

รายการอ้างอิง

- 1.Ghali,A.,Nevile,M." Structural Analysis:A Unified classical and Matrix Approach ", Chapman and Hall,London Newyork, 1978,pp.485-494.
- 2.Marti,P." Design of Concrete Slabs for Transverse Shear ", ACI Structural Journal, V.87, No.2, March-April 1990, pp.180-190.
- 3.Chana,P.S." Punching Shear in Concrete Slabs ",The Structural Engineer, Vol.69, No.15/6 ,August 1991, pp.282-285.
- 4.ASCE-ACI Task Committee 426," The Shear Strength of Reinforce Concrete Members-Slabs ",Proceeding ,ASCE,V.100,ST8,Aug.1974,pp.1543-1591.
- 5.Regan,P.E." Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Subjected to Shear Forced ", Proceeding , Institution of Civil Engineers, Vol.50, Dec. 1971, pp.337-364.
- 6.Shehata,A.E.M.I,Regan,P.E." Punching in R.C.Slabs ",Journal of Structural Engineering,Vol.115,No.7,July 1989,pp.1726-1740.
- 7.Broms,C.E"Punching of Flat Plates-A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size effect. ",ACI Structural Journal,V.87,No3,May-June 1990, pp.292-304.
- 8.MacGregor,J.G." Reinforced Concrete :Mechanics and Design ",Prentice Hall Englewood Cliffs,New Jersey,1988,pp.54-57.
- 9.Hawkins,.N.M." Shear Strength of Slabs with Shear Reinforcement ", Shear in Reinforced Concrete ", Vol.2, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp.785-815.
- 10.H.P.Andra,H.P.,Molenstra,N." Increased Punching Shear Resistance of Flat Slabs with Stud Rails ",DEHA Report.,22pp.
- 11.Hawkins,N.M.,Criswell,M.E.,Roll,F." , Shear Strength of Slabs without Shear Reinforcement ", Shear in Reinforced Concrete, Vol.2, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp.677-720.
- 12.Hawkins,.N.M.,Corley,W.G." Moment Transfer to columns in Slabs with Shearhead Reinforcement ",Shear in Reinforced Concrete ",Vol.2,SP-42, American Concrete Institute,Detroit,1974,pp.785-815.
- 13.Ghali,A.,Sargains,M.A.,Huizer,A." Vertical Prestressing of Flat Plates Columns ", Shear in Reinforceconcrete,SP-42,Vol2,American Concrete Institute,1974,pp.905-920.

14. Langohr, P. H., Ghali, A., Walter H., "Special Shear Reinforcement for Flat Slabs," ACI Journal, Proceedings, V.73 NO.3, Mar. 1976, pp 141-146.
15. Seible, F.P. H., Ghali, A., Walter H., "Preassembled Shear Reinforcing Units for Flat Plates," ACI Journal, Proceedings, V.77, NO.1, Jan-Feb. 1980, pp 28-35.
16. Van der Voet, A.F.; Dilger, W.H.; and Ghali, A., "Concrete Flat Plates with Well-Anchored Shear Reinforcement Elements," Canadian Journal of Civil Engineering (Ottawa), V.9 No.1, May. 1982, pp.107-114
17. Dilger, Walter H., and Ghali, Amin, "Shear Reinforcement for Concrete Slabs," Proceeding, ASCE, V.107, ST12, Dec. 1981, pp.2403-2420.
18. Abdel-Salam Mokhtar, Ghali, A., and Dilger, W.H. "Stud Shear Reinforcement for Flat Plates," ACI Journal, Proceeding, V.82, No5, Sep.-Oct. 1985, pp.676-683.
19. Elgabry, A.A., Ghali, A., "Design of Stud-Shear Reinforcement for Slabs," ACI Structural Journal, V.87, No.3, May-June 1990, pp.350-361.
20. ACI Committee Reports, "Abstract of: Shear Reinforcement for Slabs," ACI Structural Journal, V.89, No.5, September-October 1992, pp.587-589
21. Mowrer, R.D., Vanderbuilt, M.D. "Shear Strength of Lightweight Aggregate Reinforced Concrete Flat plates," Journal of American Concrete Institute., V.64, November 1967, pp.722-729.
22. Eelsner, R.C., Hognestad, D. "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs", Journal American Concrete Institute., V.28, No.1, 1956, pp.29-58
23. Regan, P.E. "Design Guide for the use of RISS (DEHA) 'Stud Rails' and 'Double-Headed Stud rails Reinforced Concrete Slabs'", August 1993, 25pp.
24. ACI 318-95 Building Code Requirement for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995.
25. Broms, C.E. "Shear Reinforcement for Deflection Ductility of Flat Plates" ACI Structural Journal, V.87, No.6, November-December 1990, pp.696-705.
26. Ghali, A. "An Efficient Solution to Punching of Slabs" Concrete International, V.11, No.6, June, 1989, pp.50-54.

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

| ตัวอย่างที่ | f'_c (ksc) | f_y (ksc) | f_{ys} (ksc) |
|-------------|--------------|-------------|----------------|
| S1 | 360 | 4139 | - |
| S2 | 360 | 4139 | 4100 |
| S3 | 360 | 4139 | 4100 |

f_y = กำลังแรงดึงที่จุดคานาของเหล็กเสริมรับโมเมนต์คัต

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

f_{ys} = กำลังแรงดึงที่จุดคานาของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ

| ตัวอย่างที่ | ขนาดเสา (ซม. x ซม.) | h (ซม.) | d (ซม.) | ρ | ขนาดของช่องเปิด (ซม. x ซม.) |
|-------------|------------------------|------------|------------|--------|--------------------------------|
| S1 | 25X25 | 18 | 13.5 | 0.02 | 15X15 |
| S2 | 25X25 | 18 | 13.5 | 0.02 | 15X15 |
| S3 | 25X25 | 18 | 13.5 | 0.02 | 15X15 |

h = ความหนาของแผ่นพื้นของตัวอย่างทดสอบ

d = ความลึกประสิทธิภาพของตัวอย่างทดสอบ

ρ = อัตราส่วนของเหล็กเสริมรับโมเมนต์คัตในแผ่นพื้นของตัวอย่าง
ทดสอบ

ตารางที่ 3 รายละเอียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

| ตัวอย่างที่ | \varnothing (ซม.) | จำนวนหมุด | S_0 (ซม.) | S (ซม.) | การจัดวาง |
|-------------|---------------------|-----------|-------------|---------|----------------------|
| S1 | - | - | - | - | - |
| S2 | 1.27 | 32 | 6 | 6 | วางเป็นแถบตามหน้าเสา |
| S3 | 1.27 | 32 | 6 | 6 | วางทำมุม 45 องศา |

\varnothing = เส้นผ่าศูนย์กลางของหมุดรับแรงเฉือน

S_0 = ระยะห่างระหว่างหมุดตัวแรกกับขอบเสา

S = ระยะห่างระหว่างหมุดในแถบเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ

| ตัวอย่างที่ | V_{cr} (kgf) | V_{crr} (kgf) | V_{crl} (kgf) | V_u (kgf) | δ_u (mm.) | รูปแบบการวิบัติ |
|-------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|-----------------|
| S1 | 13000 | >13000 | 18000 | 58000 | 6.621 | การเฉือนทะลุ |
| S2 | 12000 | >12000 | 26000 | 62000 | 6.8 | การเฉือนทะลุ |
| S3 | 13000 | >13000 | 27000 | 66000 | 8.817 | การเฉือนทะลุ |

V_{cr} = แรงกดที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวในแนวสัณฐาน

V_{crr} = แรงกดที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวในแนวรัศมี

V_{crl} = แรงกดที่ทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวในแนวทะแยง

V_u = แรงกดประลัย

δ_u = การแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางแผ่นพื้นที่แรงกดประลัย

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบแรงกดประลัยกับวิธีการคำนวณตามหัวข้อ 11.12.3.2 ของ ACI 318-95

| ตัวอย่าง | V_{test} (kgf) | V_{ACI} (kgf) | V_{ACI1} (kgf) | V_{ACI2} (kgf) | V_{ACI3} (kgf) | V_{calc} (kgf) | $\frac{V_{test}}{V_{calc}}$ | $\frac{V_{test}}{bd\sqrt{f'_c}}$ |
|----------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| S1 | 58000 | 29269 | - | - | 53385.89 | 29269 | 1.980 | 2.100 |
| S2 | 62150 | 29269 | 31369.8 | 111510.11 | 53385.89 | 31369.82 | 1.976 | 2.245 |
| S3 | 66000 | 29269 | 32787.2 | 111510.11 | 53385.89 | 32787.25 | 1.891 | 2.290 |

V_{ACI} = กำลังแรงเฉือนประลัยของแผ่นพื้น โดยไม่มีเหล็กเสริมรับแรง
เฉือนคำนวณตามสมการ ก.9.1 ถึง ก.9.3

b_o = เส้นรอบรูปประลัยที่ระยะ $d/2$

V_{calc} = ค่าที่น้อยที่สุดระหว่าง V_{ACI1} , V_{ACI2} และ V_{ACI3}

V_{ACI1} = กำลังแรงเฉือนประลัยของแผ่นพื้นและหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่
ระยะ $d/2$ จากมุมรับแรงเฉือนตัวนอกสุด $= 0.53\sqrt{f'_c} b_o d$

V_{ACI2} = กำลังแรงเฉือนประลัยของแผ่นพื้นคำนวณตามสมการ ก.4

$V_{ACI3} = 1.591\sqrt{f'_c} b_o d$

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบแรงกดประลัยกับวิธีการคำนวณตาม A.Ghali และคณะ

| ตัวอย่าง | V_{test} (kgf) | V_{AG} (kgf) | V_{AG1} (kgf) | V_{AG2} (kgf) | V_{AG3} (kgf) | V_{calc} (kgf) | $\frac{V_{test}}{V_{calc}}$ | $\frac{V_{test}}{b_0 d \sqrt{f'_c}}$ |
|----------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| S1 | 58000 | 29269.1 | - | - | 71170.00 | 29269.12 | 1.980 | 2.100 |
| S2 | 62150 | 29269.1 | 49377.4 | 121070.2 | 71170.00 | 49377.4 | 1.259 | 2.245 |
| S3 | 66000 | 29269.1 | 51603.3 | 121070.2 | 71170.00 | 51603.33 | 1.279 | 2.290 |

V_{AG} =กำลังแรงเฉือนประลัยของแผ่นพื้น โดยไม่มีเหล็กเสริมรับแรง
เฉือนคำนวณตามสมการ ก.3

V_{calc} = ค่าที่น้อยที่สุดระหว่าง V_{AG1} , V_{AG2} และ V_{AG3}

b_0 =เส้นรอบรูปประลัยที่ระยะ $d/2$

V_{AG1} =กำลังแรงเฉือนประลัยคำนวณตามสมการ 4.2 และหน้าตัด
วิกฤตเกิดขึ้นที่ระยะ $d/2$ จากมุมรับแรงเฉือนตัวนอกสุด

V_{AG2} =กำลังแรงเฉือนประลัยคำนวณตามสมการ ก.4

$$V_{AG3} = 2.121 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

ตารางที่ 7 ตัวอย่าง S2 การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนในแต่ละหน้าตัดที่พิจารณาตามสมการของ A.Ghali และคณะ

| Section ⁺ | $V_{s,test}$ (kgf) | $V_{c,test}$ (kgf) | $V_{c,AG}^*$ (kgf) | $V_{c,AG}^{**}$ (kgf) | $\frac{V_{c,test}}{V_{c,AG}^*}$ | $\frac{V_{c,test}}{V_{c,AG}^{**}}$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 8406.708 | 53743.292 | 23455.378 | 28138.961 | 2.291 | 1.910 |
| 2 | 9394.104 | 52755.896 | 30091.406 | 36443.154 | 1.753 | 1.448 |
| 3 | 9680.172 | 52469.828 | 34495.503 | 42294.993 | 1.521 | 1.241 |
| 4 | 2980.644 | 59169.356 | 38236.377 | 46934.066 | 1.547 | 1.261 |
| 5 | - | 62150.00 | 49377.372 | 59937.480 | 1.204 | 1.034 |

