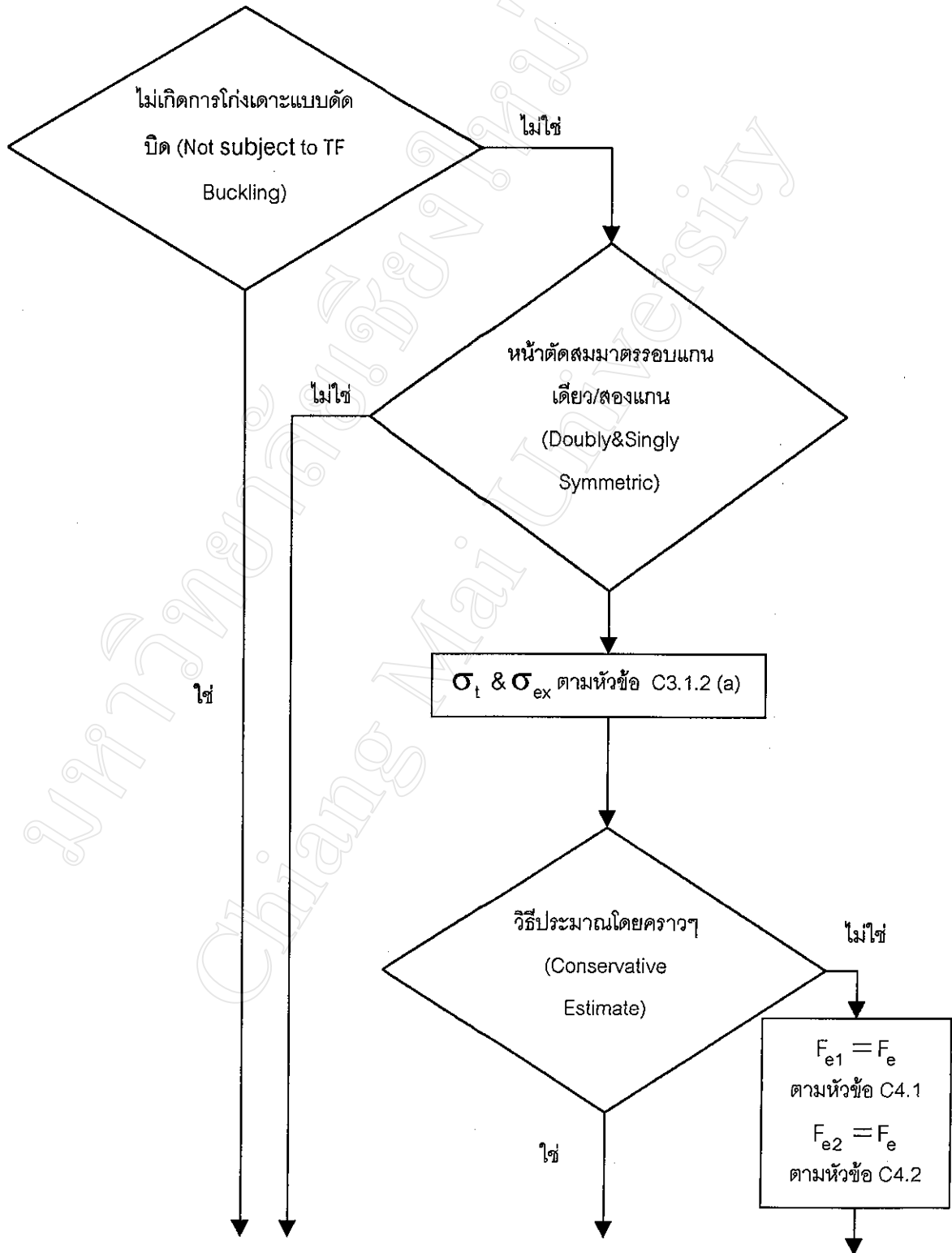


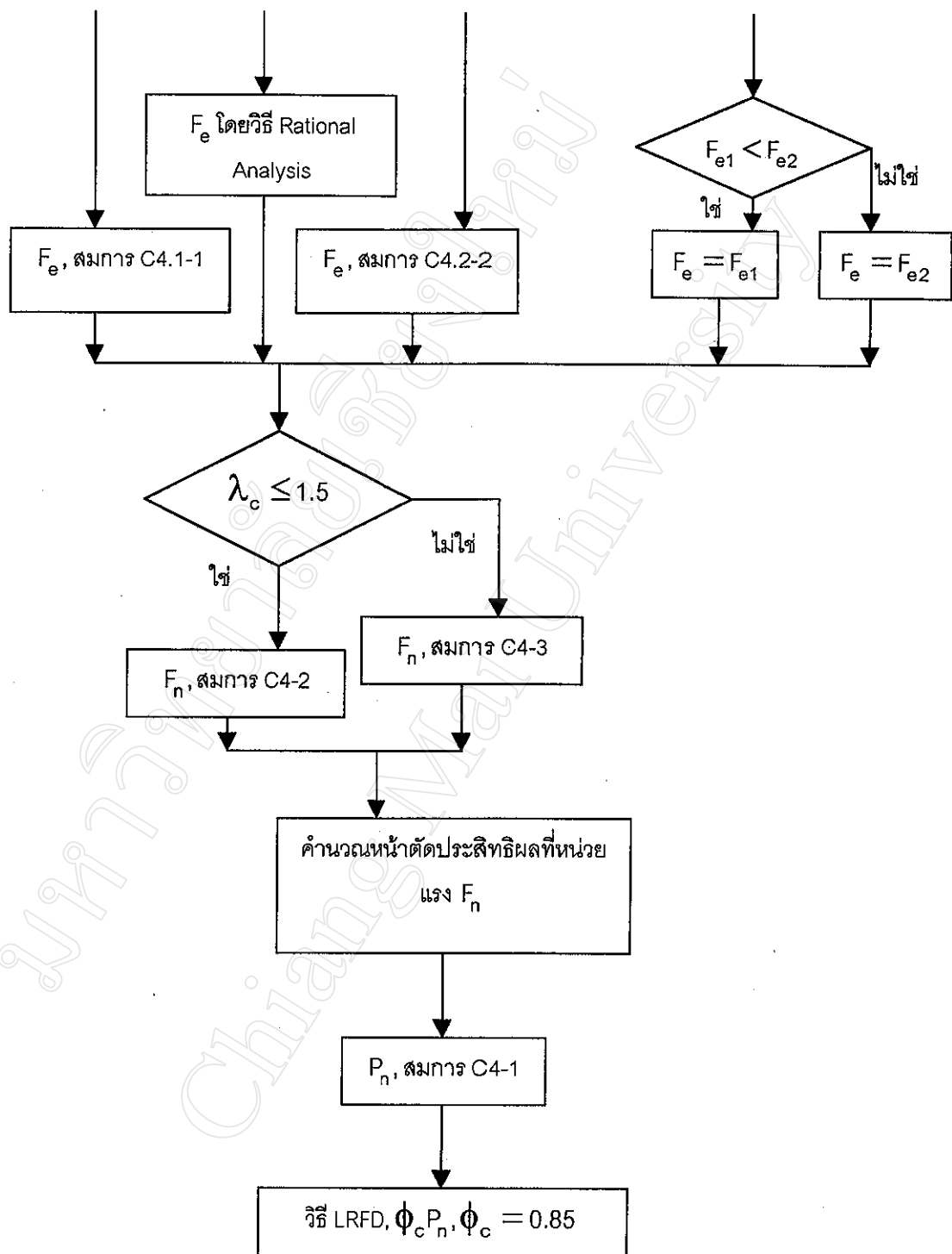
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายการคำนวณตามมาตรฐาน, การหาแรงโก่งเดาะบิดเบี้ยว
การหาแรงโก่งเดาะเฉพาะจุด และกำลังของหน้าตัด

การคำนวณในองค์ประกอบที่รับแรงอัดตามหัวข้อ C4 ตามมาตรฐาน AISI แสดงขั้นตอนดังนี้





รูปที่ ก1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน AISI

$$+ \alpha(0.0833c^3 + \frac{c}{4}(a-c)^2 + u(a/2 + 0.637r)^2 + 0.149r^3))$$

1.4 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงกับแนวแกนแผ่นเอว (Distance between centroid and web centerline)

$$\bar{x} = \frac{2t}{A}(b(b/2 + r) + u(0.363r) + \alpha(u(b + 1.637r) + c(b + 2r)))$$

1.5 โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน y (Moment of inertia about y-axis)

$$I_y = 2t(b(b/2 + r)^2 + 0.0833b^3 + 0.356r^3 + \alpha(c(b + 2r)^2 + u(b + 1.637r)^2 + 0.149r^3)) - A(\bar{x})^2$$

1.6 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนกับแนวแกนแผ่นเอว (Distance between shear center and web centerline)

$$m = \frac{\bar{b}t}{12I_x}(6\bar{c}(\bar{a})^2 + 3\bar{b}(\bar{a})^2 - 8(\bar{c})^3)$$

1.7 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงและจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (Distance between centroid and shear center)

$$x_0 = -(\bar{x} + m)$$

1.8 ค่าคงที่การบิดของเซนวานอง (St. Venant torsion constant)

$$J = \frac{t^3}{3}(a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u))$$

1.9 ค่าคงที่การหดตัวตามแนวแกน (Warping constant)

$$C_w = \frac{t^2}{A}(\frac{\bar{x}A(\bar{a})^2}{t}(\frac{(\bar{b})^2}{3} + m^2 - m\bar{b}) + \frac{A}{3t}((m)^2(\bar{a})^3 + (\bar{b})^2(\bar{c})^2(2\bar{c} + 3\bar{a})) - \frac{I_x m^2}{t}(2\bar{a} + 4\bar{c}) + \frac{m(\bar{c})^2}{3}(8(\bar{b})^2(\bar{c}) + 2m(2\bar{c}(\bar{c} - \bar{a}) + \bar{b}(2\bar{c} - 3\bar{a}))) + \frac{(\bar{b})^2(\bar{a})^2}{6}((3\bar{c} + \bar{b})(4\bar{c} + \bar{a}) - 6(\bar{c})^2) - \frac{m^2(\bar{a})^4}{4})$$

1.10 ตัวแปร β_w (Parameter β_w)

$$\beta_w = -(0.0833(\bar{x}(\bar{a})^3) + t(\bar{x})^3 \bar{a})$$

1.11 ตัวแปร β_f (Parameter β_f)

$$\beta_f = \frac{t}{2}((\bar{b} - \bar{x})^4 - (\bar{x})^4) + \frac{t(\bar{a})^2}{4}((\bar{b} - \bar{x})^2 - (\bar{x})^2)$$

1.12 ตัวแปร β_L (Parameter β_L)

$$\beta_L = 2ct(\bar{b} - \bar{x})^3 + \frac{2}{3}t(\bar{b} - \bar{x})((\bar{a}/2)^3 - (\bar{a}/2 - \bar{c})^3)$$

1.13 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดยืดหยุ่น (Parameter used in determination of elastic moment)

$$j = \frac{1}{2I_y}(\beta_w + \beta_f + \beta_L) - x_0$$

1.14 ค่าคงตัวการดัดบิด (Torsional-flexural constant)

$$\beta = 1 - (x_0/r_0)^2$$

จากค่าเฉลี่ยขนาดของหน้าตัดที่วัดได้จากตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะได้ว่า

$$A' = 10.015 \text{ ซม.} \quad \bar{a} = 9.769 \text{ ซม.} \quad a = 8.069 \text{ ซม.}$$

$$B' = 5.011 \text{ ซม.} \quad \bar{b} = 4.765 \text{ ซม.} \quad b = 3.065 \text{ ซม.}$$

$$C' = 1.411 \text{ ซม.} \quad \bar{c} = 1.288 \text{ ซม.} \quad c = 0.438 \text{ ซม.}$$

$$t = 0.246 \text{ ซม.} \quad u = 1.335 \text{ ซม.}$$

$$r = 0.850 \text{ ซม.}$$

คุณสมบัติของหน้าตัดที่คำนวณได้ตามสูตรดังกล่าวข้างต้นคือ

$$\text{พื้นที่หน้าตัด } A = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$\text{โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน } x, I_x = 77.484 \text{ ซม.}^2$$

$$\text{ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงและแนวแกนแผ่นเอว } \bar{x} = 2.628 \text{ ซม.}$$

$$\text{โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน } y, I_y = 15.870 \text{ ซม.}^2$$

$$\text{ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงและจุดศูนย์กลางแรงเฉือน } x_0 = -4.17 \text{ ซม.}$$

$$\text{ค่าคงที่การบิดของเซนวานอง } j = 0.101296 \text{ ซม.}^4$$

$$\text{ค่าคงที่การหัดตัวตามแนวแกน } C_w = 367.795 \text{ ซม.}^6$$

$$\text{ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดยืดหยุ่น } j = 6.673 \text{ ซม.}$$

$$\text{ค่าคงตัวการดัดบิด } \beta = 0.517$$

$$r_x = 3.928 \text{ ซม.}$$

$$r_y = 1.778 \text{ ซม.}$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} = 5.999 \text{ ซม.}$$

โดยค่า

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$G = 0.8 \times 10^6 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_y = 3457 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$K_x = K_y = K_t = 0.5 \text{ สำหรับเสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่น}$$

$$K_x = K_y = K_t = 1.0 \text{ สำหรับเสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระ}$$

2. การคำนวณตามมาตรฐาน American Iron and Steel Institute

2.1 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 40 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 40$ ซม.

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 40 / 1.778)^2 = 163,750.67 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 40 / 3.928)^2 = 799,515.07 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (0.5 \times 40)^2)$$

$$= 105,903.24 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 99,121.71 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 99,121.7 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 99,121.71} = 0.1868 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.0348763$$

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 3,406.90 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4$$

B4-2

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E/F_n} = 31.78$$

B4-1

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 10.59$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 ((w/t)/S) - \sqrt{k_u/4}^3 = 0.000349307 \text{ ซม.}^4$$

B4.2-4

$$I_s / I_a = 4.93$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1$$

B4.2-5

$$C_1 = C_2 - 1 = 1$$

B4.2-6

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948$$

B4.2-8

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948$$

B4.2-7

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.307 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $b = w = 3.065 \text{ ซม.}$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.695 > 0.673$$

B2.1-4

$$\rho = (1 - 0.22/\lambda) / \lambda = 0.983$$

B2.1-3

$$b = \rho w = 7.935 \text{ ซม.}$$

B2.1-1

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.115 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $d'_s = 0.438$

$d_s = C_2 d'_s = 0.438$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$A_e = 4.989 \text{ ซม.}^2$

$P_n = A_e F_n = 16,996.11 \text{ กก.}$

C4-1

ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่มากระทำเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดประสิทธิภาพ

$a = 7.935 \text{ ซม.}$ แผ่นเอว (ความกว้างประสิทธิภาพ)

$b = 3.065 \text{ ซม.}$ ปีก

$c = 0.438 \text{ ซม.}$ ขอบเสริมกำลัง

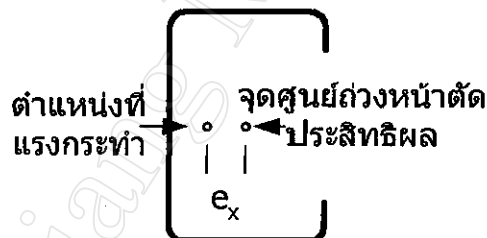
$u = 1.335 \text{ ซม.}$ ส่วนโค้ง

ดังนั้นระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงประสิทธิภาพกับแนวแกนแผ่นเอว (Distance between effective centroid and web centerline)

$\bar{x} = 1.553 \text{ ซม.}$

ดังนั้นระยะเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ

$e_x = 1.553 - 1.543 = 0.010 \text{ ซม.}$ ทางด้านซ้ายของจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดประสิทธิภาพ



รูปที่ ก3 ตำแหน่งของแรงที่มากระทำเมื่อเทียบกับศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดประสิทธิภาพ

ข้อกำหนด C3.1

ค่า M_{ny} คือค่าที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด C3.1.1 หรือ C3.1.2

- ข้อกำหนด C3.1.1: M_{ny} คำนวณจากจุดที่เกิดจุดคลากเริ่มแรก (will be calculated on the basis of the initiation of yielding)

จากตำแหน่งที่แรงมากระทำเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดประสิทธิภาพจะเห็นว่าจุดคลากจะไม่เกิดที่ส่วนแผ่นเอวของหน้าตัด

ดังนั้นสมมติให้ $f = 1740 \text{ กก./ซม.}^2$ คือหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นเอว

$w = 7.935 \text{ ซม.}$ $t = 0.246 \text{ ซม.}$ $k = 4.00$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}} = 0.488 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $b = w = 7.935$ ซม.

ตาราง ก1 การคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัดประสิทธิภาพตามข้อกำหนด C3.1.1

องค์ประกอบ	L, ความยาว (ซม.)	x, ระยะห่างจากขอบตามแนวแกน x (ซม.)	Lx (ซม. ²)	Lx ² (ซม. ³)	I ₁ ' รอบแกนตัวเอง (ซม. ³)
ปีก	6.13	2.506	15.359	38.481	4.799
ส่วนโค้งด้านบน	2.669	0.432	1.152	0.497	-
ส่วนโค้งด้านล่าง	2.669	4.579	12.223	55.973	-
แผ่นเอว	7.935	0.123	0.976	0.120	-
ขอบเสริมกำลัง	0.876	4.888	4.282	20.930	-
รวม	20.279		33.991	116.001	4.799

ดังนั้นระยะห่างจากแกน y ถึงขอบสุดของหน้าตัด

$$x_{cg} = 33.991 / 20.279 = 1.676 \text{ ซม.}$$

$$f = F_y x_{cg} / (5.011 - x_{cg}) = 1737.52 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ ใกล้เคียงกับที่สมมุติ}$$

$$I_y' = Lx^2 + I_1' - Lx_{cg}^2 = 63.826$$

$$\text{ดังนั้น } I_y = I_y' t = 15.701 \text{ ซม.}^4$$

ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหน้าตัดประสิทธิภาพตามหน่วยแรงอัดหรือหน่วยแรงดึงที่ขอบสุดของหน้าตัดที่ทำให้เกิดหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงคลากคือ

$$S_e = I_y / (5.011 - x_{cg}) = 4.708 \text{ ซม.}^3$$

$$M_{ny} = S_e F_y = 16,267.27 \text{ กก.ซม.}$$

C3.1.1-1

- ข้อกำหนดที่ C3.1.2: M_{ny} คำนวณโดยพิจารณากำลังของการโก่งเดาะด้านข้าง (will be calculated on the basis of the lateral buckling strength)

พิจารณาน้ำตัดเต็ม

$$I_y = 15.870 \text{ ซม.}^4$$

$$x_{cg} = 1.666 \text{ ซม. (พิจารณาที่ขอบสุดของหน้าตัดที่เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุด)}$$

$$S_f = I_y / x_{cg} = 6.526 \text{ ซม.}^3$$

$$M_y = S_f F_y = 39,930.49 \text{ กก.ซม.}$$

C3.1.2-5

$$C_s = 1 \text{ (เกิดหน่วยแรงอัดทางด้านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลาง)}$$

$$A = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$M_1 / M_2 = -1$$

$$C_{TF} = 0.6 - 0.4(M_1 / M_2) = 1$$

C3.1.2-12

$$M_e = C_s A \sigma_{ex} (j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})}) / C_{TF} = 54,978,528.19$$

C3.1.2-7

$$2.78 M_y = 91,546.75$$

$$\text{สำหรับ } M_e > 2.78 M_y$$

$$M_c = M_y = 32,930.49 \text{ กก.ซม.}$$

C3.1.2-2

$$\text{หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น} = M_c / S_f = 3457 \text{ กก./ซม.}^2$$

การคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรง 3457 กก./ซม.² เพื่อหาค่า S_c

พิจารณาแผ่นเอว

$$k = 4.00 \quad w = 8.069 \text{ ซม.} \quad t = 32.80 \text{ ซม.} \quad f = 3457 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}} = 0.700 > 0.673$$

B2.1-4

$$\rho = (1 - 0.22 / \lambda) / \lambda = 0.980$$

B2.1-3

$$b = \rho w = 7.904 \text{ ซม.}$$

B2.1-2

ตาราง ก2 การคำนวณคุณสมบัติของหน้าตัดประสิทธิภาพตามข้อกำหนด C3.1.2

องค์ประกอบ	L, ความยาว (ซม.)	x, ระยะห่างจากขอบตามแนวแกน x (ซม.)	Lx (ซม. ²)	Lx ² (ซม. ³)	I _y ' รอบแกนตัวเอง (ซม. ³)
ปีก	6.13	2.506	15.359	38.481	4.799
ส่วนโค้งด้านบน	2.669	0.432	1.152	0.497	-
ส่วนโค้งด้านล่าง	2.669	4.579	12.223	55.973	-
แผ่นเอว	7.904	0.123	0.972	0.120	-
ขอบเสริมกำลัง	0.876	4.888	4.282	20.930	-
รวม	20.248		33.987	116.000	4.799

ดังนั้นระยะห่างจากแกน y ถึงขอบสุดของหน้าตัด

$$x_{cg} = 33.987 / 20.248 = 1.679 \text{ ซม.}$$

$$I_y' = Lx^2 + I_y - Lx_{cg}^2 = 63.751$$

$$\text{ดังนั้น } I_y = I_y' + Lx_{cg}^2 = 15.683 \text{ ซม.}^4$$

$$S_c = I_y / x_{cg} = 9.343 \text{ ซม.}^3$$

$$M_{ny} = M_c S_c / S_F = 32,299.18 \text{ กก.ซม.} \quad \text{C3.1.2-1}$$

M_{ny} พิจารณาจากค่าที่น้อยที่สุดระหว่างค่าที่ได้จากข้อกำหนดที่ C3.1.1 และ C3.1.2 ดังนั้นค่า

$$M_{ny} = 16,267.27 \text{ ตามข้อกำหนดที่ C3.1.1}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงคลาก, F_y

$$d = 0.438 \text{ ซม. } t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4$$

$$D = 1.411 \text{ ซม.}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E/F_y} = 31.55$$

B4-1

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 10.59$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 \left((w/t)/S \right) - \sqrt{k_u/4}^3 = 0.00040008 \text{ ซม.}^4$$

B4.2-4

$$I_s / I_a = 4.31$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1$$

B4.2-5

$$C_1 = C_2 - 1 = 1$$

B4.2-6

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948$$

B4.2-8

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948$$

B4.2-7

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0.310 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $b = w = 3.065 \text{ ซม.}$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0.700 > 0.673$$

B2.1-4

$$\rho = (1 - 0.22/\lambda) / \lambda = 0.980$$

B2.1-3

$$b = \rho w = 7.904 \text{ ซม.}$$

B2.1-2

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0.116 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = d'_s C_2 = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิผลที่หน่วยแรงคดงามีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 4.981 \text{ ซม.}^2$$

$$P_{n0} = A_e F_y = 16,996.11 \text{ กก.}$$

การคำนวณตามข้อกำหนด C5.2 องค์ประกอบที่รับแรงอัดและแรงดัด (Combined Compressive Axial Load and Bending)

การหาค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบโดยวิธี LRFD

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{C_{my} M_{uy}}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad \text{C5.2.2-1}$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_{n0}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad \text{C5.2.2-2}$$

โดย $C_{my} = 1.0$ $\phi_c = 0.85$ $\phi_b = 0.9$

$$\alpha_y = 1 - (P_u / P_{ey}) \quad \text{C5.2.2-5}$$

$M_{uy} = P_u e_x$, สมมติให้ $P_u = 14,307$ กก.

เมื่อแทนค่าในสมการ C5.2.2-1 จะได้ว่า $\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{C_{my} M_{uy}}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} = 0.999 < 1.0$ ผ่าน

เมื่อแทนค่าในสมการ C5.2.2-2 จะได้ว่า $\frac{P_u}{\phi_c P_{n0}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} = 0.9869 < 1.0$ ผ่าน

ดังนั้นน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 14,307 กก.

การหาค่ากำลังสูงสุดตามการคำนวณตามมาตรฐาน AISI

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{C_{my} M_{uy}}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad \text{C5.2.2-1}$$

$$\frac{P_u}{P_{n0}} + \frac{M_{uy}}{M_{ny}} \leq 1.0 \quad \text{C5.2.2-2}$$

โดย $C_{my} = 1.0$

$$\alpha_y = 1 - (P_u / P_{ey}) \quad \text{C5.2.2-5}$$

$M_{uy} = P_u e_x$, สมมติให้ $P_u = 16,812$ กก.

เมื่อแทนค่าในสมการ C5.2.2-1 จะได้ว่า $\frac{P_u}{P_n} + \frac{C_{my} M_{uy}}{M_{ny} \alpha_y} = 0.999 < 1.0$ ผ่าน

เมื่อแทนค่าในสมการ C5.2.2-2 จะได้ว่า $\frac{P_u}{P_{n0}} + \frac{M_{uy}}{M_{ny}} = 0.9869 < 1.0$ ผ่าน

ดังนั้นน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 16,812 กก.

2.2 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 100 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 100$ ซม.

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 100 / 1.778)^2 = 26,200.11 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 100 / 3.928)^2 = 127,922.41 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (0.5 \times 100)^2)$$

$$= 17,321.19 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 16,187.48 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 16,187.48 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 16,187.48} = 0.4621 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.2135601$$

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 3,161.40 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 32.99 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 11.00$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 \left((w/t)/S \right) - \sqrt{k_u/4}^3 = 0.000158315 \text{ ซม.}^4$$

B4.2-4

$$I_s / I_a = 10.88$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1$$

B4.2-5

$$C_1 = C_2 - 1 = 1$$

B4.2-6

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948$$

B4.2-8

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948$$

B4.2-7

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.296 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $b = w = 3.065 \text{ ซม.}$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.669 < 0.673$$

B2.1-4

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.115 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิผลมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 15,875.29 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 13,494.00 \text{ กก.}$$

$$\phi_c = 0.85$$

2.3 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 150 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 150$ ซม.

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 150 / 1.778)^2 = 11,644.49 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 150 / 3.928)^2 = 56,854.41 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (0.5 \times 150)^2)$$

$$= 7,947.43 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 7,410.50 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 7,410.50 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 7410.50} = 0.6830 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.4665002$$

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658 \lambda_c^2) F_y = 2,843.82 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 34.78 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 11.59$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 \left((w/t)/S \right) - \sqrt{k_u/4}^3 = 0.0000327718 \text{ ซม.}^4$$

B4.2-4

$$I_s / I_a = 52.56$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1$$

B4.2-5

$$C_1 = C_2 - 1 = 1$$

B4.2-6

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948$$

B4.2-8

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948$$

B4.2-7

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.281 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $b = w = 3.065 \text{ ซม.}$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.635 < 0.673$$

B2.1-4

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.105 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 14,280.51 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 12,138.43 \text{ กก.}$$

$$\phi_c = 0.85$$

2.4 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 200 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 200$ ซม.

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 200 / 1.778)^2 = 6,550.03 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 200 / 3.928)^2 = 31,980.60 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_o^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (0.5 \times 200)^2)$$

$$= 4,666.61 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 4,337.58 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 4,337.58 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 4337.58} = 0.8927 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.7969889$$

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 2,476.44 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 37.27 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 12.42$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 \left((w/t)/S - \sqrt{k_u/4} \right)^3 = 0.0000001132 \text{ ซม.}^4$$

B4.2-4

$$I_s / I_a = 15,207$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1$$

B4.2-5

$$C_1 = C_2 - 1 = 1$$

B4.2-6

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948$$

B4.2-8

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948$$

B4.2-7

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.262 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.592 < 0.673$$

B2.1-4

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.098 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 12,435.68 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 10,570.32 \text{ กก.}$$

$$\phi_c = 0.85$$

2.5 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 220 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 220$ ซม.

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 220 / 1.778)^2 = 5,413.25 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (0.5 \times 220 / 3.928)^2 = 26,430.25 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (0.5 \times 220)^2)$$

$$= 3,934.53 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 3,615.55 \text{ กก./ซม.}^2$$

$F_e = 3,615.55 \text{ กก./ซม.}^2$ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 3,615.55} = 0.9730 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.9467223$$

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 2,326.00 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 38.46 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 12.82$$

$$w/t < S/3$$

ดังนั้น $b = w = 3.065$ ซม.

แผ่นเอว

$w = 8.069$ ซม. และ $k = 4.00$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.574 < 0.673$$

B2.1-4

$b = w = 8.069$ ซม.

ขอบเสริมกำลัง

$d = 0.438$ ซม. และ $k = 0.43$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.095 < 0.673$$

B2.1-4

ดังนั้น $d'_s = 0.438$

$d_s = C_2 d'_s = 0.438$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$A_e = 5.022$ ซม.²

$P_n = A_e F_n = 11,680.24$ กก.

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

โดยวิธี LRFD เท่ากับ $\phi_c P_n = 9,928.20$ กก.

$\phi_c = 0.85$

2.6 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 40 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 40 + 17 = 57$ ซม. (ขนาดของฐานรองรับเท่ากับ 17 ซม.)

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2$$

C4.1-1

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 57 / 1.778)^2 = 20,160.13 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2$$

C3.1.2-8

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 57 / 3.928)^2 = 98,423.14 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2)$$

C3.1.2-10

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (1.0 \times 57)^2)$$

$$= 13,431.47 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t})$$

C4.2-1

$$= 12,545.56 \text{ กก. / ซม.}^2$$

$$F_e = 12,545.56 \text{ กก. / ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 12,545.46} = 0.5249 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 0.2755556$$

$$\text{สำหรับ } \lambda_c \leq 1.5$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 3,080.42 \text{ กก. / ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 33.42 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 11.14$$

$$S/3 < w/t < S$$

$$I_a = 399t^4 ((w/t)/S - \sqrt{k_u/4})^3 = 0.000114598 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4.2-4}$$

$$I_s / I_a = 15.03$$

$$C_2 = I_s / I_a \leq 1 = 1 \quad \text{B4.2-5}$$

$$C_1 = C_2 - 1 = 1 \quad \text{B4.2-6}$$

$$k_u = 0.43 \quad n = 0.5$$

$$k_a = 5.25 - 5(D/w) \leq 4 = 2.948 \quad \text{B4.2-8}$$

$$k = C_2^n (k_a - k_u) + k_u = 2.948 \quad \text{B4.2-7}$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.292 < 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.661 > 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

B2.1-1

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.109 < 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 15,468.65 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 13,148.35 \text{ กก.} \quad \phi_c = 0.85$$

2.7 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 100 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 100 + 17 = 117$ ซม. (ขนาดของฐานรองรับเท่ากับ 17 ซม.)

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 117 / 1.778)^2 = 4,784.88 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 117 / 3.928)^2 = 23,326.26 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (1.0 \times 117)^2)$$

$$= 3,529.86 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 3,272.21 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 3,272.21 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 3,272.21} = 1.0278 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 1.056$$

$$\text{สำหรับ } \lambda_c \leq 1.5$$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y = 2,221.57 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E / F_n} = 39.35 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 13.12$$

$$w/t < S/3$$

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.561 > 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.} \quad \text{B2.1-1}$$

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.093 < 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438 \quad \text{B4.2-9}$$

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 11,155.83 \text{ กก.} \quad \text{C4-1}$$

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

โดยวิธี LRFD เท่ากับ $\phi_c P_n = 9,482.46 \text{ กก.}$ $\phi_c = 0.85$

2.8 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 150 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 150 + 17 = 167 \text{ ซม.}$ (ขนาดของฐานรองรับเท่ากับ 17 ซม.)

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 167 / 1.778)^2 = 2,348.61 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 167 / 3.928)^2 = 11,467.10 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (1.0 \times 167)^2)$$

$$= 1,960.91 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 1,799.07 \text{ กก./ซม.}^2$$

$F_e = 1,799.07 \text{ กก./ซม.}^2$ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 1799.09} = 1.3862 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 1.921$$

สำหรับ $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y = 1,546.72 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$d = 0.438 \text{ ซม.}$ (ขอบเสริมกำลัง) $t = 0.246 \text{ ซม.}$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$D = 1.411 \text{ ซม.}$ (ขอบเสริมกำลัง)

$w = 3.065 \text{ ซม.}$ (ปีก)

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E/F_n} = 47.16$$

B4-1

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 15.57$$

$$w/t < S/3$$

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.473 > 0.673$$

B2.1-4

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

B2.1-1

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.078 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 7,767.00 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 6,602.48 \text{ กก.}$$

$$\phi_c = 0.85$$

2.9 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 200 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 200 + 17 = 217$ ซม. (ขนาดของฐานรองรับเท่ากับ 17 ซม.)

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2$$

C4.1-1

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 217 / 1.778)^2 = 1,390.99 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2$$

C3.1.2-8

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 217 / 3.928)^2 = 6,791.52 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_o^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2)$$

C3.1.2-10

$$= 1/(5.022 \times 5.999^2)(800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795)/(1.0 \times 217)^2)$$

$$= 1,344.21 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta)((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 1,216.00 \text{ กก./ซม.}^2$$

$F_e = 1,216.00 \text{ กก./ซม.}^2$ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e} = \sqrt{3457/1,216} = 1.6861 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 2.843$$

สำหรับ $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right)F_y = 1,066.43 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4 \quad \text{B4-2}$$

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E/F_n} = 56.80 \quad \text{B4-1}$$

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 18.93$$

$$w/t < S/3$$

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.389 > 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.} \quad \text{B2.1-1}$$

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.064 < 0.673 \quad \text{B2.1-4}$$

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438 \quad \text{B4.2-9}$$

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 5,355.20 \text{ กก.} \quad \text{C4-1}$$

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 4,551.92 \text{ กก.} \quad \phi_c = 0.85$$

2.10 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 220 ซม.

สำหรับหน้าตัดสมมาตรรอบแกนเดียว

โดยที่ $L = 220 + 17 = 237$ ซม. (ขนาดของฐานรองรับเท่ากับ 17 ซม.)

$$(F_e)_1 = (\pi^2 E) / (K_y L_y / r_y)^2 \quad \text{C4.1-1}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 237 / 1.778)^2 = 1,166.13 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{ex} = (\pi^2 E) / (K_x L_x / r_x)^2 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C3.1.2-8}$$

$$= (\pi^2 \times 2,100,000) / (1.0 \times 237 / 3.928)^2 = 5,693.64 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = 1 / (A r_0^2) (GJ + (\pi^2 E C_w) / (K_t L_t)^2) \quad \text{C3.1.2-10}$$

$$= 1 / (5.022 \times 5.999^2) (800,000 \times 0.101296 + (\pi^2 \times 2,100,000 \times 367.795) / (1.0 \times 237)^2) \\ = 1,199.40 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$(F_e)_2 = (1/2\beta) ((\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t}) \quad \text{C4.2-1}$$

$$= 1,077.75 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$F_e = 1,077.75 \text{ กก./ซม.}^2 \text{ (ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการ C4.1-1 และ C4.2-1)}$$

การคำนวณ F_n

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_e} = \sqrt{3457 / 1,077.75} = 1.7910 \quad \text{C4-4}$$

$$\lambda_c^2 = 3.208$$

สำหรับ $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y = 945.19 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \text{C4-2}$$

การคำนวณหน้าตัดประสิทธิภาพที่หน่วยแรงเท่ากับ F_n

ปีก

$$d = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)} \quad t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$I_s = d^3 t / 12 = 0.0017226 \text{ ซม.}^4$$

B4-2

$$D = 1.411 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$w = 3.065 \text{ ซม. (ปีก)}$$

$$D/w = 0.46 < 0.80$$

$$S = 1.28 \sqrt{E/F_n} = 60.33$$

B4-1

$$w/t = 12.46 \quad S/3 = 20.11$$

$$w/t < S/3$$

$$\text{ดังนั้น } b = w = 3.065 \text{ ซม.}$$

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม. และ } k = 4.00$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.366 > 0.673$$

B2.1-4

$$b = w = 8.069 \text{ ซม.}$$

B2.1-1

ขอบเสริมกำลัง

$$d = 0.438 \text{ ซม. และ } k = 0.43$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{F_n}{E}} = 0.061 < 0.673$$

B2.1-4

$$\text{ดังนั้น } d'_s = 0.438$$

$$d_s = C_2 d'_s = 0.438$$

B4.2-9

ดังนั้นหน้าตัดประสิทธิภาพมีขนาดเท่ากับ

$$A_e = 5.022 \text{ ซม.}^2$$

$$P_n = A_e F_n = 4,746.35 \text{ กก.}$$

C4-1

ดังนั้นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\text{โดยวิธี LRFD เท่ากับ } \phi_c P_n = 4,034.39 \text{ กก.}$$

$$\phi_c = 0.85$$

3. การคำนวณตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

ตัวคูณประกอบหน่วยแรงและ/หรือเนื้อที่ Q

$$Q = Q_a Q_s$$

การคำนวณตัวคูณประกอบหน่วยแรง Q_s

4200 หน่วยแรงออกแบบพื้นฐาน

$$F = 0.60F_y = 2074.20 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (42-1)$$

4300 หน่วยแรงอัดในองค์ประกอบไม่เสริมกำลัง

$$w = 0.438 \text{ ซม. (ขอบเสริมกำลัง)}$$

$$t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$w/t = 1.780$$

$$531/\sqrt{F_y} = 9.031 > w/t$$

$$F_c = 0.60F_y = 2074.20 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (43-1)$$

ดังนั้นตัวคูณประกอบหน่วยแรง $Q_s = F/F_c = 1$

การคำนวณตัวคูณประกอบพื้นที่ Q_a

แผ่นเอว

$$w = 8.069 \text{ ซม.}$$

$$t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$w/t = 32.80 < 500 \quad 3500(\text{ข})$$

$$(w/t)_{\text{จำกัด}} = 1430/\sqrt{F_c} = 31.40 \quad (33-1)$$

$$w/t > (w/t)_{\text{จำกัด}}$$

ดังนั้นความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นเอวเท่ากับ

$$b = \frac{2120t}{\sqrt{F_c}} \left[1 - \frac{464}{(w/t)\sqrt{F_c}} \right] = 7.894 \text{ ซม.} \quad (33-2)$$

ปีก

$$w = 3.065 \text{ ซม.}$$

$$t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$w/t = 12.46 < 60 \quad 3500(\text{ก})$$

$$(w/t)_{\text{จำกัด}} = 1430/\sqrt{F_c} = 31.40 \quad (33-1)$$

$$w/t < (w/t)_{\text{จำกัด}}$$

ดังนั้นปีกมีความกว้างประสิทธิผลเต็มเท่ากับ 3.065 ซม.

