เอกสารอ้างอิง

1. พรีเมียร์โพรดักส์ "เอกสารทางวิชาการคอนกรีตเสริมใยแก้ว" โดยบริษัท พรีเมียร์ โพรดักส์ จำกัด 201 ซอยไอสถสภา หัวหมาก กรุงเทพมหานคร.
2. ม.ล. ชัยนิมิตร นวรัตน "คอนกรีตประสานแรง G.R.C." กรุงเทพมหานคร: โดยผู้แต่ง 201 ซอยไอสถสภา หัวหมาก กรุงเทพมหานคร.
3. บุญโชติ ศรีมงคล, ไพศาล กาญธนาวัฒน์, วิวัฒน์ พงศาพาส และ ศักดิ์ชัย สกานุพงษ์ "พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมใยแก้วในการรับแรงตัด" วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี กรุงเทพมหานคร, 2521.
4. D.J. Hammant, Fibre Cements and Fibre Concretes, lst ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978.
5. Asahi Glass, "Design Criteria For G.R.C. Panels" G.R.C. Thechnical Bulletin, No. 4, Design and Installation of Asahi Glass, 1978.
6. R.Ferry, Glass Fibre Reinforce Cement, Pilkington Brothers Ltd. England, August 1978.
7. A.J.S. Repard, Sir John Baker, The Analysis of Engineering Structures, 4th ed., pp. 260-278.
8. Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon, Reinforced Concrete Design, 3rd ed., pp. 484-497, Harper & Row, 1917.
9. Temoshenko, and D.H. Young, Theory of Structure, pp. 419-442, New York: McGraw-Hill Book Co., 1945.
10. George Winter, Arthur H. Nelson,"Design of Concrete Structures, 8th ed., pp. 431-464, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1968.

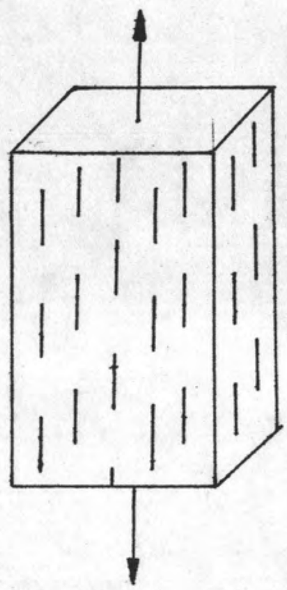
11. Allen H.G., "Stiffness and strength of two glass-figre reinforced cement laminates", Journal Composite Materials, 5, (April 1971): 194-207.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับปริมาณใยแก้วของคอนกรีตเสริมใยแก้ว

เมื่อคอนกรีตเสริมใยแก้วมีใยแก้วเรียงตัวในทิศทางเดียวและค่า Poisson's ratio = 0 ดังแสดงในรูปที่ 1 ผ



รูปที่ 1 ผ แสดงรูปคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ถูกแรงดึงกระทำ

