

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ทักษิณ เทพชาตรี. รายงานวิจัยการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ในพื้นระบบ Flat Plate ด้วยโปรแกรมไมโครคอมพิวเตอร์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปณิธาน ลักคณະประสิทธิ์. การวิเคราะห์โครงสร้าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สามเสนการพิมพ์, 2527.

ภาษาอังกฤษ

- ACI Committee 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary-ACI 318R-89. American Concrete Institute, Detroit: 1989.
- Cano, M. T., and Klingner, R. E. Comparison of Analysis Procedures for Two-Way Slabs. ACI Journal, Proceedings V. 85, No. 6 (Nov.-Dec. 1988): 597-608.
- Cook, R. D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Second Edition, John Wiley & Sons, 1981.
- Corley, W. G., Sozen, M. A., and Siess, C. P. The Equivalent Frame Analysis for Reinforced Concrete Slabs. Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 218, University of Illinois: June 1961.
- Corley, W. G., and Jirsa J. O. Equivalent Frame Analysis for Slab Design. ACI Journal, Proceedings V.67, No.11 (Nov.1970): 875-884.
- Ekasit Limsuwan. Flat Slabs. 1987. (Unpublished Manuscript)
- Ferguson, P. M., Breen, J. E., and Jirsa, J. O. Reinforced Concrete Fundamentals. Fifth Edition, John Wiley & Sons. 1983.

- Guralnick, S. A., and La Fraugh, R. W. Laboratory Study of a Forty-Five-Foot Square Flat Plate Structure. ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 9 (Sept. 1963): 1107-1185.
- Hatcher, D. S., Sozen, M. A., and Siess, C. P. Test of a Reinforced Concrete Flat Plate. Proceedings, ASCE, V. 91, ST 51, (Oct. 1965): 205-231.
- Klaus, J. B., Edward, L. W. and Fred, E. P. SAP IV A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems. April 1974.
- Rice, P. F., and Hoffman, E. S. Structural Design Guide to the ACI Building Code. Second Edition, Van Nostrand Reinforced Company.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เปรียบเทียบแบบจำลอง

ภาคผนวก ก.

เปรียบเทียบแบบจำลอง

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAP IV (Klaus, Edward และ Fred, 1974) นั้น แบบจำลองที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วน (element) 2 ประเภท คือชิ้นส่วนแผ่นบางและเปลือกบาง (Plate and shell elements, quadrilateral) แทนโครงสร้างแผ่นพื้น และชิ้นส่วนคานาใน 3 มิติ (Three-dimensional beam elements) แทนโครงสร้างเสานั้น เนื่องจากชิ้นส่วนคานาที่ใช้แทนโครงสร้างเสาเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างในมิติเดียว คือความยาว ส่วนหน้าตัดจะไม่มีขนาด คือเป็นจุด จึงทำให้ผลเนื่องจากขนาดหน้าตัดเสามีต่อโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ในภาคผนวกนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองข้างต้น กับแบบจำลองที่พิจารณาถึงผลของขนาดหน้าตัดเสามาเกี่ยวข้องกับ โดยการแทนโครงสร้างเสาด้วยชิ้นส่วนตันรูปลูกบาศก์ใน 3 มิติ (Three-dimensional solid elements, eight node brick) และเพื่อให้ได้แบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงจะต้องแบ่งโครงสร้างเสาออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ทั้งบนหน้าตัด และตามความยาวของเสา

ชิ้นส่วนตันรูปลูกบาศก์ใน 3 มิติ ของโปรแกรม SAP IV นั้น เป็นชิ้นส่วนที่มีจำนวนจุดต่อ (node) เท่ากับ 8 แต่ละจุดต่อจะมีองศาอิสระ (degree of freedom) สำหรับการเคลื่อนที่ (translation) เท่ากับ 3 และกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง แรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนประกอบด้วยความดันที่ผิว แรงคาน้ำ แรงเนื่องจากความเฉื่อย และแรงเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ ผลลัพธ์ของแรงภายในประกอบด้วย หน่วยแรงย่อย 6 ค่า และหน่วยแรงหลัก 3 ค่า ซึ่งคำนวณที่จุดศูนย์กลางของชิ้นส่วน

โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ ที่จะใช้ในการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสองนั้น มีลักษณะดังในรูปที่ ก.1 ซึ่งมีจำนวนช่วงเสา 1 ช่วง ความยาวช่วงเสาในทิศทางที่พิจารณา, L_1 4.0 เมตร ความกว้างของพื้นในแนวตั้งฉาก, L_2 4.0 เมตร ความหนาของ

แผ่นพื้น 0.10 เมตร สภาพขอบในทิศทางที่พิจารณากำหนดให้ไม่มีการหมุนรอบแกน X ส่วนเสา กำหนดให้มีสภาพยึดแน่นปลายที่ระดับของพื้นชั้นถัดไปทั้งข้างบนและข้างล่าง โดยความสูงระหว่าง ชั้นมีค่าเท่ากับ 3.0 เมตร และพิจารณาผลของขนาดหน้าตัดเสาที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.20×0.20 , 0.40×0.40 และ 0.80×0.80 เมตร ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ 1.0 ตันต่อตารางเมตร

แบบจำลองที่ 1 แทนโครงสร้างเสาค้ำด้วยชิ้นส่วนตันรูปลูกบาศก์ใน 3 มิติ โดยแบ่งหน้าตัดเสาทั้งในด้านกว้างและด้านลึก ออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน และแบ่งเสาตามความยาวออกเป็น 8 ส่วน แทนโครงสร้างพื้นด้วยชิ้นส่วนแผ่นบางและเปลือกบาง เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งแผ่นพื้นที่อยู่ในแนวเสาตามการแบ่งหน้าตัดเสา ส่วนแผ่นพื้นที่ไม่อยู่ในแนว เสาจะแบ่งออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน และเพื่อให้ระนาบของหน้าตัดเสาที่จุดต่อยังคงเป็น ระนาบ จึงกำหนดให้แผ่นพื้นส่วนที่อยู่ในเสามีค่าสตีฟเนสมาก ๆ การแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองนี้ แสดงไว้ในรูปที่ ก.2

แบบจำลองที่ 2 ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ จะแทนโครงสร้างเสาค้ำด้วยชิ้นส่วนคานใน 3 มิติ และแทนโครงสร้างแผ่นพื้นด้วยชิ้นส่วนแผ่นบางและเปลือกบาง โดยแบ่งแผ่นพื้นในแต่ละช่วงเสา ออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน แบบจำลองนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับในรูปที่ 2.1 ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดเอาไว้แล้วในบทที่ 2

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบระหว่าง แบบจำลองทั้งสองนั้นแสดงไว้ในตารางที่ ก.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าโมเมนต์ของแบบจำลองที่ 2 ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้มีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองที่ 1 บ้าง โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของเสา นั่นคือความคลาดเคลื่อนนี้จะมีค่าน้อยเมื่อเสามีขนาดเล็ก และความคลาดเคลื่อนจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ เสามีขนาดใหญ่ขึ้น และสำหรับโครงสร้างที่มีขนาดเสา 0.40×0.40 เมตร ซึ่งเท่ากับ $1/10$ เท่าของความยาวช่วงเสานั้น พบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ข.

วิธีเฟรมเสมือนสำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ

ภาคผนวก ข.

วิธีเฟรมเสมือนสำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ

ในวิธีเฟรมเสมือนตาม ACI Committee 318 (1989) นั้น โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบในระบบ 3 มิติดังรูปที่ 1.1 จะถูกแบ่งออกเป็นโครงข้อแข็ง 2 มิติทั้งทางยาวและทางขวาง เรียกโครงข้อแข็งแต่ละอันนี้ว่า เฟรมเสมือน (Equivalent frame) ความกว้างของโครงข้อแข็งตัวในมีค่าเท่ากับระยะระหว่างกึ่งกลางของช่วงเสา ส่วนความกว้างของโครงข้อแข็งตัวริมมีค่าเท่ากับ ระยะระหว่างกึ่งกลางของช่วงเสากับขอบนอกของพื้น

หลังจากนั้นจึงนำเฟรมเสมือนแต่ละเฟรมมาวิเคราะห์หาแรงภายใน ดังโครงสร้างในรูปที่ 1.2 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นพื้น กับส่วนที่เป็นเสาเสมือน (Equivalent column) ให้ปลายเสาในระดับของพื้นชั้นถัดไปทั้งชั้นบนและชั้นล่างมีสภาพยึดแน่น วิธีวิเคราะห์โครงสร้างที่มักจะใช้กับเฟรมเสมือน คือวิธีกระจายโมเมนต์ (Moment distribution) โดยให้สถิติเฟสของชั้นส่วนต่าง ๆ มีค่าดังต่อไปนี้

สถิติเฟสของพื้น, K_u

จากรูปที่ 2.2 ที่หน้าตัด 1-1 สามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, I_u ได้โดยตรง คือ

$$I_u = \frac{1}{12} (L_e)(h)^3 \quad \dots\dots(ข.1)$$

โดยที่ L_e = ความกว้างของแผ่นพื้นในทิศทางตั้งฉากกับที่พิจารณา
 h = ความหนาของพื้น

ส่วนที่หน้าตัด 2-2 นั้นพื้นบางส่วนอยู่รวมกับเสา ซึ่งในกรณีนี้ ACI Committee 318 ได้ประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อย, I ไว้คือ

$$I = \frac{I_u}{(1 - C_2/L_2)^2} \quad \dots\dots(ท.2)$$

โดยที่ C_2 = ขนาดของเสาในทิศทางตั้งฉากกับที่พิจารณา

รูปที่ 2.2 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงที่สมมติขึ้นของโมเมนต์ความเฉื่อยในพื้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสติเฟเนสส์ได้โดยอาศัยวิธี Column analogy แต่เพื่อเป็นการลดความยุ่งยากในการคำนวณ Rice ได้เสนอให้ใช้ค่าสติเฟเนสส์ของพื้นดังนี้

$$K_u = \frac{4E_u I_u}{(L_1 - C_1/2)} \quad \dots\dots(ท.3)$$

โดยที่ E_u = โมดูลัสยืดหยุ่นของพื้น

L_1 = ความยาวของช่วงเสาในทิศทางที่พิจารณา

C_1 = ขนาดของเสาในทิศทางที่พิจารณา

สติเฟเนสส์ของเสาเสมือน, K_{uc}

เสาเสมือนที่สมมติขึ้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเสาที่อยู่ชั้นบนและชั้นล่างของพื้น กับส่วนของพื้นที่ติดกับเสาและยื่นออกไปจากเสาทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2.4 เรียกส่วนของพื้นที่ว่า Attached torsional member ค่าสติเฟเนสส์ของเสาเสมือนคำนวณได้จาก

$$\frac{1}{K_{uc}} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_u} \quad \dots\dots(ท.4)$$

