื่อหาค่าคงที่ที่ติดอยู่ในฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และระยะเอน หรือมุมที่บิดไปของโครงสร้างซึ่งสมมติขึ้น แทนค่าคงที่ในสมการของระยะเอนหรือมุมบิดที่เกิดจากแรง หรือแรงบิดที่จุดยอดคสุดและโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ก็จะได้ความสัมพันธ์ตามต้องการ

2.3.1.1 พลังงานศักย์ทั้งหมด (Total Potential Energy) ของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เนื่องจากความสมมาตร พลังงานความเครียดทั้งหมด (Total Strain Energy) ที่เกิดขึ้นในกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก (รูปที่ 1) ซึ่งแสดงได้ว่า

$$U = 2U_1 + 2U_2 + 4U_c \quad (1)$$

โดยที่ U เป็นพลังงานความเครียดทั้งหมด

U_1 และ U_2 เป็นพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นของด้านที่ 1 และ ด้านที่ 2 ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ

U_c เป็นพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเข้มข้น (Concentrated Area) ที่รับแรงในแนวแกนอย่างเดี่ยวของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

สำหรับทิศทางของความเค้นในระนาบ (Plane Stress) ในแต่ละด้าน และแกน x, y, z

(รูปที่ 2) ดังนั้นพลังงานความเครียด U_1, U_2 และ U_c เขียนได้

$$U_1 = \frac{1}{2} \int_0^H \int_0^c (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xz} \gamma_{xz}) t_1 dx dz \quad (2)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \int_0^H \int_0^b (\sigma_y \epsilon_y + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{yz} \gamma_{yz}) t_2 dy dz \quad (3)$$

$$U_C = \frac{1}{2} \int_0^H A_{CC}^* \sigma_C \epsilon_C dz \quad (4)$$

โดยที่ t_1, t_2 = ความหนาแน่นที่ 1, 2 ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ
(ภาคผนวก ก)

A_{CC}^* = พื้นที่หน้าตัด ซึ่งมีชั้นรับแรงในแนวแกนอย่างเดียวของมุมกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิก (ภาคผนวก ก)

$2c$ = ความยาวด้านตั้งฉากกับทิศทางของแรงกระทำด้านข้างของกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิก

$2b$ = ความยาวด้านขนานกับทิศทางของแรงกระทำด้านข้างของกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิก

H = ความสูงของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ = ความเครียดในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = ความเค้นในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

ν_{xz}, ν_{yz} = ความเครียดของการเฉือนของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

τ_{xz}, τ_{yz} = ความเค้นการเฉือนของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ϵ_C, σ_C = ความเครียดและความเค้นในแนวแกนของมุมกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ

เนื่องจากข้อสมมติฐานที่ว่า สติฟเนสของพื้นที่มีความแข็งแกร่งในระนาบสูงดังนั้น
พลังงานความเครียด เนื่องจากความเครียดของความเค้นในแนวราบมีค่าน้อยมาก (σ_x, σ_y
มีค่าเป็น 0) สมการที่ (2), (3) และ (4) สามารถลดรูปได้

$$U_1 = \frac{1}{2} \int_0^H \int_0^c (\sigma_z \epsilon_z + \tau_{xz} \cdot \nu_{xz}) t_1 dx dz \quad (5)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \int_0^H \int_0^b (\sigma_z \epsilon_z + \tau_{yz} \cdot \nu_{yz}) t_2 dy dz \quad (6)$$

H

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^H A_{cc}^* \sigma_c \epsilon_c dz \quad (7)$$

0

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนที่ (Strain-Displacement Relationship)

$$\epsilon_z = \partial w / \partial z \quad (8)$$

$$\gamma_{xz} = \partial w / \partial x + \partial u / \partial z \quad (9)$$

$$\gamma_{yz} = \partial w / \partial y + \partial v / \partial z \quad (10)$$

เนื่องจากวัสดุอยู่ในช่วงอีลาสติกตามข้อสมมติฐานตั้งนั้น

$$\sigma_z = E_z (\partial w / \partial z) \quad (11)$$

$$\tau_{xz} = G_1 (\partial w / \partial x + \partial u / \partial z) \quad (12)$$

$$\tau_{yz} = G_2 (\partial w / \partial y + \partial v / \partial z) \quad (13)$$

โดยที่ u , v , w เป็นหน่วยการเคลื่อนที่ในแกน x , y , z (รูปที่ 2) แทนค่าจากสมการ (8) - (13) ในสมการ (5), (6), (7) ได้ดังนี้

H c

$$U_1 = \frac{1}{2} \int_0^c \int_0^c [E_1 (\partial w / \partial z)^2 + G_1 (\partial w / \partial x + \partial u / \partial z)^2] t_1 dx dz \quad (14)$$

0 -c

H b

$$U_2 = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^b [E_2 (\partial w / \partial z)^2 + G_2 (\partial w / \partial y + \partial v / \partial z)^2] t_2 dy dz \quad (15)$$

0 -b

H

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^H A_{cc}^* E_c (\partial w_c / \partial z)^2 dz \quad (16)$$

0

โดยที่ w เป็นการเคลื่อนที่ในแนวแกนของด้านที่ 1 หรือ 2 ตามการกระจายของฟังก์ชันที่สมมติ

E_1, E_2 เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้านที่ 1 และ 2 ของกล่องเทียบเท่า
ออร์โททรอปิกตามลำดับ (ภาคผนวก ก)

G_1, G_2 เป็นค่าโมดูลัสของการเฉือนของด้านที่ 1 และ 2 ของกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ (ภาคผนวก ก)

w_C, E_C เป็นหน่วยการเคลื่อนที่และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแนวแกนของมุมกล่อง
เทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ

2.3.1.2 พลังงานศักย์เนื่องจากแรงกระทำภายนอก (V)

$$\text{แรงกระทำผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง} : V_P = -\int_0^H \bar{P} \cdot \Delta \, dz \quad (17)$$

$$\text{แรงบิด} : V_T = -\int_0^H \bar{T} \cdot \bar{\theta} \, dz \quad (18)$$

โดยที่ V_P เป็นพลังงานศักย์เนื่องจากแรงกระทำด้านข้างผ่านศูนย์กลางของโครงข้อแข็ง
รูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

V_T เป็นพลังงานศักย์เนื่องจากแรงบิดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

\bar{P} เป็นฟังก์ชันของแรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างอยู่ในรูปแรงเดี่ยวที่
จุดยอดสุดและโพลีโนเมียลอันดับต่าง ๆ

Δ เป็นฟังก์ชันของระยะเออนที่สมมติขึ้น

\bar{T} เป็นฟังก์ชันของแรงบิดที่จุดยอดสุดและโพลีโนเมียลอันดับต่าง ๆ

$\bar{\theta}$ เป็นฟังก์ชันของมุมบิดที่สมมติขึ้น

2.3.1.3 วิธีการของริทซ์ (Ritz Method)

แรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง

1. การยืดหดในแนวแกนของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก โดยอาศัย

Boundary Condition ($w_c = 0$ เมื่อ $z = 0$ และ เมื่อ $\partial w_c / \partial z = 0$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$w_c(z) = A_1 \sin \pi \xi / 2 + B_1 (\cos \pi \xi - 1) + C_1 (\cos 2\pi \xi - 1) \quad (19)$$

2. ระยะเวลาของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก โดยอาศัย Boundary Condition ($\Delta = 0$ เมื่อ $z = 0$ และ $\partial \Delta / \partial z = 0$ เมื่อ $z = 0$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\Delta(z) = K_1 \xi^2 + K_2 \xi^3 + K_3 \xi^4 \quad (20)$$

3. การกระจายการยึดหดในแนวแกนแต่ละด้านของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก โดยจากการเสนอแนะของ สุธรรม [7] จะได้ว่า

$$\text{ด้านที่ 1 : } w(x,z) = [(x/c)^{M_2} + M_3 \cdot (1-(x/c)^{M_2})] \cdot w_c \quad (21)$$

$$\text{ด้านที่ 2 : } w(y,z) = [\sinh(y/b)^{M_1} / \sinh(1)] \cdot w_c \quad (22)$$

โดยที่ M_1, M_2, M_3 เป็นสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการยึดหดตามแนวแกนหาได้จากการเสนอแนะ (ดูรูปที่ 8 - 12)

4. ความสัมพันธ์หน่วยการเคลื่อนที่ในแนวแกน x, y, z กับระยะเวลา

$$\partial u / \partial z = 0, \quad \partial v / \partial z = \partial \Delta / \partial z \quad (23)$$

แรงบิด

1. การยึดหดในแนวแกนของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก จากการเสนอแนะ โดย พูลสวัสดิ์ [8]

$$w_c(z) = A_2 \sin \pi \xi / 2 + B_2 (\cos \pi \xi - 1) + C_2 (\cos 2\pi \xi - 1) \quad (24)$$

2. มุมบิดของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก จากการเสนอแนะโดย พูลสวัสดิ์ [8]

$$\theta(z) = K_4 \xi + K_5 \cdot \xi^2 + K_6 \cdot \xi^3 \quad (25)$$

3. การกระจายการยึดหดของทั้งสองด้านของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิกจากการเสนอแนะโดย พูลสวัสดิ์ [8]

$$w(x,y,z) = (xy/bc) \cdot w_c \quad (26)$$

4. ความสัมพันธ์หน่วยการเคลื่อนที่ในแนวแกน x, y, z กับมุมบิด

$$u(x,y,z) = -y \cdot \theta(z), \quad v(x,y,z) = x \cdot \theta(z) \quad (27)$$

โดยที่ $\xi = z/H$

$A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ เป็นค่าคงที่ของฟังก์ชันของการยึดหดในแนวแกนของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก ระยะเวลา และมุมบิดที่สมมติขึ้น

โดยการใช้หลักการพลังงานศักย์ทั้งหมดน้อยที่สุด (Πp)

$$\Pi p = 2U_1 + 2U_2 + 4U_C + V \quad (28)$$

โดยการหาอนุพันธ์ของพลังงานศักย์ทั้งหมด เทียบกับค่าคงที่ในแต่ละค่าคงที่ที่สมมติขึ้น จะได้ชุดของสมการเท่ากับจำนวนของค่าคงที่ที่สมมติขึ้น แก้อสมการจะได้ค่าคงที่ของฟังก์ชันที่สมมติขึ้น แล้วแทนในสมการ (20), (25) ของแต่ละแรงที่ผ่านศูนย์กลางและแรงบิดที่ศูนย์กลางของโครงสร้าง ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำผ่านศูนย์กลางในรูปแรงเฉื่อยที่จุดยอดสุด และโพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับระยะ เอน หรือแรงบิดในรูปแรงบิดเฉื่อยที่จุดยอดสุด และโพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับมุมบิดตามต้องการ

2.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

โครงสร้างอาคารสูงทั่วไป อาจประกอบไปด้วยโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือระบบโครงอาคารประเภทอื่นๆ ที่ใช้ในการต้านทานแรงกระทำด้านข้าง จำนวนรวมกันเท่ากับ J โดยการสมมติว่าแผ่นพื้นทำหน้าที่เป็นแผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm) ที่มีความแข็งแรงในระนาบตัวเองสูงมาก เมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำด้านข้างจะมีการเคลื่อนที่ตามแนวราบ (รูปที่ 3) ที่ระดับใดๆ องค์อาคารตัวที่ j ที่ระยะ z_j จากจุดอ้างอิง ดังเช่นจุด O จะมีการเคลื่อนที่เท่ากับ $y_1 + \theta_1 \cdot z_j$ และมุมบิดเท่ากับ θ_1 โดยที่ y_1 เป็นค่าการเคลื่อนที่เทียบกับแกนอ้างอิงและ θ_1 เป็นมุมบิดรอบแกน ที่ระดับ x_1

เมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำด้านข้าง ที่ระดับใดๆ แรงกระทำด้านข้างสามารถแยกได้เป็น 2 ชนิดคือ แรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง (P_{T_1}) และ แรงบิด (M_{T_1}) และโดยการสมมติให้องค์อาคารใดๆ มีการกระจายแรงซึ่งประกอบไปด้วยแรงเฉื่อยกระทำที่จุดยอดสุด ร่วมกับแรงกระจายในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ รวมกัน (รูปที่ 4)

สำหรับแรงกระทำที่ผ่านศูนย์กลาง ขององค์อาคารที่ j เขียนได้เป็น

$$P_j = P_{Oj} + \sum_{i=0}^m p_{1j} \xi^i \quad (29)$$

โดยที่ $m =$ จำนวนเต็มใดๆ ที่แสดงค่าอันดับสูงสุดของโพลีโนเมียล ($m < 8$)

$= N - 2$, โดยที่ $N =$ จำนวนจุดอ้างอิง

$P_{0j} =$ แรงเดี่ยวกกระทำที่จุดยอดสุด

$p_{ij} =$ สัมประสิทธิ์คงที่ของแรงกระทำผ่านศูนย์กลางโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

$\xi = x/H$

ในทำนองเดียวกัน แรงบิดที่ระดับใด ๆ ขององค์อาคารตัวที่ j (t_j)

ที่สามารถต้านทานแรงบิดได้ก็จะประกอบไปด้วย แรงบิดเดี่ยวกกระทำที่จุดยอดสุด ร่วมกับแรงบิดกระจายในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ รวมกัน เขียนได้เป็น

$$T_j = T_{0j} + \sum_{i=0}^m t_{ij} \xi^i \quad (30)$$

โดยที่ $T_{0j} =$ แรงบิดเดี่ยวกกระทำที่จุดยอดสุด

$t_{ij} =$ สัมประสิทธิ์คงที่ของแรงบิด โพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

กำหนดให้ $Q_j =$ แรงเฉือนที่ระดับใดๆ ของโครงสร้างที่ j แสดงได้ว่า

$$Q_j = P_{0j} + \int_0^H \sum_{i=0}^m p_{ij} \xi^i dx \quad (31)$$

$$Q_j = P_{0j} + H \sum_{i=0}^m p_{ij} \frac{\xi^{i+1}}{i+1} \quad (32)$$

$$Q_j = P_{0j} + \sum_{i=0}^m s_i p_{ij} \quad (33)$$

กำหนดให้ $T_j =$ แรงบิดที่ระดับใดๆ ขององค์อาคารตัวที่ j แสดงได้ว่า

$$T_j = T_{0j} + \sum_{i=0}^m s_i t_{ij} \quad (34)$$

โดยที่ $s_i = H \cdot \frac{\xi^{i+1}}{i+1}$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ของแรงเฉือนและแรงบิดที่ต้านทานโดยโครงอาคารกับแรงกระทำภายนอกที่ก่อให้เกิดแรงที่ผ่านศูนย์กลางและแรงบิด จะได้ว่า

$$W_L = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_J \quad (35)$$

$$W_L = \sum_{j=1}^J Q_j \quad (36)$$

$$M_T = (Q_1 z_1 + Q_2 z_2 + \dots + Q_J z_J) + (T_1 + T_2 + \dots + T_J) \quad (37)$$

$$M_T = \sum_{j=1}^J Q_j z_j + \sum_{j=1}^J T_j \quad (38)$$

โดยที่ W_L = แรงที่ผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างเนื่องจากแรงภายนอกที่ระดับใดๆ

M_T = แรงบิดเนื่องจากแรงภายนอกที่ระดับใดๆ รอบจุดอ้างอิง

โดยการกำหนดให้องค์อาคารมีการเชื่อมกันด้วยจุดเชื่อม จำนวนเท่ากับ $m+2$

หรืออีกนัยหนึ่งอาจเรียกว่า ระดับอ้างอิง (Reference Level) ซึ่งจะต้องประกอบด้วยจุดเชื่อมที่จุดยอดสุด และจุดอื่นใดระหว่างโครงอาคาร จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ขององค์อาคารตัวที่ j สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\tilde{y}_j = \tilde{F}_j \tilde{P}_j \quad (39)$$

โดยที่ \tilde{y}_j คือเวกเตอร์ (Vector) ของการเคลื่อนที่ที่ระดับอ้างอิงใดๆ ขององค์อาคารตัวที่ j

\tilde{F}_j คือเฟล็กซิบลิตีเมตริกซ์ (Flexibility matrix) ของแรงที่ผ่านศูนย์กลาง ขององค์อาคารตัวที่ j

\tilde{P}_j คือเวกเตอร์ของแรงกระทำที่จุดยอดสุด และแรงในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

และจากความสัมพันธ์ตามแนวราบ อาจแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\tilde{Q}_j = \tilde{s}_j \tilde{P}_j \quad (40)$$

โดยที่ \tilde{Q}_j คือเวกเตอร์ของแรงเฉือนที่ต้านทานโดยองค์อาคารตัวที่ j ที่ระดับอ้างอิงใดๆ

\tilde{S} คือเมตริกซ์คงที่

โดยสมมติฐานข้อที่ 4 ดังนั้นการเคลื่อนที่ที่ระดับอ้างอิงใดๆ ขององค์อาคารตัวที่ j แสดงได้ว่า

$$\tilde{y}_j = \tilde{y} + \tilde{\theta}_j \cdot z_j \quad (41)$$

และจากสมการ (41) และ (39) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \tilde{y} + \tilde{\theta}_j \cdot z_j &= \tilde{F}_j \tilde{P}_j \\ \tilde{P}_j &= \tilde{F}_j^{-1} (\tilde{y} + \tilde{\theta}_j \cdot z_j) \end{aligned} \quad (42)$$

และจากสมการ (36) แสดงในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\tilde{W}_L = \sum_{j=1}^J \tilde{Q}_j \quad (43)$$

จากสมการ (40), (42) และ (43) จะได้ว่า

$$\tilde{W}_L = \tilde{S} \sum_{j=1}^J \tilde{F}_j^{-1} (\tilde{y} + \tilde{\theta}_j \cdot z_j) \quad (44)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับการหมุนขององค์อาคารตัวที่ j สามารถเขียนได้ว่า

$$\tilde{\theta}_j = \tilde{F}_j^{-1} \tilde{T}_j \quad (45)$$

โดยที่ $\tilde{\theta}_j$ คือเวกเตอร์การหมุนที่ระดับอ้างอิงใด ๆ ของโครงอาคารตัวที่ j

\tilde{F}_j คือเฟลกซ์บิลลิตี้เมตริกซ์ของแรงบิดขององค์อาคารตัวที่ j

\tilde{T}_j คือเวกเตอร์ของแรงบิดที่จุดยึดสุดและแรงบิด ในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

และจากความสมดุลย์ของแรงบิด สมการ (34) อาจแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ว่า

$$\tilde{M}_{T_j} = \tilde{\sigma}^2 \tilde{T}_j \quad (46)$$

โดยที่ \tilde{M}_{T_j} คือเวกเตอร์ของแรงบิดที่ระดับอ้างอิงใด ๆ
ในทำนองเดียวกันจากสมการ 38 , 40 และ 45 จะได้ว่า

$$\tilde{M}_T = \sum_{j=1}^J \tilde{\sigma}^2 \Sigma [\tilde{F}_j^{-1} (\tilde{y} + \tilde{\theta} \cdot z_j) \cdot z_j + (\tilde{F}'_j)^{-1} \tilde{\theta}] \quad (47)$$

โดยกำหนดให้ $\tilde{G}_1 = \sum_{j=1}^J \tilde{\sigma}^2 \tilde{F}_j^{-1}$

$$\tilde{G}_2 = \sum_{j=1}^J \tilde{\sigma}^2 \tilde{F}_j^{-1} z_j$$

$$\tilde{G}_3 = \sum_{j=1}^J \tilde{\sigma}^2 [\tilde{F}_j^{-1} z_j + (\tilde{F}'_j)^{-1}]$$

จากสมการ (44) และ (47) สามารถหาค่า \tilde{y} และ $\tilde{\theta}$ ได้คือ

$$\tilde{y} = [\tilde{G}_2 - \tilde{G}_3 \tilde{G}_2^{-1} \tilde{G}_1]^{-1} [\tilde{M}_T - \tilde{G}_3 \tilde{G}_2^{-1} \tilde{W}_L] \quad (48)$$

$$\tilde{\theta} = [\tilde{G}_2 - \tilde{G}_1 \tilde{G}_2^{-1} \tilde{G}_3]^{-1} [\tilde{W}_L - \tilde{G}_1 \tilde{G}_2^{-1} \tilde{M}_T] \quad (49)$$

จากสมการ (48) และ (49) ทำให้สามารถทราบค่าการเคลื่อนที่และการบิดขององค์อาคาร
ที่ทุกระดับอ้างอิงได้

สำหรับค่าการเคลื่อนที่ และการบิดขององค์อาคารที่ j หาได้จากความสัมพันธ์
ดังที่กล่าวมาในตอนต้น ดังนั้นหาการกระจายแรงกระทำผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างและแรงบิด
ขององค์อาคารใดๆ ทุกระดับอ้างอิงได้โดยการแทนในสมการ (39) และ (45) จะได้ว่า

$$\tilde{P}_j = \tilde{F}_j^{-1} \tilde{y}_j \quad (50)$$

$$\tilde{T}_j = (\tilde{F}_j)^{-1} \tilde{\theta}_j \quad (51)$$

ในการมีโครงสร้างอาคารประกอบด้วย โครงอาคารหลายประเภทประกอบกัน ค่าที่ได้จากสมการ (50) และ (51) จะแสดงถึงสัดส่วนของการต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่ อาจก่อให้เกิด แรงกระทำผ่านศูนย์กลางของโครงสร้าง และแรงบิดของแต่ละโครงอาคาร

บทที่ 3

ขั้นตอนของโปรแกรมวิเคราะห์

เพื่อให้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน เพื่อให้สามารถทราบค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีบทบาทมากในด้านต่างๆ การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ จะทำให้ผู้ใช้สะดวกและง่ายต่อการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง โดยที่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่างๆ เช่น แปรเปลี่ยนจำนวนจุดอ้างอิงระดับอ้างอิง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเก็บข้อมูลไว้เพื่อการแก้ไขในภายหลัง ซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบขั้นต้นได้เป็นอย่างดี โดยที่โปรแกรมวิเคราะห์ทั้งหมดประกอบด้วยโปรแกรมย่อย 3 โปรแกรมคือ

- 3.1 โปรแกรมการป้อนข้อมูล
 - 3.2 โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล
 - 3.3 โปรแกรมแสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์
- ดังมีรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไปนี้

3.1 โปรแกรมการป้อนข้อมูล

ก่อนจะเริ่มขั้นตอนต่างๆ ในการป้อนข้อมูลจะมีโปรแกรมควบคุมทำหน้าที่ในการช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้โปรแกรมต่างๆตามต้องการ ดังแสดงในแผนผังโปรแกรมควบคุมรูปที่ 13 ดังนั้นถ้าต้องการใช้โปรแกรมการป้อนข้อมูลก็สามารถเลือกได้ ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งมีรายละเอียดในการป้อนข้อมูลตามลำดับดังต่อไปนี้

- 3.1.1 ป้อนข้อมูลเพื่อที่จะกำหนดลักษณะของข้อมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์ เช่น เป็นข้อมูลเก่า หรือ ข้อมูลที่จะป้อนใหม่ เป็นต้น
- 3.1.2 ในกรณีที่ต้องการป้อนข้อมูลใหม่จะต้องกำหนดชื่อ ไฟล์ของข้อมูล วันที่ เวลา และผู้ที่วิเคราะห์
- 3.1.3 ในกรณีที่ต้องการป้อนข้อมูลใหม่ต้องกำหนดว่า โครงสร้างที่จะวิเคราะห์ประกอบด้วยโครงอาคารชนิดใดบ้าง อาจจะมีโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือ

โครงข้อแข็ง หรือ ผนังต้านแรงเฉือน เป็นต้น

3.1.4 ขั้นตอนนี้เป็นภารกิจป้อนข้อมูลจำนวนชั้น จำนวนระดับอ้างอิง ความสูงของแต่ละชั้น ความสูงของแต่ละระดับอ้างอิง ลักษณะการสมมาตร แรงด้านข้างที่กระทำที่ระดับอ้างอิง ของโครงสร้างทั้งหมดที่จะวิเคราะห์ ขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องป้อนถ้าหากเป็นข้อมูลเก่า กล่าวคือข้อมูลเก่าจะถูกอ่านเข้ามาตามการกำหนดลักษณะของข้อมูล ซึ่งภายในขั้นตอนนี้ก่อนออกจากโปรแกรมยังมีการตรวจสอบข้อมูลให้ ยกเว้นข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดจากผู้ใช้ที่ไม่อาจตรวจสอบได้

3.1.5 ขั้นตอนป้อนข้อมูลของโครงอาคารในแต่ละประเภท ตามที่กำหนดในขั้นตอนที่ 3.1.3 สามารถที่จะเลือก และแก้ไขข้อมูลของโครงอาคารแต่ละประเภทได้สำหรับรายละเอียดการป้อนข้อมูล โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 14 ข้อมูลที่ต้องการมีดังต่อไปนี้

3.1.5.1 สัดส่วนความกว้าง ความยาว ความสูงทั้งหมดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.1.5.2 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง

3.1.5.3 ข้อมูลขนาดเสาและคานทั้งสองด้าน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าโมดูลัสการเฉือน ตำแหน่งชั้นที่เปลี่ยนขนาด ระยะห่างระหว่างเสาทั้งสองด้าน ที่แตกต่างกันแต่คงที่ตลอดความสูง

3.1.5.4 ค่าคงที่ของฟังก์ชันการยึดหดตัวของการกระจายแรงในแนวแกนจากการเสถียร โดย สูตรรวม จากรูปที่ 8 - 12

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผู้ใช้สามารถที่จะแก้ไข ดูข้อมูล เก็บข้อมูล พิมพ์ข้อมูล นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบข้อมูลก่อนออกจากโปรแกรมนี้สู่โปรแกรมควบคุม

3.2 โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล

ก่อนการใช้โปรแกรมนี้จะ เริ่มอ่านข้อมูลที่เก็บไว้ ภายหลังจากการป้อนข้อมูล โปรแกรมจะคำนวณค่าความยืดหยุ่น และสถิติเนสของโครงอาคารแต่ละตัว สำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะได้จากสมการ (20) และ (25) จากนั้นจะคำนวณหาค่า S เมตริกซ์

และค่า G_1 , G_2 , G_3 แล้วจึงคำนวณหาค่าการเคลื่อนที่และการหมุน ที่ทุกระดับอ้างอิงตามสมการ (48) และ (49) ตามลำดับ เมื่อได้ค่าการการเคลื่อนที่ และการหมุนแล้ว โปรแกรมจะคำนวณหาค่าแรงกระทำที่จุดยอดสุด และแรงกระจายในรูปอนุกรม โพลีโนเมียลตามสมการ (50) , (51) แรงกระจายต่างๆ ที่คำนวณได้จะนำมาหาแรงภายในเสาและคาน เช่น แรงเฉือน , โมเมนต์ , และแรงในแนวแกน สำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อเสร็จจากการคำนวณ ก็จะเก็บค่าผลลัพธ์ต่างๆ เช่น แรงภายในเสาและคาน การหมุน การเคลื่อนที่ รวมถึงค่าการกระจายแรง ของแต่ละโครงอาคาร ดังแสดงในแผนผังโปรแกรมวิเคราะห์ รูปที่ 15

เมื่อจบโปรแกรมวิเคราะห์จะกลับไปสู่โปรแกรมควบคุม เพื่อจะดำเนินการต่อไป

3.3 โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์

สำหรับการแสดงข้อมูลที่ป้อน เข้า ไปจะแสดงทางจอภาพ และพิมพ์ผลลัพธ์ทางเครื่องพิมพ์ ได้ตลอดเวลาในแต่ละขั้นตอนการป้อนข้อมูล ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ จะแสดงผลตามที่ต้องการแสดง และแล้วแต่ชนิดของ โครงอาคาร จากนั้นก็จะอ่านข้อมูลที่เก็บไว้จาก โปรแกรมวิเคราะห์ของแต่ละ โครงอาคารที่ต้องการทราบ ซึ่งจะแสดงทางจอภาพ และพิมพ์ผลลัพธ์ทางเครื่องพิมพ์ตามที่ต้องการได้ ดังแสดงแผนผัง โปรแกรมในรูปที่ 16

เมื่อเสร็จ โปรแกรมนี้แล้วก็กลับไปสู่โปรแกรมควบคุม

ดังนั้นจะเห็น ได้ว่าโปรแกรมต่างๆที่จัดทำขึ้นช่วยอำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้และทำให้ทราบค่าต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างและผลการวิเคราะห์

ตัวอย่างที่แสดงในการวิจัยนี้ ผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ผู้วิจัยอื่นและ โปรแกรมการวิเคราะห์ละเอียด ETABS โดยศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างที่สมมาตรและ ไม่สมมาตรที่กระทำต่อ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีการแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูง ผลของการแปรเปลี่ยนตำแหน่งระดับอ้างอิง

4.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูงรับแรงกระทำด้านข้างที่ก่อให้เกิดแรงบิดคงที่อย่างเดี่ยวย และมีขนาดระยะห่างช่วงเสาในแต่ละด้านเท่ากัน ตัวอย่างนี้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยเมื่อมีการแปรเปลี่ยนจำนวนระดับอ้างอิงกับผลลัพธ์ของ พูลส์วัตต์ และ ETABS