สมมุติว่า ปริมาณคอนกรีตเสริมใยแก้ว $V_c = 1$

ถ้า A_f = หน้าตัดของใยแก้ว V_f = ปริมาณใยแก้ว

จะได้ว่า หน้าตัดเนื้อคอนกรีต $A_m = (A_c - A_f) = (1 - A_f)$

ปริมาณเนื้อคอนกรีต $V_m = (V_c - V_f) = (1 - V_f)$

และ $\frac{V_f}{V_c} = \frac{V_f}{1}$

เนื่องจากในช่วงอีลาสติกความเครียดเนื้อคอนกรีตจะเท่ากับความเครียดใยแก้ว

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

และ $F = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$

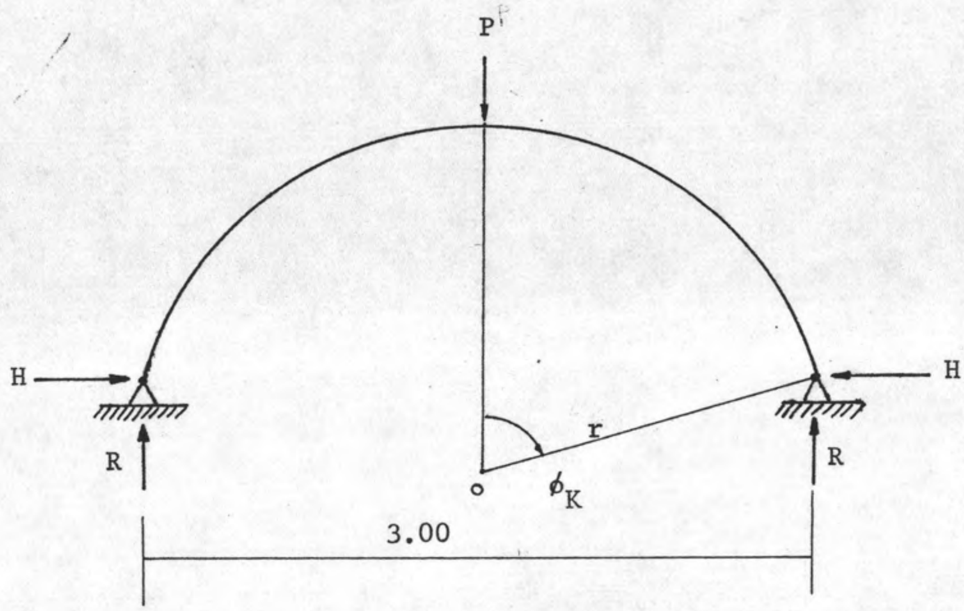
ดังนั้น $\sigma_c = \sigma_f A_f + \sigma_m (1-A_f)$

$= \sigma_f V_f + \sigma_m (1-V_f)$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างแสดงวิธีการคำนวณ แรงเฉือน แรงในแนวแกน โมเมนต์ หน่วยแรงวัดความเครียดและระยะโก่ง ของโครงสร้างหลังคา อาร์ชบางโค้งรูปทรงกระบอกทำด้วยคอนกรีตเสริมใยแก้ว เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำตรงกลางในแนวดิ่ง



รูปที่ 2 ผ แสดงรูปการวิเคราะห์โครงหลังคา

1. หาแรงเฉือน แรงในแนวแกนและโมเมนต์

พิจารณาลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2 ผ มีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ P ดังนั้นสามารถหาแรงปฏิกริยาที่ฐานรองรับได้ดังนี้

$$R = \frac{P}{2} \qquad \text{...........(1)}$$

จากสมการที่ (2.7) สามารถหาระยะการเคลื่อนตัว u_1 ได้

โดยกำหนดให้ $r = 188$ ซม.

$$\phi_K = 0.9237574$$

$$EI(U_1) = 2.\frac{P}{2}r^3 \left| (0.6366002) - \frac{0.3633998}{2} + 0.6028265 - (0.923757)(0.7978723) \right.$$

$$\left. (0.6028265) - 0.5 \right|$$

$$= 0.1134195\ Pr^3 \qquad \text{............(2)}$$

จากสมการที่ (2.9) สามารถหาระยะการเคลื่อนตัว U_2 ได้

$$EI(HU_2) = 2Hr^3 \left| \frac{0.9237574}{2} + \frac{0.9619571}{4} - 2(0.7978723)(0.6028265) \right.$$

$$\left. + (0.9237574)(0.3633998) \right|$$

$$= 0.1522082\ Hr^3 \qquad \text{............(3)}$$

เนื่องจากที่ฐานเป็นแบบโครงข้อหมุน ซึ่งไม่มีการเคลื่อนตัว

$$U_1 - HU_2 = 0 \qquad \text{............(4)}$$

$$H = \frac{U_1}{U_2} = \frac{0.1134195\ Pr^3}{0.1522082\ r^3}$$

$$H = 0.745160\ P \qquad \text{............(5)}$$

ดังนั้น เมื่อรู้ค่าแรงปฏิกริยาที่ฐานก็สามารถหาแรงเฉือน แรงในแนวแกนและโมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางตรงแนวน้ำหนักบรรทุกกระทำ โดยอาศัยสมการที่ (2.10), (2.11) และ (2.12)

$$V = \frac{P}{2} \qquad \text{............(6)}$$

$$T = 0.74516\ P \qquad \text{............(7)}$$

$$M = \frac{P}{2} f \left| (0.7878723-0) - 0.745160\ Pr(1-0.6028265) \right|$$

$$= 0.1029783\ Pr \qquad \text{............(8)}$$

2. หาหน่วยแรงดัดและความเครียด

การพิจารณาหาหน่วยแรงดัดและความเครียดถือว่า แรงเฉือนและแรงในแนวแกนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลที่เกิดจากโมเมนต์ ในการพิจารณาในช่วงอีลาสติกใช้ความสัมพันธ์

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$= \frac{6M}{bd^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(9)$$

และ $$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6M}{Ebd^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

เช่นกรณีตัวอย่าง R-1 ซึ่งมีความหนา 1.32 ซม. เมื่อมีน้ำหนักบรรทุก 40 กก. มากระทำจะหาค่าหน่วยแรงดัดและความเครียดได้ดังนี้

จากสมการ (8) $M = 0.1029783(40)(188) = 774.40$ กก-ซม.