โดยที่ K_c = สติเฟเนสส์ของเสา

K_u = สติเฟเนสส์เชิงบิดของ Attached torsional member

สติฟเนสของเสา, K_c

จากรูปที่ 2.3 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาในช่วงระหว่างพื้นแต่ละชั้นนั้น สามารถคำนวณได้โดยตรงจากหน้าตัดของเสา นั่นคือ

$$I_c = \frac{1}{12} (C_2)(C_1)^3 \quad \dots\dots(2.5)$$

โดยที่ C_1 = ขนาดของเสาในทิศทางที่พิจารณา
 C_2 = ขนาดของเสาในทิศทางตั้งฉากกับที่พิจารณา

ส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาในส่วนที่อยู่ในพื้น ถือว่ามีค่ามาก ให้เท่ากับ α จากนั้นจะสามารถคำนวณค่าสติฟเนสของเสาได้โดยอาศัยวิธี Column Analogy แต่เช่นเดียวกับพื้น Rice เสนอให้ใช้

$$K_c = \frac{\Sigma 4E_c I_c}{(L_c - 2h)} \quad \dots\dots(2.6)$$

โดยที่ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสา
 L_c = ความสูงระหว่างชั้น
 h = ความหนาของพื้น

สติฟเนสเชิงบิด, K_s

ค่าสติฟเนสเชิงบิดของ Attached torsional member นั้น ACI Committee 318 กำหนดให้

$$K_s = \frac{9E_c C}{L_c (1 - C_2/L_c)^3} \quad \dots\dots(2.7)$$

$$\text{โดยที่ } C = \frac{(1 - 0.63 x)}{y} \frac{x^3 y}{3}$$

$$x = \text{ความหนาของพื้น} = h$$

$$y = \text{ความลึกของหน้าเสา} = C_1$$

หลังจากได้ค่าสติฟเนสของพื้น และสติฟเนสของเสาเสมือนแล้ว ก็จะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้โดยใช้วิธีการกระจายโมเมนต์ (Moment distribution) ส่วนค่า carry over factor ที่ถูกต้องของแผ่นพื้นซึ่งจะนำไปใช้ในวิธีการกระจายโมเมนต์นี้ จะสามารถคำนวณได้โดยวิธี Column Analogy แต่อย่างไรก็ตามหากใช้ค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.5 การคำนวณก็จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย

ภาคผนวก ค.

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำหรับแบบจำลองต้นแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบที่จะทำการศึกษา และค่าที่กำหนดให้

ตัวแปร	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าที่กำหนดให้
จำนวนช่วงเสา	N	-	1, 2, 3, 4
ความยาวช่วงของพื้น	L_1	ม.	3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0
ความกว้างของพื้น	L_2	ม.	3.0, 6.0, 9.0, 12.0, 15.0
ความหนาของพื้น	h	ม.	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
สตีฟเนสของเสา	K_c	ตัน.ม	36000, 57600, 291600, 921600, 2250000

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณค่าสลิปแอสซิดโอง, K_c เมื่อเปลี่ยนค่าความหนาของพื้น, h โดยที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ดังนี้

$$L_1 = 9.0 \text{ ม.}$$

$$L_2 = 9.0 \text{ ม.}$$

$$K_c = 2.916 \text{ E } 5 \text{ ตัน.ม.}$$

N	h (ม.)	θ_{c1} (rad.)	θ_{c2} (rad.)	K_{t1} (t.m)	K_{t2} (t.m)
1	0.1	.14206 E-3		7.163 E 2	
	0.2	.14146 E-3		5.752 E 3	
	0.3	.13986 E-3		1.962 E 4	
	0.4	.13686 E-3		4.750 E 4	
	0.5	.13217 E-3		9.615 E 4	
2	0.1	.11983 E-3		9.054 E 2	
	0.2	.11914 E-3		7.302 E 3	
	0.3	.11731 E-3		2.520 E 4	
	0.4	.11391 E-3		6.251 E 4	
	0.5	.10876 E-3		1.323 E 5	
3	0.1	.12193 E-3	-.19818 E-4	8.514 E 2	7.080 E 2
	0.2	.12128 E-3	-.19762 E-4	6.856 E 3	5.651 E 3
	0.3	.11954 E-3	-.19606 E-4	2.356 E 4	1.895 E 4
	0.4	.11631 E-3	-.19283 E-4	5.791 E 4	4.433 E 4
	0.5	.11138 E-3	-.18718 E-4	1.205 E 5	8.451 E 4
4	0.1	.12171 E-3	-.17711 E-4	8.663 E 2	8.094 E 2
	0.2	.12106 E-3	-.17676 E-4	6.982 E 3	6.496 E 3
	0.3	.11932 E-3	-.17576 E-4	2.404 E 4	2.212 E 4
	0.4	.11608 E-3	-.17362 E-4	5.932 E 4	5.331 E 4
	0.5	.11115 E-3	-.16974 E-4	1.244 E 5	1.070 E 5

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณค่าสตีเฟนสวิตชอง, K_c เมื่อเปลี่ยนค่าความยาวช่วงของพจน, L_1 โดยที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ดังนี้

$$L_e = 9.0 \text{ ม.}$$

$$h = 0.3 \text{ ม.}$$

$$K_c = 2.916 \text{ E } 5 \text{ ตัน.ม.}$$

N	L_1 (m.)	θ_{c1} (rad.)	θ_{c2} (rad.)	K_{t1} (t.m)	K_{t2} (t.m)
1	3.0	.19695 E-4		3.263 E 5	
	6.0	.63033 E-4		3.194 E 4	
	9.0	.13986 E-3		1.962 E 4	
	12.0	.25748 E-3		1.625 E 4	
	15.0	.42266 E-3		1.540 E 4	
2	3.0	.18143 E-3		3.531 E 5	
	6.0	.55261 E-4		4.632 E 4	
	9.0	.11731 E-3		2.520 E 4	
	12.0	.21242 E-3		1.936 E 4	
	15.0	.35073 E-3		1.762 E 4	
3	3.0	.18354 E-4	-.10172 E-5	5.090 E 5	6.000 E 4
	6.0	.55795 E-4	-.62009 E-5	4.126 E 4	1.823 E 4
	9.0	.11954 E-3	-.19606 E-4	2.356 E 4	1.895 E 4
	12.0	.21684 E-3	-.41408 E-4	1.857 E 4	2.120 E 4
	15.0	.35689 E-3	-.69019 E-4	1.740 E 4	2.408 E 4
4	3.0	.18305 E-4	-.14368 E-5	5.698 E 5	2.615 E 5
	6.0	.55797 E-4	-.59235 E-5	4.281 E 4	2.431 E 4
	9.0	.11932 E-3	-.17576 E-4	2.404 E 4	2.212 E 4
	12.0	.21636 E-3	-.36925 E-4	1.879 E 4	2.352 E 4
	15.0	.35630 E-3	-.62457 E-4	1.725 E 4	2.641 E 4

ตารางที่ 3.4 ผลการคำนวณค่าสตีเฟนสวิตโฮง, K_c เมื่อเปลี่ยนค่าความกว้างของพิน, L_2 โดยที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ดังนี้

$$L_1 = 9.0 \text{ ม.}$$

$$h = 0.3 \text{ ม.}$$

$$K_c = 2.916 \text{ E } 5 \text{ ตัน.ม.}$$

N	L_2 (ม.)	θ_{c1} (rad.)	θ_{c2} (rad.)	K_{t1} (ต.ม)	K_{t2} (ต.ม)
1	3.0	.60547 E-4		2.195 E 4	
	6.0	.98882 E-4		1.562 E 4	
	9.0	.13986 E-3		1.962 E 4	
	12.0	.18682 E-3		2.692 E 4	
	15.0	.24040 E-3		3.818 E 4	
2	3.0	.54940 E-4		2.465 E 4	
	6.0	.81705 E-4		1.822 E 4	
	9.0	.11731 E-3		2.520 E 4	
	12.0	.16143 E-3		3.759 E 4	
	15.0	.21244 E-3		5.644 E 4	
3	3.0	.55118 E-4	-.57284 E-5	2.402 E 4	3.337 E 4
	6.0	.83292 E-4	-.16146 E-4	1.759 E 4	2.238 E 4
	9.0	.11954 E-3	-.19606 E-4	2.356 E 4	1.895 E 4
	12.0	.16349 E-3	-.20720 E-4	3.400 E 4	1.813 E 4
	15.0	.21416 E-3	-.22062 E-4	4.988 E 4	1.987 E 4
4	3.0	.55113 E-4	-.55704 E-5	2.422 E 4	4.194 E 4
	6.0	.83135 E-4	-.14545 E-4	1.777 E 4	2.486 E 4
	9.0	.11932 E-3	-.17476 E-4	2.404 E 4	2.212 E 4
	12.0	.16338 E-3	-.19115 E-4	3.506 E 4	2.272 E 4
	15.0	.21417 E-3	-.20932 E-4	5.180 E 4	2.627 E 4

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณค่าสลิปเฟสฮิดโอง, K_c เมื่อเปลี่ยนค่าสลิปเฟสของเสา, K_c โดยที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ดังนี้

$$L_1 = 9.0 \text{ ม.}$$

$$L_2 = 9.0 \text{ ม.}$$

$$h = 0.3 \text{ ม.}$$

N	K_c (t.m)	θ_{c1} (rad.)	θ_{c2} (rad.)	K_{c1} (t.m)	K_{c2} (t.m)
3	3.600 E 3	.36193 E-2	-.75607 E-3	-2.614 E 4	1.484 E 4
	5.760 E 4	.55733 E-3	-.96197 E-4	2.611 E 4	1.884 E 4
	2.916 E 5	.11954 E-3	-.19606 E-4	2.356 E 4	1.895 E 4
	9.216 E 5	.38369 E-4	-.62381 E-5	2.316 E 4	1.901 E 4
	2.250 E 6	.15777 E-4	-.25606 E-5	2.306 E 4	1.904 E 4