นิจากรูปที่ 17 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 30 ชั้น รับแรงบิดคงที่ 162 kips-ft/ft ความสูงระหว่างชั้น 12 ฟุตและระยะห่างระหว่างช่วงเสาทั้งสองด้าน 12 ฟุต ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชั้นส่วนที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูงที่ทุกๆ 10 ชั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและ โมดูลัสของการเฉือนเท่ากับ 5×10^5 kips/ft² และ 2.07×10^5 kips/ft² ตามลำดับ ค่า Stiffness Factor และ Shear Lag Parameter แสดงในตารางที่ 3

โดยอาศัยวิธีการในภาคผนวก ก ทำให้สามารถจำลองโครงสร้างดิสครีตของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่มี มิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 17 ข. และมีความหนาของผนังเทียบเท่า โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่าและ โมดูลัสการเฉือนเทียบเท่าตามการแปรเปลี่ยนขนาดของชั้นส่วนตามความสูงที่ทุกๆ 10 ชั้นของ โครงสร้างดิสครีตเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

สำหรับผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ต่างๆ ในรูปที่ 18 แสดงค่ามุมบิดที่ระดับชั้นต่างๆ โดยโปรแกรม ETABS, วิธีของพูลส์วัตต์ และการวิจัยนี้ โดยการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 2 และ 3 เท่านั้น เนื่องจากการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 2 เป็นการจำลองแรงบิดกระทำภายนอกคงที่ ด้วยแรงบิดเดี่ยวที่จุดยอดสุดและแรงบิดคงที่เท่านั้น พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับ

ผลลัพธ์ของ ETABS และ พูลส์วิสต์ ต่อมาเพิ่มจำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 3 เปรียบเสมือนเพิ่ม
 เทอมแรงกระทำรูปสามเหลี่ยมอีกหนึ่งเทอมจากการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 2 พบว่าผลที่
 ได้ไม่แตกต่างจากการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 2 จะเห็นได้ว่า การใช้จำนวนระดับอ้างอิง
 ที่สอดคล้องกับลักษณะการกระจายแรงบิดภายนอก จะช่วยให้ค่าที่ตัดและรวดเร็วยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม
 เพื่อการเปรียบเทียบค่าต่างๆจะใช้ผลลัพธ์จากการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 3 เท่านั้น
 เมื่อเปรียบเทียบค่ามุมบิดที่จุดยอดสุด ดังแสดงในตารางที่ 4 กับผลลัพธ์ของ ETABS พบว่าให้
 ค่าสูงกว่าค่าจริง 6 เปอร์เซ็นต์

ผลลัพธ์แรงในแนวแกนของเสาต้นมุม ดังแสดงในรูปที่ 19 พบว่าแรงในแนวแกนสูงสุด
 ที่ชั้นล่างสุดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จาก ETABS ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ และจะมีค่าผิดพลาดมากที่สุด
 ชั้นบนสุด สำหรับการกระจายแรงในแนวแกนของเสากายในทั้งสองด้าน ดังแดงในรูปที่ 21
 จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของฟังก์ชันการยึดหดในแนวแกนที่สมมติขึ้น ในลักษณะสมการ
 เส้นตรง (สมการที่ 26) พบว่าค่าของแรงในแนวแกนตามความสูงของเสากายในทั้งสองด้าน
 ที่ระดับชั้นต่อเนื่องกัน ค่าของแรงในแนวแกนที่ชั้นบนจะให้ค่าที่ถูกต้องกว่าชั้นล่าง และในชั้น
 เดียวกันเสาที่อยู่ตำแหน่งใกล้เสาต้นมุมจะให้ค่าที่ถูกต้องกว่าเสาต้นที่อยู่ห่างออกไป ค่าแรงใน
 แนวแกนจะให้ผลที่ชั้นที่ 1-6 ทั้งนี้ค่าของแรงในแนวแกนจะผิดพลาดที่ชั้นบนสุด เช่นเดียวกัน

ผลลัพธ์ของแรงเฉือนในเสาและคานของทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 20 พบว่า
 การกระจายแรงเฉือนในเสาและคานของทั้งสองด้านประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด จะให้
 ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ของ ETABS และพูลส์วิสต์ และจะให้ค่าผิดพลาดสูงที่เสาต้นมุม โดยที่ให้ค่า
 ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก ETABS ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดในเสาต้นมุม
 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าค่าที่ได้ให้ผลดีพอสมควรแต่จะมีค่าผิดพลาดสูงที่ชั้นล่างสุด

จากค่าผิดพลาดต่างๆ สำหรับแรงในแนวแกนของทั้งสองด้านเนื่องจาก การให้การ
 กระจายฟังก์ชันการยึดหดในแนวแกนเหมือนกันที่ทุกระดับชั้น โดยแท้จริงแล้วแรงในแนวแกนจะ
 เปลี่ยนเครื่องหมายที่ชั้นบน และการกระจายแรงในแนวแกนในแต่ละด้านแตกต่างจากที่สมมติ
 จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น สำหรับแรงในแนวแกนที่เสาต้นมุม ขึ้นอยู่กับการสมมติฟังก์ชันการ
 ยึดหด ได้ถูกต้องเพียงใด รวมทั้งฟังก์ชันมุมบิดที่สมมติขึ้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงเฉือนที่จุด
 ยอดสุด กล่าวคือแรงเฉือนต้องมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดยอดสุด อีกประการหนึ่งควรเพิ่มเทอมของ
 ฟังก์ชันที่สมมติให้มากขึ้นกว่าเดิม อย่างไรก็ตามการใช้ฟังก์ชันต่างๆดังที่แสดงไว้ก็ให้ค่าที่ถูกต้อง
 เพียงพอสำหรับการออกแบบขั้นต้นได้

4.2 **ตัวอย่างที่ 2** โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดตามความสูงรับแรงกระทำด้านข้างที่สมมาตร ตัวอย่างนี้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยโดยใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 3 กับผลลัพธ์ของ สุธรรม, KHAN และค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ละเอียด

พิจารณารูปที่ 22 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 50 ฟุต รับแรงกระทำคงที่ในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลาง 19 kips/ft ความสูงระหว่างชั้น 13 ฟุต และระยะห่างระหว่างช่วงเสาทั้งสองด้าน 12 ฟุต ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของชั้นส่วน ตัวอย่างนี้ KHAN ไม่ได้กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสของการเฉือน ดังนั้นกำหนดให้ใช้เท่ากับ 5×10^5 kips/ft² และ 2.07×10^5 kips/ft² ตามลำดับ ค่า Stiffness Factor ดังแสดงในตารางที่ 6 จากค่า Stiffness Factor และ Aspect Ratio สามารถหาค่า M_1 , M_2 , M_3 ได้เท่ากับ 1, 1.92, 0.52 ตามลำดับ

รูปที่ 22 ข. แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิก และมีความหนาของผนังเทียบเท่า โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่าและโมดูลัสการเฉือนเทียบเท่าตามการแปรเปลี่ยนขนาดของชั้นส่วนตามความสูงของโครงสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 7

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่ามุมบิดที่จุดยอดสุดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแปรเปลี่ยนจำนวนระดับอ้างอิง ไม่สามารถเปรียบเทียบกับการวิจัยของผู้วิจัยอื่นเนื่องจากการกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสของการเฉือนไม่เท่ากันในการวิเคราะห์ ซึ่งการกำหนดค่าดังกล่าวไม่มีผลต่อผลลัพธ์ของแรงในแนวแกนและแรงเฉือนในเสาและคานในการวิเคราะห์

ผลลัพธ์แรงในแนวแกนของเสาต้นมุมและเสากลางในของด้านที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 8 การเปรียบเทียบจะใช้ค่าจำนวนระดับอ้างอิงที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเท่ากับ 3 โดยมีการกระจายแรงในแนวแกนในด้านที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 23 ซึ่งแสดงการกระจายของฟังก์ชันการยึดหดในแนวแกนในแต่ละด้านที่สมมติขึ้น (สมการที่ 21, 22) จากการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกนในตารางที่ 8 พบว่า แรงในแนวแกนสูงสุดที่ชั้นล่างสุดของเสาต้นมุมมีค่าต่ำกว่าค่าจริงไม่เกิน 14 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการกระจายแรงในแนวแกนของเสากลางในด้านที่ 1 พบว่าค่าของแรงในแนวแกนที่ชั้นล่างสุดจะให้ค่าต่ำกว่าค่าจริงไม่เกิน 11 เปอร์เซ็นต์

ผลลัพธ์ของแรงเฉือนในคานของด้านที่ 2 ที่รวมค่า 5 ชั้นแรก ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าการกระจายแรงเฉือนในคานบริเวณกึ่งกลางด้านที่ 2 ที่ให้ค่าสูงสุดจะให้ค่าผิดพลาดไม่เกินสูงกว่าค่าจริง 12 เปอร์เซ็นต์ และที่ตำแหน่งคานถัดไปทางขอบริมด้านที่ 2 จะให้ค่าผิดพลาดสูงกว่าค่าจริงไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ค่าผิดพลาดสืบเนื่องมาจากการใช้ฟังก์ชันที่สมมติขึ้น และการใช้ฟังก์ชันการกระจายการยึดหดเดียวกันตลอดความสูง ดังนั้นจึงไม่สามารถแทนฟังก์ชันการยึดหดจริงได้ที่ทุกตำแหน่งของเสา ทั้งนี้จะมีผลต่อแรงเฉือนในเสาและคานเนื่องจากแรงเฉือนส่วนหนึ่งจะได้รับการกระจายแรงในแนวแกนนี้ อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ก็เพียงพอที่จะใช้ในการออกแบบขั้นต้นได้

4.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมือนตัวอย่างที่ 2 แตกต่างตรงที่แปลงหน่วยของมิติ เป็นหน่วยเมตริกซ์ และลักษณะของแรงกระทำด้านข้างที่ก่อให้เกิดแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลาง และแรงบิด ตัวอย่างนี้เป็นการแสดงผลลัพธ์ค่าต่างๆที่เกิดขึ้นในโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยไม่มีการเปรียบเทียบกับผู้วิจัยอื่น

พิจารณารูปที่ 24 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าสูง 50 ชั้น รับแรงลมขนาดตามเทศบัญญัติกรุงเทพมหานครมีขนาดคงที่ 160 กก.ต่อ ตร.ม. และแรงบิดขนาด 16000 กก.-ม ต่อ ตร.ม โดยมีทิศทางของแรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 24 ก. ความสูงระหว่างชั้น 3.90 ม. และระยะห่างระหว่างช่วงเสาทั้งสองด้าน 3.00 ม. ตารางที่ 10 แสดงคุณสมบัติต่างๆของชั้นส่วน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสของการเฉือนเท่ากับ 2.3×10^6 ตัน.ต่อ ตร.ม. และ 0.92×10^6 ตัน.ต่อ ตร.ม ตามลำดับ ค่า Stiffness Factor และ Shear Lag Parameter และ Aspect Ratio สามารถหาค่า M_1 , M_2 , M_3 ได้เท่ากับ 1.00, 1.92 และ 0.52 ตามลำดับ

พิจารณารูปที่ 24 ข. แสดงมิติและแปลนพื้นชั้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โธทโรปิดและมีความหนาของผนังเทียบเท่าในแต่ละด้าน โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่าและโมดูลัสการเฉือนเทียบเท่าตามการแปรเปลี่ยนขนาดของชั้นส่วนตามความสูง ดังแสดงในตารางที่ 11

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าต่างๆโดยการใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 3 เท่านี้มาแสดง เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วในตัวอย่างที่ 1 ผลลัพธ์ของระยะเออนและมุมบิดดังแสดงในรูปที่ 25, 26 สำหรับผลลัพธ์ของแรงในแนวแกนของเสาในแต่ละด้านดังแสดงในรูปที่ 27-30 พบว่าด้านที่ 1 และ 3 แรงในแนวแกนจะมีขนาดเท่ากันแต่ต่างเครื่องหมาย เป็นผลสืบเนื่องจากแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางและแรงบิดมีทิศทางสวนกัน ส่วนด้านที่ 2 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างด้านทั้งสอง การกระจายแรงในแนวแกนด้านที่ 4 จะให้ค่าที่สูงกว่าในด้านที่ 2 เนื่องจากการเสริมกันของแรงในแนวแกนในด้านที่ 4 และการหักล้างกันในด้านที่ 2 ทั้งนี้แรงในแนวแกนของทุกด้านจะมีการเปลี่ยนเครื่องหมายที่ขึ้นบนๆ

สำหรับผลลัพธ์ของแรงเฉือนในเสาและคาน ดังแสดงในรูปที่ 31-34 พบว่าด้านที่ 1 และ 3 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาและคานที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เนื่องจากผลของแรงบิด โดยมีขนาดเท่ากันแต่เครื่องหมายต่างกัน ส่วนด้านที่ 2 และ 4 แรงเฉือนในเสาและคานจะเกิดการหักล้างกันในด้านที่ 2 และแรงเฉือนในเสาและคานในด้านที่ 4 จะให้ค่าที่สูงกว่าในด้านที่ 2 เนื่องจากแรงเฉือนมีทิศทางเดียวกันเกิดการเสริมกัน

โดยแท้จริงแล้วการกระจายแรงในแนวแกนหรือแรงเฉือนในเสาและคานนั้นไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนขนาดของแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางและแรงบิดที่มากกระทำ ยังขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงที่มากกระทำด้วย

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์อย่างง่ายเพื่อหาค่าการกระจายแรงกระทำด้านข้างสำหรับโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการแทนแรงกระทำด้านข้างด้วยแรงกระทำแบบจุดที่ปลายยอดสุดและโพลีโนเมียลอันดับต่างๆจากผลการวิจัยพอสรุปได้ว่า

5.1.1 วิธีการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยการแทนโครงสร้างดิสครีตด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิกตามที่กล่าวมาในบทที่ 2 สามารถให้ค่าที่ถูกต้องเพียงพอในการออกแบบขั้นต้นได้

5.1.2 ในกรณีที่แรงกระทำภายนอกมีขนาดคงที่ตลอดความสูง การใช้จำนวนระดับอ้างอิงเท่ากับ 3 ก็เป็นการพอเพียงสำหรับการกระจายแรงกระทำด้านข้าง สำหรับแรงกระทำภายนอกที่มีลักษณะอื่นๆ ควรเลือกใช้จำนวนระดับอ้างอิงที่มากขึ้น ทั้งนี้ฟังก์ชันที่สมมติขึ้นควรที่จะให้ค่าความถูกต้องได้ที่ทุกชนิดของแรงที่กระจายที่ด้าน โดย โครงอาคาร

5.1.3 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านทานแรงกระทำด้านข้างที่มีขนาดคงที่ สำหรับแรงบิดพบว่าแรงโมเมนต์แกนสูงสุดของเสาต้นมุมต่ำกว่าค่าจริงประมาณ 30 % แรงเฉือนโมเมนต์และคานส่วนในหุบจะให้ค่าที่ค่อนข้างจะถูกตองที่ชั้นล่างๆ แม้ว่าจะผิดพลาดมากที่เสาต้นมุม มุมบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าจริงไม่เกิน 6 % ส่วนกรณีโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านทานแรงกระทำผ่านศูนย์กลาง พบว่าแรงโมเมนต์แกนสูงสุดของเสาต้นมุมจะให้ค่าต่ำกว่าค่าจริงไม่เกิน 14 % สำหรับการกระจายแรงโมเมนต์แกนของเสาต้นที่ 1 และ 3 มีค่าต่ำกว่าค่าจริงไม่เกิน 12 % ส่วนแรงเฉือนในคานซึ่งเปรียบเทียบผลรวมของแรงเฉือนในคาน 5 ชั้นแรกตำแหน่งที่ให้ค่าผลรวมของแรงเฉือนในคาน 5 ชั้นแรกสูงสุดจะให้ค่าสูงกว่าค่าจริง 12 % ระยะเอนไม่สามารถเปรียบเทียบได้ จากผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆที่ได้ให้ค่าที่ถูกต้องเพียงพอสำหรับการออกแบบขั้นต้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมจากวิทยานิพนธ์นี้ อาจจะศึกษาถึง

5.2.1 กรณีโครงสร้างข้อซึ่งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแปรเปลี่ยนขนาดของระยะห่างระหว่างช่วงเสาในแต่ละด้านตามความสูง

5.2.2 การศึกษาการกระจายแรงกระทำด้านข้างของโครงอาคาร กรณีที่องค์อาคารประกอบด้วยองค์อาคารประเภทอื่นเช่น ผนังปล่องลิฟท์ เป็นต้น

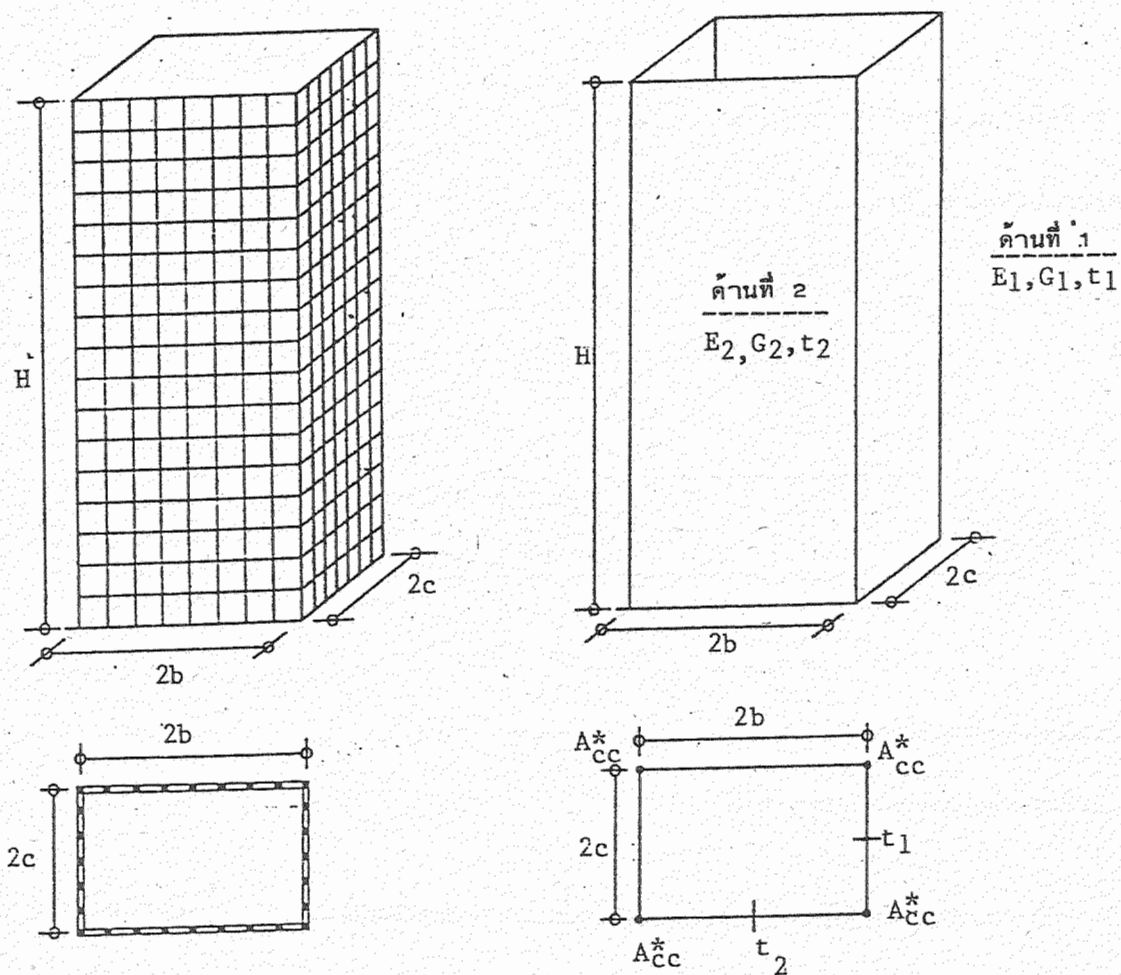
5.2.3 การเลือกใช้ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ที่ให้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น แทนที่จะใช้การสมมติฟังก์ชัน อาจใช้วิธีการ Calculus of Variation เพื่อหาฟังก์ชันต่างๆโดยตรง

เอกสารอ้างอิง

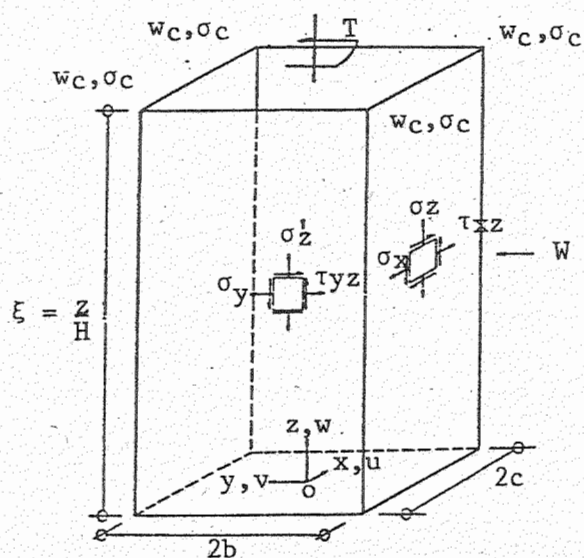
1. Coull, A. and Subedi, N.K., "Framed Tube Structures for High-rise Buildings," Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers., 97, ST 8 (August 1971), pp 2097-2105
2. Rutenberg, A., "Analysis of Tube Structures Using Plane Frame Programs," Proceeding of the Regional Conference on Tall Building, Bangkok, Asian Institute of Technology, 1974, pp. 397-413
3. Khan, F.R. and Amin, N.R., "Analysis and Design of Framed Tube Structures for Tall Concrete Buildings," Response of Multistory Concrete Structures to Lateral Forces, Publication SP-36. Detroit : American Concrete Institute, 1973, pp. 39-60
4. Coull, A. and Bose, B., "Simplified Analysis of Framed Tube Structures," Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers., 101, ST. 11 (November 1975), pp. 2223-2240
5. Coull, A. and Bose, B., "Torsion of Framed Tube Structures," Journal of the Structure Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers., 102 ,ST. 12 (December 1976), pp. 2366-2370
6. Coull, A. and Ahmed, A.K., "Deflection of Framed Tube Structures," Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers., 104, ST. 5 (May 1978), pp. 857-862

7. Watanavong, S., "Approximate Analysis of Framed Tube Structures Subjected to Lateral Load," Master's Thesis, Department of Civil Engineers, Graduate School, Chulalongkorn University, 1978
8. Phuaprapat, P., "Approximate Analysis of Framed Tube Structures Subjected to Torsional Loading," Master's Thesis, Department of Civil Engineers, Graduate School, Chulalongkorn University, 1979
9. Coull, A. and Adams, N.W., "A Simple Method of Analysis of the Load Distribution in Multistory Shear Wall Structures," Response of Multistory, Concrete Structures to Lateral Forces, Publication SP 36-9, ACI, 1973, pp. 187-216
10. Coull, A. and Mohammed, T.H., "Simplified Analysis of Lateral Load Distribution in Structures Consisting Frames, Coupled Shear Wall and Cores," The Structural Engineer, Vol. 61B No. 1, March 1983, pp. 1-8
11. Saengboonsong, T., "An Approximate Lateral Load Distribution in Nonuniform Building Frames," Master's Thesis, Department of Civil Engineers, Graduate School, Chulalongkorn University, 1985
12. ดร.ทักษิณ เทพชาตรี, "การวิเคราะห์แรงกระทำด้านข้างในอาคารสูงประกอบด้วย โครงข้อแข็งและกำแพงด้วยไมโครคอมพิวเตอร์," วิศวกรรมสาร เล่มที่ 4, สิงหาคม 2527, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
13. ดร.ทักษิณ เทพชาตรี, "การใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์อย่างประมาณเพื่อหาค่า การกระจายของแรงด้านข้างในอาคารสูง ประกอบด้วยผนังรับแรงเฉือนและ โครงข้อแข็ง," จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528, หน้า 1-53

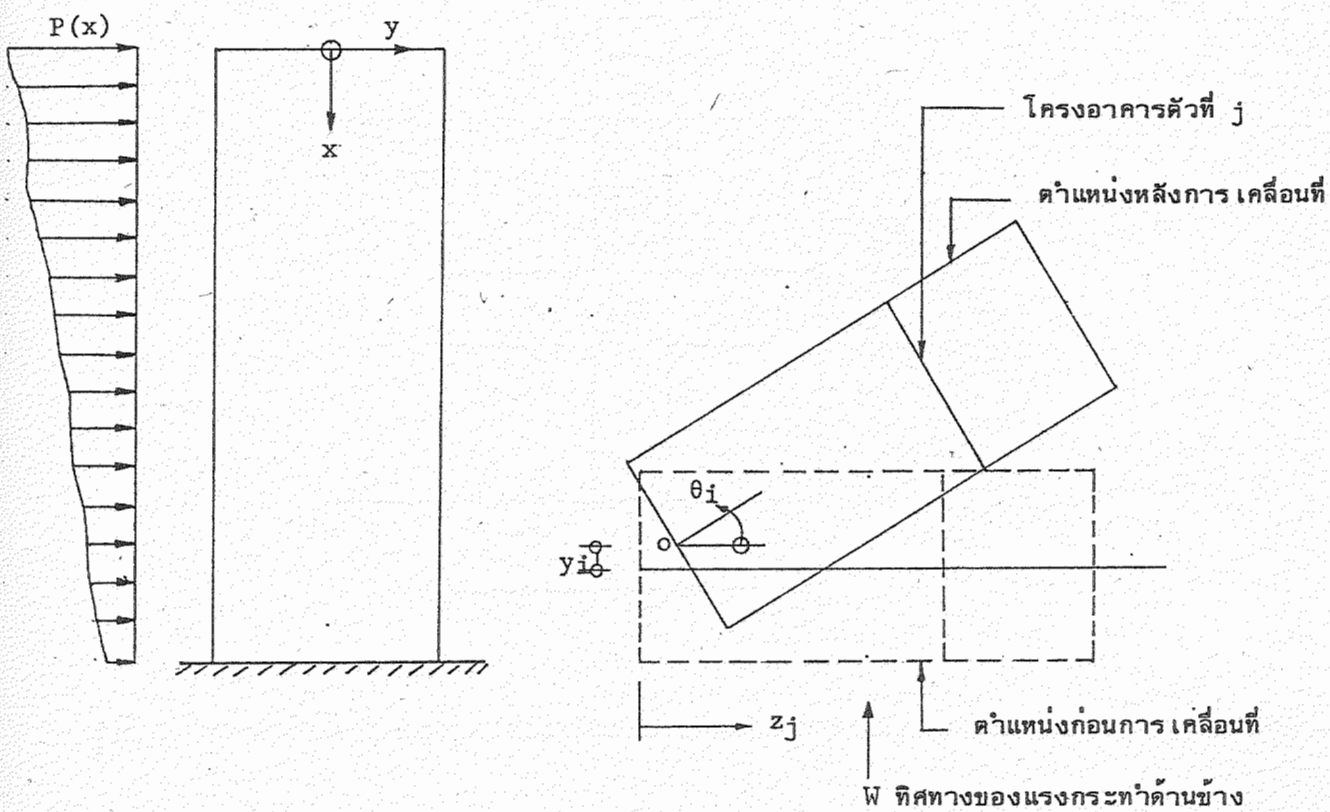
รูปภาพประกอบ



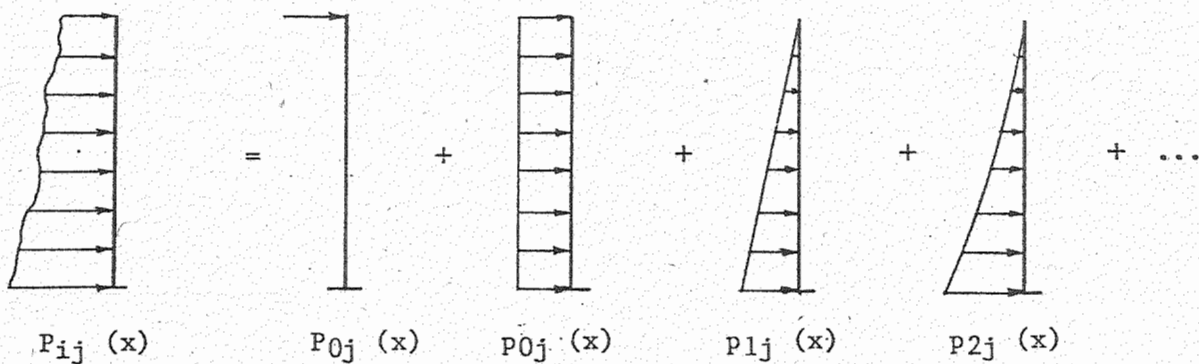
รูปที่ 1. การแทนโครงสร้างดิสครีต (Discrete Structure) ด้วยกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก



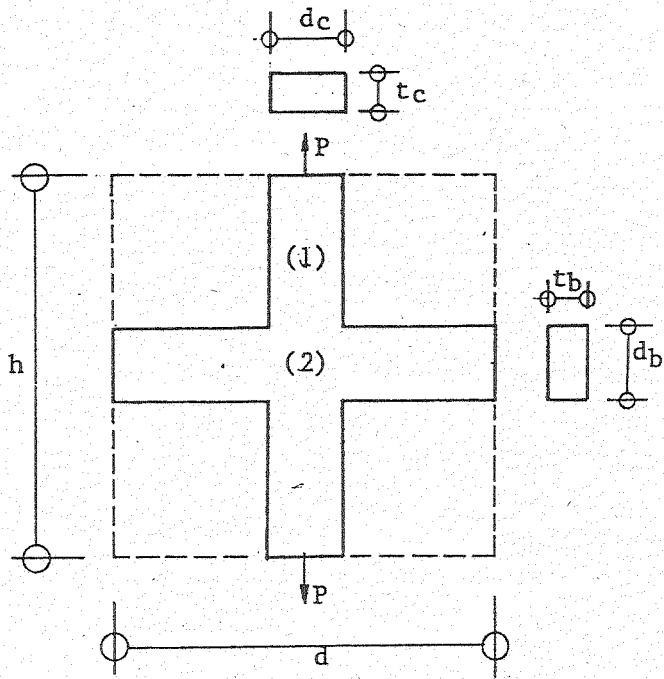
รูปที่ 2. ทิศทางของแกน x, y, z ความเค้น การเคลื่อนที่ และขนาดของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก



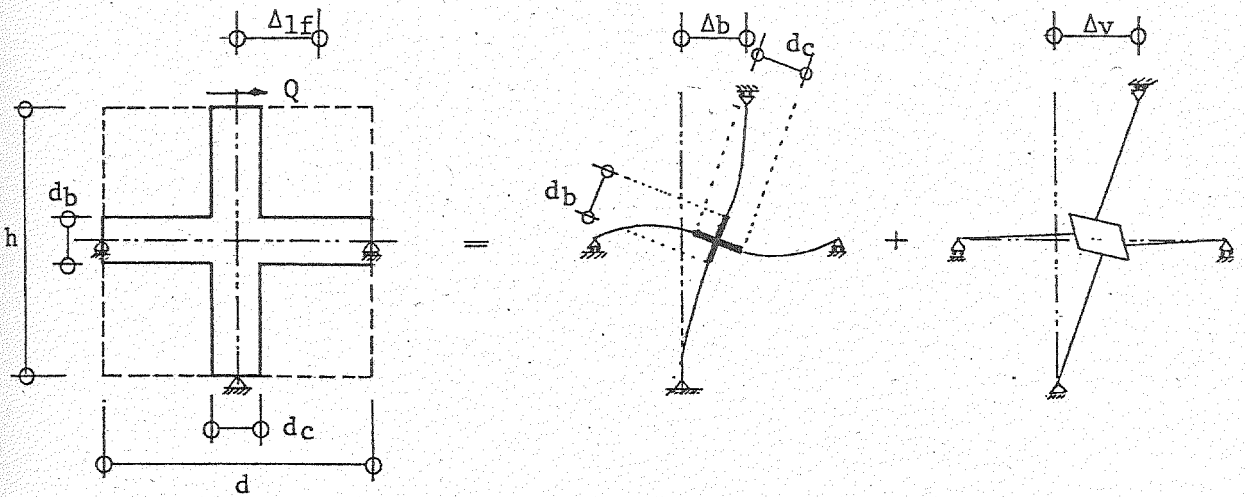
รูปที่ 3. แกนอ้างอิง x, y, z และลักษณะการเคลื่อนที่ของโครงอาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์



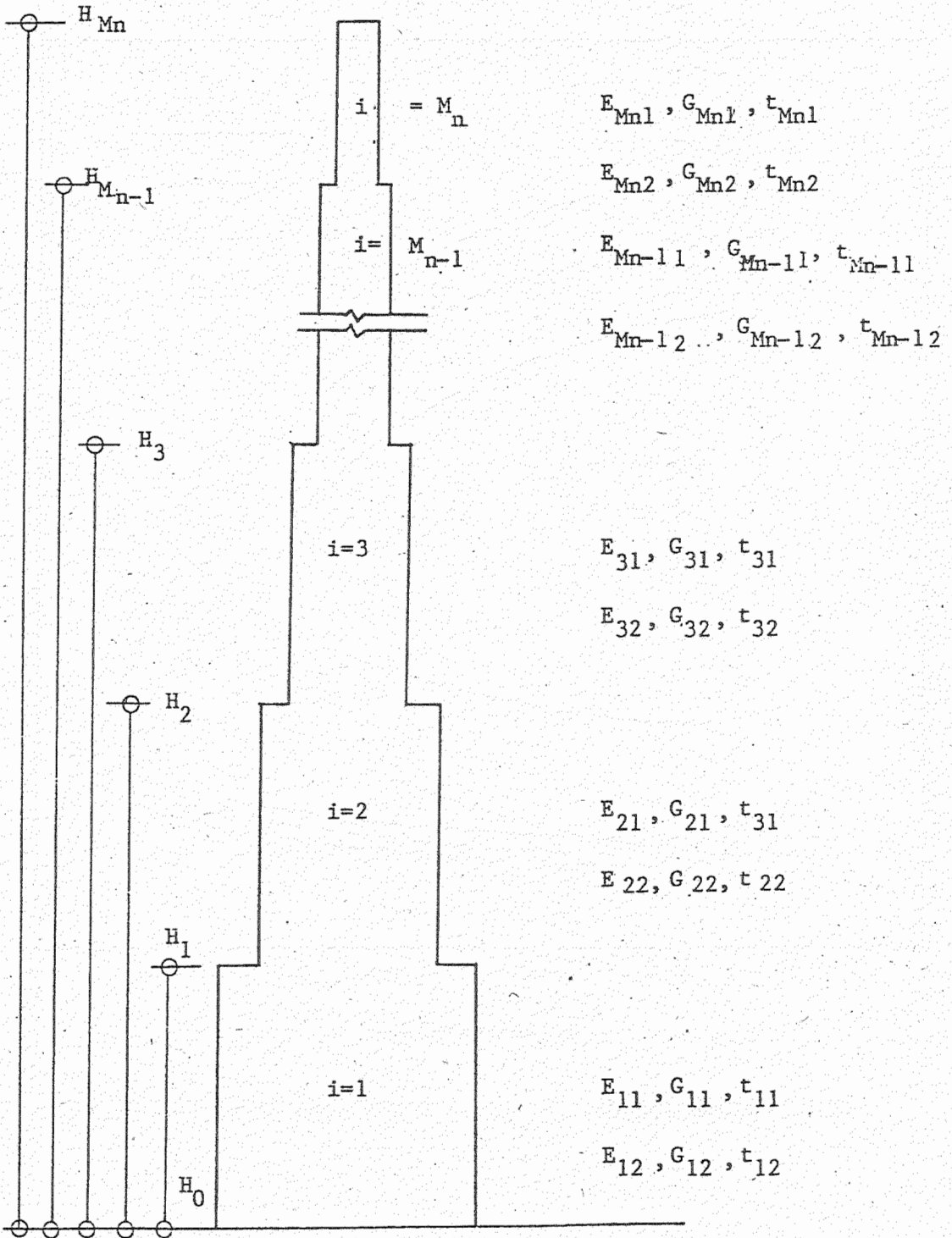
รูปที่ 4. การแทนแรงกระทำด้านข้าง $P(x)$ ด้วยแรงกระทำเป็นจุดที่จุดยอดสุด และแรงในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ



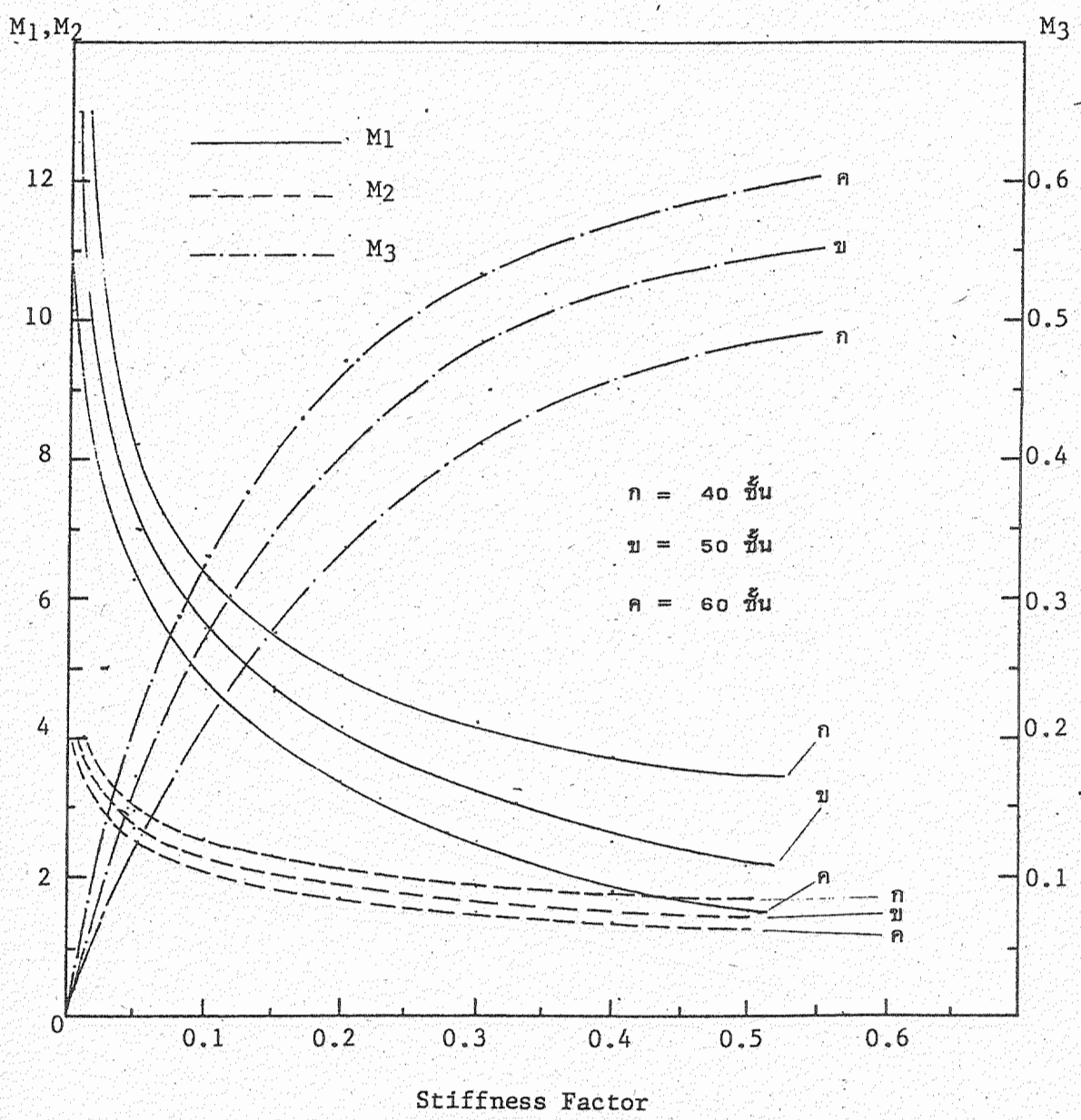
รูปที่ 5. การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E_z ของกล่องเหลี่ยมเท่าออร์โททรอปิก



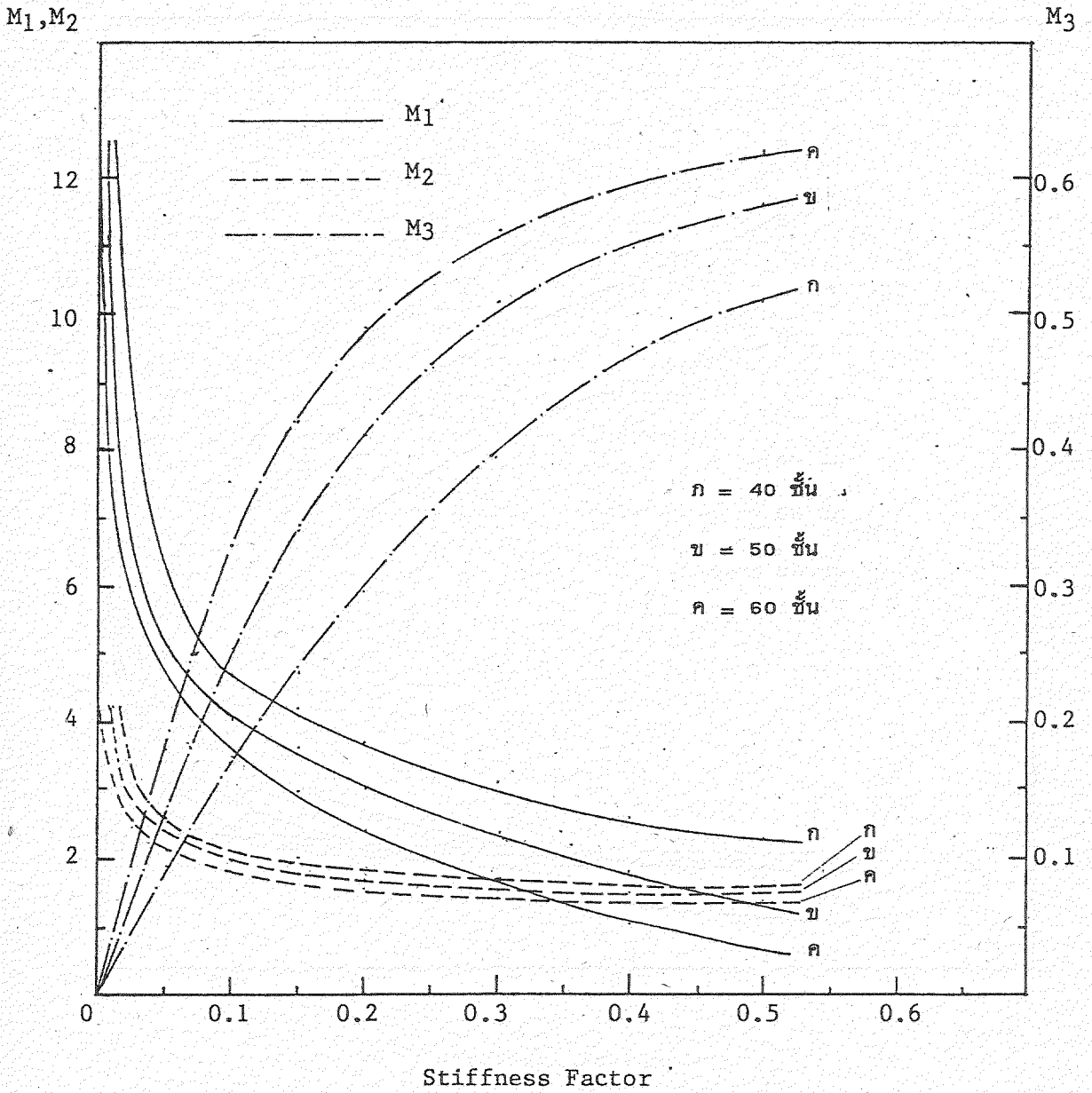
รูปที่ 6. การหาค่าโมดูลัสการเฉือน (Shear modulus) G_{zs} ของกล่องเหลี่ยมเท่าออร์โททรอปิก



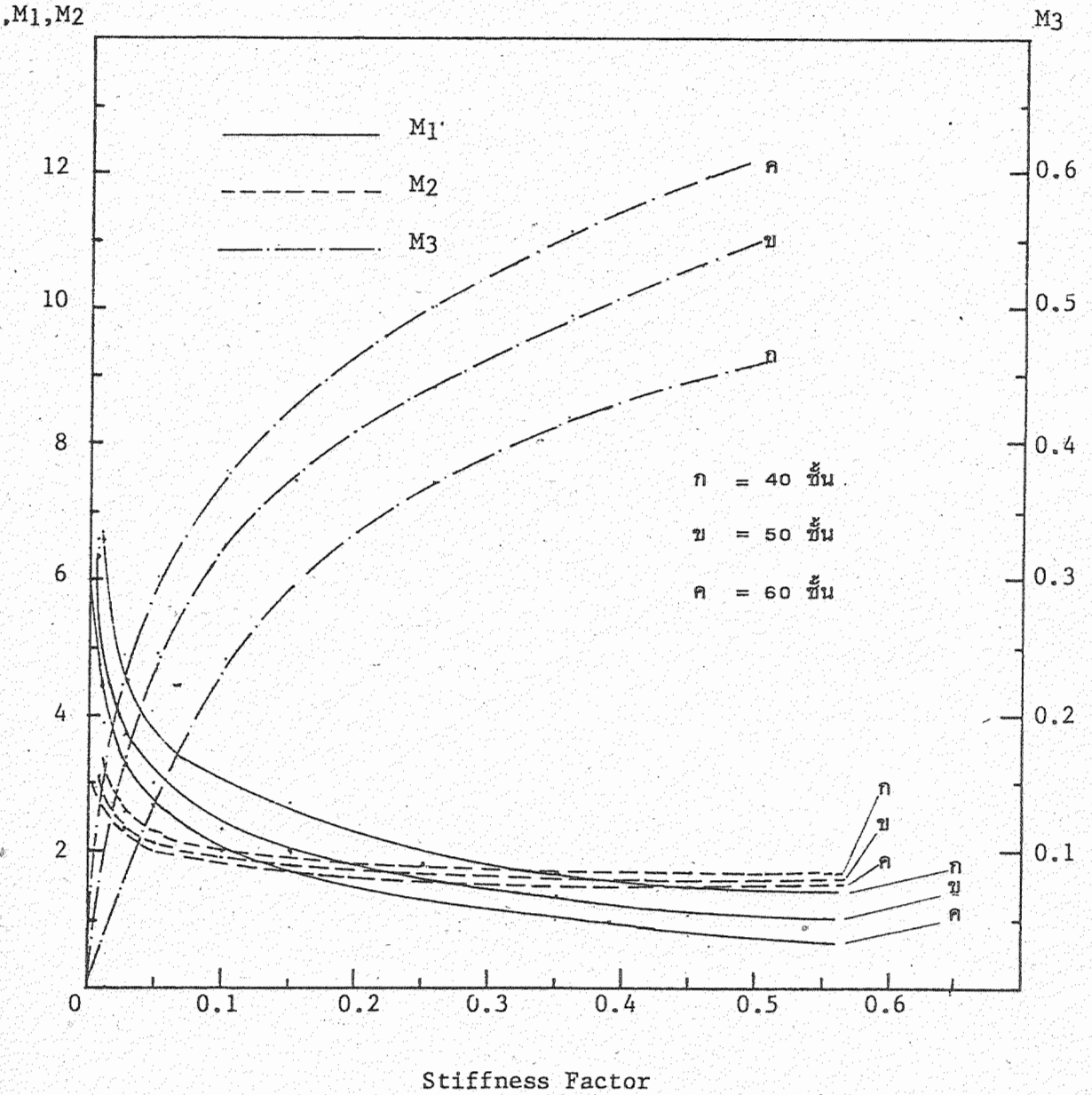
รูปที่ 7. แสดงสัญลักษณ์การแปรเปลี่ยนขนาดของชิ้นส่วนตามความสูง



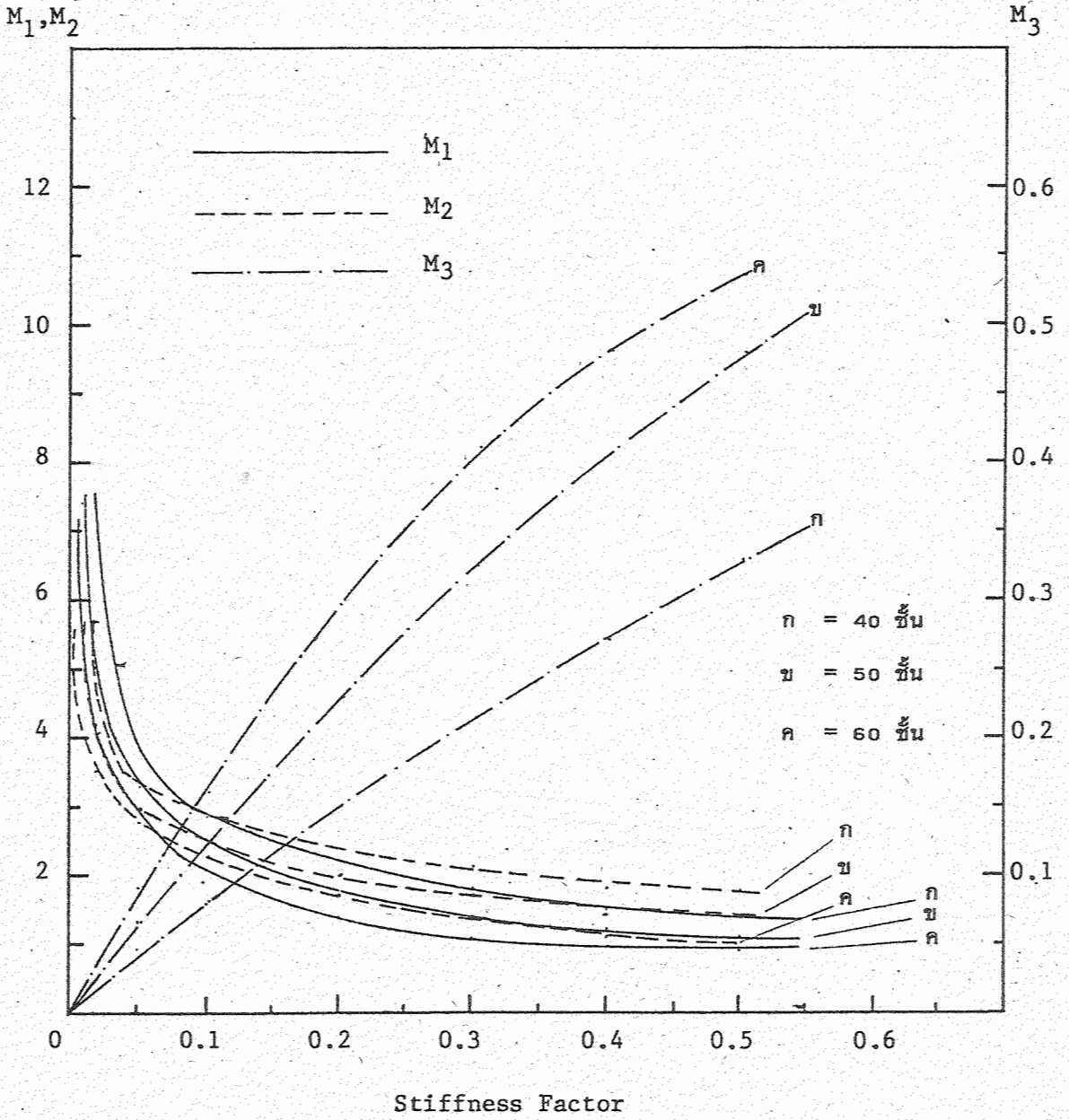
รูปที่ 8. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1 , M_2 , M_3 (Aspect Ratio = 0.5)



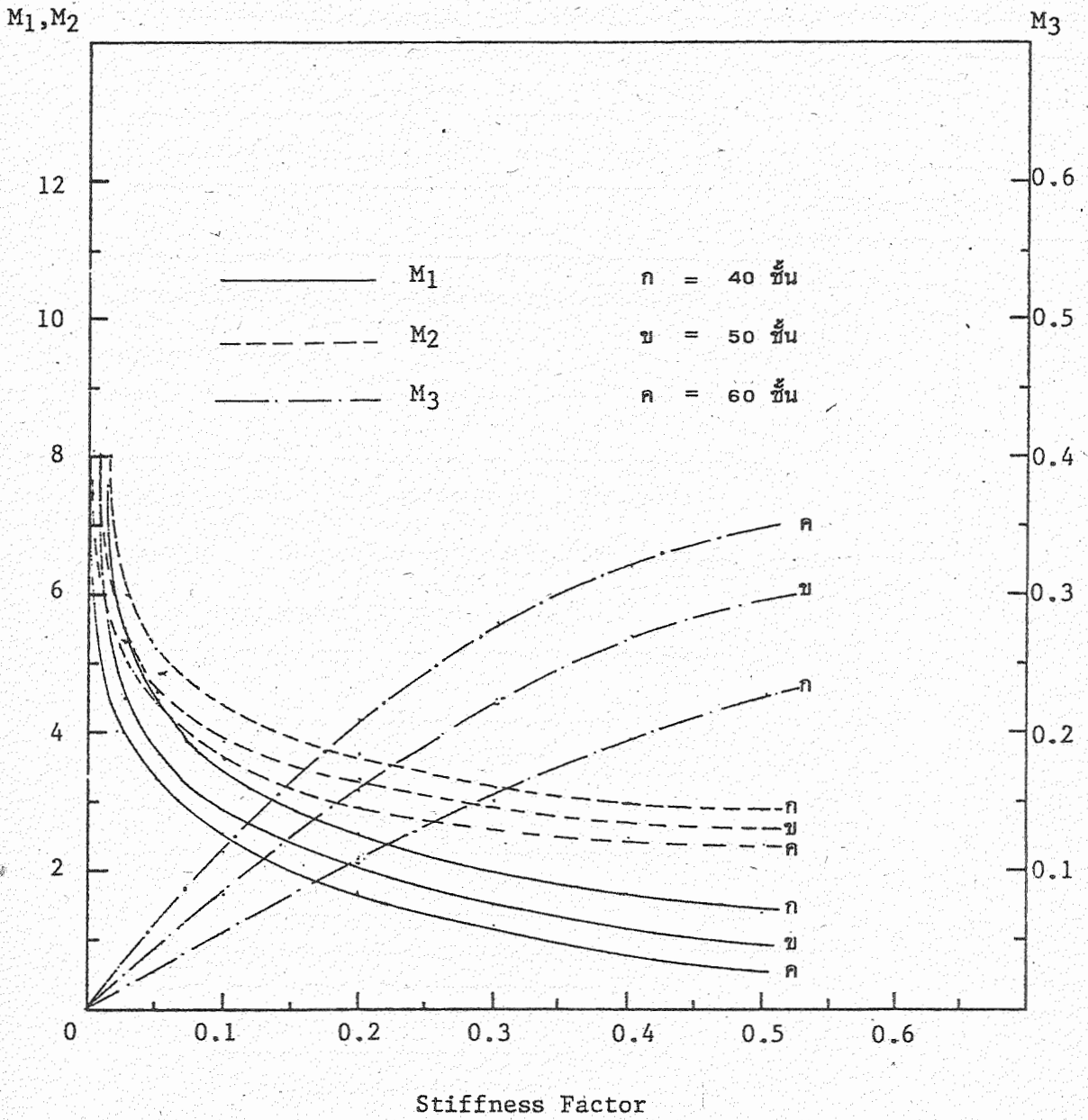
รูปที่ 9. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1, M_2, M_3 (Aspect Ratio = 0.666)



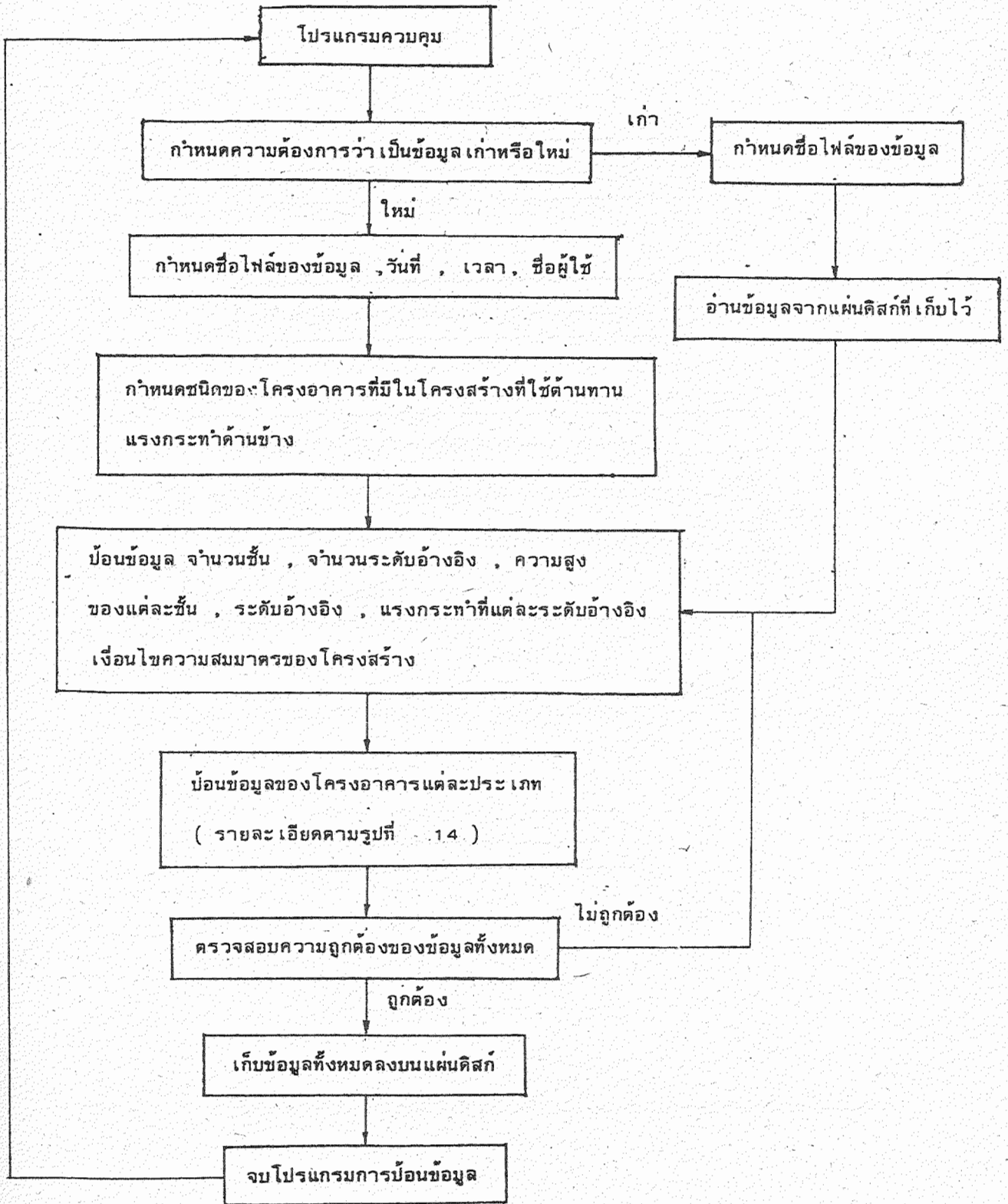
รูปที่ 10. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1 , M_2 , M_3 (Aspect Ratio = 1.00)