*คิดผลของช่องเปิดตาม ACI318-95

**ไม่คิดผลของช่องเปิดตาม ACI318-95

⁺รายละเอียดของหน้าตัดรูปที่ 36

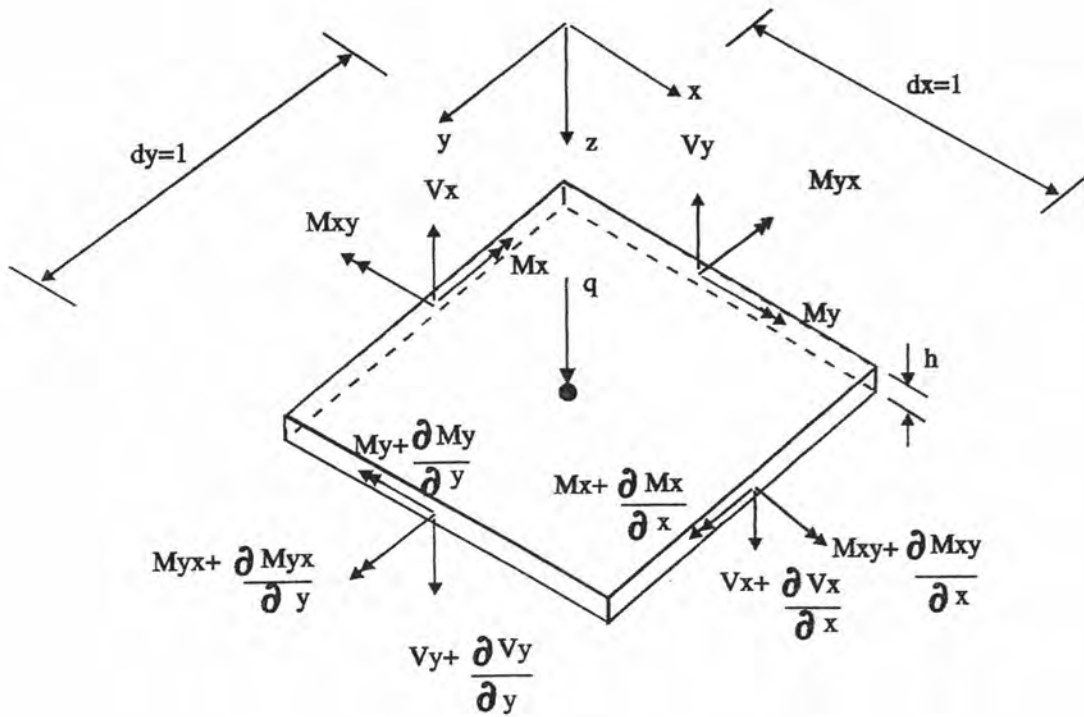
ตารางที่ 8 ตัวอย่าง S3 การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนในแต่ละหน้าตัดที่พิจารณาตามสมการของ A.Ghali และคณะ

| Section ⁺ | $V_{s,test}$ (kgf) | $V_{c,test}$ (kgf) | $V_{c,AG}^*$ (kgf) | $V_{c,AG}^{**}$ (kgf) | $\frac{V_{c,test}}{V_{c,AG}^*}$ | $\frac{V_{c,test}}{V_{c,AG}^{**}}$ |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 8443.620 | 57556.380 | 24988.336 | 29671.918 | 2.300 | 1.940 |
| 2 | 10612.20 | 55387.800 | 32770.578 | 38787.588 | 1.690 | 1.428 |
| 3 | 8092.956 | 57907.044 | 36637.763 | 43293.884 | 1.581 | 1.338 |
| 4 | 2943.732 | 63056.268 | 39912.738 | 47117.400 | 1.580 | 1.338 |
| 5 | - | 66000.00 | 51603.327 | 61436.240 | 1.279 | 1.074 |