จากสมการ (9) $\sigma = \frac{6(774.40)}{(60)(1.32)^2} = 44.44$ กก/ซม^2

จากสมการ (10) $\varepsilon = \frac{44.44}{23.2\times10^4} = 190\times10^{-6}$

3. หาระยะโก่งของโครงสร้างเนื่องจากมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ

การหาระยะโก่งตัวของโครงสร้างนี้ ใช้ทฤษฎี CASTIGLIANO'S THEOREM จากสมการที่ (2.10) สามารถที่จะหาโมเมนต์ที่จุดใด ๆ

$$M_\phi = Rr(\sin\phi_K - \sin\phi) - Hr(\cos\phi - \cos\phi_K)$$

$$= 0.5\,Pr(0.7978723 - \sin\phi) - 0.745191\,Pr(\cos\phi - 0.6028265)$$

$$= (0.8481378 - 0.5\sin\phi - 0.7451591\cos\phi)\,Pr$$

$$\frac{\partial M}{\partial P} = (0.8481378 - 0.5\sin\phi - 0.7451591\cos\phi)\,Pr \qquad \ldots\ldots\ldots(11)$$

โดย CASTIGLIANO'S THEOREM สามารถที่จะหาการเคลื่อนที่ตามแนวดิ่งตรงจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ

$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial P} = 2\int_{o}^{\phi_K} \frac{M\ \partial M/\partial P\ r d\phi}{EI} \qquad \text{..........(12)}$$

$$(EI)\Delta = 2\int_{o}^{\phi_K} Pr(0.8481378-0.5 \sin\phi-0.7451591 \cos\phi).r(0.8481378 -0.5 \sin\phi-0.7451541 \cos\phi).rd\phi$$

$$= 2\,Pr^3 \int_{o}^{\phi_K}(0.7193377-0.8481378 \sin\phi-1.2639952 \cos\phi +0.745159 \sin\phi \cos\phi+0.25 \sin^2\phi +0.5552621 \cos^2\phi)\ d\phi$$

$$= 2\,Pr^3 \Big|0.7193377\,\phi+0.8481378 \cos\phi-1.2639952 \sin\phi+0.745159 (\frac{1}{2}\sin^2\phi)+0.25(\frac{\phi}{2}-\frac{1}{4}\sin 2\phi)+0.555262 (\frac{\phi}{2}+\frac{1}{4}\sin 2\phi)\Big|_{o}^{\phi_K=0.9237574}$$

$$\Delta = 0.0031752\,\frac{Pr^3}{EI} \qquad \text{...........(13)}$$

ในกรณีตัวอย่างหนา 1.32 ซม.

จากสมการ (13) $\Delta = 0.0031752\,\dfrac{P(188)^3}{E\,\dfrac{(60)(1.32)^3}{12}}$

$$= 1834.648\,\frac{P}{E} \qquad \text{...........(14)}$$

เช่นถ้ามีน้ำหนักบรรทุก 50 กก. มากระทำ

$$\Delta = \frac{1834.648(50)}{23.2\text{x}10^4} = 0.394 \quad \text{ซม.}$$

ในกรณีตัวอย่างหนา 1.80 ซม.

จากสมการ (13) $\Delta = 0.0031752 \dfrac{P(188)^3}{E\dfrac{(60)(1.80)^3}{12}}$

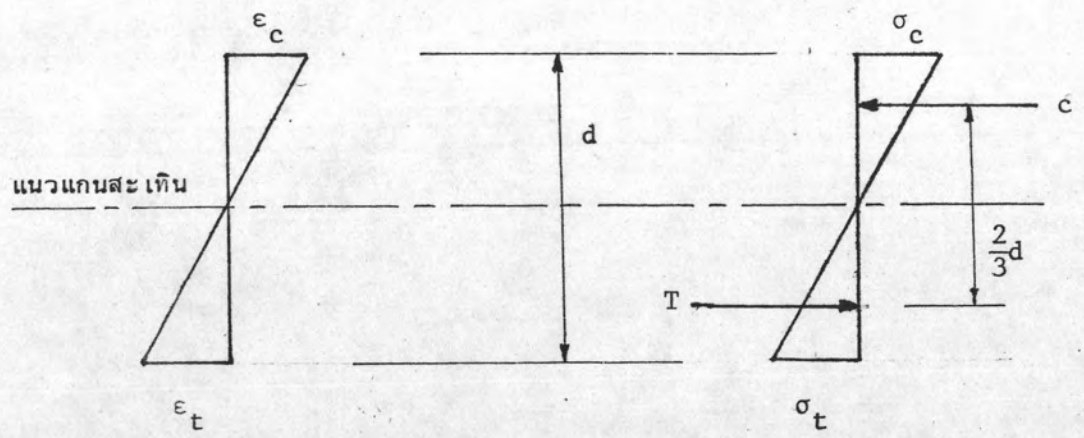
$$= 723.531 \frac{P}{E} \qquad \text{..........(15)}$$