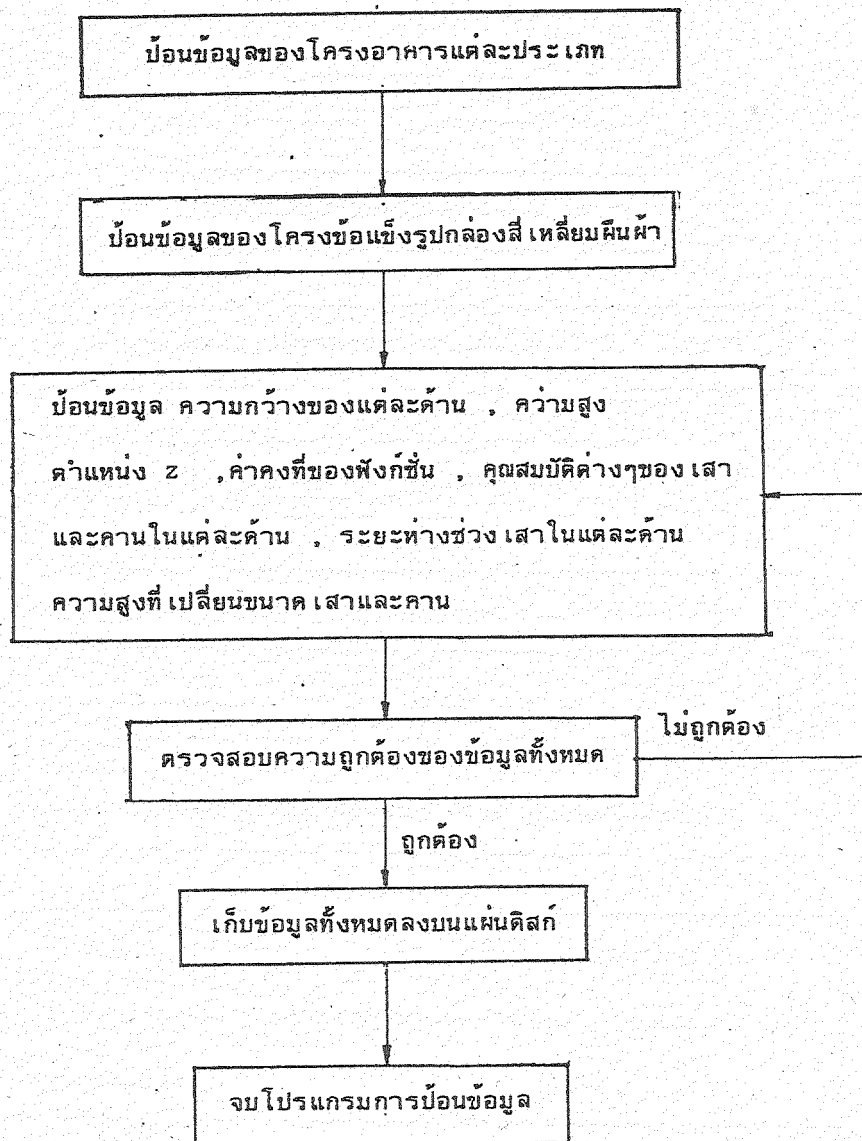
รูปที่ 11. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1 , M_2 , M_3 (Aspect Ratio = 1.50)



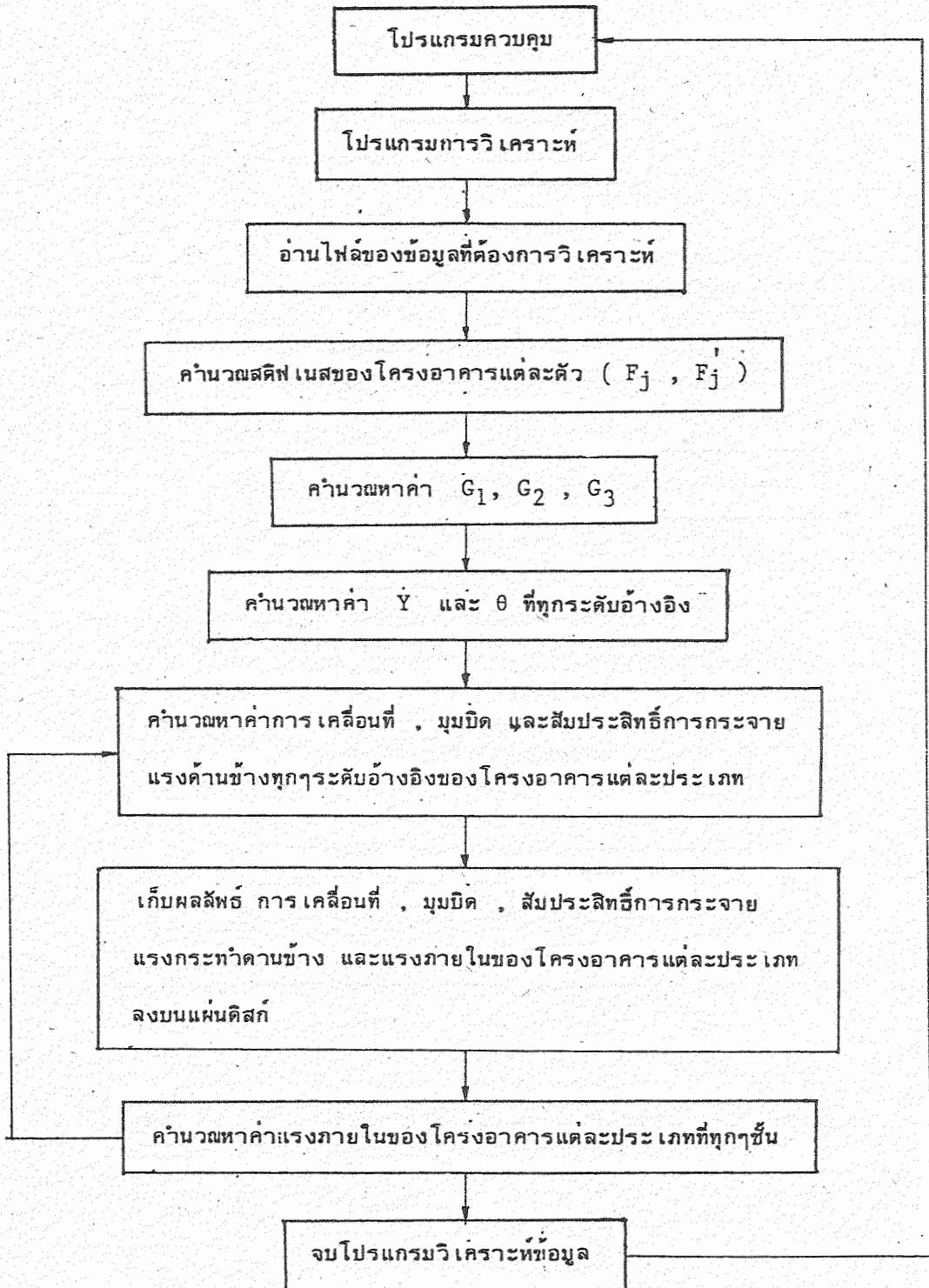
รูปที่ 12. กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ M_1 , M_2 , M_3 (Aspect Ratio = 2.00)



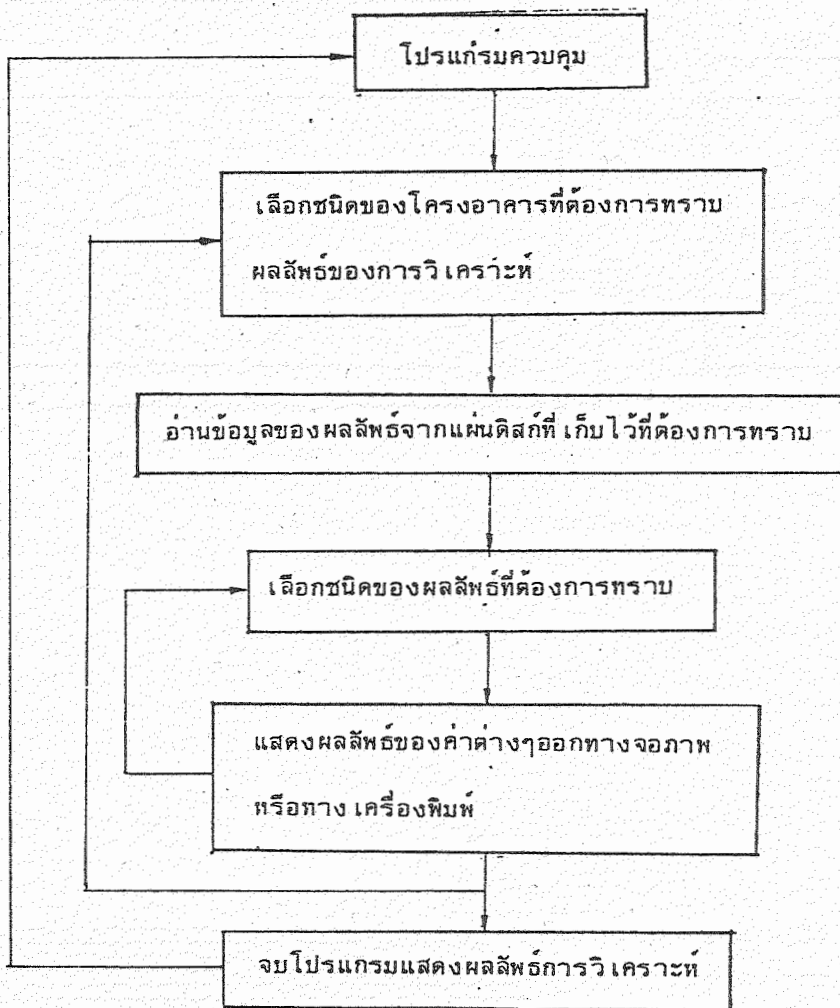
รูปที่ 13. แสดงขั้นตอนต่างๆของ โปรแกรมการบ่อนข้อมูล



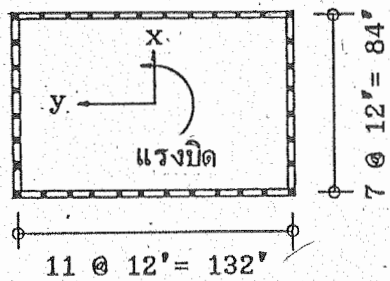
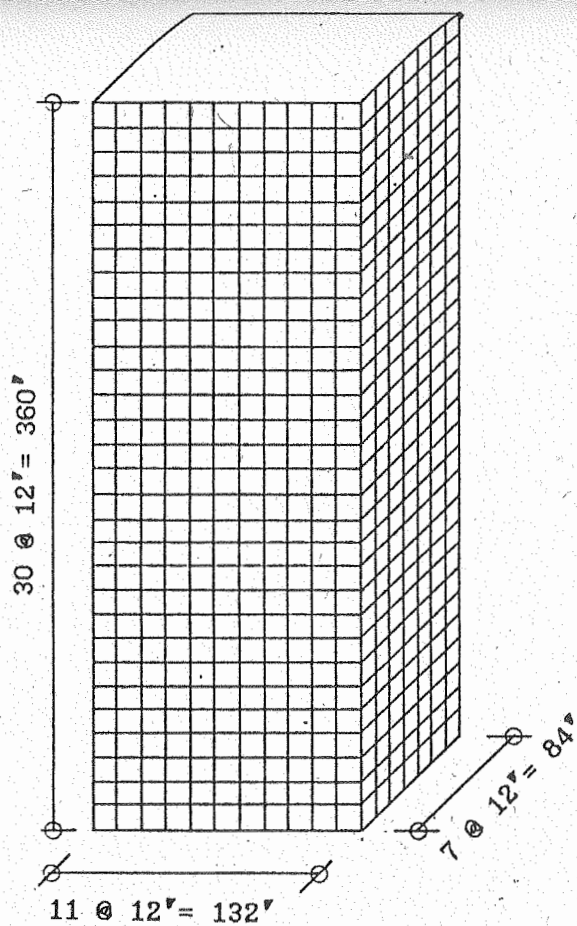
รูปที่ 14. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมการป้อนข้อมูล โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า



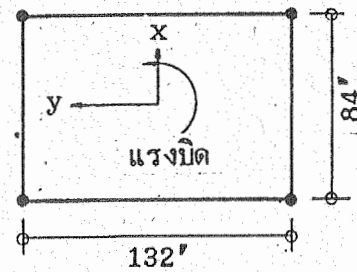
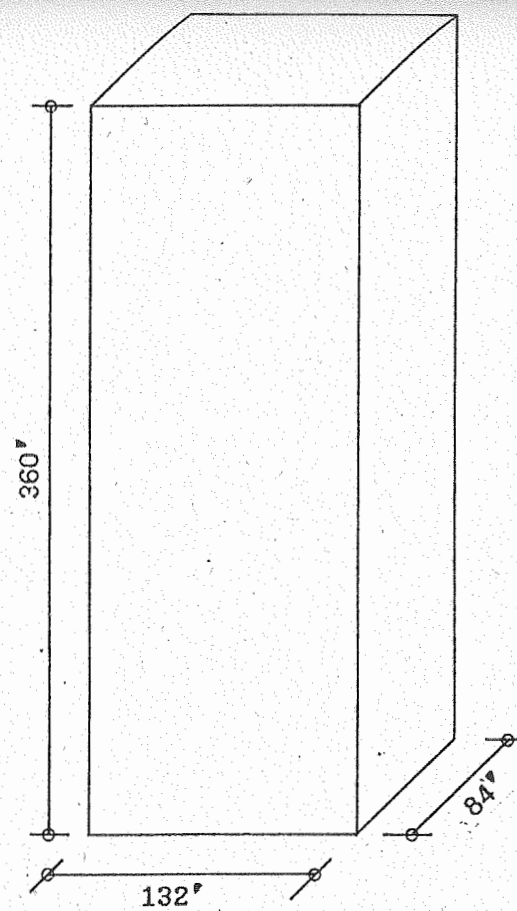
รูปที่ 15. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 16. แสดงขั้นตอนต่างๆของโปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์



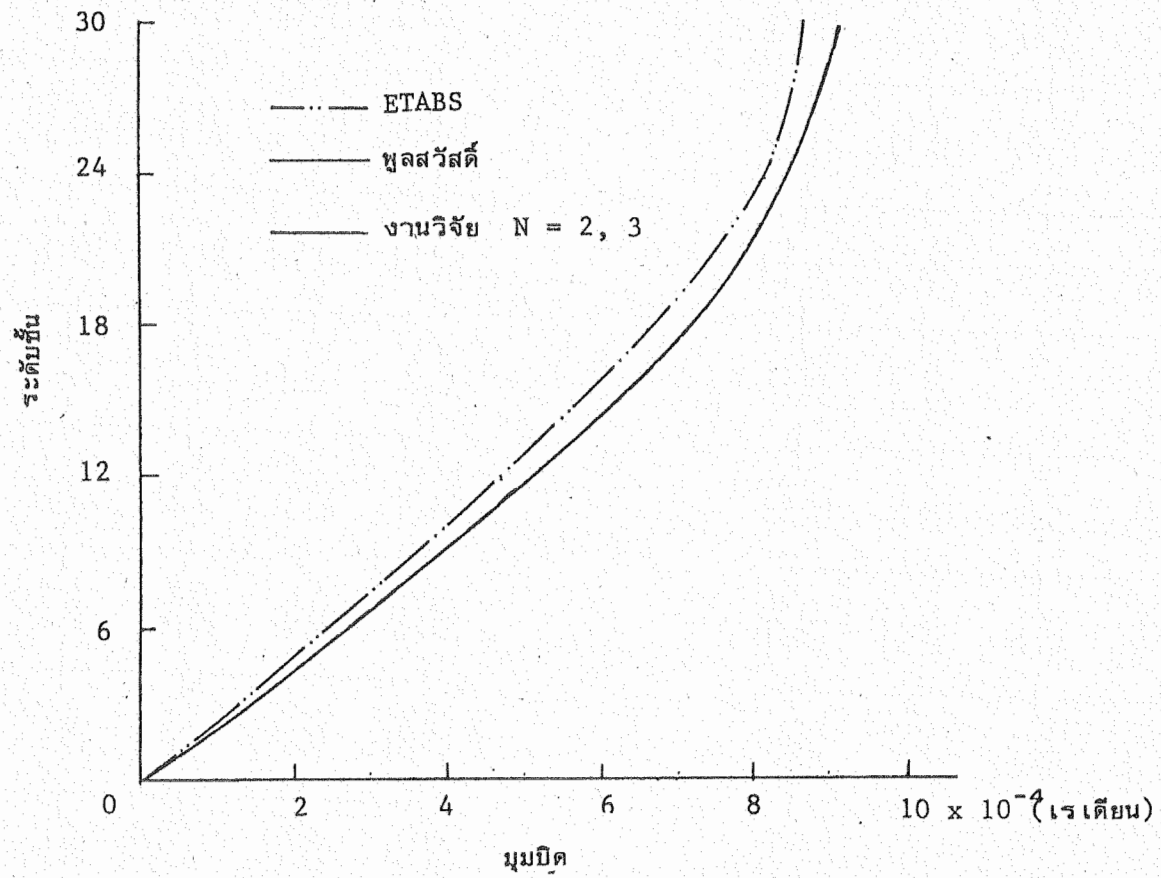
(ก)



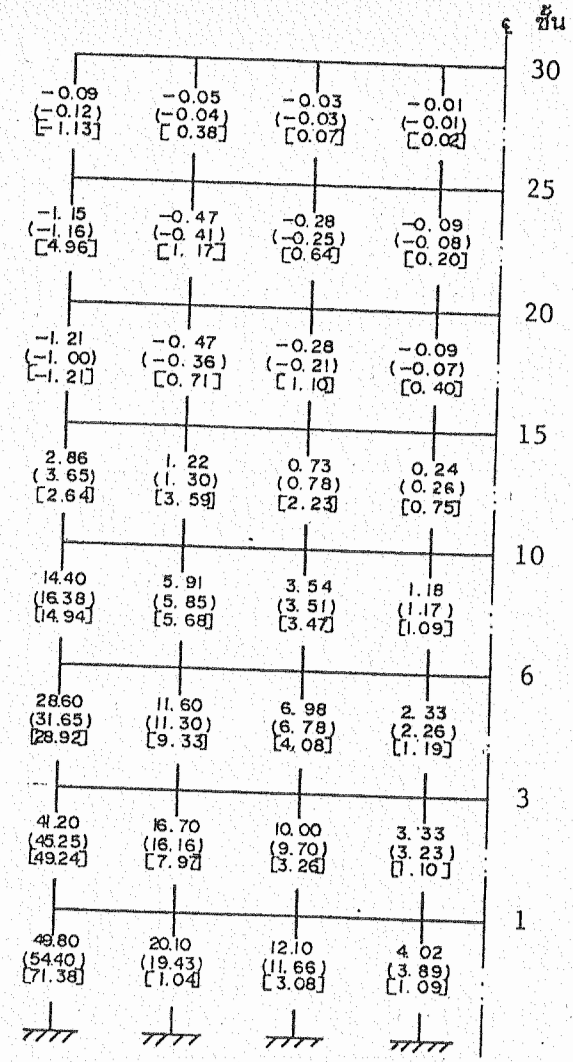
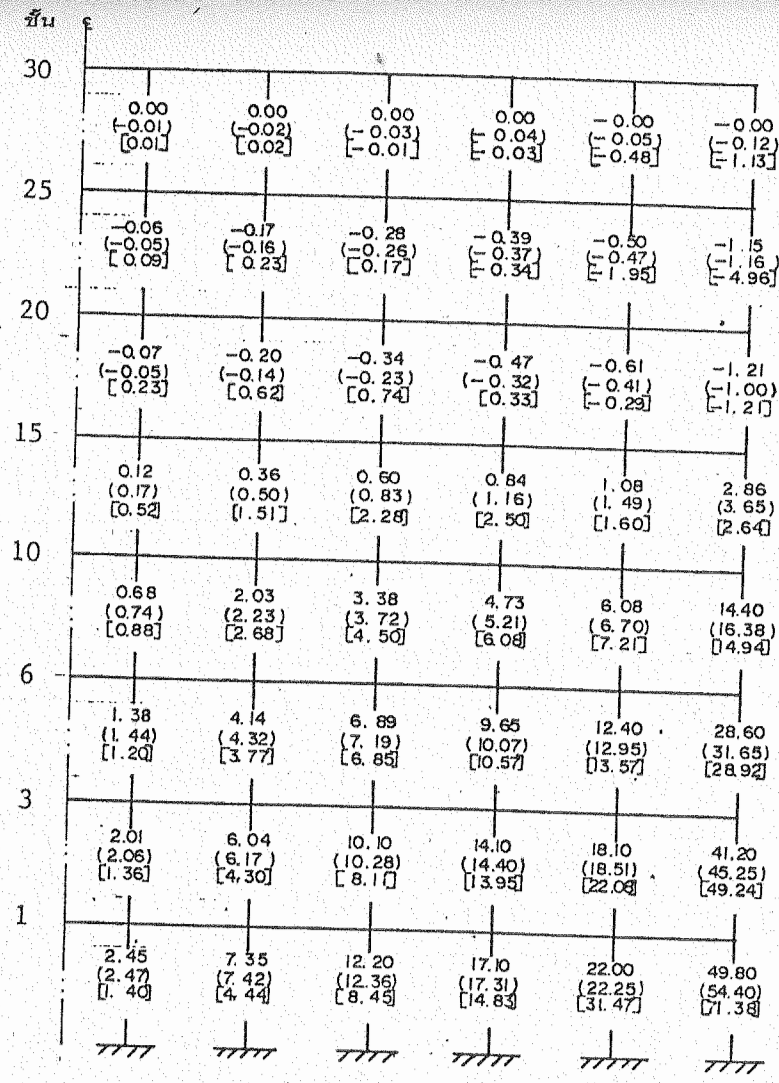
(ข)

รูปที่ 17 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นที่ทั้งหมดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)

ข. แสดงมิติและแปลนพื้นที่ทั้งหมดของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 1)

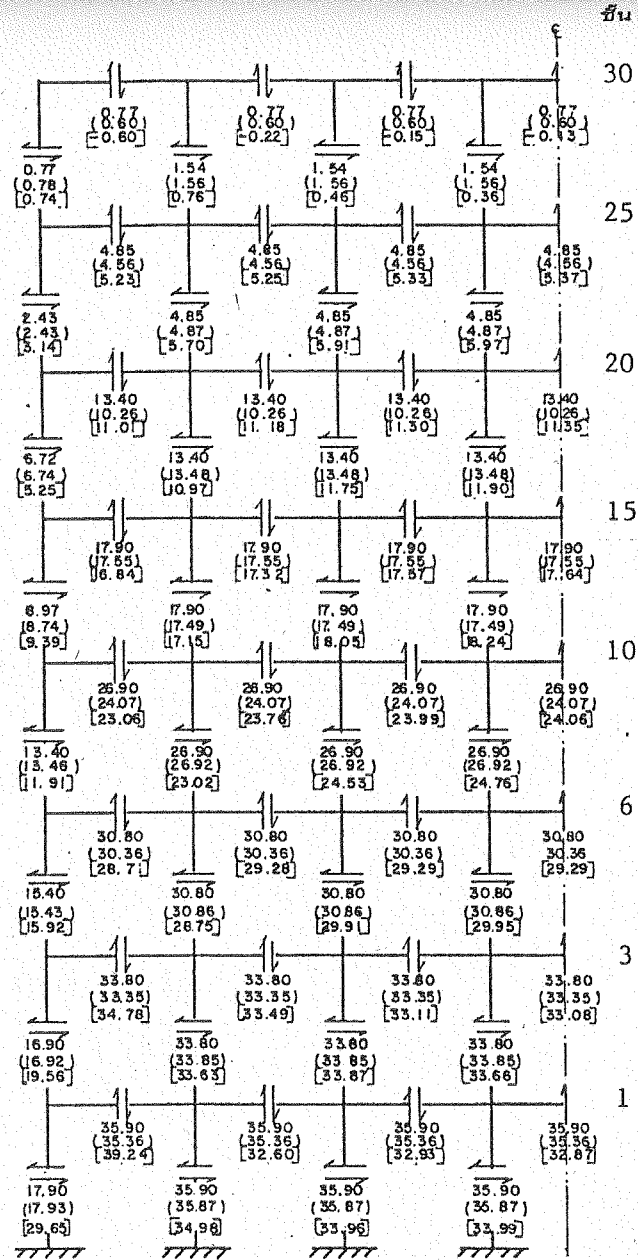
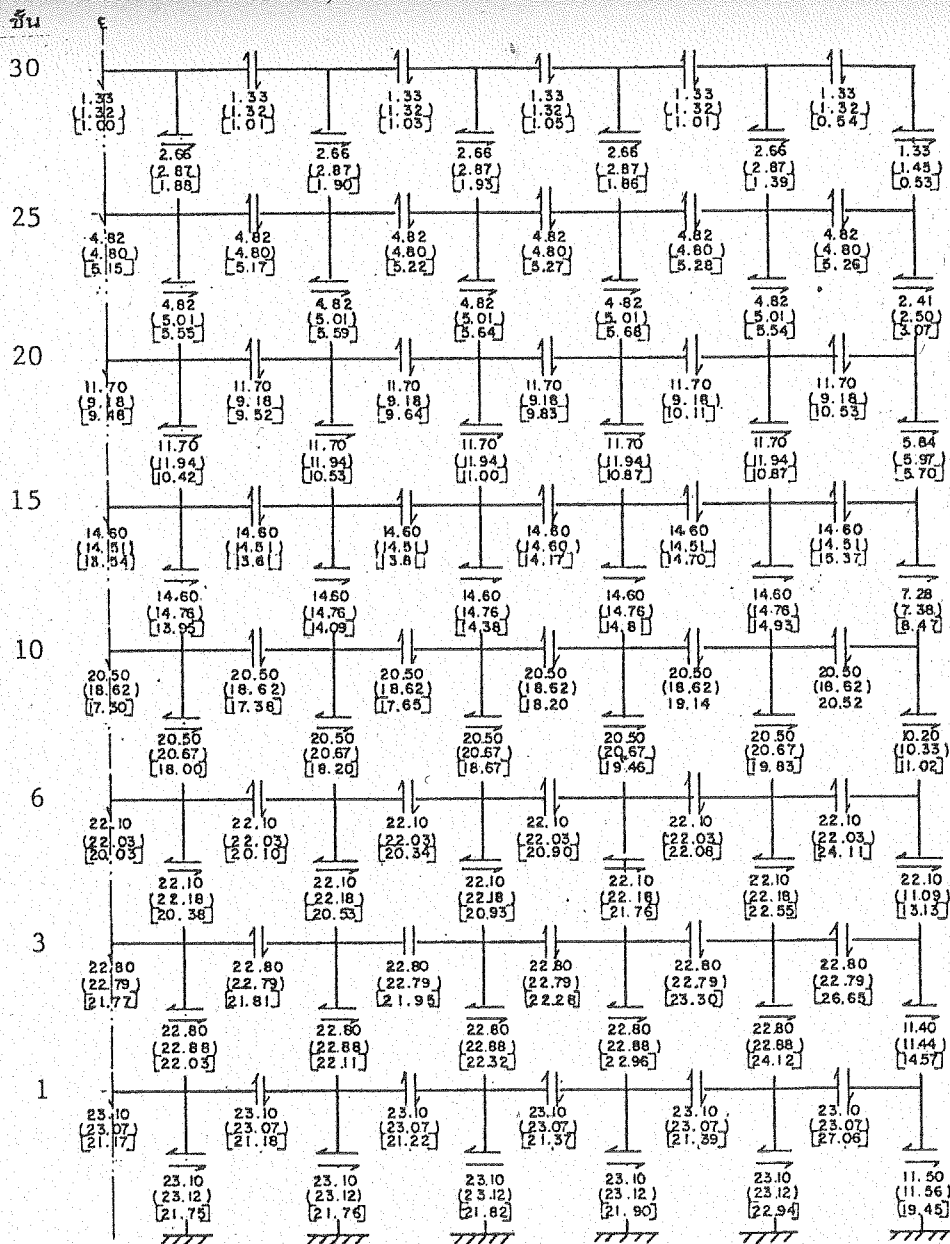


รูปที่ 18. มุมบิดที่ขึ้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 1)