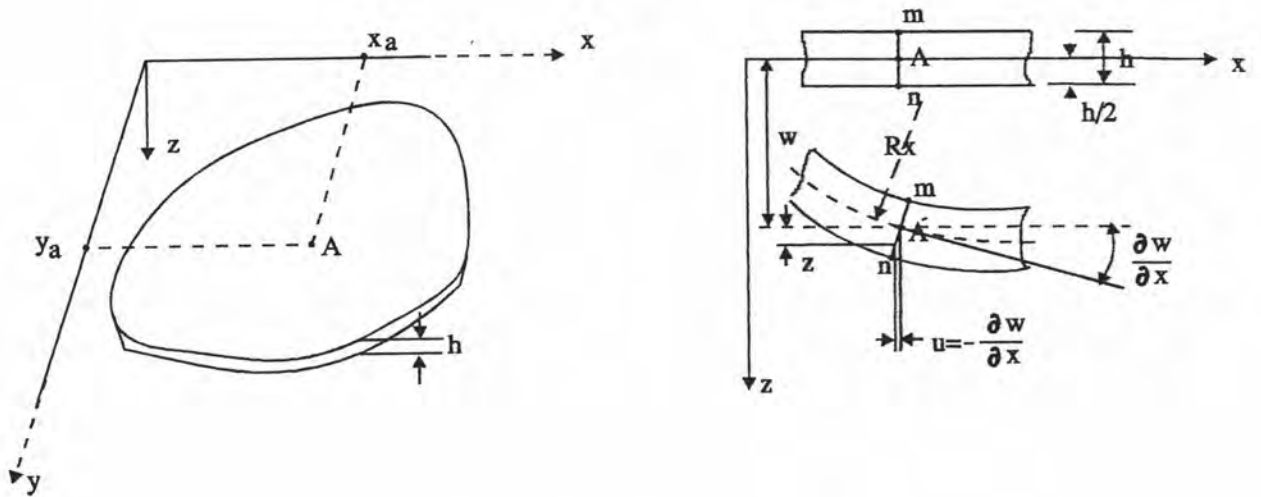
*คิดผลของช่องเปิดตาม ACI318-95

**ไม่คิดผลของช่องเปิดตาม ACI318-95

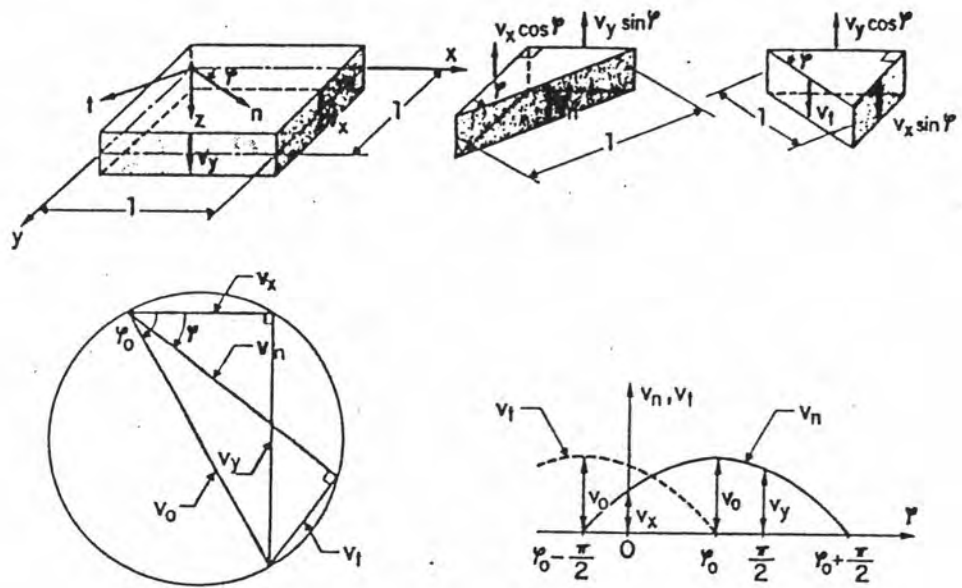
⁺รายละเอียดของหน้าตัดรูปที่ 36



รูปที่ 1 แรงกระทำต่อชิ้นส่วนเล็กๆในแผ่นพื้น

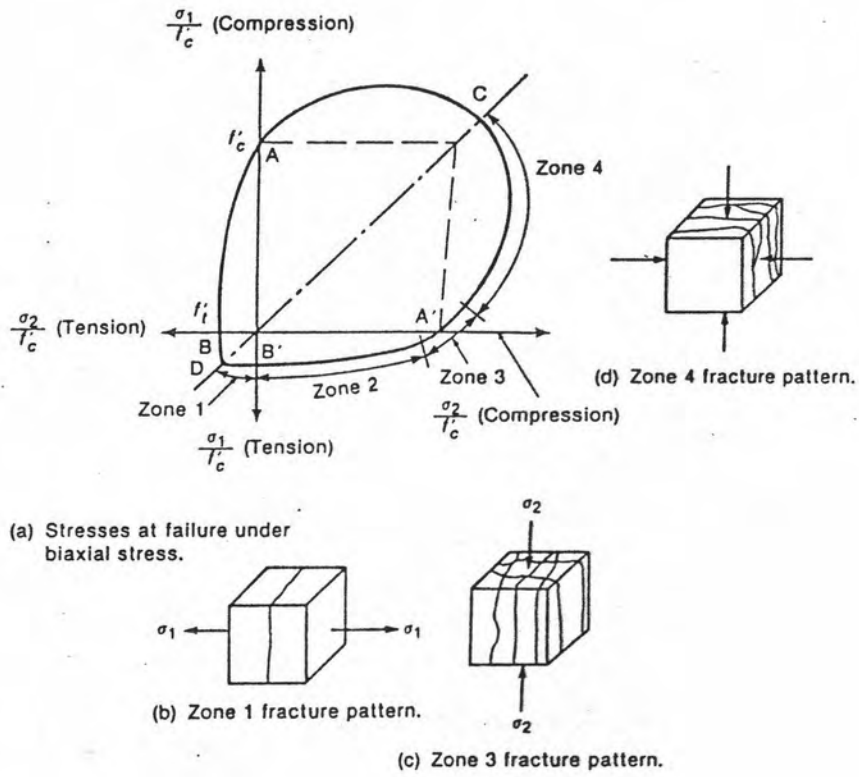


รูปที่ 2 การเสีจรูปของแผ่นพื้น

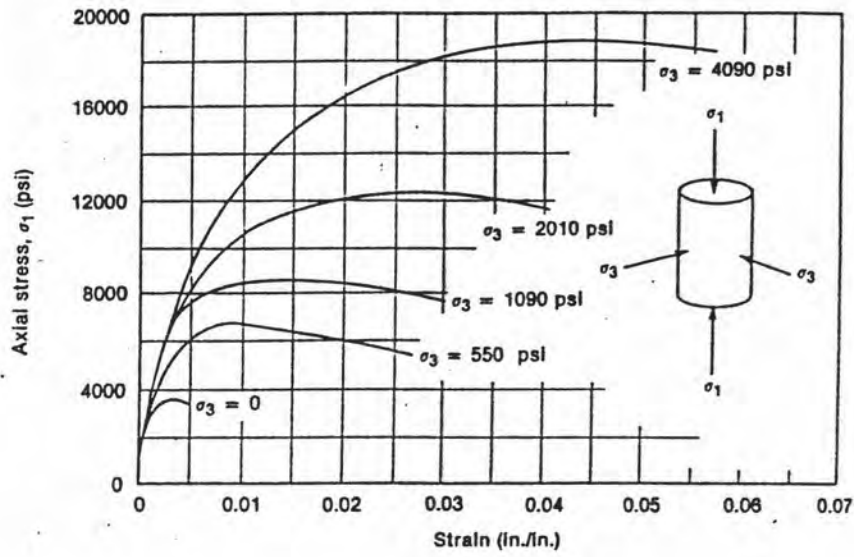


รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของแรงเฉือนในแผ่นพื้น

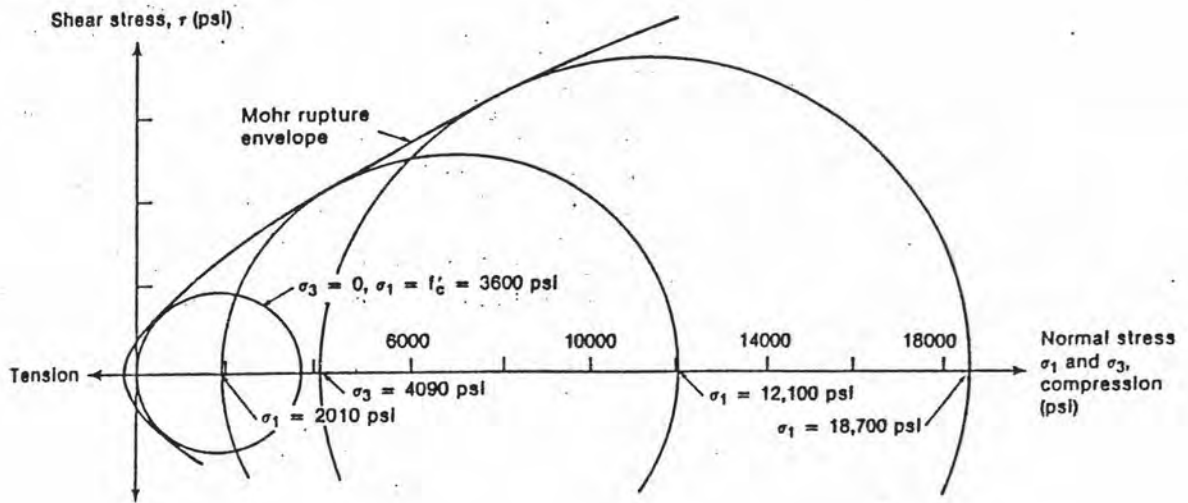
- ก) แรงเฉือนในชิ้นส่วนเล็กๆ ข) -ค) Free body diagram สำหรับคำนวณค่า V_n และ V_t
- ง) Thales circle จ) การแปรเปลี่ยนของ V_n และ V_t



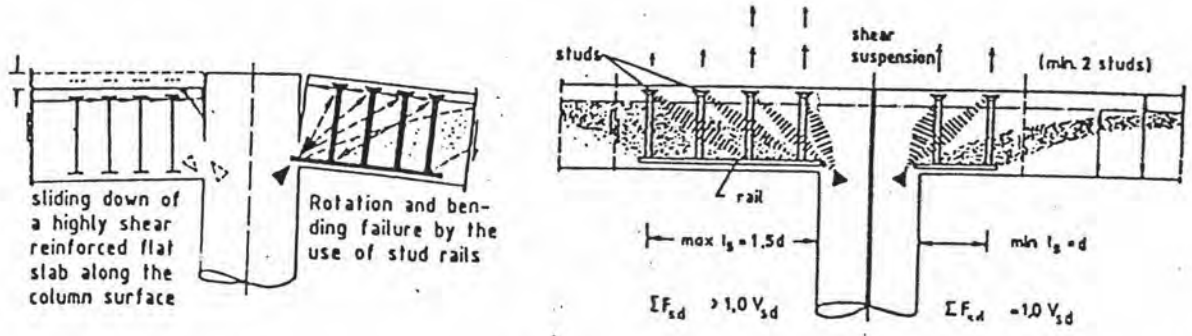
รูปที่ 4 กำลังและการวิบัติของคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงอัดสองแกน



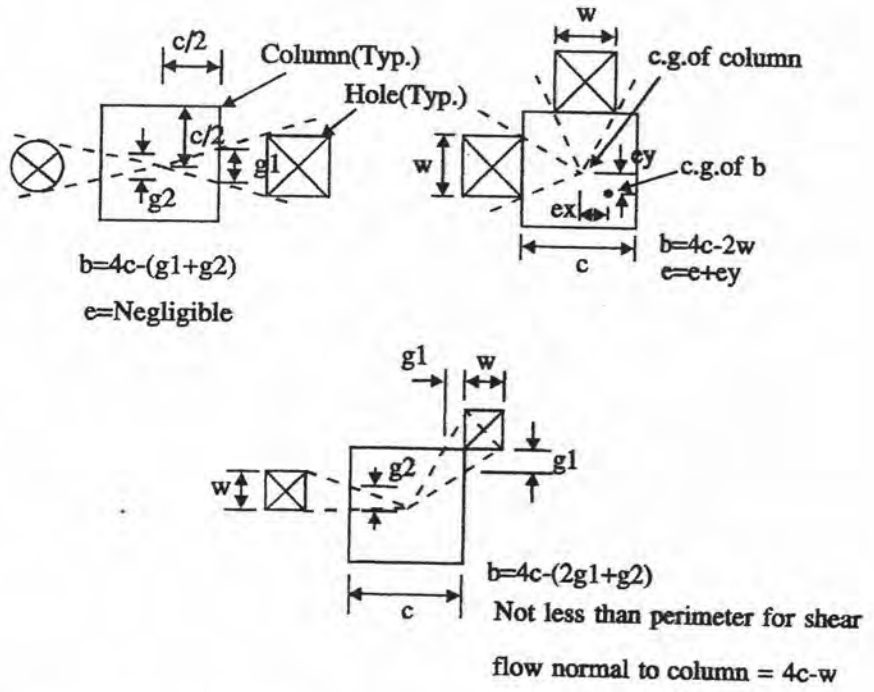
รูปที่ 5 กราฟแสดงหน่วยแรงและความเครียดในแนวแกนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ($f'_c = 3600 \text{ psi}$)



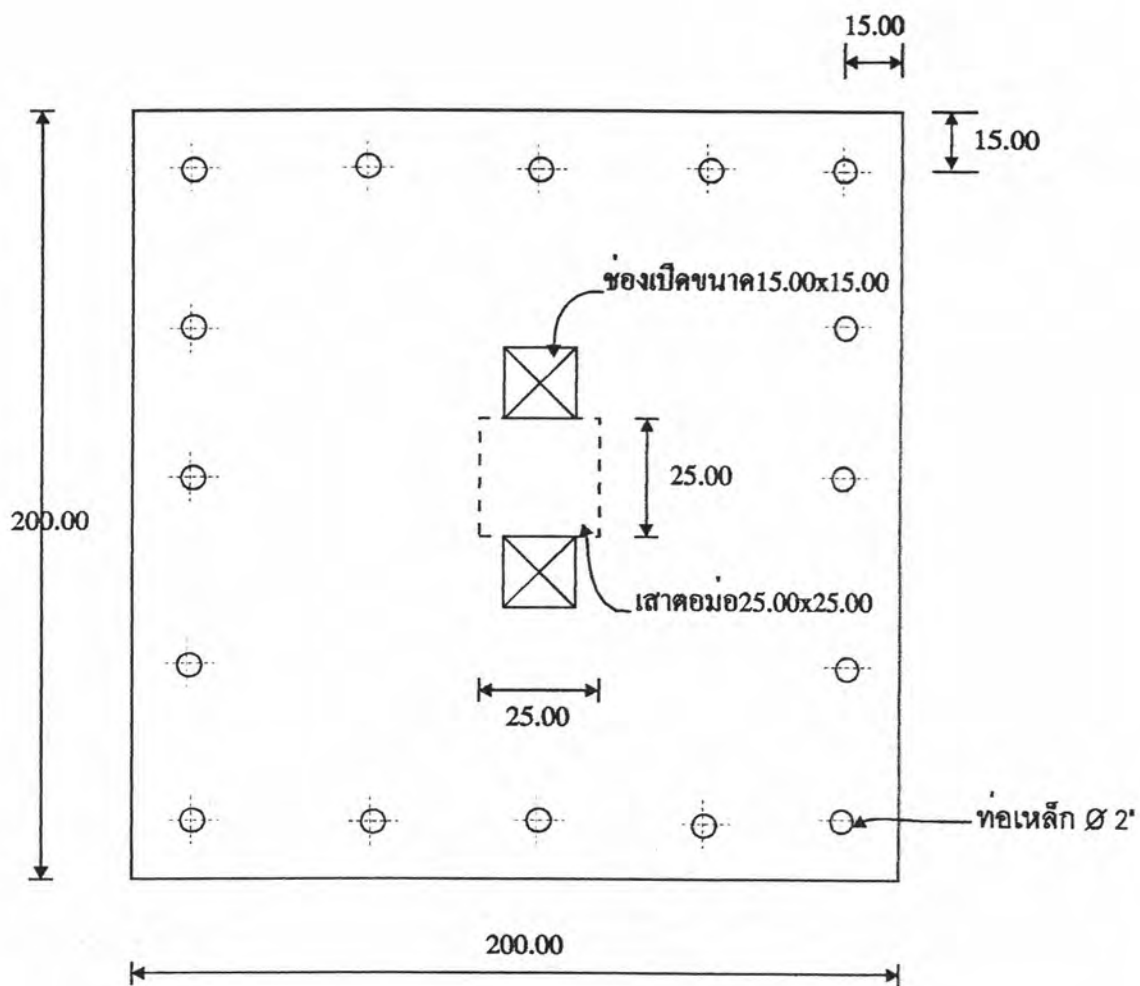
รูปที่ 6 Mohr rupture envelope จากการทดสอบตามรูปที่ 5



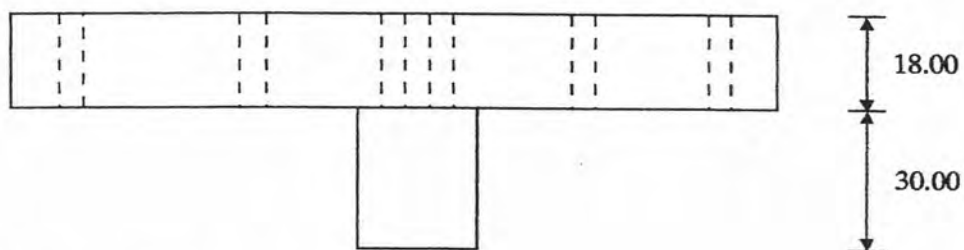
รูปที่ 7 กลไกการถ่ายแรงเฉือนในแผ่นพื้นที่เสริมด้วยหมุดรับแรงเฉือน



รูปที่ 8 เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตและการเยื้องศูนย์กลางของสมการ 2.25 และ 2.26