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณค่าสตีเฟนสวิตชิ่ง, K_c เพิ่มเติมเมื่อเปลี่ยนค่าความยาวช่วงของพื่น, L_1 และความกว้างของพื่น, L_2 สำหรับโครงสร้าง 3 ช่วงเสา โดยที่ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ดังนี้

$$h = 0.3 \text{ ม.}$$

$$K_c = 2.916 \text{ E } 5 \text{ ตัน.ม.}$$

L_1 (ม.)	L_2 (ม.)	θ_{c1} (rad.)	θ_{c2} (rad.)	K_{t1} (t.m)	K_{t2} (t.m)
4.5	9.0	.34100 E-4	-.29508 E-5	7.583 E 4	2.377 E 4
7.5	9.0	.84017 E-4	-.11726 E-4	2.933 E 4	1.807 E 4
10.5	9.0	.16342 E-3	-.29608 E-4	2.039 E 4	2.003 E 4
13.5	9.0	.28094 E-3	-.54680 E-4	1.756 E 4	2.253 E 4
9.0	4.5	.68707 E-4	-.12250 E-4	1.710 E 4	2.752 E 4
9.0	7.5	.10033 E-3	-.18382 E-4	1.995 E 4	2.018 E 4
9.0	10.5	.14066 E-3	-.20257 E-4	2.823 E 4	1.826 E 4
9.0	13.5	.18799 E-3	-.21265 E-4	4.110 E 4	1.863 E 4

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างตามตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีจำนวนช่วงเสาแตกต่างกัน

จำนวนช่วงเสา	วิธีวิเคราะห์	โมเมนต์ในเสาริม (ตัน.เมตร)	โมเมนต์ในเสาใน (ตัน.เมตร)
1	ไฟไนท์เอลเลเมนต์	25.90	
	งานวิจัยนี้	26.83	
	ความคลาดเคลื่อน	3.6 %	
2	ไฟไนท์เอลเลเมนต์	20.84	
	งานวิจัยนี้	19.57	
	ความคลาดเคลื่อน	-6.1 %	
3	ไฟไนท์เอลเลเมนต์	21.46	-3.83
	งานวิจัยนี้	20.85	-3.88
	ความคลาดเคลื่อน	-2.8 %	1.3 %
4	ไฟไนท์เอลเลเมนต์	21.38	-3.33
	งานวิจัยนี้	20.60	-3.12
	ความคลาดเคลื่อน	-3.6 %	-6.3 %

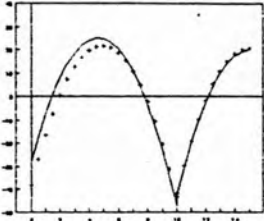
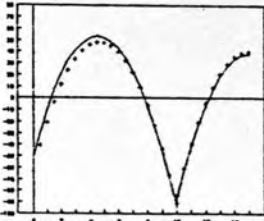
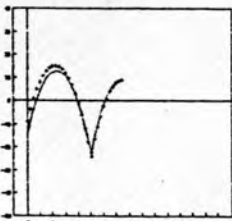
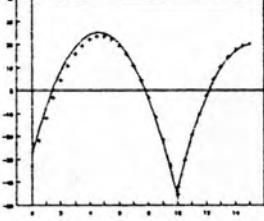
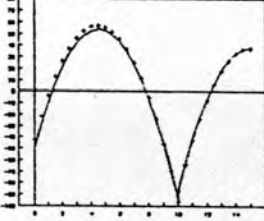
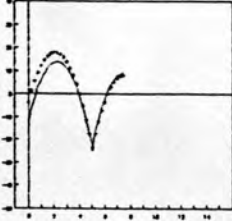
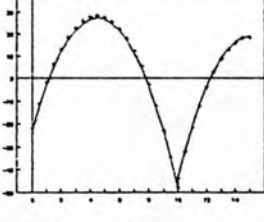
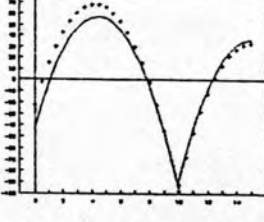
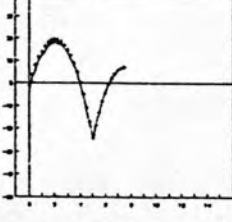
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างตามตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้นแตกต่างกัน

โครงสร้าง	วิธีวิเคราะห์	โมเมนต์ในเสาริม (ตัน.เมตร)	โมเมนต์ในเสาใน (ตัน.เมตร)
<u>2.1</u> $L_2/L_1=0.50$ $L_1=8.0, L_2=4.0$ $K_{c1}=5194, K_{c2}=7813$	ใฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	12.66 12.62 -0.3 %	-2.54 -2.54 0.0 %
<u>2.2</u> $L_2/L_1=0.75$ $L_1=8.0, L_2=6.0$ $K_{c1}=5941, K_{c2}=6362$	ใฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	16.63 16.64 0.1 %	-3.42 -3.45 0.9 %
<u>2.3</u> $L_2/L_1=1.00$ $L_1=8.0, L_2=8.0$ $K_{c1}=7490, K_{c2}=5453$	ใฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	21.46 20.85 -2.8 %	-3.83 -3.88 1.3 %
<u>2.4</u> $L_2/L_1=1.50$ $L_1=6.0, L_2=9.0$ $K_{c1}=12996, K_{c2}=5259$	ใฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	14.03 12.56 -10.5 %	-1.80 -1.91 6.1 %
<u>2.5</u> $L_2/L_1=2.00$ $L_1=4.0, L_2=8.0$ $K_{c1}=21713, K_{c2}=7230$	ใฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	5.97 4.76 -20.3 %	-0.62 -0.74 19.4 %

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างตามตัวอย่างที่ 3 ซึ่งความยาวช่วงของพื้นมีค่าไม่เท่ากัน

โครงสร้าง	วิธีวิเคราะห์	โมเมนต์ในเสาริม (ตัน.เมตร)	โมเมนต์ในเสาใน (ตัน.เมตร)
<u>3.1</u> $L_{11}/L_{12} = 0.50$ $L_1 = 4.0, 8.0, 4.0$ $L_2 = 4.0$ $K_{e1} = 7490, K_{e2} = 6633$	ไฟไนท์เอลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	1.52 0.69 -54.6 %	7.29 6.02 -17.4 %
<u>3.2</u> $L_{11}/L_{12} = 0.75$ $L_1 = 6.0, 8.0, 6.0$ $L_2 = 6.0$ $K_{e1} = 7490, K_{e2} = 5908$	ไฟไนท์เอลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	8.09 7.19 -11.1 %	4.45 3.38 -24.0 %
<u>3.3</u> $L_{11}/L_{12} = 1.00$ $L_1 = 8.0, 8.0, 8.0$ $L_2 = 8.0$ $K_{e1} = 7490, K_{e2} = 5453$	ไฟไนท์เอลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	21.46 20.85 -2.8 %	-3.83 -3.88 1.3 %
<u>3.4</u> $L_{11}/L_{12} = 1.50$ $L_1 = 9.0, 6.0, 9.0$ $L_2 = 9.0$ $K_{e1} = 7490, K_{e2} = 5356$	ไฟไนท์เอลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	32.38 32.87 1.5 %	-17.70 -14.92 -15.7 %
<u>3.5</u> $L_{11}/L_{12} = 2.00$ $L_1 = 8.0, 4.0, 8.0$ $L_2 = 8.0$ $K_{e1} = 7490, K_{e2} = 6342$	ไฟไนท์เอลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	22.94 23.36 1.8 %	-14.60 -12.65 -13.4 %

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในแผ่นพื้นที่ตำแหน่งเสา จากการวิเคราะห์โครงสร้างตามตัวอย่างที่ 4 ระหว่างวิธีอย่างง่ายและวิธีเฟรมเสมือน ซึ่งโครงสร้างตัวอย่างมี ขนาดเสา และสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้นแตกต่างกัน

C/L	L ₂ /L ₁		
	0.5	1.0	2.0
1/5	<p>4.1.1</p>  <p>-28.0 -47.3 -42.5 (-38.4) (-43.2) (-41.7)</p>	<p>4.1.2</p>  <p>-50.7 -94.3 -86.9 (-62.9) (-91.6) (-84.6)</p>	<p>4.1.3</p>  <p>-14.3 -22.8 -21.7 (-8.8) (-24.2) (-22.3)</p>
1/10	<p>4.2.1</p>  <p>-27.7 -47.3 -42.5 (-33.1) (-45.3) (-42.1)</p>	<p>4.2.2</p>  <p>-50.1 -94.4 -87.0 (-43.1) (-95.9) (-87.6)</p>	<p>4.2.3</p>  <p>-11.8 -23.4 -22.1 (-3.7) (-24.4) (-23.4)</p>
1/20	<p>4.3.1</p>  <p>-23.0 -48.4 -43.4 (-21.6) (-48.0) (-43.8)</p>	<p>4.3.2</p>  <p>-42.4 -96.1 -88.5 (-22.1) (-97.6) (-92.0)</p>	<p>4.3.3</p>  <p>-3.2 -24.9 -24.0 (-0.9) (-24.3) (-24.1)</p>

หมายเหตุ : กราฟ + และค่าในวงเล็บ แสดงค่าโมเมนต์ตามวิธีเฟรมเสมือน

C/L คือสัดส่วนขนาดเสาต่อความยาวช่วง

L₂/L₁ คือสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้น

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างตามตัวอย่างที่ 5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสตีฟเนสของคานากับสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้นเป็นเส้นตรง

