

เอกสารอ้างอิง

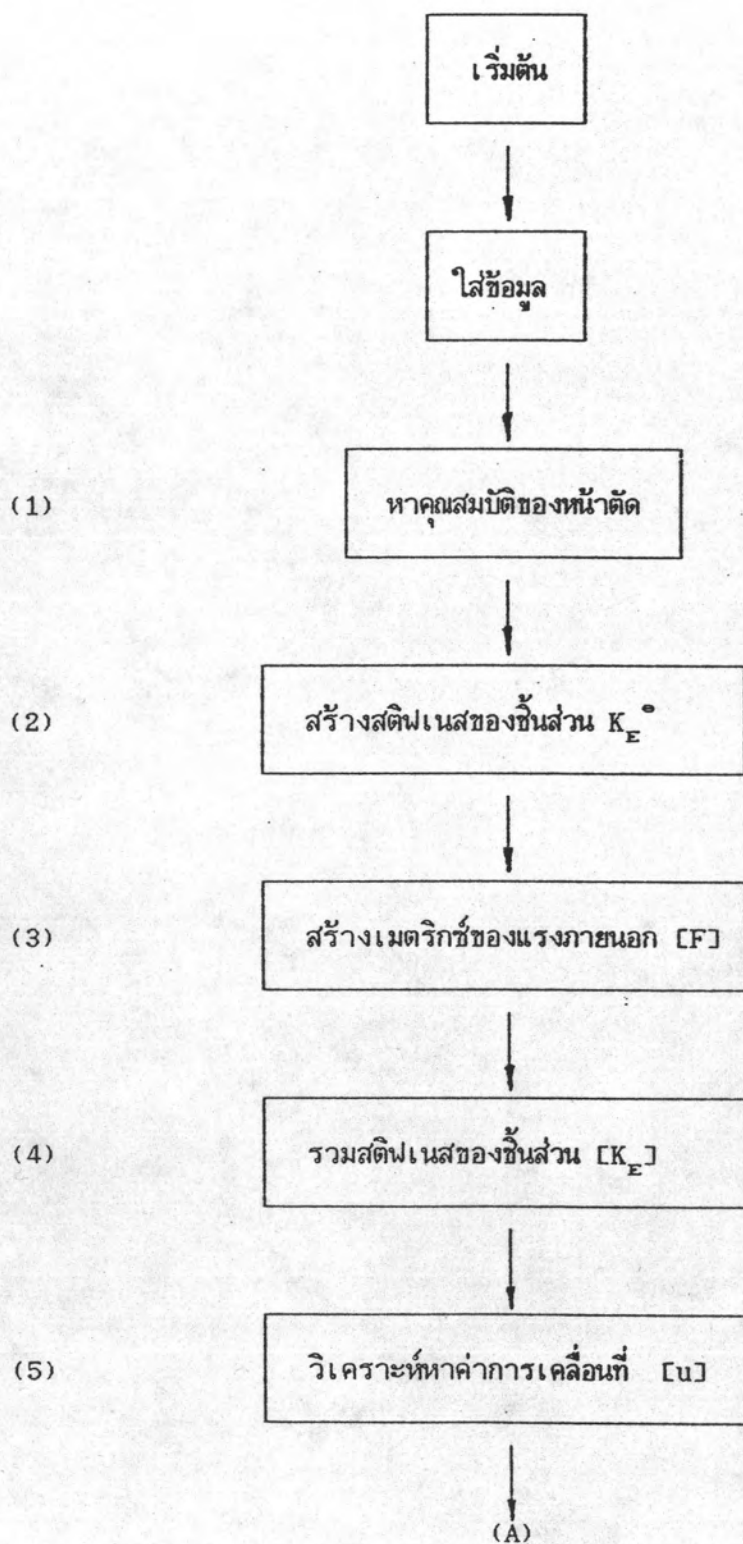
1. Vlasov, V.Z., Thin - Walled Elastic Beams , Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1961.
2. Timoshenko, S and Gere, J.M., Theory of Elastic Stability , McGraw-Hill, New York, 1963.
3. Krahula, J.L., "Analysis of Bent and Twisting Bar Using The finite Element Method" Journal of AIAA , Vol 5, No.6, pp.1194, 1967.
4. Krajcinovic, D., "A Consistent Discrete Technique for Thin-Walled Assemblages", International Journal of Solids structures Vol 5, pp.639-662, 1969.
5. Teoman, B.P., "Torsional Flexural Buckling of Thin-Walled Sections Under Eccentric Load" Cornell Engineering Research Bulletin No. 65-1, Sept 1969.
6. Barsoum, R.S. and Gallagher, R.H. , "Finite Element Analysis of Torsional and Torsional - Flexural Stability Problems ", International Journal for Numerical Methods in Engineering Vol 2, pp.335-352, 1970.
7. Nishino, F., Kasemset, C. and Lee, S.L., "Variational Formulation of Stability Problem for Thin-Walled Member, " Ingenieur-Archiv Vol 43, pp.58-68, 1973.
8. Bazant, Z.P., Nimeriri, M.E., "Large-Deflection Spatial Buckling of Thin-Walled Beams and Frames", Journal of The Engineering Mechanics Division , No. EM6, Dec. 1973, pp.1259-1281.

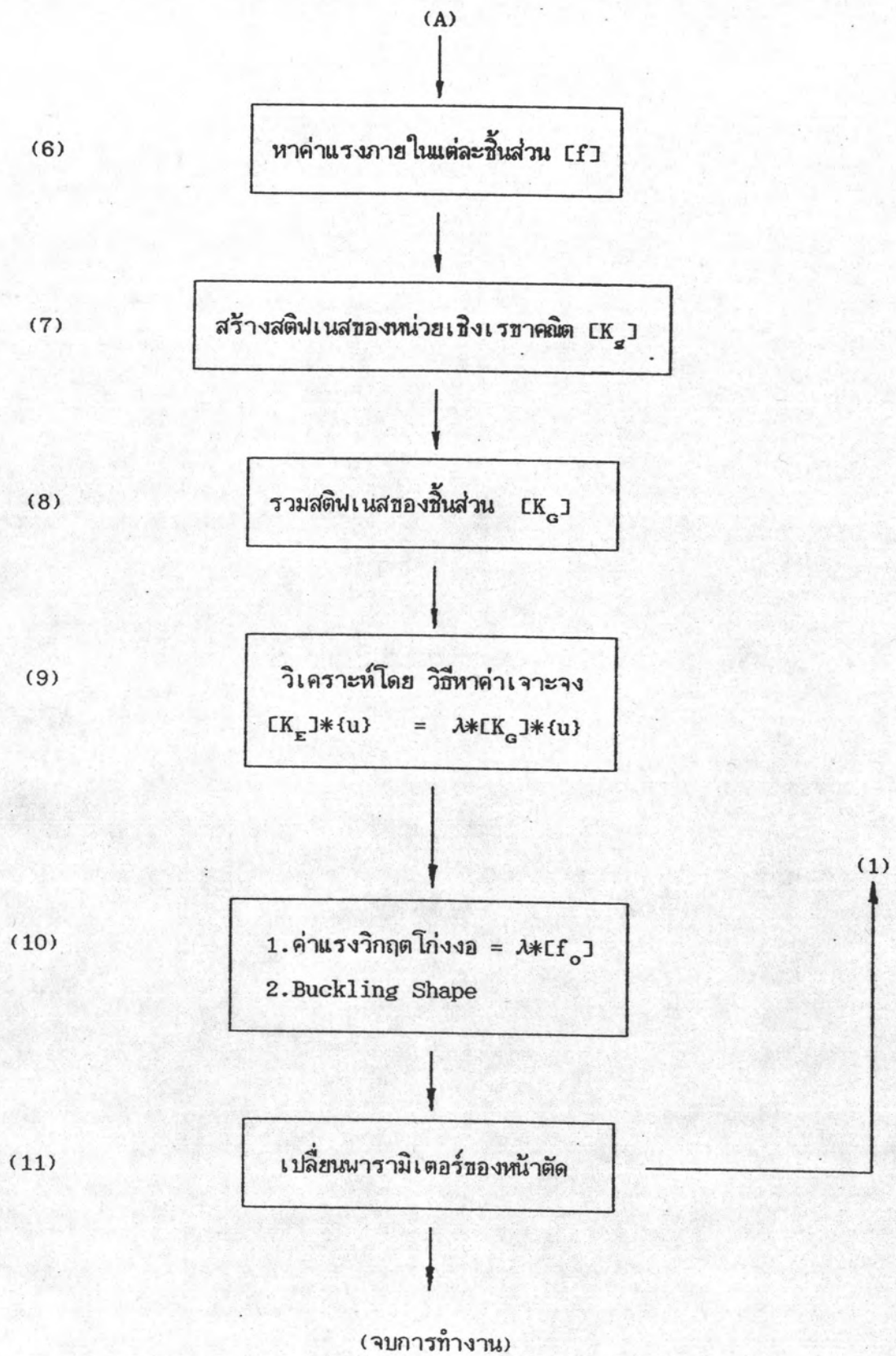
9. Bathe, K.J. and Wilson, E.L., Numerical Methods in Finite Element Analysis , Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1976.
10. Chen, W.F. and Atsuta, T., Theory of Beam-Columns , Vol 2 Space Behaviour and Design, McGraw-Hill, New York , 1977.
11. Yoo, C.H., "Bimoment Contribution to Stability of Thin-Walled Assemblages" , Computer & Structures , Vol 11 , pp.465-471 , 1980.
12. Oden, J.T. and Ripperger, E.A., Mechanics of Elastic Structures Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1981.
13. Hancock, G.J. and Baigent, A.H., "Structural Analysis of Assemblages of Thin-Walled Member" Engineering Structures , Vol 4 , pp.207-216 , 1982.
14. Gouri Dhatt , Gilbert Touzot , The Finite Element Method Displayed John Wiley & Sons , 1985.
15. Hasegawa, A., Liyange, K.K. and Nishino, F. , "Spatial Instability and Nonlinear Finite Displacement Analysis of Thin-Walled Members and Frames " , Journal of Faculty of Engineering The University of Tokyo (B) , Vol 38, No 4 , pp.19-78 , 1986.
16. Yang, Y.B. , McGuire, W. , "Stiffness Matrix For Geometric Nonlinear Analysis", Journal of Structural Engineering , ASCE, Vol 112 No. ST4, Apr. 1986, pp.879-905.
17. Waldron, P. , "Sectorial Properties Of Straight Thin-Walled Beams", Computer & Structure , Vol 24 , No.1 , 1986, pp.147-156.
18. Trahair N.S. , The Behaviour And Design Of Steel Structures, John Wiley & Sons , 1976.