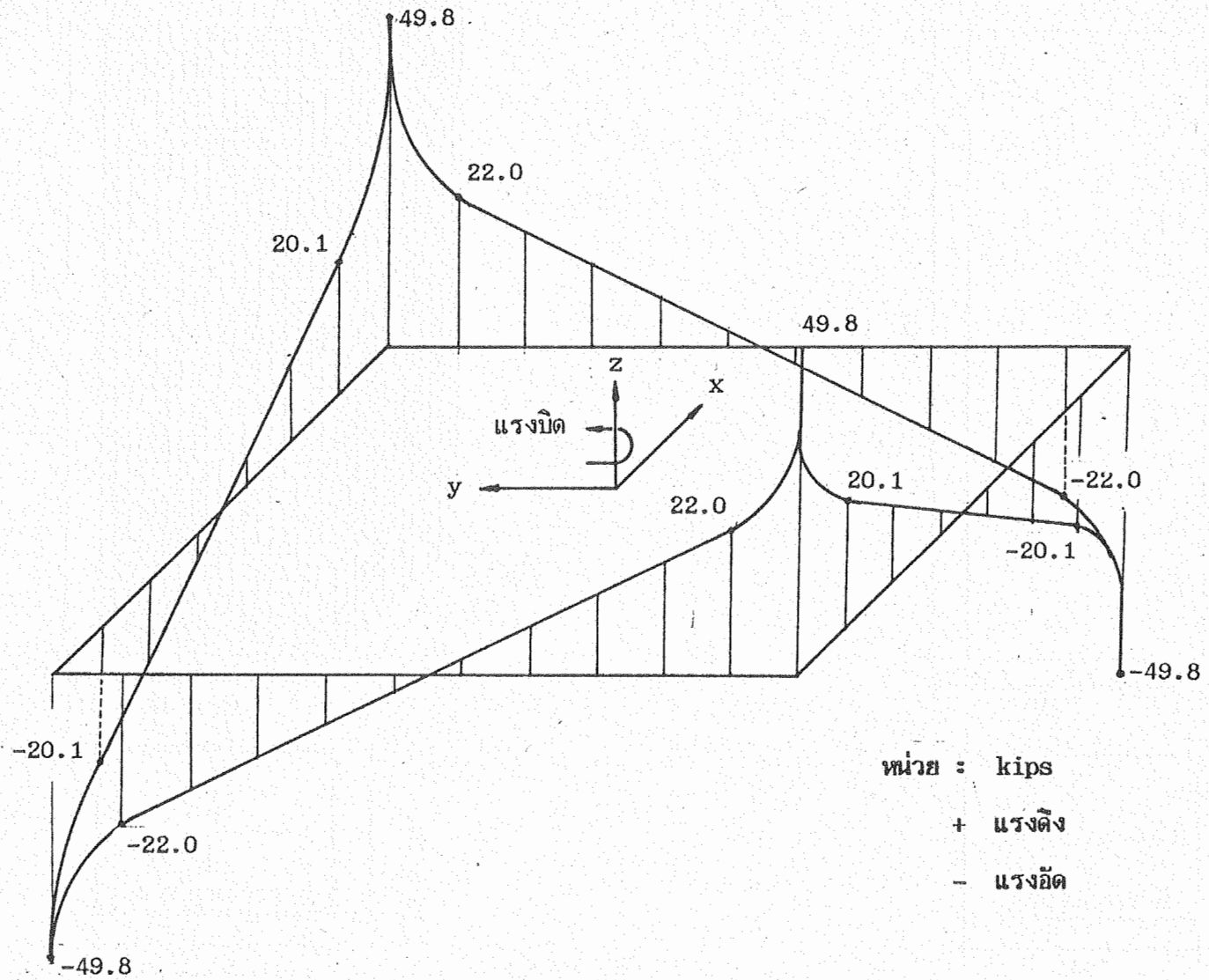
หมายเหตุ () ผลลัพธ์ของพูลลวอลล์
[] ผลลัพธ์ของ ETABS

รูปที่ 19. แรงในแนวแกนของเสาตึ้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ตัวอย่างที่ 1)

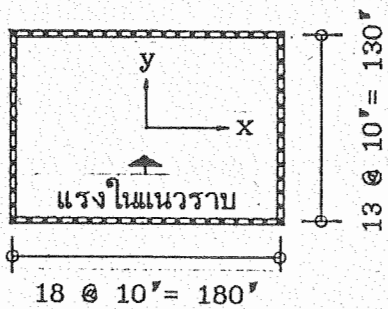
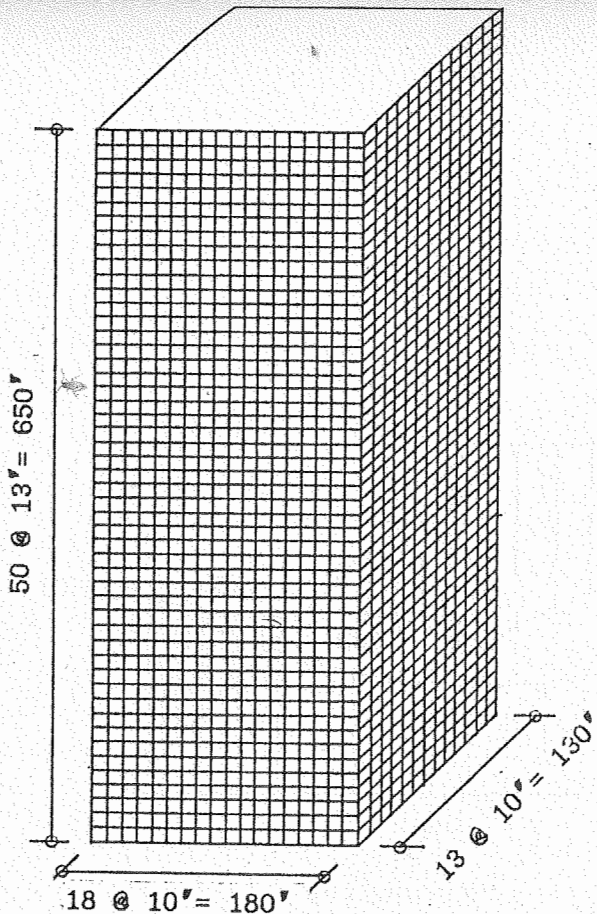


หมายเหตุ () ผลลัพธ์ของพูลพลวล์ดี
 [] ผลลัพธ์ของ ETABS

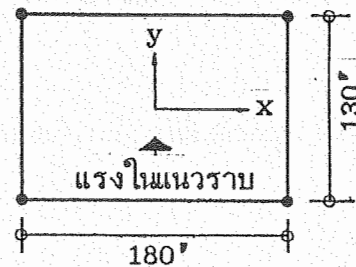
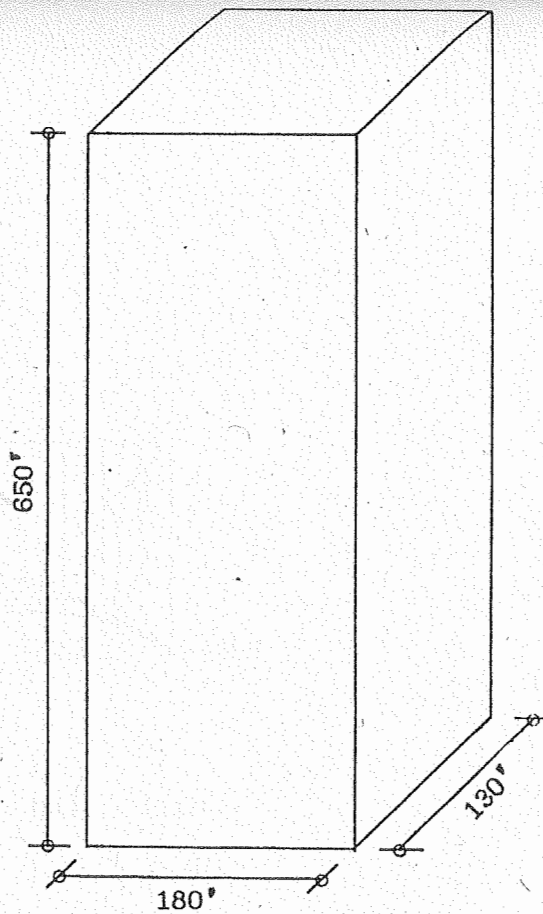
รูปที่ 20. แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ตัวอย่างที่ 1)



รูปที่ 21. แสดงการกระจายแรงในแนวแกนของเสาที่เกิดขึ้นจากแรงบิดอย่างเฉียวที่ชั้นล่างสุด (ตัวอย่างที่ 1)



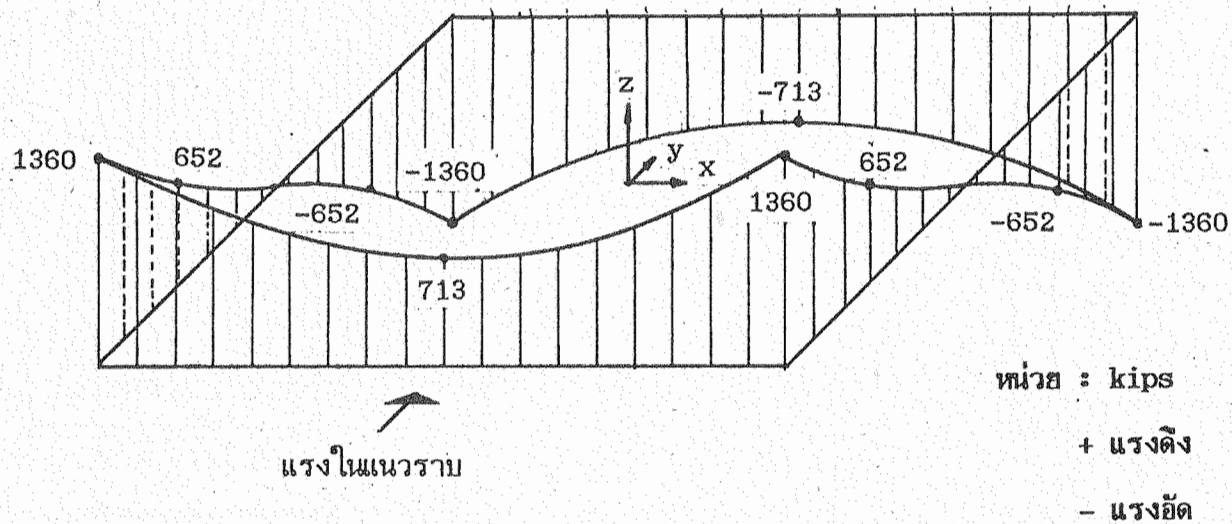
(ก)



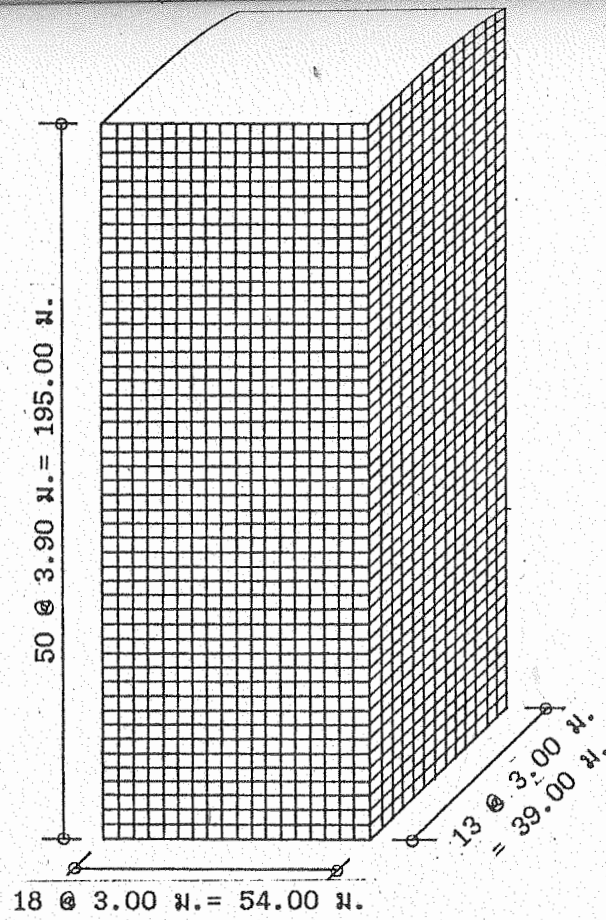
(ข)

รูปที่ 22 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นที่หน้าตัดทั่วไปของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 2)

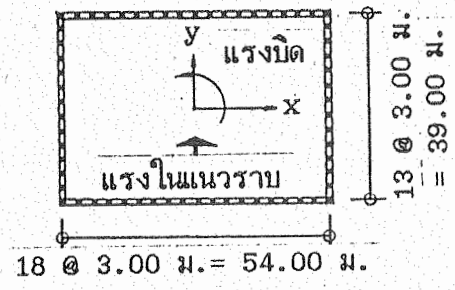
ข. แสดงมิติและแปลนพื้นที่หน้าตัดทั่วไปของกล่องเทียบเท่าออร์โทโทรปิกที่ใช้ในทฤษฎีเคาะ (ตัวอย่างที่ 2)



รูปที่ 23. แสดงการกระจายแรงในแนวแกนของเสาที่เกิดขึ้นจากแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางเดียวที่ชั้นล่างสุด (ตัวอย่างที่ 2)

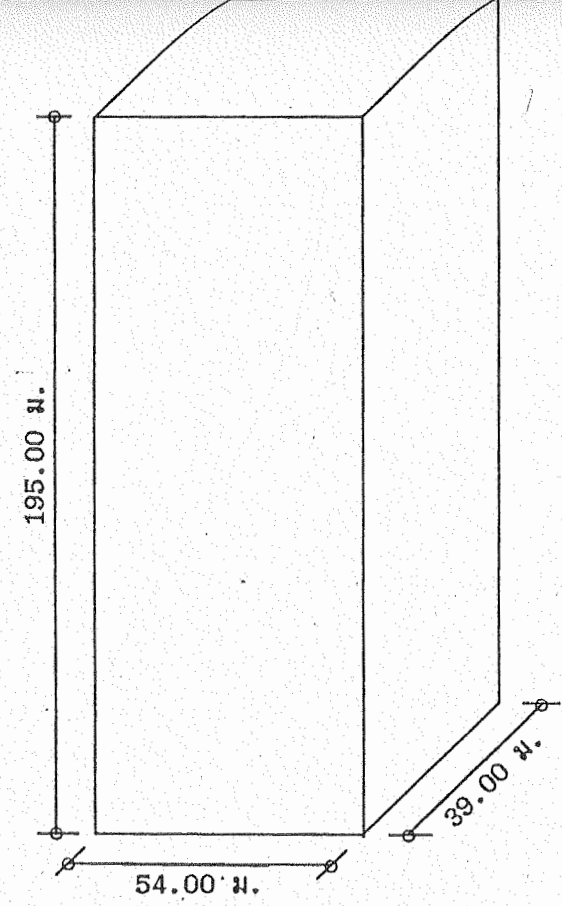


18 @ 3.00 ม. = 54.00 ม.

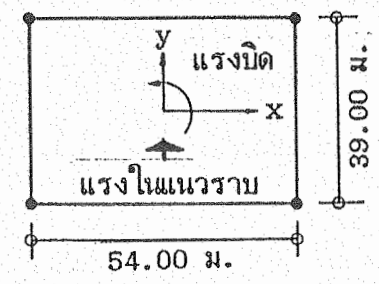


18 @ 3.00 ม. = 54.00 ม.

(ก)



54.00 ม.

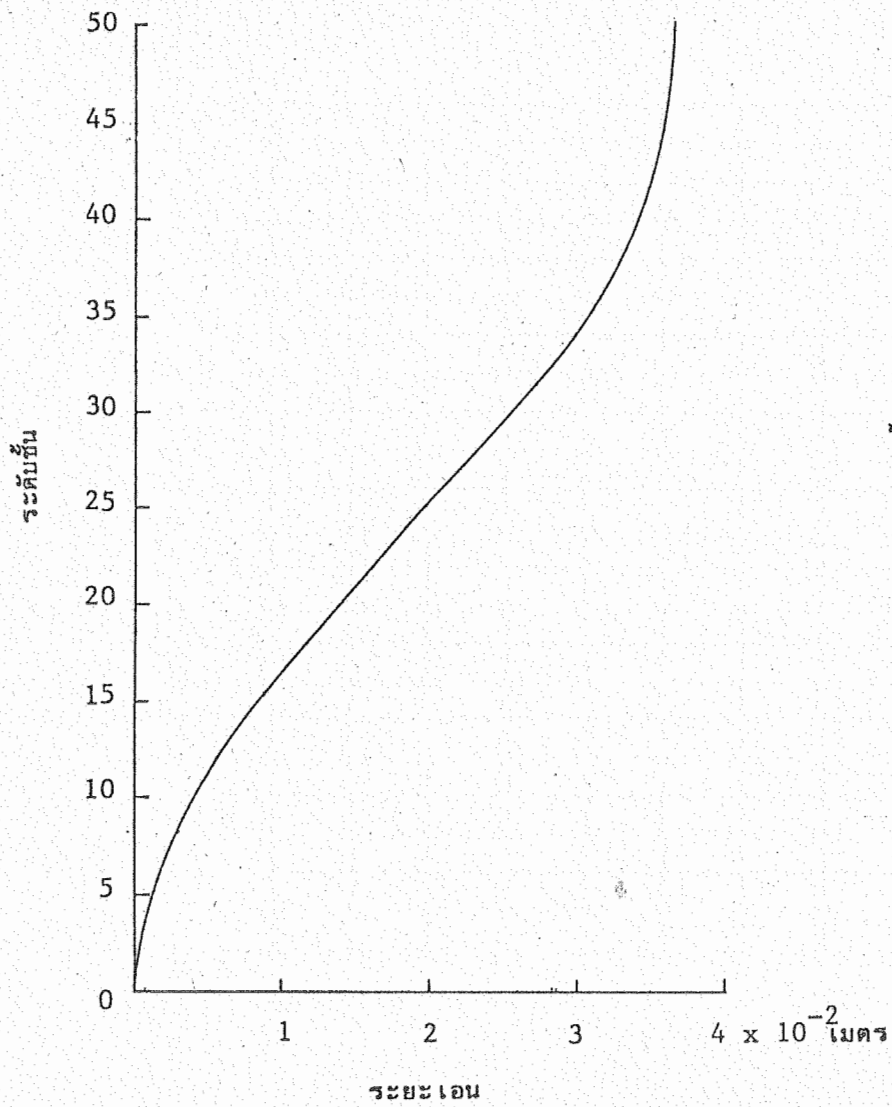


54.00 ม.

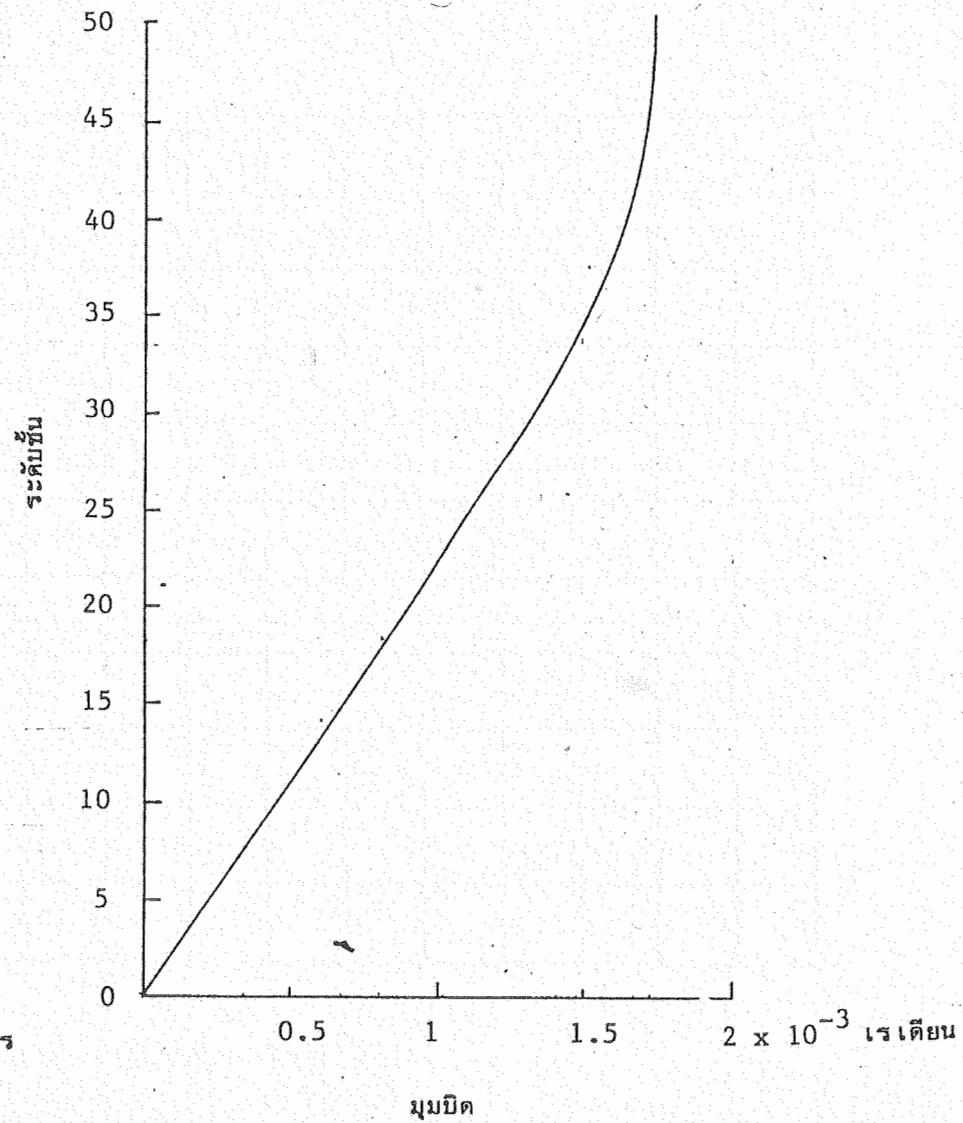
(ข)

รูปที่ 24 ก. แสดงมิติและแปลนพื้นที่ขึ้นทั่วไปของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 3)

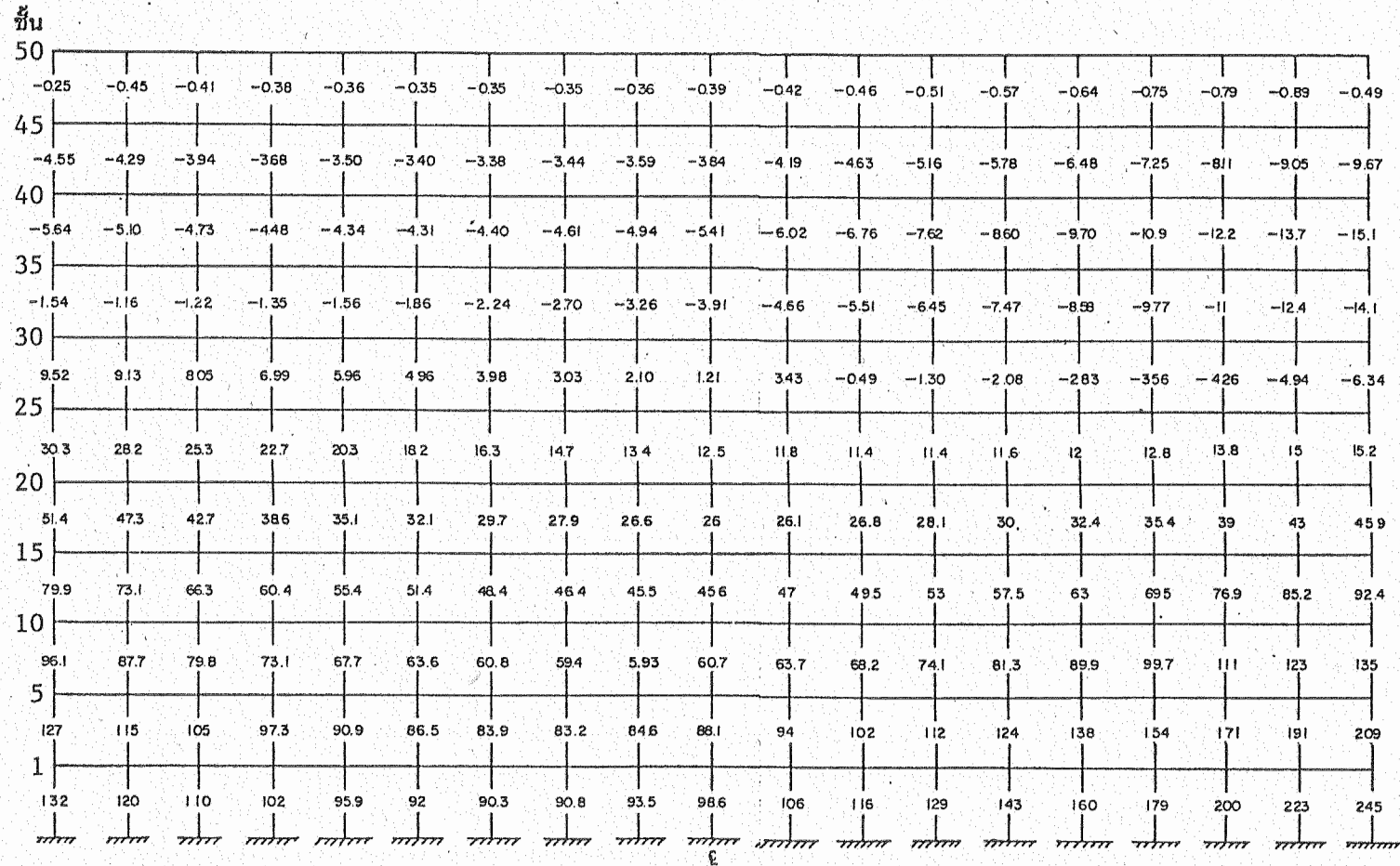
ข. แสดงมิติและแปลนพื้นที่ขึ้นทั่วไปของกล่องเทียบเท่าอโรโทรบิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 3)



รูปที่ 25. ระยะเอนที่ระดับชั้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 3)



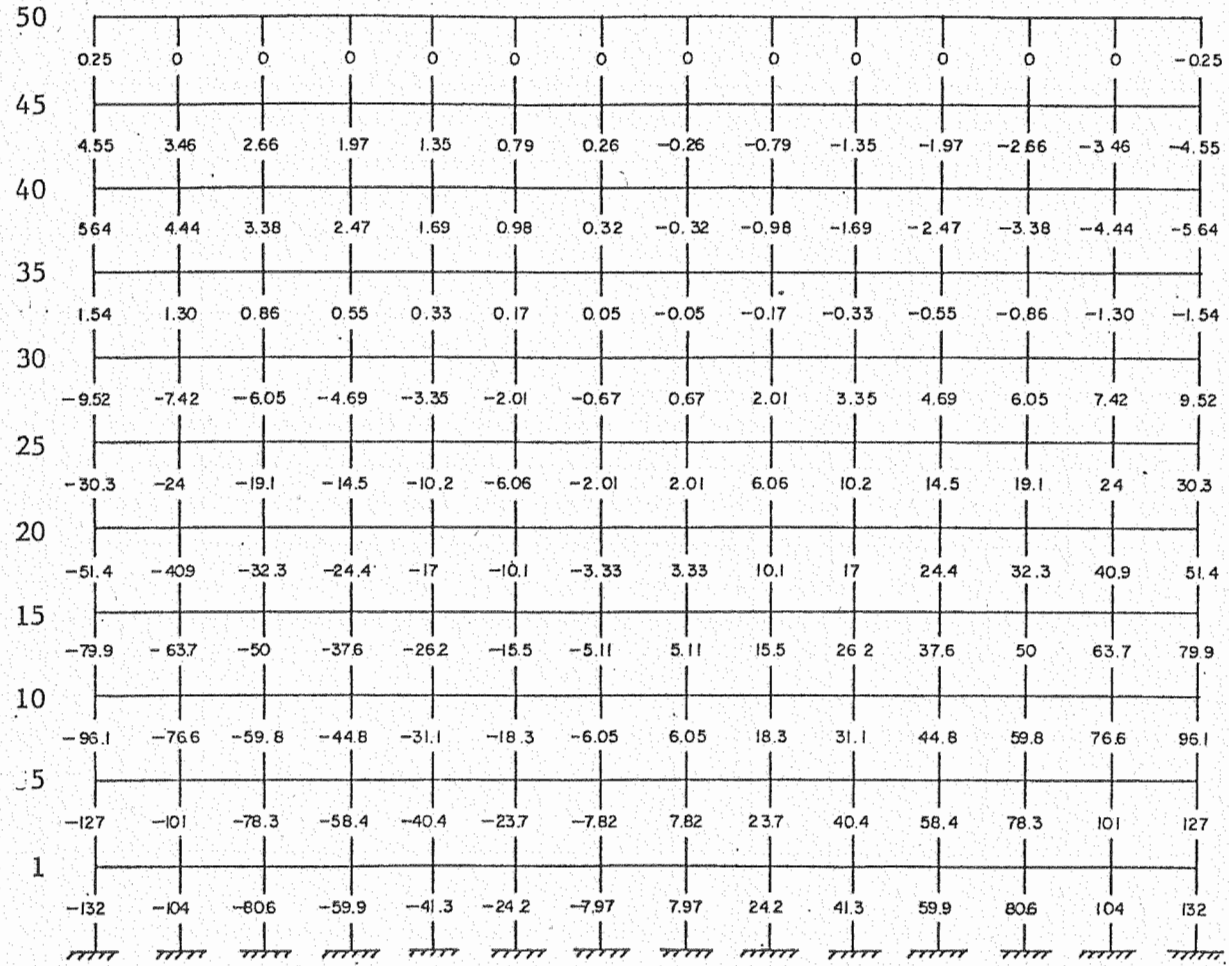
รูปที่ 26. มุมบิตที่ระดับชั้นต่างๆ (ตัวอย่างที่ 3)