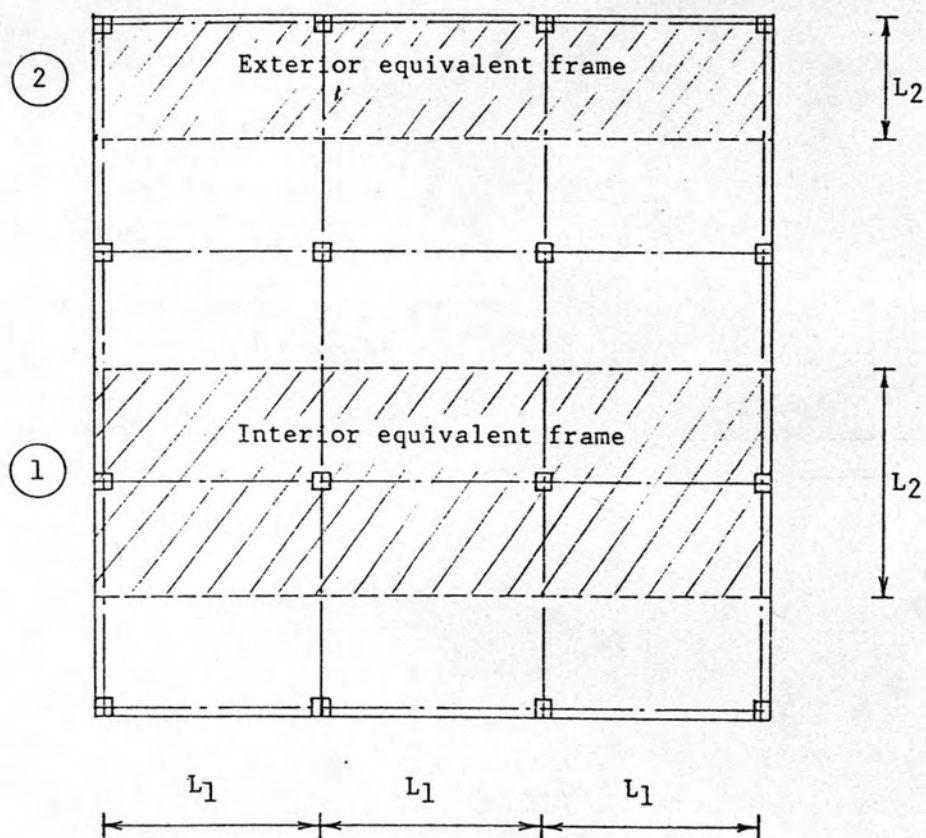
โครงสร้าง	วิธีวิเคราะห์	โมเมนต์ในเสาริม (คณ. เมตร)	โมเมนต์ในเสาใน (คณ. เมตร)
<u>5.1</u> $L_2/L_1=0.50$ $L_1=8.0, L_2=4.0$ $K_{c1}=2363, K_{c2}=5903$	ไฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	12.66 9.49 -25.0 %	-2.54 -3.19 25.6 %
<u>5.2</u> $L_2/L_1=0.75$ $L_1=8.0, L_2=6.0$ $K_{c1}=5095, K_{c2}=5794$	ไฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	16.63 15.83 -4.8 %	-3.42 -3.51 2.6 %
<u>5.3</u> $L_2/L_1=1.00$ $L_1=8.0, L_2=8.0$ $K_{c1}=7828, K_{c2}=5685$	ไฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	21.46 21.12 -1.6 %	-3.83 -3.91 2.1 %
<u>5.4</u> $L_2/L_1=1.50$ $L_1=6.0, L_2=9.0$ $K_{c1}=13293, K_{c2}=5468$	ไฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	14.03 12.63 -10.0 %	-1.80 -1.94 7.8 %
<u>5.5</u> $L_2/L_1=2.00$ $L_1=4.0, L_2=8.0$ $K_{c1}=18759, K_{c2}=5251$	ไฟไนท์เอลเลเมนต์ งานวิจัยนี้ ความคลาดเคลื่อน	5.97 4.64 -22.3 %	-0.62 -0.64 3.2 %

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าโมเมนต์ที่ถ่ายจากพื้นเข้าสู่เสา (หน่วย ตัน.เมตร)

ขนาดเสา	แบบจำลองที่ 1 (เสาเป็นชิ้นส่วนตัน)	แบบจำลองที่ 2 (เสาเป็นชิ้นส่วนคาน)	ความคลาดเคลื่อน
0.20x0.20	3.024	2.916	-3.6 %
0.40x0.40	4.300	3.584	-16.7 %
0.80x0.80	4.720	3.636	-23.0 %

ภาคผนวก ง.

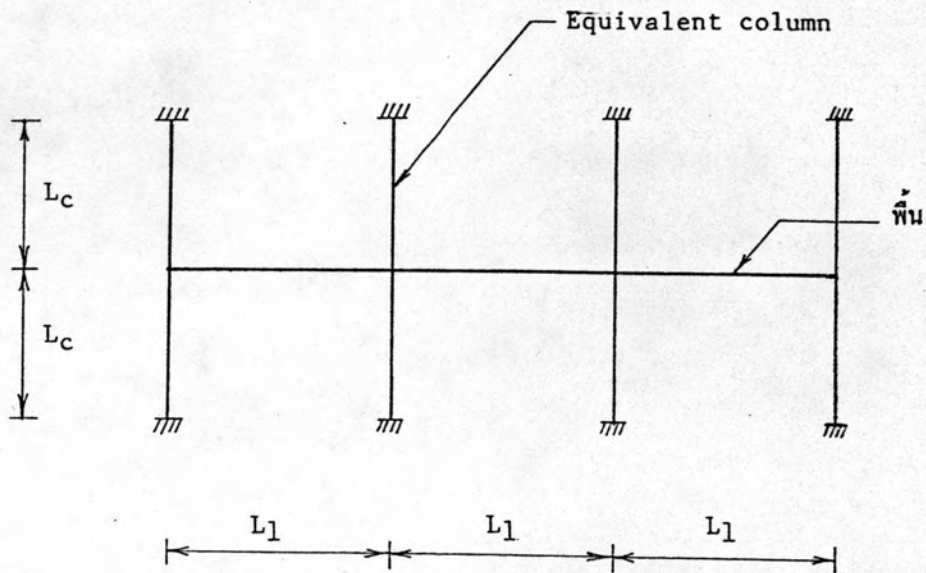
รายการรูปประกอบ



รูปที่ 1.1 นิยามของเฟรมเสมือน

L_1 = ความยาวของช่วงเสาในทิศทางที่พิจารณา

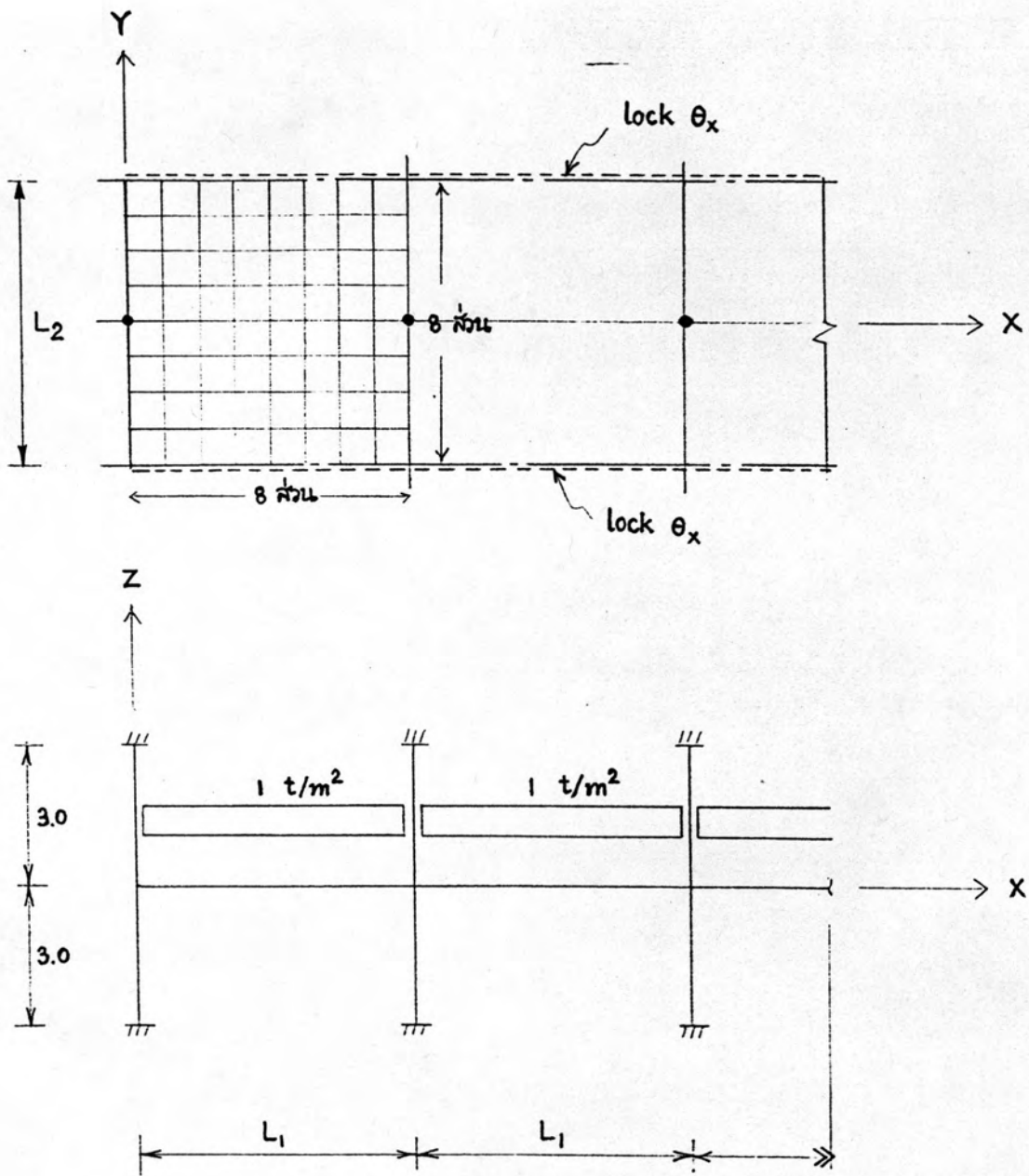
L_2 = ความกว้างของแผ่นพื้นในทิศทางตั้งฉากกับที่พิจารณา



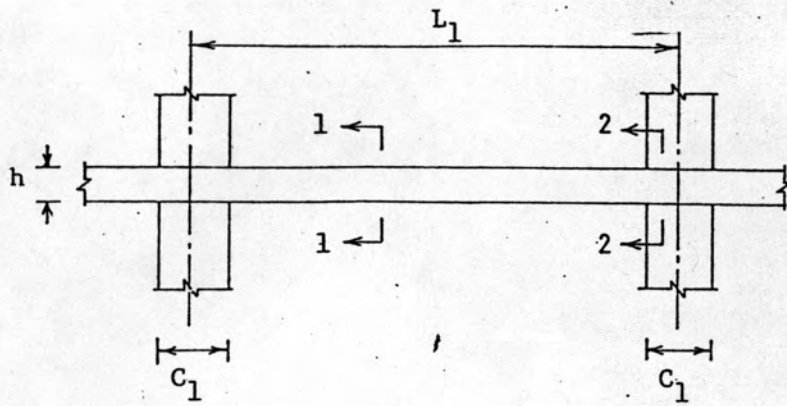
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของเฟรมเสมือน

L_1 = ความยาวช่วงของพื้น

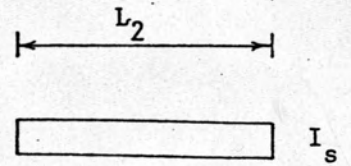
L_c = ความสูงระหว่างชั้น



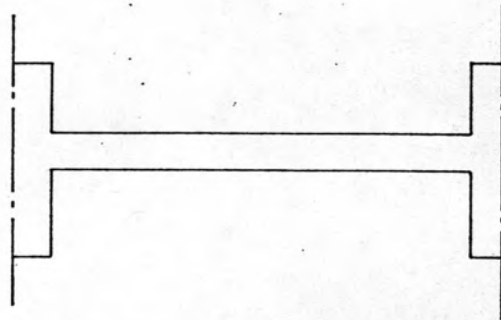
รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ



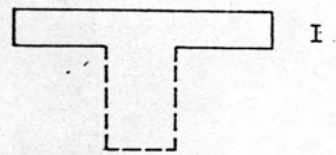
(ก)



หน้าตัด 1-1



(ข)

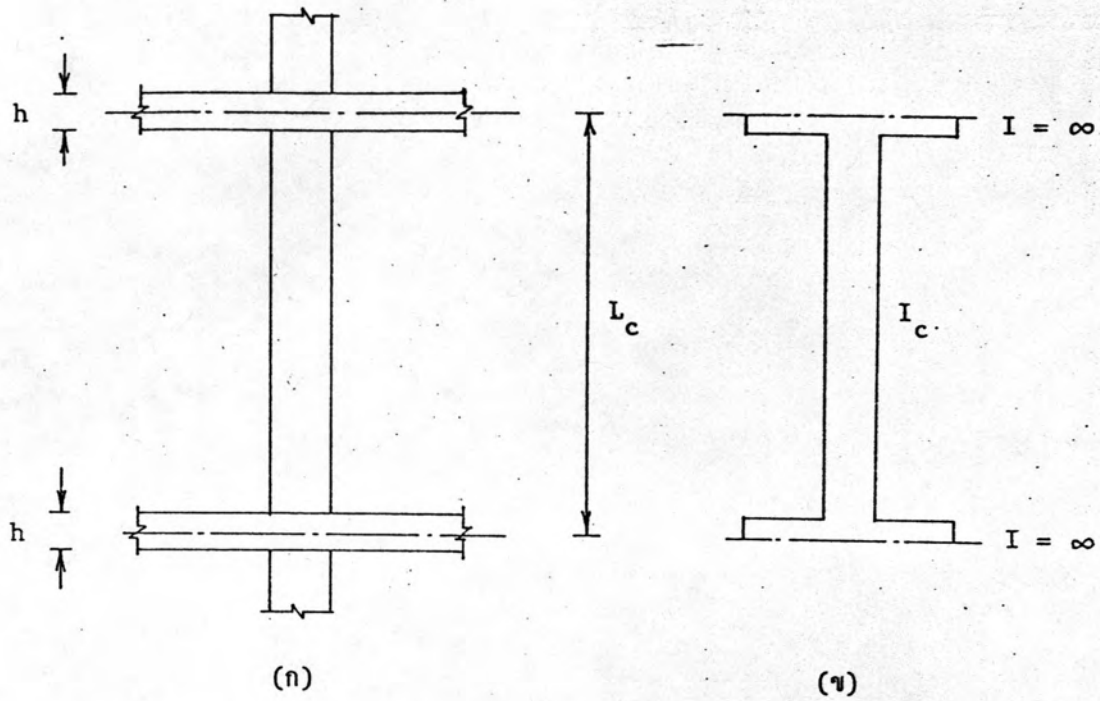


หน้าตัด 2-2

รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของหน้าตัดพื้นที่ใช้คำนวณหาค่าสติเฟเนส

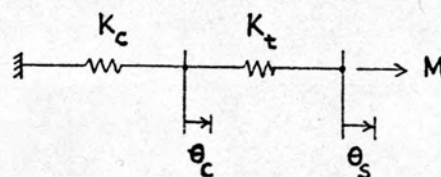
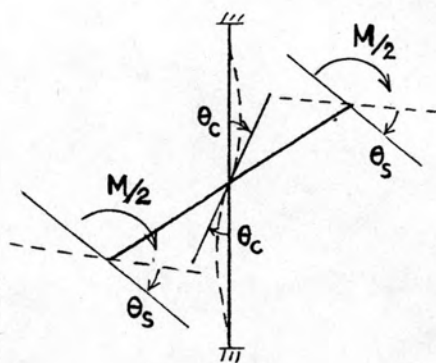
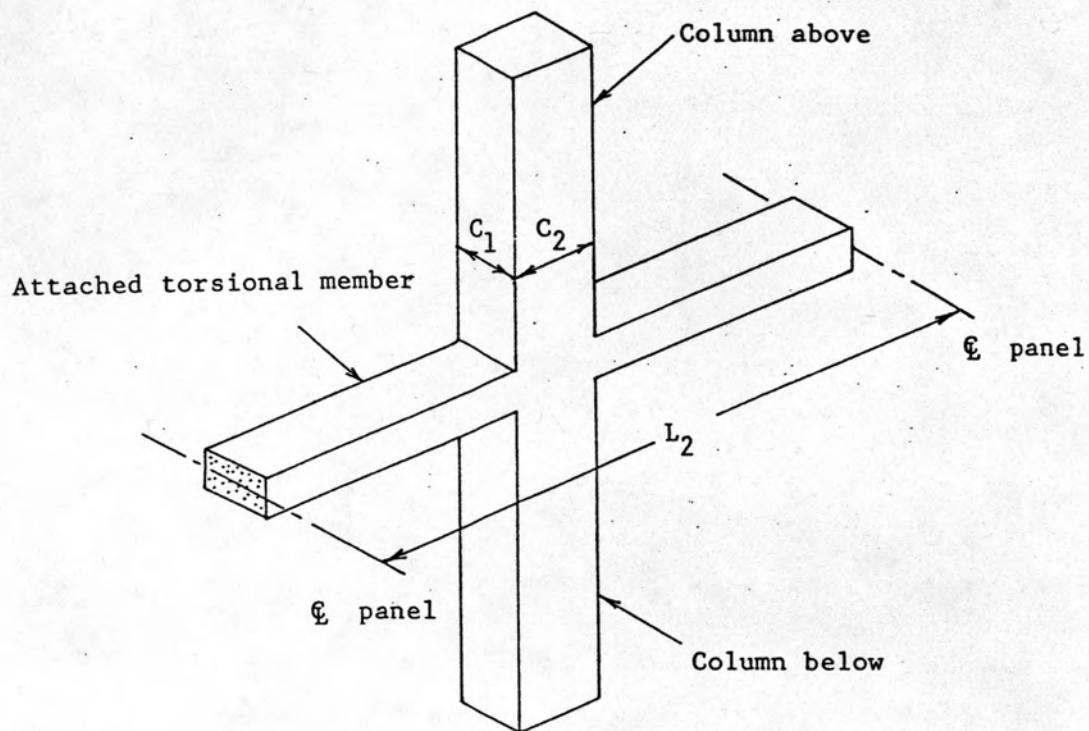
(ก) โครงสร้างแผ่นพื่นต่อกับเสา

(ข) โมเมนต์ความเฉื่อยในพื้นที่สมมุติขึ้น

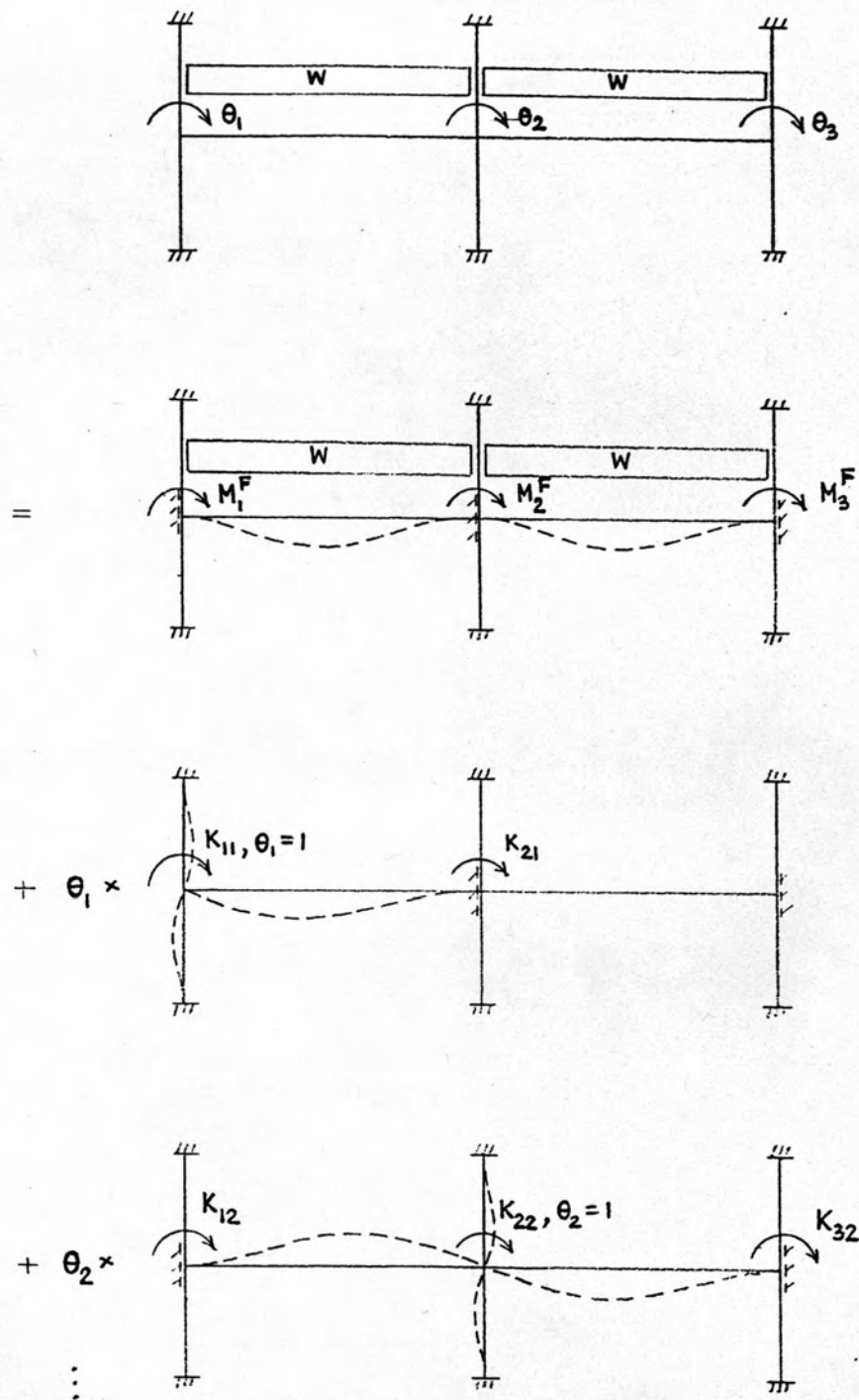


รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของหน้าตัดเสาที่ใช้คำนวณหาค่าสคิปเนส