เช่นถ้ามีน้ำหนักบรรทุก 100 กก. มากระทำ

$$\Delta = \frac{723.531(100)}{23.2x10^4} = 0.311 \text{ ซม.}$$

4. การหาระยะโก่งโดยอาศัยผลของการวัดความเครียดที่ผิว

กรณีที่คอนกรีตเสริมใยแก้วยังอยู่ในช่วงอีลาสติก จะได้ว่า ความเครียดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงดัด ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 3 ผ แสดงความเครียดและหน่วยแรงดัดในช่วงอีลาสติก
ในกรณีตัวอย่างหนา 1.32 ซม.

เมื่อมีน้ำหนักบรรทุก 50 กก. กระทำต่อแผ่นหลังคาจะวัดความเครียดที่ผิวบนและผิวล่างได้ประมาณ $317.5x10^{-6}$

นั่นคือ $\varepsilon_c = \varepsilon_t = 317.5\text{x}10^{-6}$

$$\sigma_c = \sigma_t = \varepsilon_{c,t}E$$

$$= (317.5\text{x}10^{-6})(23.2\text{x}10^{4}) = 73.66 \quad \text{กก./ซม.}^2$$

แรงกระทำส่วนบนและล่างของแนวแกนสะเทิน

$$C = T = \frac{1}{2} \text{x} \frac{d}{2} \text{x} \sigma_{c,t} \text{x } b$$

$$= \frac{1}{2} \text{x} \frac{1.32}{2} \text{x } 73.66\text{x}60 = 1458.5 \quad \text{กก.}$$

ดังนั้นโมเมนต์เนื่องจากความเครียดดังกล่าว

$$M = (C,T)\text{x} \frac{2d}{3}$$

$$= 1485.5 \text{x} \frac{2}{3} \text{x}1.32 = 1283.45 \quad \text{กก-ซม.}$$

จากโมเมนต์ที่หาได้อาศัยสมการที่ (๘) สามารถหาน้ำหนักบรรทุกได้

$$P = \frac{M}{0.1029783\ r}$$

$$= \frac{1283.45}{(0.1029783)(188)} = 66.58 \quad \text{กก.}$$

เนื่องจากในช่วงอีลาสติก ในการหาระยะโก่งของสมการ (๑๓) ค่าโมเมนต์อินเนอร์เชีย ใช้ค่า I_g

$$\Delta = \frac{0.0031752(66.58)(188)^3}{(23.2\text{x}10^4)\frac{(60)(1.32)^3}{12}}$$

$$= 0.524 \quad \text{ซม.}$$

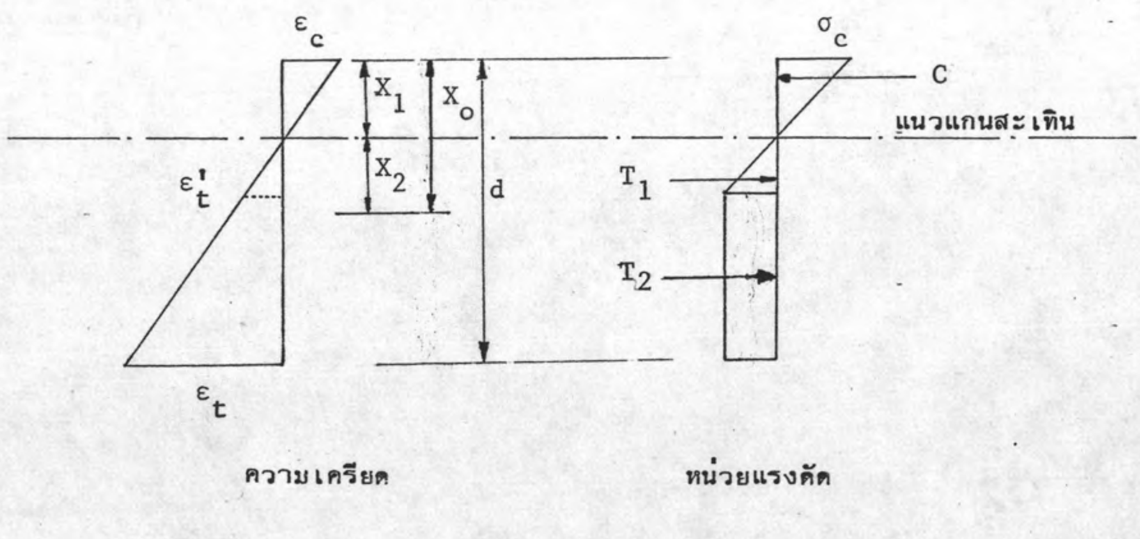
แต่จากการระยะโก่งเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก 56 กก. ตามสมการที่ (14) มีค่า