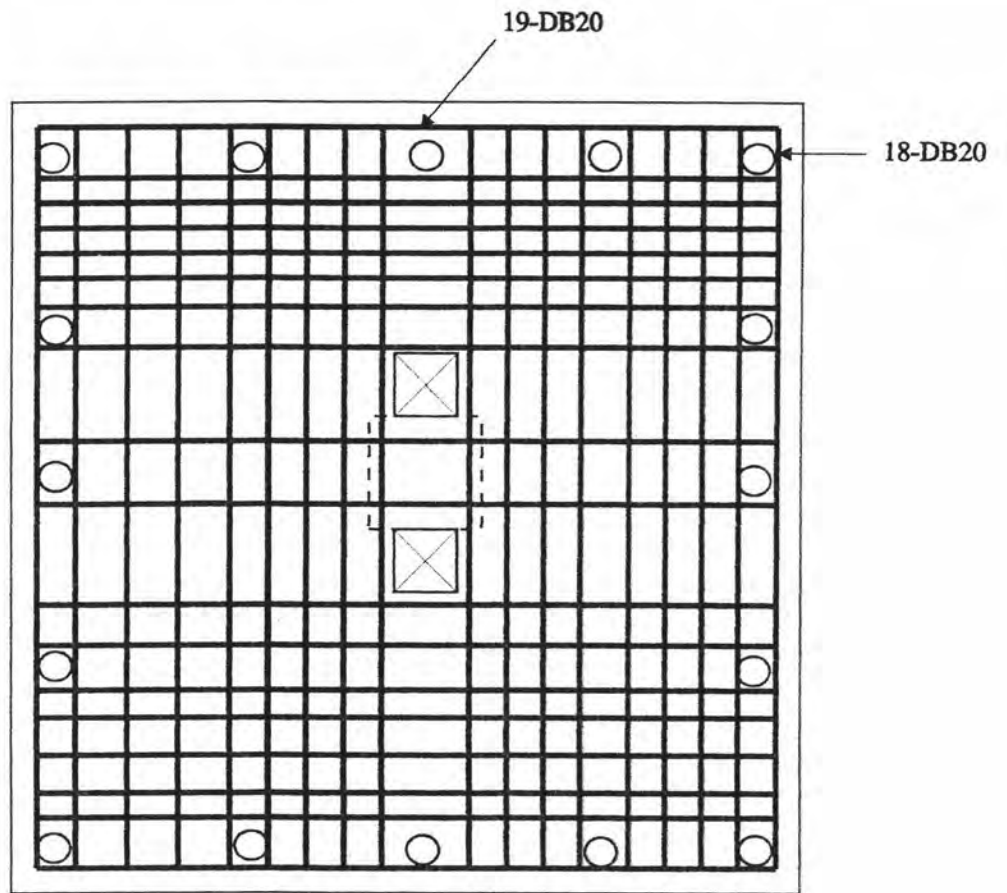
แปลน



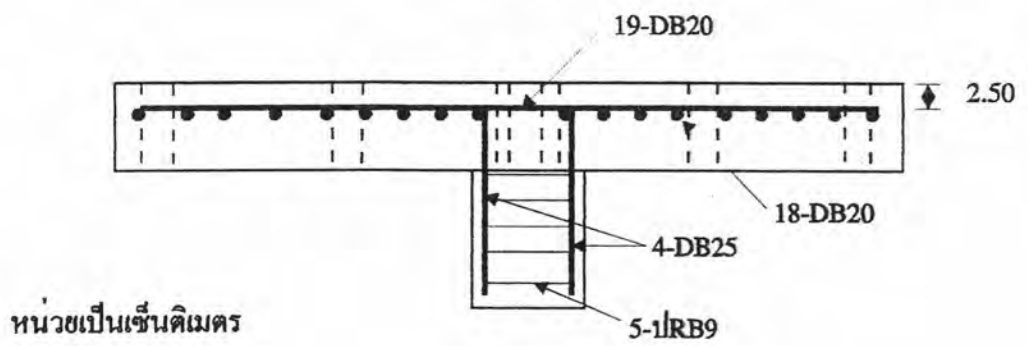
หน่วยเป็นเซนติเมตร

รูปค้ำ

รูปที่ 9 แสดงมิติของตัวอย่างทดสอบ

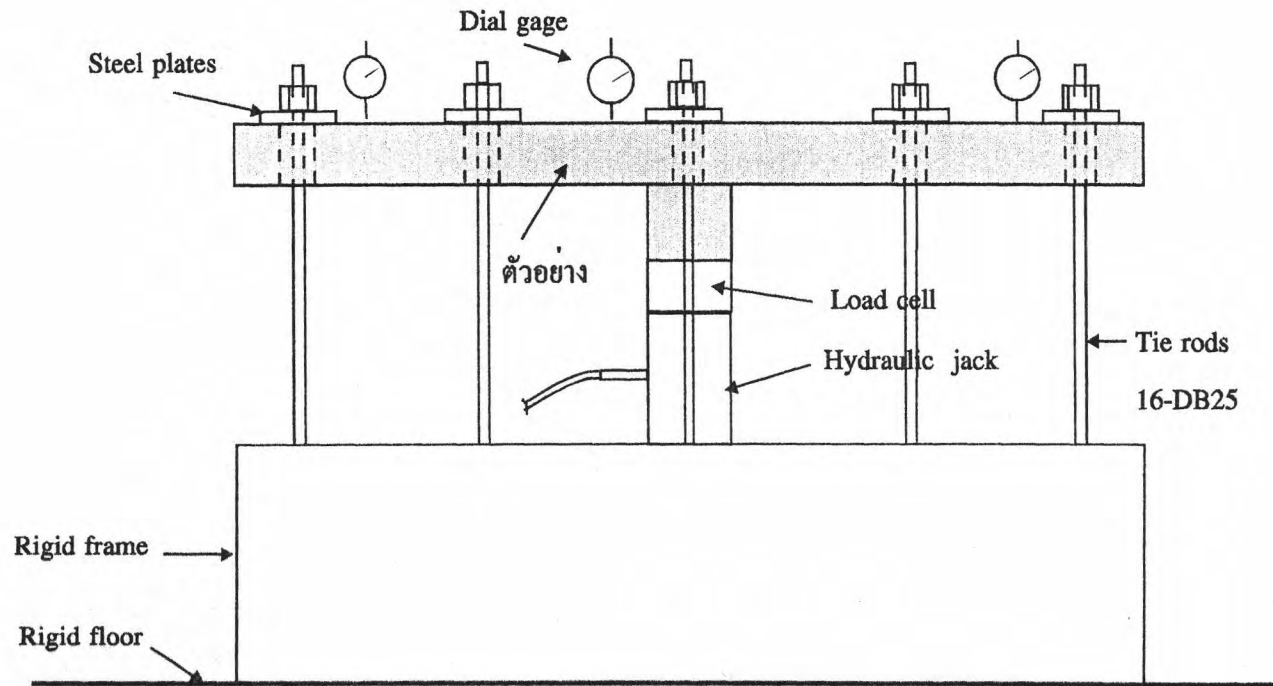


เหล็กเสริมบน



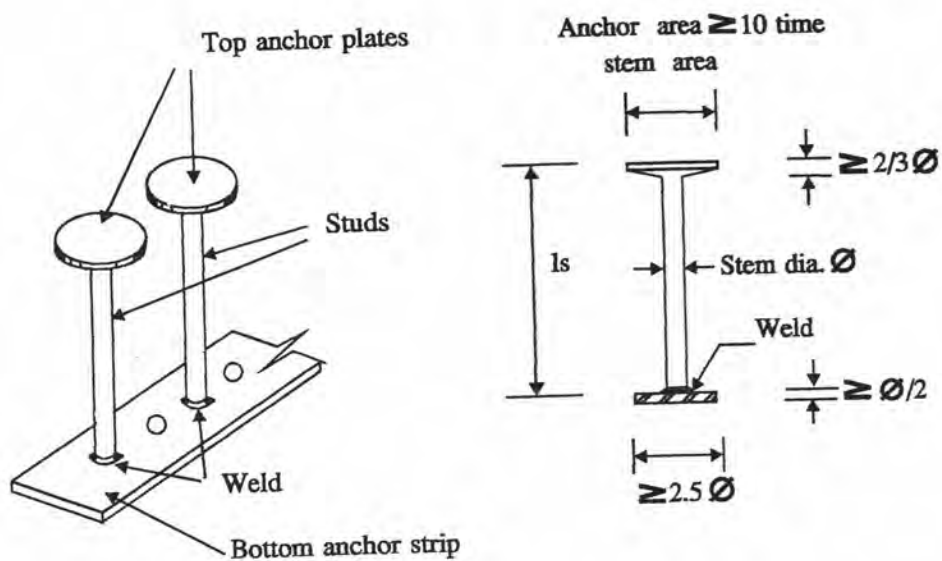
รูปตัด

รูปที่ 10 แสดงรายละเอียดทั่วไปของการเสริมเหล็กคานทานค่อการค้ำ

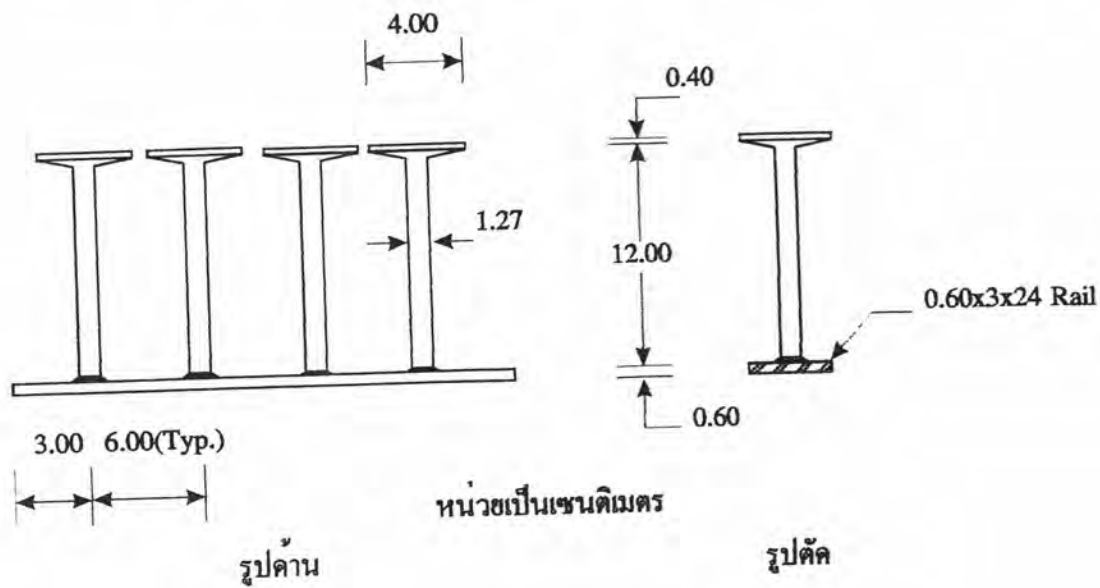


รูปด้าน

รูปที่ 11 การจัดตัวอย่างทดสอบ

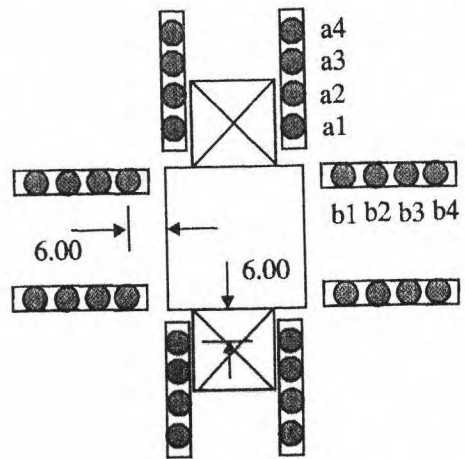


รูปที่ 12 รายละเอียดทั่วไปของหมุดรับแรงเฉือนที่เสนอ โดย A.Ghali และคณะ (19)

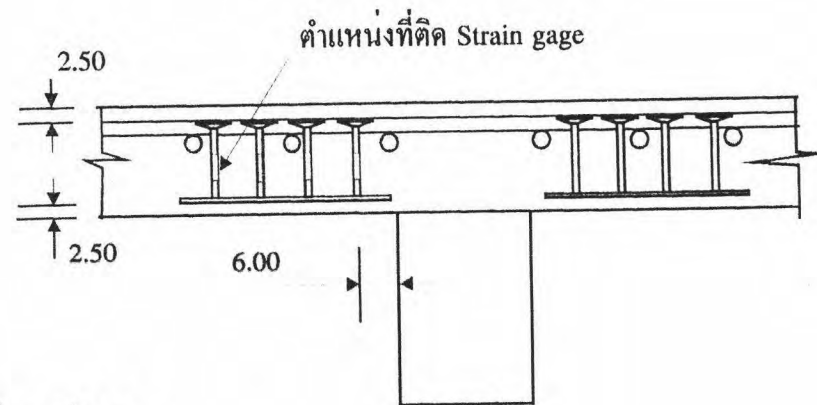


รูปที่ 13 รายละเอียดของหมุดรับแรงเฉือนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