พ.ท.หน้าตัดประสิทธิผลเท่ากับ $5.022 - 0.246 \times (8.069 - 7.894) = 4.979 \text{ ซม.}^2$

ดังนั้น $Q_a = A_{ef} / A = 0.991$

$$Q = Q_a Q_s = 0.991$$

พิจารณาส่วนเสริมกำลังสำหรับองค์ประกอบอัด

ในกรณีที่ส่วนเสริมกำลังเป็นขอบเม้มแบบธรรมดา ดัดพับเป็นมุมฉาก ความลึกรวมอย่างน้อยของขอบเม้มอาจพิจารณาได้ดังนี้

$$d_{\min} = 2.80t \sqrt{(w/t)^2 - (281,000/F_y)} \geq 4.80t$$

โดย $w = 3.065 \text{ ซม.}$

$$t = 0.246 \text{ ซม.}$$

$$w/t = 12.4$$

จะได้ $d_{\min} = 1.18 \text{ ซม.}$ ซึ่งน้อยกว่าความลึกรวมของขอบเสริมกำลัง 1.41 ซม. ผ่าน

3.1 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 40 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 40 \text{ ซม.}$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 0.5 \times 40 / 1.778 = 11.25 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522 Q F_y - \left(\frac{Q F_y K L / r_y}{12520} \right)^2 = 1,779.63 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 799,515.07 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(KL)^2} \right] = 105,903.24 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] = 99,121.71 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5 F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 1,773.66 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,773.66 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 8,906.60 \text{ กก.}$$

3.2 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 100 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 100 \text{ ซม.}$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 0.5 \times 100 / 1.778 = 28.13 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522QF_y - \left(\frac{QF_y KL / r_y}{12520} \right)^2 = 1,729.83 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL / r_x)^2} = 127,922.41 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 17,321.19 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 16,187.48 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 1,694.50 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,773.66 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 8,509.08 \text{ กก.}$$

3.3 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 150 ซม.

4700 องค์กรรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 150$ ซม.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 0.5 \times 150 / 1.778 = 42.19 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522 Q F_y - \left(\frac{Q F_y K L / r_y}{12520} \right)^2 = 1,655.72 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K L / r_x)^2} = 56,854.41 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K L)^2} \right] = 7,947.43 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] = 7,410.50 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5 F_y$$

$$F_{a2} = 0.522 F_y - \frac{F_y^2}{7.67 \sigma_{TFO}} = 1,582.43 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,582.43 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = A F_a = 7,946.35 \text{ กก.}$$

3.4 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 200 ซม.

4700 องค์กรรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 200$ ซม.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 0.5 \times 200 / 1.778 = 56.25 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522QF_y - \left(\frac{QF_y KL/r_y}{12520}\right)^2 = 1,551.97 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 31,980.60 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 4,666.61 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 4,337.58 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 1,436.02 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,436.02 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 7,211.10 \text{ กก.}$$

3.5 เสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่ความยาว 220 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 220 \text{ ซม.}$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 0.5 \times 220 / 1.778 = 61.88 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522QF_y - \left(\frac{QF_y KL/r_y}{12520}\right)^2 = 1,502.17 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 26,430.25 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 3,934.53 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 3,651.55 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 1,369.68 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,369.68 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 6,877.98 \text{ กก.}$$

3.6 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 40 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 40 + 17 = 57$ ซม. (รวมขนาดของฐานรองรับ 17 ซม.)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 1 \times 57 / 1.778 = 32.06 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522QF_y - \left(\frac{QF_y KL / r_y}{12520} \right)^2 = 1,712.06 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL / r_x)^2} = 98,432.14 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 13,431.47 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 12,545.56 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 1,667.03 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,667.03 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 8,371.15 \text{ กก.}$$

3.7 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุดได้โดยอิสระที่มีความยาว 100 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 100 + 17 = 117$ ซม. (รวมขนาดของฐานรองรับ 17 ซม.)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 1.0 \times 117 / 1.778 = 65.81 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522 Q F_y - \left(\frac{Q F_y K L / r_y}{12520} \right)^2 = 1,464.49 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K L / r_x)^2} = 23,362.26 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K L)^2} \right] = 3,529.86 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] = 3,272.21 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5 F_y$$

$$F_{a2} = 0.522 F_y - \frac{F_y^2}{7.67 \sigma_{TFO}} = 1,321.06 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 1,321.06 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = A F_a = 6,633.81 \text{ กก.}$$

3.8 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุดได้โดยอิสระที่มีความยาว 150 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 150 + 17 = 167$ ซม. (รวมขนาดของฐานรองรับ 17 ซม.)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 1.0 \times 167 / 1.778 = 93.94 < C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = 0.522QF_y - \left(\frac{QF_y KL/r_y}{12520}\right)^2 = 1,127.10 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 11,467.10 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 1,960.91 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 1,799.07 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} > 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522F_y - \frac{F_y^2}{7.67\sigma_{TFO}} = 937.80 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-6)$$

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 937.80 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 4,709.23 \text{ กก.}$$

3.9 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 200 ซม.

4700 องค์กรอาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 200 + 17 = 217 \text{ ซม.}$ (รวมขนาดของฐานรองรับ 17 ซม.)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 1.0 \times 217 / 1.778 = 122.07 > C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = \frac{10.68 \times 10^6}{(KL/r_y)^2} = 716.76 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-4)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 6,791.52 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 1,344.21 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 1,216.00 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} < 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522\sigma_{TFO} = 634.75 \text{ กก./ซม.}^2$$

(47-7)

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 634.75 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 3,187.47 \text{ กก.}$$

3.10 เสาที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 220 ซม.

4700 องค์อาคารรับแรงอัดตามแนวแกน

โดยที่ $L = 220 + 17 = 237 \text{ ซม.}$ (รวมขนาดของฐานรองรับ 17 ซม.)

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times 2.1 \times 10^6}{3457}} = 109.5$$

$$C_c / \sqrt{Q} = 109.5 / \sqrt{0.991} = 110.0$$

$$K_y L_y / r_y = 1.0 \times 237 / 1.778 = 133.32 > C_c / \sqrt{Q}$$

$$F_{a1} = \frac{10.68 \times 10^6}{(KL/r_y)^2} = 600.90 \text{ กก./ซม.}^2$$

(47-4)

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r_x)^2} = 5,693.64 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} \right] = 1,199.40 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\sigma_{TFO} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 1,077.75 \text{ กก./ซม.}^2 \quad (47-2)$$

$$\sigma_{TFO} < 0.5F_y$$

$$F_{a2} = 0.522\sigma_{TFO} = 562.59 \text{ กก./ซม.}^2$$

(47-7)

ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบ $F_a = 562.59 \text{ กก./ซม.}^2$

ค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ

$$P = AF_a = 2,825.08 \text{ กก.}$$

4. การคำนวณหาแรงโก่งเดาะบิดเบี้ยวของหน้าตัด

ความกว้างของแผ่นปีกเท่ากับ 5.011 ซม.

ความกว้างของขอบเสริมกำลังเท่ากับ 1.411 ซม.

ความกว้างของแผ่นเอวเท่ากับ 10.015 ซม.

ความหนาของหน้าตัดเท่ากับ 0.246 ซม.

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2.1×10^6 กก./ซม.²

ดังนั้นจะได้ว่า

$$A = (5.011 + 1.411) \times 0.246 = 1.579 \text{ ซม.}^2$$

$$\bar{y} = 1.411 \times \frac{0.7055}{5.011 + 1.411} = 0.155 \text{ ซม.}$$

$$\bar{x} = \frac{(5.011 \times 2.5055 + 1.411 \times 5.011)}{(5.011 + 1.411)} = 3.056 \text{ ซม.}$$

$$J = 0.246^3 \times \frac{5.011 + 1.411}{3} = 0.032 \text{ ซม.}^4$$

$$I_x = 5.011 \times \frac{0.246^3}{12} + 0.246 \times \frac{1.411^3}{12} + 5.011 \times 0.246 \times 0.155^2 + 1.411 \times 0.246 \times (0.7055 - 0.155)^2 = 0.198 \text{ ซม.}^4$$

$$I_y = 0.246 \times \frac{5.011^3}{12} + 1.411 \times \frac{0.246^3}{12} + 1.411 \times 0.246 \times (5.011 - 3.056)^2 + 5.011 \times 0.246 \times (3.056 - 2.5055)^2 = 4.281 \text{ ซม.}^4$$

$$I_{xy} = 5.011 \times 0.246 \times (2.5055 - 3.056) \times (-0.155) + 1.411 \times 0.246 \times (0.7055 - 0.155) \times (5.011 - 3.056) = 0.479 \text{ ซม.}^4$$

$$\beta_1 = 3.056^2 + \frac{0.198 + 4.281}{1.579} = 12.175 \text{ ซม.}^2$$

$$\lambda = 4.80 \left(\frac{0.198 \times 5.011^2 \times 10.015}{0.246^3} \right)^{0.25} = 36.531 \text{ ซม.}$$

$$\eta = \left(\frac{\pi}{36.531} \right)^2 = 0.00740$$

หาค่า P'

$$\alpha_1 = \frac{0.00740}{12.174} (0.198 \times 5.011^2 + 0.039 \times 0.032 \times 36.531^2) = 0.00404 \text{ ซม.}^2$$

$$\alpha_2 = 0.00740 \left(4.281 + \frac{2}{12.174} \times 0.155 \times 5.011 \times 0.478 \right) = 0.0321 \text{ ซม.}^2$$

$$\alpha_3 = 0.00740 \left(0.00404 \times 4.281 - \frac{0.00740}{12.174} \times 0.478^2 \times 5.011^2 \right) = 0.0001 \text{ ซม.}^2$$

$$P' = \frac{2.1 \times 10^6}{2} \left\{ (0.00404 + 0.0321) \pm \sqrt{(0.00404 + 0.0321)^2 - 4 \times 0.0001} \right\} = 6,340$$

(ใช้ค่าน้อยที่สุดที่เป็นค่าบวก)

$$k_\phi = \frac{2.1 \times 10^6 \times 0.246^3}{5.46(10.015 + 0.06 \times 36.531)} \left[1 - \frac{1.11 \times 6,340}{2.1 \times 10^6 \times 1.579 \times 0.246^2} \left(\frac{10.015^2 \times 36.531}{10.015^2 + 36.531^2} \right) \right]$$

$$= 361.83$$

$$\alpha_1 = 0.00404 + \frac{361.83}{12.174 \times 0.0074 \times 2.1 \times 10^6} = 0.00594 \text{ ซม.}^2$$

$$\alpha_3 = 0.0074 \left(0.00594 \times 4.281 - \frac{0.0074}{12.174} \times 0.478^2 \times 5.011^2 \right) = 0.00016 \text{ ซม.}^2$$

$$P_{CR} = \frac{2.1 \times 10^6}{2} \left\{ (0.00594 + 0.0321) \pm \sqrt{(0.00594 + 0.0321)^2 - 4 \times 0.00016} \right\} = 10,110$$

ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะบิดเบี้ยวของหน้าตัดเท่ากับ 10,110 กก.

5. การคำนวณหาแรงโก่งเดาะเฉพาะจุดของหน้าตัด

ความกว้างของแผ่นเอวเท่ากับ 10.015 ซม.

ความกว้างของแผ่นปีกเท่ากับ 5.011 ซม.

ความหนาของหน้าตัดเท่ากับ 0.246 ซม.

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2.1×10^6 กก./ซม.²

ดังนั้นจะได้ว่า

$$h = \frac{5.011}{10.015} = 0.5$$

$$k = 7 - \frac{1.8 \times 0.5}{0.15 + 0.5} - 1.43 \times 0.5^3 = 5.44$$

$$f_{CR} = \frac{5.44 \times \pi^2 \times 2.1 \times 10^6}{12 \times (1 - 0.3^2) \times (10.015 / 0.246)^2} = 6,230 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$P_{CR} = f_{CR}A = 6230 \times 5.022 = 31,287 \text{ กก.}$$

ดังนั้นแรงที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุดของหน้าตัดเท่ากับ 31,287 กก.

6. การคำนวณหากำลังของหน้าตัด

พ.ท.หน้าตัดเท่ากับ 5.022 ซม.^2

หน่วยแรงคดากของเหล็กเท่ากับ 3457 กก./ซม.^2

ดังนั้นจะได้ว่า

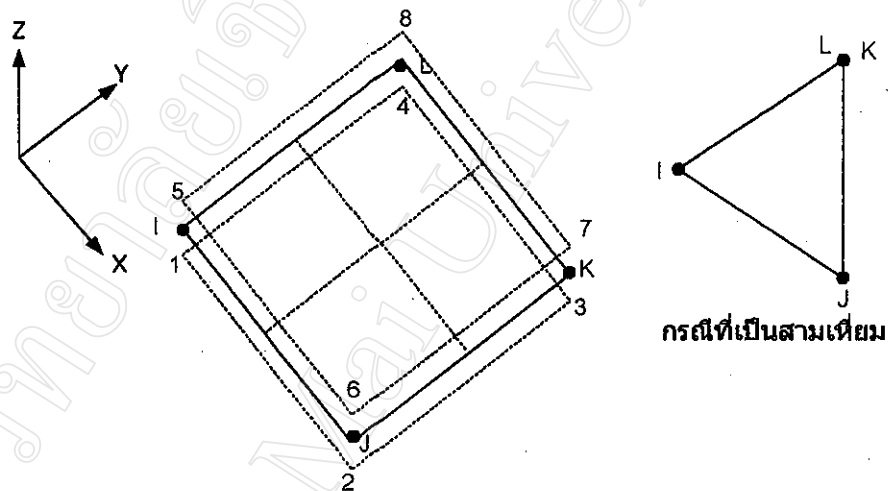
$$\text{กำลังของหน้าตัดเท่ากับ} = 3457 \times 5.022 = 17,361 \text{ กก.}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำผลที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS (Version 5.4) ซึ่งเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะใช้ SHELL 181: Finite Strain Shell เอลิเมนต์ดังกล่าวมี 4 node ต่อเอลิเมนต์ แต่ละnode จะมีการเคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทางคือการเคลื่อนที่ในแนวแกน x y z และหมุนได้รอบแกน x y z รูปของเอลิเมนต์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ ข1



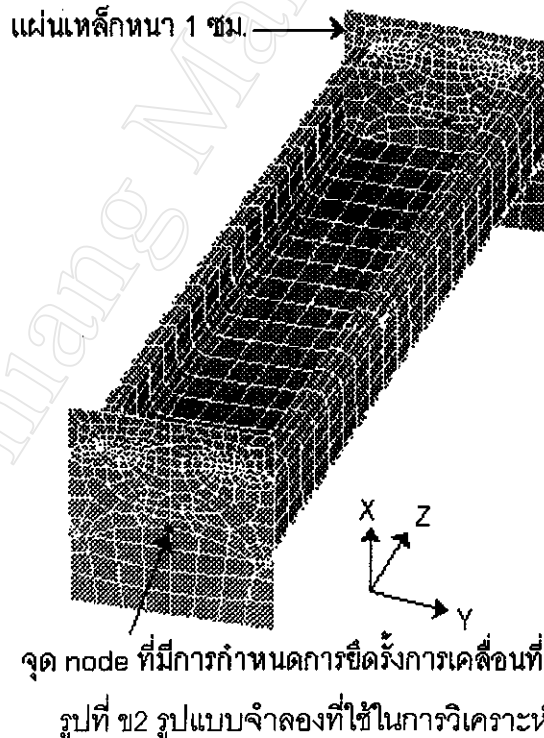
รูปที่ ข1 ลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอลิเมนต์ดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สำคัญคือเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาโครงสร้างบางที่เป็นเส้นตรงและไม่เป็นเส้นตรงโดยเฉพาะที่ไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้เอลิเมนต์ดังกล่าวยังสามารถรวมผลของการเสียรูปอย่างมาก (Large deformation) ซึ่งจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงของโครงสร้างที่จะใช้ในการคำนวณด้วย

ในการสร้างรูปแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น สำหรับกรณีพื้นฐานรองรับเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น จะใช้ขนาดของหน้าตัดเสาเฉลี่ยที่ได้จากการวัดและค่าความยาวจริง ปลายทั้งสองข้างของเสาก็จะปิดด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 1 ซม. โดยให้จุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็กดังกล่าวตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเสา และกำหนด node ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวที่ปลายด้านหนึ่งกำหนดให้การเคลื่อนที่ node ในแนวแกน x y z เป็นศูนย์ และให้การหมุนรอบแกน x y z เป็นศูนย์ ในขณะที่อีกด้านหนึ่งก็จะกำหนดการยึดรั้งการเคลื่อนที่ใน

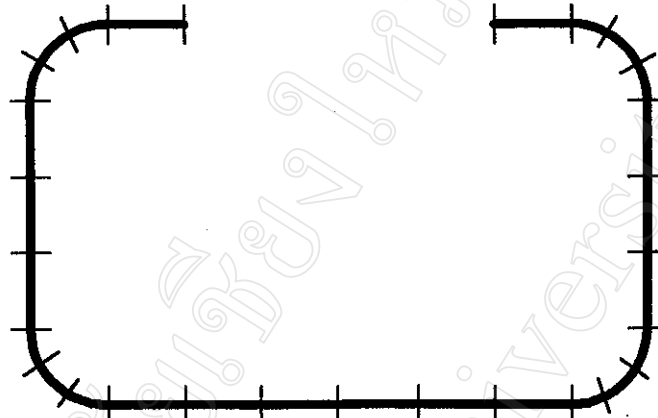
ลักษณะเดียวกันยกเว้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน z เพื่อที่จะให้ node ดังกล่าวเป็นจุดที่ใช้ในการถ่ายน้ำหนัก

กรณีที่ฐานรองรับเป็นจุดรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระ จะใช้ขนาดของหน้าตัดเสาเฉลี่ยที่ได้จากการวัดและค่าความยาวจะใช้ค่าความยาวจริงรวมกับขนาดของฐานรองรับที่ปลายทั้งสองข้าง ดังการคำนวณในหัวข้อที่ 3.6 ที่ปลายทั้งสองข้างของเสาก็จะปิดด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 1 ซม. โดยให้จุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็กดังกล่าวตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเสา และกำหนด node ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวที่ปลายด้านหนึ่งกำหนดให้การเคลื่อนที่ในแนวแกน $x y z$ เป็นศูนย์ และให้มีการหมุนได้โดยอิสระรอบแกน $x y$ ได้อย่างอิสระ ในขณะที่อีกปลายด้านหนึ่งจะมีการยึดรั้งการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน x และ แกน y ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน z จะปล่อยให้เป็นอิสระเพื่อให้ node ดังกล่าวเป็นจุดในการถ่ายน้ำหนัก รูปจำลองของโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงในรูปที่ ข2



ในการแบ่งขนาดของอีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ส่วนของขอบเสริมกำลังนั้นแบ่งออกเป็น 1 ส่วน ส่วนโค้งของหน้าตัดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน แผ่นปีกจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน และ

แผ่นเอวของหน้าตัดจะแบ่งออกเป็น 6 ส่วนดังแสดงในรูปที่ ข3 อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแต่ละอิเลเมนต์จะมีค่าประมาณ 1:1.5 ถึง 1:2 ซึ่งละเอียดเพียงพอต่อการวิเคราะห์



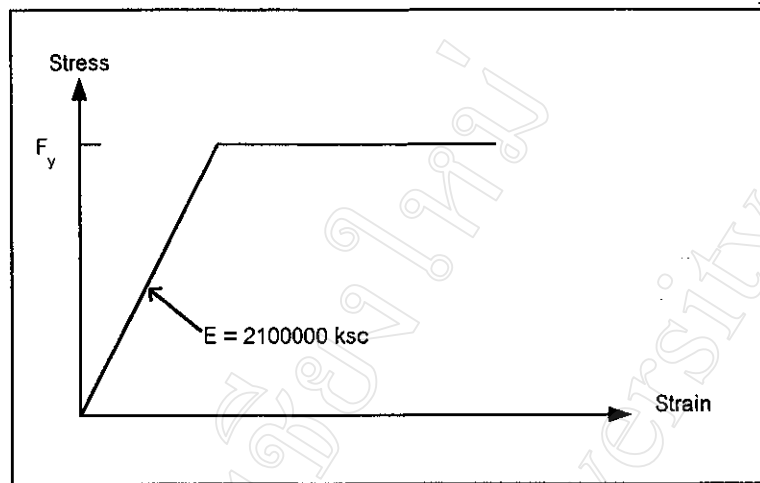
รูปที่ ข3 การแบ่งขนาดอิเลเมนต์บนหน้าตัด

ค่าคุณสมบัติของแผ่นเหล็กที่ใช้ในการสร้างรูปแบบจำลองที่ปลายเสาทั้งสองข้างนั้น จะมีค่า 20 เท่าของค่าคุณสมบัติของหน้าตัดเสาทั้งนี้เพื่อให้แผ่นเหล็กดังกล่าวมีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigid Plate) พอที่จะทำการถ่ายแรงจาก node ที่กำหนดโดยไม่ให้เกิดการเสียรูปของแผ่นเหล็กที่ปลายทั้งสองข้างและจะทำให้แรงกระทำกระจายสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของเสา

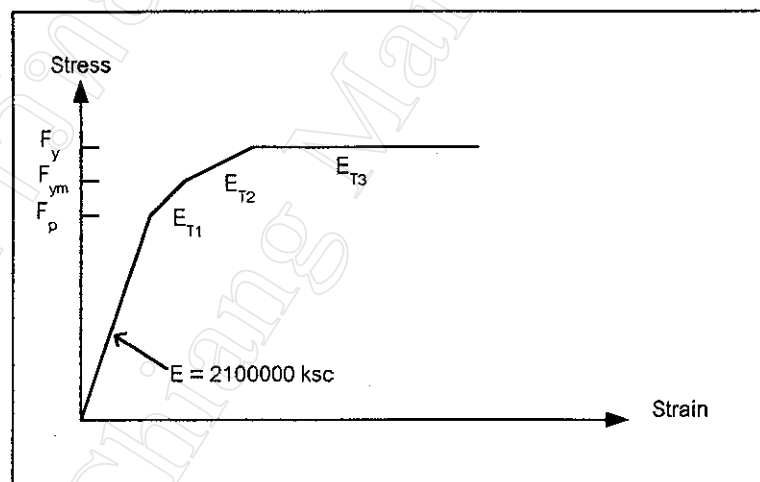
คุณสมบัติของหน้าตัดเสาที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยไฟไนท์อิเลเมนต์นั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเป็นในลักษณะเส้นตรงสองเส้น (Bilinear) ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ ข4 จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2.1×10^6 กก./ซม. และค่าหน่วยแรงคลาก F_y เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3

กรณีที่ 2 ให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเป็นในลักษณะเส้นตรงสี่เส้น (Sivakumaran and Rahman ,1998) ดังแสดงในรูปที่ ข5 ซึ่งค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในช่วงแรกนั้นหรือช่วงที่หน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงขีดจำกัดสัดส่วน (Proportional limit, $F_p=0.75F_y$) มีค่าเท่ากับ 2.1×10^6 กก./ซม.². ส่วนค่าโมดูลัสสัมผัส E_{T1} ค่า E_{T2} ค่า E_{T3} เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบขึ้นทดสอบตามหัวข้อที่ 3.3 จุดแบ่งช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ในรูปที่ ข5 นี้จะมีหน่วยแรงเท่ากับ $0.875F_y$ หรือ F_{ym}



รูปที่ ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในกรณีที่ 1

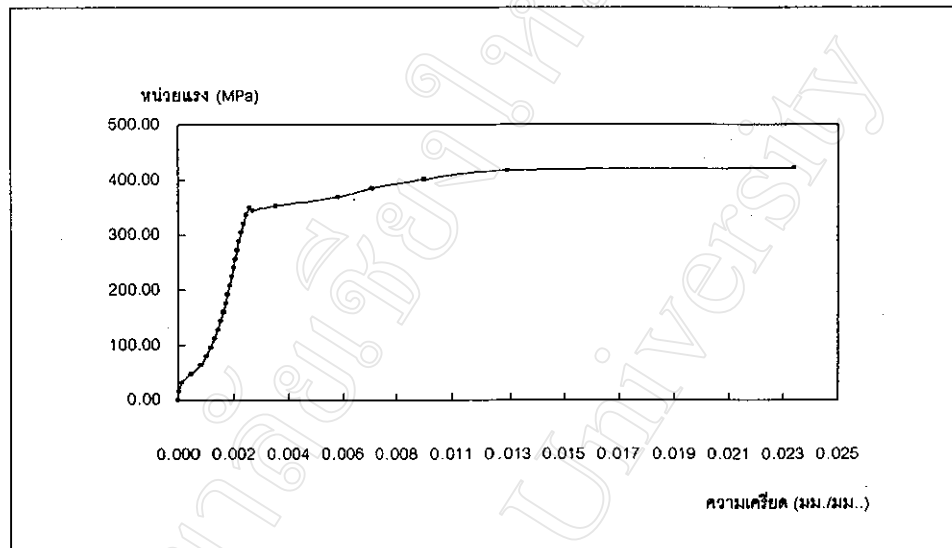


รูปที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในกรณีที่ 2

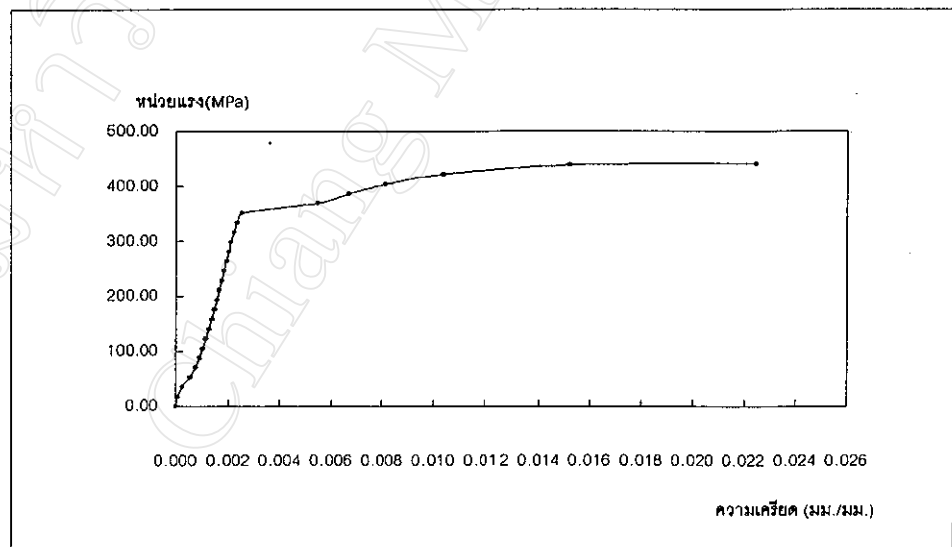
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลการทดสอบแรงดึงได้พบว่าได้ค่าเฉลี่ยของจุดคลาก 345.7 MPa หรือประมาณ 3457 กก./ ซม^2 ดังนั้นค่า F_p และค่า F_{ym} ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับ 2593 กก./ ซม^2 และ 3025 กก./ ซม^2 ตามลำดับและจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในรูปที่ ข6 และ รูปที่ ข7 จะได้ค่า E_{T1} E_{T2} และค่า E_{T3} สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี

ไฟไนท์อีพ็อกซีเรซินที่มีค่าเท่ากับ 1.725×10^6 กก./ ซม.² 1.5×10^6 กก./ ซม.² และ 4.3×10^4 กก./ ซม.² ตามลำดับ



รูปที่ ๑6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของชิ้นทดสอบที่ 3



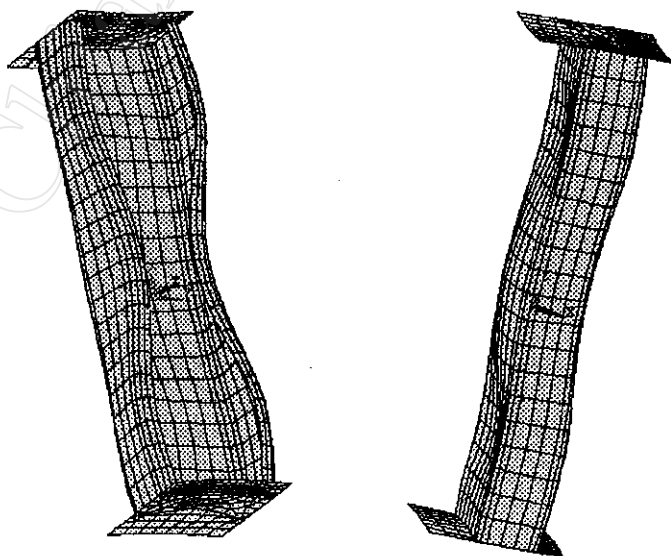
รูปที่ ๑7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของชิ้นทดสอบที่ 4

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS (Version 5.4) แบ่งออกเป็น 2 กรณีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ข1 ซึ่งรูปแบบของการวิบัติสำหรับตัวอย่างบางตัวอย่างแสดงในรูปที่ ข8 รูปที่ ข9 รูปที่ ข10 รูปที่ ข11 และรูปที่ ข12

ตารางที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

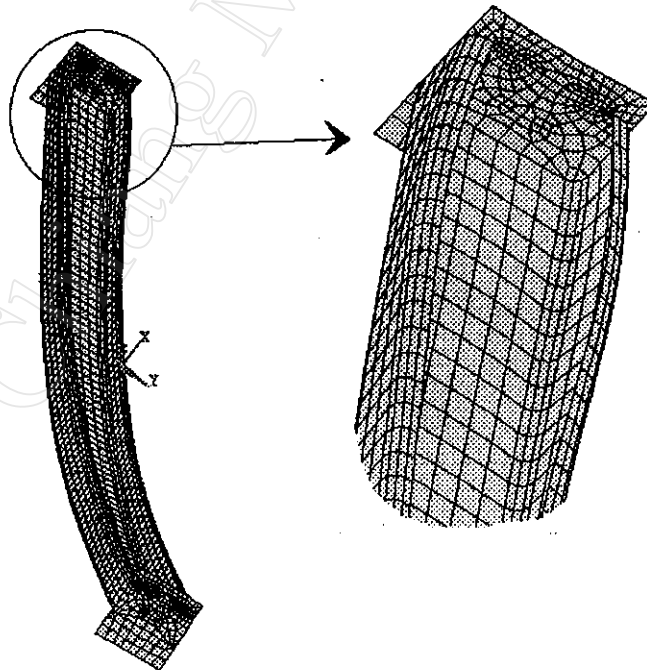
ความยาว (ซม.)	กรณีที่ 1				กรณีที่ 2			
	ฐานรองรับแบบยึดแน่น		ฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระ		ฐานรองรับแบบยึดแน่น		ฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระ	
	นน. กระทำ สูงสุด (กก.)	รูปแบบ การวิบัติ	นน. กระทำ สูงสุด (กก.)	รูปแบบ การวิบัติ	นน. กระทำ สูงสุด (กก.)	รูปแบบ การวิบัติ	นน. กระทำ สูงสุด (กก.)	รูปแบบ การวิบัติ
40	17,446	D/L	17,142	D/L	17,278	D/L	16,952	D/L
100	17,236	D/L	17,099	D/L	17,146	D/L	12,900	D/L
150	17,231	D/L	11,440	D/L	16,994	D/L/F	11,171	D/F
200	17,016	D/L/F	6,832	F/TF	14,136	D/L/F	6,813	F/TF
220	16,542	D/L/F	5,736	F/TF	13,429	D/L/F	5,727	F/TF



รูปที่ ข8 การเสียรูปของเสาที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 40 ซม. ในกรณีที่ 1



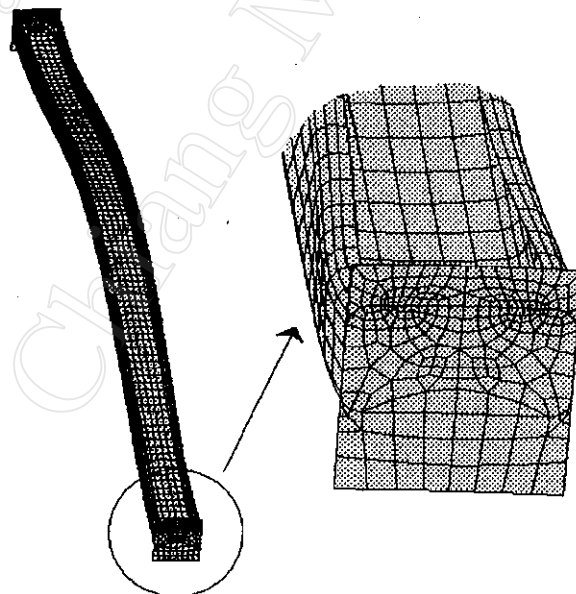
รูปที่ ข9 การเสียรูปของเสาที่มีฐานรองรับแบบหมุดได้โดยอิสระที่มีความยาว 100 ซม. ในกรณีที่ 1



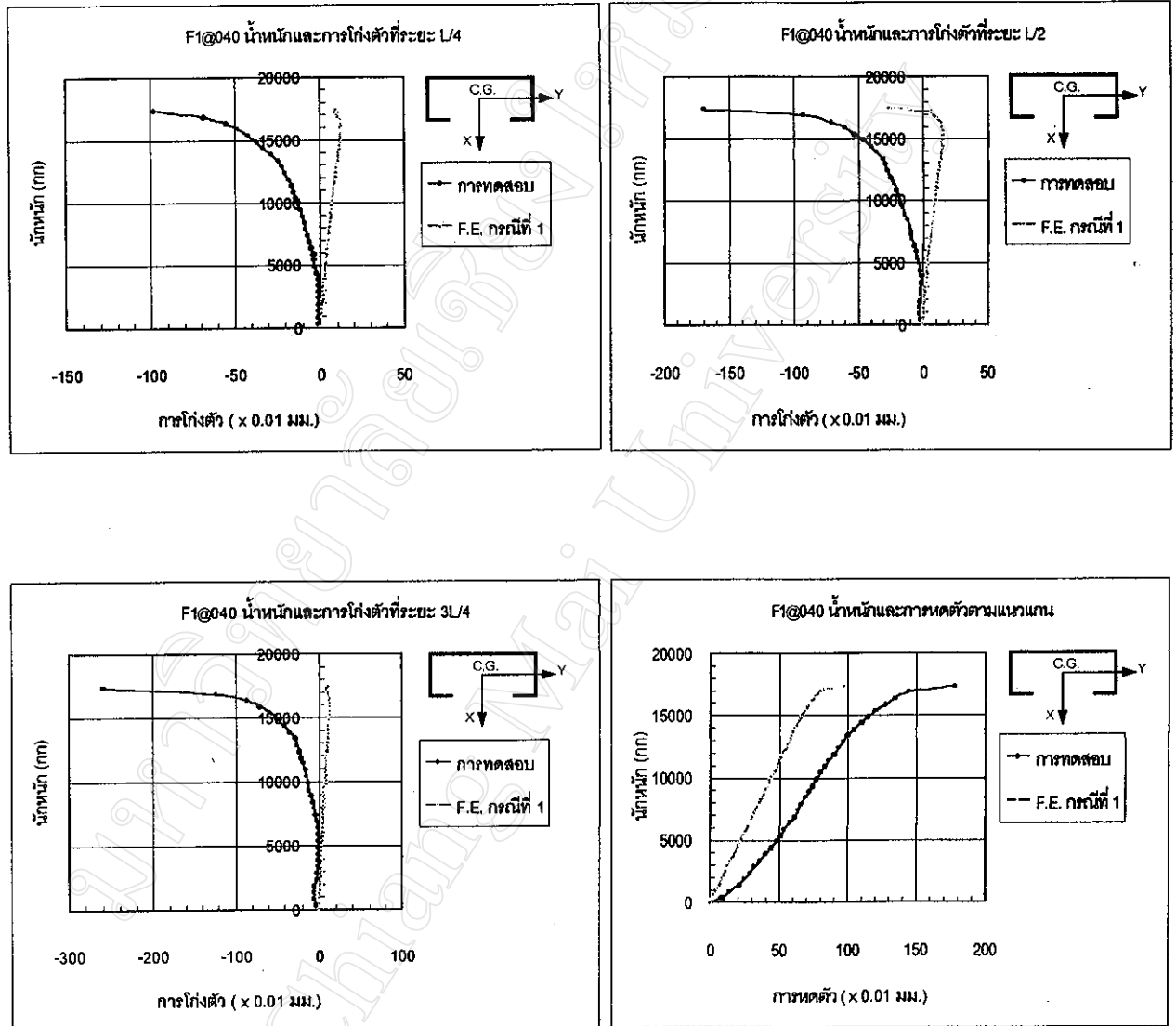
รูปที่ ข10 การเสียรูปของเสาที่มีฐานรองรับแบบหมุดได้โดยอิสระที่มีความยาว 150 ซม. ในกรณีที่ 2