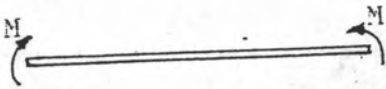
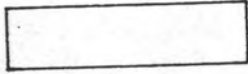
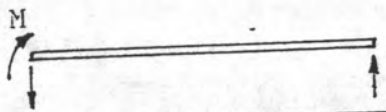
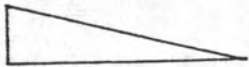
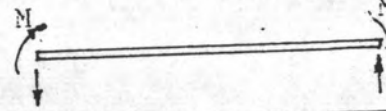

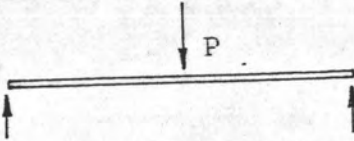
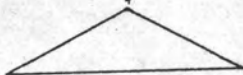
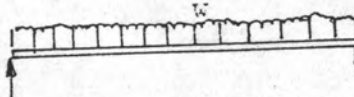
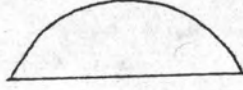
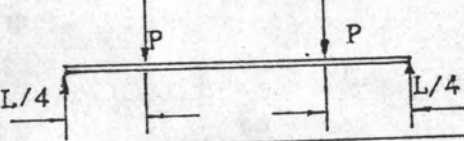
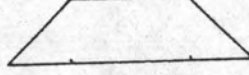
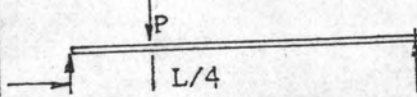
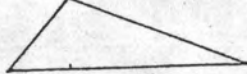
รายการตารางประกอบ

ตาราง 1.1

แผนภูมิแสดงขั้นตอนการคำนวณ

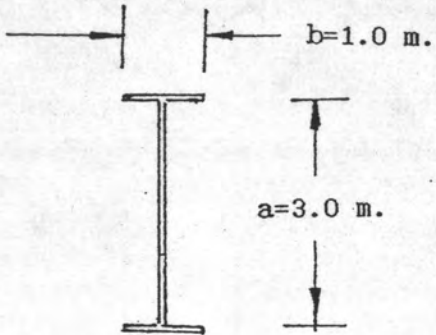
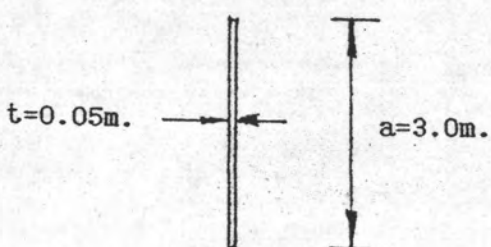




ลักษณะของน้ำหนักที่กระทำ	ลักษณะโมเมนต์ดัดที่เกิด	M_{Max}	m
		M	1.00
		M	1.75
		M	2.56
		$PL/4$	1.35
		$\frac{wL^2}{8}$	1.13
		$PL/4$	1.04
		$3PL/16$	1.44

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวประกอบปรับแก้โมเมนต์วิกฤติ โถงงอสำหรับคานที่มีจุดรองรับธรรมดา ตามวิธีการ ของ Trahair.N.S [18]

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหน้าตัดตัวอย่างที่ 1

คุณสมบัติของหน้าตัด		ความหนาตัดรูปตัวไอ	ความแคบ
พื้นที่หน้าตัด	A (ม.)	0.25	0.15
ระยะจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเทียบกับจุดศูนย์กลางมวล y_u, z_u	(ม.)	0, 0	0, 0
โมเมนต์อินเนอร์เซีย รอบแกน Y I_{yy}	(ม. ⁴)	0.3375	0.1125
โมเมนต์อินเนอร์เซีย รอบแกน Z I_{zz}	(ม. ⁴)	0.008333	3.125E-05
ค่าคงที่ของการบิด J	(ม. ⁴)	0.000208	1.25E-04
ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยว I_w	(ม. ⁶)	0.01875	0
คุณสมบัติจากความสมมาตรของหน้าตัด			
β_y	(ม.)	0	0
β_z	(ม.)	0	0
r_u^2	(ม. ²)	1.38333	0.750208
			

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าแรงวิกฤติโก่งงอในตัวอย่างที่ 1 กับค่าจริง

ลักษณะของน้ำหนักที่กระทำและสภาพจุดรองรับ ของคานแคง และ คานรูปตัว ไอ		คานหน้าตัดรูปตัว ไอ ที่มีสมมาตร 2 แกน	คาน แคง
1. คานยื่นปลายมีน้ำหนักเป็นจุดกระทำที่ปลาย ด้านอิสระ (Kg.)	Timmoshenko	1.651E-03	4.406E-05
	งานวิจัยนี้	1.627E-03	4.4554-05
	แตกต่าง (%)	1.45	1.26
2. คานแบบธรรมดา น้ำหนักเป็นจุดกระทำที่จุดกึ่งกลางคาน (Kg.)	Timmoshenko	5.042E-03	1.860E-04
	งานวิจัยนี้	5.180E-03	1.748E-04
	แตกต่าง (%)	2.73	6.02
2. คานแบบธรรมดา น้ำหนักแผ่กระจายกระทำตลอดความยาวคาน (Kg./m.)	Timmoshenko	1.399E-04	5.179E-06
	งานวิจัยนี้	1.486E-04	4.814E-06
	แตกต่าง (%)	6.21	7.05
2. คานแบบธรรมดา น้ำหนักเป็นโมเมนต์กระทำที่ปลายทั้งสอง (Kg.-m.)	Timmoshenko	5.545E-02	2.070E-03
	งานวิจัยนี้	5.192E-02	1.898E-03
	แตกต่าง (%)	6.4	8.3

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของหน้าตัดตัวอย่างที่ 2

คุณสมบัติของหน้าตัด	หน้าตัด 1	หน้าตัด 2	หน้าตัด 3	หน้าตัด 4	หน้าตัด 5	หน้าตัด 6
A (ม. ²)	40.0	50.0	60.0	40.0	40.0	40.0
y _s (ม.)	7.071	10.239	12.0	8.57	6.25	0
z _s (ม.)	0	0	0	0	0	0
I _{yy} (ม. ⁴)	2666.666	4208.15	3333.33	1166.66	2666.66	2666.66
I _{zz} (ม. ⁴)	666.666	1302.0	1166.66	616.66	416.66	666.66
J (ม. ⁴)	13.33	16.66	20.0	13.33	13.33	13.33
I _w (ม. ⁶)	0.0	25081.66	370000.0	10119.05	29166.66	41666.66
rs ² (ม. ²)	133.33	215.04	219.0	119.3	116.145	83.33
β _y (ม.)	0	0	0	0	0	31.25
β _z (ม.)	0	-15.109	400.27	103.13	57.5	125

ตารางที่ 3.5. ค่าแรงวิกฤติโค้งงอจากแรงตามแนวแกนกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวล
ของหน้าตัดชนิดต่างๆ ตามตัวอย่างที่ 2 เปรียบเทียบกับ วิธีการอื่น และลักษณะการโค้งงอ

แรงโค้งงอที่เกิด	หน้าตัด 1	หน้าตัด 2	หน้าตัด 3	หน้าตัด 4	หน้าตัด 5	หน้าตัด 6
P_y (Kg.)	328.986	519.16	411.233	143.93	328.98	328.98
P_z (Kg.)	82.25	160.627	143.93	76.08	51.4	82.25
P_o (Kg.)	80.0	76.39	281.5	99.87	122.82	189.65
I_c	3333.333	5510.15	4500.0	1783.32	3083.32	3333.32
I_o	5333.22	10752.0	13140.0	4772.0	4645.8	3333.32
P_{TF} (Kg.)	72.35	70.36	182.92	65.63	105.36	189.65
P_{cr} จากการคำนวณ	72.35	70.36	143.93	65.63	51.4	82.25
P_{cr} จากงานวิจัยนี้	72.401	71.038	144.	66.13	51.4	82.3
แตกต่าง (%)	0.07	0.96	0.05	0.76	0.0	0.06
ลักษณะของการโค้งงอ ที่เกิดขึ้นก่อน	ดัดรอบแกน Y บิดรอบแกน X	ดัดรอบแกน Y บิดรอบแกน X	ดัดรอบแกน Z	ดัดรอบแกน Y บิดรอบแกน X	ดัดรอบแกน Z	ดัดรอบแกน Z

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติอื่น ๆ ที่ใช้ในตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4

คุณสมบัติของวัสดุ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E (Kg./m. ²)	1000	2000	2000	1000
ค่าโมดูลัสการเฉือน G (Kg./m. ²)	400	800	800	400
ความยาวคาน L (m.)	60	400	500, 1000	50 - 100
ความหนาของหน้าตัด t (m.)	0.05	1	0.1	0.05

ตารางที่ 3.7 ผลของค่าแรงโก่งงอวิกฤติจากตำแหน่งของแรงกระทำตามแนวแกน
 เชื่อมศูนย์จาก ตำแหน่ง C.G.

ระยะห่างจาก จุดศูนย์ถ่วง (ม.)	แรงวิกฤติโก่งงอที่เกิด (Kg.)	
	L = 500 (ม.)	L = 1000 (ม.)
0.0	4.754 E-02	1.271 E-02
0.5	4.901 E-02	1.287 E-02
1.0	5.038 E-02	1.300 E-02
1.5	5.154 E-02	1.305 E-02
2.0	5.218 E-02	1.314 E-02
2.475 (จุด Shear Center)	5.266 E-02	1.316 E-02
3.0	5.194 E-02	1.316 E-02
3.5	4.992 E-02	1.309 E-02
4.0	4.701 E-02	1.297 E-02
5.0	4.075 E-02	1.261 E-02
-0.5	4.604 E-02	1.253 E-02
-1.0	4.455 E-02	1.234 E-02
-1.5	4.311 E-02	1.215 E-02
-2.0	3.940 E-02	1.191 E-02
-3.0	3.670 E-02	1.146 E-02
-4.0	3.431 E-02	1.102 E-02
-5.0	3.219 E-02	1.057 E-02
-7.0	2.864 E-02	9.752 E-03
ค่าแรงโก่งงอ P_y	5.264 E-02	1.316 E-02
ค่าแรงโก่งงอ P_z	6.218 E-02	1.554 E-02

ตารางที่ 3.8 ค่าแรงโก่งงอเทียบกับอัตราส่วน t/a ของความแคบตัวอย่างที่ 4.1
ให้ ค่า a คงที่ มีค่า เท่ากับ $3m$. รับน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอบนจุดรองรับแบบขรรคมดา

ความแคบ อัตราส่วน t/a	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
ความหนา t (ม.)	0.06	0.12	0.18	0.24	0.3
ความยาวคาน L (ม.)	ค่าแรงวิกฤติโก่งงอ (Kg.)				
50	1.546E-5	1.23E-4	4.17E-4	9.89E-4	1.93E-3
60	8.95E-6	7.15E-5	2.51E-4	5.73E-4	1.25E-3
70	5.63E-5	4.50E-5	1.58E-4	3.60E-4	7.15E-3
80	3.77E-6	3.02E-5	1.12E-4	2.47E-4	4.91E-4
90	2.65E-6	2.15E-5	7.32E-5	1.79E-4	3.32E-4
100	1.93E-6	1.54E-5	5.28E-5	1.26E-4	2.57E-4