หมุดที่ติด Strain gage



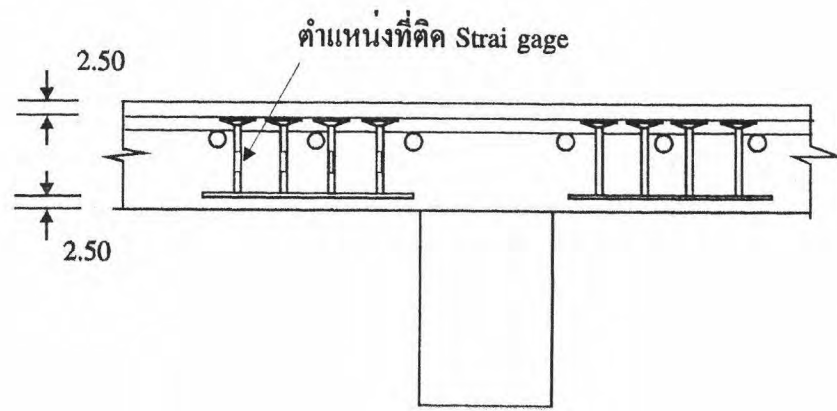
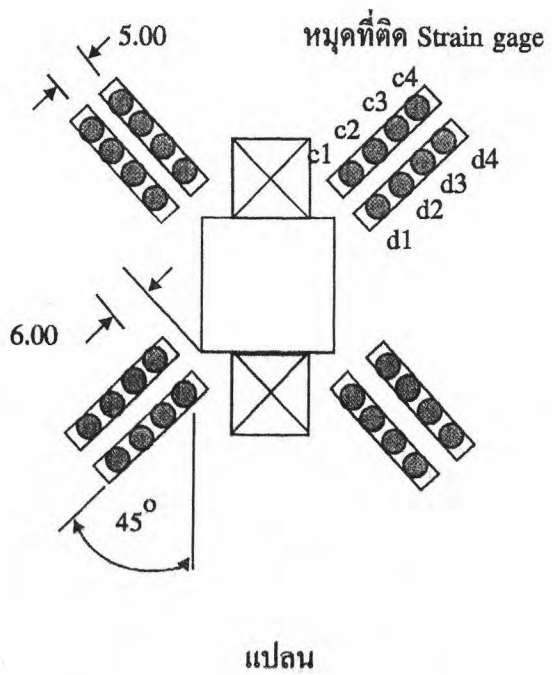
แปลน



หน่วยเป็นเซนติเมตร

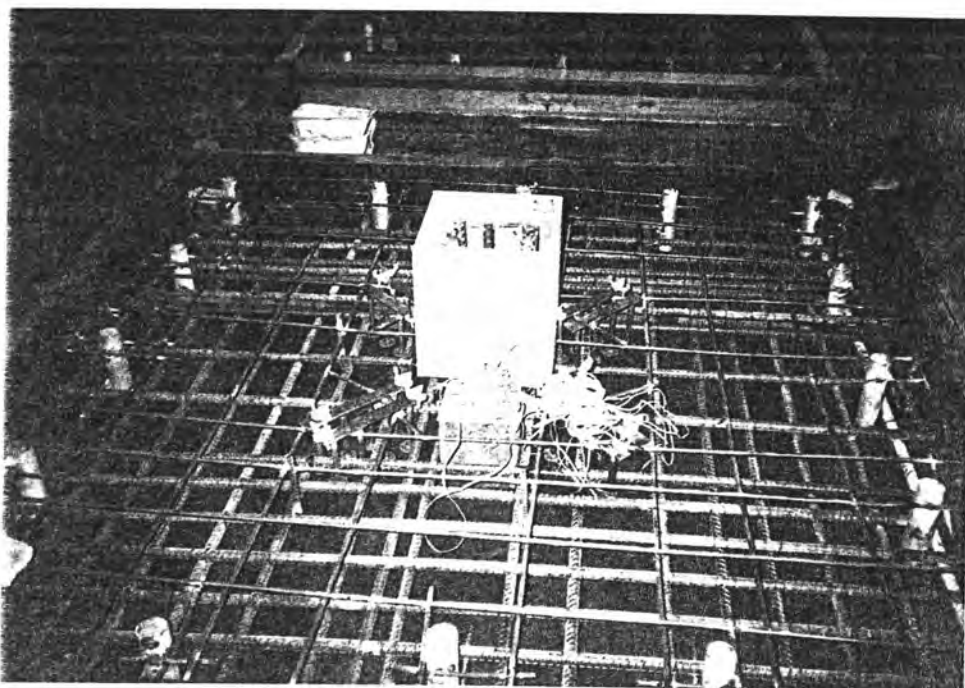
รูปตัด

รูปที่ 14 การจัดวางหมุดรับแรงเฉือนในตัวอย่าง S2

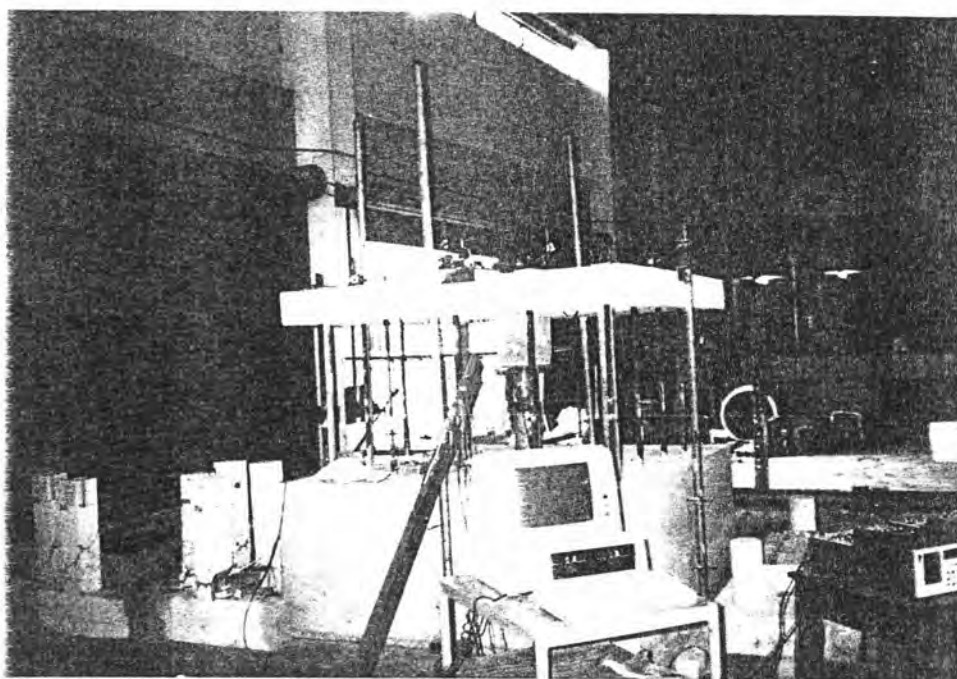


หน่วยเป็นเซนติเมตร

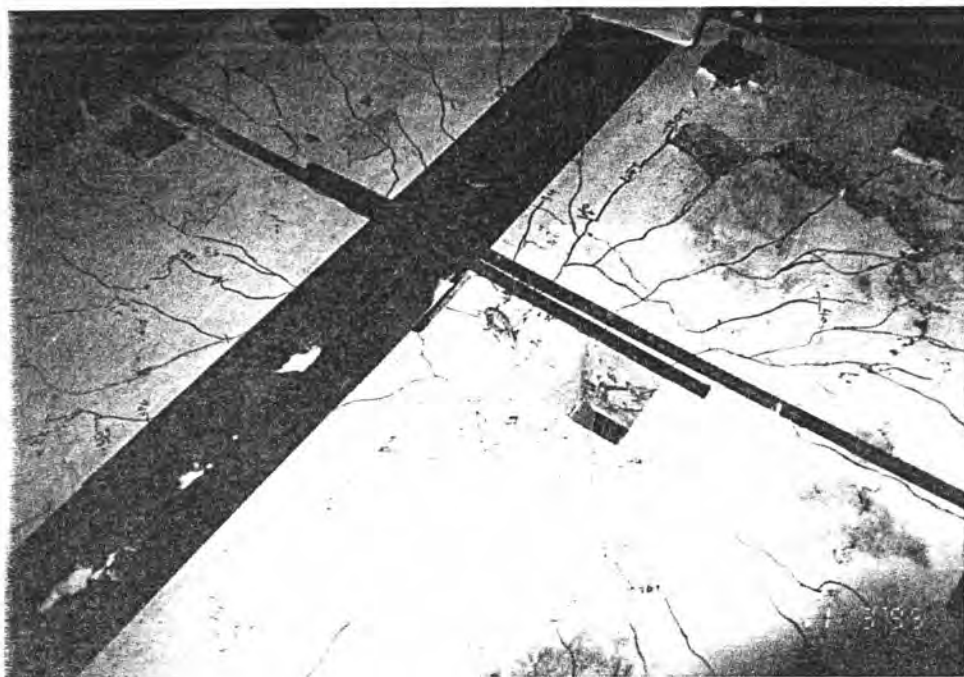
รูปที่ 15 การจัดวางหมุดรับแรงเฉือนในตัวอย่าง S3