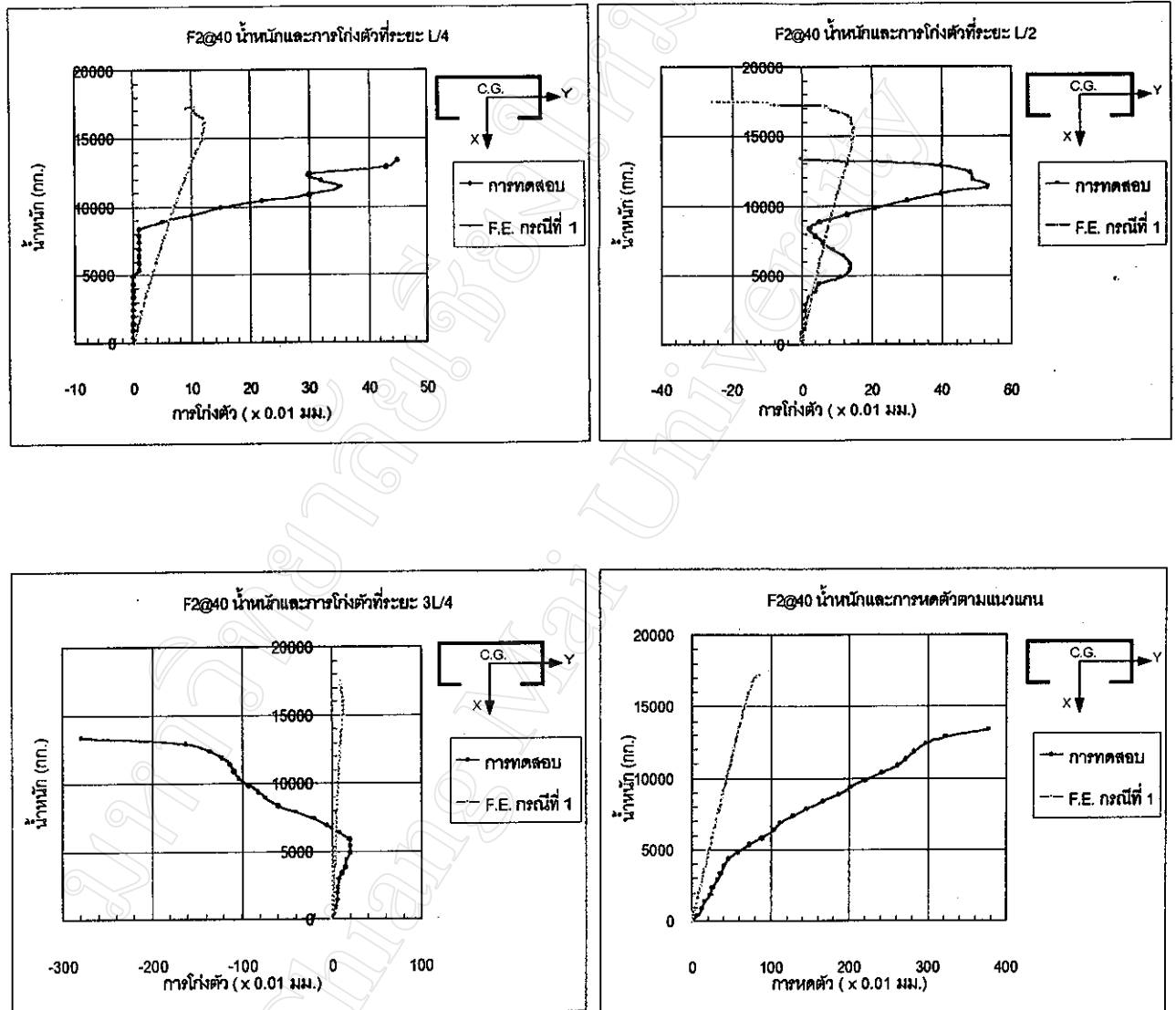
รูปที่ ข11 การเสียรูปของเส้นที่มีฐานรองรับแบบหมุนได้โดยอิสระที่มีความยาว 200 ซม. ในกรณีที่ 2



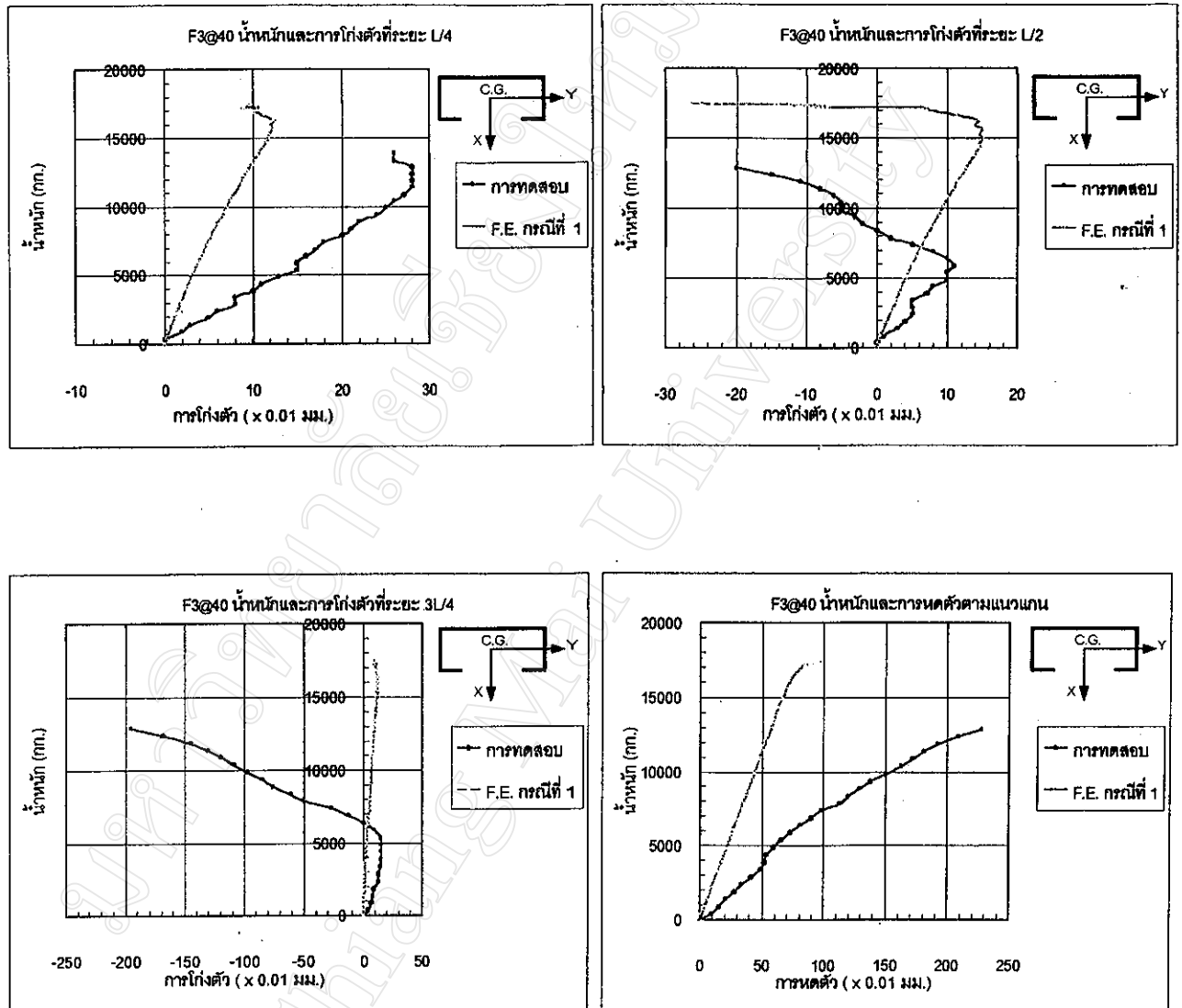
รูปที่ ข12 การเสียรูปของเส้นที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นที่มีความยาว 220 ซม. ในกรณีที่ 2



รูปที่ ข13.การโก่งตัวและระยะหยดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ F1@040

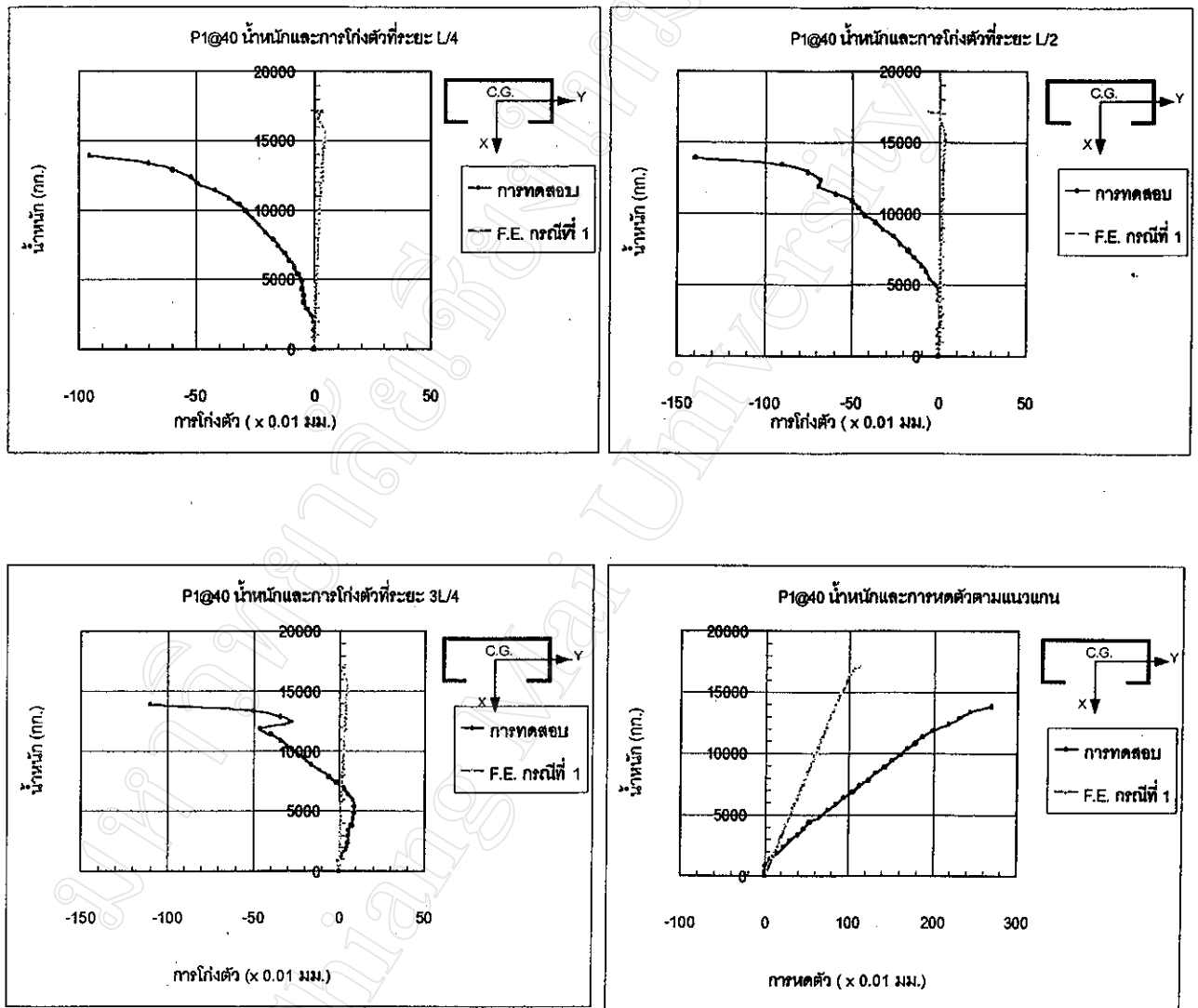


รูปที่ ข14.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1
ของ F2@040

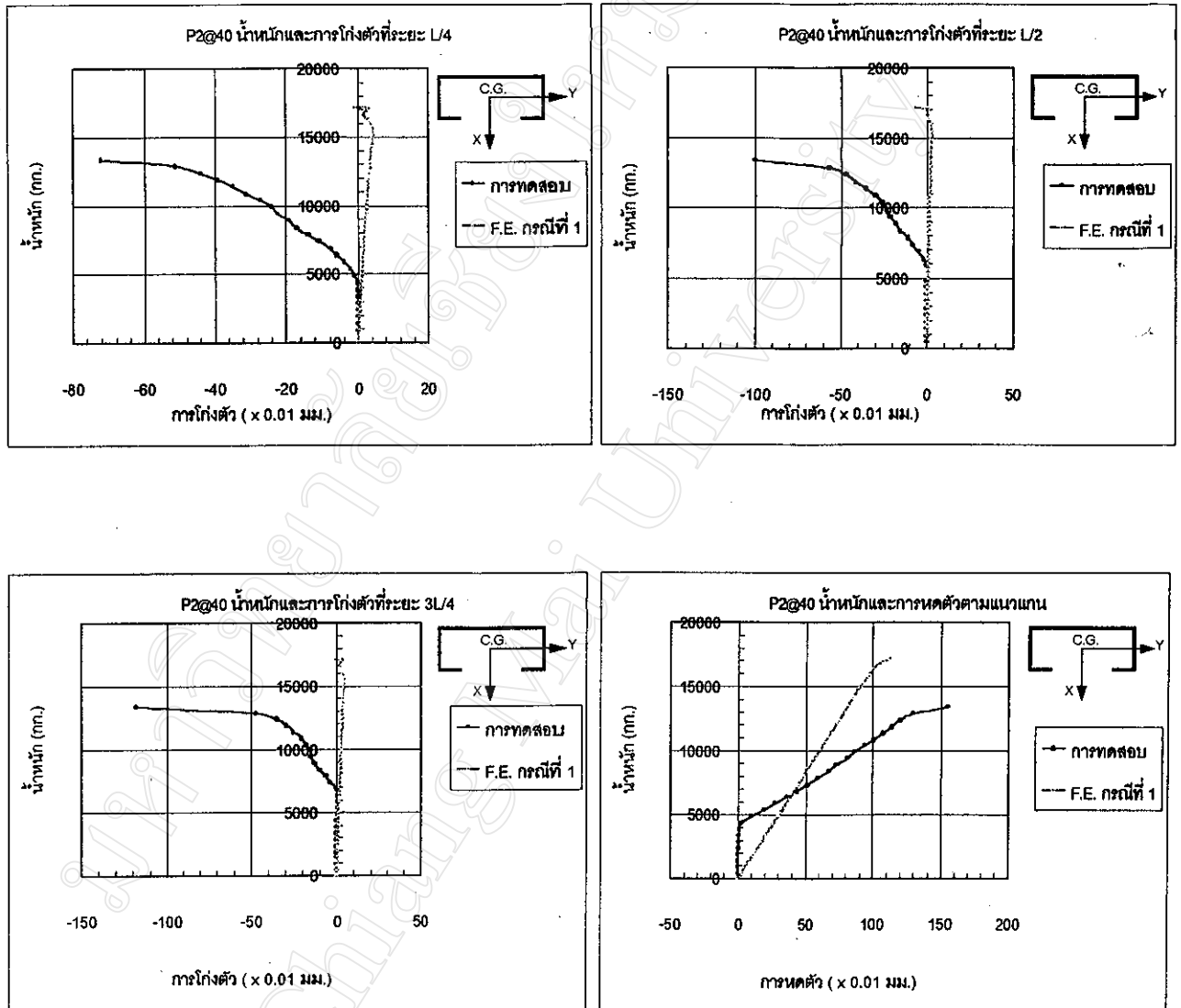


รูปที่ ข15.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1

ของ F3@040

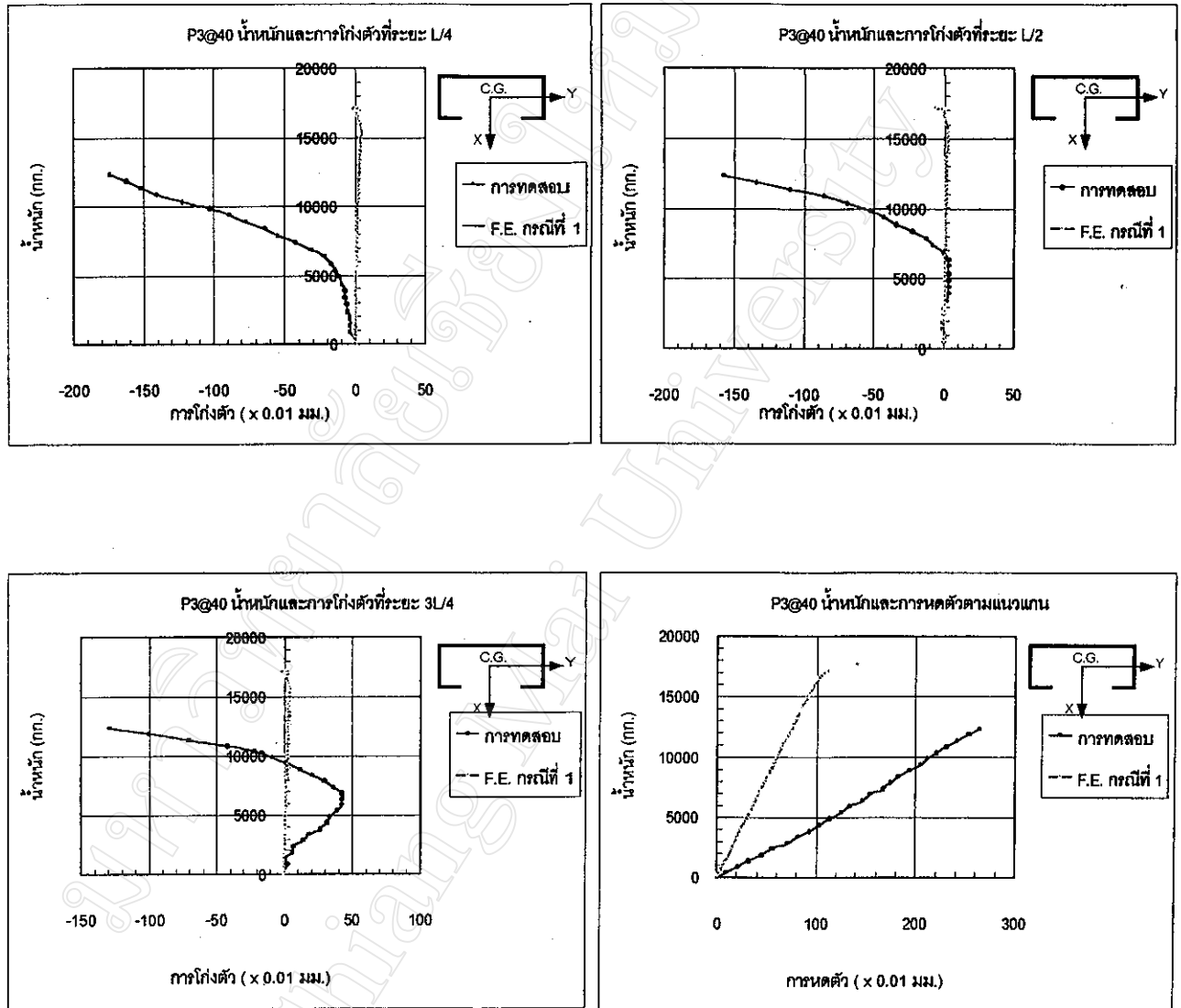


รูปที่ ข16. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P1@040

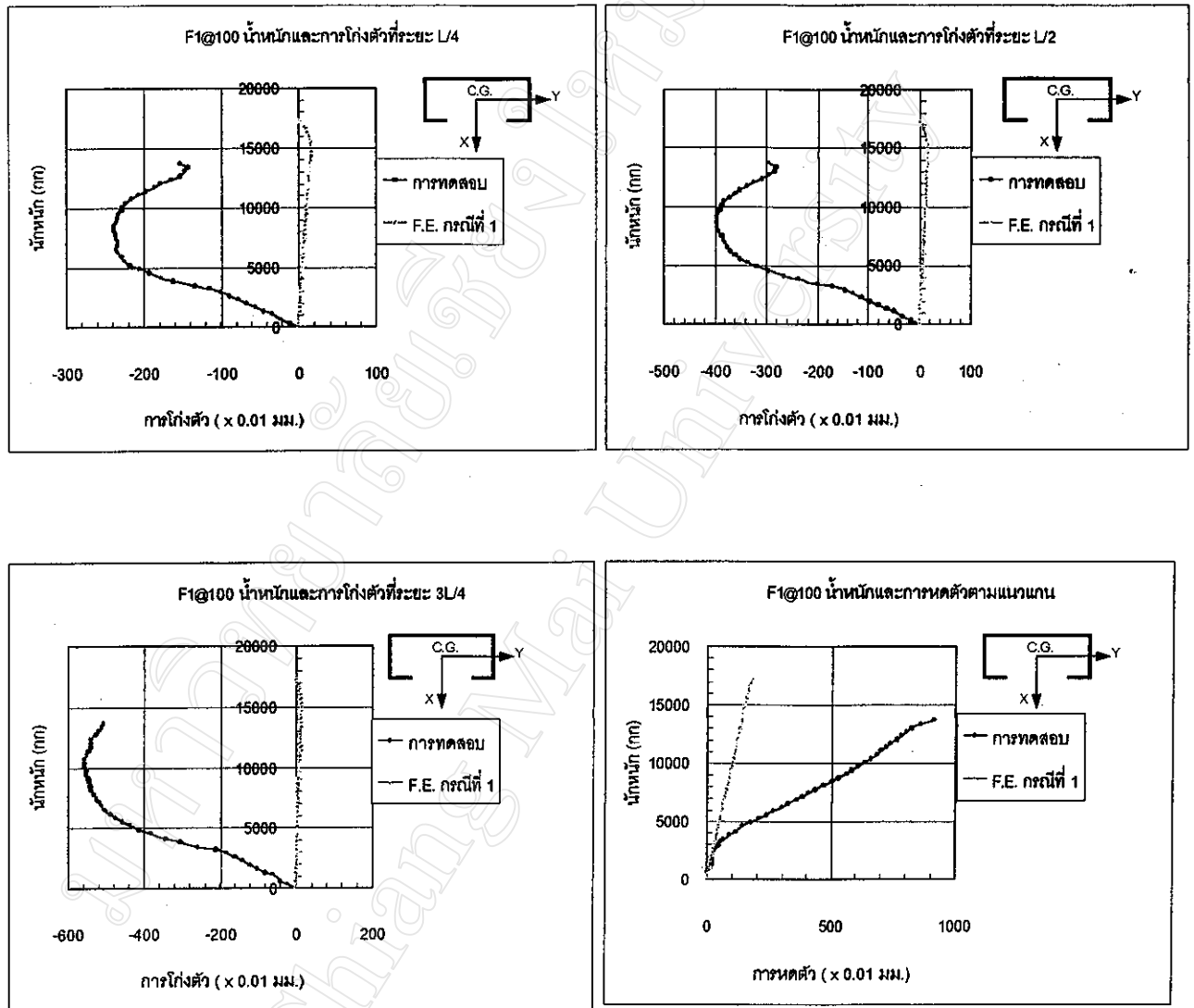


รูปที่ ข17.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวกานกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ P2@040

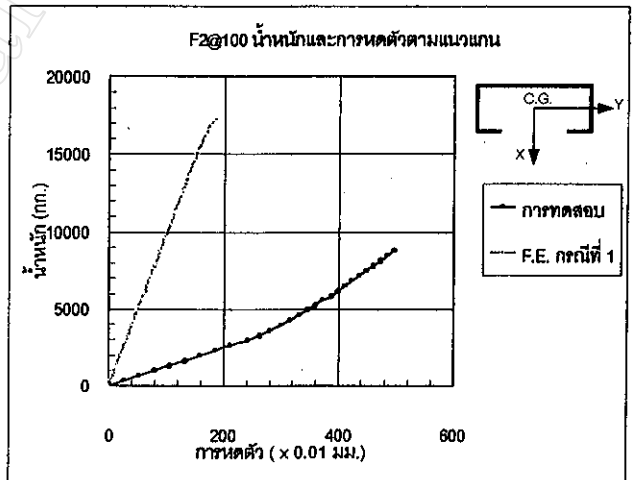
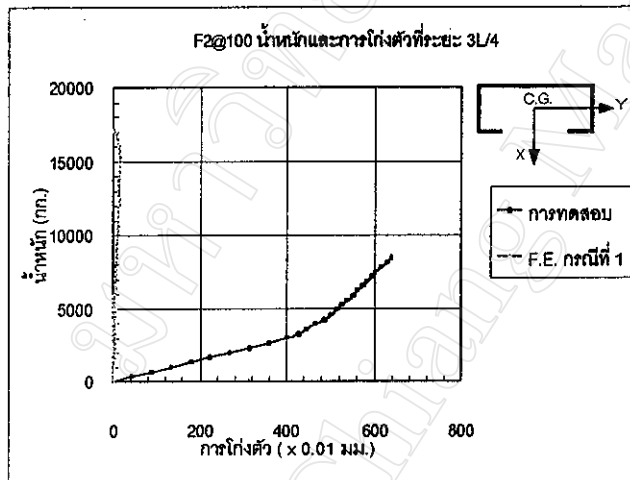
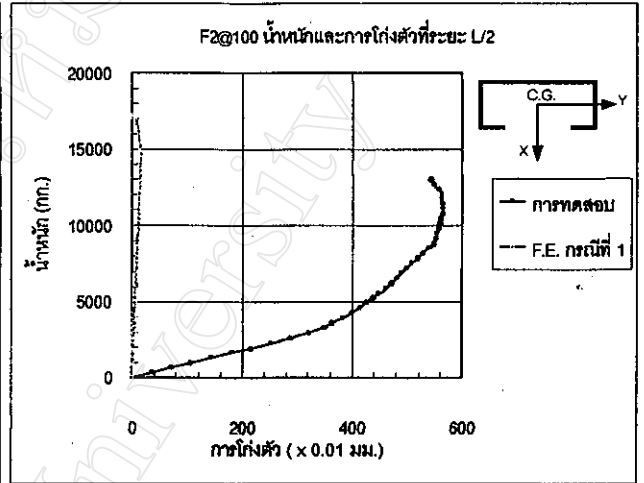
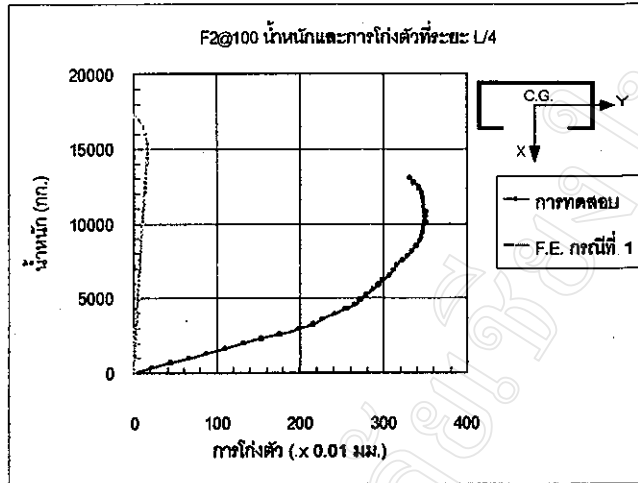


รูปที่ ข18.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P3@040

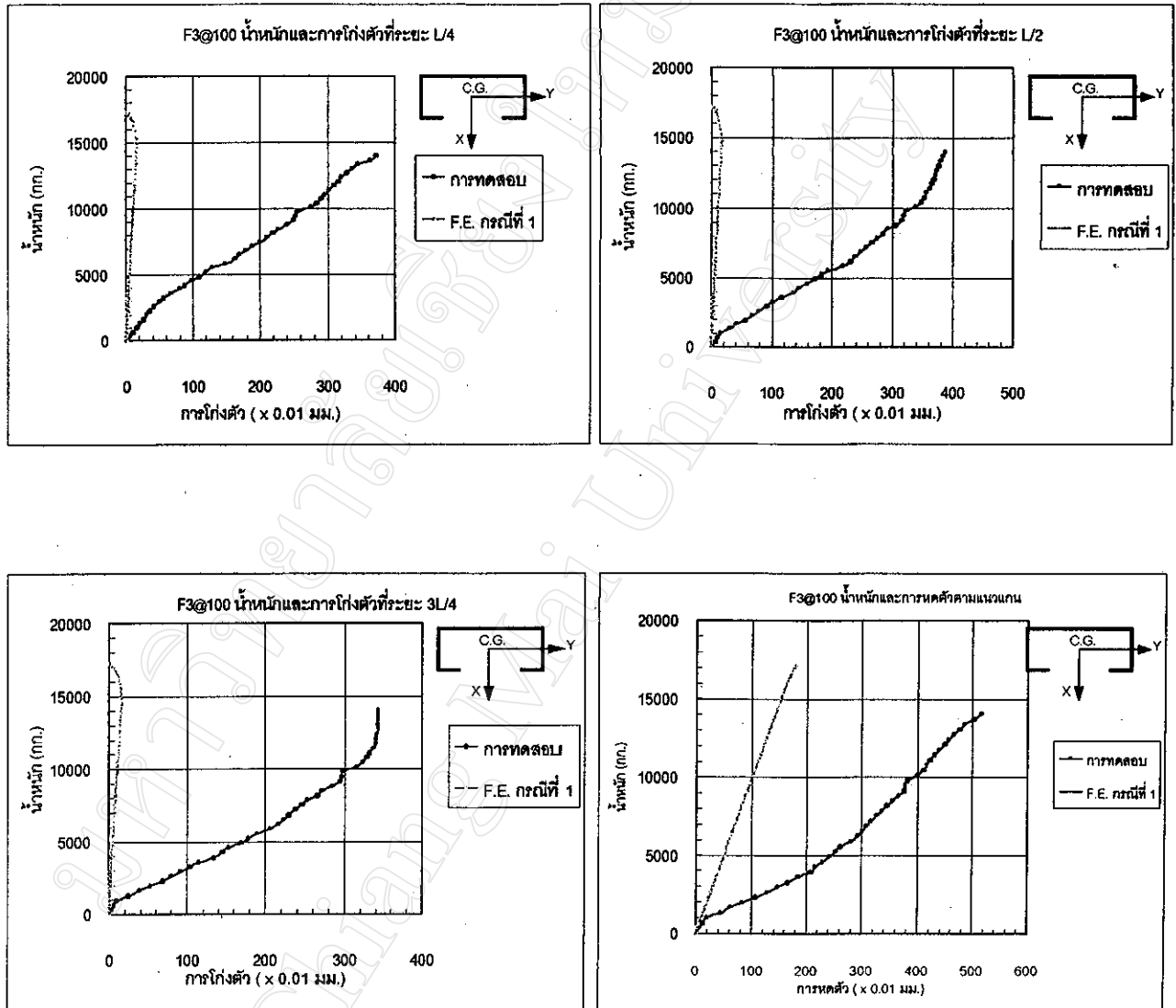


รูปที่ ข19.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

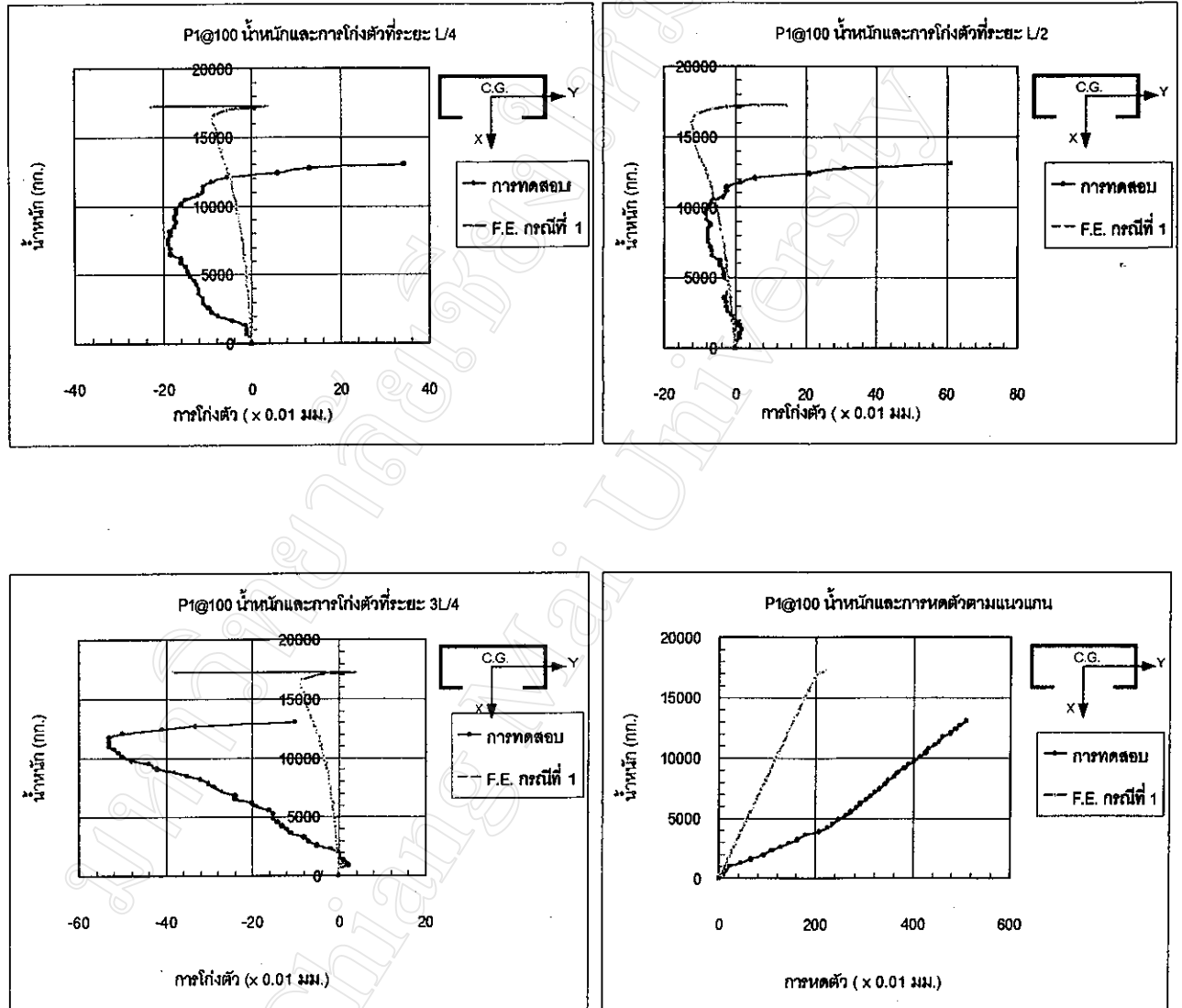
ของ F1@100



รูปที่ ข20.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1
ของ F2@100

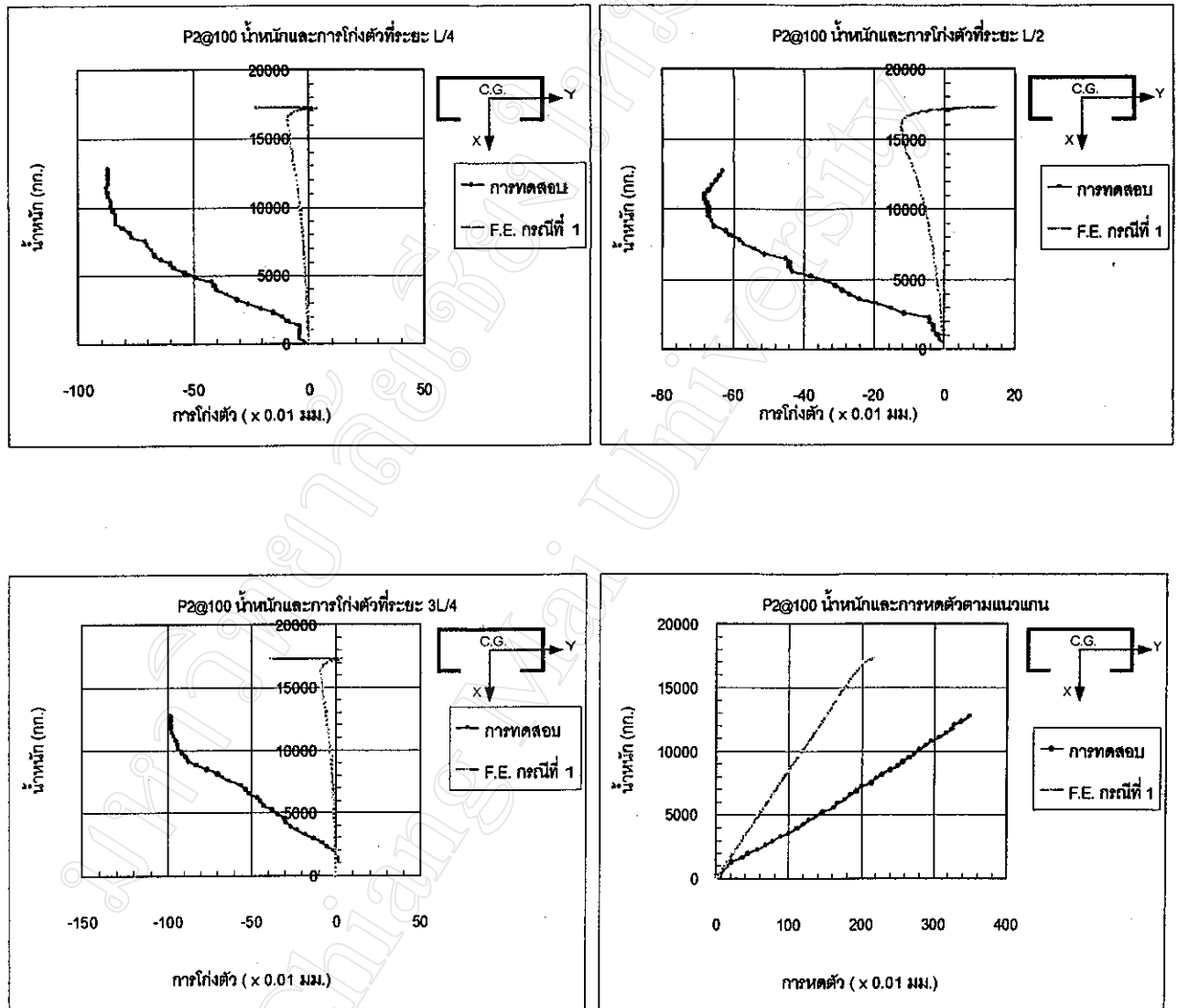


รูปที่ ข21.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1
ของ F3@100



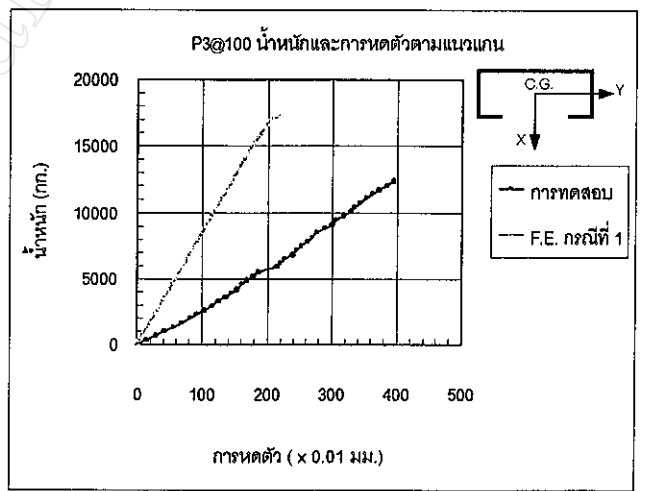
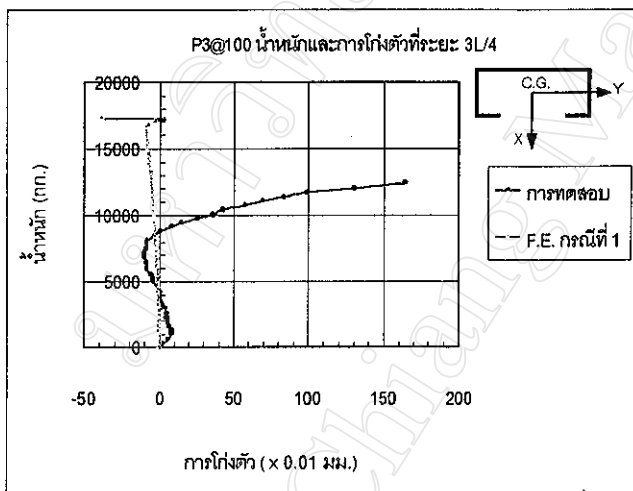
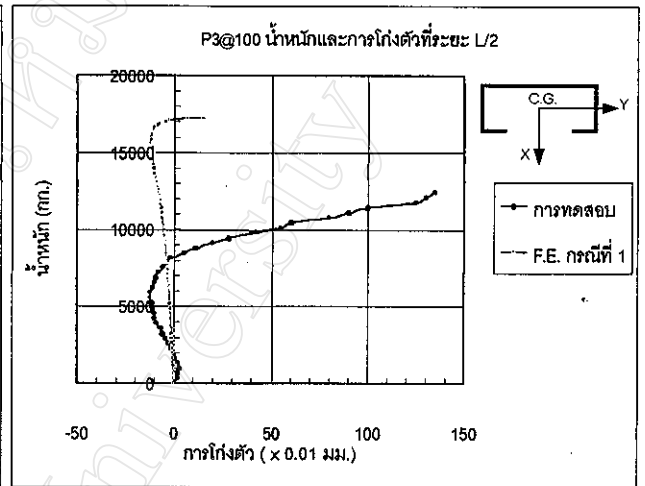
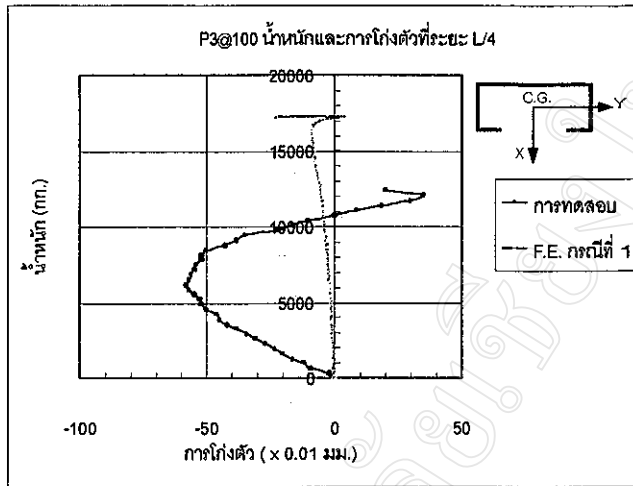
รูปที่ ข22.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1