ตารางที่ 3.9 ค่าแรงโก่งงอเทียบกับอัตราส่วน b/a ของคานแคงตัวอย่างที่ 4.2
 ให้ ค่าความสูง a คงที่ มีค่า เท่ากับ 3 ม. ความหนา $t = 0.05$ ม.
 รับน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอบนจุดรองรับแบบธรรมดา

คานแคง อัตราส่วน b/a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
ความกว้างปีก b (ม.)	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
ความยาวคาน L (ม.)	ค่าแรงวิกฤติโก่งงอ (Kg.)				
50	8.94E-5	4.12E-4	1.17E-3	2.712E-3	4.99E-3
60	5.13E-5	2.17E-4	5.87E-4	1.29E-3	2.48E-3
70	3.11E-5	1.38E-4	3.32E-4	7.18E-4	1.34E-3
80	2.06E-5	8.20E-5	2.04E-4	4.33E-4	8.06E-4
90	1.45E-5	5.52E-5	1.34E-4	2.79E-4	5.13E-4
100	1.14E-5	3.95E-5	9.24E-5	1.89E-4	3.53E-4

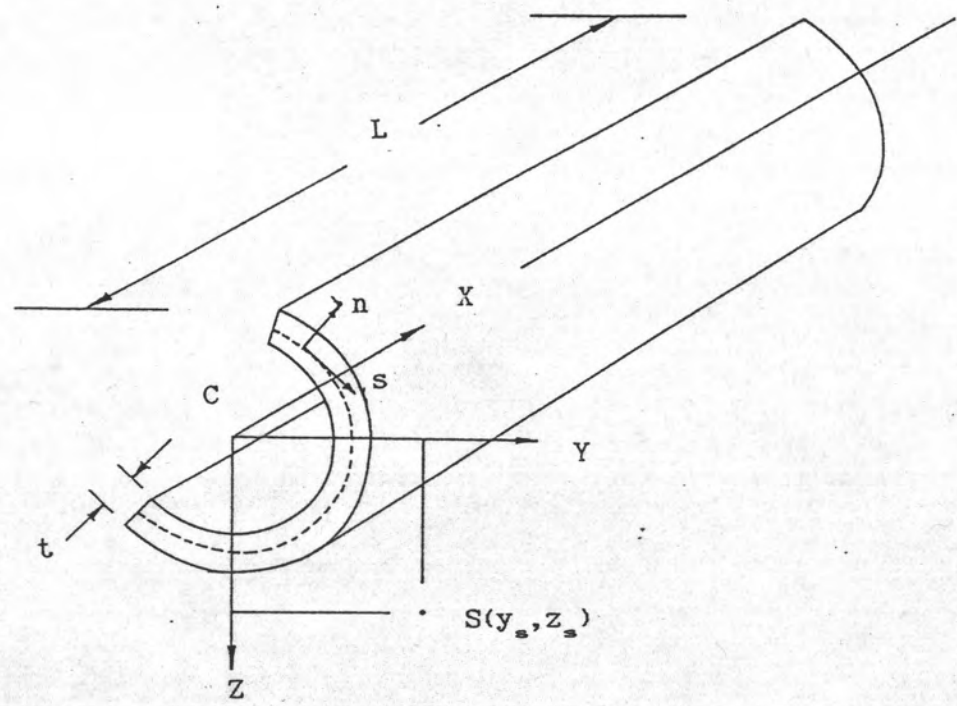
ตารางที่ 3.10 ค่าแรงโก่งงอเทียบกับอัตราส่วน b/a ของคานแคนตัวอย่างที่ 4.3
 ให้ ค่าความสูง a คงที่ มีค่า เท่ากับ 3 ม. ความหนา $t = 0.05$ ม.
 รับน้ำหนักแผ่นส้มาเสมอจนจุดรองรับแบบธรรมดา

คานแคน อัตราส่วน b/a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
ความกว้างปีก b (ม.)	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
ความยาวคาน L (ม.)	ค่าแรงวิกฤติโก่งงอ (Kg.)				
50	1.46E-4	4.75E-4	1.03E-3	1.91E-3	3.18E-3
60	8.42E-5	2.66E-4	5.63E-4	1.01E-3	1.646E-3
70	5.28E-5	1.64E-4	3.39E-4	5.96E-4	9.55E-4
80	3.52E-5	1.08E-4	2.20E-4	3.90E-4	6.02E-4
90	2.48E-5	7.56E-5	1.52E-4	2.59E-4	4.03E-4
100	1.80E-5	5.45E-5	1.09E-4	1.84E-4	2.83E-4

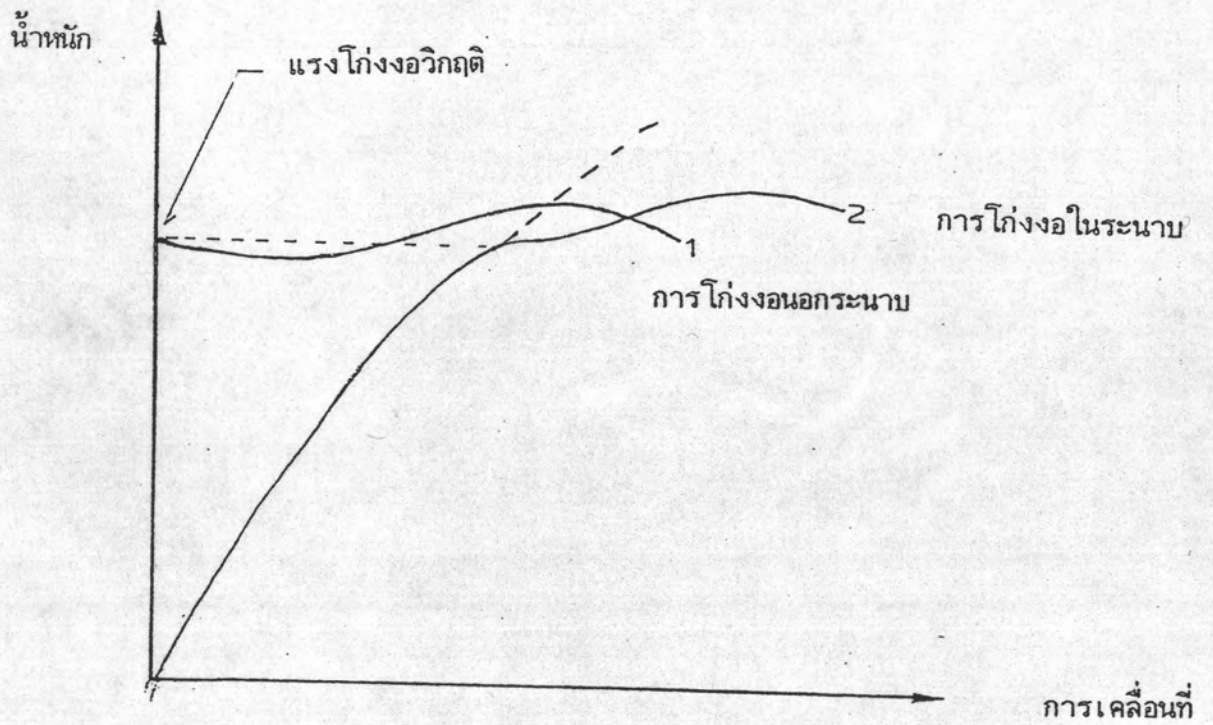
ตารางที่ 3.11 ค่าแรงโค้งงอเทียบกับอัตราส่วน c/a ของความแคบตัวอย่างที่ 4.4
 ให้ ค่าความสูง a คงที่ มีค่า เท่ากับ 3 ม. ความหนา $t = 0.05$ ม.
 รับน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอบนจุดรองรับแบบธรรมดา

ความแคบ อัตราส่วน c/a	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25
ความกว้างปลายยื่น c (ม.)	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75
ความยาวคาน L (ม.)	ค่าแรงวิกฤติโค้งงอ (Kg.)				
50	2.71E-3	3.26E-3	3.91E-3	4.63E-3	5.46E-3
60	1.33E-3	1.65E-3	1.92E-3	2.27E-3	2.66E-3
70	7.45E-4	8.95E-4	1.15E-3	1.34E-3	1.48E-3
80	4.65E-4	5.34E-4	6.31E-4	7.41E-4	8.66E-4
90	2.91E-4	3.45E-4	4.05E-4	4.72E-4	5.64E-4
100	1.97E-4	2.32E-4	2.74E-4	3.16E-4	3.68E-4

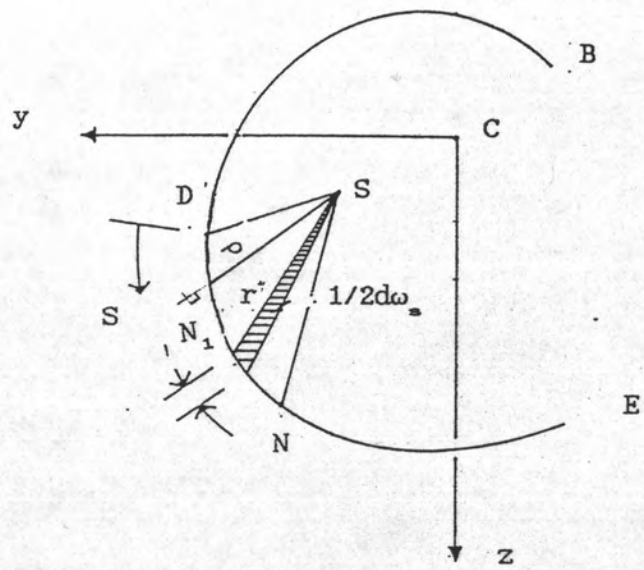
รายการรูปประกอบ



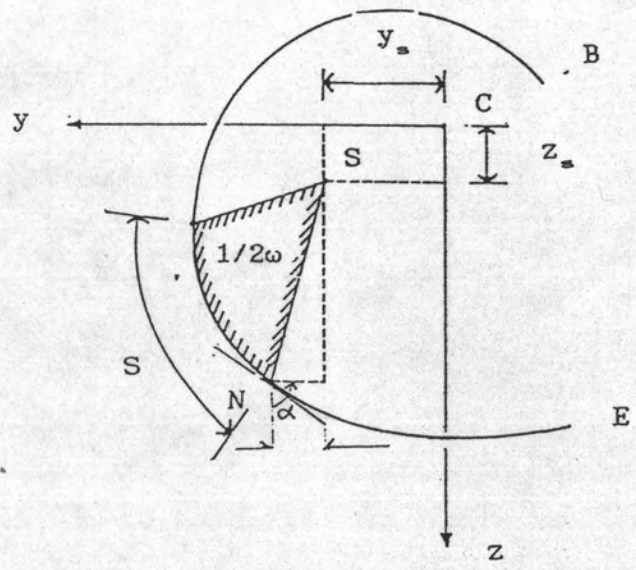
รูปที่ 1.1 ความหนาตัดเปิดแบบหนึ่งบาง



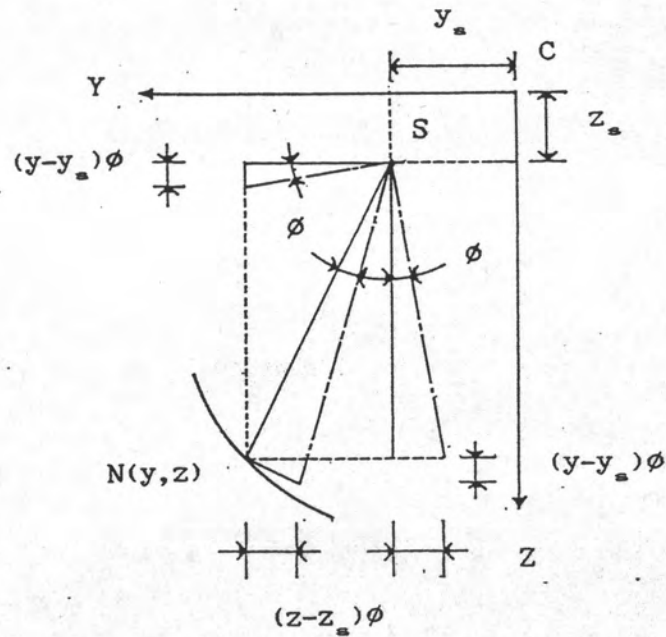
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้ก - การเคลื่อนที่ การรับแรงในระนาบ เกิดการโค้งงอด้านข้าง