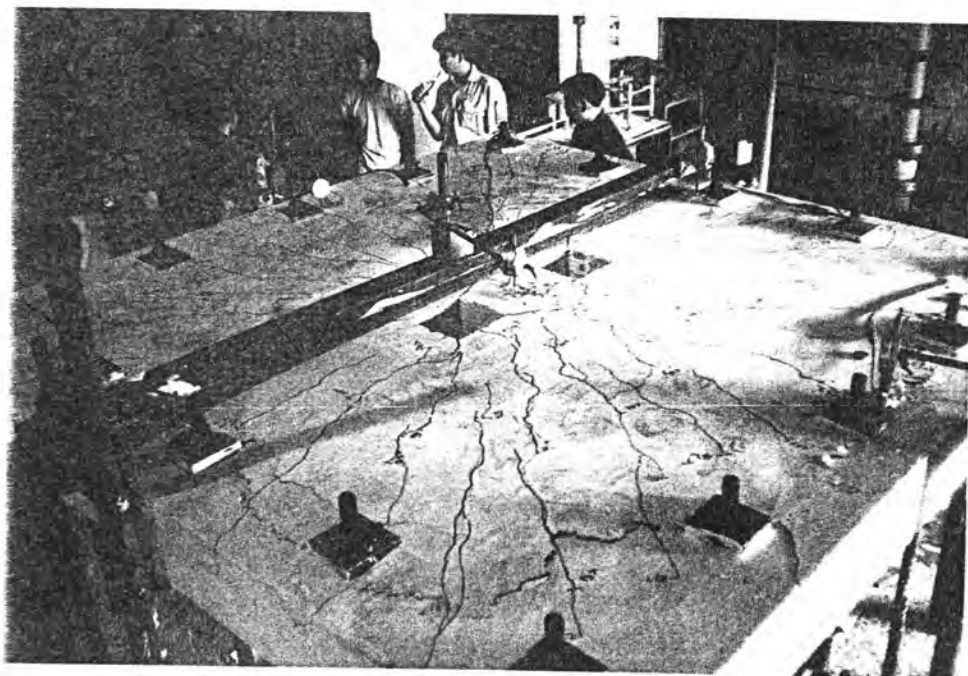
รูปที่ 16 การจัดเตรียมตัวอย่าง



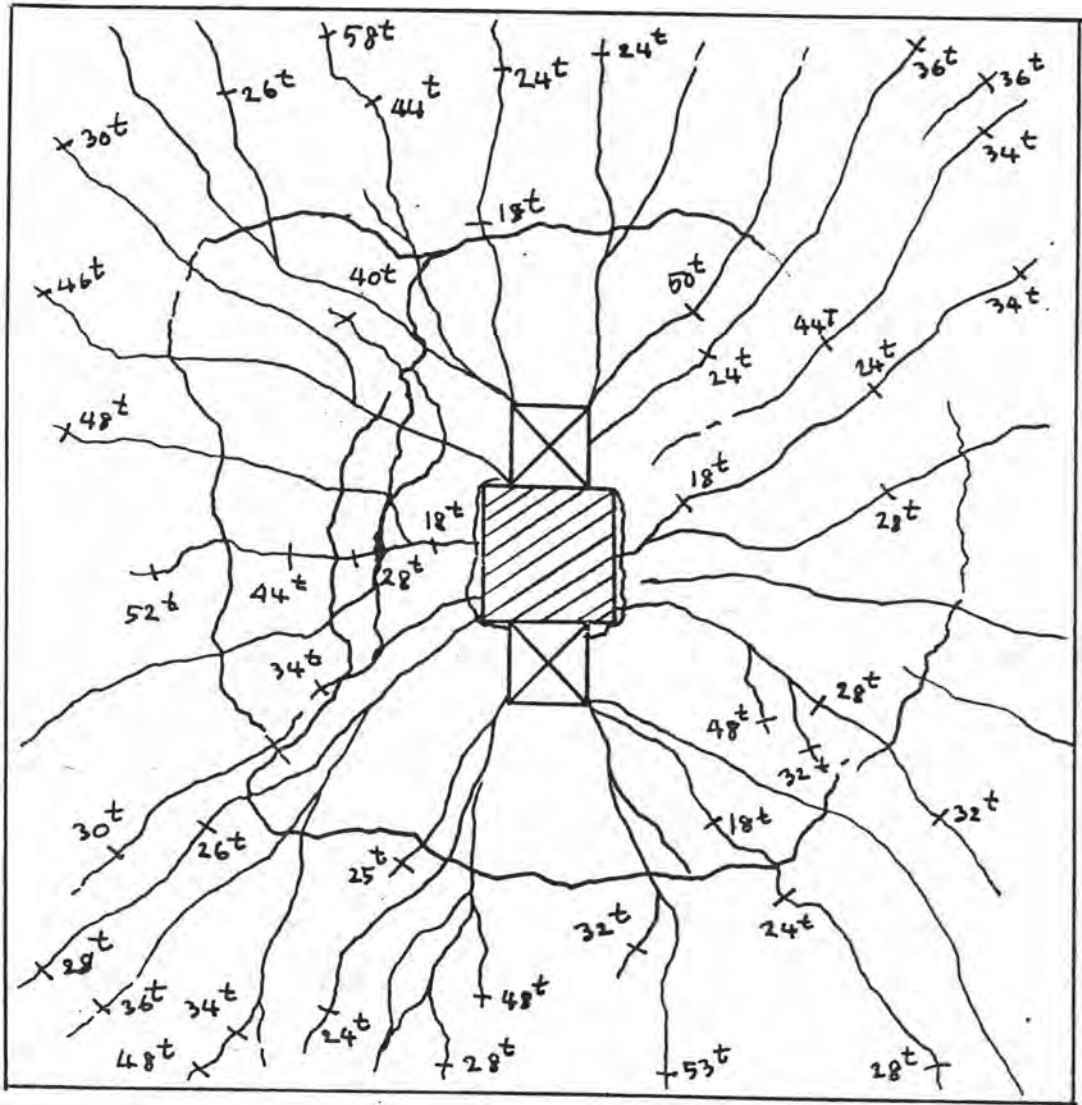
รูปที่ 17 การจัดเตรียมตัวอย่างและอุปกรณ์ทดสอบ



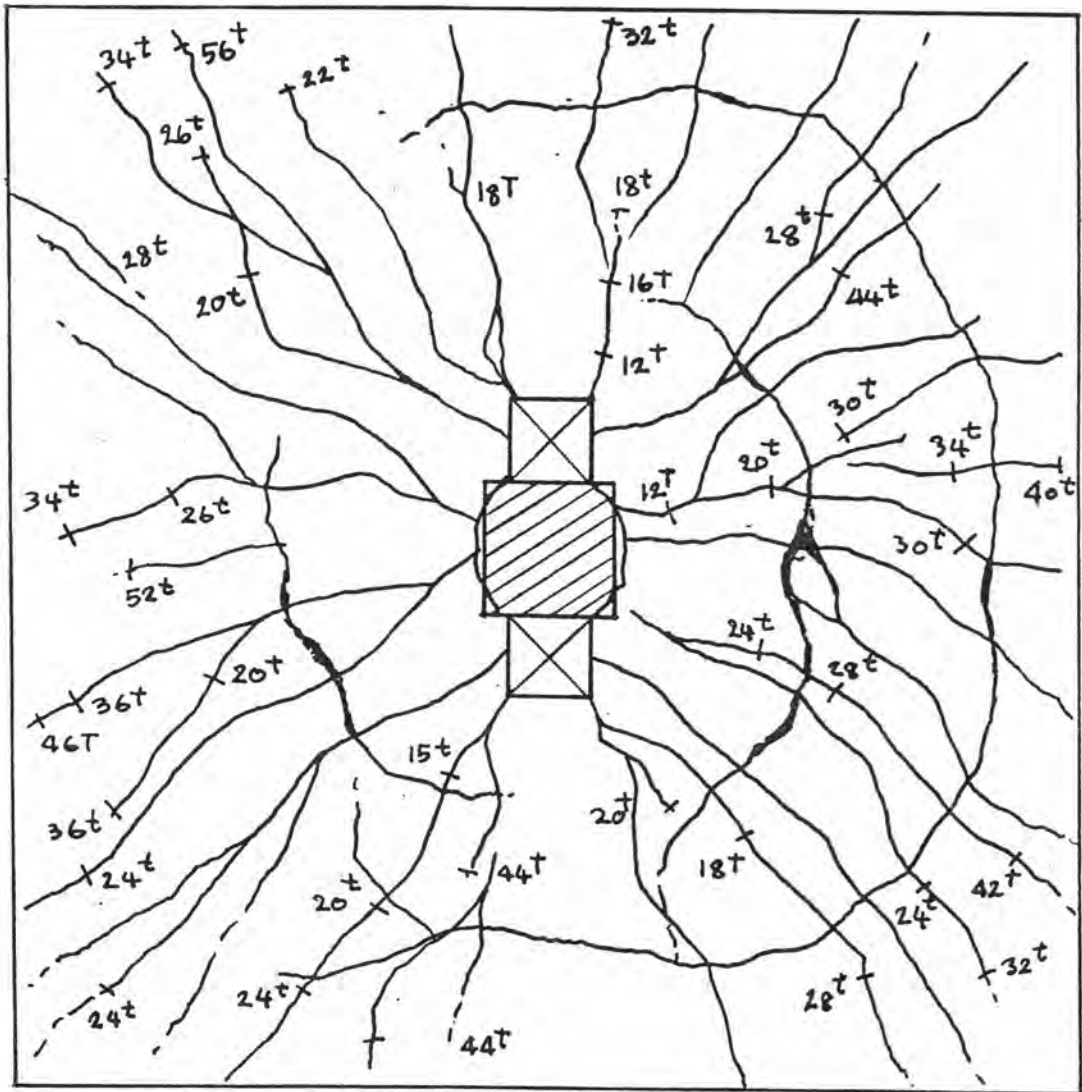
รูปที่ 18 ตัวอย่าง S1 ภายหลังแรงกดประลัย



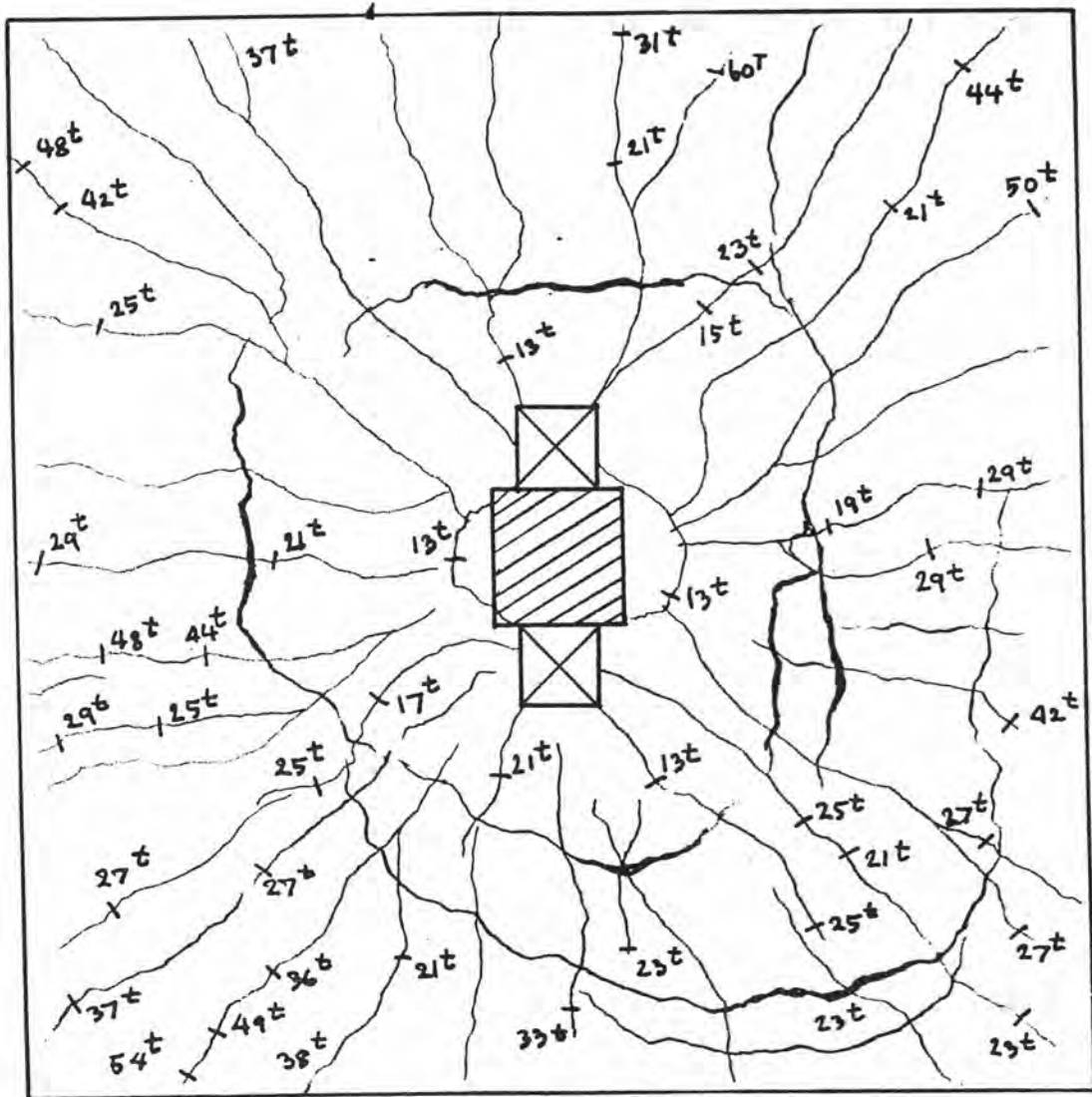
รูปที่ 19 ตัวอย่าง S2 ภายหลังแรงกดประลัย



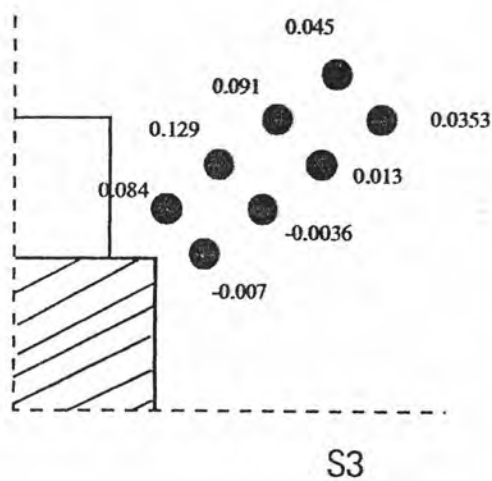
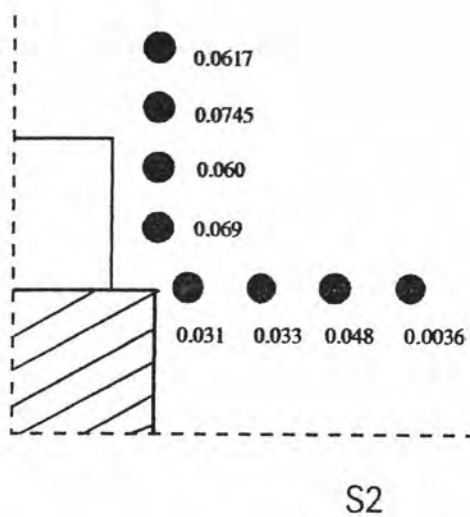
รูปที่ 20 ลักษณะการแตกตัวของตัวอย่าง S1 ภายหลังจากคประลัย