ของ P1@100

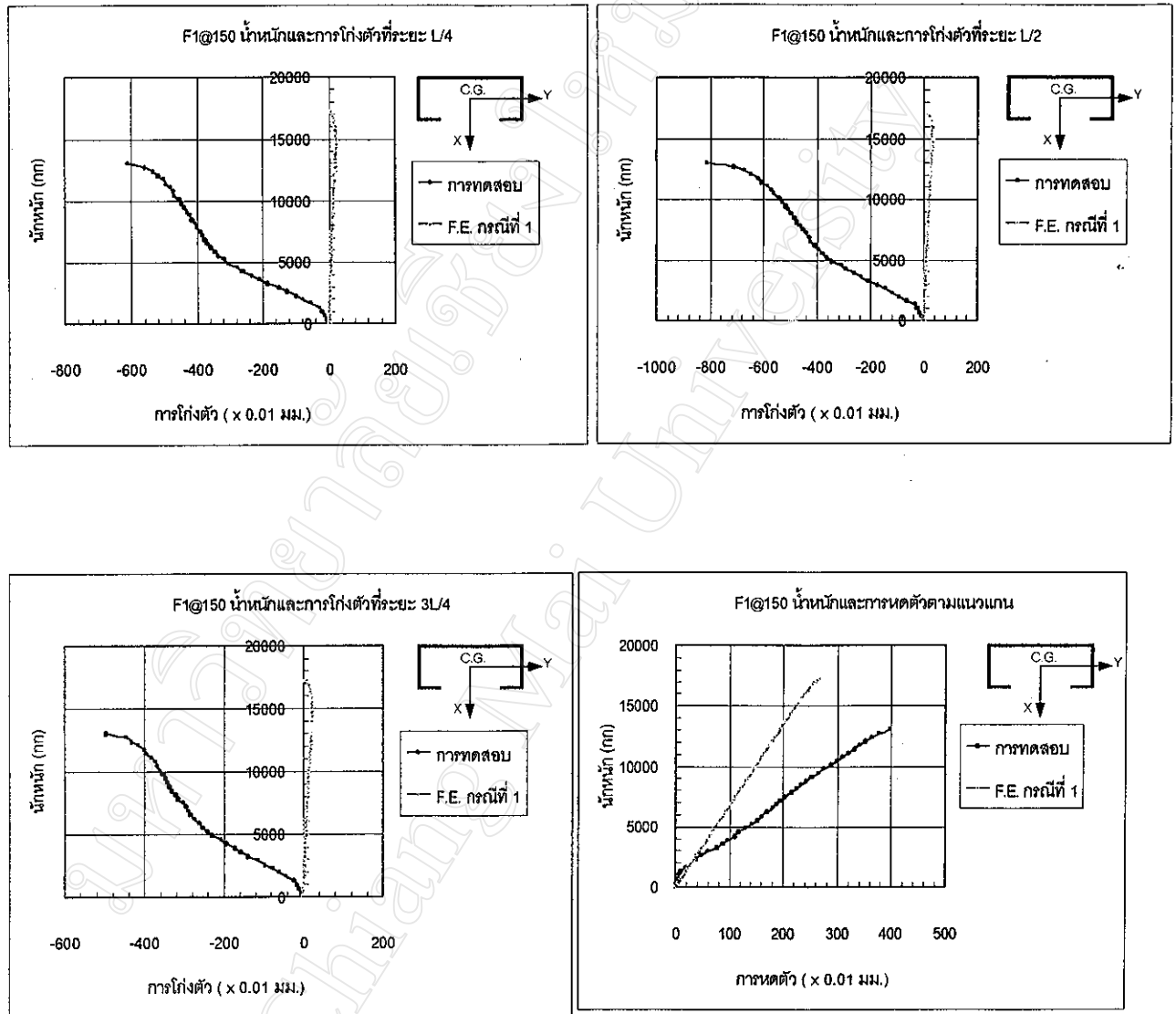


รูปที่ ข23.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณี ที่ 1

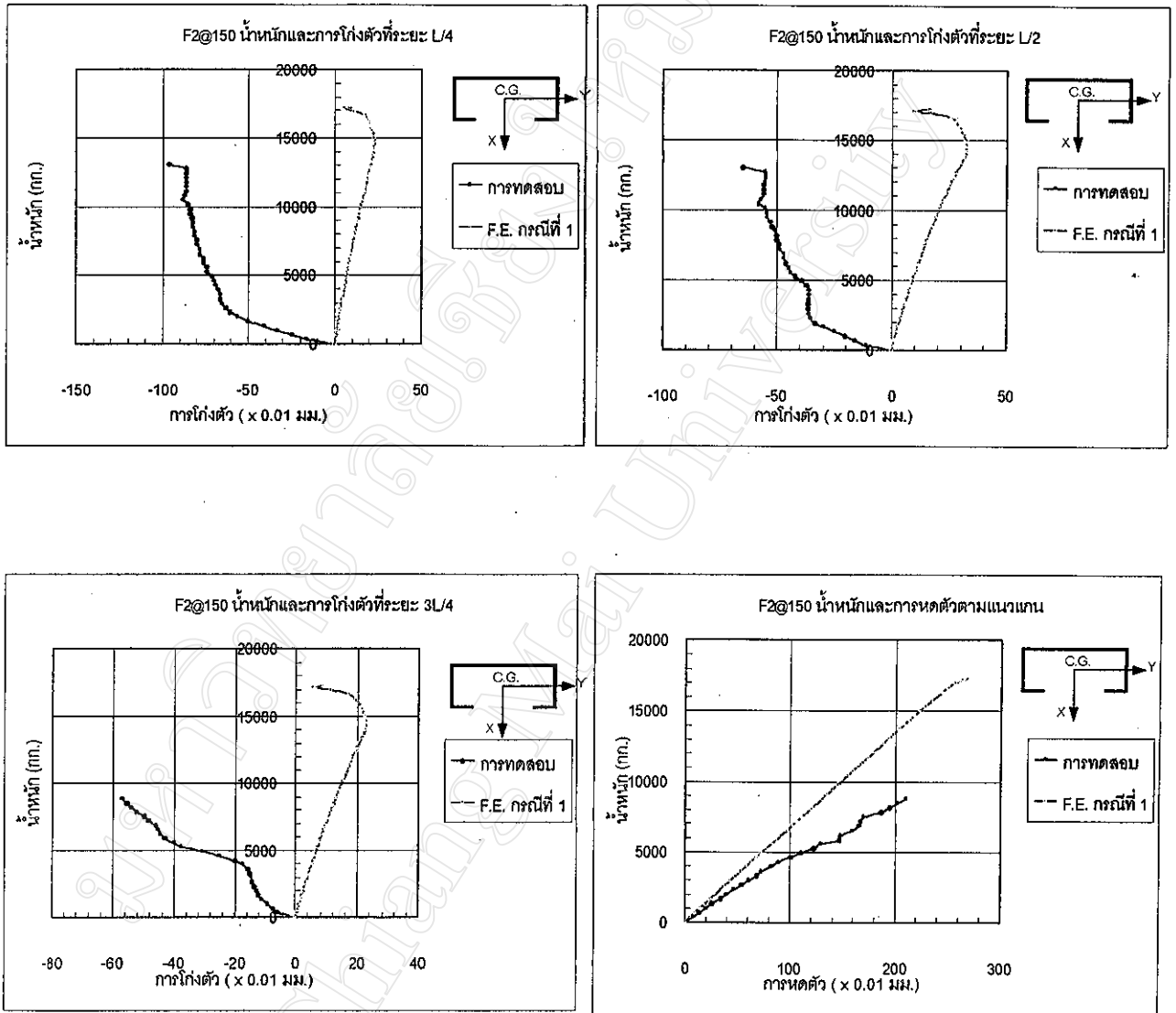
ของ P2@100



รูปที่ ข24.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P3@100

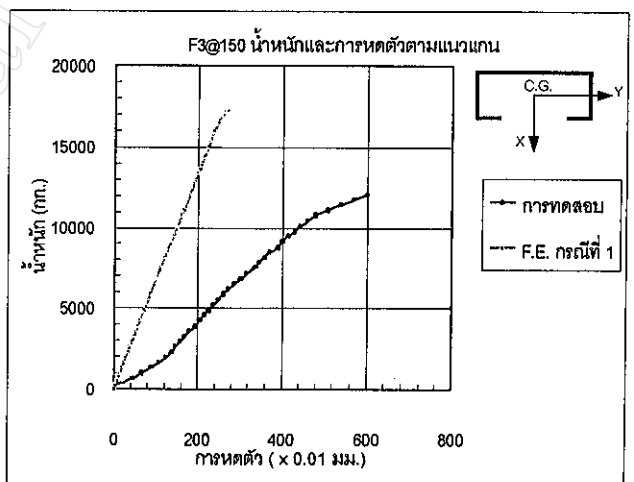
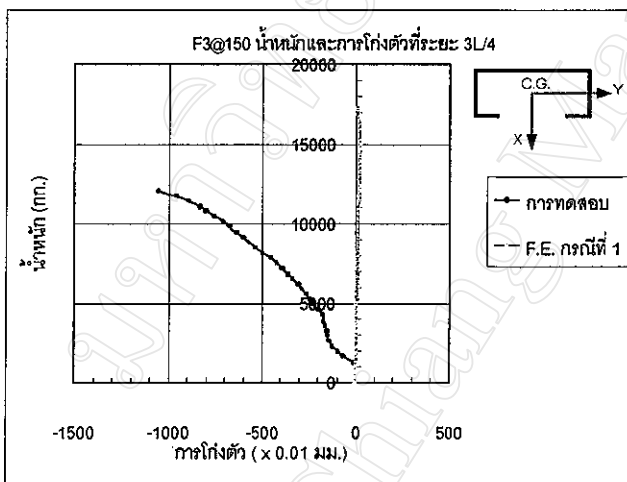
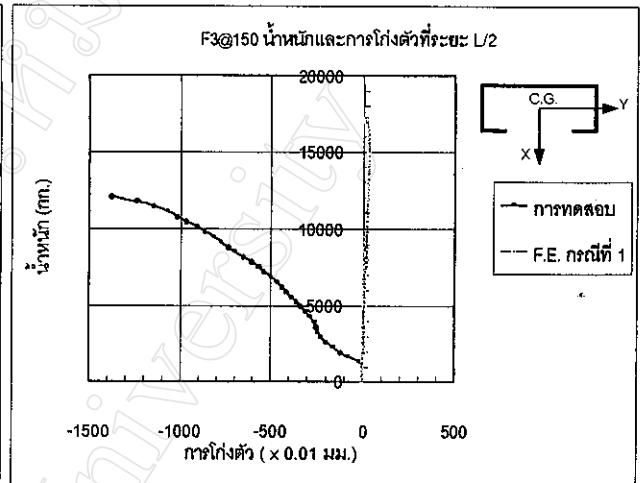
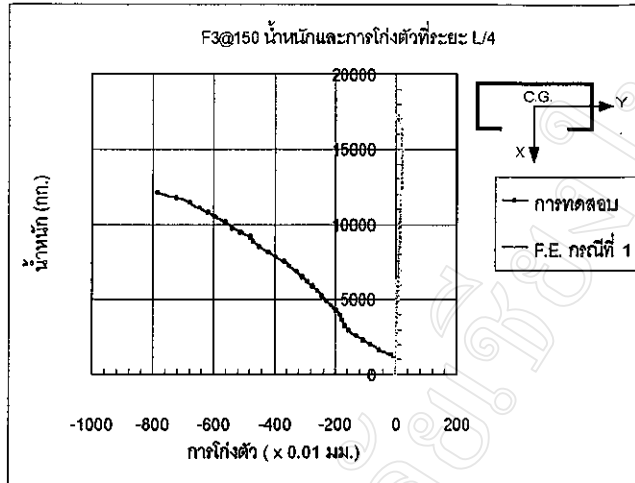


รูปที่ ข25.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ F1@150



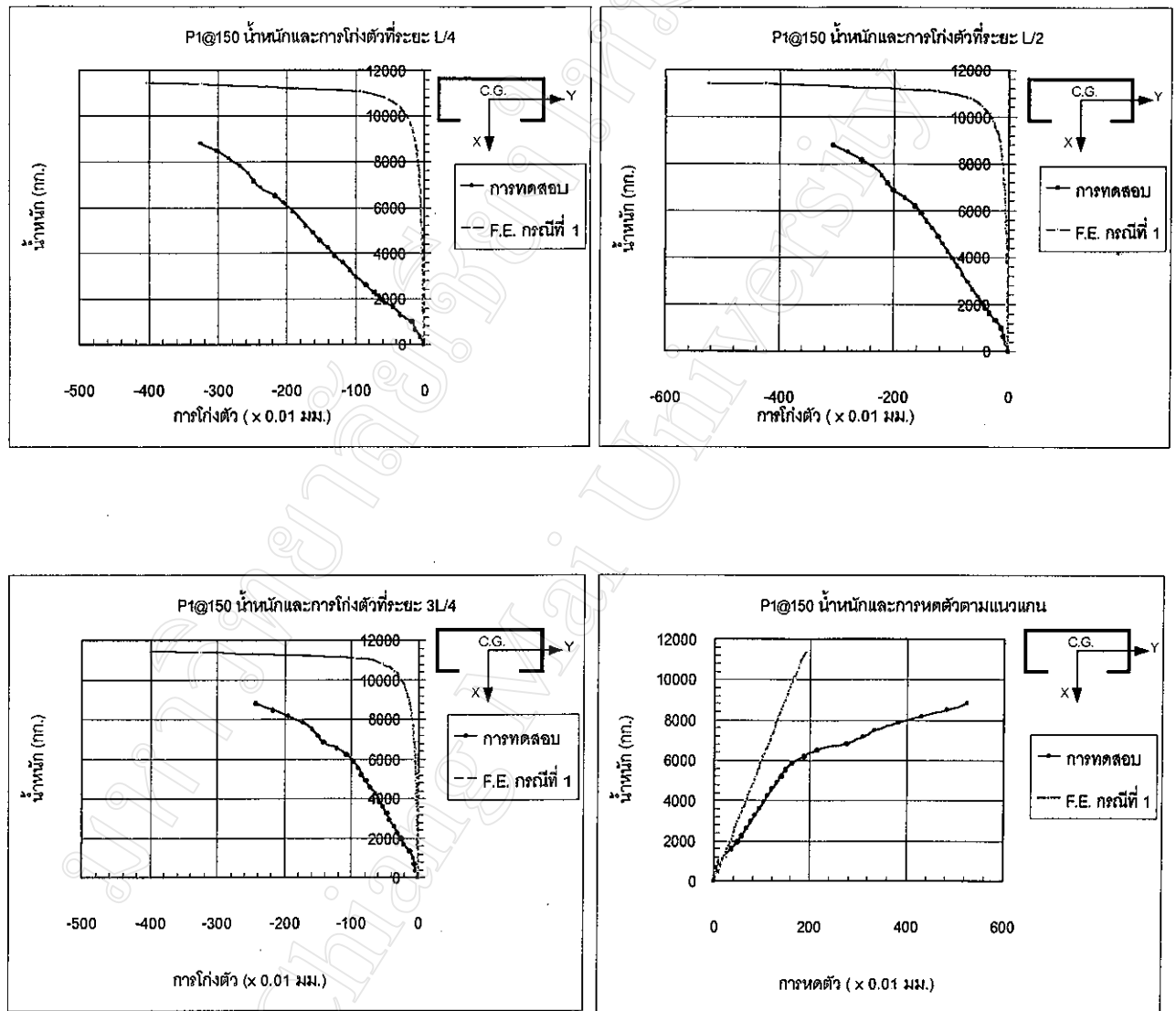
รูปที่ ข26. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ F2@150



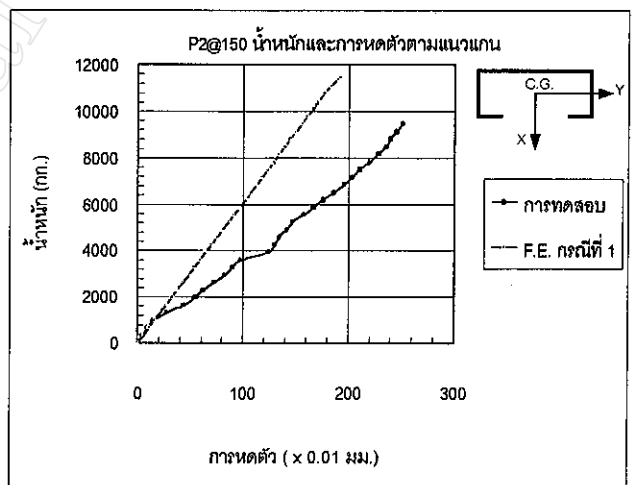
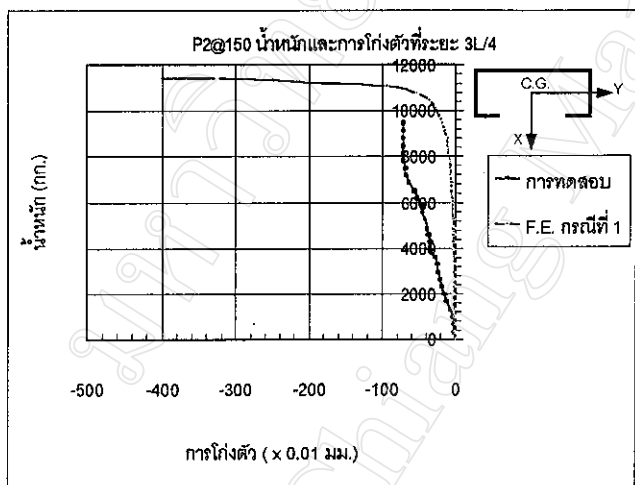
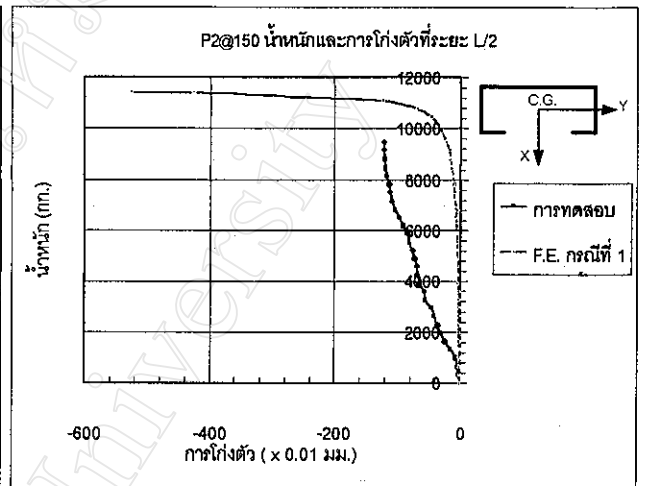
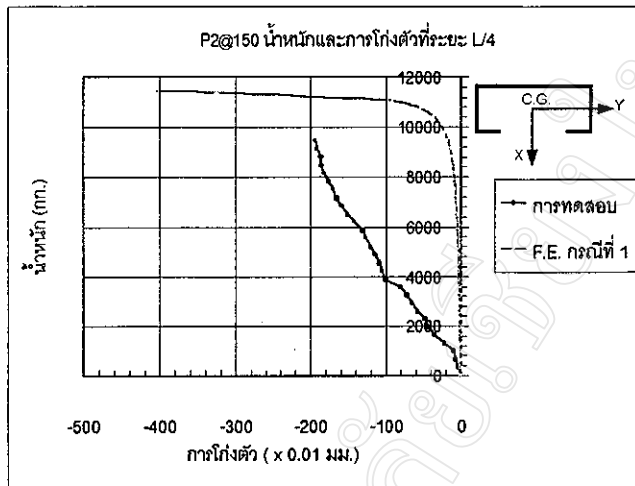
รูปที่ ข27. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ F3@150



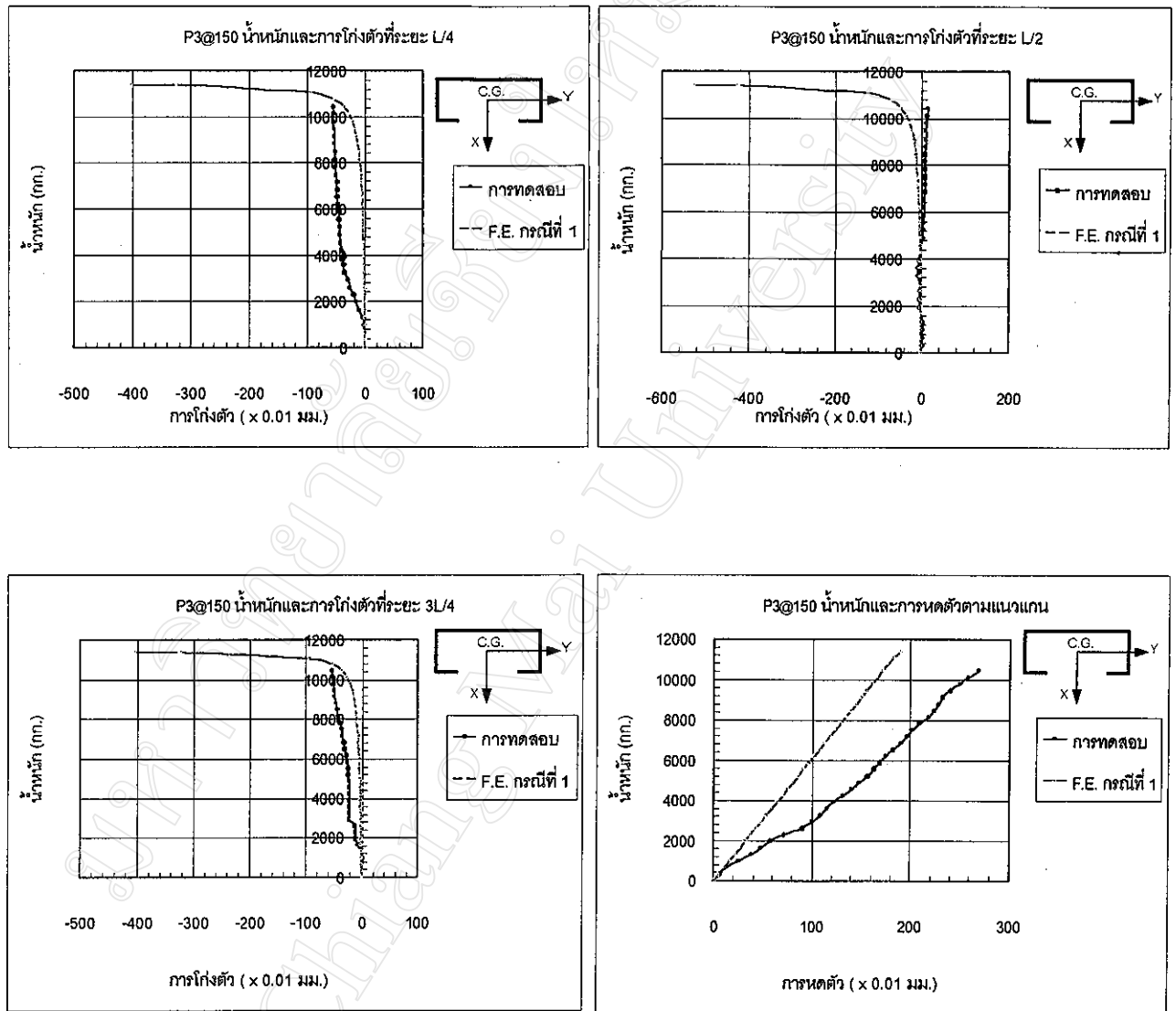
รูปที่ ข28.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ P1@150



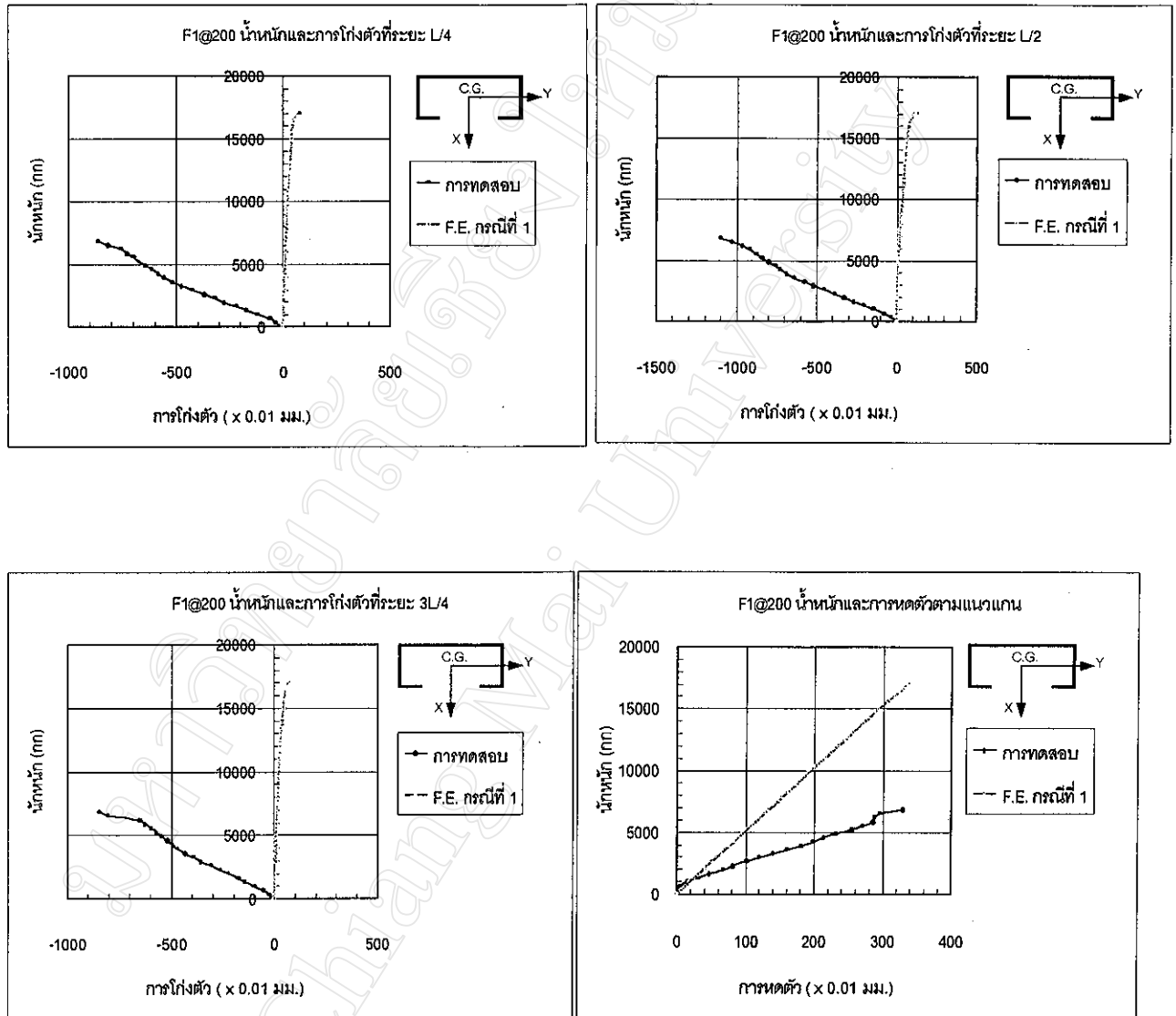
รูปที่ ข29.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1