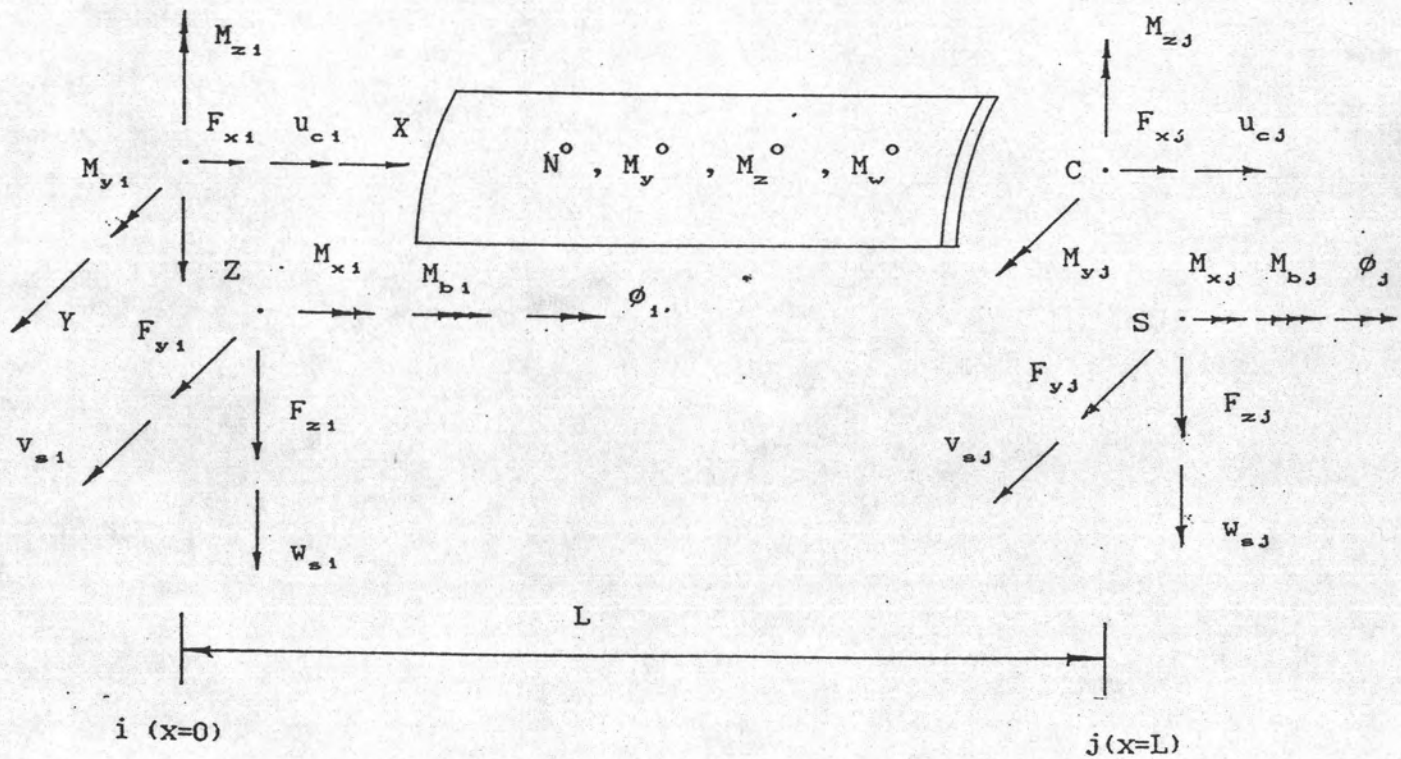
รูปที่ 2.2 การหาพื้นที่ของส่วนใด ๆ บนหน้าตัด



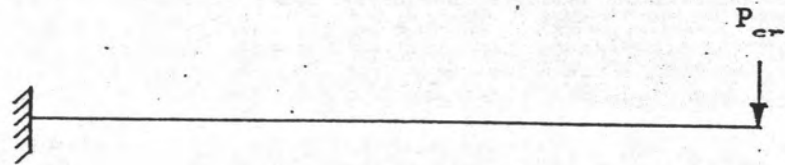
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดคานผนังบาง



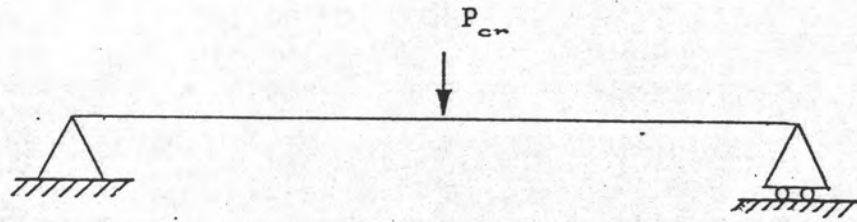
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของจุดใดาบนหน้าตัดคาน



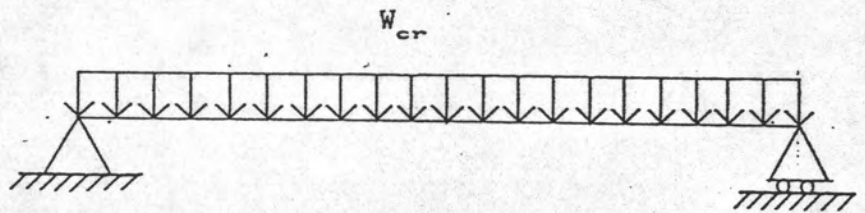
รูปที่ 2.5 แรงและการเคลื่อนที่ บนหน้าตัดคานแต่ละชั้น



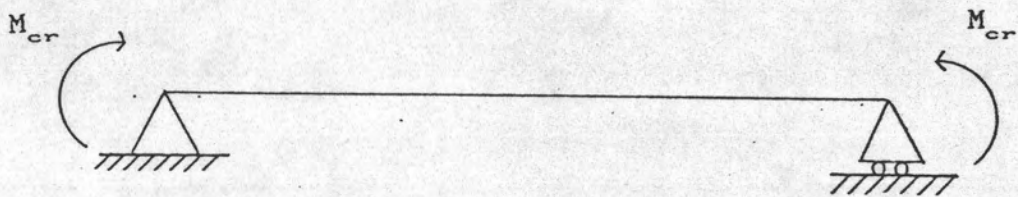
1. คานยื่นมีน้ำหนักเป็นจุดกระทำที่ปลายยื่น



2. คานมีจุดรองรับแบบธรรมดาที่มีน้ำหนักเป็นจุดกระทำที่ กึ่งกลางคาน

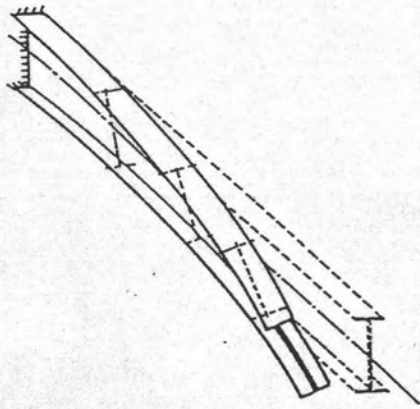


3. คานมีจุดรองรับแบบธรรมดาที่มีน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดความยาวคาน

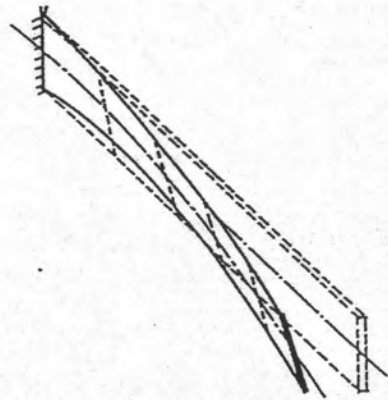


4. คานมีจุดรองรับแบบธรรมดาจับโมเมนต์ดีดสม่ำเสมอตลอดความยาวคาน

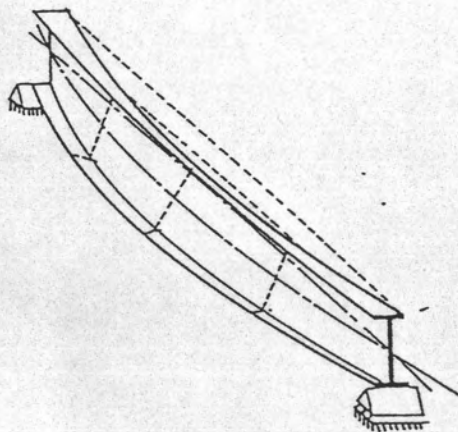
รูปที่ 3:1 ลักษณะของจุดรองรับและน้ำหนักที่กระทำบนคานตัวอย่างที่ 1



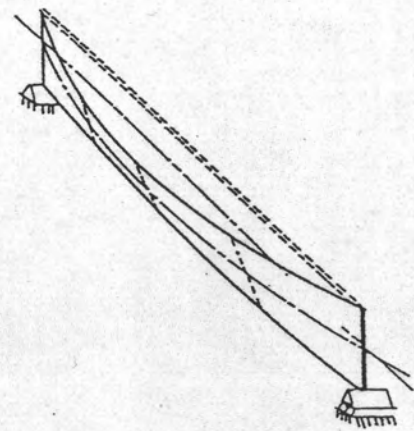
1. หน้าตัดรูปตัว ไอ สมมาตรสองแกน
(รูปแบบที่ 1)



2. คานแควรูปสี่เหลี่ยม
(รูปแบบที่ 1)