$$\Delta = 0.441$$

จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะโก่ง = $\frac{0.441-0.394}{0.441} \times 100 = 10.64\ \%$

หมายเหตุ เนื่องจากเมื่อน้ำหนักบรรทุก 56 กก. ความเครียดที่ผิวล่างเริ่มแตกร้าวพอดี จึงถือว่าน้ำหนักบรรทุกนี้เป็นจุดที่เปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกเป็นอินอีลาสติก (P_{cr}) และโมเมนต์ที่ได้ก็คือ M_{cr} นั่นเอง

กรณีที่คอนกรีตเสริมใยแก้วอยู่ในช่วงอินอีลาสติก คอนกรีตที่ผิวล่างจะแตกร้าวอยู่ในช่วงอินอีลวสติก ส่วนผิวบนยังอยู่ในช่วงอีลาสติก ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 ผ



รูปที่ 4 ผ แสดงความเครียดและหน่วยแรงดัดในช่วงอินอีลาสติก

คอนกรีตเสริมใยแก้วเริ่มแตกร้าวเมื่อคอนกรีต $(\varepsilon_t') \approx 317.5\text{x}10^{-6}$

ดังนั้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุก 100 กก. กระทำจะวัดค่าความเครียดได้ $\varepsilon_c = 650\text{x}10^{-6}$ และ $\varepsilon_t = 770\text{x}10^{-6}$

หน่วยแรงตัด $\sigma_c = \varepsilon_c E$

$$= (650\text{x}10^{-6})(23.2\text{x}10^{4}) = 150.80 \text{ กก/ซม}^2$$

$$\sigma_t' = \varepsilon_t' E$$

$$= (317.5\text{x}10^{-6})(23.2\text{x}10^{4}) = 73.66 \text{ กก/ซม}^2$$

จากความเครียดที่วัดได้สามารถหาระยะจากผิวด้านรับแรงดึงถึงแนวแกนสะเทิน ได้โดย

$$\frac{X_1}{1.32-X_1} = \frac{650\text{x}10^{-6}}{770\text{x}10^{-6}}$$

$$X_1 = 0.604 \text{ ซม.}$$

และระยะจากผิวด้านรับแรงดึงที่ยังไม่แตกร้าวถึงแนวแกนสะเทินจะมีค่า

$$\frac{X_2}{X_1} = \frac{317.5\text{x}10^{-6}}{650\text{x}10^{-6}}$$

$$X_2 = 0.295 \text{ ซม.}$$

แรงในส่วนรับแรงอัดที่เนื้อคอนกรีตเสริมใยแก้ว

$$C = \frac{1}{2}\sigma_c X_1 b$$

$$= \frac{1}{2}(150.8)(0.604)(60) = 2732.50 \text{ กก.}$$

แรงในส่วนรับแรงดึงที่เนื้อคอนกรีตเสริมใยแก้วรับ

$$T_1 = \frac{1}{2}\sigma_t' X_2 b$$

$$= \frac{1}{2}(73.66)(0.295)(60) = 651.89 \text{ กก.}$$

เนื่องจากสภาพสมดุลย์

$$C = T_1 + T_2$$

แรงในส่วนรับแรงดึงที่เสริมใยแก้วรับ

$$T_2 = C - T_1$$

$$= 2732.5 - 651.89 = 2080.61 \text{ กก.}$$

โมเมนต์ดัดภายใน $(M_{max}) = (2732.50)(\frac{2}{3} x0.604) + (651.89)(\frac{2}{3} x0.895)$