ของ P2@150

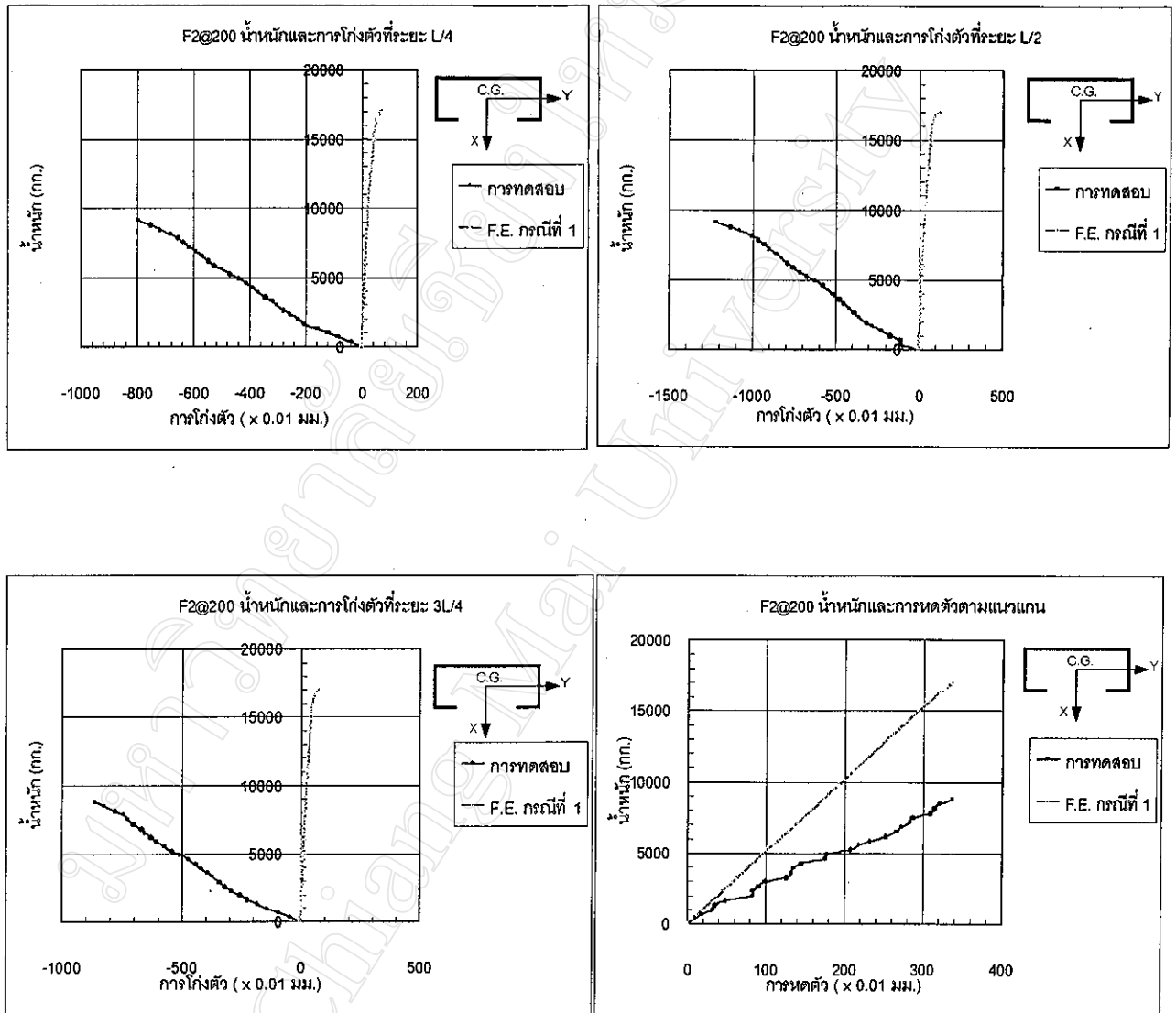


รูปที่ ข30.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ P3@150

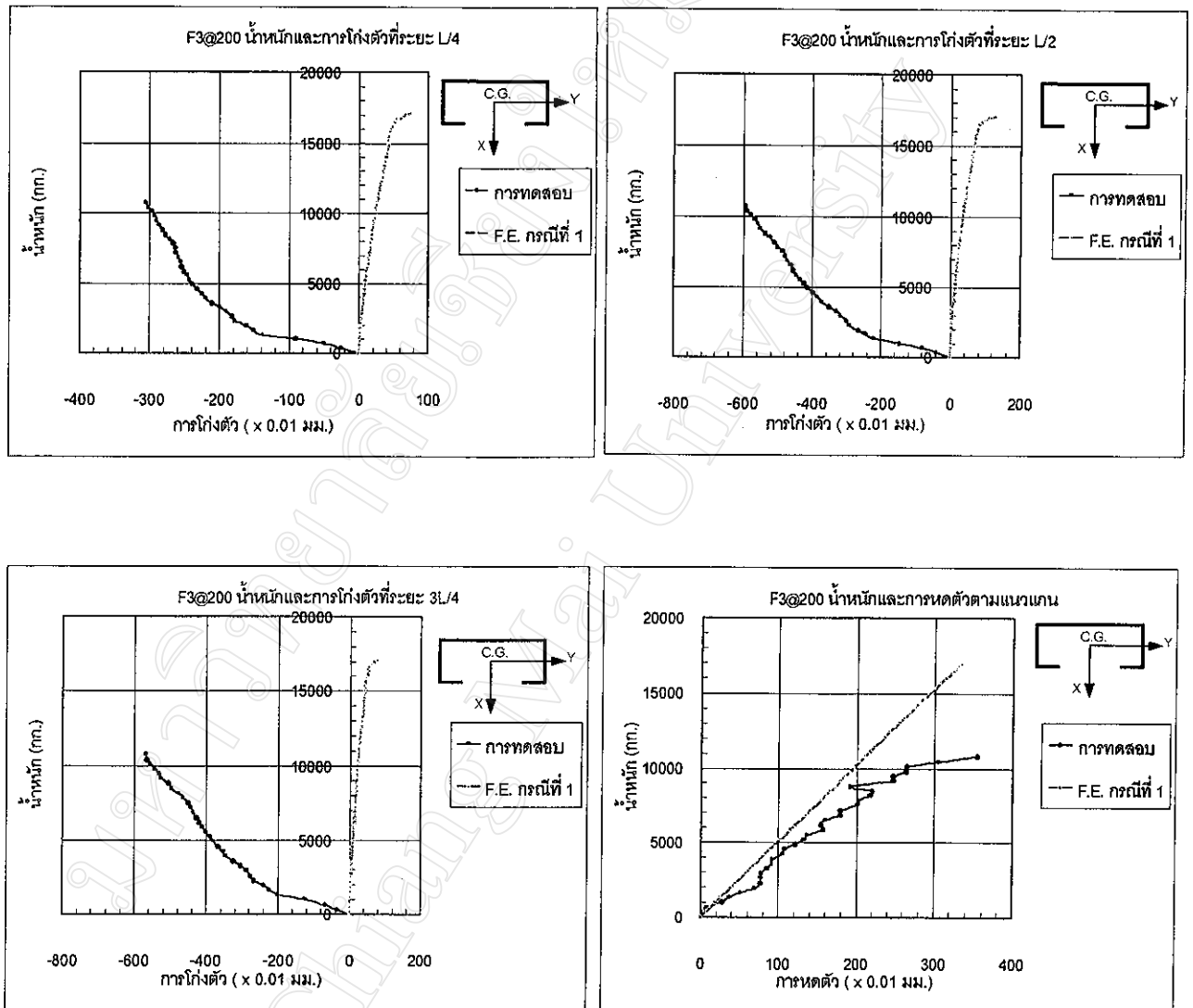


รูปที่ ข31. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1 ของ F1@200

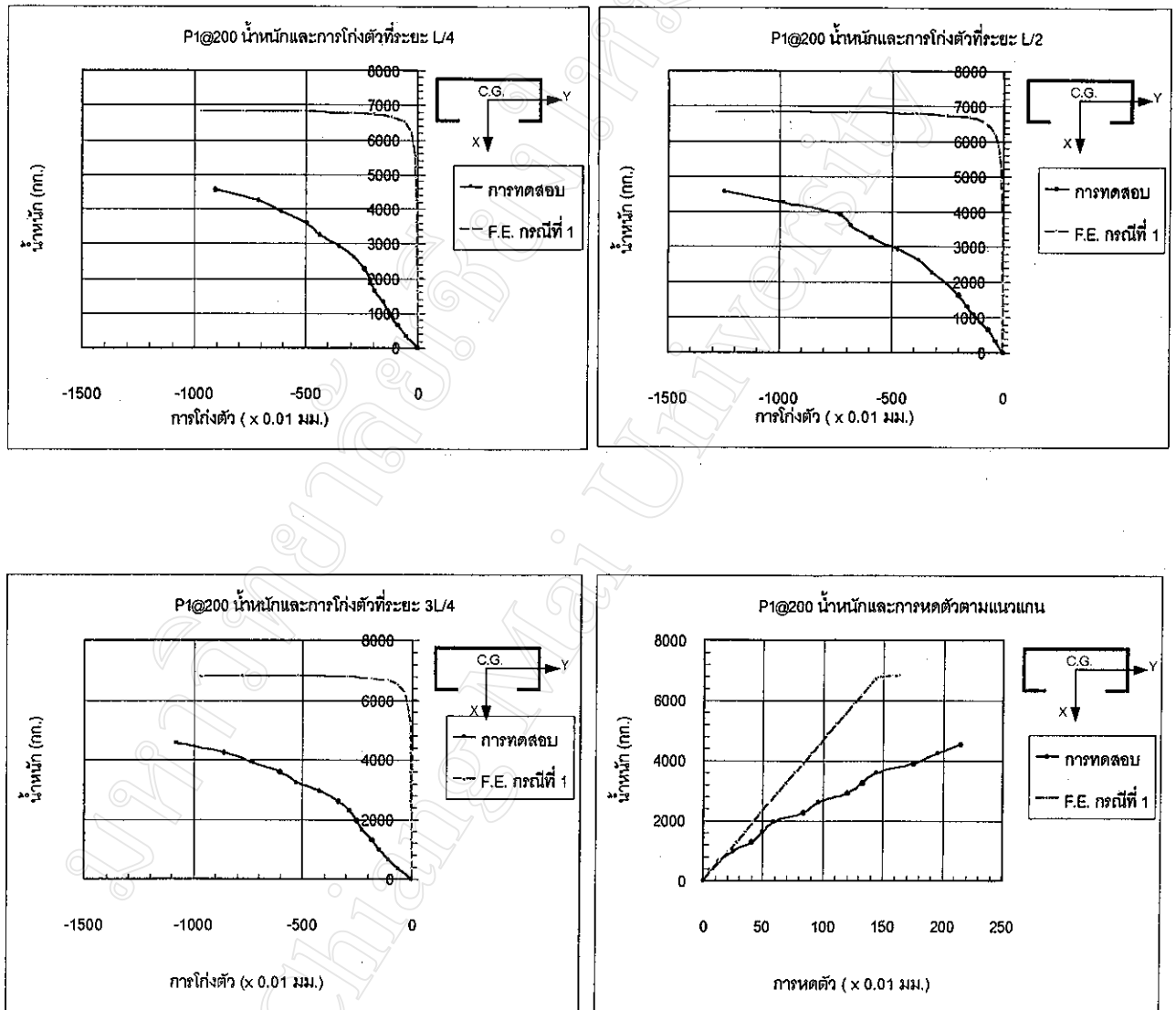


รูปที่ ข32.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

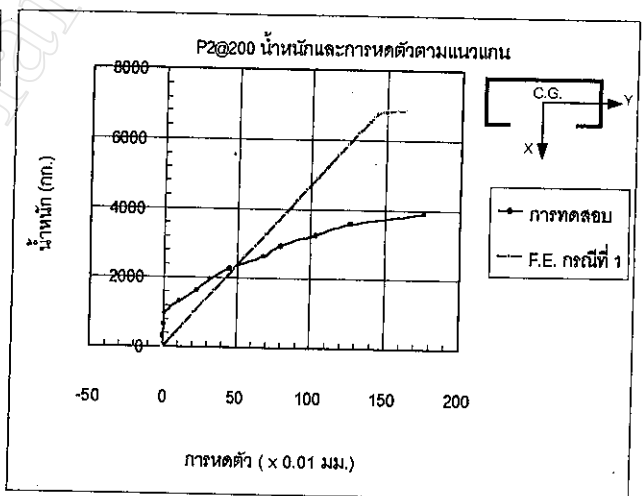
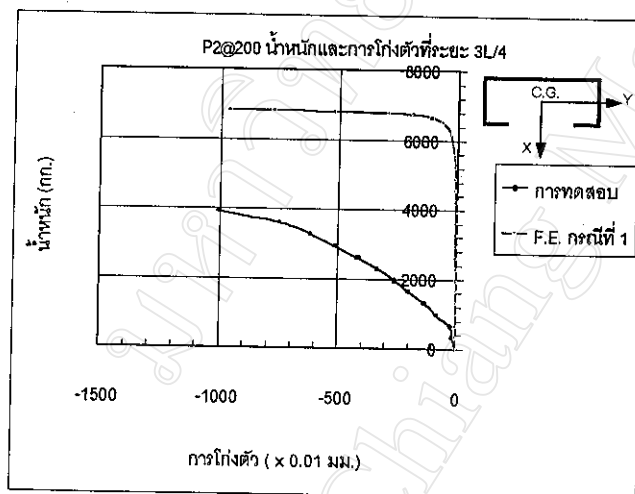
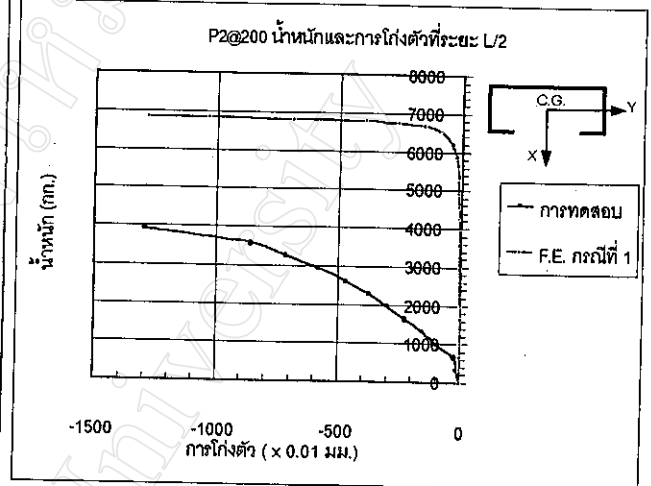
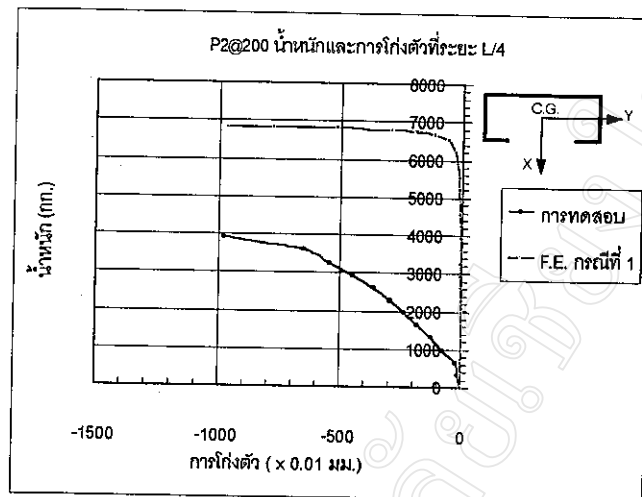
ของ F2@200



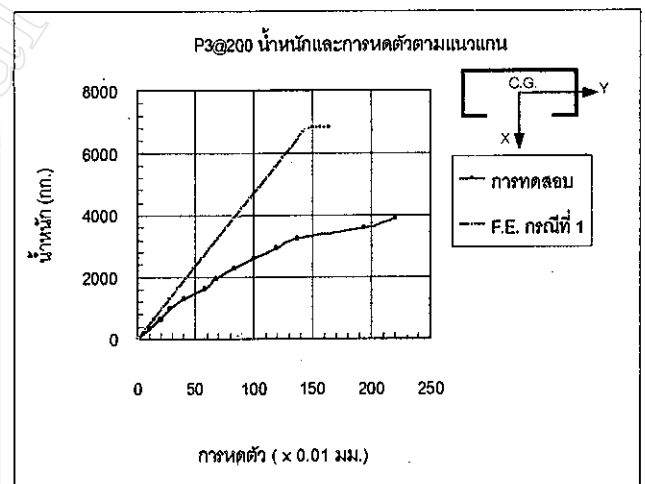
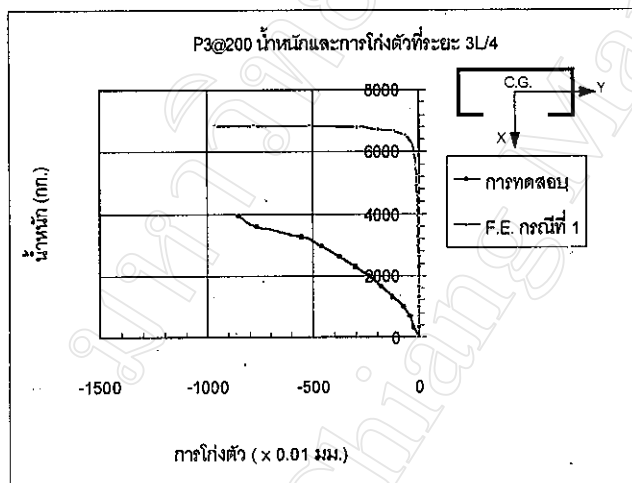
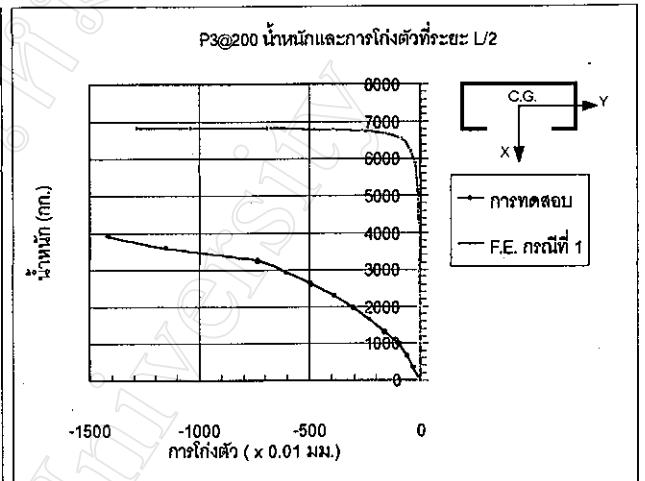
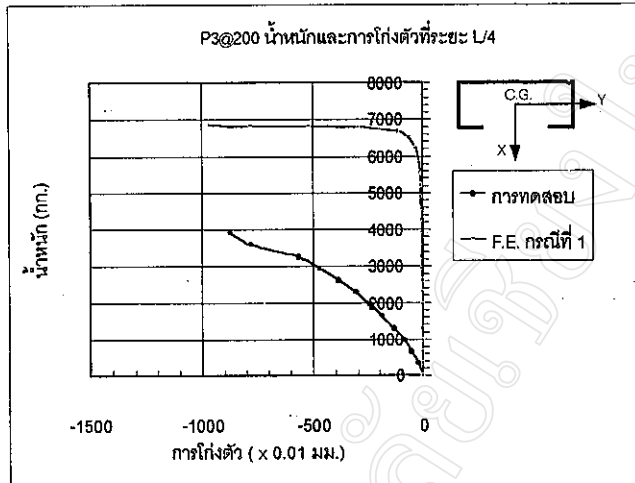
รูปที่ ข33.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 1
ของ F3@200



รูปที่ ข34.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P1@200

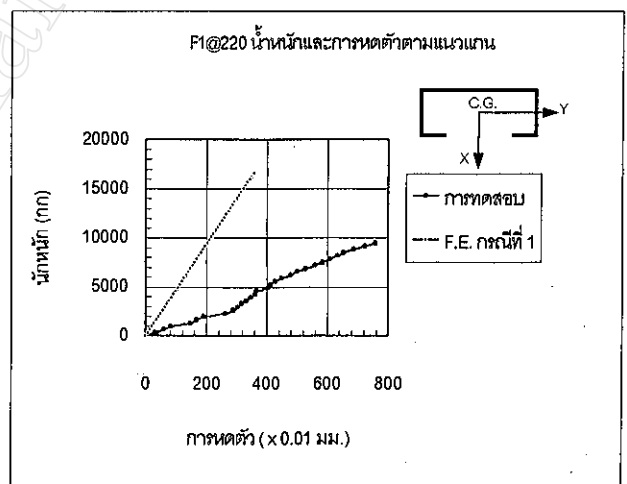
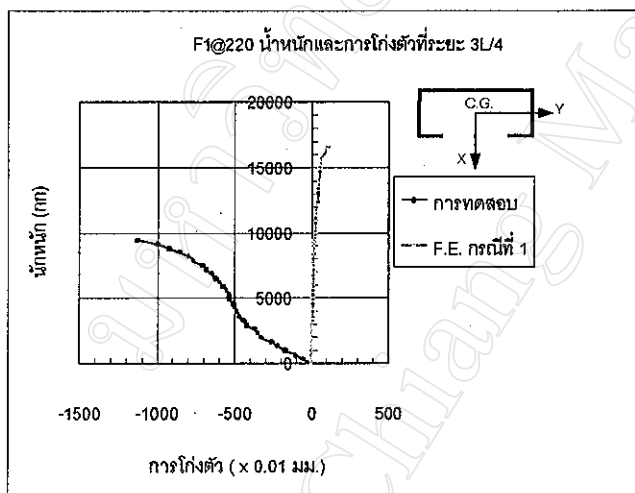
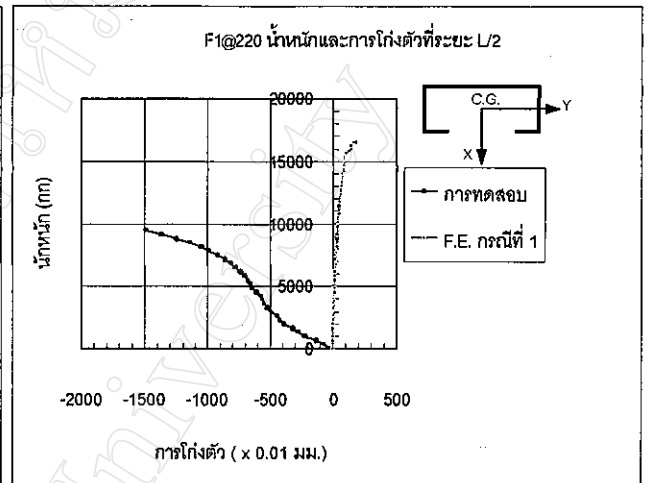
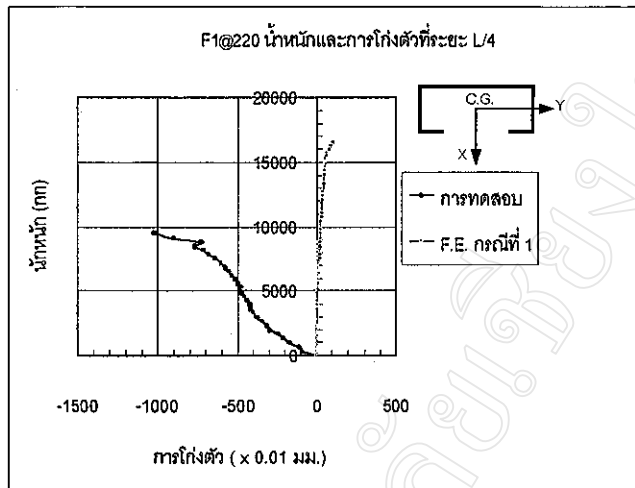


รูปที่ ข35.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P2@200



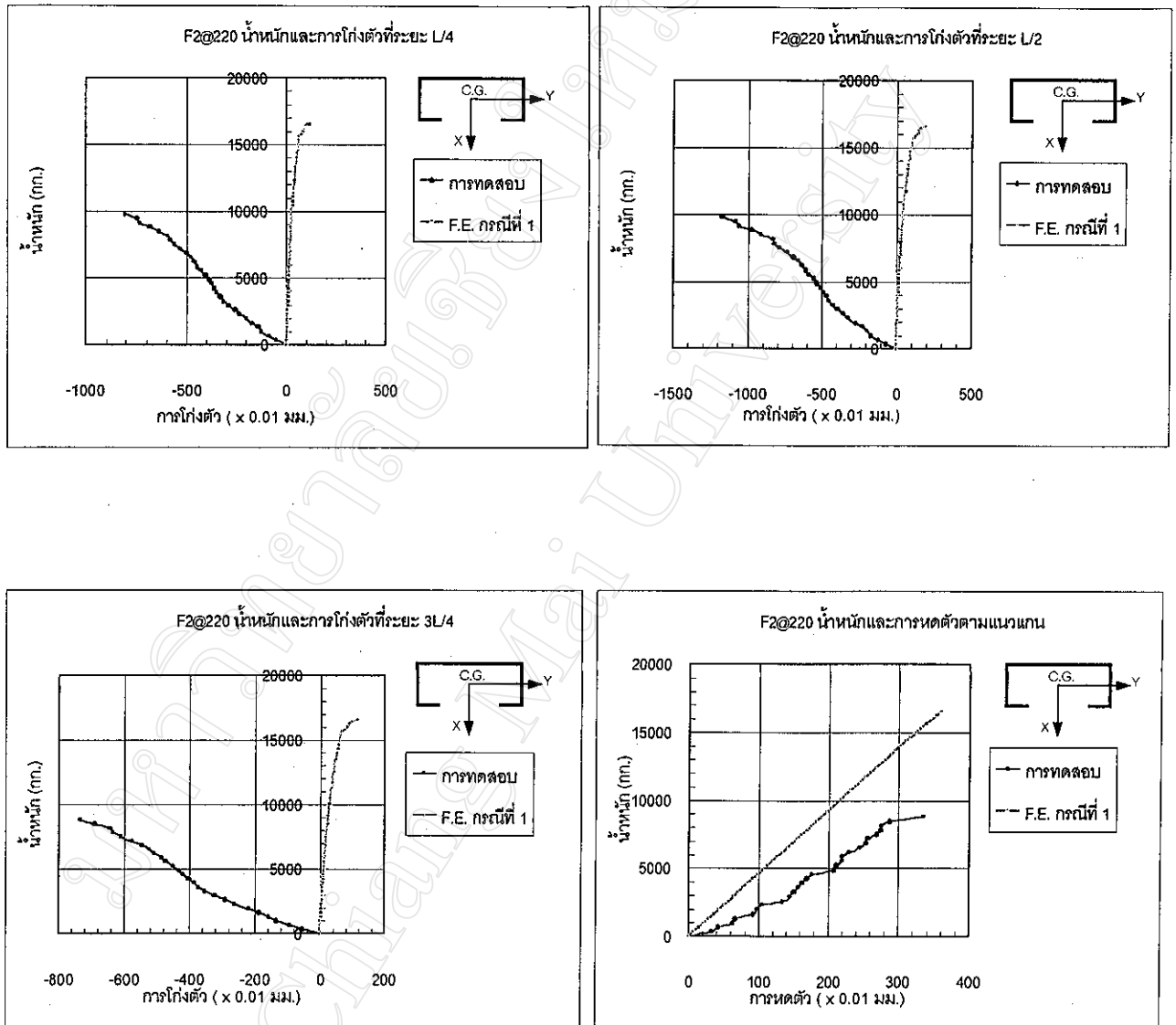
รูปที่ ข36.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ P3@200



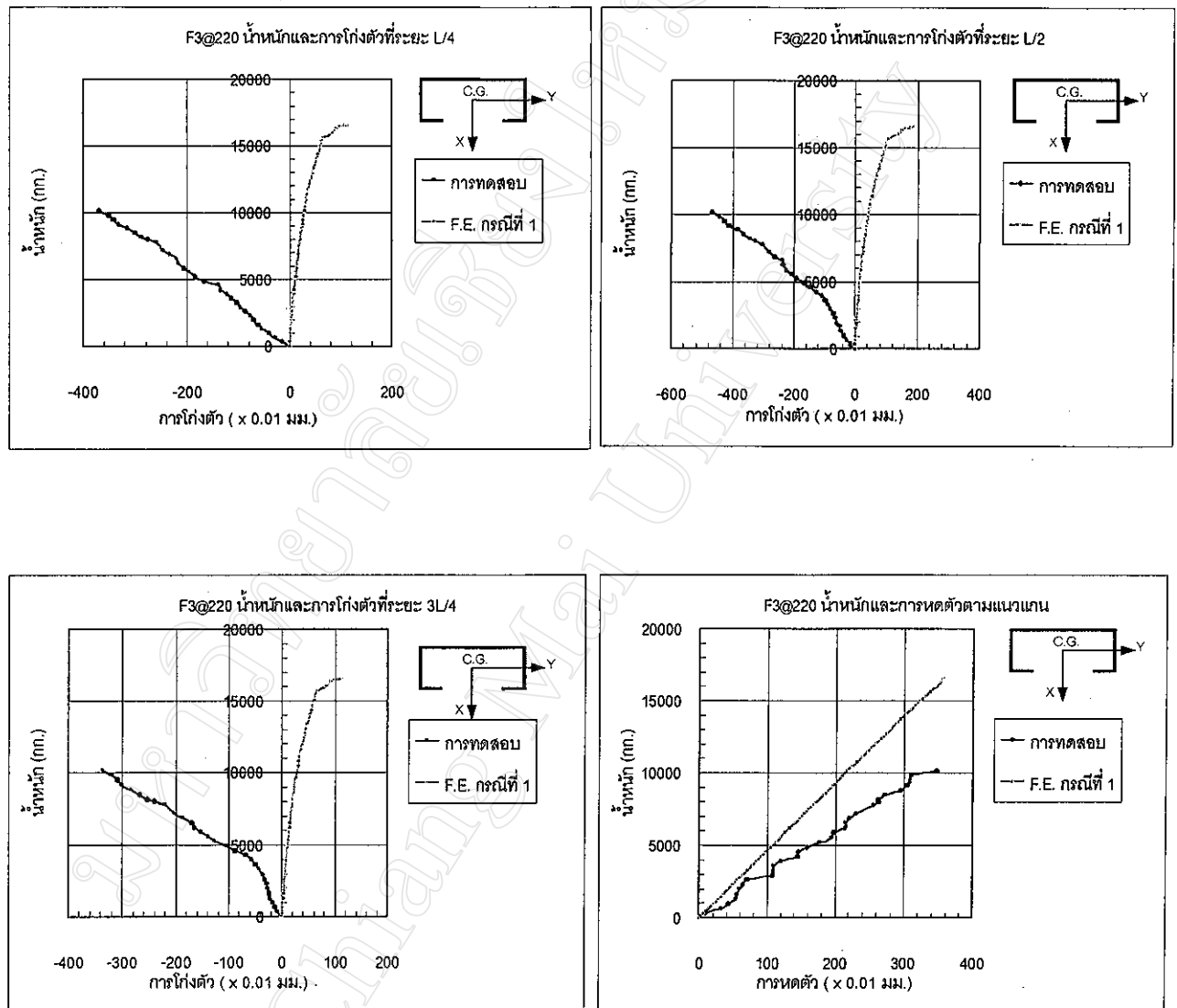
รูปที่ ข37. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ F1@220



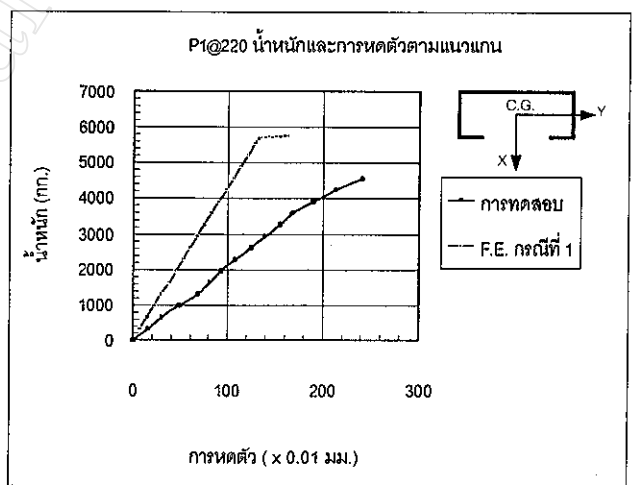
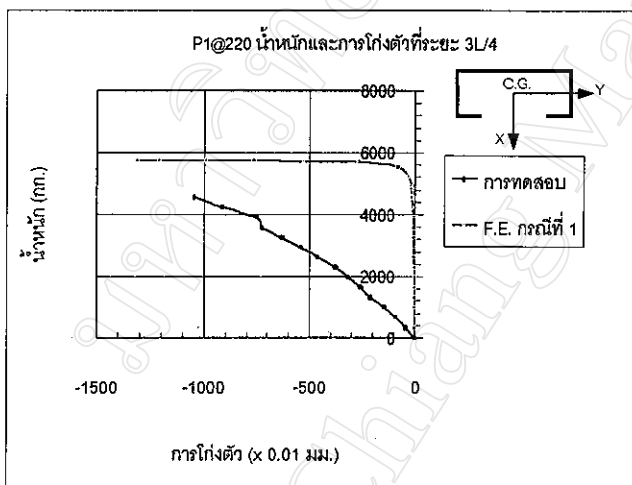
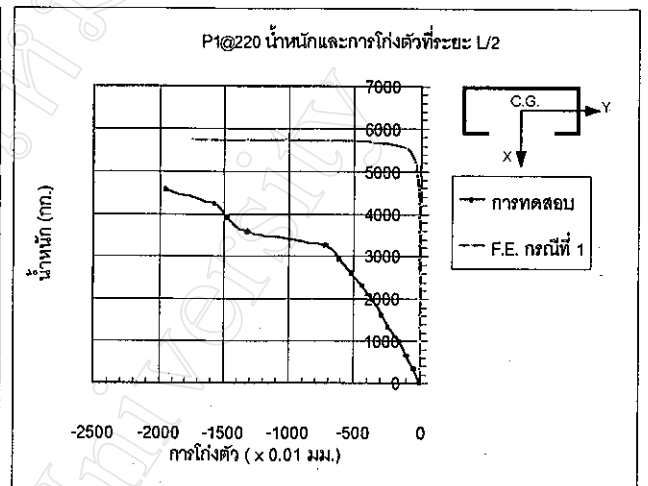
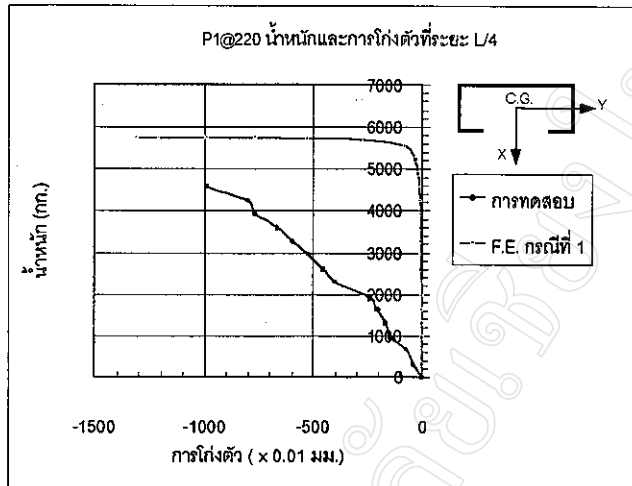
รูปที่ ข38.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กรณีที่ 1

ของ F2@220

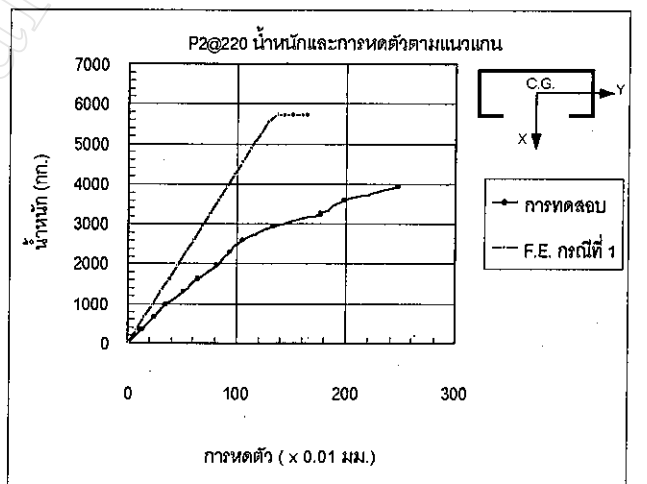
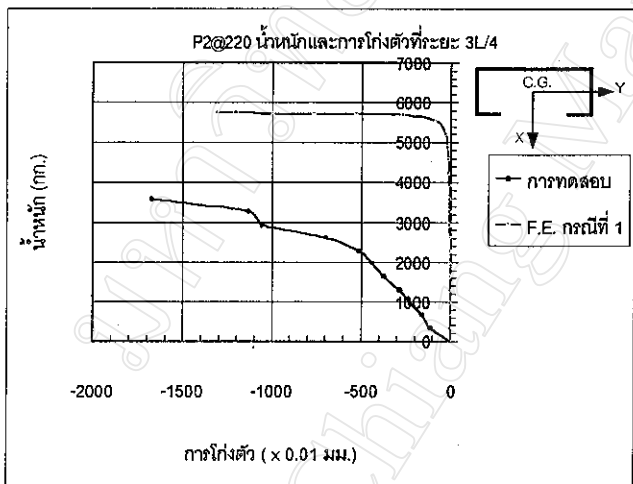
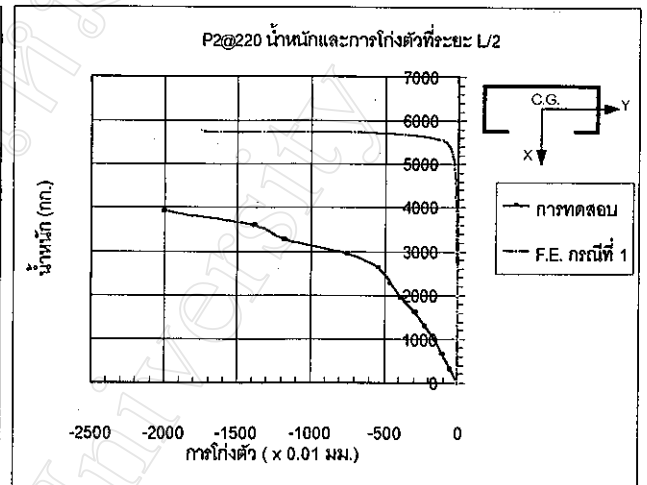
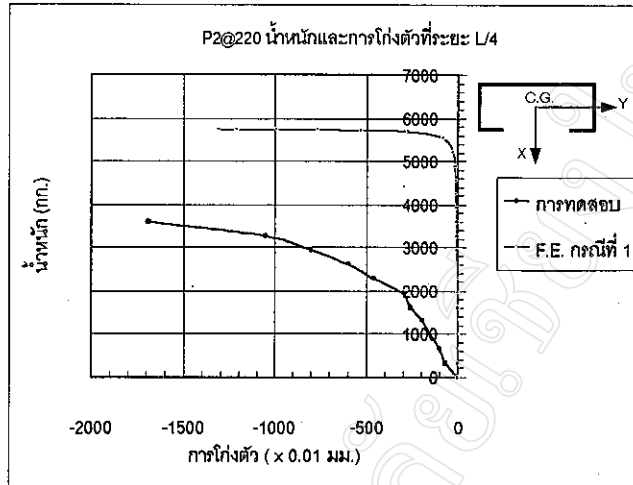


รูปที่ ข39.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

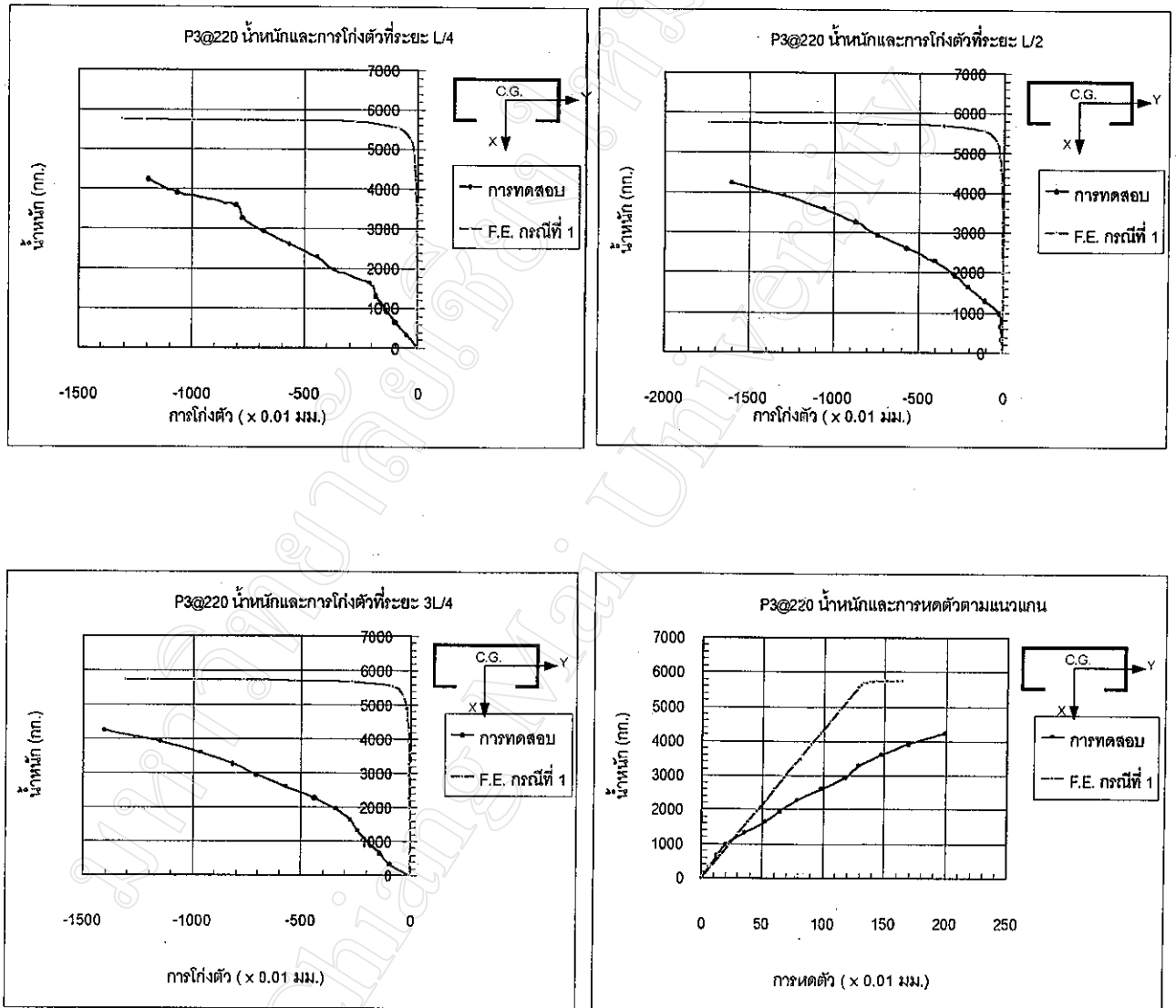
ของ F3@220



รูปที่ ข40.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P1@220

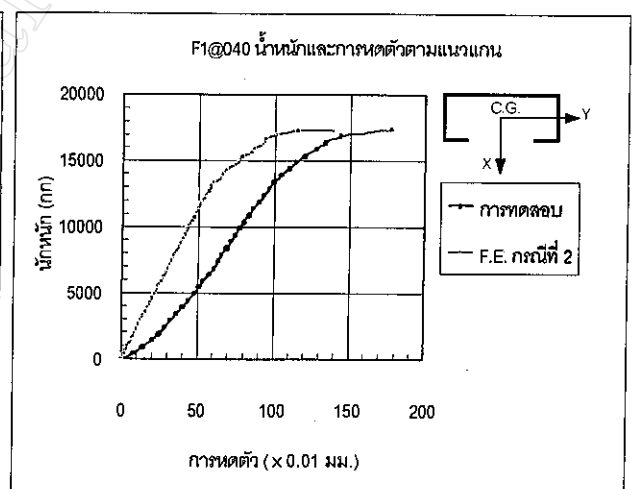
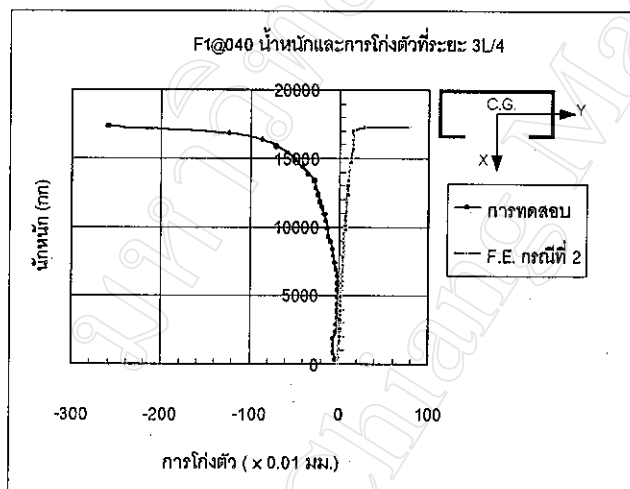
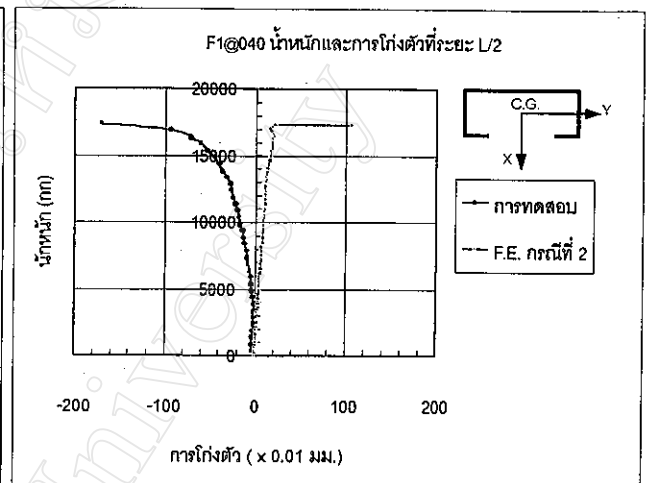
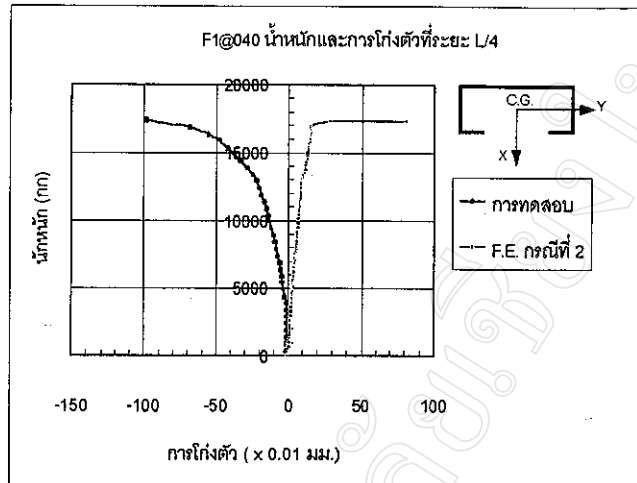