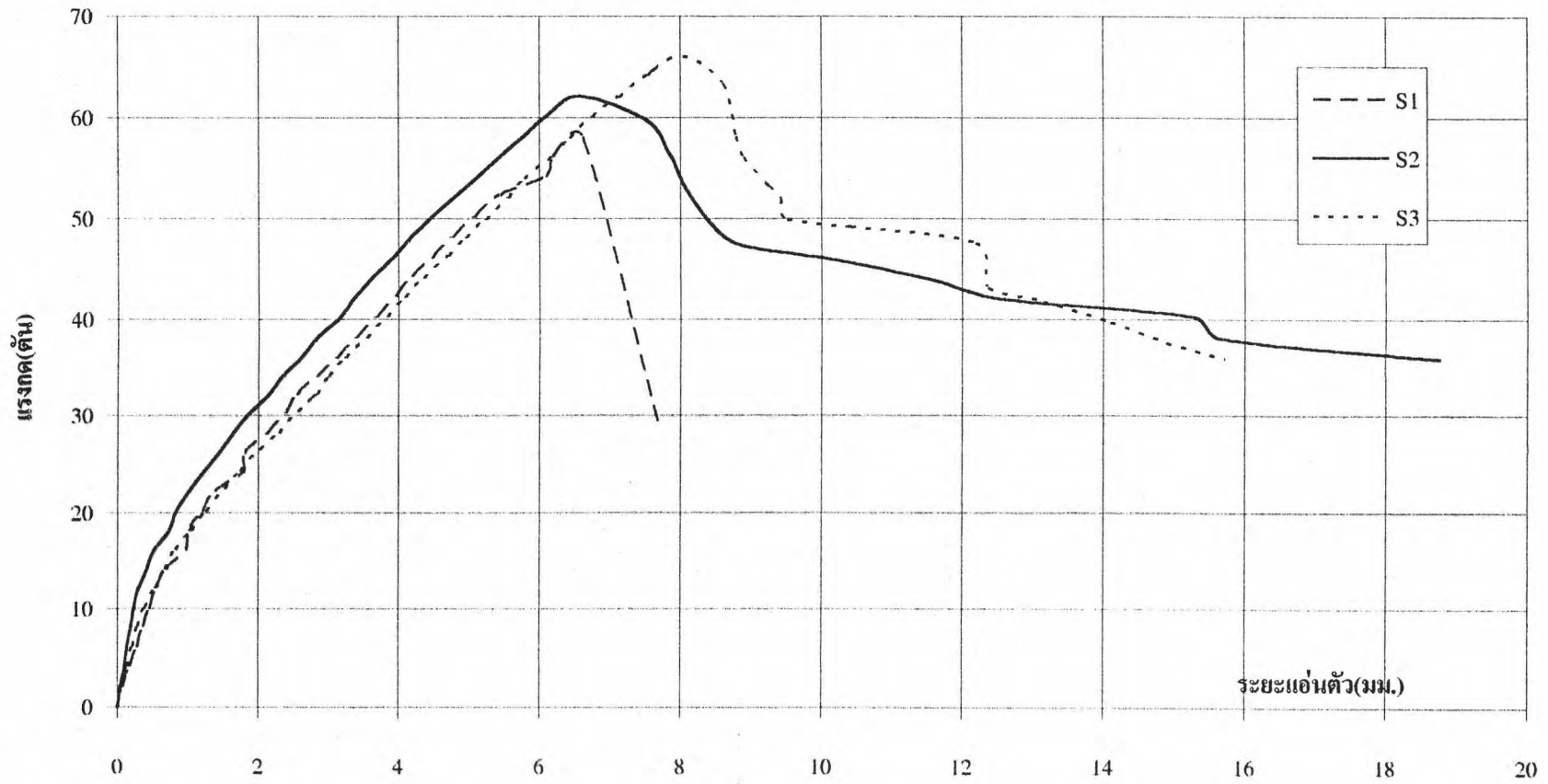
รูปที่ 21 ลักษณะการแตกตัวของตัวอย่าง S2 ภายหลังจากคปละลาย



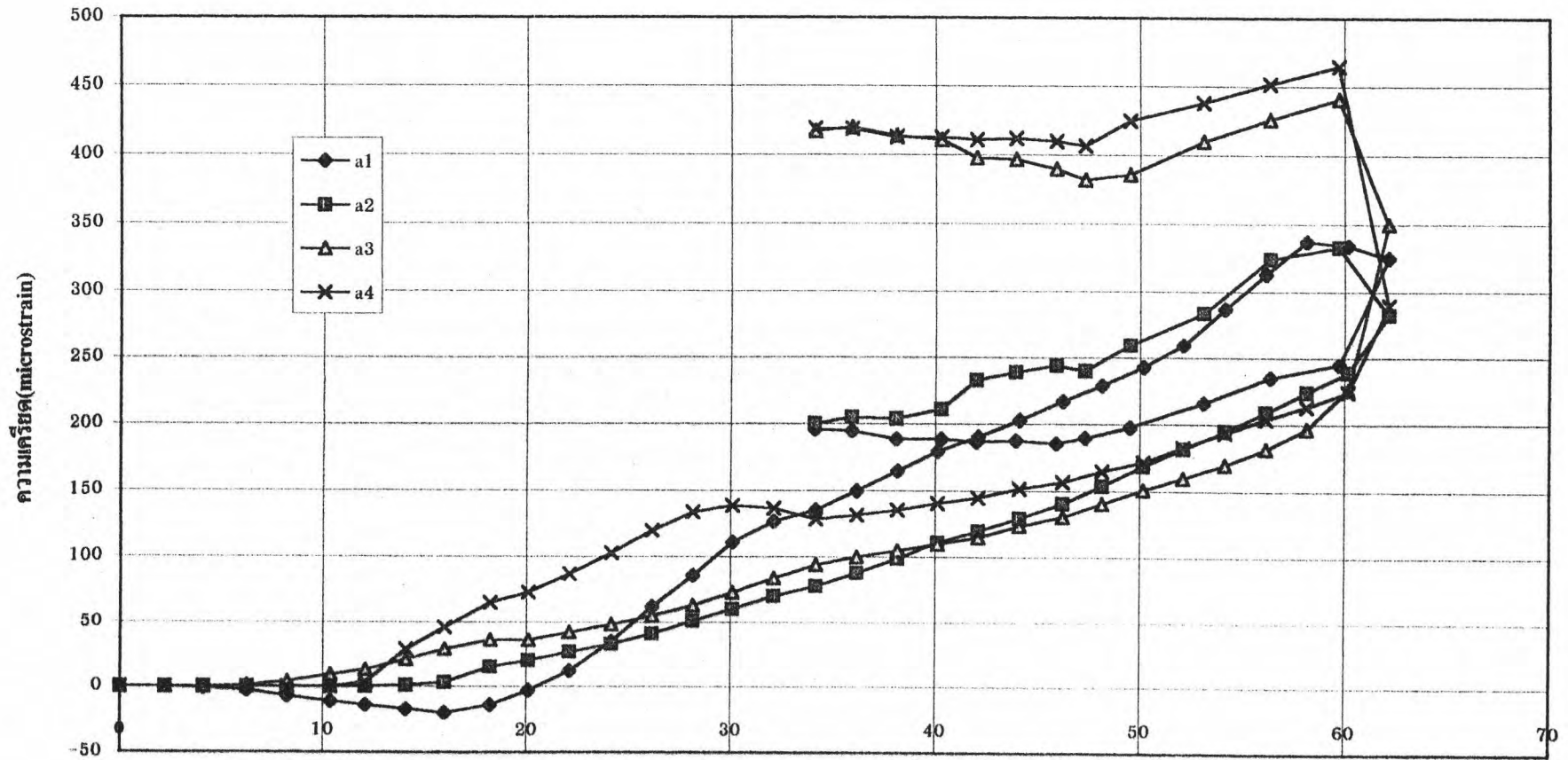
รูปที่ 22 ลักษณะการแตกตัวของตัวอย่าง S3 ภายหลังจากคปละลาย



รูปที่ 23 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเหมือนที่แรงกดประลัย
โดยคิดเป็นอัตราส่วนต่อหน่วยแรงที่จุดกลางของหมุด

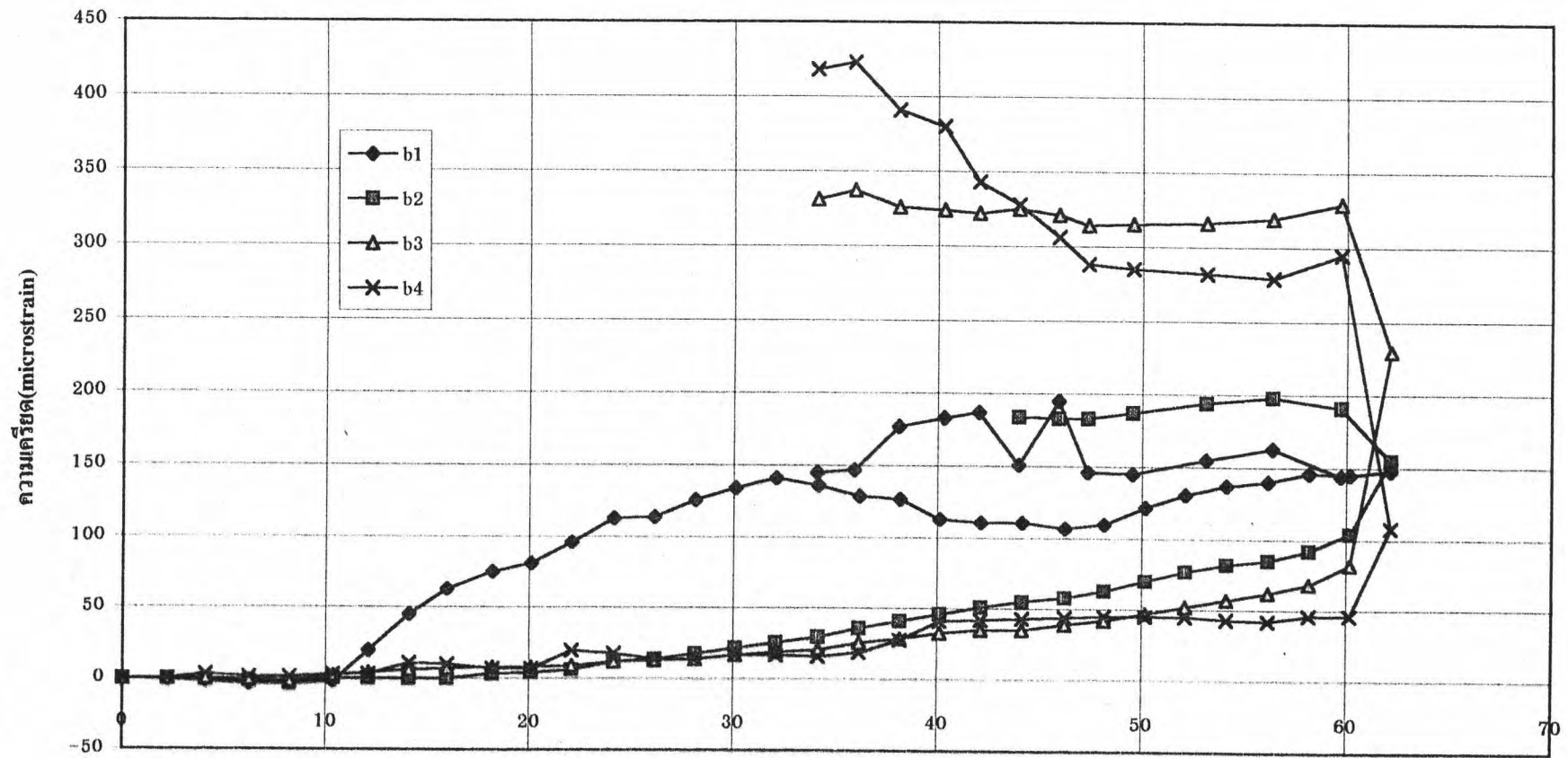


รูปที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการแอนตัวที่กึ่งกลางของตัวอย่าง