หน่วย ตัน

รูปที่ 27 แรงโมเมนต์แกนของเสาในด้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 3)

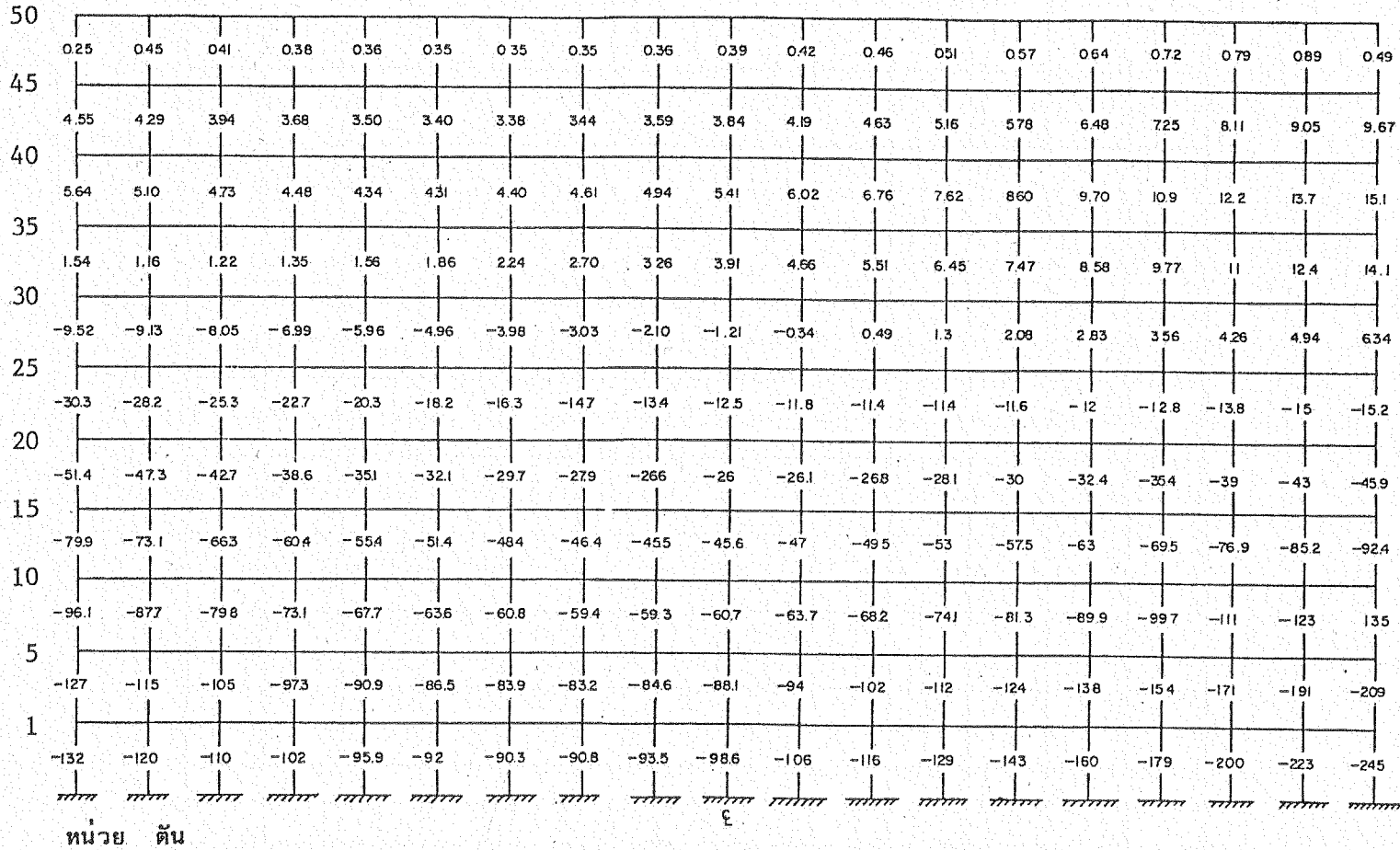
ชั้น



หน่วย ตัน

รูปที่ 28. แรงในแนวแกนของเสาชั้นที่ 2 (ตัวอย่างที่ 3)

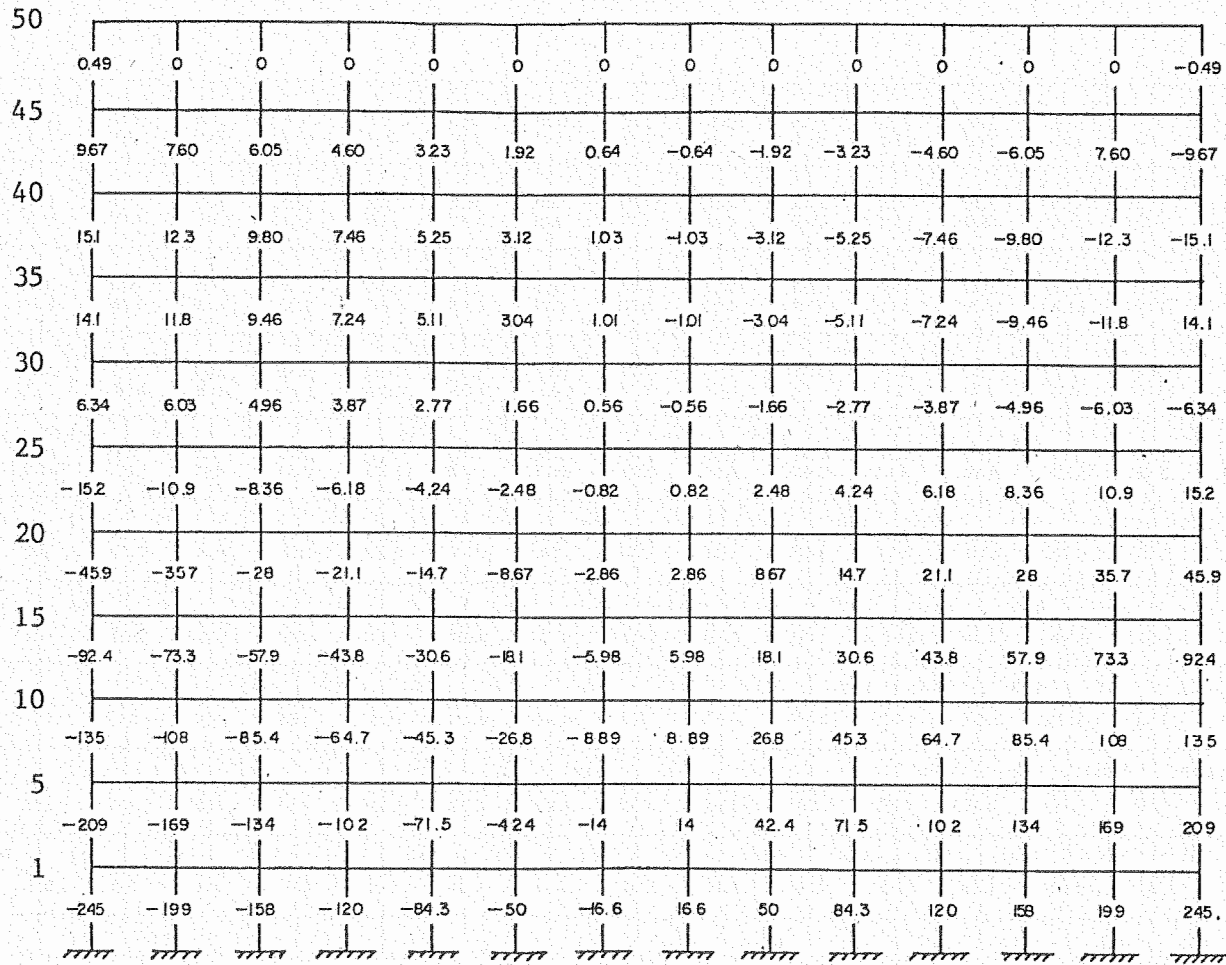
ชั้น



รูปที่ 29. แรงในแนวแกนของเสาชั้นที่ 3 (ตัวอย่างที่ 3)

วิทยาลัยเทคโนโลยี
 วิศวกรรมศาสตร์
 ภูเก็ต

ชั้น

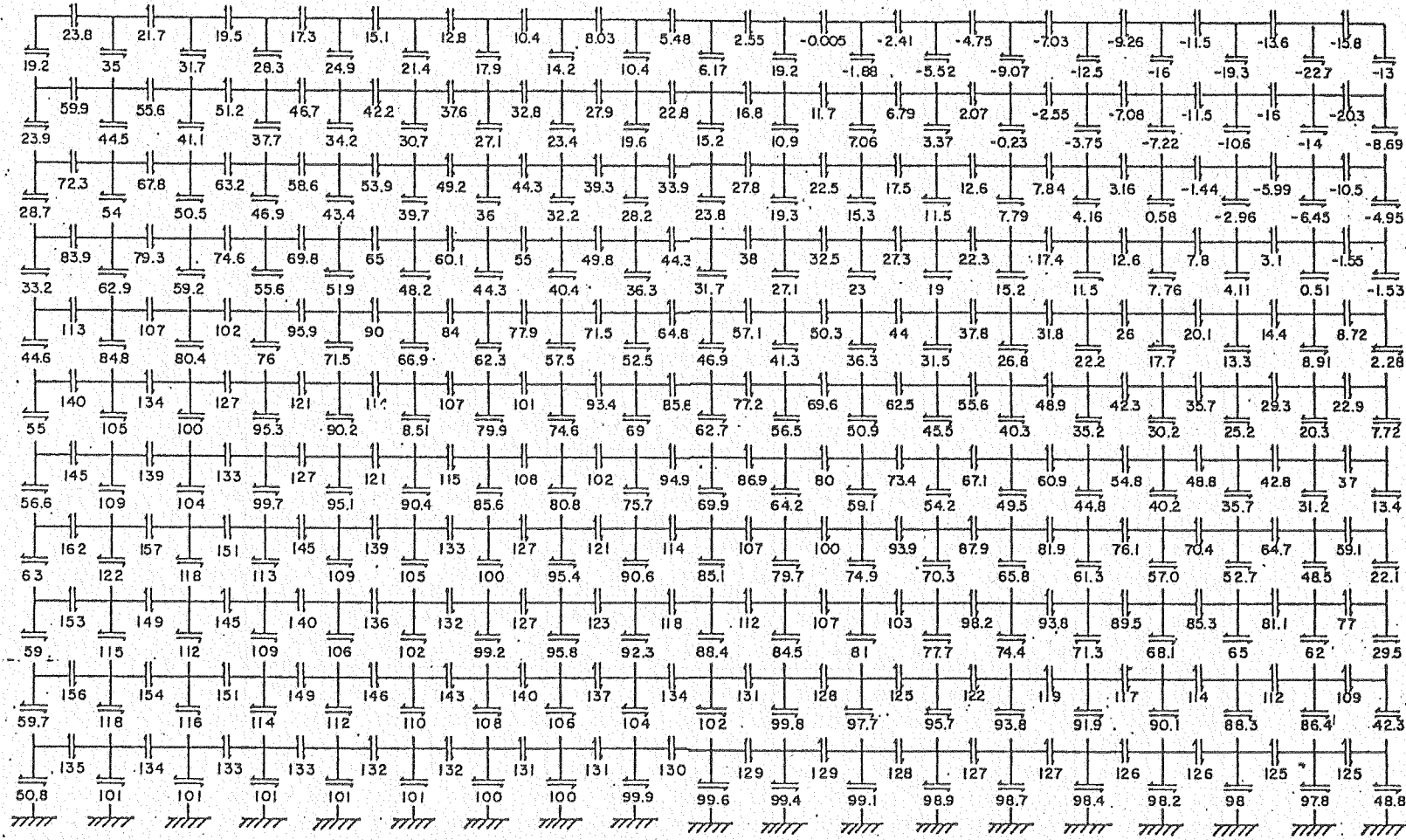


หน่วย ตัน

รูปที่ 30. แรงในแนวแกนของเสาชั้นที่ 4 (ตัวอย่างที่ 3)

ชั้น

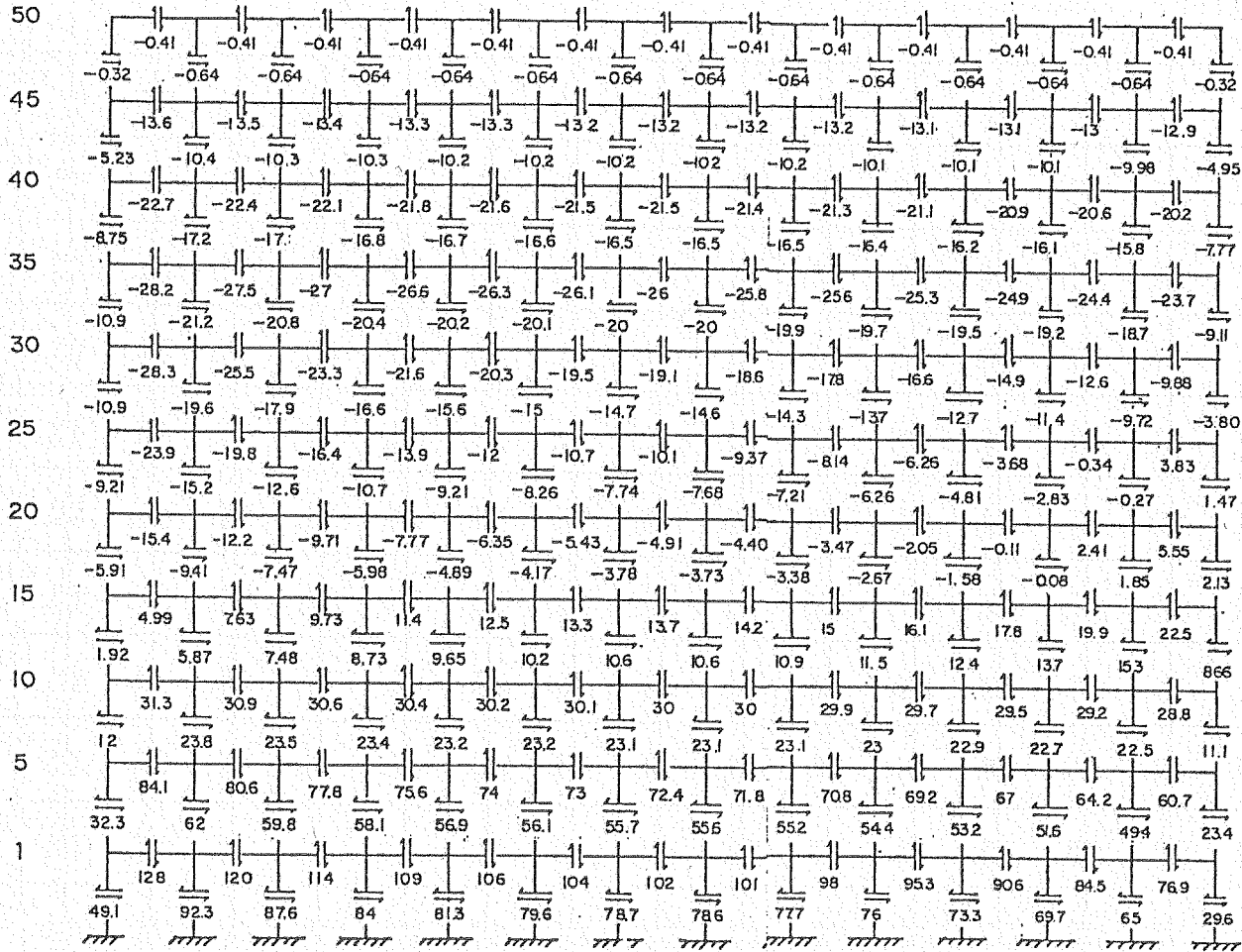
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
1



หน่วย : ตัน

รูปที่ 31. แรงเฉือนในเสาและคานของดันทที่ 1 (ตัวอย่างที่ 3)

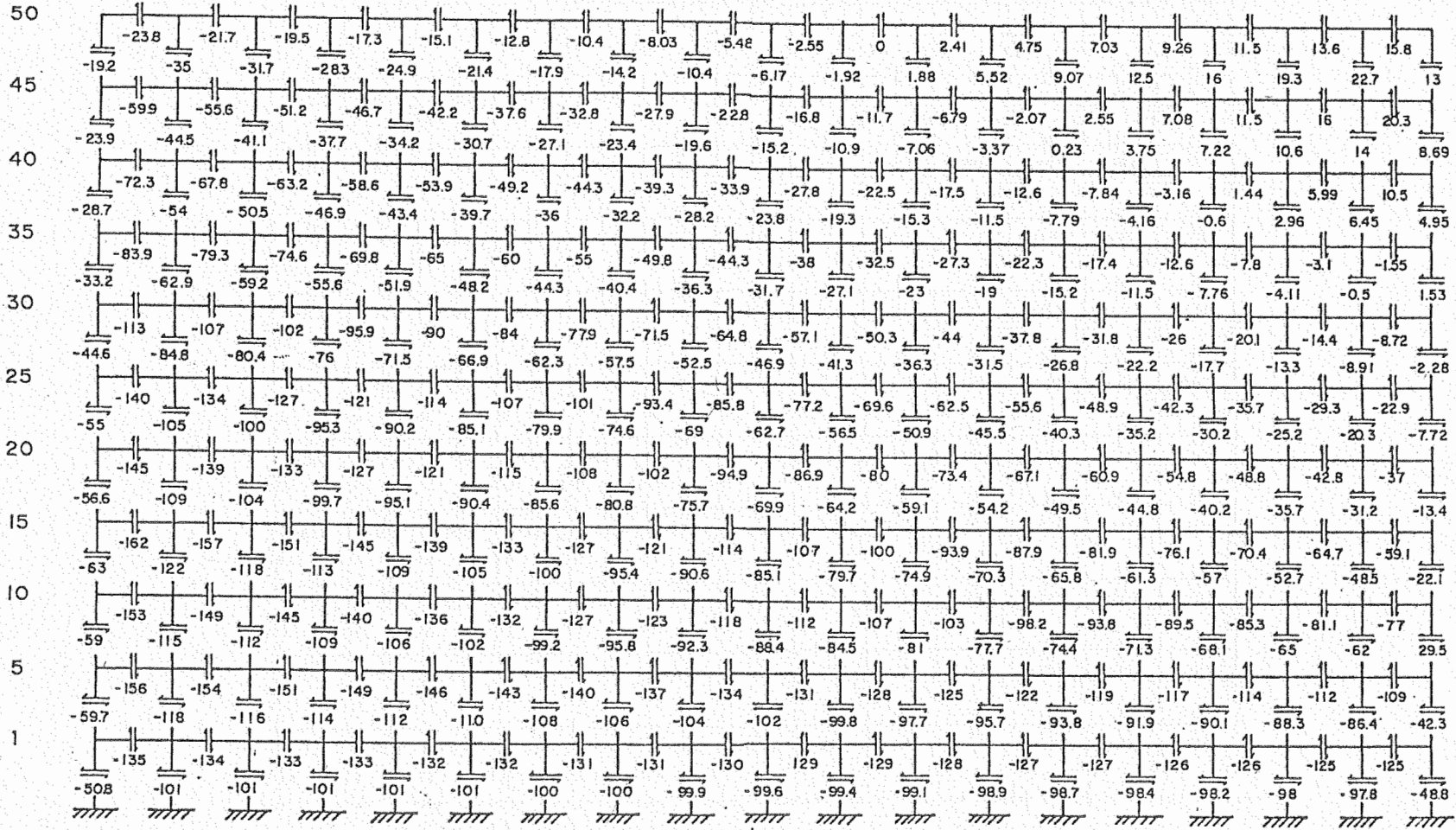
ชั้น



หน่วย : ตัน

รูปที่ 32. แรงเฉือนในเสาและคานของด้านที่ 2 (ตัวอย่างที่ 3)

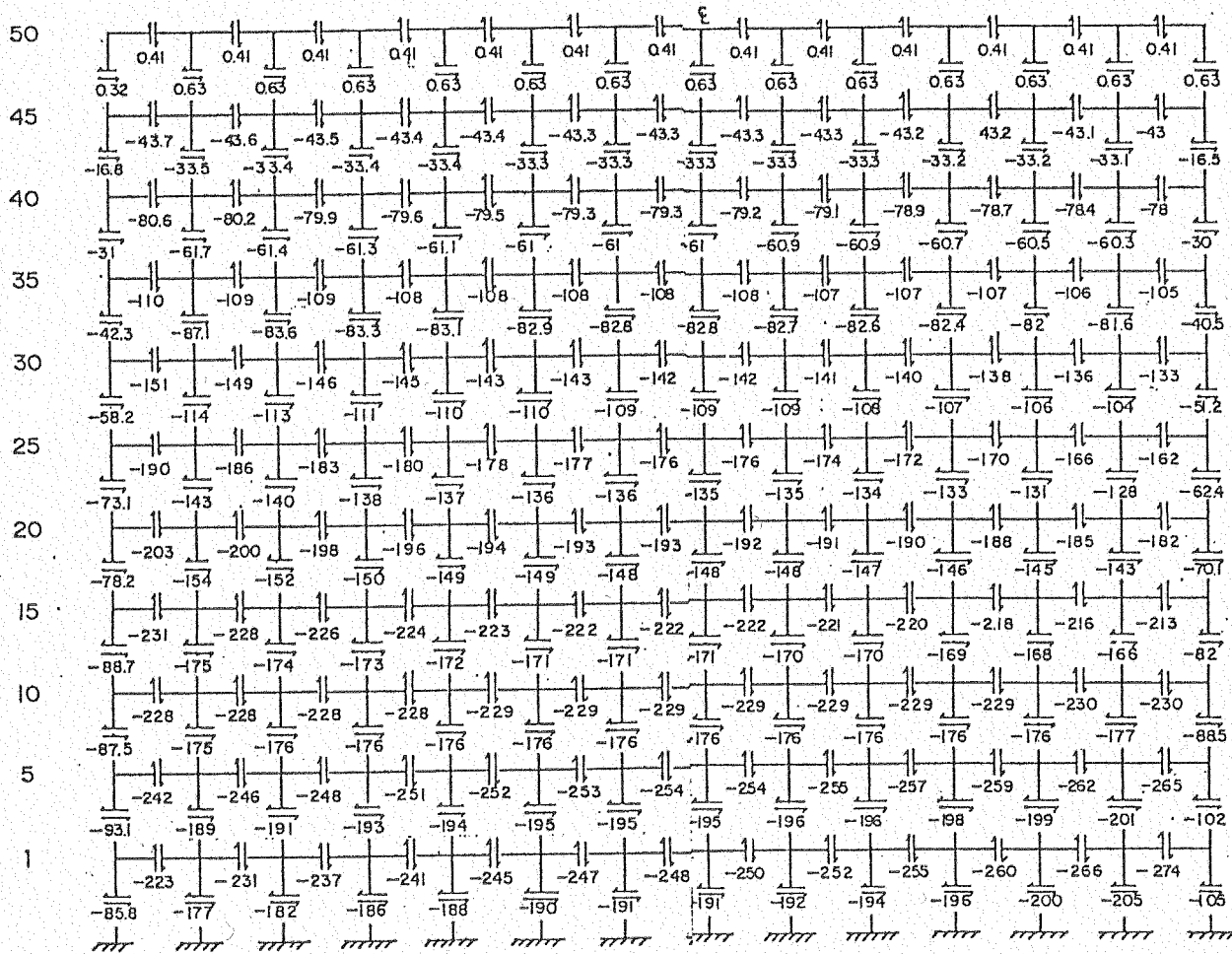
ชั้น



หน่วย : ตัน

รูปที่ 33. แรงเฉือนในเสาและคานของดาดฟ้าที่ 3 (ตัวอย่างที่ 3)

ชั้น



หน่วย : ตัน

รูปที่ 34. แรงเฉือนในเสาและคานของดันทันที่ 4 (ตัวอย่างที่ 3)

ตารางประกอบ

ตารางที่ 1. คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมแบนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)

ชั้น	เสาภายใน				เสาด้านมุม			คาน		
	d_c (ฟุต)	A_c (ตร.ฟุต)	A_{rc} (ตร.ฟุต)	I_c (ฟุต ⁴)	A_{cc} (ตร.ฟุต)	A_{rcc} (ตร.ฟุต)	I_{cc} (ฟุต ⁴)	d_b (ฟุต)	A_{rb} (ตร.ฟุต)	I_b (ฟุต ⁴)
1-10	3.40	3.40	2.83	3.28	6.80	5.67	3.56	3.60	3.00	3.68
11-20	3.20	3.20	2.67	2.73	6.40	5.33	2.92	3.40	2.83	3.28
21-30	2.80	2.80	2.33	1.83	5.60	4.67	2.06	2.80	2.33	1.83

ตารางที่ 2. คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรมิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 1)

ชั้น	ด้านที่ 1 (ด้านตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำ)			ด้านที่ 2 (ด้านขนานกับทิศของแรงกระทำ)			มุมกล่องเทียบเท่า	
	E_1 (ksf)	G_1 (ksf)	t_1 (ft.)	E_2 (ksf)	G_2 (ksf)	t_2 (ft.)	E_c (ksf)	A_{cc} (ft ²)
1-10	625,000	36,095	0.323	654,761	37,814	0.309	639,880	3.003
11-20	610,465	31,538	0.305	639,534	33,039	0.291	625,000	2.826
21-30	570,652	20,834	0.267	597,826	21,826	0.255	584,239	2.473

ตารางที่ 3. แสดงค่า Stiffness Factor และ Shear Lag Parameter (ตัวอย่างที่ 1)

ชั้น	Stiffness Factor ($12I_b h / A_c d^3$)	Shear Lag Parameter (G_{zs} / E_z)
1-10	0.10	0.058
11-20	0.08	0.052
21-30	0.05	0.036

ตารางที่ 4. แสดงค่ามุมบิดที่จุดยอดสุดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 1)

มุมบิดที่จุดยอดสุด (1×10^{-4} เรเดียน)				งานวิจัย ETABS (N=3)
ETABS	ผลส่วสต์	งานวิจัย (N=2)	งานวิจัย (N=3)	
8.60	9.00	9.09	9.09	1.056

ตารางที่ 5. โมเมนต์ตัดของเสาต้นมุมของด้านที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1)

ชั้น	โมเมนต์ปลายบน			โมเมนต์ปลายล่าง		
	ETABS	พูลส์วิสต์	งานวิจัยนี้ (N=3)	ETABS	พูลส์วิสต์	งานวิจัยนี้ (N=3)
30	-2.82	3.59	3.54	3.94	-3.59	-3.54
25	16.05	11.18	11.18	-12.83	-11.18	-11.18
20	22.57	30.00	28.90	-23.06	-30.00	-28.90
15	42.31	37.58	38.57	-39.37	-37.58	-38.57
10	49.75	56.53	56.28	-50.26	-56.53	-56.28
6	68.04	64.81	64.68	-65.69	-64.81	-64.68
3	82.22	71.06	70.98	-82.04	-71.06	-70.98
1	83.73	75.31	75.18	-165.31	-107.58	-107.40

ตารางที่ 6. คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ตัวอย่างที่ 2)

ชั้น	เสากลางใน				เสาด้านมุม			คาน			Stiffness
	d_c (ฟุต)	A_c (ตร.ฟุต)	A_{rc} (ตร.ฟุต)	I_c (ฟุต ⁴)	A_{cc} (ตร.ฟุต)	A_{rcc} (ตร.ฟุต)	I_{cc} (ฟุต ⁴)	d_b (ฟุต)	A_{rb} (ตร.ฟุต)	I_{b^4} (ฟุต ⁴)	Factor
1-5	1.073	6.750	5.625	22.280	6.750	5.625	22.280	5.080	8.420	21.800	0.530
6-20	0.829	5.625	4.690	21.557	5.625	4.690	21.557	5.080	6.940	17.940	0.525
21-25	0.730	4.979	4.149	19.290	4.979	4.149	19.290	5.000	6.125	15.910	0.525
26-35	0.610	4.271	3.560	17.506	4.271	3.560	17.506	5.000	5.440	13.600	0.520
36-50	0.500	3.542	2.950	14.805	3.542	2.950	14.805	5.000	4.360	11.285	0.520

หมายเหตุ Aspect Ratio เป็นอัตราส่วนความยาวของด้านตั้งฉากต่อด้านขนานกับทิศของแรงกระทำด้านข้าง
(Aspect Ratio = 1.385)

ตารางที่ 7. คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โธทโรดที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 2)