รูปที่ ข41.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1
ของ P2@220

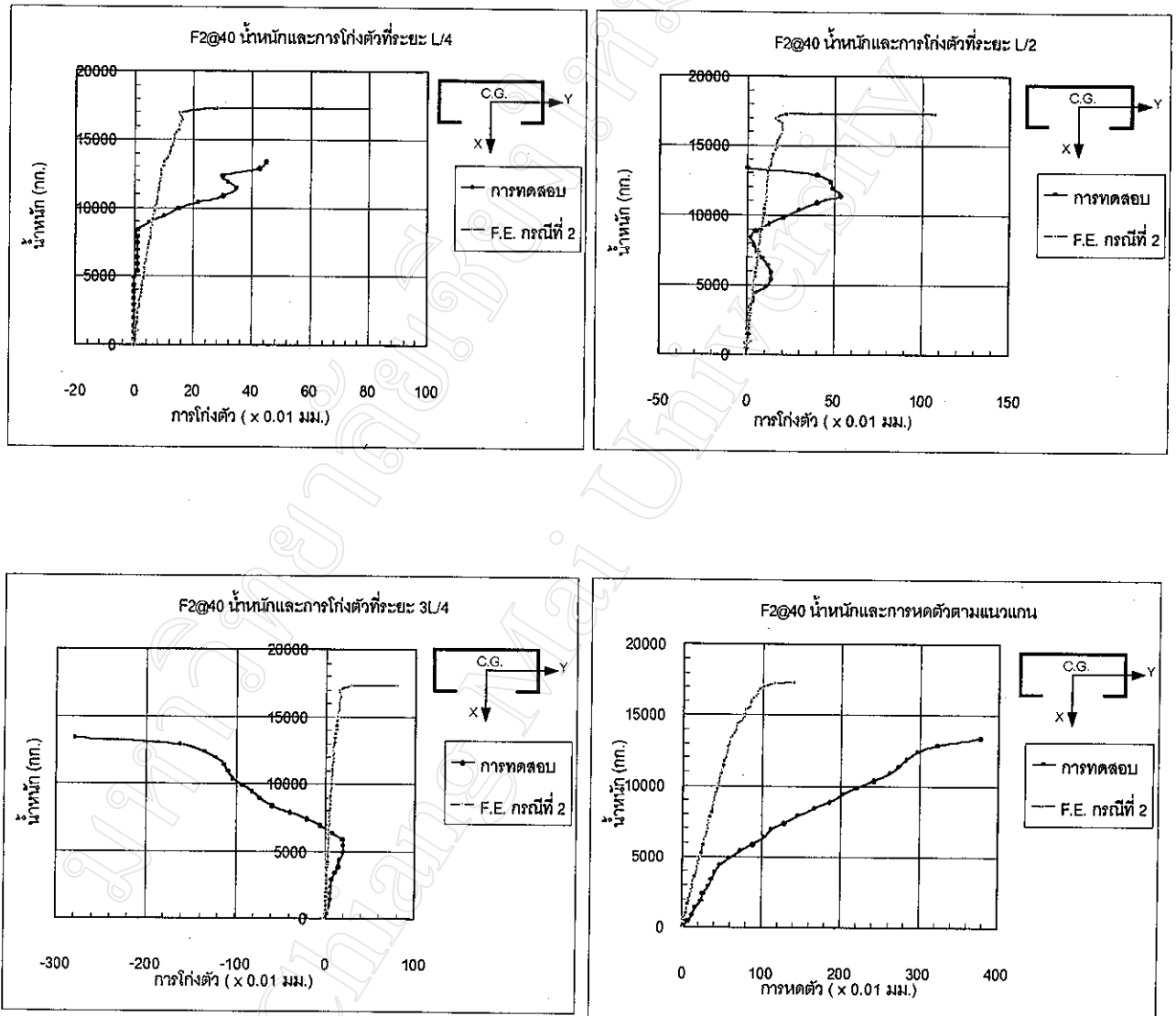


รูปที่ ๒42. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 1

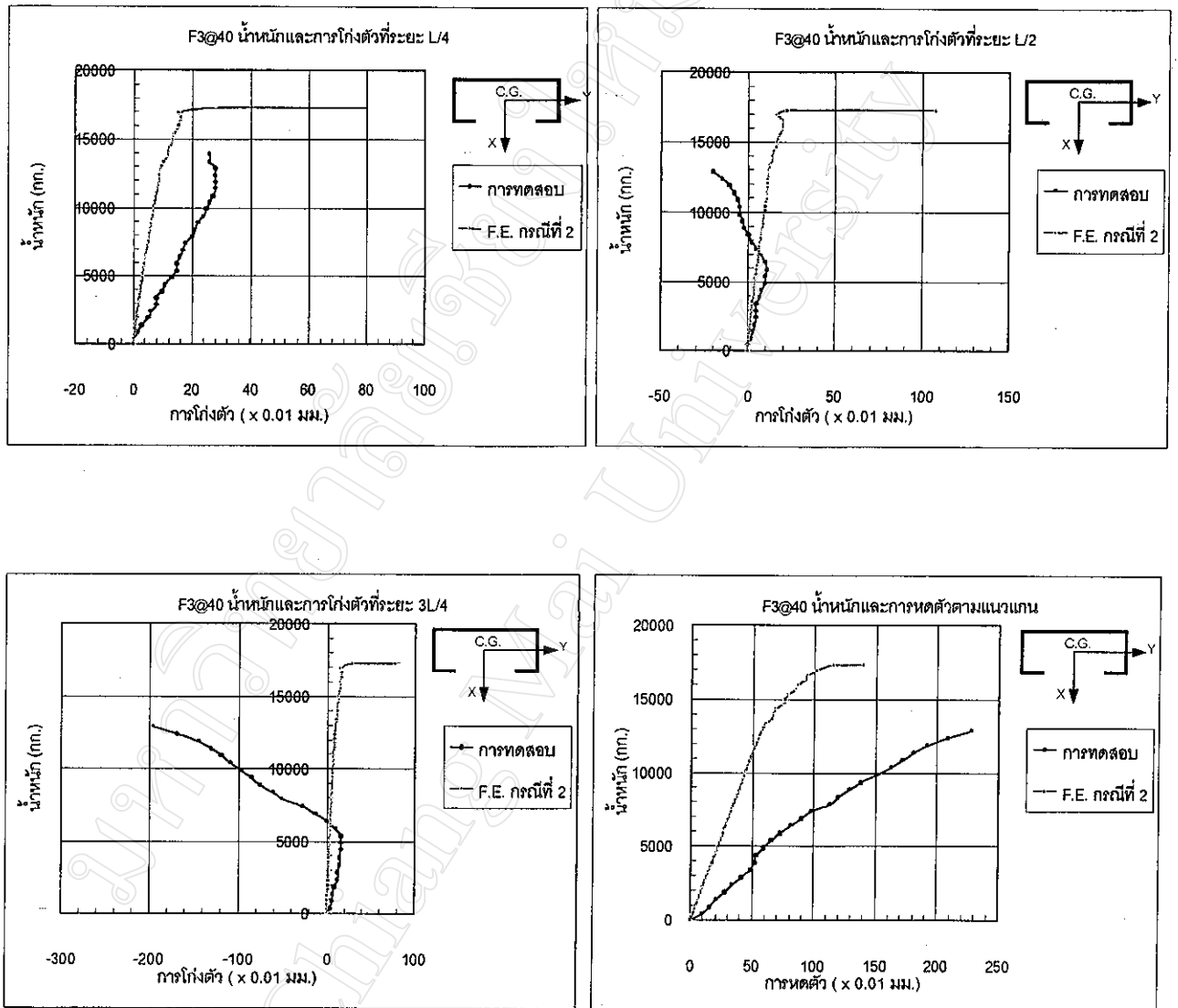
ของ P3@220



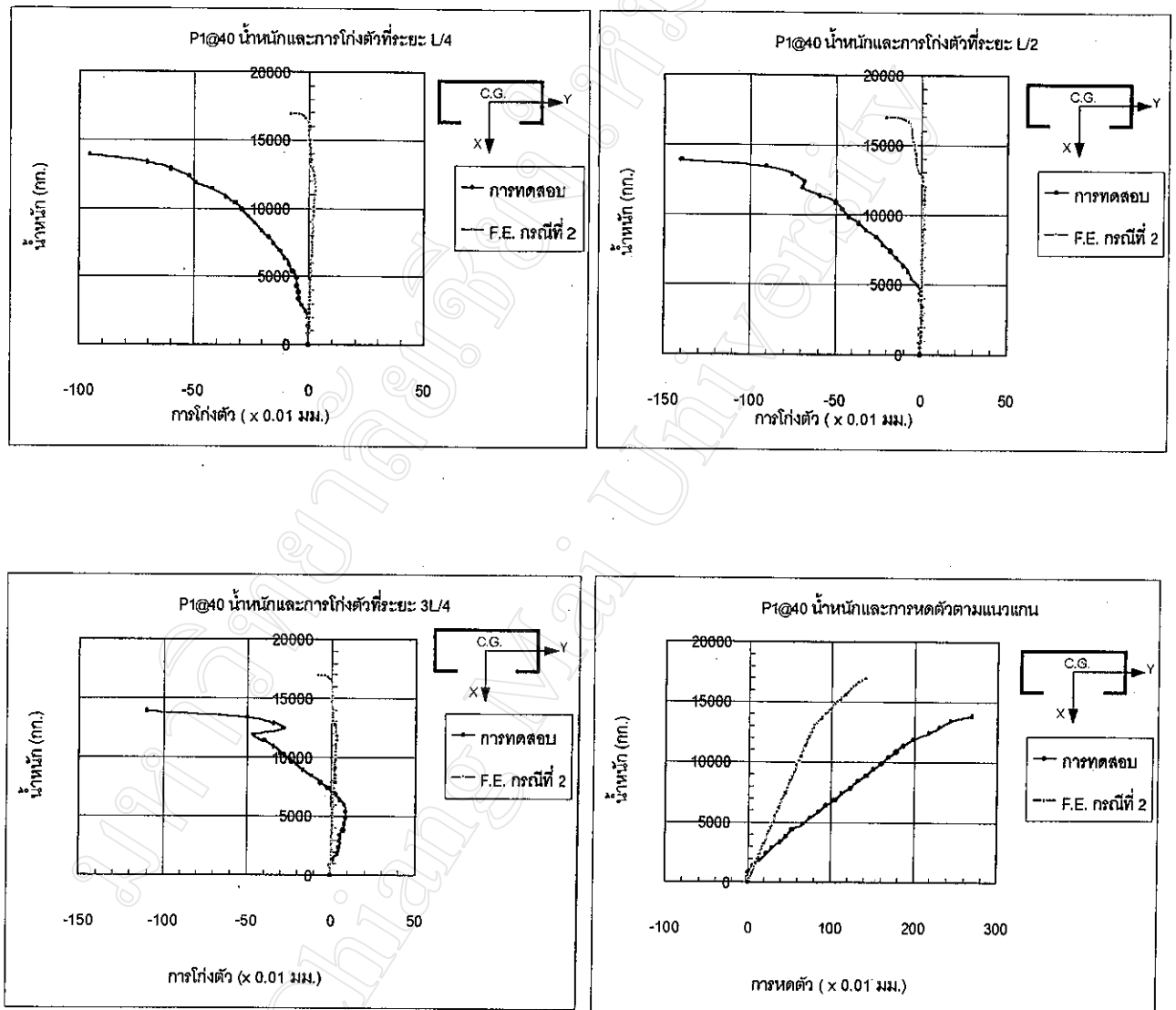
รูปที่ ข43. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ F1@040



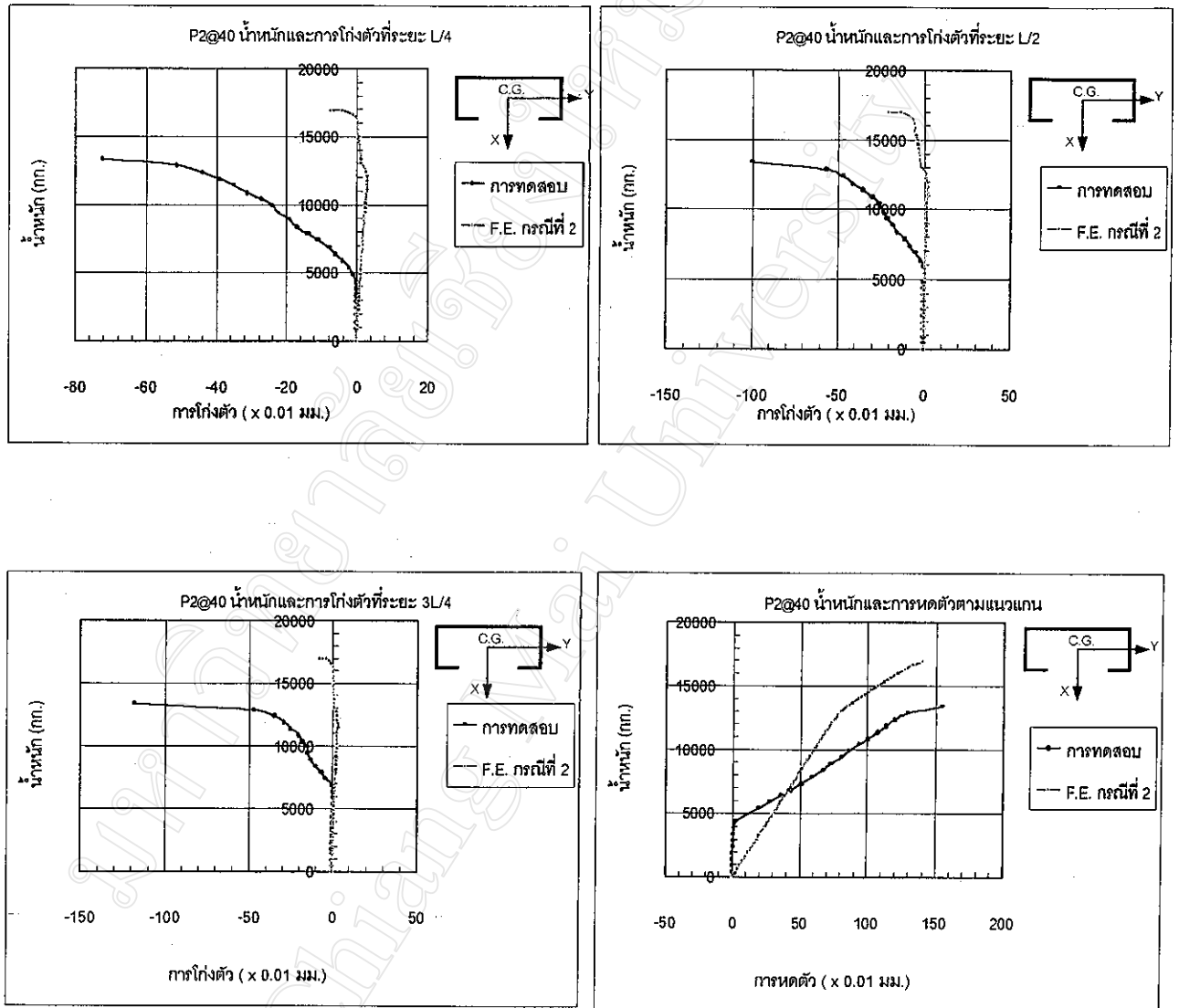
รูปที่ ข44. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ F2@040



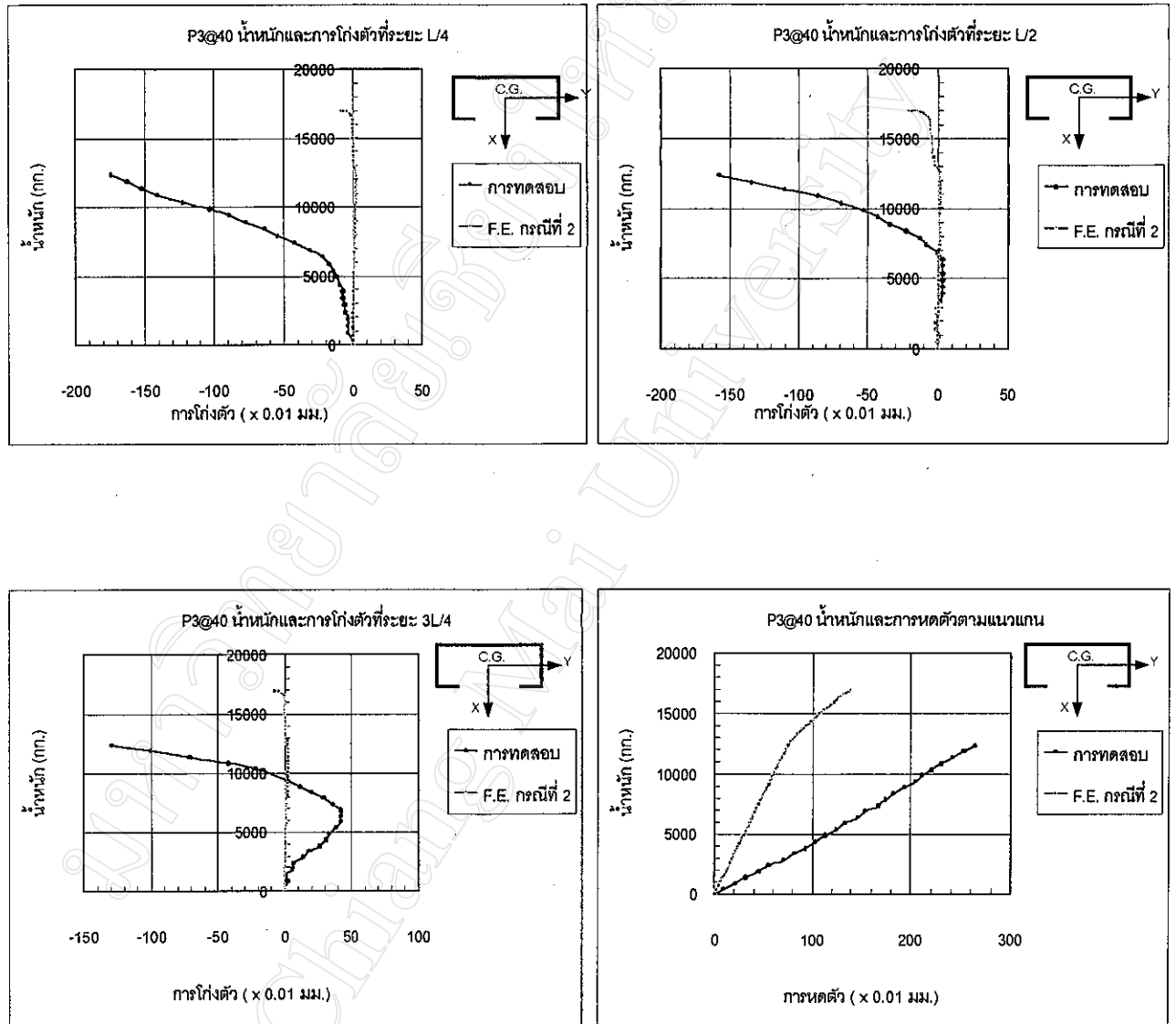
รูปที่ ข45.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F3@040



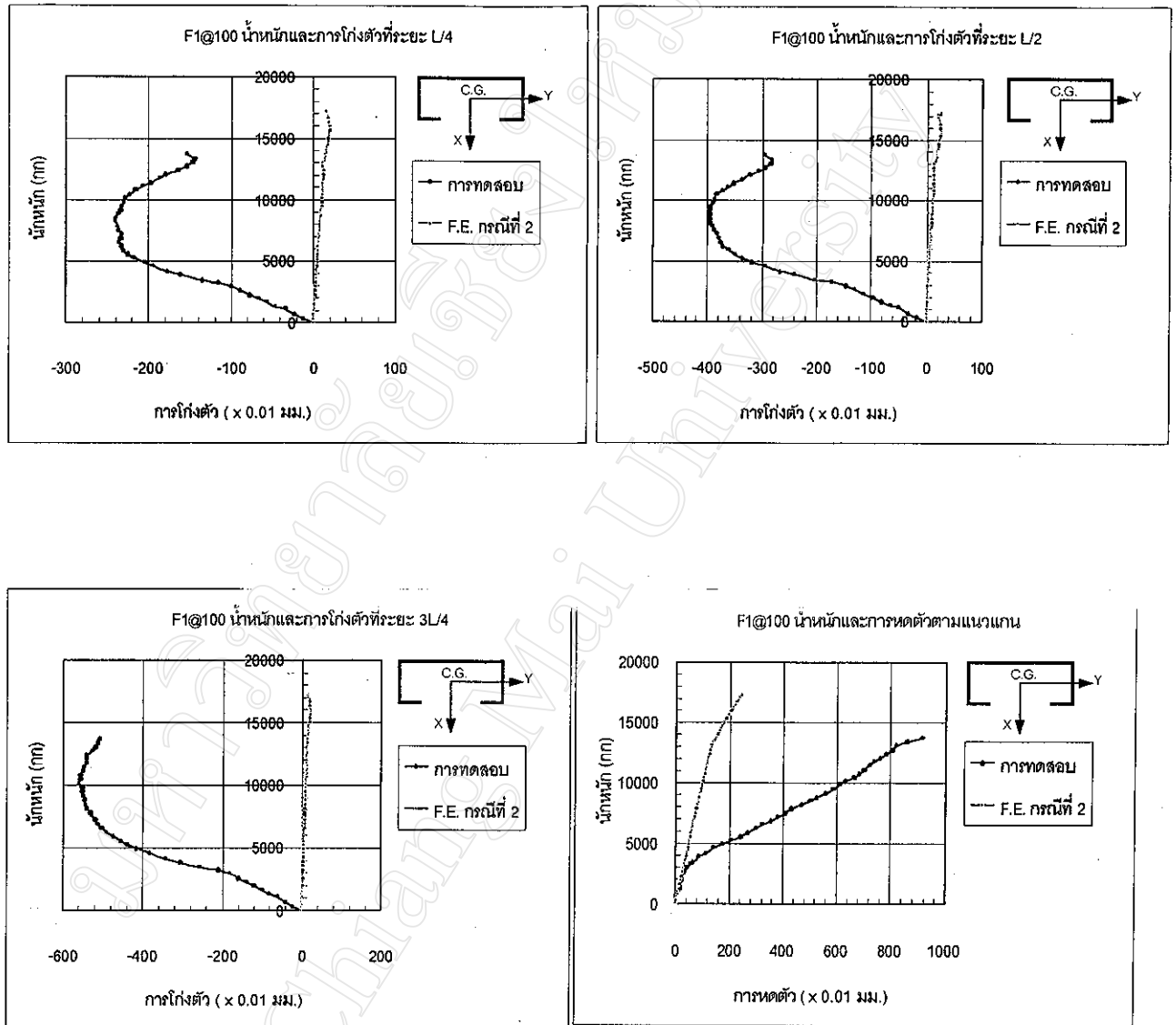
รูปที่ ข46.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P1@040



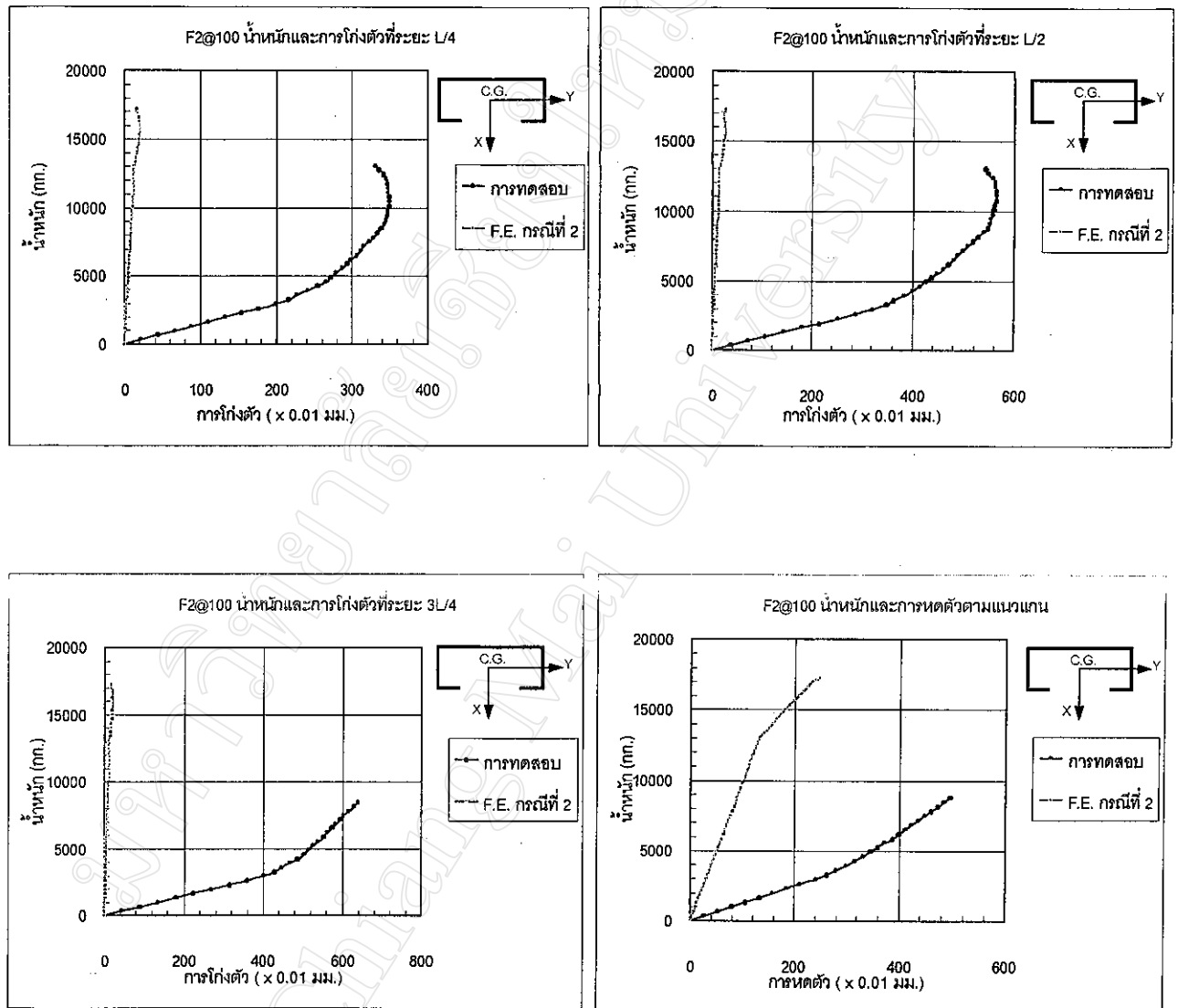
รูปที่ ข47. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ P2@040