$+ (2080.61)(0.5055)$

$$= 2280.24 \text{ กก-ซม.}$$

โดยที่ $M_{cr} = 1283.45$ กก-ซม.

$$I_g = \frac{60(1.32)^3}{12} = 11.50 \text{ ซม}^4$$

$$I_{cr} = \frac{60(0.604+0.295}{12} = 3.63 \text{ ซม}^4$$

จาก $I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 \left| I_g + 1-\left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 \right| I_{cr}.$

$$= \left(\frac{1283.45}{2280.24}\right)^3 (11.5)+\left|1-\left(\frac{1283.45}{2280.24}\right)^3\right|(3.63)$$

$$= 5.04 \text{ ซม}^4.$$

เมื่อแทนค่า P และ I_e ในสมการที่ (13) จะได้ระยะโก่งตัว

$$\Delta = \frac{0.0031752(100)(188)^3}{(23.2\text{x}10^4)(5.04)} = 1.79$$

5. การระยะโก่งโดยอาศัยทฤษฎี

จากรูปที่ 4 ผ จะได้ว่า

$$\frac{x_1}{x_o-x_1} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma_c E}{\sigma_o E}$$

$$\sigma_c = \sigma_o \frac{x_1}{x_o-x_1} \qquad ....(16)$$

และแรงปฏิกริยาภายในที่เกิดขึ้นมีดังนี้

$$C = \frac{1}{2}\sigma_c x_1 b = \frac{1}{2}\sigma_o\left(\frac{x_1^2}{x_o-x_1}\right)b \qquad ....(17)$$

$$T_1 = \frac{1}{2}\sigma_o(x_o-x_1)b \qquad ....(18)$$

$$T_2 = \sigma_o(d-x_o)b \qquad ....(19)$$

โดยที่ $C = T_1+T_2$

$$\frac{1}{2}\sigma_o\left(\frac{x_1^2}{x_o-x_1}\right)b = \frac{1}{2}\sigma_o(x_o-x_1)b+\sigma_o(d-x_o)b$$

จะได้ $x_1 = \frac{2dx_o - x_o^2}{2d}$ ....(21)

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้หน้าตัดของตัวอย่าง R-1 เกิดการแตกร้าวมีค่า x_o = 0.82 ซม.

จากสมการ (21) จะได้ $x_1 = \frac{2(1.32)(0.82)-0.82)^2}{2(1.32)}$ = 0.565 ซม.

แทนค่า และ ลงในสมการ (17),(18) และ (19) จะได้

$$c = \frac{1}{2}(317.5x10^{-6})(23.2x10^4)\{\frac{(0.565)^2}{0.82x0.565}\} 60 = 2766.36$$

$$T_1 = \frac{1}{2}(317.5x10^{-6})(23.2x10^4)(0.82-0.565)\ 60 = 563.30$$

$$T_2 = (317.5x10^{-6})(23.2x10^4)(1.32-0.82)\quad 60 = 2209.80$$

$$M = \frac{2}{3}(2766.36)(0.565)+\frac{2}{3}(563.50)(0.82-0.565)+2209.8(0.505)$$

$$= 2254.15 \text{ กก-ซม.}$$

แทนค่า M ลงในสมการที่ (8) จะได้

$$P = \frac{2254.15}{0.1029783(188)} = 116.43$$

$$I_e = (\frac{1283.45}{2254.15})^3(11.50)+|1-(\frac{1.283.45}{2254.15})^3|\frac{(60)(0.82)^3}{12}$$

$$= 4.39 \text{ ซม}^3.$$

แทนค่า P และ I_e ลงในสมการที่ (13) จะได้ระยะโก่งตัว

$$\Delta = \frac{0.0031752(116.43)(188)^3}{(23.2x10^4)(4.37)} = 2.420$$

สำหรับการวิเคราะห์หาระยะโก่งโดยสมมุติว่าผลเนื่องจากแรงในแนวแกนมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลเนื่องจากแรงตัดดังสมการที่ (13) ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับระยะโก่งที่หาจากโปรแกรมของ FEAP ซึ่งพิจารณาแรงในแนวแกนด้วย ปรากฏว่าระยะโก่งตัวที่ได้จากโปรแกรม FEAP น้อยกว่า 3.19 %

ประวัติการศึกษา

นายศักดิ์ชัย สกานุพงษ์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี ปีการศึกษา 2521