ชั้น	ด้านที่ 1 (ด้านตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำ)			ด้านที่ 2 (ด้านขนานกับทิศของแรงกระทำ)			มุมกล่องเทียบเท่า	
	E_1 (ksf)	G_1 (ksf)	t_1 (ft.)	E_2 (ksf)	G_2 (ksf)	t_2 (ft.)	E_c (ksf)	A_{cc} (ft ²)
	1-5	821,536	130,560	0.675	821,536	130,560	0.675	-
6-20	821,018	141,766	0.563	821,018	141,766	0.563	-	-
21-25	822,576	142,856	0.498	822,576	142,856	0.498	-	-
26-35	812,398	146,522	0.427	812,398	146,522	0.427	-	-
36-50	820,707	148,948	0.354	820,707	148,948	0.354	-	-

ตารางที่ 9. การเปรียบเทียบผลรวมของแรงเฉือนในคาน 5 ชั้นแรกด้านที่ 2 (ตัวอย่างที่ 2)

ผลรวมของแรงเฉือนในคาน 5 ชั้นแรก (Kips) ของด้านที่ 2					งานวิจัยนี้ (N=3)
ตำแหน่งคาน	Actual	KHAN	สุ่มรวม	งานวิจัยนี้ (N=3)	Actual
1	1,954	2,340	2,313	2,295	1.17
2	2,257	2,620	2,570	2,511	1.11
3	2,450	2,750	2,768	2,684	1.09
4	2,565	2,810	2,914	2,818	1.09
5	2,640	2,850	3,013	2,915	1.10
6	2,690	2,850	3,048	2,978	1.11
7	2,700	2,850	3,065	3,013	1.12

ตารางที่ 10. คุณสมบัติชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมแบนผ้า (ตัวอย่างที่ 3)

ชั้น	เสากลางใน				เสาด้านมุม			คาน			S.F.	S.L.
	d_c (ม.)	A_c (ตร.ม.)	A_{rc} (ตร.ม.)	I_c (ม ⁴)	A_{cc} (ตร.ม.)	A_{rcc} (ตร.ม.)	I_{cc} (ม ⁴)	d_b (ม.)	A_{rb} (ตร.ม.)	I_b (ม ⁴)		
1-5	0.32	0.61	0.51	0.180	0.61	0.51	0.180	1.50	0.76	0.177	0.530	0.160
6-20	0.25	0.51	0.43	0.175	0.51	0.43	0.175	1.50	0.63	0.145	0.525	0.166
21-25	0.22	0.45	0.38	0.156	0.45	0.38	0.156	1.50	0.55	0.129	0.525	0.166
26-35	0.18	0.38	0.32	0.142	0.38	0.32	0.142	1.50	0.49	0.110	0.520	0.172
36-50	0.15	0.32	0.27	0.119	0.32	0.27	0.119	1.50	0.39	0.090	0.520	0.169

หมายเหตุ S.F. = Stiffness Factor

S.L. = Shear Lag Parameter

ตารางที่ 11. คุณสมบัติต่างๆของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ตัวอย่างที่ 3)

ชั้น	ด้านที่ 1 (ด้านตั้งฉากกับทิศของแรงกระทำ)			ด้านที่ 2 (ด้านขนานกับทิศของแรงกระทำ)			มุกกล่องเทียบเท่า	
	E_1 (ตัน/ตร.ม.)	G_1 (ตัน/ตร.ม.)	t_1 (ม.)	E_2 (ตัน/ตร.ม.)	G_2 (ตัน/ตร.ม.)	t_2 (ม.)	E_c (ตัน/ตร.ม.)	A_{cc} (ตร.ม.)
1-5	3,737,500	599,721	0.203	3,737,500	599,721	0.203	—	—
6-20	3,737,500	623,387	0.170	3,737,500	623,387	0.170	—	—
21-25	3,737,500	623,937	0.150	3,737,500	623,937	0.150	—	—
26-35	3,737,500	642,050	0.127	3,737,500	642,050	0.127	—	—
36-50	3,737,500	632,744	0.107	3,737,500	632,744	0.107	—	—

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิธีการหาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

ก.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

พิจารณาหน่วยของโครงข้อแข็งภายใต้แรงกระทำในแนวแกน P (รูปที่ 5) ดังนั้นค่าการเคลื่อนที่ในแนวแกน Δ_{ap} (ไม่พิจารณา Deformation ของจุดต่อในส่วนที่ 2) จะได้ว่า

$$\Delta_{ap} = P(h-d_b) / (A_c E) \quad (ก.1.1)$$

โดยที่ h = ความสูงของชิ้น

d_b = ความลึกของคาน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของเสา

E = โมดูลัสยืดหยุ่นขององค์อาคารของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สำหรับผนังบางเทียบเท่า (เส้นประในรูปที่ 5) ที่มีขนาด h x d x t

การเคลื่อนที่ในแนวแกนของผนังบางเทียบเท่า Δ_{ap} จะสามารถหาได้ว่า

$$\Delta_{ap} = Ph / (tdE_z) \quad (ก.1.2)$$

โดยที่ d = ระยะห่างของช่วงเสา

t = ความหนาของผนังบางเทียบเท่า หาได้จากการเทียบเท่าพื้นที่หน้าตัดของผนังบางเทียบเท่า กับพื้นที่หน้าตัดของเสาของท่อน

โครงข้อแข็ง

เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก สมการ (ก.1.1)

เท่ากับสมการ (ก.1.2) ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_z = EA_c / [(1-d_b/h)td] \quad (ก.1.3)$$

โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเสาต้นมุมใหญ่กว่าเสารอบนอกที่อยู่ภายใน

โดยที่พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของเสาต้นมุมจะเป็นส่วนหนึ่งของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก A_{CP}

ดังนั้นพื้นที่ส่วนนี้ถือว่ารับแรงในแนวแกนและแรงเฉือนเท่านั้น จะได้ว่า

$$A_{CP} = 0.5(t_1 d_1 + t_2 d_2) \quad (ก.1.4)$$

โดยที่ t_1, t_2 = ความหนาของผนังบางเทียบเท่าของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

d_1, d_2 = ระยะห่างช่วงเสาของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ดังนั้น พื้นที่ของเสาต้นมุมที่เหลือ A_{cc}^* ซึ่งรับแรงในแนวแกนอย่างเดี่ยวย สามารถหาได้ว่า

$$A_{cc}^* = A_{cc} - A_{cp} \quad (ก.1.5)$$

ที่ซึ่ง $A_{cc} =$ พื้นที่หน้าตัดของเสาต้นมุมของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป เนื่องจากความแตกต่างขององค์อาคารของด้านที่ 1 และ 2 ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นของมุมกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก E_c สามารถหาได้จาก

$$E_c = (E_1 + E_2)/2 \quad (ก.1.6)$$

ที่ซึ่ง $E_1, E_2 =$ โมดูลัสยืดหยุ่นของด้านที่ 1 และ 2 ของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิกตามลำดับ

ก.2 โมดูลัสของการเฉือนของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

พิจารณาหน่วยของโครงข้อแข็งภายใต้แรงกระทำ Q (รูปที่ 6) ทำให้หน่วยของโครงข้อแข็งมีการเคลื่อนที่ Δ_{1f} ซึ่งเป็นผลบวกที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการตัดและการเฉือนขององค์อาคาร เขียนในรูปของสมการจะได้ว่า

$$\Delta_{1f} = \Delta_b + \Delta_v \quad (ก.2.1)$$

ที่ซึ่ง $\Delta_b, \Delta_v =$ การเคลื่อนที่ของหน่วยโครงข้อแข็งเนื่องจากผลของการตัดและการเฉือนขององค์อาคาร

โดยอาศัยวิธีการ Virtual Force และ ไม่คำนึงถึง Deformation ของจุดต่อจะได้ว่า

$$\Delta_{1f} = \frac{Qh}{E} \left[\frac{(h-d_b)^3}{12hI_c} + \frac{h(d-d_c)^3}{12d^2I_b} \right] + \frac{Qh}{G} \left[\frac{h(d-d_c)}{d^2A_{rb}} + \frac{h-d_b}{hA_{rc}} \right] \quad (ก.2.2)$$

ที่ซึ่ง $I_b, I_c =$ โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดคานและเสาตามลำดับ

$A_{rb}, A_{rc} =$ Effective Shear Area ของคานและเสาตามลำดับ

$d_c =$ ด้านยาวของหน้าตัดเสา

$G =$ โมดูลัสของการเฉือนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พิจารณามุมบางเทียบเท่า (เส้นประในรูปที่ 6) ซึ่งมีขนาด $h \times d \times t$

การเคลื่อนที่เนื่องจากแรง Q (รูปที่ 6) เป็น Δ_{1p} ซึ่งหาได้ว่า

$$\Delta_{1p} = Qh / (G_{zs} td) \quad (\text{ก.2.3})$$

ที่ซึ่ง G_{zs} = โมดูลัสของการเฉือนของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก

เพื่อหาค่าโมดูลัสของการเฉือนของกล่องเทียบเท่าออร์โททรอปิก สมการ(ก.2.2)

เท่ากับสมการ (ก.2.3) ดังนั้นจะได้ว่า

$$G_{zs} = E / (tdC_{zs}) \quad (\text{ก.2.4})$$

$$\text{ที่ซึ่ง } C_{zs} = \frac{(h-d_b)^3}{12hI_c} + \frac{h(d-d_c)^3}{12d^2I_b} + \frac{E}{G} \left[\frac{h(d-d_c)}{d^2A_{rb}} + \frac{h-d_c}{hA_{rc}} \right] \quad (\text{ก.2.5})$$

ภาคผนวก ข

ข.1 วิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดในรูปแรงบิดเดี่ยวที่จุดยอดสุด และ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับมุมบิดของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดในรูปแรงบิดเดี่ยวที่จุดยอดสุด และ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับมุมบิดของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 โดยวิธีที่เสนอ โดย พูลสวัสดิ์³⁾ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้อย่างง่ายและมีความถูกต้อง อีกทั้งสามารถใช้กับ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถแปรเปลี่ยนขนาดของชิ้นส่วนตามความสูง ได้ด้วยการสมมติฟังก์ชันของมุมบิด การเคลื่อนที่ ในแนวแกนของมุมกล่อง เทียบเคียง ออร์โททรอปิคดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในกล่อง เทียบ ทำออร์โททรอปิคในสมการที่ 14, 15, 16 โดยที่

M_n = จำนวนการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนตามความสูง (รูปที่ 5)

H_{i-1} = ความสูงชิ้นที่เริ่มแปรเปลี่ยนขนาด (รูปที่ 5)

H_i = ความสูงชิ้นที่สิ้นสุดการแปรเปลี่ยนขนาด (รูปที่ 5)

$M_n H_i$

$$\begin{aligned}
 2U_1 = \sum_{i=1}^{M_n} \int_{H_{i-1}}^{H_i} & \left[\frac{\pi^2 \cos^2 \pi \xi E_{11} t_{11} c + 2 \sin^2 \pi \xi G_{11} t_{11} c}{6H^2} \cdot A^2 \right. \\
 & - \frac{(2\pi^2 \cos^2 \pi \xi \sin \pi \xi E_{11} t_{11} c - 4 \sin^2 \pi \xi (\cos \pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{3H^2} \cdot A_2 B_2 \\
 & - \frac{(4\pi^2 \cos^2 \pi \xi \sin 2\pi \xi E_{11} t_{11} c - 4 \sin^2 \pi \xi (\cos \pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{3H^2} \cdot A_2 C_2 \\
 & - \frac{(4b \sin \pi \xi G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot A_2 K_4 - \frac{(8b \xi \sin \pi \xi G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot A_2 K_5 \\
 & - \frac{(12b \xi^2 \sin \pi \xi G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot A_2 K_6 \\
 & + \frac{(2\pi^2 \sin^2 \pi \xi E_{11} t_{11} c + 2(\cos \pi \xi - 1)^2 G_{11} t_{11} c)}{3H^2} \cdot B^2 \\
 & + \frac{(8\pi^2 \sin \pi \xi \sin 2\pi \xi E_{11} t_{11} c + 4(\cos \pi \xi - 1)(\cos 2\pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{3H^2} \cdot B_2 C_2 \\
 & - \frac{(4b(\cos \pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot B_2 K_4 - \frac{(8b \xi (\cos \pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot B_2 K_5 \\
 & - \frac{(12b \xi^2 (\cos \pi \xi - 1) G_{11} t_{11} c)}{cH} \cdot B_2 K_6 \\
 & \left. + \frac{(8\pi^2 \sin^2 2\pi \xi E_{11} t_{11} c + 2(\cos 2\pi \xi - 1)^2 G_{11} t_{11} c)}{3H^2} \cdot C^2 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\left\{ \frac{4b(\cos 2\pi\xi - 1)G_{11}t_{11}c}{cH} \cdot C_2 K_4 - \frac{8b\xi(\cos 2\pi\xi - 1)G_{11}t_{11}c}{cH} \cdot C_2 K_5 \right. \\
 & - \left\{ \frac{12b\xi^2(\cos 2\pi\xi - 1)G_{11}t_{11}c}{cH} \cdot C_2 K_6 + \frac{2b^2 G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_4^2 \right. \\
 & + \frac{8b^2 \xi G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_4 K_5 + \frac{12b^2 \xi^2 G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_4 K_6 + \frac{8b^2 \xi^2 G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_5^2 \\
 & \left. \left. + \frac{24b^2 \xi^3 G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_5 K_6 + \frac{18b^2 \xi^4 G_{11}t_{11}c}{H^2} \cdot K_6^2 \right\} \right] dz \\
 & M_n H_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2U_2 = \Sigma \int_{i=1}^{H_{1-1}} & \left[\frac{\pi^2 \cos^2 \frac{\pi\xi}{2} E_{21}t_{21}b + 2\sin^2 \frac{\pi\xi}{2} G_{21}t_{21}b}{6H^2} \cdot A_2^2 \right. \\
 & - \left\{ \frac{2\pi^2 \cos \pi\xi \sin \pi\xi E_{21}t_{21}b}{3H^2} - \frac{4\sin \pi\xi (\cos \pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{b^2} \right\} \cdot A_2 B_2 \\
 & - \left\{ \frac{4\pi^2 \cos \pi\xi \sin 2\pi\xi E_{21}t_{21}b}{3H^2} - \frac{4\sin \pi\xi (\cos \pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{b^2} \right\} \cdot A_2 C_2 \\
 & + \frac{4c \sin \pi\xi G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot A_2 K_4 + \frac{8c\xi \sin \pi\xi G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot A_2 K_5 \\
 & + \frac{12c\xi^2 \sin \pi\xi G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot A_2 K_6 \\
 & + \frac{2\pi^2 \sin^2 \frac{\pi\xi}{2} E_{21}t_{21}b + 2(\cos \pi\xi - 1)^2 G_{21}t_{21}b}{3H^2} \cdot B_2^2 \\
 & + \frac{8\pi^2 \sin \pi\xi \sin 2\pi\xi E_{21}t_{21}b + 4(\cos \pi\xi - 1)(\cos 2\pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{3H^2} \cdot B_2 C_2 \\
 & + \frac{4c(\cos \pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot B_2 K_4 + \frac{8c\xi(\cos \pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot B_2 K_5 \\
 & + \frac{12c\xi^2(\cos \pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot B_2 K_6 \\
 & + \frac{8\pi^2 \sin^2 2\pi\xi E_{21}t_{21}b + 2(\cos 2\pi\xi - 1)^2 G_{21}t_{21}b}{3H^2} \cdot C_2^2 \\
 & + \frac{4c(\cos 2\pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot C_2 K_4 + \frac{8c\xi(\cos 2\pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot C_2 K_5 \\
 & + \frac{12c\xi^2(\cos 2\pi\xi - 1)G_{21}t_{21}b}{bH} \cdot C_2 K_6 + \frac{2c^2 G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_4^2 \\
 & + \frac{8c^2 \xi G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_4 K_5 + \frac{12c^2 \xi^2 G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_4 K_6 + \frac{8c^2 \xi^2 G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_5^2 \\
 & \left. \left. + \frac{24c^2 \xi^3 G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_5 K_6 + \frac{18c^2 \xi^4 G_{21}t_{21}b}{H^2} \cdot K_6^2 \right\} \right] dz \\
 & M_n H_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4U_c = \Sigma \int_{i=1}^{H_{1-1}} & \left[\frac{\pi^2 \cos^2 \frac{\pi\xi}{2} A_{cc1}^* E_{c1}}{2H^2} \cdot A_2^2 - \frac{2\pi^2 \cos \pi\xi \sin \pi\xi A_{cc1}^* E_{c1}}{H^2} \cdot A_2 B_2 \right. \\
 & - \left\{ \frac{4\pi^2 \cos \pi\xi \sin 2\pi\xi A_{cc1}^* E_{c1}}{H^2} \right\} \cdot A_2 C_2 + \frac{2\pi^2 \sin^2 \pi\xi A_{cc1}^* E_{c1}}{H^2} \cdot B_2^2 \\
 & \left. + \frac{8\pi^2 \sin \pi\xi \sin 2\pi\xi A_{cc1}^* E_{c1}}{H^2} \cdot B_2 C_2 + \frac{8\pi^2 \sin^2 2\pi\xi A_{cc1}^* E_{c1}}{H^2} \cdot C_2^2 \right] dz
 \end{aligned}$$

พลังงานศักย์เนื่องจากแรงบิดภายนอกในรูปแรงบิดเดี่ยวกระทำที่จุดยอดสุดและ

โพลีโนเมียลอันดับต่างๆ หาได้จากสมการที่ 18 ดังนี้

โดยที่ $T =$ แรงบิดเตี้ยวที่จุดยอดสุด

$T_0 =$ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดในรูปโพลีโนเมียล

เนื่องจากแรงบิดเตี้ยวกระทำที่จุดยอดสุด ; $V_p = -T(K_4+K_5+K_6)$

เนื่องจากแรงบิดในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ;

H

$$V_T = -\int_0^H T_0(1-\xi)^N (K_4\xi + K_5\xi^2 + K_6\xi^3) dz$$

0

$$= -\frac{T_0 H N! K_4}{(N+2)!} - \frac{2T_0 H N! K_5}{(N+3)!} - \frac{6T_0 H N! K_6}{(N+4)!}$$

กำหนดให้ $F_{11} = E_{11}t_{11}c + E_{21}t_{21}b + 3A_{cc1}E_{cc1}$

$$F_{21} = G_{11}t_{11}b + G_{21}t_{21}c$$

$$F_{31} = G_{11}t_{11}b - G_{21}t_{21}c$$

โดยใช้หลักการพลังงานศักย์ทั้งหมดน้อยที่สุด ดังสมการที่ 28 ดังนั้นสามารถเขียนสมการเพื่อแก้หาค่าคงที่ต่างๆในรูปของเมตริกซ์ได้

$$\tilde{A} \cdot \tilde{X} = \tilde{V}$$

โดยที่ $\tilde{A} =$ เมตริกซ์สมมาตรของสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ ขนาด 6×6

$\tilde{X} =$ เมตริกซ์ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ขนาด 6×1

$\tilde{V} =$ เมตริกซ์ของพลังงานศักย์เนื่องจากแรงบิดภายนอกในรูปแรงบิดเตี้ยวที่จุดยอดสุด และโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ขนาด 6×1

$$M_n \cdot H_1$$

$$A(1,1) = \sum_{i=1}^n \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{\pi^2 \cos^2 \frac{\pi \xi}{2} F_{11}}{3H^2} + \frac{4 \sin^2 \frac{\pi \xi}{2} F_{21}}{bc} \right\} dz$$

$$M_n \cdot H_1$$

$$A(1,2) = \sum_{i=1}^n \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ -\frac{2\pi^2 \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \xi}{2} F_{11}}{H^2} + \frac{4 \sin \frac{\pi \xi}{2} (\cos \frac{\pi \xi}{2} - 1) F_{21}}{bc} \right\} dz$$

$$M_n \cdot H_1$$

$$A(1,3) = \sum_{i=1}^n \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ -\frac{4\pi^2 \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin 2\frac{\pi \xi}{2} F_{11}}{3H^2} + \frac{4 \sin \frac{\pi \xi}{2} (\cos 2\frac{\pi \xi}{2} - 1) F_{21}}{bc} \right\} dz$$

$$A(1,4) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-4 \sin \pi \xi F_{31}}{H^2} \right\} dz$$

$$A(1,5) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-8 \xi \sin \pi \xi F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$A(1,6) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-12 \xi^2 \sin \pi \xi F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$A(2,2) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{4 \pi^2 \sin^2 \pi \xi F_{11}}{3 H^2} + \frac{4 (\cos \pi \xi - 1)^2 F_{21}}{bc} \right\} dz$$

$$A(2,3) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{8 \pi^2 \sin \pi \xi \sin 2 \pi \xi F_{11}}{3 H^2} + \frac{4 (\cos \pi \xi - 1) (\cos 2 \pi \xi - 1) F_{21}}{bc} \right\} dz$$

$$A(2,4) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-4 (\cos \pi \xi - 1) F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$A(2,5) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-8 \xi (\cos \pi \xi - 1) F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$A(2,6) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-12 \xi^2 (\cos \pi \xi - 1) F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$A(3,3) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{16 \pi^2 \sin^2 2 \pi \xi F_{11}}{3 H^2} + \frac{4 (\cos 2 \pi \xi - 1)^2}{bc} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(3,4) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{-4(\cos 2\pi\xi - 1)F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(3,5) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{-8\xi(\cos 2\pi\xi - 1)F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(3,6) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{-12\xi^2(\cos 2\pi\xi - 1)F_{31}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(4,4) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{4bcF_{21}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(4,5) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{8bc\xi F_{21}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(4,6) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{12bc\xi^2 F_{21}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(5,5) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{16bc\xi^2 F_{21}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(5,6) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{24bc\xi^3 F_{21}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$A(6,6) = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int \left\{ \frac{36bc\xi^4 F_{21}}{H^2} \right\} dz$$

เมตริกซ์พลังงานศักย์เนื่องจากแรงบิดเดี่ยวกระทำที่จุดยอดสุด

$$V(1,1) = V(2,1) = V(3,1) = 0$$

$$V(4,1) = V(5,1) = V(6,1) = T$$

เมตริกซ์พลังงานศักย์เนื่องจากแรงบิดในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

$$V(1,1) = V(2,1) = V(3,1) = 0$$

$$V(4,1) = T_0 H / ((N+1)(N+2))$$

$$V(5,1) = 2T_0 H / ((N+1)(N+2)(N+3))$$

$$V(6,1) = 6T_0 H / ((N+1)(N+2)(N+3)(N+4))$$

โดยการแทนค่า $T=1$, $T_0=1$ แก่สมการหาค่าเมตริกซ์ X ในแต่ละ V ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาคผนวก ค.

ค.1 วิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางที่จุดยอดสุดและ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับระยะ เอนของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางที่จุดยอดสุดและ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆกับระยะ เอนของ โครงสร้างข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 โดยวิธีที่เสนอโดย พูลสวัสดิ์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้อย่างง่ายและมีความถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถใช้กับ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถแปรเปลี่ยนขนาดของชิ้นส่วนตาม ความสูง ได้ด้วยการสมมติฟังก์ชันของระยะ เอน การเคลื่อนที่ในแนวแกนของมุมกล่องที่เย็บเค้นงอ ออร์โททรอปิก ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เนื่องจากฟังก์ชันของระยะ เอนที่สมมติขึ้นเป็นไปตามเงื่อนไขที่ฐานแต่ฟังก์ชันของ ระยะ เอนที่สมมติขึ้น ไม่ทำให้หน่วยแรงเฉือนเป็นไปตามเงื่อนไขที่จุดยอดสุด ดังนั้นจึงต้องมีการ ปรับแก้เฉพาะหน่วยแรงเฉือนก่อนที่จะนำไปหาพลังงานความเครียดในแต่ละด้านที่เกิดขึ้น โดยวิธีการของ Galerkin ดังมีรายละเอียดดังนี้

$\bar{\tau}_{YZ}$ เป็นหน่วยแรงเฉือนที่จุดยอดสุดของด้านที่ 2

τ_{YZ} เป็นหน่วยแรงเฉือนที่ระดับชั้นใดๆของด้านที่ 2

$$\bar{\tau}_{YZ} = G_2 (\partial w / \partial y + \partial \Delta / \partial Z) \Big|_{\xi=1}$$

$$\tau_{YZ} = G_2 (\partial w / \partial y + \partial \Delta / \partial Z)$$

$$\tau_{YZ}^* = (\tau_{YZ} - \bar{\tau}_{YZ})$$

หน่วยแรงเฉือน τ_{YZ}^* ที่ได้เป็นหน่วยแรงเฉือนที่ปรับแก้และจะนำไปแทนในสมการพลังงานความเครียดต่อไป

พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในกล่องที่เย็บเค้นงอ ออร์โททรอปิกในสมการที่ 14, 15, 16

โดยที่

M_n = จำนวนการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนตามความสูง (รูปที่ 5)

H_{1-1} = ความสูงชั้นที่เริ่มแปรเปลี่ยนขนาด (รูปที่ 5)

H_1 = ความสูงชั้นที่สิ้นสุดการแปรเปลี่ยนขนาด (รูปที่ 5)

$$D(1) = \int_{-c}^c [M_3 + (1-M_3)(x/c)^{M_2}]^2 dx$$

$$D(2) = \int_{-c}^c \frac{[M_2(1-M_3)(x/c)^{M_2-1}]^2}{c} dx$$

$$D(3) = \int_{-b}^b \frac{[\sinh(y/b)^{M_1}]^2}{\sinh(1)} dy$$

$$D(4) = \int_{-b}^b \frac{[M_1(y/b)^{M_1-1} \cosh(y/b)^{M_1}]^2}{b \sinh(1)} dy$$

$$D(5) = \int_{-b}^b \frac{[M_1(y/b)^{M_1-1} \cosh(y/b)^{M_1}]^2}{b \sinh(1)} dy$$

$$M_n \quad H_1/H$$

$$2U_1 = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int_{H_1-1}^{H_1/H} \left[\frac{\pi^2 D(1) \cos^2 \frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} + HD(2) \sin^2 \frac{\pi \xi}{2} G_{1i} t_{1i} \right] \cdot A_1^2$$

$$- \left\{ \frac{\pi^2 D(1) \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} - 2HD(2) \sin \frac{\pi \xi}{2} (\cos \frac{\pi \xi}{2} - 1) G_{1i} t_{1i} \right\} \cdot A_1 B_1$$

$$- \left\{ \frac{2\pi^2 D(1) \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin 2\frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} - 2HD(2) \sin \frac{\pi \xi}{2} (\cos \frac{\pi \xi}{2} - 1) G_{1i} t_{1i} \right\} \cdot A_1 C_1$$

$$+ \left\{ \frac{\pi^2 \sin^2 \frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} + HD(2) (\cos \frac{\pi \xi}{2} - 1)^2 G_{1i} t_{1i} \right\} \cdot B_2^2$$

$$+ \left\{ \frac{4\pi^2 D(1) \sin \frac{\pi \xi}{2} \sin 2\frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} + 2HD(2) (\cos \frac{\pi \xi}{2} - 1) (\cos 2\frac{\pi \xi}{2} - 1) G_{1i} t_{1i} \right\} \cdot B_2 C_2$$

$$+ \left\{ \frac{4\pi^2 D(1) \sin^2 2\frac{\pi \xi}{2} E_{1i} t_{1i} + HD(2) (\cos 2\frac{\pi \xi}{2} - 1)^2 G_{1i} t_{1i} \right\} \cdot C_2^2 \int d\xi$$

$$M_n \quad H_1/H$$

$$2U_2 = \sum_{i=1}^{H_1-1} \int_{H_1-1}^{H_1/H} \left[\frac{\pi^2 D(3) \cos^2 \frac{\pi \xi}{2} E_{2i} t_{2i} + HD(4) \sin^2 \frac{\pi \xi}{2} G_{2i} t_{2i} - HD(4) \sin \frac{\pi \xi}{2} G_{2i} t_{2i} \right] \cdot A_1^2$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\pi^2 D(3) \cos \pi \xi \sin \pi \xi E_{21} t_{21}}{H} - 2HD(4) \sin \pi \xi (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \\
& + HD(4) (\cos \pi \xi - 1 - 2 \sin \pi \xi) G_{21} t_{21} \}. A_1 B_1 \\
& -\frac{2\pi^2 D(3) \cos 2\pi \xi \sin 2\pi \xi E_{21} t_{21}}{H} - 2HD(4) \sin 2\pi \xi (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \\
& + HD(4) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. A_1 C_1 \\
& + \{4\xi^2 D(5) \sin \pi \xi G_{21} t_{21} - D(5) (2\xi + 2 \sin \pi \xi) G_{21} t_{21} \}. A_1 K_1 \\
& + \{6\xi^2 D(5) \sin \pi \xi G_{21} t_{21} - D(5) (3\xi^2 + 3 \sin \pi \xi) G_{21} t_{21} \}. A_1 K_2 \\
& + \{8\xi^3 D(5) \sin \pi \xi G_{21} t_{21} - D(5) (4\xi^3 + 4 \sin \pi \xi) G_{21} t_{21} \}. A_1 K_3 \\
& + \frac{\pi^2 D(3) \sin^2 \pi \xi E_{21} t_{21}}{H} + HD(4) (\cos \pi \xi - 1)^2 G_{21} t_{21} \\
& + 2HD(4) (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. B_2^2 \\
& + \frac{4\pi^2 D(3) \sin \pi \xi \sin 2\pi \xi E_{21} t_{21}}{H} + 2HD(4) (\cos \pi \xi - 1) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \\
& + 2HD(4) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. B_1 C_1 \\
& + \{4\xi D(5) (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - D(5) (2(\cos \pi \xi - 1) - 4\xi) G_{21} t_{21} \}. B_1 K_1 \\
& + \{6\xi^2 D(5) (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - D(5) (3(\cos \pi \xi - 1) - 6\xi^2) G_{21} t_{21} \}. B_1 K_2 \\
& + \{8\xi^3 D(5) (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - D(5) (4(\cos \pi \xi - 1) - 8\xi^3) G_{21} t_{21} \}. B_1 K_3 \\
& + \frac{4\pi^2 D(3) \sin^2 2\pi \xi E_{21} t_{21}}{H} + HD(4) (\cos 2\pi \xi - 1)^2 G_{21} t_{21} \}. C_1^2 \\
& + \{4\xi D(5) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - 2D(5) (\cos \pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. C_1 K_1 \\
& + \{6\xi^2 D(5) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - 3D(5) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. C_1 K_2 \\
& + \{8\xi^3 D(5) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} - 4D(5) (\cos 2\pi \xi - 1) G_{21} t_{21} \}. C_1 K_3 \\
& + \frac{8\xi^2 G_{21} t_{21} b - 8\xi G_{21} t_{21} b}{H} \}. K_1^2 + \frac{24\xi^3 G_{21} t_{21} b - 12(\xi^2 + \xi) G_{21} t_{21} b}{H} \}. K_1 K_2 \\
& + \frac{32\xi^4 G_{21} t_{21} b - 16(\xi^3 + \xi) G_{21} t_{21} b}{H} \}. K_1 K_3 \\
& + \frac{18\xi^4 G_{21} t_{21} b - 18\xi^2 G_{21} t_{21} b}{H} \}. k_2^2 \\
& + \frac{48\xi^5 G_{21} t_{21} b - 24(\xi^3 + \xi^2) G_{21} t_{21} b}{H} \}. K_2 K_3 \\
& + \frac{32\xi^6 G_{21} t_{21} b - 32\xi^3 G_{21} t_{21} b}{H} \}. K_3^2 \quad] d\xi \\
& M_n H_1 / H
\end{aligned}$$

$$4U_c = \sum_{i=1} \int_{H_{i-1}/H} \left[\frac{\pi^2 \cos^2 \pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{2H} \}. A_1^2 - \frac{2\pi^2 \cos \pi \xi \sin \pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{H} \}. A_1 B_1 \right.$$

$$\left. - \frac{4\pi^2 \cos \pi \xi \sin 2\pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{H} \}. A_1 C_1 + \frac{2\pi^2 \sin^2 \pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{H} \}. B_2^2 \right. \\
\left. + \frac{8\pi^2 \sin \pi \xi \sin 2\pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{H} \}. B_2 C_2 + \frac{8\pi^2 \sin^2 2\pi \xi A_{cc_i}^* E_{c_i}}{H} \}. C_2^2 \right] d\xi$$