รูปที่ ข48. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณี 2
ของ P3@040

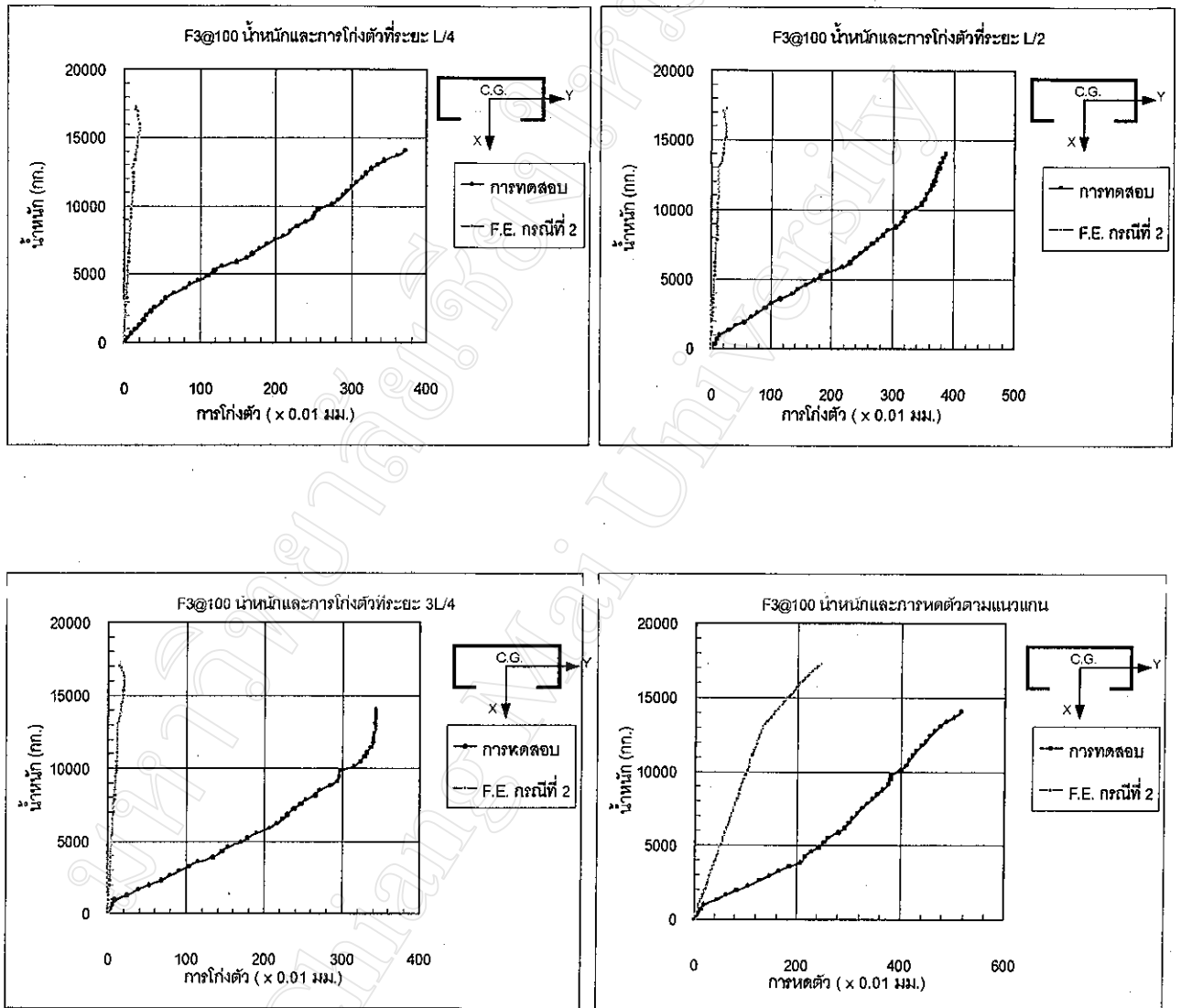


รูปที่ ข49.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ F1@100

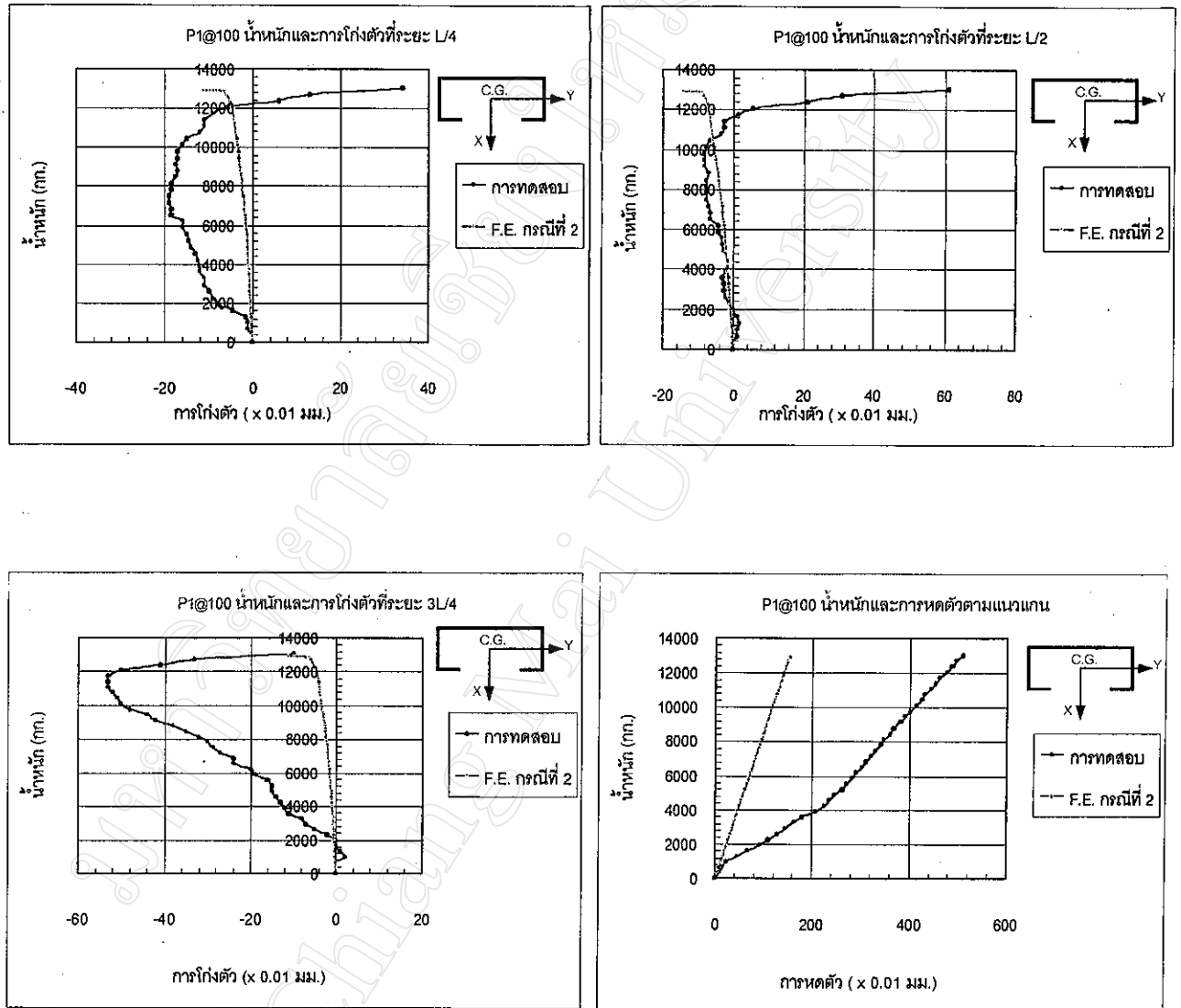


รูปที่ 150. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2

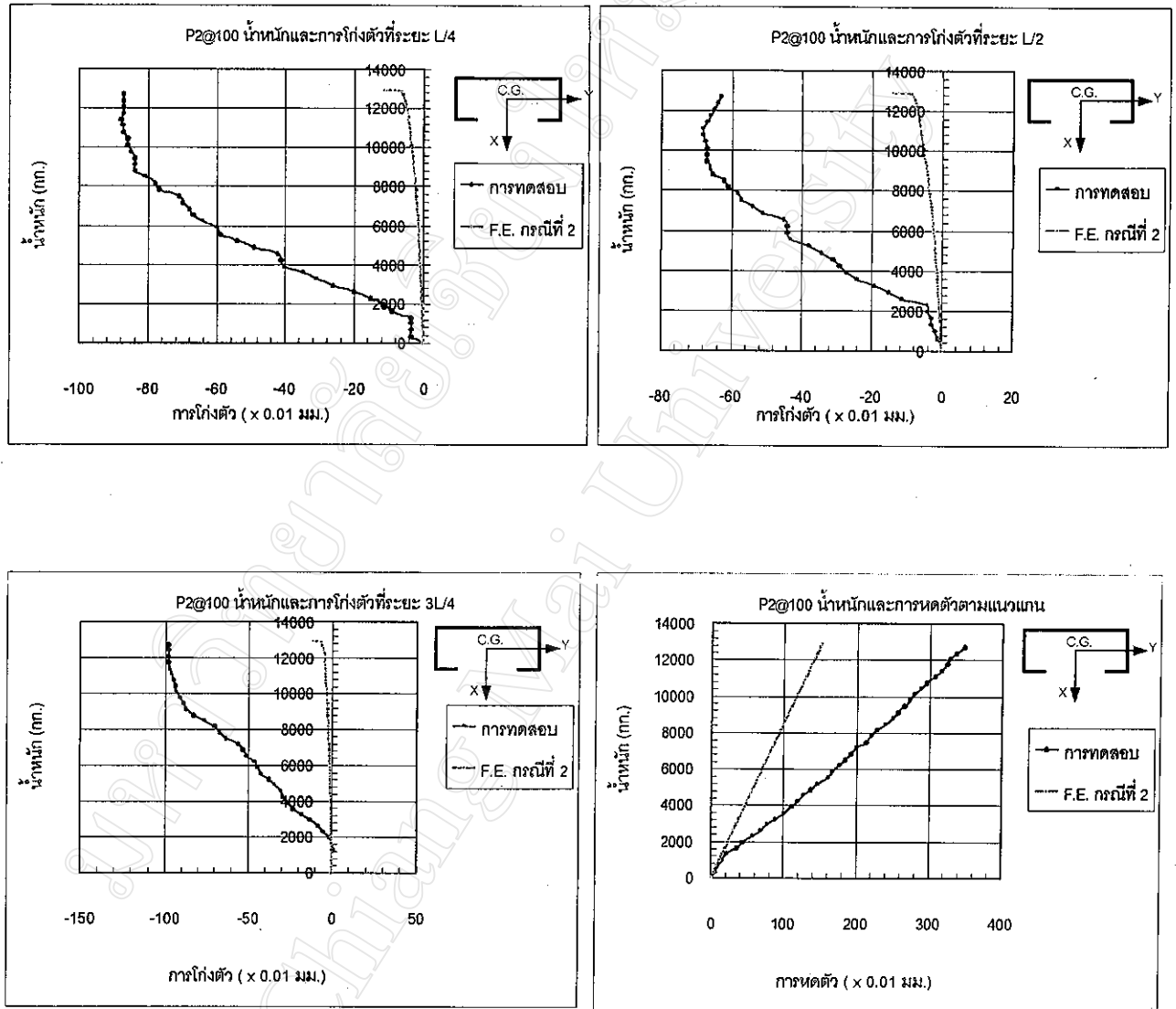
ของ F2@100



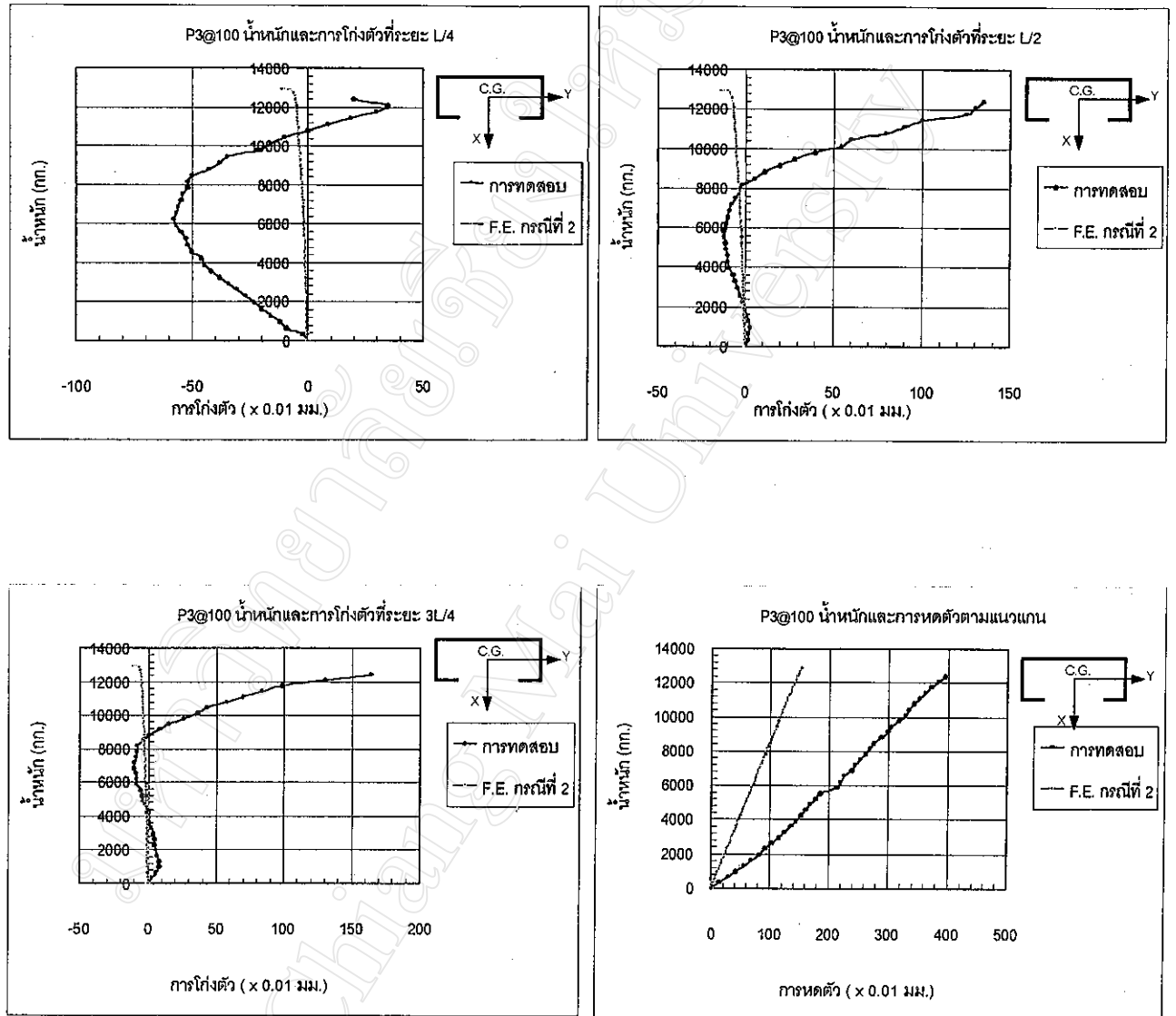
รูปที่ 151. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F3@100



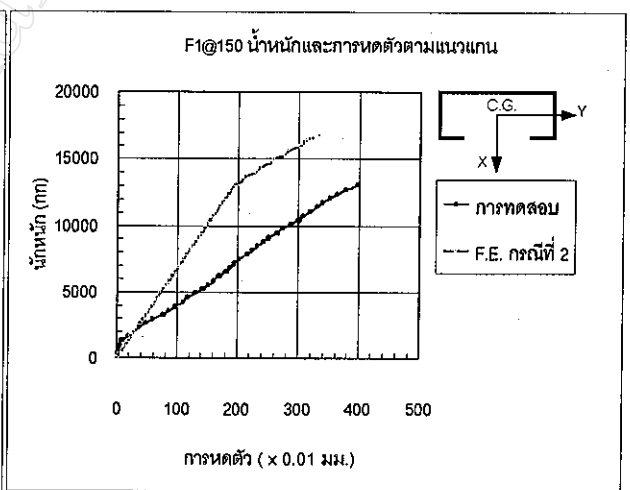
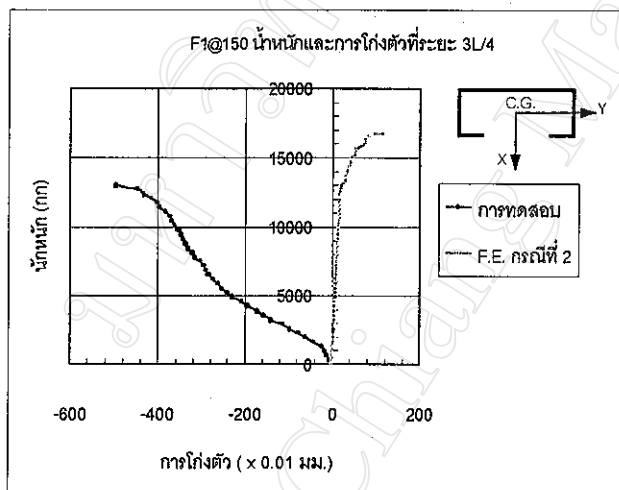
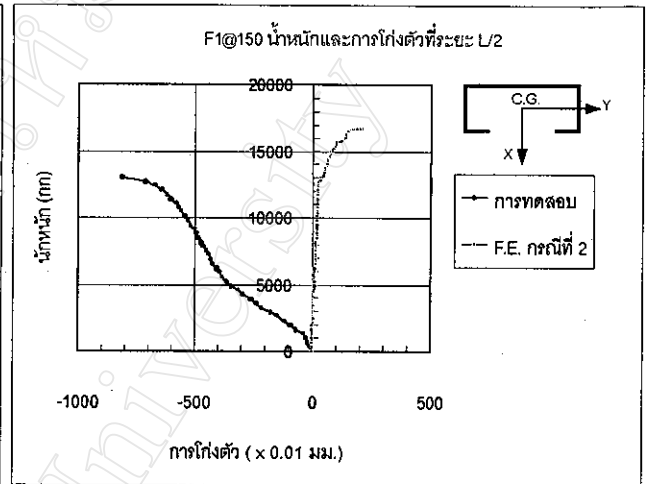
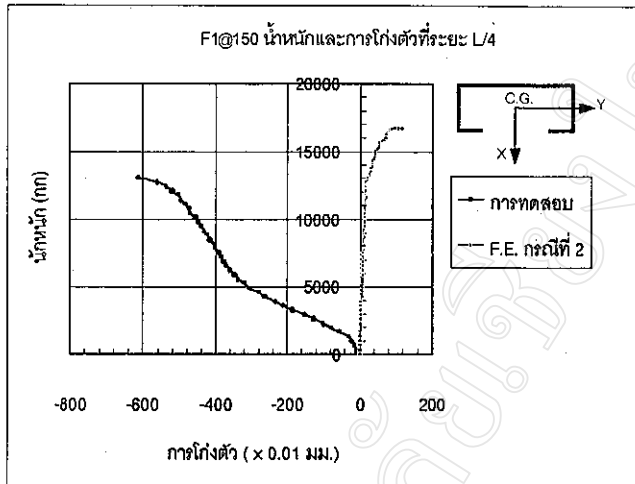
รูปที่ ข52.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P1@100



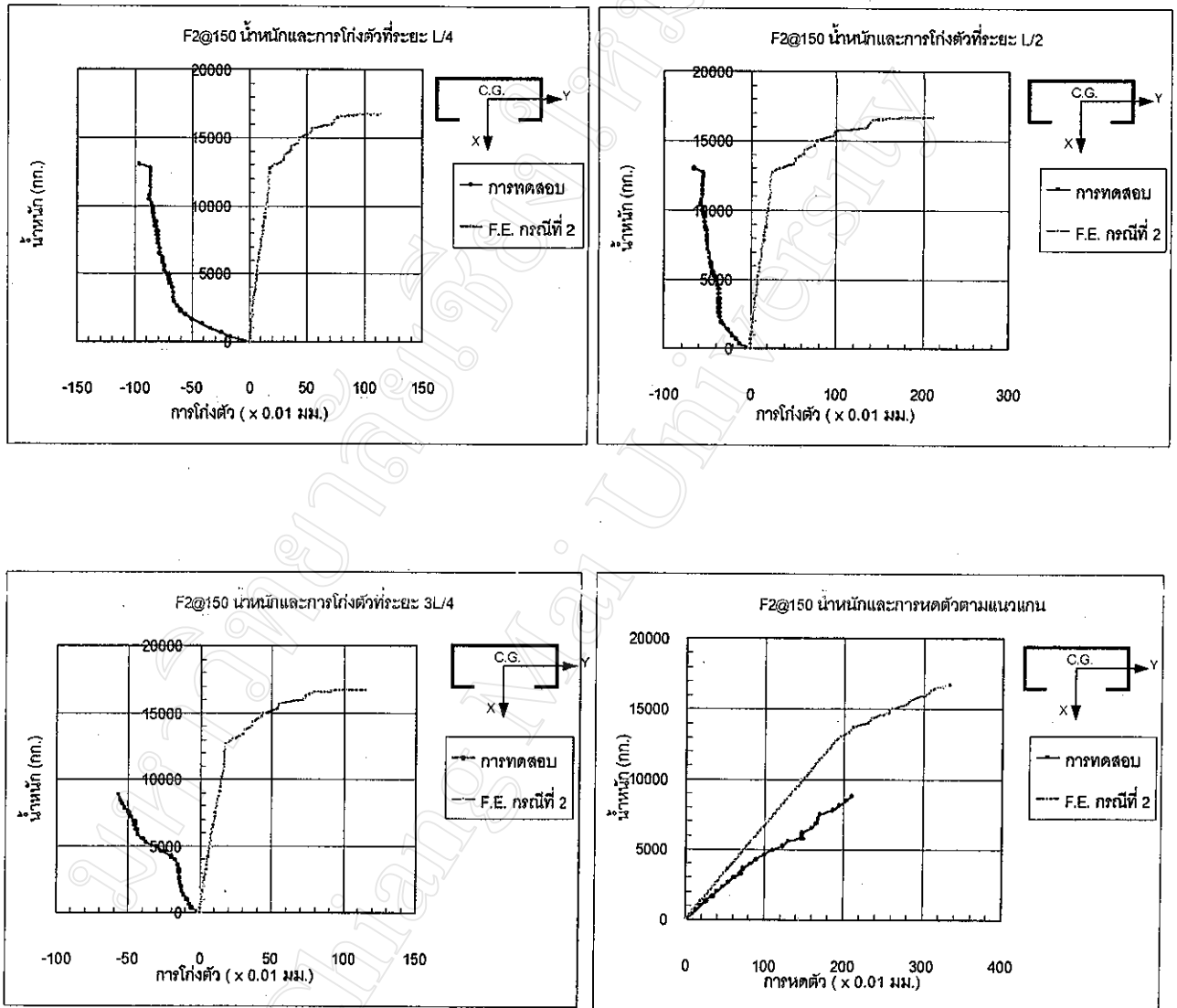
รูปที่ ข53.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P2@100



รูปที่ ข54. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ P3@100

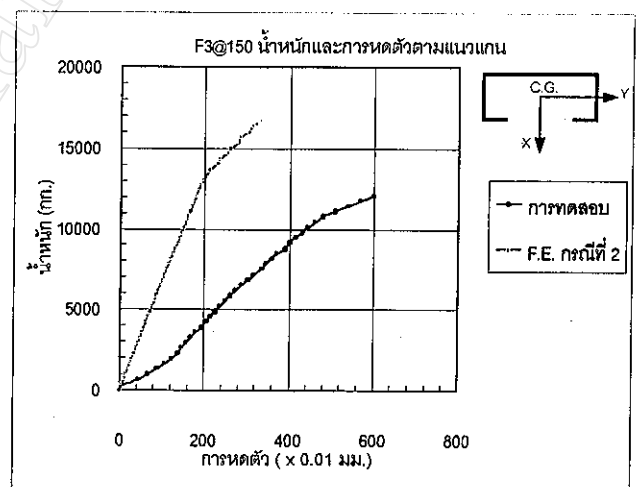
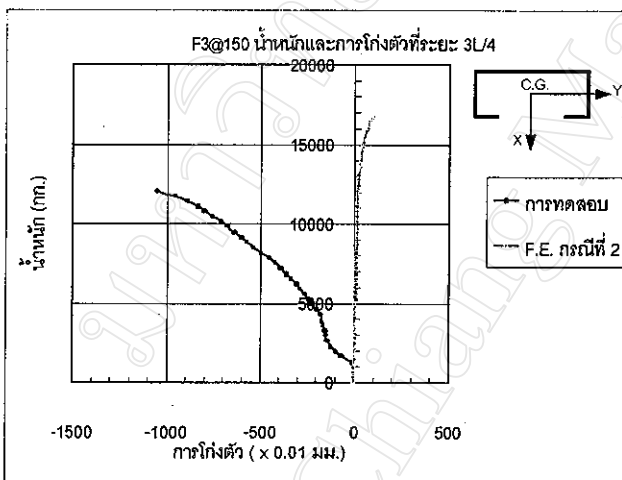
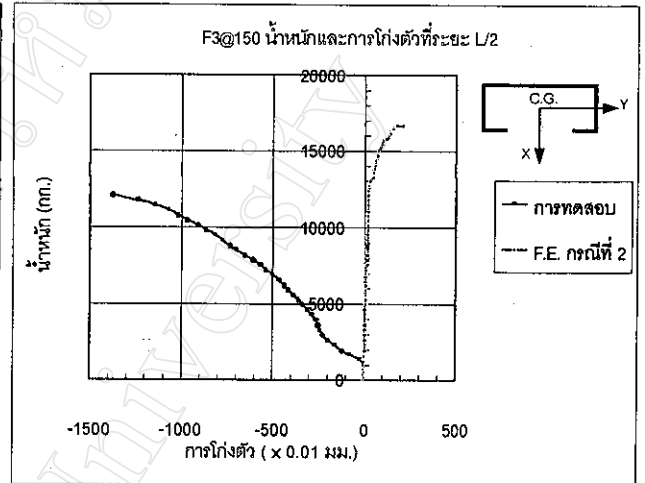
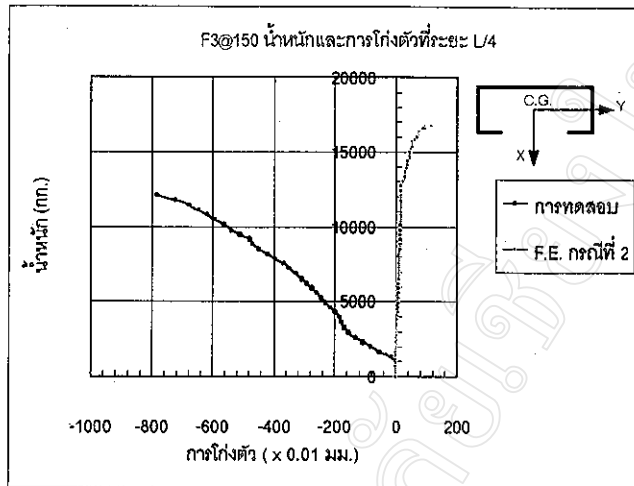


รูปที่ ข55.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F1@150

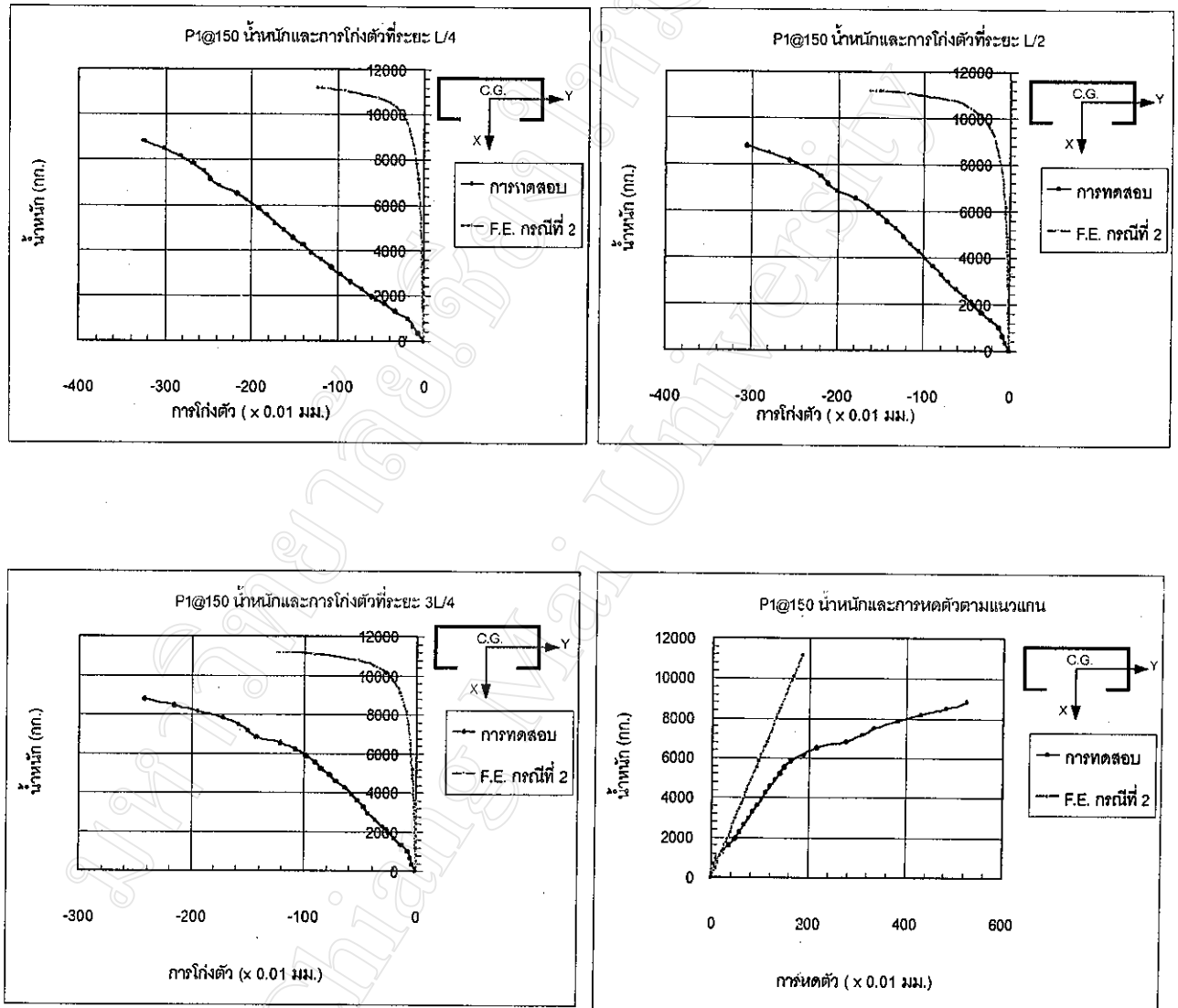


รูปที่ ข56.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2

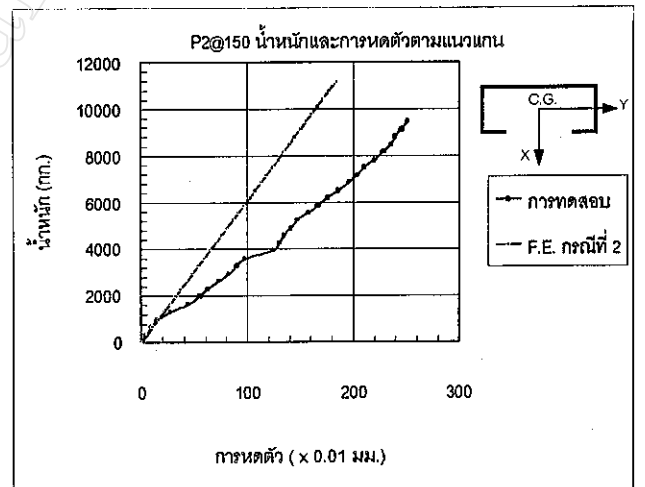
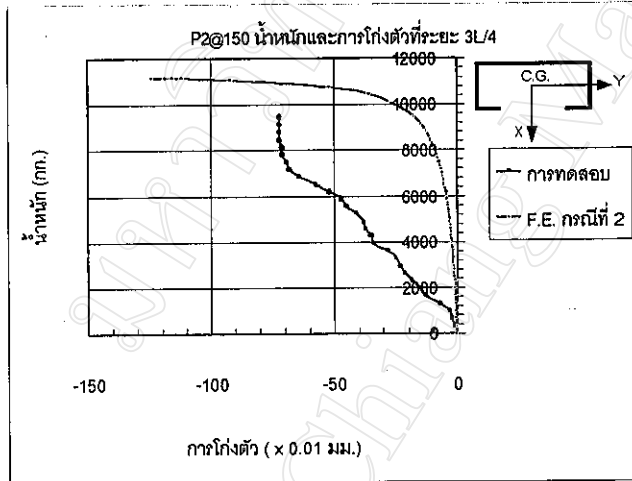
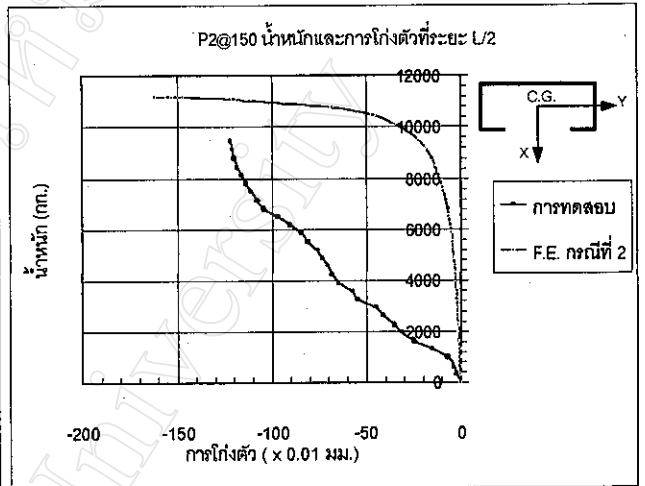
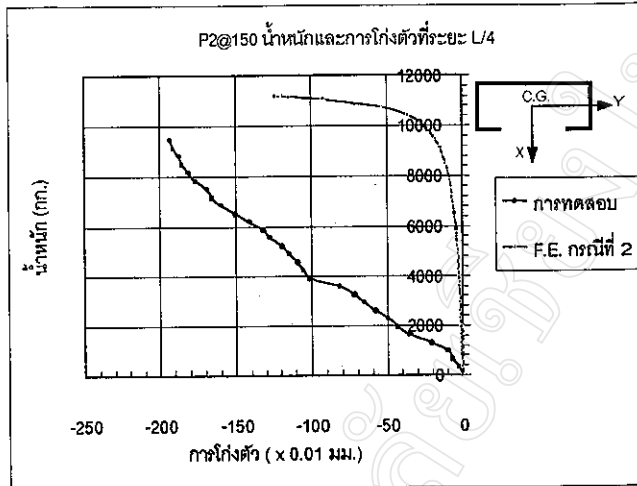
ของ F2@150



รูปที่ ข57. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F3@150

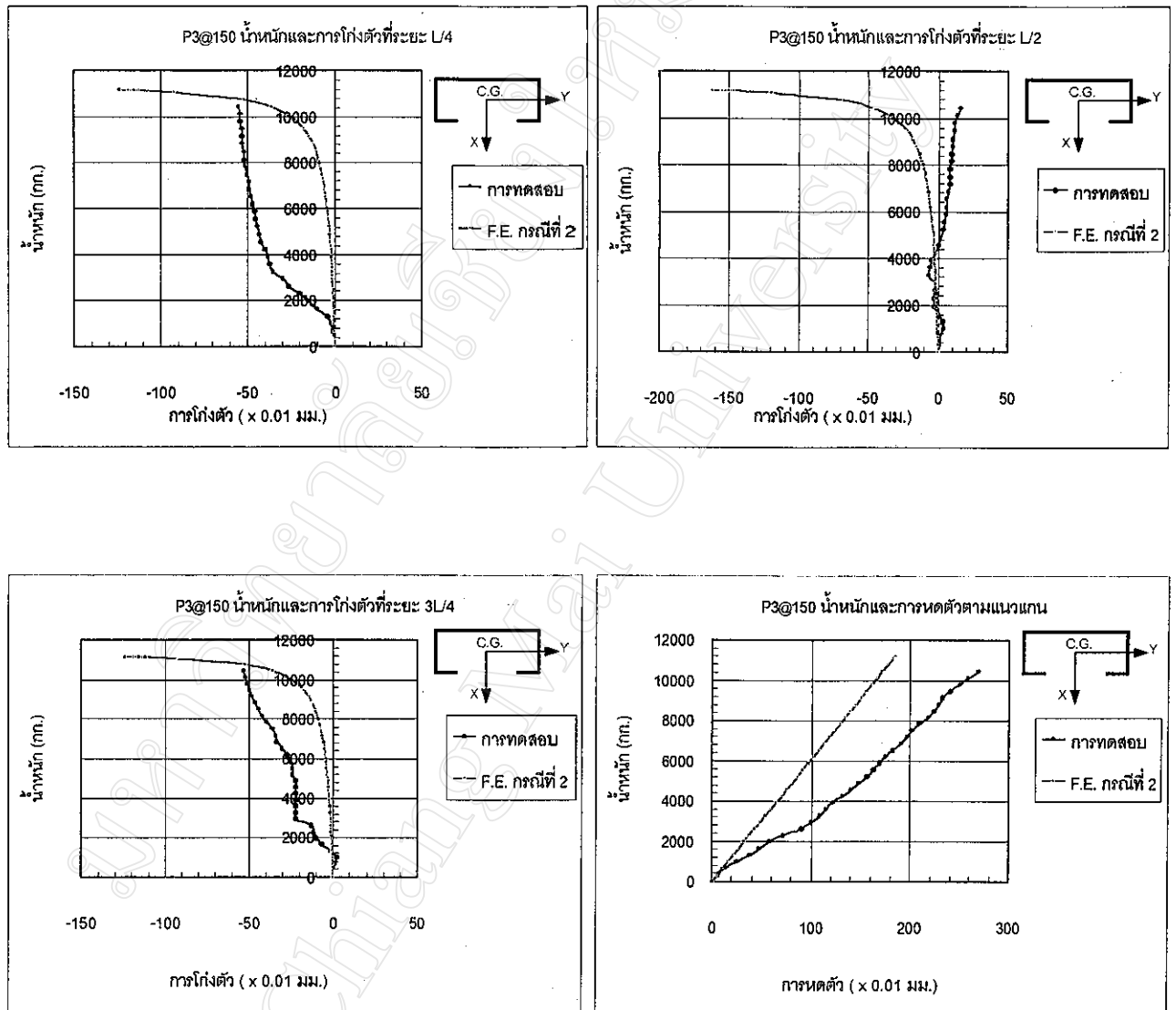


รูปที่ ข58. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ P1@150

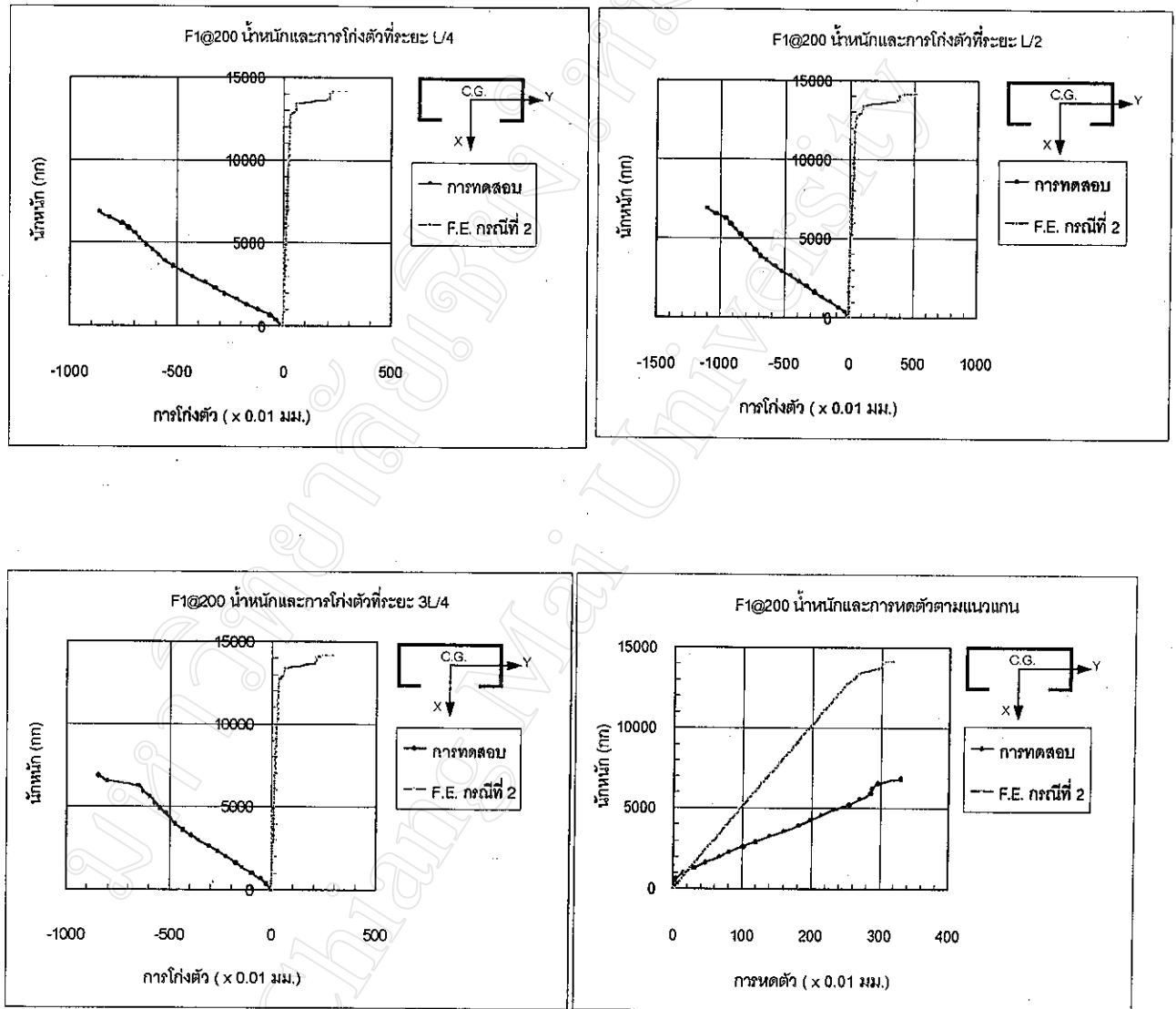


รูปที่ ข59. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2

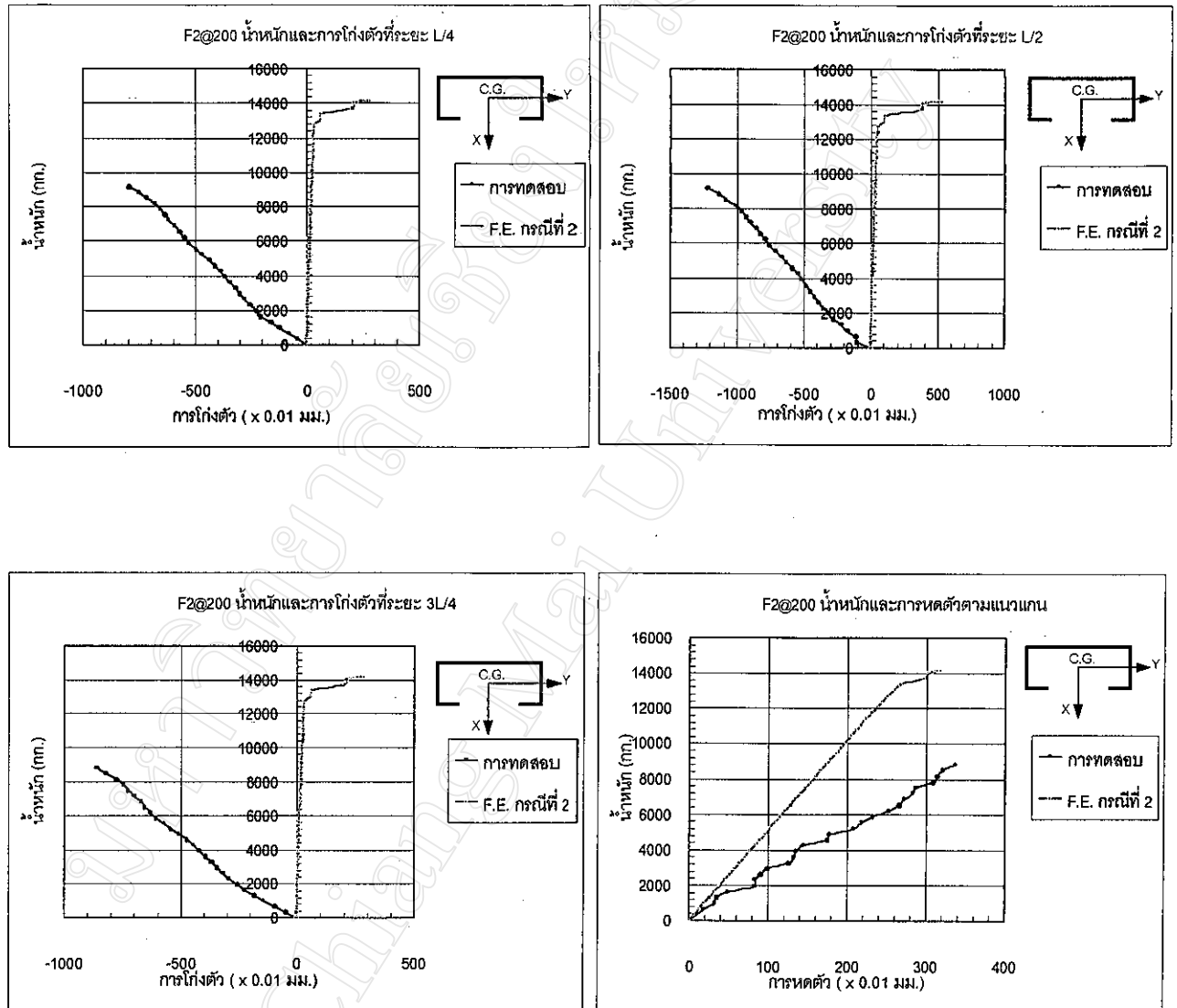
ของ P2@150



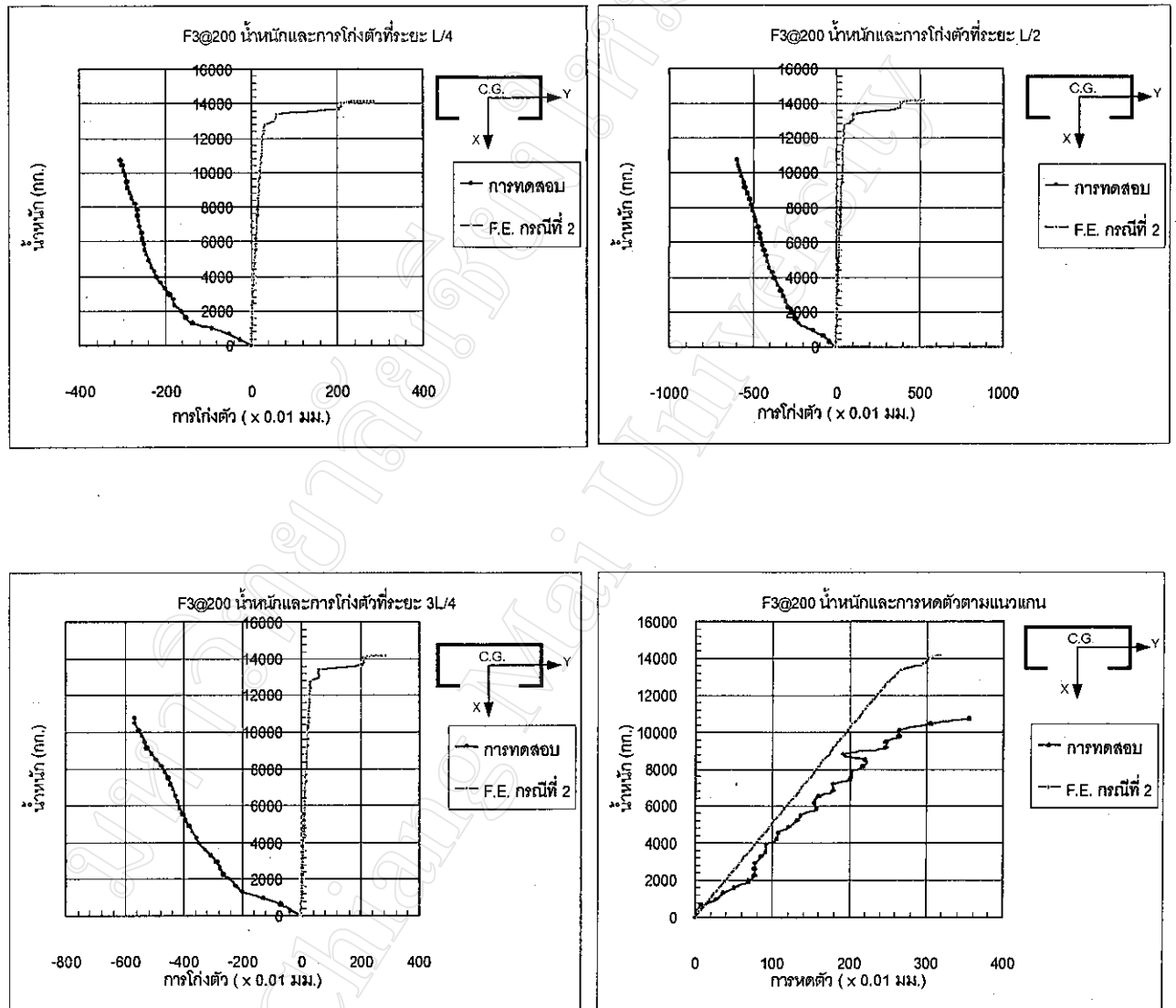
รูปที่ ข60.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P3@150