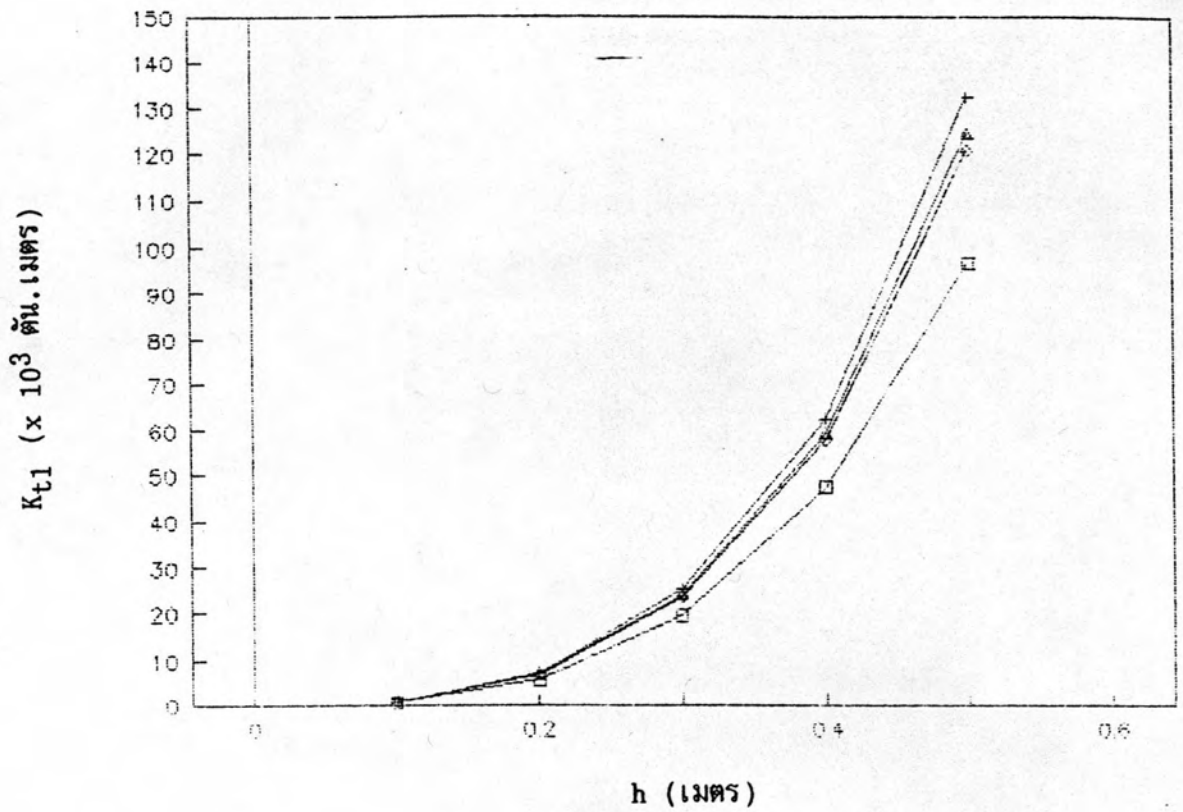
- (ก) โครงสร้างเสาคู่กับแผ่นพื้น
- (ข) โมเมนต์ความเฉื่อยในเสาที่สมมติขึ้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเสาเสมือน

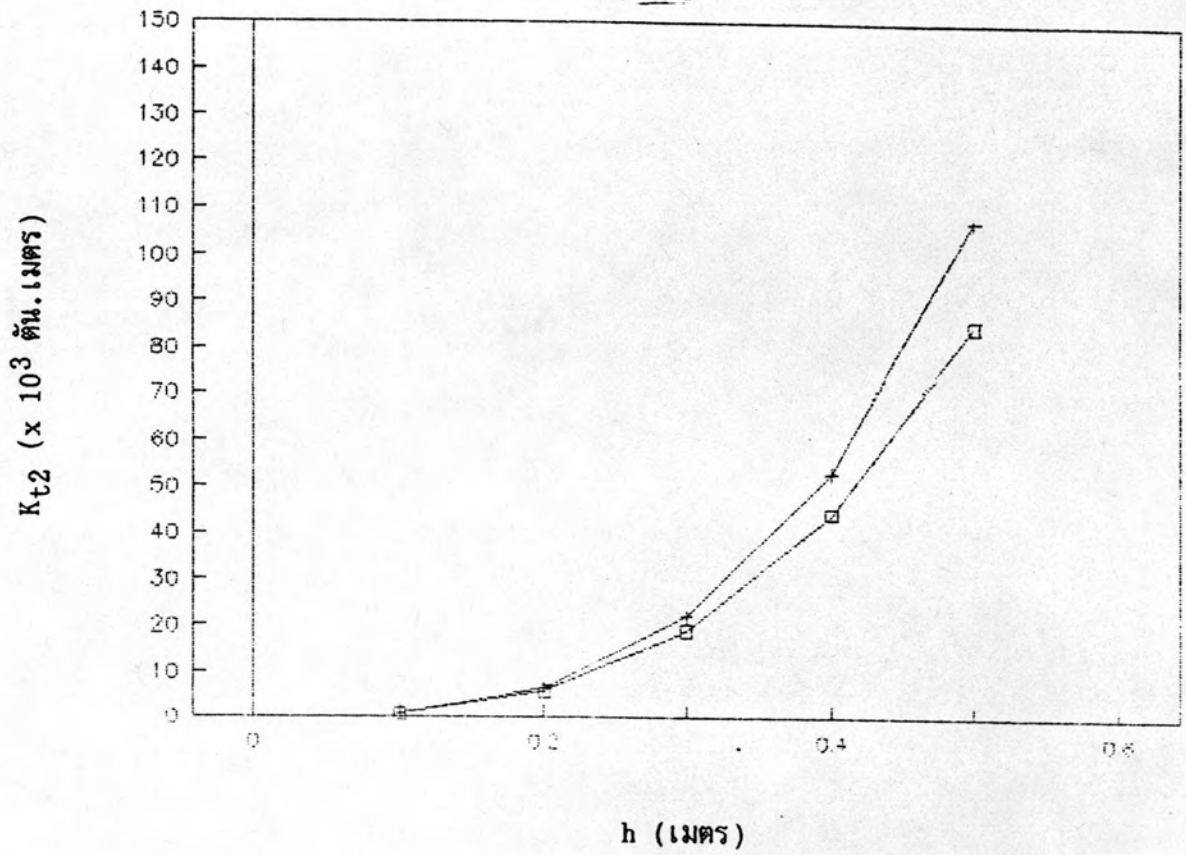


รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเปลี่ยนตำแหน่งของโครงข้อแข็งขึ้นเดียว



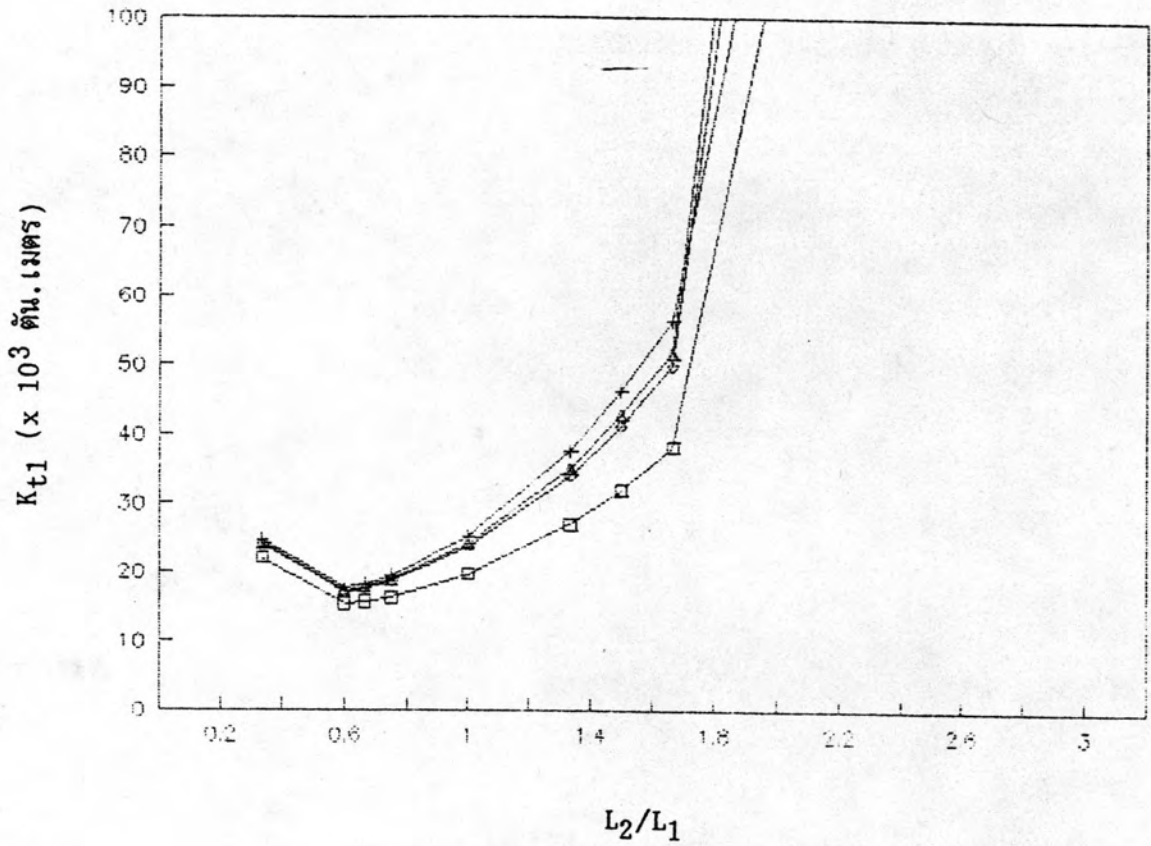
รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพื้น, h กับสถิติเนตยัดโยงที่เสาต้นริม, K_{t1}

- โครงสร้าง 1 ช่องเสา
- + โครงสร้าง 2 ช่องเสา
- ◇ โครงสร้าง 3 ช่องเสา
- △ โครงสร้าง 4 ช่องเสา