พลังงานศักย์เนื่องจากแรงเดียวในระนาบที่ผ่านศูนย์กลางที่สุดและ
โพลีโนเมียลอันดับต่างๆ หาได้จากสมการที่ 18 ดังนี้

โดยที่ $P =$ แรงเดียวในระนาบที่ผ่านศูนย์กลางที่สุด

$P_0 =$ สัมประสิทธิ์ของแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางในรูปโพลีโนเมียล

เนื่องจากแรงเดียวในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางที่สุด ; $V_p = -T(K_1+K_2+K_3)$

เนื่องจากแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางในรูปโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ;

H

$$\begin{aligned} V_T &= -\int_0^H P_0 (1-z)^N (K_1 z^2 + K_2 z^3 + K_3 z^4) dz \\ &= -2HP_0 \frac{N!}{(N+3)!} K_1 - 4HP_0 \frac{N!}{(N+4)!} K_2 - 6HP_0 \frac{N!}{(N+5)!} K_3 \end{aligned}$$

กำหนดให้ $L_{11} = D(1)E_{11}t_{11} + D(3)E_{21}t_{21} + 2A_{CC1}^* E_{C1}$

$$L_{21} = D(2)G_{11}t_{11} + D(4)G_{21}t_{21}$$

$$L_{31} = D(5)G_{21}t_{21}$$

$$L_{41} = G_{21}t_{21}b$$

$$L_{51} = D(4)G_{21}t_{21}$$

โดยใช้หลักการพลังงานศักย์ทั้งหมดน้อยที่สุด ดังสมการที่ 28 ดังนั้นสามารถเขียนสมการ
เพื่อแก้หาค่าคงที่ต่างๆ ในรูปของเมตริกซ์ได้

$$\tilde{B} \cdot \tilde{Y} = \tilde{V}$$

โดยที่ $B =$ เมตริกซ์สมมาตรของสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ ขนาด 6×6

$Y =$ เมตริกซ์ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ขนาด 6×1

$V =$ เมตริกซ์ของพลังงานศักย์เนื่องจากแรงเดียวในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลาง
จุดยอดสุด และ โพลีโนเมียลอันดับต่างๆ ขนาด 6×1

$$M_n \quad H_1$$

$$B(1,1) = \sum_{i=1}^n \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{\pi^2 \cos^2 \pi z}{2H^2} L_{11} + 2 \sin^2 \frac{\pi z}{2} L_{21} - 2 \sin \frac{\pi z}{2} L_{51} \right\} dz$$

$$B(1,2) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-\pi^2 \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin \pi \xi L_{1,1}}{H^2} + 2 \frac{\sin \pi \xi (\cos \pi \xi - 1) L_{2,1}}{2} - \frac{(\cos \pi \xi - 1 - 2 \sin \frac{\pi \xi}{2})}{2} \right. \\ \left. \cdot L_{5,1} \right\} dz$$

$$B(1,3) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{-2\pi^2 \cos \frac{\pi \xi}{2} \sin 2\pi \xi L_{1,1}}{H^2} + 2 \frac{\sin \pi \xi (\cos 2\pi \xi - 1) L_{2,1}}{2} - (\cos 2\pi \xi - 1) L_{5,1} \right\} dz$$

$$B(1,4) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{4\xi \sin \pi \xi L_{3,1}}{H} - \frac{2(\xi + \sin \frac{\pi \xi}{2}) L_{3,1}}{2} \right\} dz$$

$$B(1,5) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{6\xi^2 \sin \pi \xi L_{3,1}}{H} - \frac{3(\xi^2 + \sin \frac{\pi \xi}{2}) L_{3,1}}{2} \right\} dz$$

$$B(1,6) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{8\xi^3 \sin \pi \xi L_{3,1}}{H} - \frac{4(\xi^3 + \sin \frac{\pi \xi}{2}) L_{3,1}}{2} \right\} dz$$

$$B(2,2) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{2\pi^2 \sin^2 \frac{\pi \xi}{2} L_{1,1}}{H^2} + 2(\cos \pi \xi - 1)^2 L_{2,1} + 4(\cos \pi \xi - 1) L_{5,1} \right\} dz$$

$$B(2,3) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{4\pi^2 \sin \pi \xi \sin 2\pi \xi L_{1,1}}{H^2} + 2(\cos \pi \xi - 1)(\cos 2\pi \xi - 1) L_{2,1} \right. \\ \left. + 2(\cos 2\pi \xi - 1) L_{5,1} \right\} dz$$

$$B(2,4) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{4\xi (\cos \pi \xi - 1) L_{3,1}}{H} - (2(\cos \pi \xi - 1) - 4\xi) L_{3,1} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(2,5) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{6\xi^2}{H} (\cos\pi\xi - 1)L_{3,1} - \frac{(3(\cos\pi\xi - 1) - 6\xi^2)L_{3,1}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(2,6) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{8\xi^3}{H} (\cos\pi\xi - 1)L_{3,1} - \frac{(4(\cos\pi\xi - 1) - 8\xi^3)L_{3,1}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(3,3) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{8\pi^2 \sin^2 \pi\xi L_{1,1}}{H^2} + 2(\cos 2\pi\xi - 1)^2 L_{2,1} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(3,4) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{4\xi}{H} (\cos 2\pi\xi - 1)L_{3,1} - \frac{2(\cos \pi\xi - 1)L_{3,1}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(3,5) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{6\xi^2}{H} (\cos 2\pi\xi - 1)L_{3,1} - \frac{3(\cos 2\pi\xi - 1)L_{3,1}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(3,6) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{8\xi^3}{H} (\cos 2\pi\xi - 1)L_{3,1} - \frac{4(\cos 2\pi\xi - 1)L_{3,1}}{H} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(4,4) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{16\xi^2 L_{4,1} - 16\xi L_{4,1}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(4,5) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{24\xi^3 L_{4,1} - 12(\xi^2 + \xi)L_{4,1}}{H^2} \right\} dz$$

$$M_n H_1$$

$$B(4,6) = \sum_{i=1}^{H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \left\{ \frac{32\xi^4 L_{4,1} - 16(\xi^3 + \xi)L_{4,1}}{H^2} \right\} dz$$

$$B(5,5) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \frac{\{36\xi^4 L_{4,1} - 36\xi^2 L_{4,1}\}}{H^2} dz$$

$$B(5,6) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \frac{\{48\xi^5 L_{4,1} - 24(\xi^3 + \xi^2)L_{4,1}\}}{H^2} dz$$

$$B(6,6) = \sum_{i=1}^{M_n H_1} \int_{H_{i-1}}^{H_i} \frac{\{64\xi^6 L_{4,1} - 64\xi^3 L_{4,1}\}}{H^2} dz$$

เมตริกซ์พลังงานศักย์เนื่องจากแรงเฉื่อยในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางจุดยอดสุด

$$V(1,1) = V(2,1) = V(3,1) = 0$$

$$V(4,1) = V(5,1) = V(6,1) = P$$

เมตริกซ์พลังงานศักย์เนื่องจากแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางในรูปแบบโพลีโนเมียลอันดับต่างๆ

$$V(1,1) = V(2,1) = V(3,1) = 0$$

$$V(4,1) = 2P_0 H / ((N+1)(N+2)(N+3))$$

$$V(5,1) = 6P_0 H / ((N+1)(N+2)(N+3)(N+4))$$

$$V(6,1) = 24P_0 H / ((N+1)(N+2)(N+3)(N+4)(N+5))$$

โดยการแทนค่า $P=1$, $P_0=1$ แก่สมการหาค่าเมตริกซ์ Y ในแต่ละ V ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวราบที่ผ่านศูนย์กลางกับระยะเอนของโครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ภาคผนวก ง

การหาแรงภายใน โครงสร้างดิสครีตของ โครงข้อแข็งรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สำหรับการคำนวณหาแรงภายใน โครงสร้างดิสครีต หา ได้จากการแทนฟังก์ชันต่างๆที่ สมมติขึ้น (สมการที่ 19-27) ที่ทราบค่า. และความสัมพันธ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในสมการของ หน่วยแรงเฉือนและแรงในแนวแกนของกล่องเทียบเท่าออร์โธโทรปิก (สมการที่ 11-13) จะ ได้การกระจายของหน่วยแรงในเทอมของ x, y, z ในแต่ละด้านของกล่องเทียบเท่า ออร์โธโทรปิก

การหาค่าแรงภายในในแต่ละชั้นส่วนของ โครงสร้างดิสครีตของ โครงข้อแข็งรูปกล่อง สี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถหา ได้ผลคูณของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผนังบาง เทียบเท่าในแต่ละ โครงข้อแข็ง (ดังแสดงในรูปที่ 6) กับพื้นที่ของผนังบางเทียบเท่า แรงในแนวแกนของเสาที่ระดับ z_1

$$P_c = A_{cc} [\sigma_c] \quad (ง.1)$$

$$P_1(x_1) = t_1 d_1 [\sigma_1(x_1, -b, \xi)] \quad (ง.2)$$

$$P_2(x_1) = t_2 d_2 [\sigma_2(-c, y_1, \xi)] \quad (ง.3)$$

โดยที่ $P_c, P_1, P_2 =$ แรงในแนวแกนของเสาต้นมุม ด้านที่ 1 และด้านที่ 2 ตามลำดับ
 $z_1 =$ ความสูงของตำแหน่งที่อ้างอิงจากรูปร่างของ โครงข้อแข็งรูปกล่อง สี่เหลี่ยมผืนผ้าถึงจุดตัดกลับของเสาในแต่ละชั้น

แรงเฉือนในเสาที่ระดับ z_1

$$Q_1 = t_1 d_1 [\tau_{xy}(\xi)] \quad (ง.4)$$

$$Q_2 = t_2 d_2 [\tau_{yz}(\xi)] \quad (ง.5)$$

$$Q_{c1} = 0.50Q_1 \quad (ง.6)$$

$$Q_{c2} = 0.50Q_2 \quad (ง.7)$$

โดยที่ $Q_1, Q_2 =$ แรงเฉือนในเสาของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$Q_{c1}, Q_{c2} =$ แรงเฉือนในเสาต้นมุมของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

แรงเฉือนในคานที่ระดับ z_1

$$V_1 = t_1 h [\tau_{xz}(\xi)] \quad (ง.8)$$

$$V_2 = t_2 h [\tau_{yz}(\xi)] \quad (\text{ง.9})$$

โดยที่ V_1, V_2 = แรงเฉือนที่จุดตัดกลับในคานของด้านที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

z_1 = ความสูงของตำแหน่งที่อ้างอิงจากฐานของโครงข้อแข็งรูปกล่อง
สี่เหลี่ยมผืนผ้าถึงระดับคานในแต่ละชั้น

โมเมนต์ในคานและเสา ได้จากการคูณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดตัดกลับของเสาและคานที่แต่ละ
ระดับกับระยะทางจากจุดตัดกลับถึงจุดที่ต้องการทราบ

ดังนั้นสามารถที่จะหาแรงภายใน โครงสร้างดิสครีต ได้ทุกค่าที่ต้องการทราบดังที่กล่าว

มา

ภาคผนวก จ.

(ตัวอย่างการป้อนข้อมูลและผลลัพธ์การวิเคราะห์)

SLDF ANALYSIS

DATE : 01-06-1989 <DATA> P. 1

PROJECT : EXAM#1-3(TORSION)

FILENAME : EXAM#1-3

AUTHORITY : J. BANPOTE

ENGINEER : J. BANPOTE

```

*****
*                                     *
*   S T R U C T U R A L   D A T A   *
*                                     *
*****

```

***** TYPES OF STRUCTURE *****

```

SYMMETRICAL RECTANGULAR FRAME TUBE = 1
FRAMES..... = 0
SHEAR WALLS..... = 0
COUPLE SHEAR WALLS..... = 0
SHEAR CORES..... = 0

```

***** GENERAL DATA *****

```

NUMBER OF STORIES ..... = 30
NUMBER OF REFERENCE LEVELS ..... = 3
STRUCTURE CONDITION (SYM.=1, OTHERS=2). = 1
HEIGHT OF EACH STORY
STORY NO.      HEIGHT

```

1	12.00
2	12.00
3	12.00
4	12.00
5	12.00
6	12.00
7	12.00
8	12.00
9	12.00
10	12.00
11	12.00
12	12.00
13	12.00
14	12.00
15	12.00
16	12.00
17	12.00
18	12.00
19	12.00
20	12.00
21	12.00
22	12.00
23	12.00

=====

SLDF ANALYSIS
 PROJECT : EXAM#1-3(TORSION)
 AUTHORITY : J. BANPOTE

DATE : 01-06-1989 <DATA> P. 2
 FILENAME : EXAM#1-3
 ENGINEER : J. BANPOTE

=====

HEIGHT OF EACH STORY
 STORY NO. HEIGHT

24	12.00
25	12.00
26	12.00
27	12.00
28	12.00
29	12.00
30	12.00

HEIGHT OF REFERENCE LEVELS
 REF. NO. HEIGHT

1	120.00
2	240.00
3	360.00

LOAD AT REF. LEVELS

REF NO.	SHEAR	TORSION
1	+0.00E+00	+3.89E+04
2	+0.00E+00	+1.94E+04
3	+0.00E+00	+0.00E+00

```

=====
SLDF ANALYSIS          DATE : 01-06-1989 <DATA> P. 3
PROJECT   : EXAM#1-3(TORSION)      FILENAME  : EXAM#1-3
AUTHORITY : J. BANPOTE             ENGINEER  : J. BANPOTE
=====

```

```

*****
*
* SYMMETRICAL FRAME TUBE DATA *
*
*****

```

*** DIMENSION & LOCATION ***

```

-----
WIDTH OF PERPENDICULAR PANEL = 84.00
WIDTH OF PARALLEL PANEL ... = 132.00
HEIGHT OF SYM. FRAME TUBE ... = 360.00
LOCATION.....(w.r.t datum axis) = 0.00

```

*** CONSTANT OF FUNCTION ***

```

-----
M1..... = 1.00
M2..... = 2.00
M3..... = 1.00

```

*** MEMBER DATA ***

```

-----
NO. OF PANELS = 4

```

*** GIRDER DATA ***

```

-----
PANEL NO. 1 & 3
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3

```

MATERIAL PROPERTY NO. 1

```

-----
MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA ... = 3.89E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.60E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 3.00E+00
WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
DEPTH OF GIRDER..... = 3.60E+00

```

SLDF ANALYSIS DATE : 01-06-1989 <DATA> P. 4
 PROJECT : EXAM#1-3(TORSION) FILENAME : EXAM#1-3
 AUTHORITY : J. BANPOTE ENGINEER : J. BANPOTE

MATERIAL PROPERTY NO. 2

 MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
 SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
 MOMENT OF INNERTIA ... = 3.28E+00
 CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.40E+00
 EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.83E+00
 WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
 DEPTH OF GIRDER..... = 3.40E+00

MATERIAL PROPERTY NO. 3

 MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
 SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
 MOMENT OF INNERTIA ... = 1.83E+00
 CROSS SECTIONAL AREA.. = 2.80E+00
 EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.33E+00
 WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
 DEPTH OF GIRDER..... = 2.80E+00

PANEL NO. 2 & 4
 NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3

MATERIAL PROPERTY NO. 1

 MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
 SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
 MOMENT OF INNERTIA ... = 3.89E+00
 CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.60E+00
 EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 3.00E+00
 WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
 DEPTH OF GIRDER..... = 3.60E+00

MATERIAL PROPERTY NO. 2

 MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
 SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
 MOMENT OF INNERTIA ... = 3.28E+00
 CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.40E+00
 EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.83E+00
 WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
 DEPTH OF GIRDER..... = 3.40E+00

ต้องส่งคืนวิศวกรรมการก่อสร้าง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

=====
SLDF ANALYSIS          DATE :01-06-1989  <DATA> P. 5
PROJECT   : EXAM#1-3(TORSION)      FILENAME  : EXAM#1-3
AUTHORITY : J. BANPOTE             ENGINEER  : J.BANPOTE
=====

```

MATERIAL PROPERTY NO. 3

```

-----
MODULUS OF ELASTICITY = 5.00E+05
SHEAR MODULUS..... = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA... = 1.83E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 2.80E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.33E+00
WIDTH OF GIRDER..... = 1.00E+00
DEPTH OF GIRDER..... = 2.80E+00

```

**** INTERIOR COLUMN DATA ****

```

-----
PANEL NO.      1 & 3
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3
MATERIAL PROPERTY NO. 1
-----

```

```

MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....     = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 3.28E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.40E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.83E+00
WIDTH OF COLUMN.....    = 3.40E+00
LONG OF COLUMN.....     = 1.00E+00

```

MATERIAL PROPERTY NO. 2

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....     = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 2.73E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.20E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.67E+00
WIDTH OF COLUMN.....    = 3.20E+00
LONG OF COLUMN.....     = 1.00E+00

```

MATERIAL PROPERTY NO. 3

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....     = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 1.83E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 2.80E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.33E+00
WIDTH OF COLUMN.....    = 2.80E+00
LONG OF COLUMN.....     = 1.00E+00

```

```

-----
PANEL NO.      2 & 4
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3

```

```

=====
SLDF ANALYSIS          DATE :01-06-1989  <DATA> P. 6
PROJECT   : EXAM#1-3(TORSION)      FILENAME  : EXAM#1-3
AUTHORITY : J. BANPOTE             ENGINEER  : J.BANPOTE
=====

```

MATERIAL PROPERTY NO. 1

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....    = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 3.28E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.40E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.83E+00
WIDTH OF COLUMN.....   = 3.40E+00
LONG OF COLUMN.....    = 1.00E+00

```

MATERIAL PROPERTY NO. 2

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....    = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 2.73E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 3.20E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.67E+00
WIDTH OF COLUMN.....   = 3.20E+00
LONG OF COLUMN.....    = 1.00E+00

```

MATERIAL PROPERTY NO. 3

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS.....    = 2.07E+05
MOMENT OF INNERTIA.... = 1.83E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 2.80E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 2.33E+00
WIDTH OF COLUMN.....   = 2.80E+00
LONG OF COLUMN.....    = 1.00E+00

```

**** CORNER COLUMN DATA ****

```

-----
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3
MATERIAL PROPERTY NO. 1
-----

```

```

MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS .....    = 2.07E+05
MOMENT OF INERTIA..... = 3.56E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 6.80E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 5.67E+00
WIDTH OF COLUMN.....   = 6.80E+00
LONG OF COLUMN.....    = 1.00E+00

```



```

=====
SLDF ANALYSIS      DATE : 01-06-1989  <DATA> P. 7
PROJECT   : EXAM#1-3(TORSION)      FILENAME  : EXAM#1-3
AUTHORITY : J. BANPOTE              ENGINEER  : J.BANPOTE
=====

```

MATERIAL PROPERTY NO. 2

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS          = 2.07E+05
MOMENT OF INERTIA..... = 3.00E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 6.40E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 5.33E+00
WIDTH OF COLUMN..... = 6.40E+00
LONG OF COLUMN..... = 1.00E+00

```

MATERIAL PROPERTY NO. 3

```

-----
MODULUS ELASTICITY      = 5.00E+05
SHEAR MODULUS          = 2.07E+05
MOMENT OF INERTIA..... = 2.06E+00
CROSS SECTIONAL AREA.. = 5.60E+00
EFFECTIVE SHEAR AREA.. = 4.67E+00
WIDTH OF COLUMN..... = 5.60E+00
LONG OF COLUMN..... = 1.00E+00

```

** BAY WIDTH DATA **

```

-----
PANEL NO. 1 & 3
NO. OF BAY WIDTH = 1
BAY WIDTH NO.    BAY WIDTH
-----
1                12.00

```

```

-----
PANEL NO. 2 & 4
NO. OF BAY WIDTH = 1
BAY WIDTH NO.    BAY WIDTH
-----
1                12.00

```

** STORY NO. (CHANGE PROP.) **

```

-----
PANEL NO. 1 & 3
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3
PROP. NO./ PROP. NO.      STORY NO. (CHANGE PROP.)
-----
1 / 2                    10
2 / 3                    20

```

```

-----
PANEL NO. 2 & 4
NO. OF MATERIAL PROPERTIES = 3
PROP. NO./ PROP. NO.      STORY NO. (CHANGE PROP.)
-----

```

=====

SLDF ANALYSIS	DATE : 01-06-1989	<DATA> P. 8
PROJECT : EXAM#1-3(TORSION)	FILENAME : EXAM#1-3	
AUTHORITY : J. BANPOTE	ENGINEER : J. BANPOTE	

=====

PROP. NO. / PROP. NO. STORY NO. (CHANGE PROP.)

1	/	2	10
2	/	3	20

=====

SLDF ANALYSIS DATE : 01-06-1989 <RESULT> P. 1
PROJECT : EXAM#1-3(TORSION) FILENAME : EXAM#1-3
AUTHORITY : J.BANPOTE ENGINEER : J.BANPOTE

=====

*
* DISPLACEMENT & ROTATION OF SYM. FRAME TUBE *
*

REF. NO.	DISPLACEMENT	ROTATION
1	+0.00E+00	+4.29E-04
2	+0.00E+00	+7.46E-04
3	+0.00E+00	+9.09E-04

```
=====
SLDF ANALYSIS   DATE : 01-06-1989  <RESULT> P. 2
PROJECT  : EXAM#1-3(TORSION)        FILENAME  : EXAM#1-3
AUTHORITY : J.BANPOTE                ENGINEER  : J.BANPOTE
=====
```

```
*****
*
*      COMPONENT LOAD OF SYM. FRAME TUBE      *
*
*
*****
```

REF. NO.	LATERAL LOAD	TORSION
1	+0.00E+00	-1.75E-03
2	+0.00E+00	+1.62E+02
3	+0.00E+00	+8.98E-05

=====

SLDF ANALYSIS DATE : 01-06-1989 <RESULT> P. 3
 PROJECT : EXAM#1-3(TORSION) FILENAME : EXAM#1-3
 AUTHORITY : J.BANPOTE ENGINEER : J.BANPOTE

=====

 *
 * FORCES IN COLUMN OF SYM. FRAME TUBE *
 *

*** PANEL NO. 1 *** STORY NO. 1 ***

DIST OF COL. FROM CENTER	AXIAL FORCE		SHEAR FORCE		MOMENT	
	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER
-42	+4.98E+01	+4.98E+01	+1.79E+01	+1.79E+01	+1.08E+02	+1.08E+02
-30	+2.01E+01	+2.01E+01	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
-18	+1.21E+01	+1.21E+01	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
-6	+4.02E+00	+4.02E+00	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
6	-4.02E+00	-4.02E+00	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
18	-1.21E+01	-1.21E+01	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
30	-2.01E+01	-2.01E+01	+3.59E+01	+3.59E+01	+2.15E+02	+2.15E+02
42	-4.98E+01	-4.98E+01	+1.79E+01	+1.79E+01	+1.08E+02	+1.08E+02

*** PANEL NO. 2 *** STORY NO. 1 ***

DIST OF COL. FROM CENTER	AXIAL FORCE		SHEAR FORCE		MOMENT	
	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER
66	-4.98E+01	-4.98E+01	+1.15E+01	+1.15E+01	+6.93E+01	+6.93E+01
54	-2.20E+01	-2.20E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
42	-1.71E+01	-1.71E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
30	-1.22E+01	-1.22E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
18	-7.35E+00	-7.35E+00	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
6	-2.45E+00	-2.45E+00	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-6	+2.45E+00	+2.45E+00	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-18	+7.35E+00	+7.35E+00	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-30	+1.22E+01	+1.22E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-42	+1.71E+01	+1.71E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-54	+2.20E+01	+2.20E+01	+2.31E+01	+2.31E+01	+1.39E+02	+1.39E+02
-66	+4.98E+01	+4.98E+01	+1.15E+01	+1.15E+01	+6.93E+01	+6.93E+01

=====

SLDF ANALYSIS DATE : 01-06-1989 <RESULT> P. 4
 PROJECT : EXAM#1-3(TORSION) FILENAME : EXAM#1-3
 AUTHORITY : J.BANPOTE ENGINEER : J.BANPOTE

=====

*** PANEL NO. 3 *** STORY NO. 1 ***

DIST OF COL. FROM CENTER	AXIAL FORCE		SHEAR FORCE		MOMENT	
	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER
-42	-4.98E+01	-4.98E+01	-1.79E+01	-1.79E+01	-1.05E+02	-1.08E+02
-30	-2.01E+01	-2.01E+01	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
-18	-1.21E+01	-1.21E+01	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
-6	-4.02E+00	-4.02E+00	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
6	+4.02E+00	+4.02E+00	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
18	+1.21E+01	+1.21E+01	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
30	+2.01E+01	+2.01E+01	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.09E+02	-2.15E+02
42	+4.98E+01	+4.98E+01	-1.79E+01	-1.79E+01	-1.05E+02	-1.08E+02

*** PANEL NO. 4 *** STORY NO. 1 ***

DIST OF COL. FROM CENTER	AXIAL FORCE		SHEAR FORCE		MOMENT	
	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER	UPPER	LOWER
66	+4.98E+01	+4.98E+01	-1.15E+01	-1.15E+01	-6.93E+01	-6.93E+01
54	+2.20E+01	+2.20E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
42	+1.71E+01	+1.71E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
30	+1.22E+01	+1.22E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
18	+7.35E+00	+7.35E+00	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
6	+2.45E+00	+2.45E+00	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-6	-2.45E+00	-2.45E+00	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-18	-7.35E+00	-7.35E+00	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-30	-1.22E+01	-1.22E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-42	-1.71E+01	-1.71E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-54	-2.20E+01	-2.20E+01	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-66	-4.98E+01	-4.98E+01	-1.15E+01	-1.15E+01	-6.93E+01	-6.93E+01

SLDF ANALYSIS DATE : 01-06-1989 <RESULT> P. 6
 PROJECT : EXAM#1-3(TORSION) FILENAME : EXAM#1-3
 AUTHORITY : J.BANPOTE ENGINEER : J.BANPOTE

*** PANEL NO. 3 *** STORY NO. 1 ***

DIST. OF GIRDER FROM CENTER	SHEAR		MOMENT	
	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT
-36	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
-24	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
-12	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
0	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
0	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
12	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
24	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02
36	-3.59E+01	-3.59E+01	-2.15E+02	-2.15E+02

*** PANEL NO. 4 *** STORY NO. 1 ***

DIST. OF GIRDER FROM CENTER	SHEAR		MOMENT	
	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT
60	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
48	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
36	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
24	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
12	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
0	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
0	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-12	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-24	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-36	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-48	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02
-60	-2.31E+01	-2.31E+01	-1.39E+02	-1.39E+02