รูปที่ ข61. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ F1@200

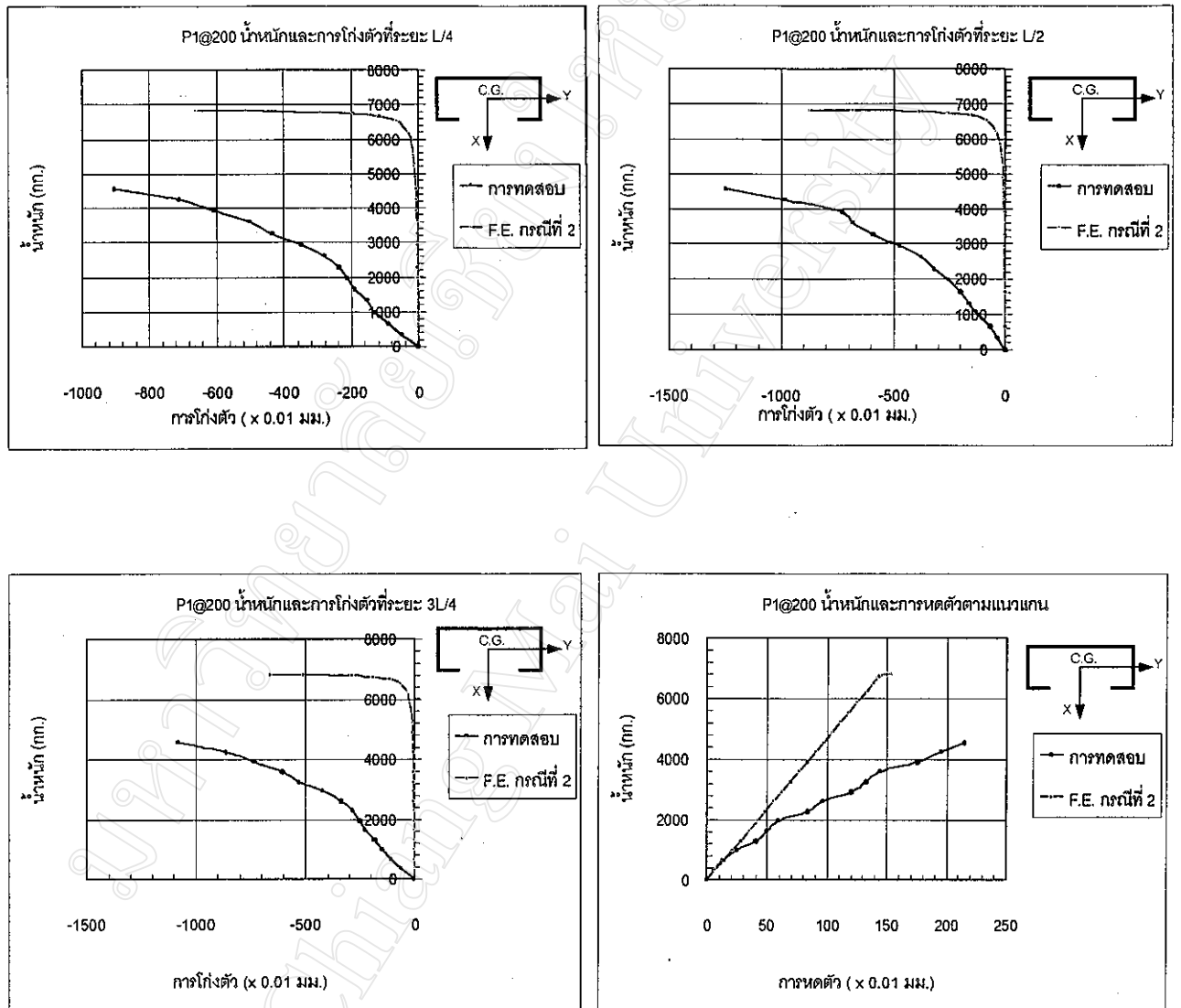


รูปที่ ข62.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F2@200

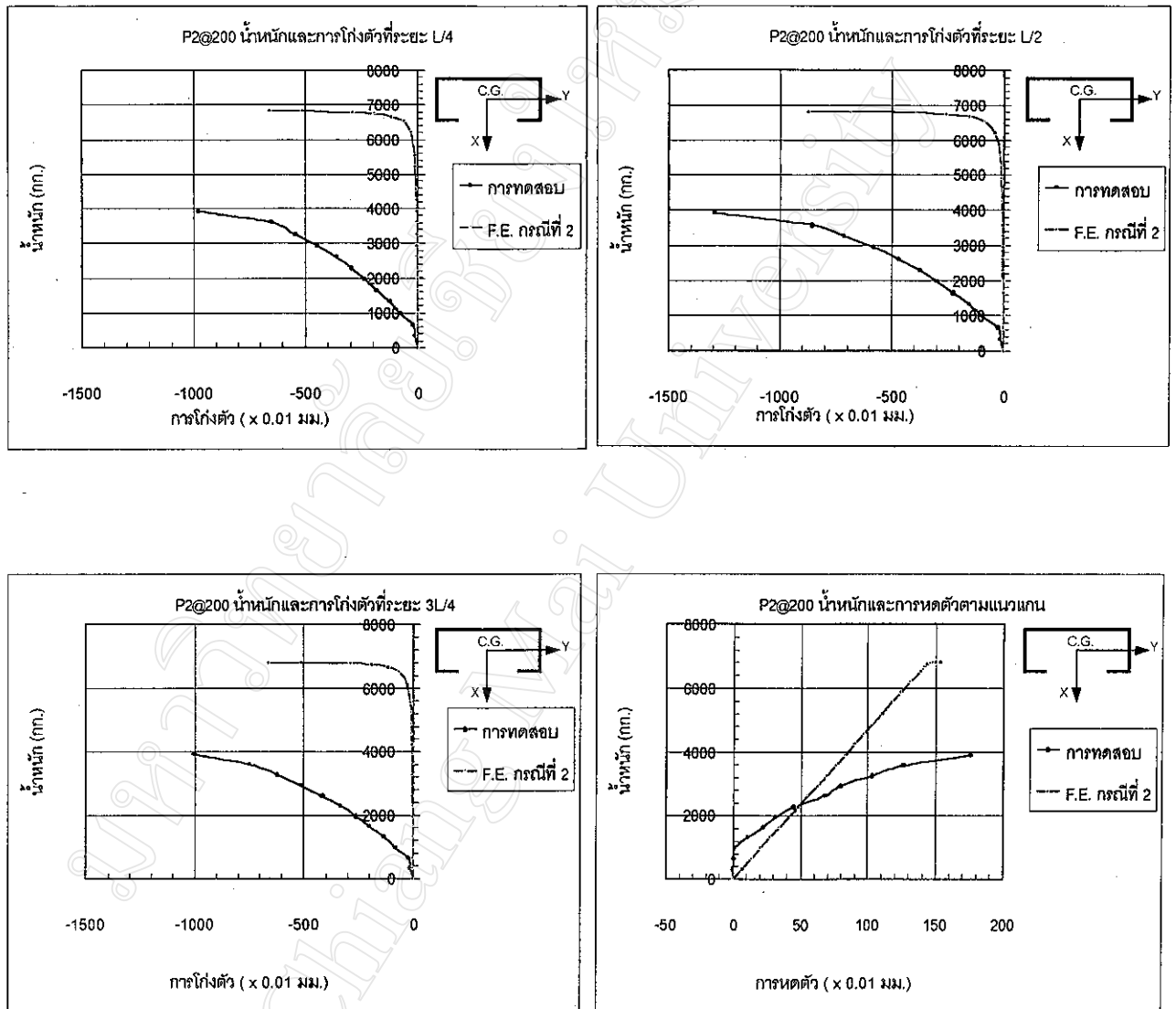


รูปที่ ข63. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2

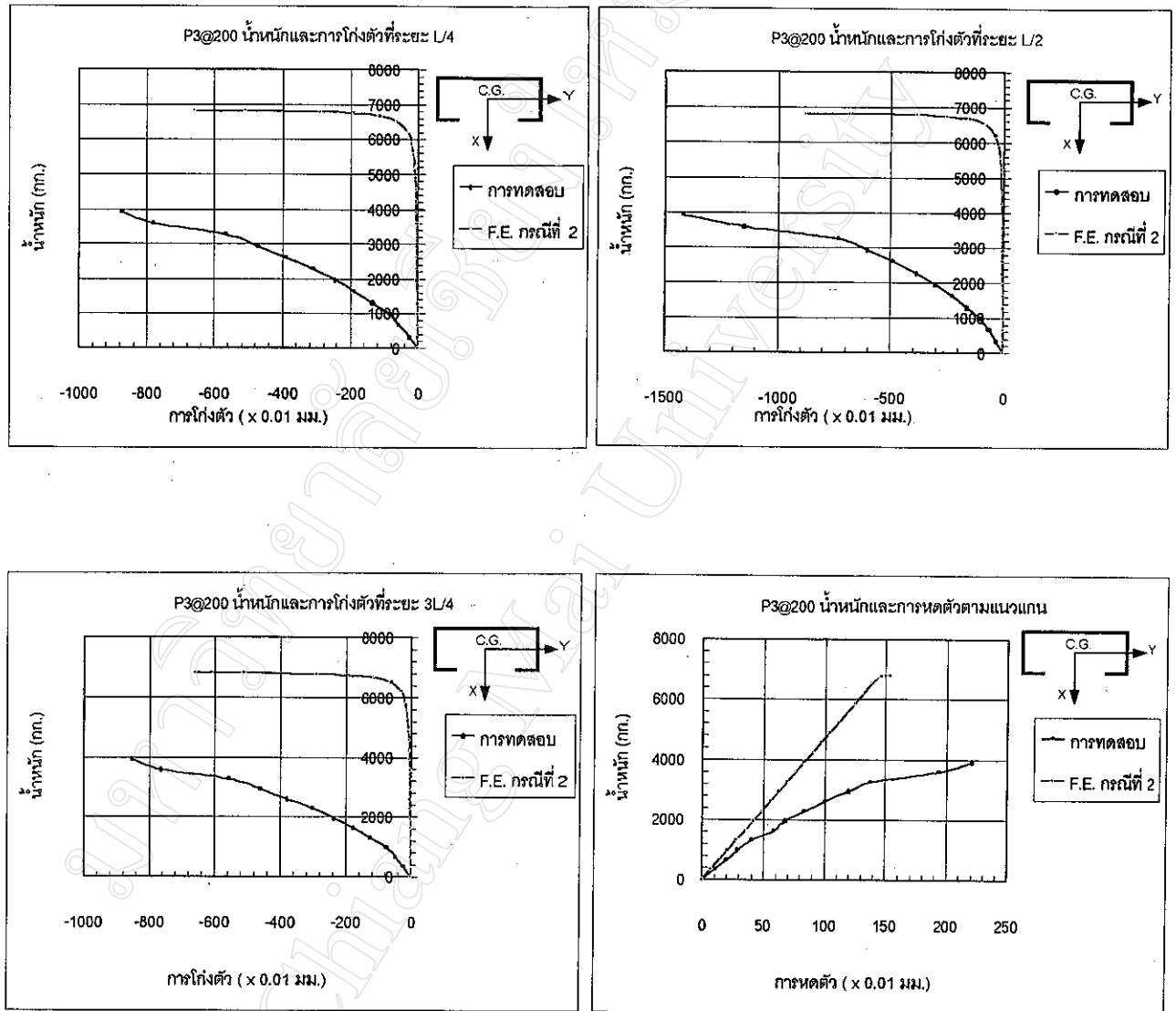
ของ F3@200



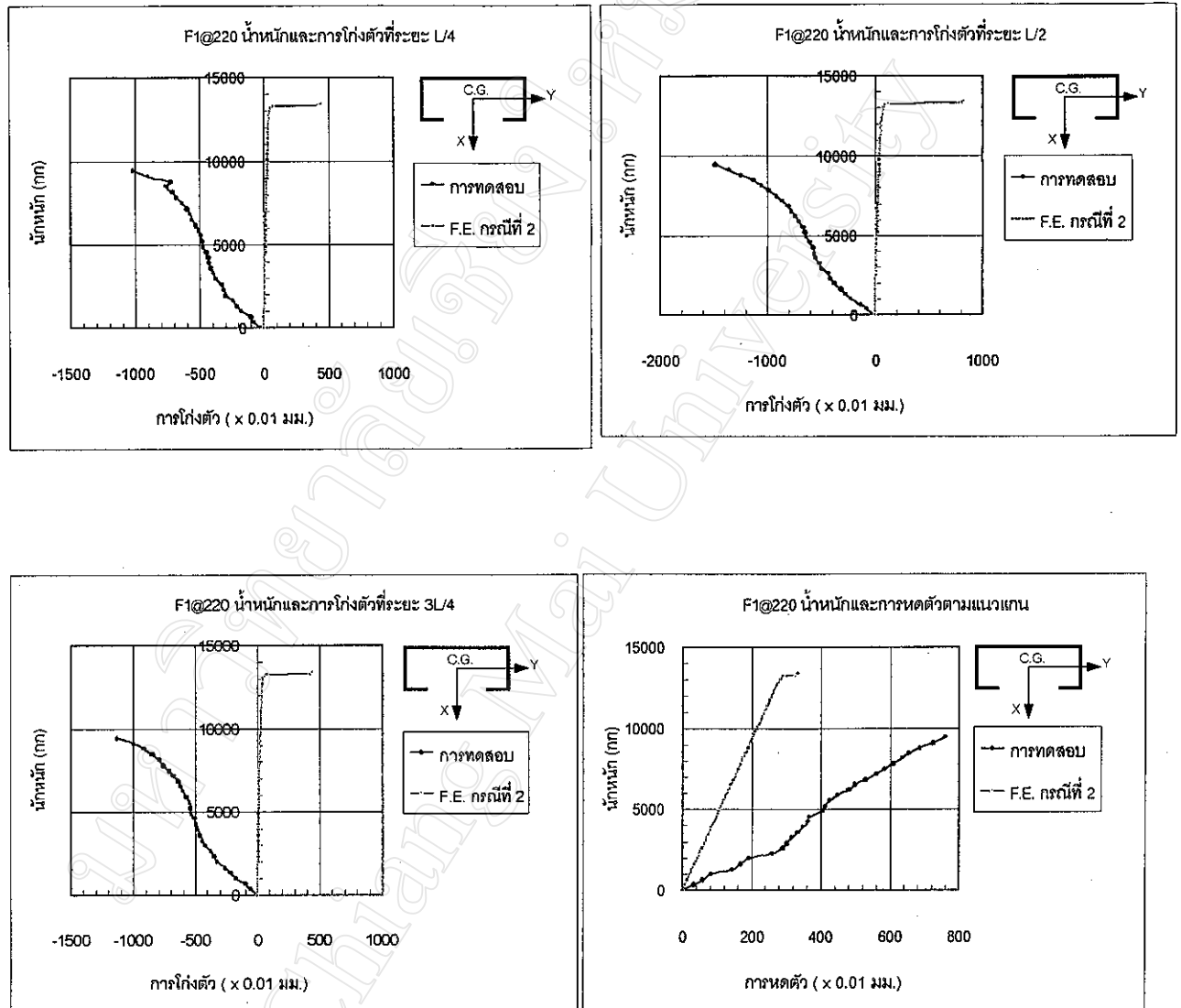
รูปที่ ข64.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P1@200



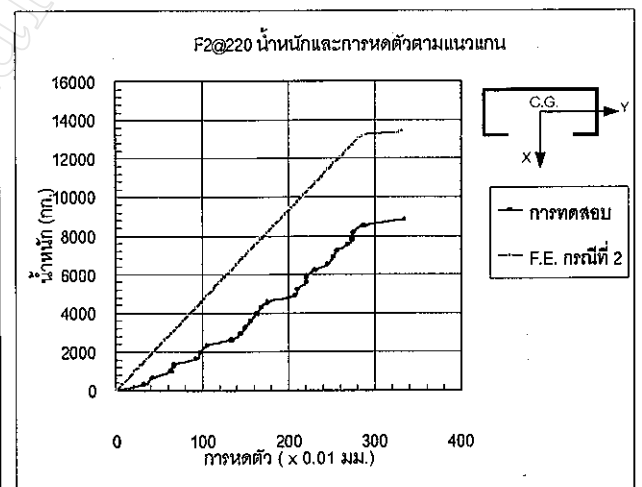
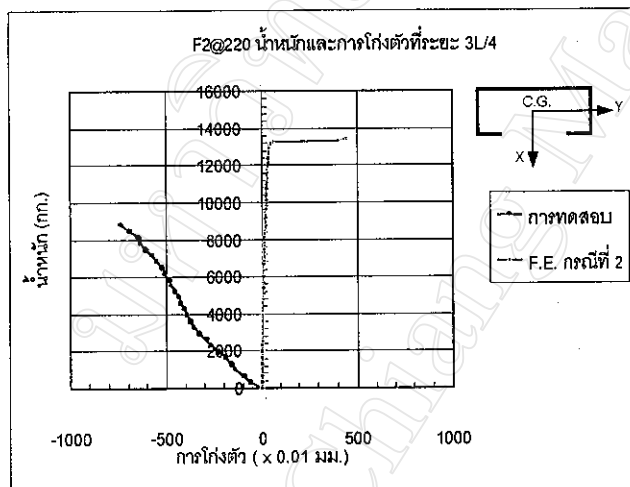
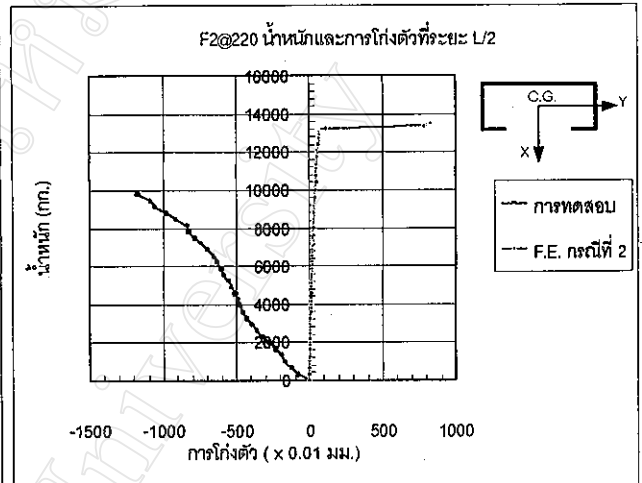
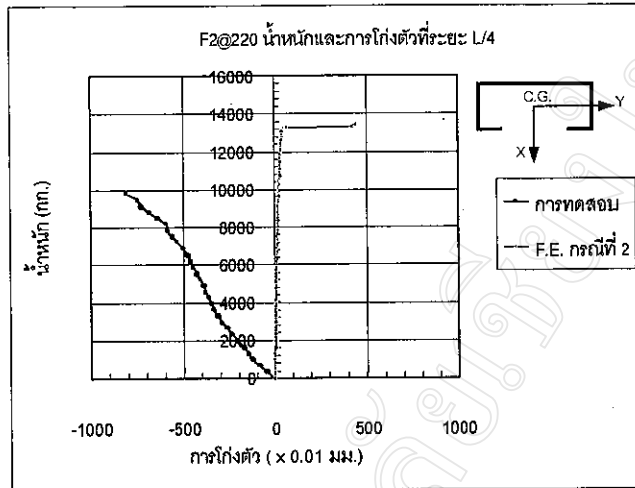
รูปที่ ข65.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P2@200



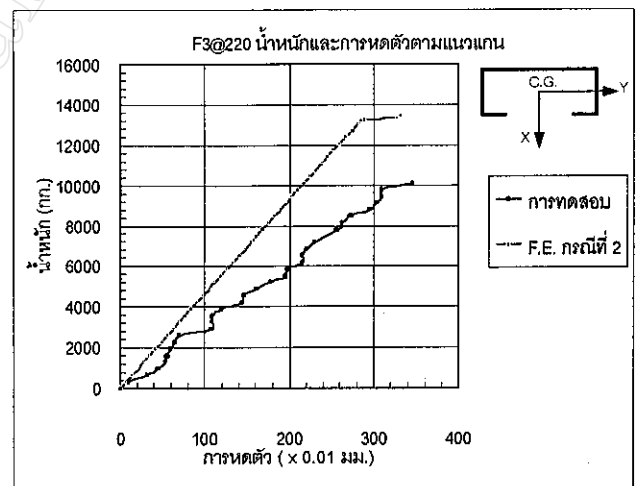
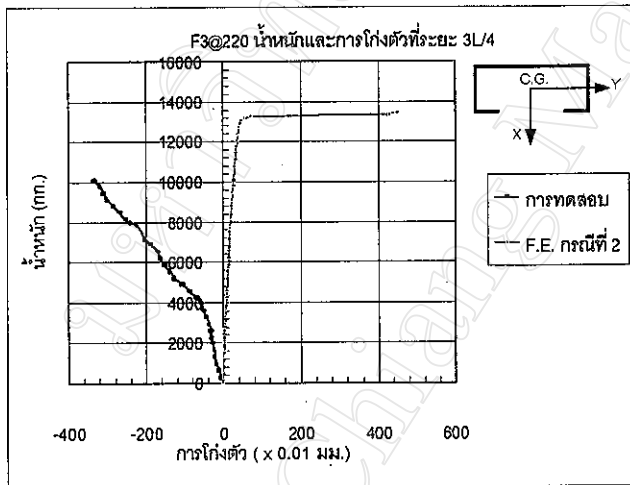
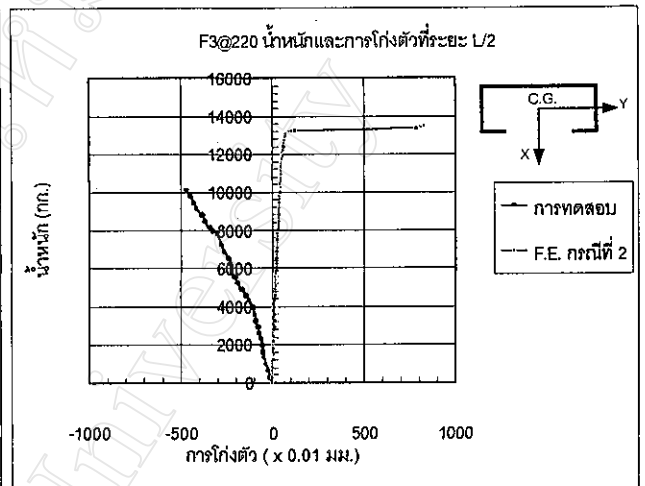
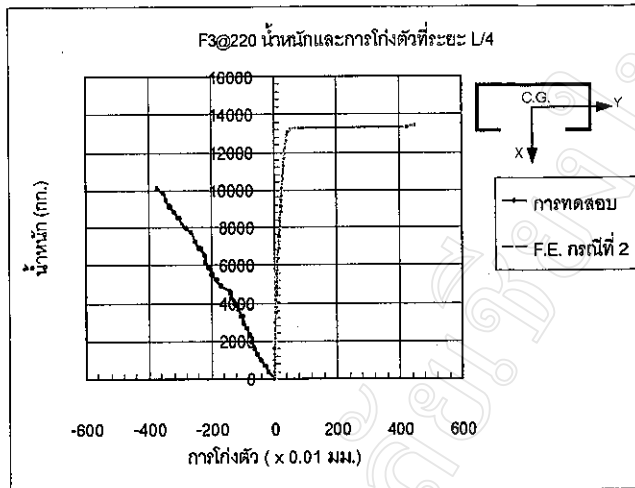
รูปที่ ข66.การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีนี้ที่ 2
ของ P3@200



รูปที่ ข67. การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ F1@220

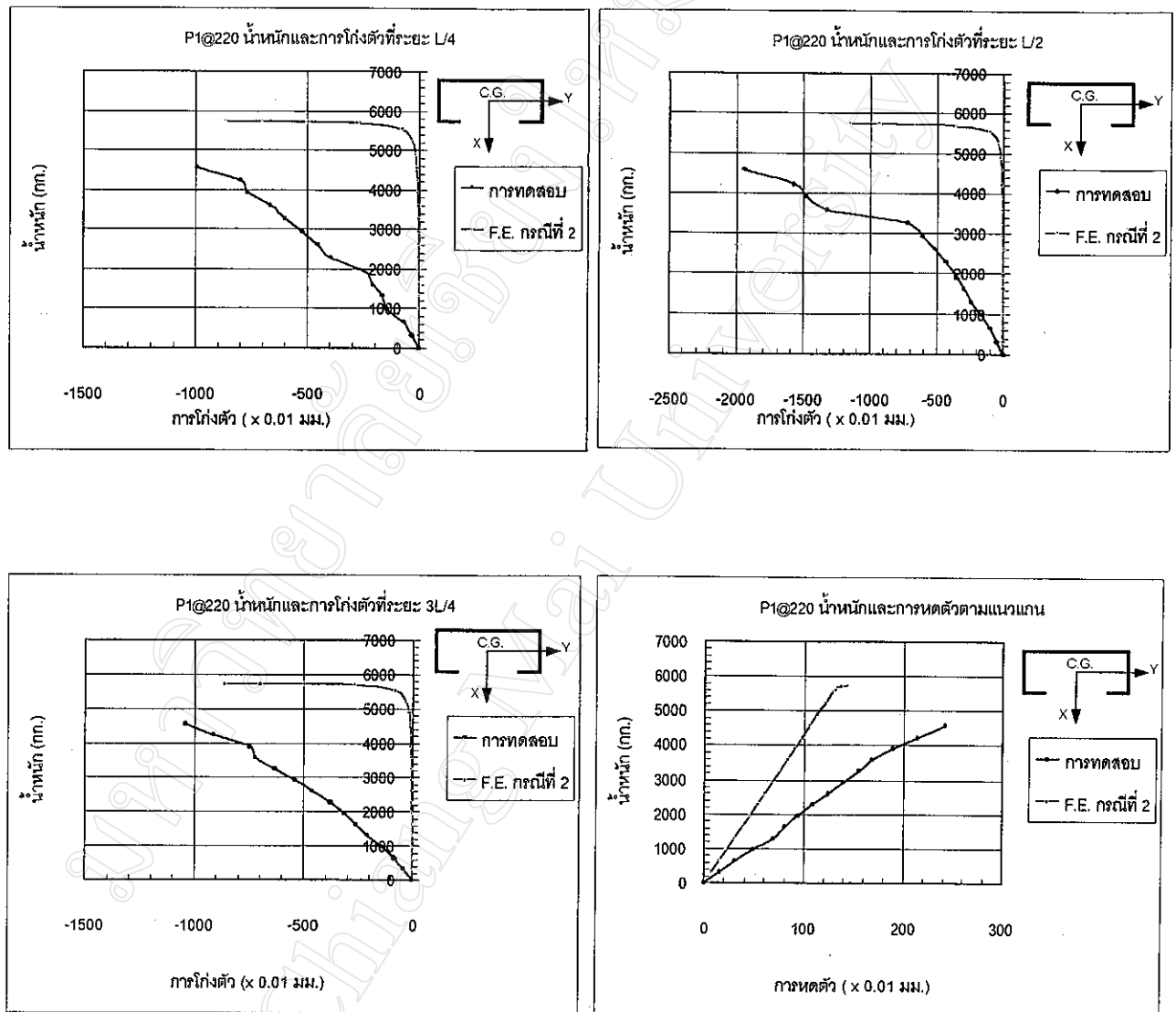


รูปที่ ข68. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ F2@220

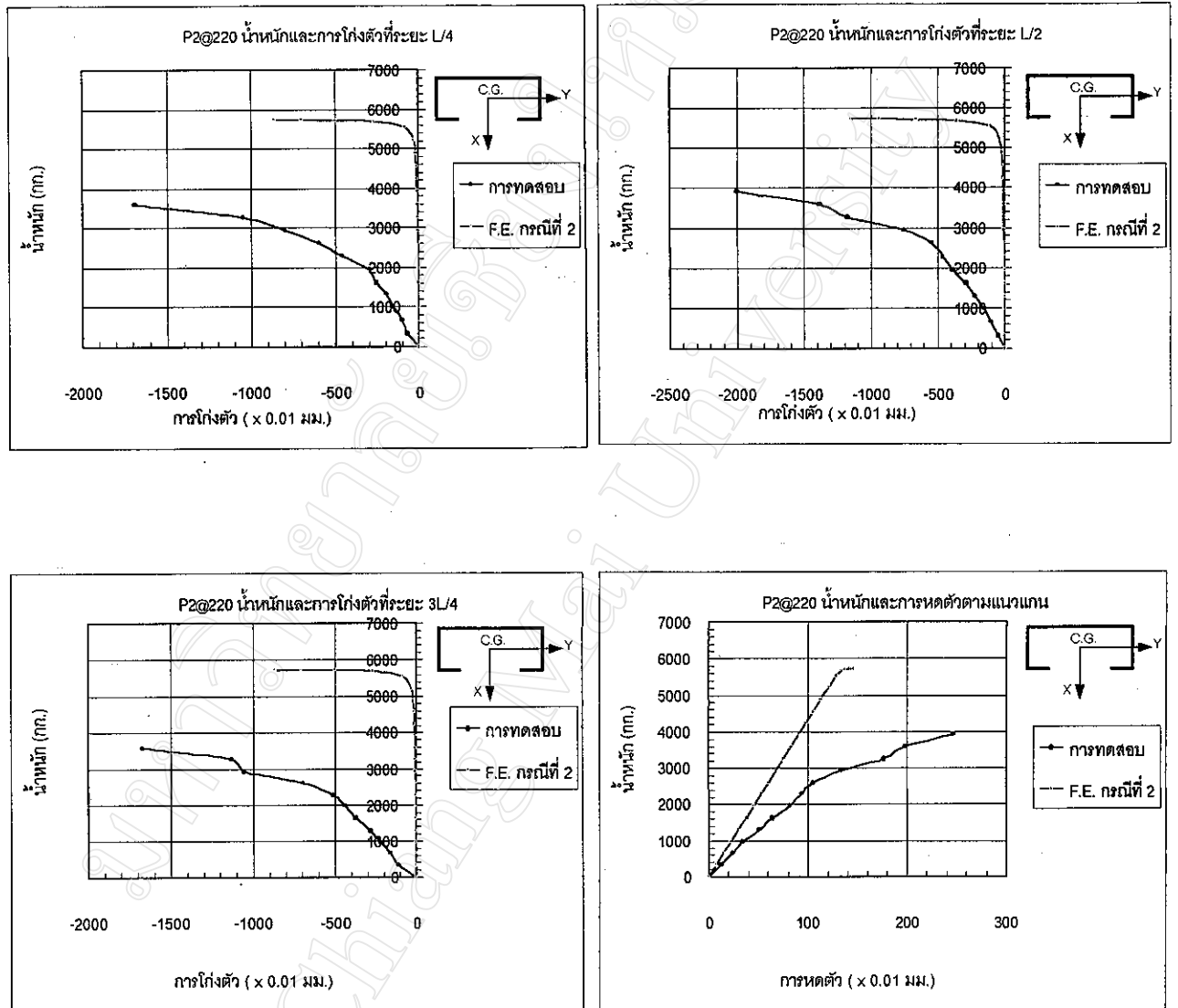


รูปที่ ข69. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2

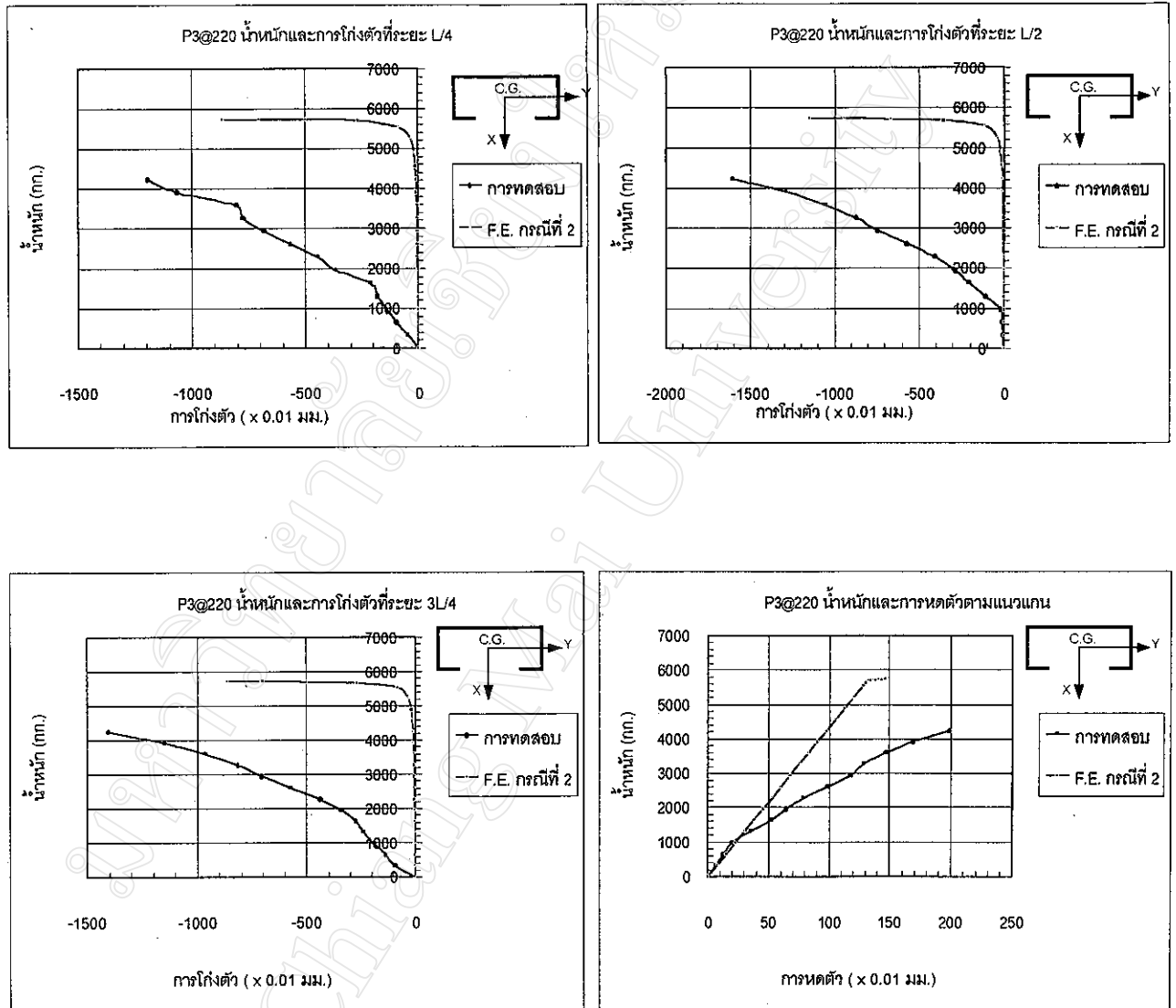
ของ F3@220



รูปที่ ข70. การโก่งตัวและระยะหดตามแนวนอนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กรณีที่ 2 ของ P1@220



รูปที่ ข71.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P2@220



รูปที่ ข72.การโก่งตัวและระยะหัดตามแนวแกนกับผลจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีที่ 2
ของ P3@220

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นายสุรศักดิ์ นิยมพานิชพัฒนา

วัน เดือน ปีเกิด

5 สิงหาคม 2519

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช

จ.อุบลราชธานี ปีการศึกษา 2536

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2540