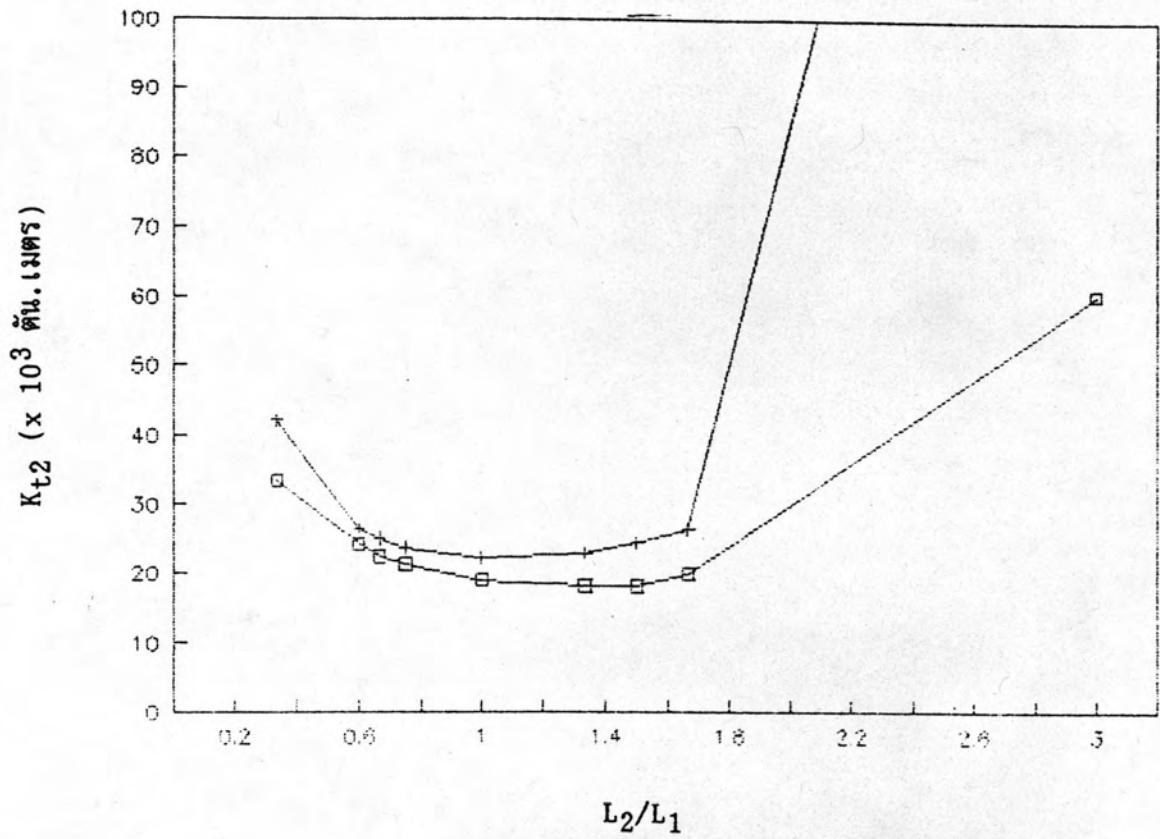
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพื้น, h กับสถิติเอนสียดของที่เสาต้นใน, K_{t2}

- โครงสร้าง 3 ช่วงเสา
- + โครงสร้าง 4 ช่วงเสา



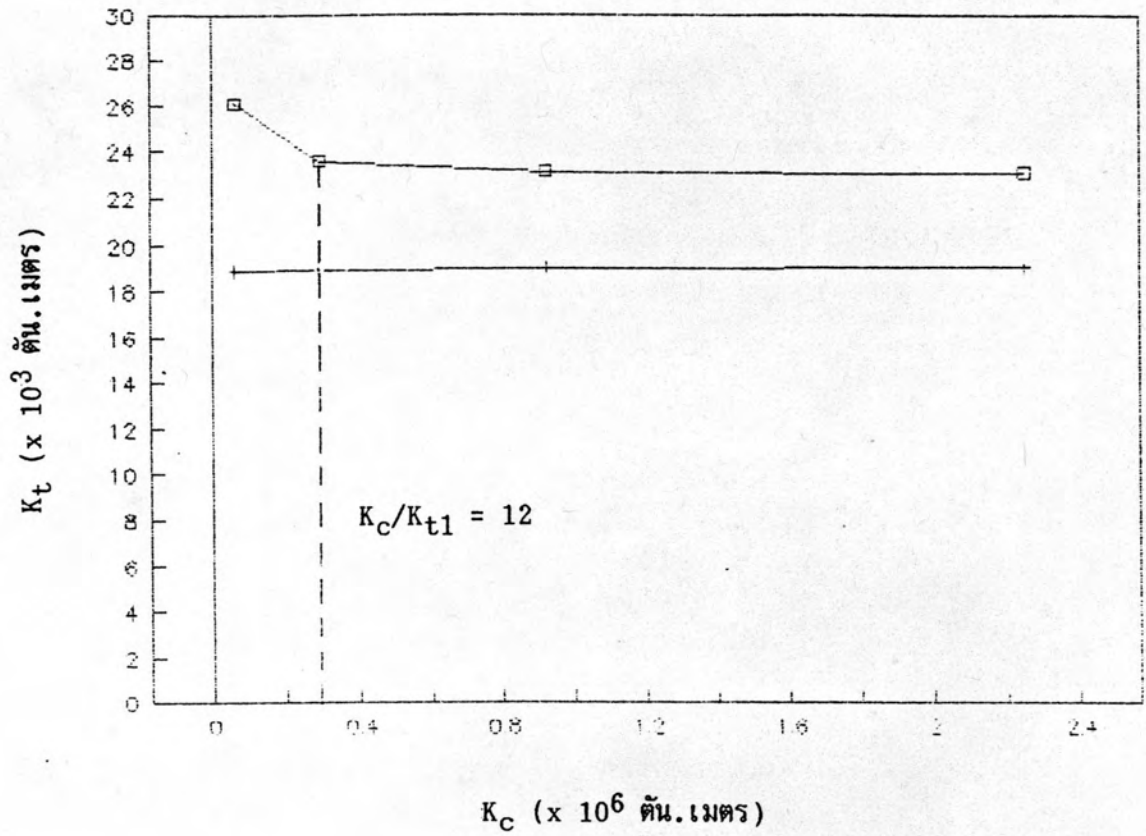
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้น, L_2/L_1 กับสติฟเนสคิโงที่เสาต้นริม, K_{t1}

- โครงสร้าง 1 ช่วงเสา
- + โครงสร้าง 2 ช่วงเสา
- ◇ โครงสร้าง 3 ช่วงเสา
- △ โครงสร้าง 4 ช่วงเสา



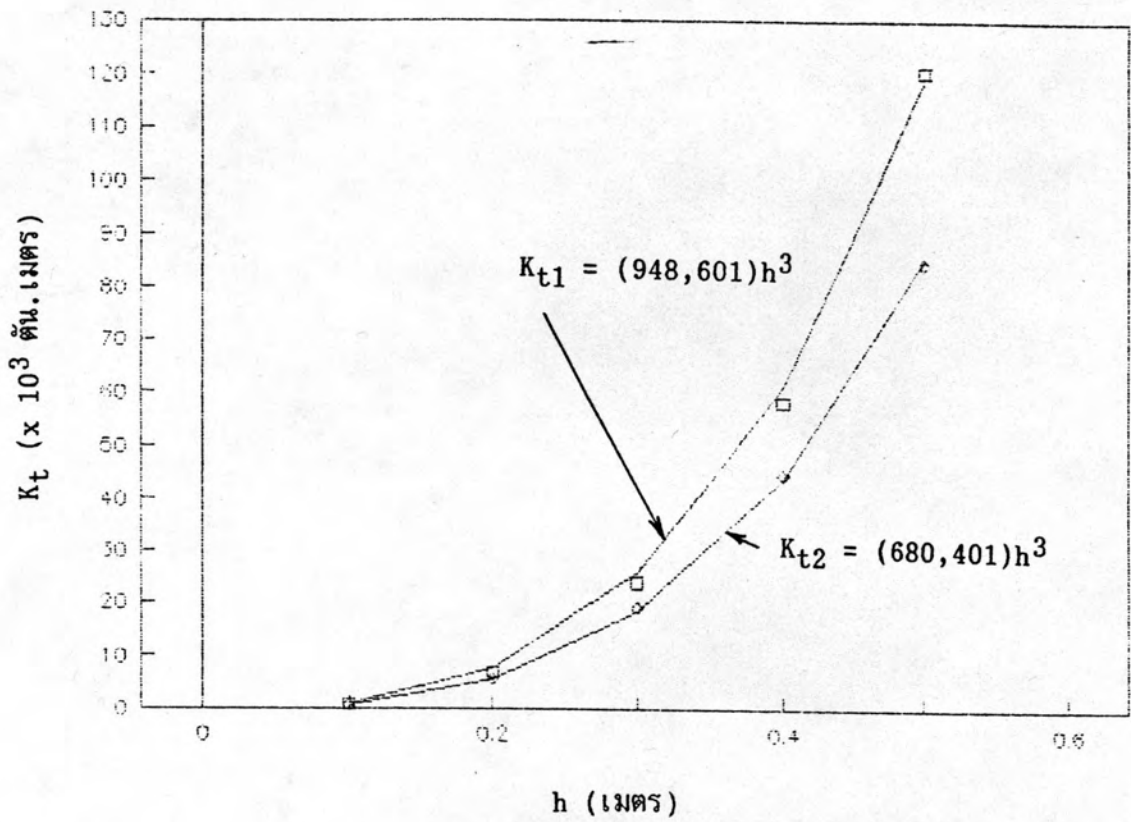
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของพื้น, L_2/L_1 กับสัมประสิทธิ์ของที่เสาด้านใน, K_{t2}