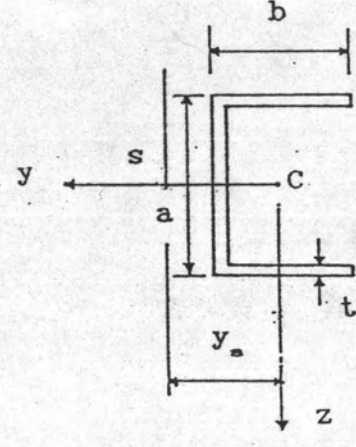
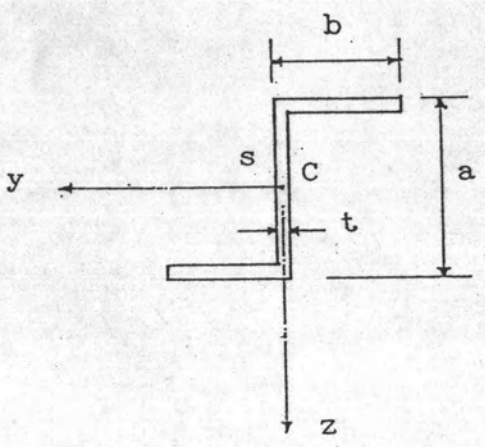
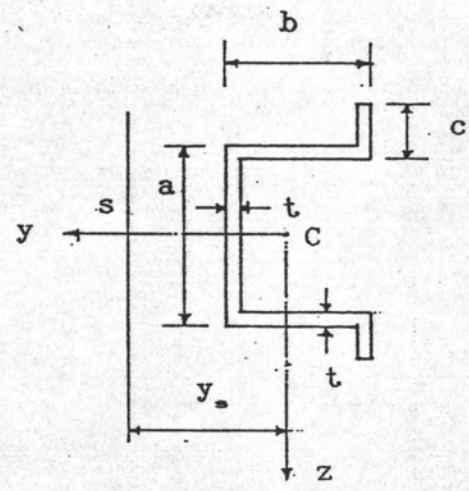
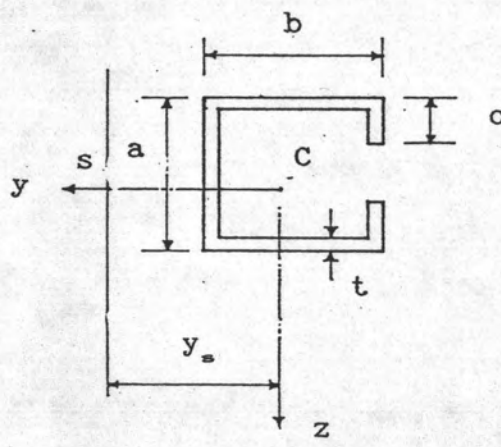
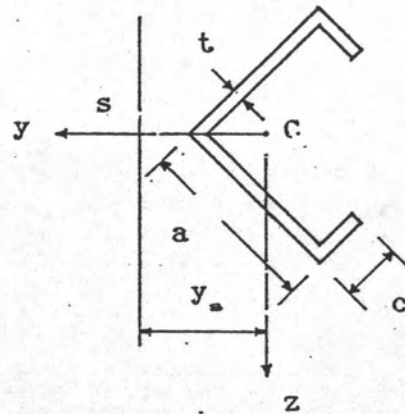
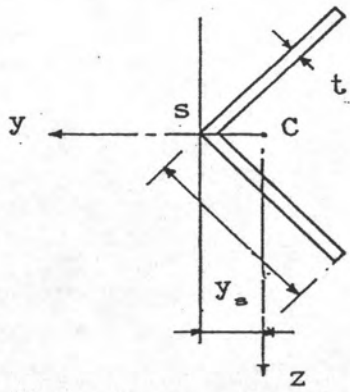


3. หน้าตัดรูปตัว ไอ สมมาตรสองแกน
(รูปแบบที่ 2,3 และ 4)

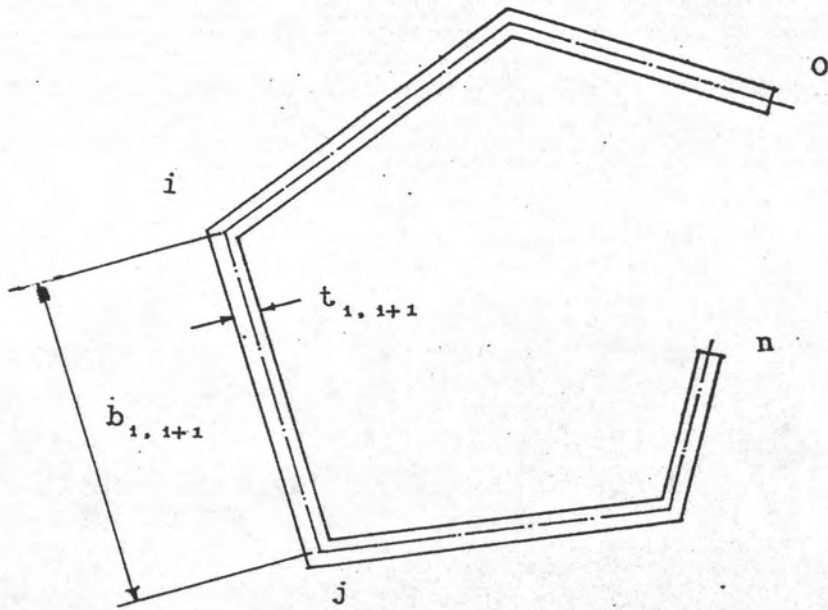


4. คานแควรูปสี่เหลี่ยม
(รูปแบบที่ 2,3 และ 4)

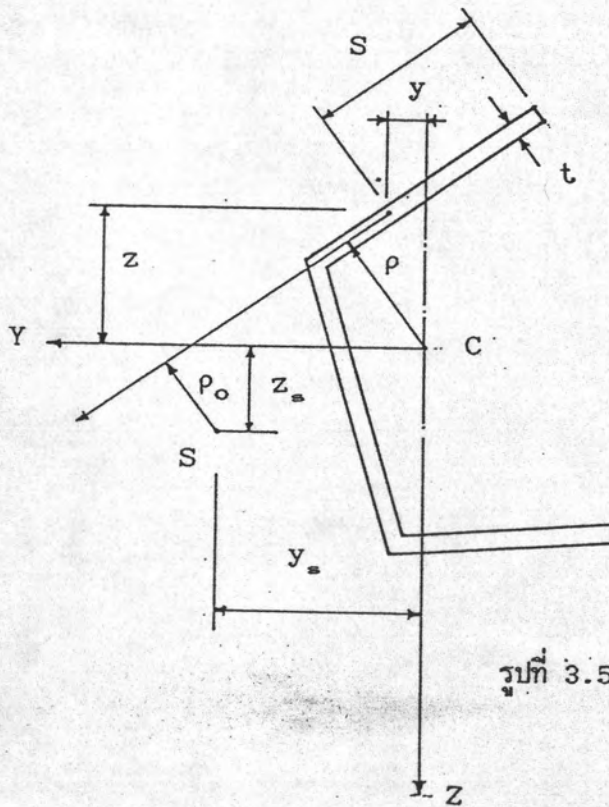
รูปที่ 3.2 ลักษณะของการโก่งงอที่เกิดบนคานตัวอย่างที่ 1



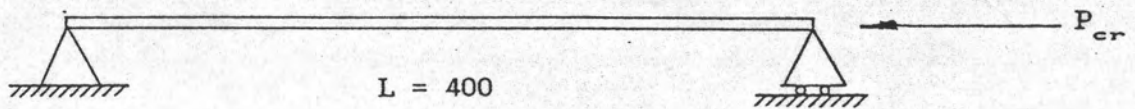
รูปที่ 3.3 หน้าตัดผนังบางชนิดต่างๆในตัวอย่างที่ 2



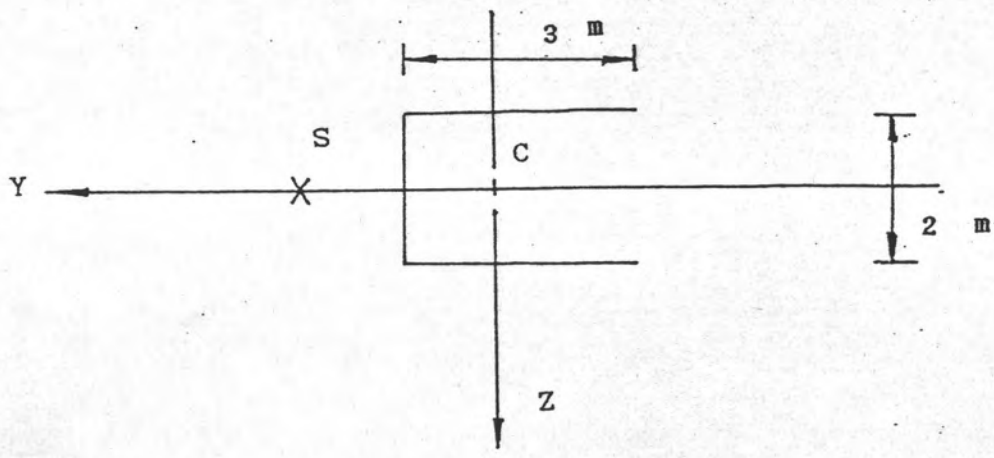
รูปที่ 3.4 การแบ่งหน้าตัดเป็นชิ้นส่วนย่อยเพื่อคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัด



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดคานตัวอย่าง

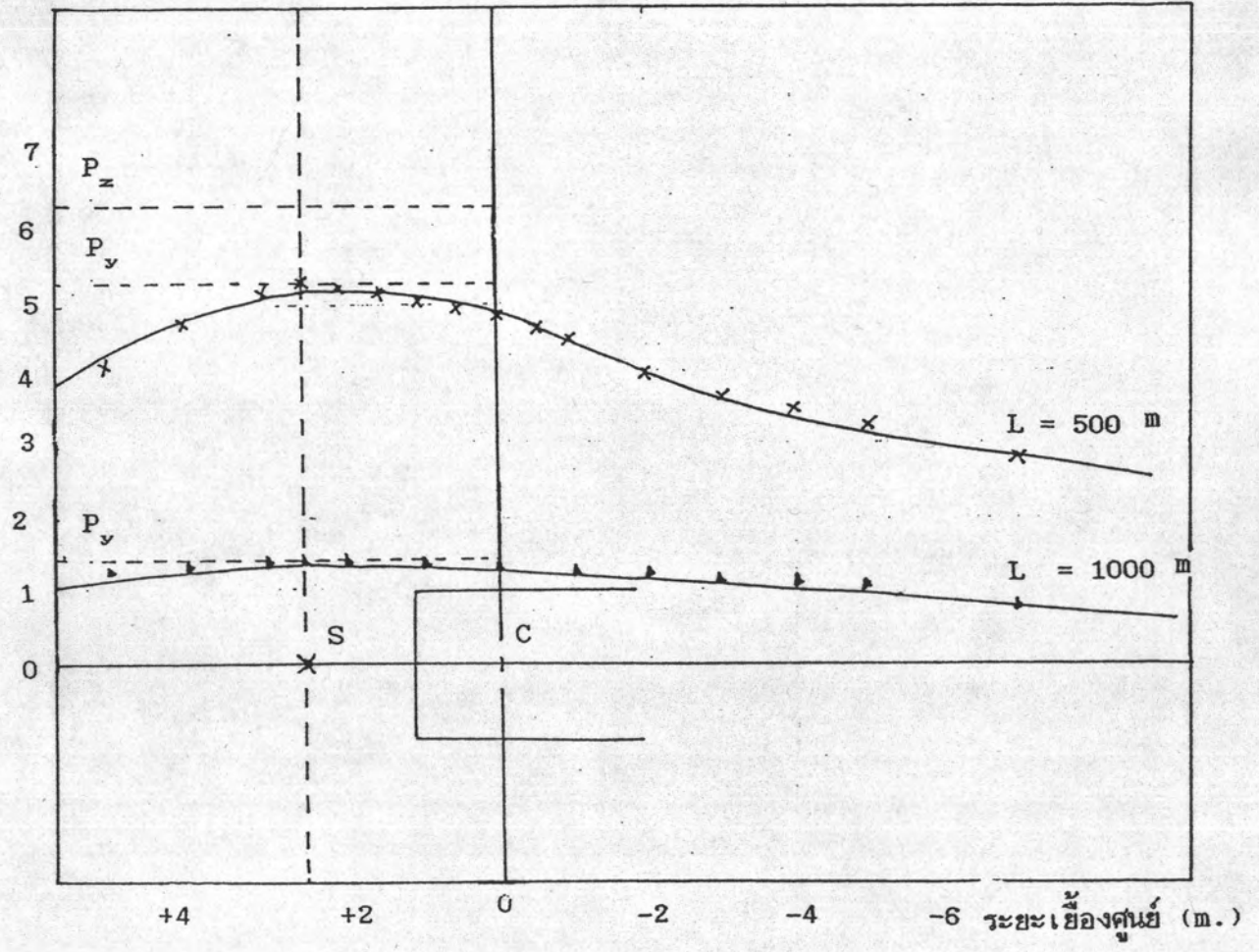


รูปที่ 3.6 ลักษณะของจุดรองรับ และแรง P ที่กระทำที่ C.G. ในตัวอย่างที่ 2

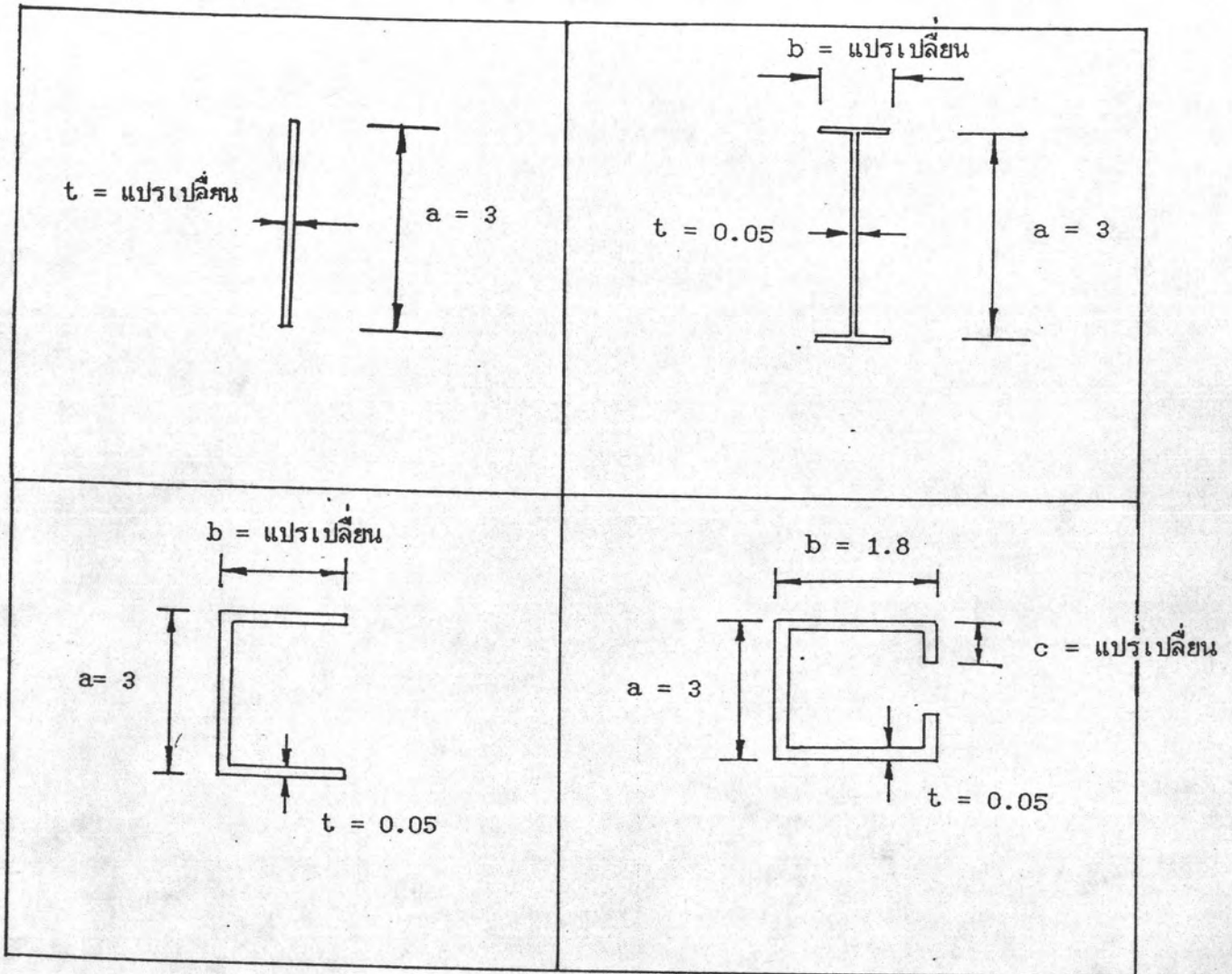


รูปที่ 3.7 ขนาดของหน้าตัดคาน สมมาตรแกนเดียวรับแรงเยื้องศูนย์กลางในตัวอย่างที่ 3

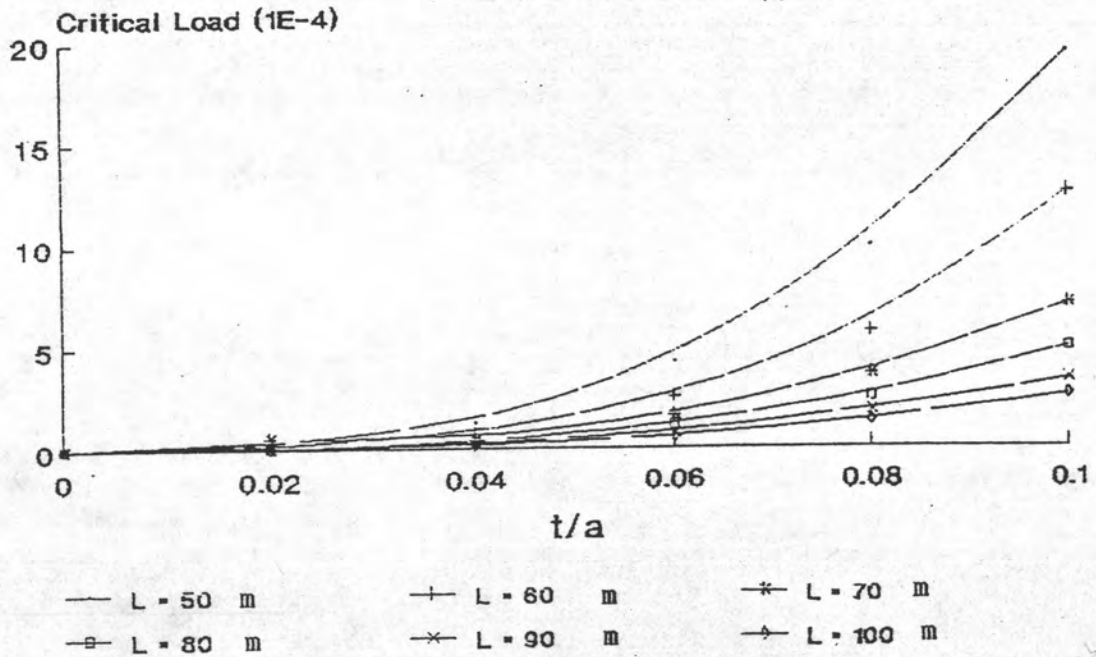
ค่าแรงโก่งงอวิกฤติ (1E-2)



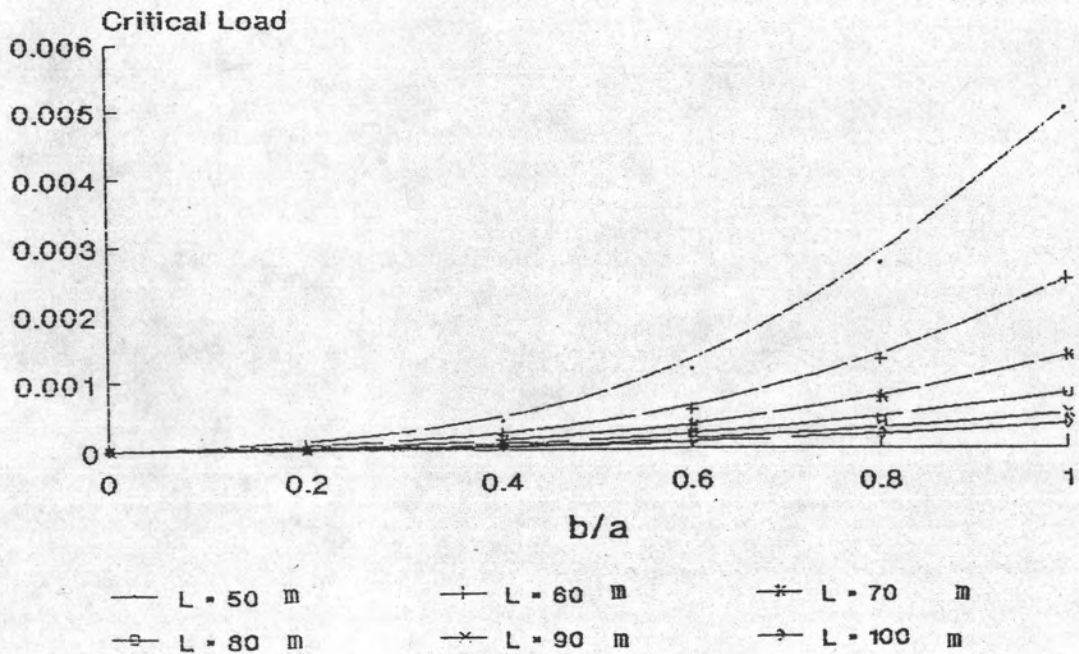
รูปที่ 3.8 ผลของตำแหน่งแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางบนแกนสมมาตร



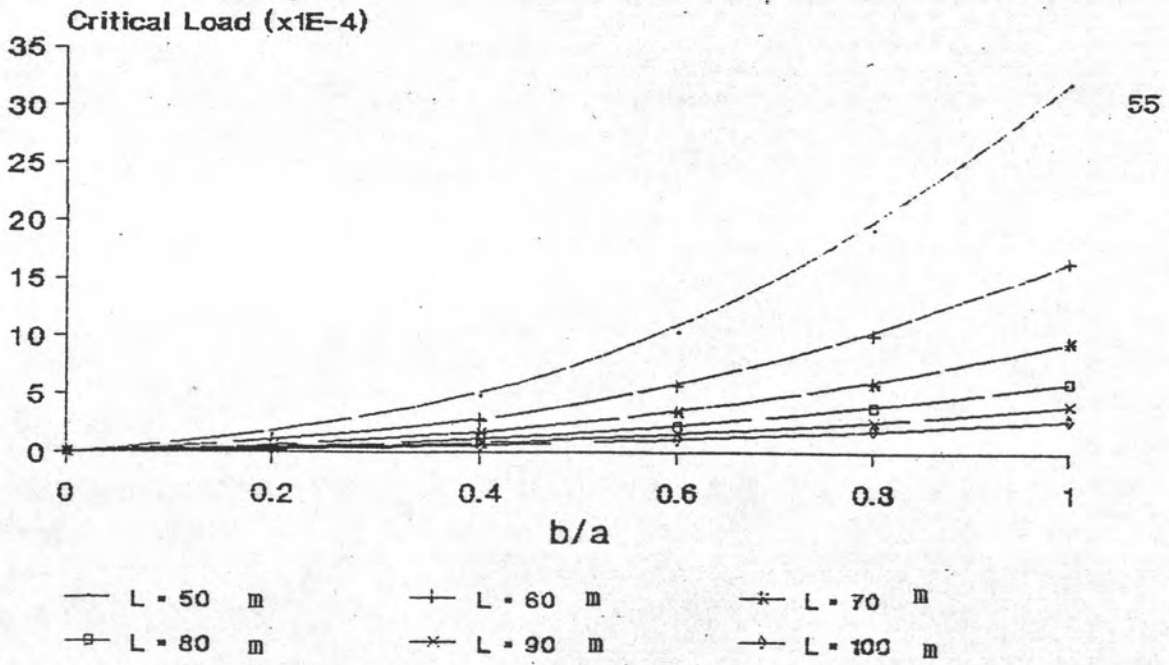
รูปที่ 3.9 ลักษณะของหน้าตัดที่ทดสอบการแปรเปลี่ยนขนาดและความยาวในตัวอย่างที่ 4



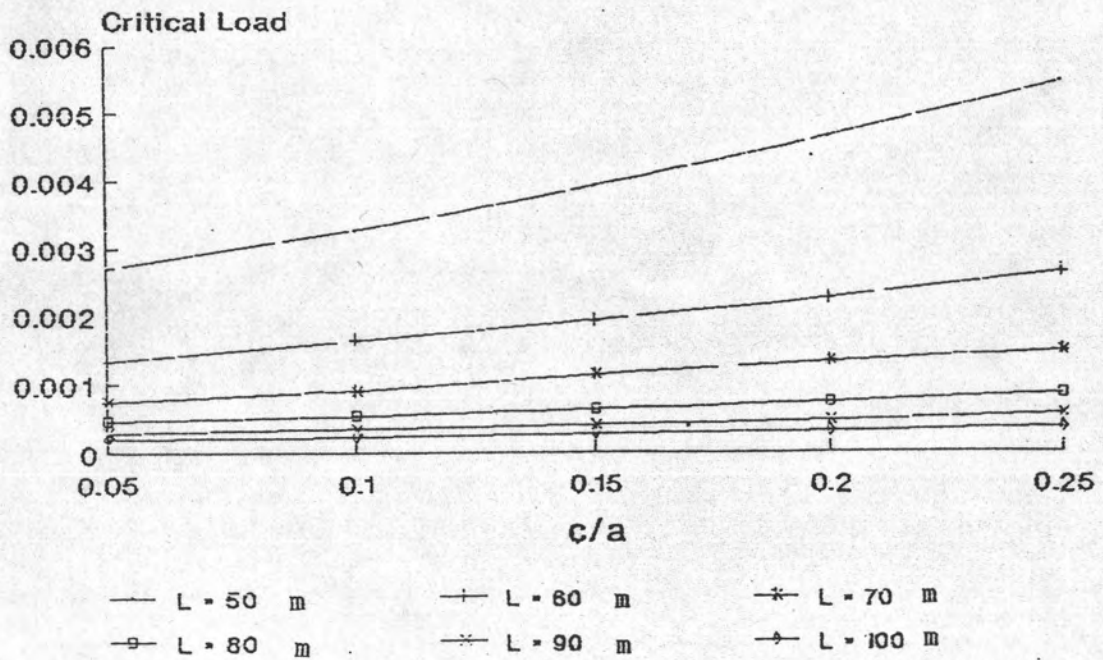
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโค้งงอวิกฤติ กับ อัตราส่วนความหนาต่อความลึก (t/a) ของคานแบบ



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโค้งงอวิกฤติ กับ อัตราส่วนความกว้างต่อความลึก (b/a) ของหน้าตัดคานรูปตัว ไอ



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโคงงอวิกฤติ กับ อัตราส่วนความกว้างต่อความลึก (b/a) ของหน้าตัดคานรูปตัว ซี



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโคงงอวิกฤติ กับ อัตราส่วนของอัตราส่วนความลึก (c/a) ของหน้าตัดคานรูปตัว ซีมีของ

รายการภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การหาค่าคุณสมบัติที่สำคัญของคานาหน้าตัดเปิดแบบผนังบาง

$$\text{Moment Inertia About Y Axis } (I_y) = \int_A y^2 da$$

$$\text{Moment Inertia About Z Axis } (I_z) = \int_A z^2 da$$

$$\text{Moment Inertia About YZ Plane } (I_{yz}) = \int_A yz da$$

$$\text{Torsional Constant } (J) = 1/3 \sum b_i t_i^3$$

$$\text{Warping Area } (\omega) = \int_0^s \rho ds$$

$$\text{Warping Area } (\omega_0) = \int_0^s \rho_0 ds$$

$$\text{Warping Area } (\omega_n) = 1/A \int_0^1 \rho_0 t ds - \omega_0$$

$$\text{Warping Constant } (I_w) = \int_0^1 \omega_n^2 da$$

$$\text{Moment Inertia About Y Axis } (I_{wy}) = \int_0^1 \omega y t ds$$

$$\text{Moment Inertia About Z Axis } (I_{wz}) = \int_0^1 \omega z t ds$$

แต่ในการคำนวณเพื่อให้ง่ายขึ้นจึงแบ่งชิ้นส่วนของหน้าตัดออกเป็นชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมหลายๆรูป
ดังรูป 3.4 จะสามารถหาค่าคุณสมบัติของหน้าตัดได้ง่ายขึ้น โดยจะได้ว่า

$$\omega_j = \sum_{i=0}^{j-1} \rho_{i,i+1} b_{i,i+1}$$

$$(\omega_0)_j = \sum_{i=0}^{i=(j-1)} (\rho_0)_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

$$(\omega_n)_j = 1/A \{ 1/2 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} [(\rho_0)_i + (\rho_0)_{i+1}] t_{i, i+1} b_{i, i+1} \} - (\omega_0)_j$$

$$I_{wy} = 1/3 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} (\omega_i y_i + \omega_{i+1} y_{i+1}) t_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

$$+ 1/6 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} (\omega_i y_{i+1} + \omega_{i+1} y_i) t_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

$$I_{wz} = 1/3 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} (\omega_i z_i + \omega_{i+1} z_{i+1}) t_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

$$+ 1/6 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} (\omega_i z_{i+1} + \omega_{i+1} z_i) t_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

$$I_w = 1/3 \sum_{i=0}^{i=(n-1)} [(\omega_n)_i + (\omega_n)_{i+1} (\omega_n)_{i+1} + (\omega_n)_{i+1}^2] t_{i, i+1} b_{i, i+1}$$

ตำแหน่งของศูนย์กลางแรงเฉือนหาจาก

$$y_s = \frac{2(I_{yy} I_{wy} - I_{zy} I_{wz})}{(I_{zz} I_{yy} - I_{zy}^2)}$$

$$z_s = \frac{-2(I_{zz} I_{wz} + I_{zy} I_{wy})}{(I_{zz} I_{yy} - I_{zy}^2)}$$

คุณสมบัติของการสมมาตรของหน้าตัด

$$r_s^2 = [I_{yy} + I_{zz} + A(y_s^2 + z_s^2)] / A$$

$$\beta_y = -2y_s + (1/I_{yy}) \int_A (y^2 + z^2) y da$$

$$\beta_z = -2z_s + (1/I_{zz}) \int_A (y^2 + z^2) z da$$

$$\beta_w = (1/I_{ww}) \int_A (y^2 + z^2) \omega da$$

โดยที่ให้

- A = เป็นพื้นที่รวมทั้งหมดของหน้าตัด
- b = ความยาวของชิ้นส่วนย่อยแต่ละชิ้น
- t = ความหนาของหน้าตัดคาน
- y, z = พิกัดของจุดใดๆของหน้าตัดวัดจากจุดศูนย์กลางมวล
- s = ระยะทางตามแนวเส้นกึ่งกลางความหนาจากปลายอิสระไปยังจุด P
- l = ระยะทั้งหมดของเส้นกึ่งกลางความหนาตลอดหน้าตัด
- ρ, ρ_0 = ระยะทางตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางแรงเฉือนไปยังแนวเส้นสัมผัสหนึ่งที่ต้องการ

ภาคผนวก ข.

สตีฟเนสเมตริกซ์ ของคาน

- สตีฟเนสเมตริกซ์ของคาน

สตีฟเนสเมตริกซ์ของคานหน้าตัดเปิดแบบผนังบาง สามารถเขียนได้ดังนี้

	U_1	V_1	W_1	ϕ_{x1}	ϕ_{y1}	ϕ_{z1}	ϕ'_{x1}	U_j	V_j	W_j	ϕ_{xj}	ϕ_{yj}	ϕ_{zj}	ϕ'_{xj}
F_{x1}	K_1	0	0	0	0	0	0	$-K_1$	0	0	0	0	0	0
F_{y1}		K_2	0	0	0	K_3	0	0	$-K_2$	0	0	0	0	0
F_{z1}			K_5	0	$-K_6$	0	0	0	0	$-K_5$	0	$-K_6$	0	0
M_{x1}				K_8	0	0	K_9	0	0	0	$-K_8$	0	0	0
M_{y1}					$2K_7$	0	0	0	0	K_6	0	K_7	0	0
M_{z1}						$2K_4$	0	0	$-K_3$	0	0	0	$-K_4$	0
M_{b1}							K_{10}	0	0	0	$-K_9$	0	0	$-K_{11}$
F_{xj}								K_1	0	0	0	0	0	0
F_{yj}									K_2	0	0	0	$-K_3$	0
F_{zj}										K_5	0	K_6	0	0
M_{xj}											K_8	0	0	$-K_9$
M_{yj}												$2K_7$	0	0
M_{zj}													$2K_4$	0
M_{bj}														K_{10}

(symm)

เมื่อกำหนดให้

$$K_1 = EA/L$$

$$K_3 = 6EI_z/L^2$$

$$K_5 = 12EI_y/L^3$$

$$K_7 = 2EI_y/L$$

$$K_8 = 12EI_w/L^3 + 6GJ/5L$$

$$K_{10} = 4EI_w/L + 2GJL/5$$

$$K_2 = 12EI_z/L^3$$

$$K_4 = 2EI_z/L$$

$$K_6 = 6EI_y/L^2$$

$$K_9 = 6EI_w/L^2 + GJ/10$$

$$K_{11} = 2EI_w/L - GJL/30$$

- สติพเนส เรขาคณิตของคาน

สติพเนส เรขาคณิตของคานหน้าตัดเปิดแบบผนังบาง เนื่องจากแรงเริ่มต้นเขียนได้ดังนี้

	U_1	V_1	W_1	ϕ_{x1}	ϕ_{y1}	ϕ_{z1}	ϕ'_{x1}	U_j	V_j	W_j	ϕ_{xj}	ϕ_{yj}	ϕ_{zj}	ϕ'_{xj}
F_{x1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{y1}		G_1	0	G_5	0	$-G_2$	G_7	0	$-G_1$	0	$-G_5$	0	$-G_2$	G_8
F_{z1}			G_1	G_6	$-G_2$	0	G_{13}	0	0	$-G_1$	$-G_6$	$-G_2$	0	G_{14}
M_{x1}				G_{15}	G_{14}	G_8	G_{16}	0	$-G_5$	$-G_6$	$-G_{15}$	G_{14}	G_8	G_{16}
M_{y1}					G_3	G_{10}	0	G_2	0	$-G_8$	0	$-G_4$	0	G_{11}
M_{z1}						G_3	G_{10}	0	G_2	0	$-G_8$	0	$-G_4$	G_9
M_{b1}							G_{17}	0	0	$-G_{14}$	G_{16}	G_{11}	G_9	G_{18}
F_{xj}								0	0	0	0	0	0	0
F_{yj}									G_1	0	G_5	0	G_2	$-G_7$
F_{zj}										G_1	G_6	G_2	0	$-G_{13}$
M_{xj}											G_{15}	G_{14}	$-G_8$	$-G_{16}$
M_{yj}												G_3	0	G_{12}
M_{zj}													G_3	G_{10}
M_{bj}														G_{17}

(symm)

เมื่อกำหนดให้

$$\begin{aligned}
 G_1 &= 1.2P/L & G_2 &= P/10 \\
 G_3 &= 2PL^2/15 & G_4 &= PL/30 \\
 G_5 &= 1.2(Pe_z - M_z)/L & G_6 &= 1.2(M_y - Pe_y)/L \\
 G_7 &= (11M_z - Pe_z)/10 & G_8 &= (M_z - Pe_z)/10 \\
 G_9 &= (M_z - Pe_z)L/30 & G_{10} &= 2(Pe_z - M_z)L/15 \\
 G_{11} &= (Pe_y - M_y)L/30 & G_{12} &= 2(M_y - Pe_y)L/15 \\
 G_{13} &= (Pe_y - 11M_y)/10 & G_{14} &= (Pe_y - M_y)/10 \\
 G_{15} &= 6(r_s^2 P + M_y \beta_y + M_z \beta_z + M_w \beta_w)/5L & G_{15} &= -(r_s^2 P + M_y \beta_y + M_z \beta_z + M_w \beta_w)/10 \\
 G_{17} &= 2(r_s^2 P + M_y \beta_y + M_z \beta_z + M_w \beta_w)L/15 & G_{18} &= -(r_s^2 P + M_y \beta_y + M_z \beta_z + M_w \beta_w)L/30
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการใส่ข้อมูล และผลลัพธ์จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ก. เริ่มใช้โปรแกรม

```
Program To Calculate Flexural-Torsional  
Buckling Of Beams With Thin Walled Open Section
```

```
*** MAIN MENU ***
```

```
D = Data Menu  
S = Solution Menu  
R = Result Menu  
E = Exit to System
```

```
=====> Select ?
```

- ใส่ข้อมูล ที่ใช้ในการคำนวณ

```
***DATA MENU***
```

```
E = Element Data  
S = Section Properties  
M = Material Properties  
L = Load Data  
O = DATA CHECK  
Q = Quit
```

```
=====> Select ?
```

- ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนชิ้นส่วน, ความยาวและสภาพจุดรองรับ

```

***ELEMENT DATA***

N = No. Of Nodes
C = Coordinate Data
B = Boundary Data
O = Element Data Output
Q = Quit

=====> Select ?

```

- ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของหน้าตัด หรือ ใส่ข้อมูลให้คำนวณคุณสมบัติของหน้าตัด

```

***SECTION PROPERTIES***

I = Input Data
C = Programe Calculate
O = Section Prop. Output
Q = Quit

=====> Select ?

```

- ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ

```

***MATERIAL PROPERTIES***

E = Elastic Modulus
V = Poisson's Ratio
O = Material Prop. Output
Q = Quit

=====> Select ?

```

- ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับแรงหรือน้ำหนักกระทำ

```

***LOAD DATA***
U = Uniform Load
N = Nodal Force
O = Load Data Output
Q = Quit

===== > Select ?

```

ข. ตรวจสอบข้อมูลที่ใส่เข้าไป

- ตรวจสอบข้อมูลของชิ้นส่วน และสภาพจุดรองรับ

```

**ELEMENT DATA CHECK OUTPUT**
Node   X-Coordinate   Z-Coordinate   BOUNDARY   F=<Free>   L=<Lock>
          u   v   w   u'  v'  w'  b
1.     0.000000   0.000000   L   L   L   L   F   F   F
2.     80.000000  0.000000   F   F   F   F   F   F   F
3.    160.000000  0.000000   F   F   F   F   F   F   F
4.    240.000000  0.000000   F   F   F   F   F   F   F
5.    320.000000  0.000000   F   F   F   F   F   F   F
6.    400.000000  0.000000   F   L   L   L   F   F   F

Enter <E> Edit Element Data Again
Enter <Q> Back to Data Menu

===== > Select ?

```

- ตรวจสอบข้อมูลของคุณสมบัติ ของหน้าตัดที่ได้จากการคำนวณ หรือที่ใส่เข้าไป

```

**SECTION PROPERTIES**
Center of Gravity Coordinate      <m.> = -5.000000 , 0.000000
Shear center coordinate w.r.t C.G. <m.> = 12.000001 , 0.000000
Shear center coordinate w.r.t 0   <m.> = 7.000001 , 0.000000
Cross section area                <m.2> = 60.000000
Torsional constant                <m.4> = 20.000000
Moment of inertia about N.A Y-axis <m.4> = 3333.333252
Moment of inertia about N.A Z-axis <m.4> = 1166.666748
Moment of inertia about N.A YZ-axis <m.4> = 0.000000
Warping constant                  <m.6> = 370000.000000
Iwy <m.5> = -20000.000000
Iwz <m.5> = -0.000000

**Unsymmetrical Section Properties**
(Rs)2 <m.2> = 219.000031
By <m.> = -0.000000
Bz <m.> = -24.000002
Bw <m.> = 0.000000

Enter <E> Edit Section Properties Data Again
Enter <Q> Back to Data Menu
=====> Select ?

```

- ตรวจสอบข้อมูลของคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในโครงสร้าง

```

**Material Properties**
Modulus Of Elasticity (E) = 2000.000000 <Kg./m2>
Poison's Ratio (v) = 0.25
Shear Modulus (G) = 800.000000 <Kg./m2>

Enter <E> Edit Material Properties Data Again
Enter <Q> Back to Data Menu
=====> Select ?

```

ค. แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

```

<<RESULT MODE>>

D = Node Displacement
I = Internal Member Force
R = Reaction
C = Buckling Calculation
B = Buckling OUTPUT
Q -> Quit to Main Menu

===== > Select ?

```

- การเคลื่อนที่ ที่แต่ละ Node จากผลของค่าแรงเริ่มต้น

NODE DISPLACEMENT OUTPUT							
Node	X-Disp <m.>	Y-Disp <m.>	Z-Disp <m.>	X-Rota. <Rad>	Y-Rota. <Rad>	Z-Rota. <Rad>	B-Twist. <rad/m.>
1	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
2	-6.67e-04	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
3	-1.33e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
4	-2.00e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
5	-2.67e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
6	-3.33e-03	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00

Press Any Key To Continue

- ค่าแรงภายในในแต่ละชิ้นส่วนจากผลของค่าแรงเริ่มต้น

OUTPUT INTERNAL MEMBER END FORCE								
ELE	NODE	Axial <Kg.>	Y-shear <Kg.>	Z-Shear <Kg.>	X-Momen <Kg-m>	Y-Momen <Kg-m>>	Z-Momen <Kg-m>	Bi-Mome <Kg.>
1	1	1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00
	2	-1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
2	2	1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00
	3	-1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
3	3	1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00
	4	-1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
4	4	1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00
	5	-1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
5	5	1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00	-0.00e+00
	6	-1.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	-0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00

Press Any Key To Continue

- ผลลัพธ์ของค่าการโก่งงอที่เกิดขึ้น และลักษณะของการโก่งงอ

<< BUCKLING RESULT >>							
Load Factor After 38 iteration = -1.4396e+02							
[Buckling Shape]							
Node	X-Disp <m.>	Y-Disp <m.>	Z-Disp <m.>	X-Rota. <Rad>	Y-Rota. <Rad>	Z-Rota. <Rad>	B-Twist. <rad/m.>
1	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00
2	0.0e+00	1.6e-05	-7.1e-02	1.7e-07	0.0e+00	5.3e+00	-1.2e-03
3	1.3e-04	1.3e-05	-5.7e-02	1.4e-06	0.0e+00	8.6e+00	-2.0e-03
4	2.0e-04	4.9e-06	-2.2e-02	5.2e+07	0.0e+00	8.6e+00	-2.0e-03
5	2.0e-04	-4.9e-06	2.2e-02	-5.2e-07	0.0e+00	5.3e+00	-1.2e-03
6	1.3e-04	0.0e+00	0.0e+00	0.0e+00	-1.3e-05	5.7e-02	-1.4e-06

Press Any Key To Continue

ประวัติผู้ศึกษา

นายสมชาย พัฒนภาพ เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ.2508 ที่อำเภอเมือง
จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
จาก มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2529 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เมื่อปีการศึกษา 2530