- โครงสร้าง 3 ช่วงเสา
- + โครงสร้าง 4 ช่วงเสา



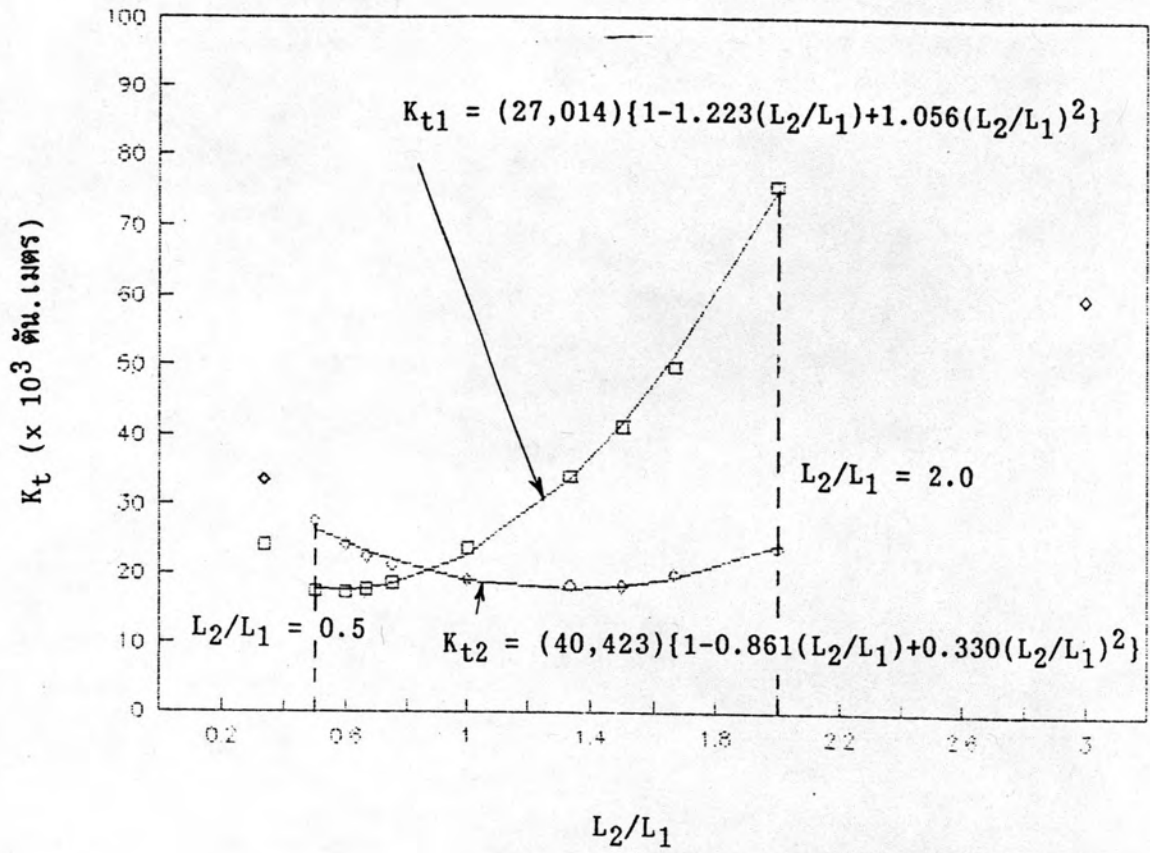
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสของเสา, K_c กับสติฟเนสคอร์ดของ สำหรับโครงสร้าง 3 ช่วงเสา

- สติฟเนสคอร์ดของที่เสาด้านริม, K_{t1}
- + สติฟเนสคอร์ดของที่เสาด้านใน, K_{t2}



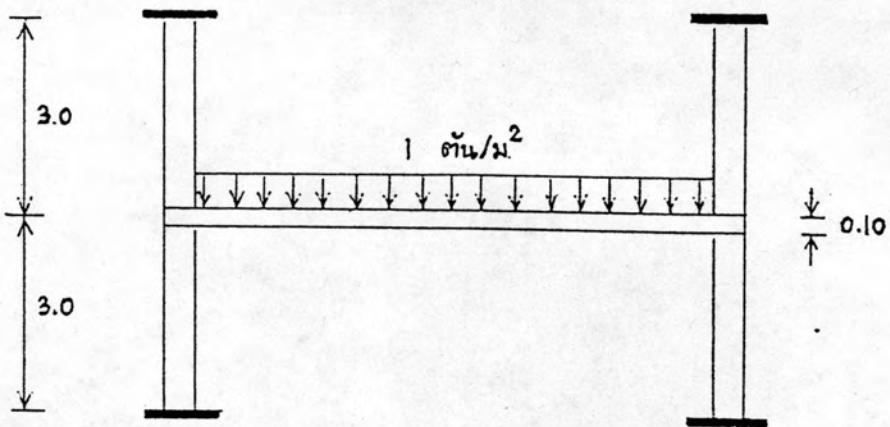
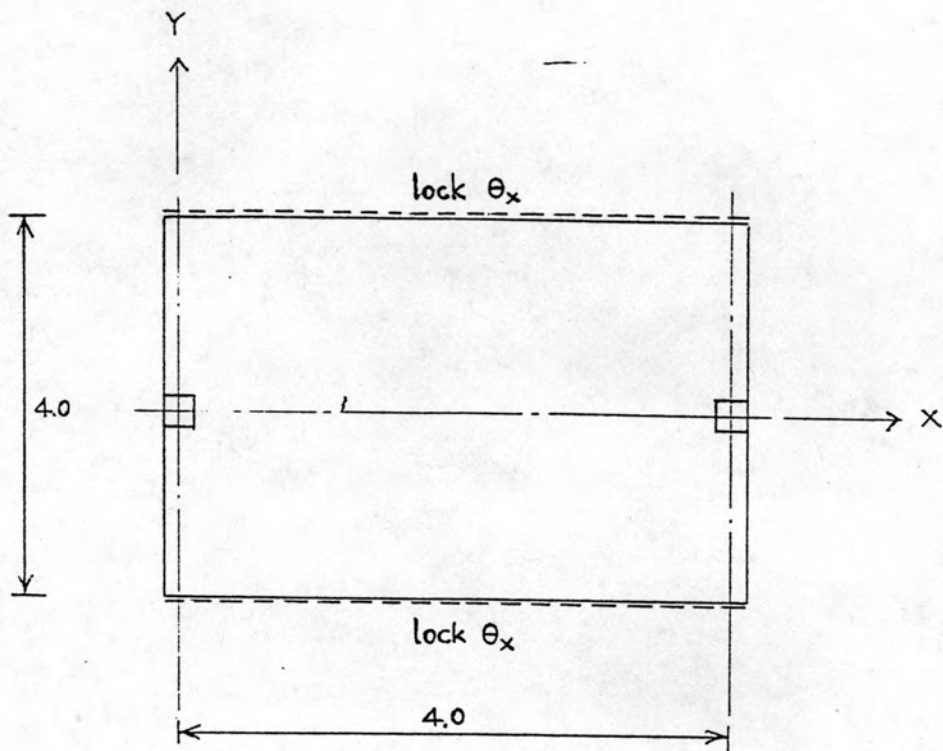
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพื้น, h กับสติฟเนสบิดของ, K_t สำหรับโครงสร้าง 3 ช่วงเสา

- สติฟเนสบิดของที่เสาต้นริม, K_{t1}
- ◇ สติฟเนสบิดของที่เสาต้นใน, K_{t2}

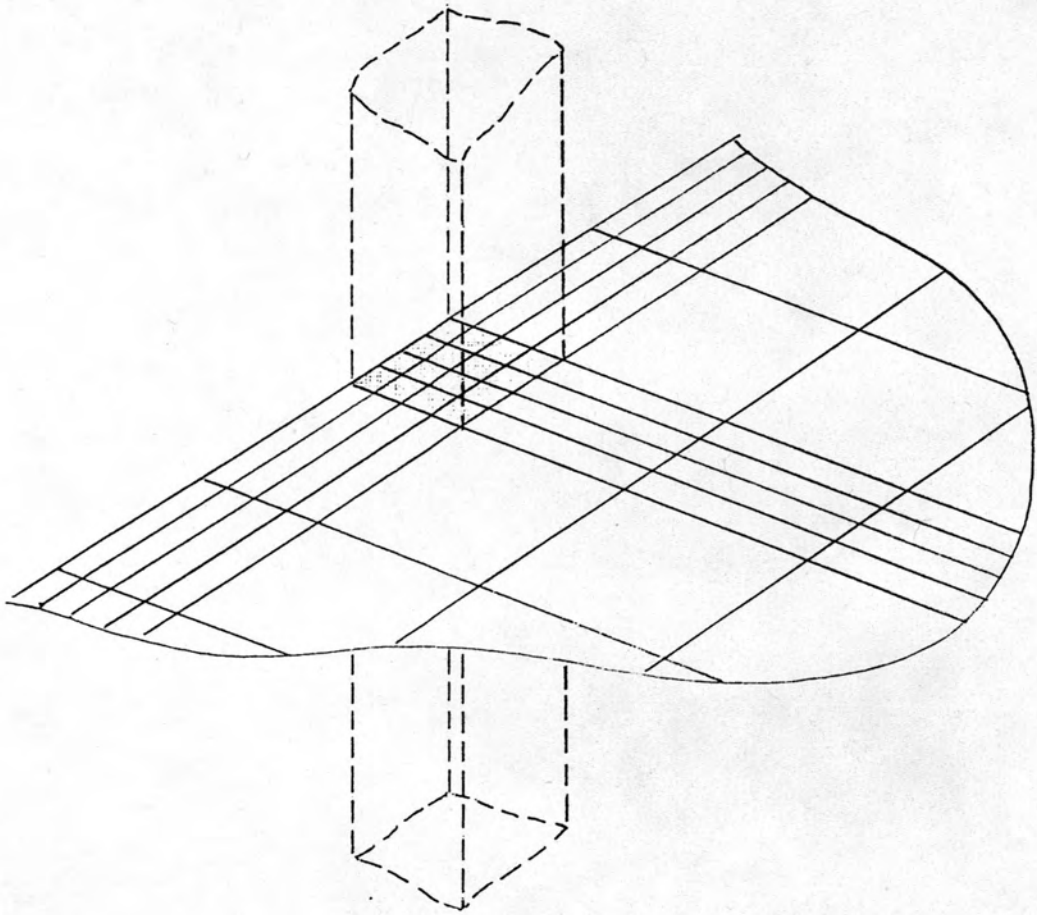


รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความกว้างต่อความยาวช่วงของ
 พื่น, L_2/L_1 กับสติฟเนสยืดโยง, K_t สำหรับโครงสร้าง 3 ช่วงเสา

- สติฟเนสยืดโยงที่เสาต้นริม, K_{t1}
- ◇ สติฟเนสยืดโยงที่เสาต้นใน, K_{t2}



รูปที่ ก.1 โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบ 1 ช่วงเสา



รูปที่ ก.2 แบบจำลองที่แทนโครงสร้างเสาด้วยชิ้นส่วนตัน

ประวัติผู้เขียน

นายวัฒนชัย สมิทธาร เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2509 ที่ อำเภอ
กระทุ่มแบน จังหวัด สมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
โยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2530 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2532