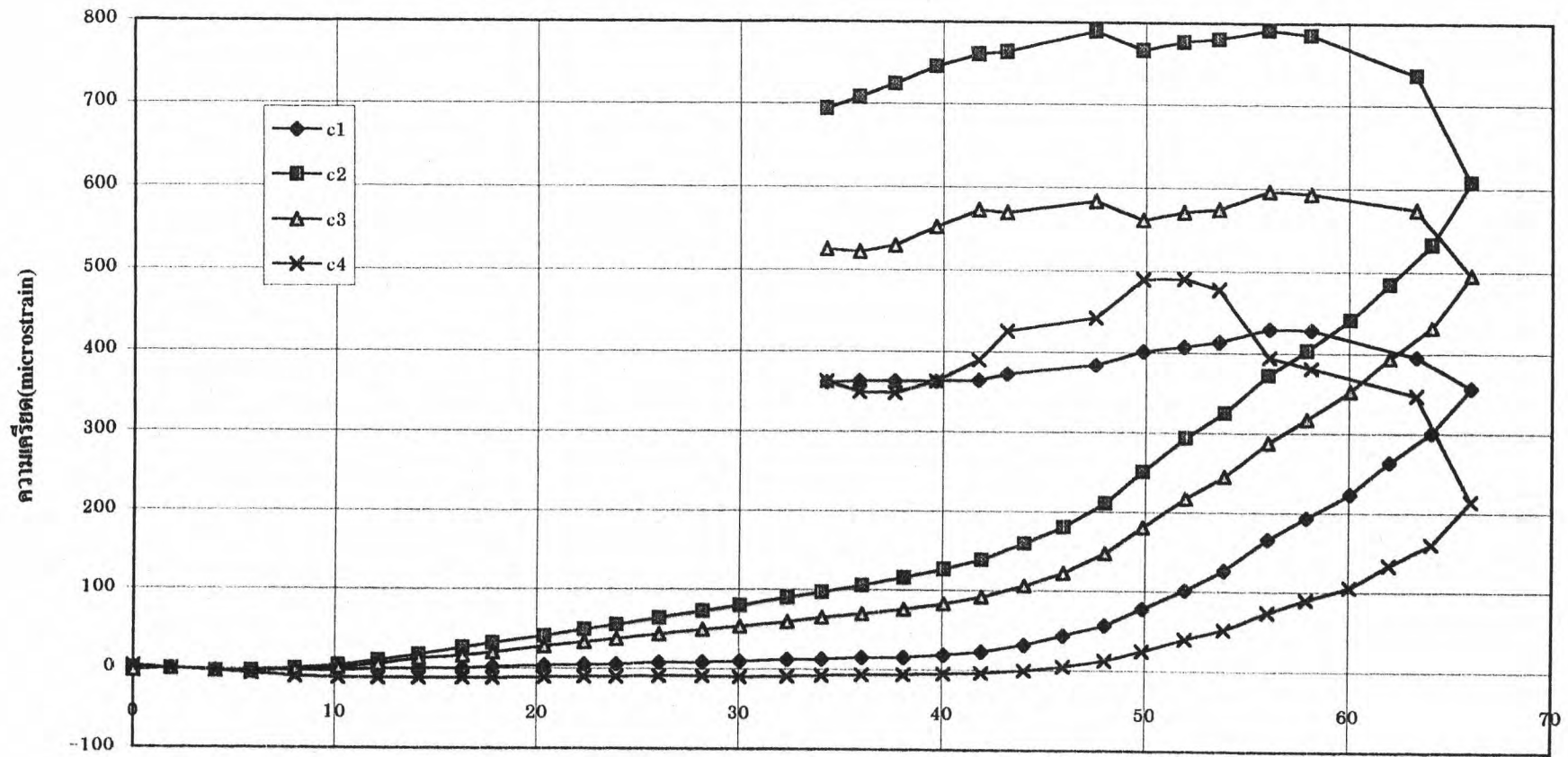
รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดในหมุดแถบ a

แรงกด(ตัน)



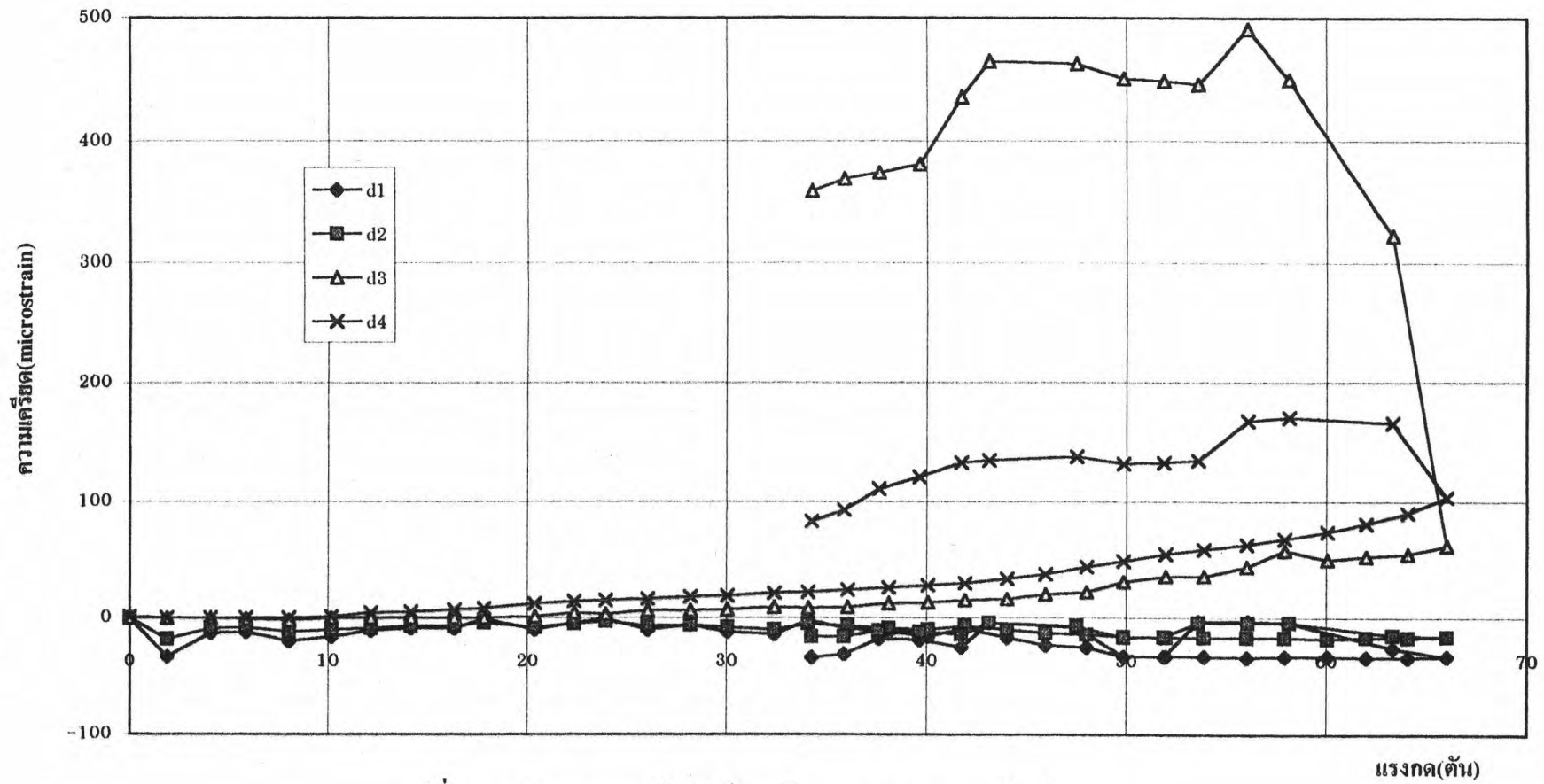
รูปที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดในหมุดแถบ b

แรงกด(ตัน)

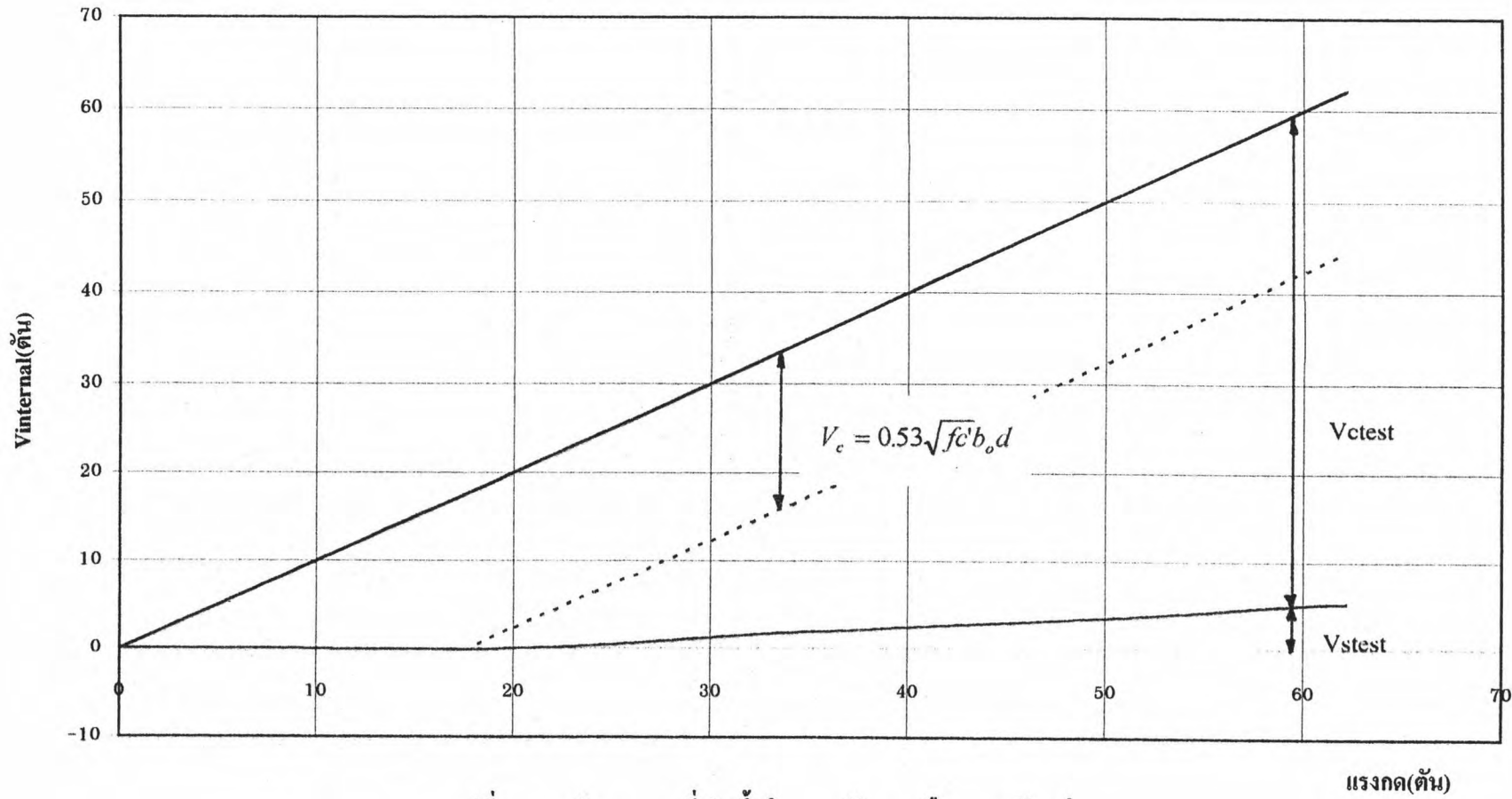


รูปที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดในหมุดแถบ c

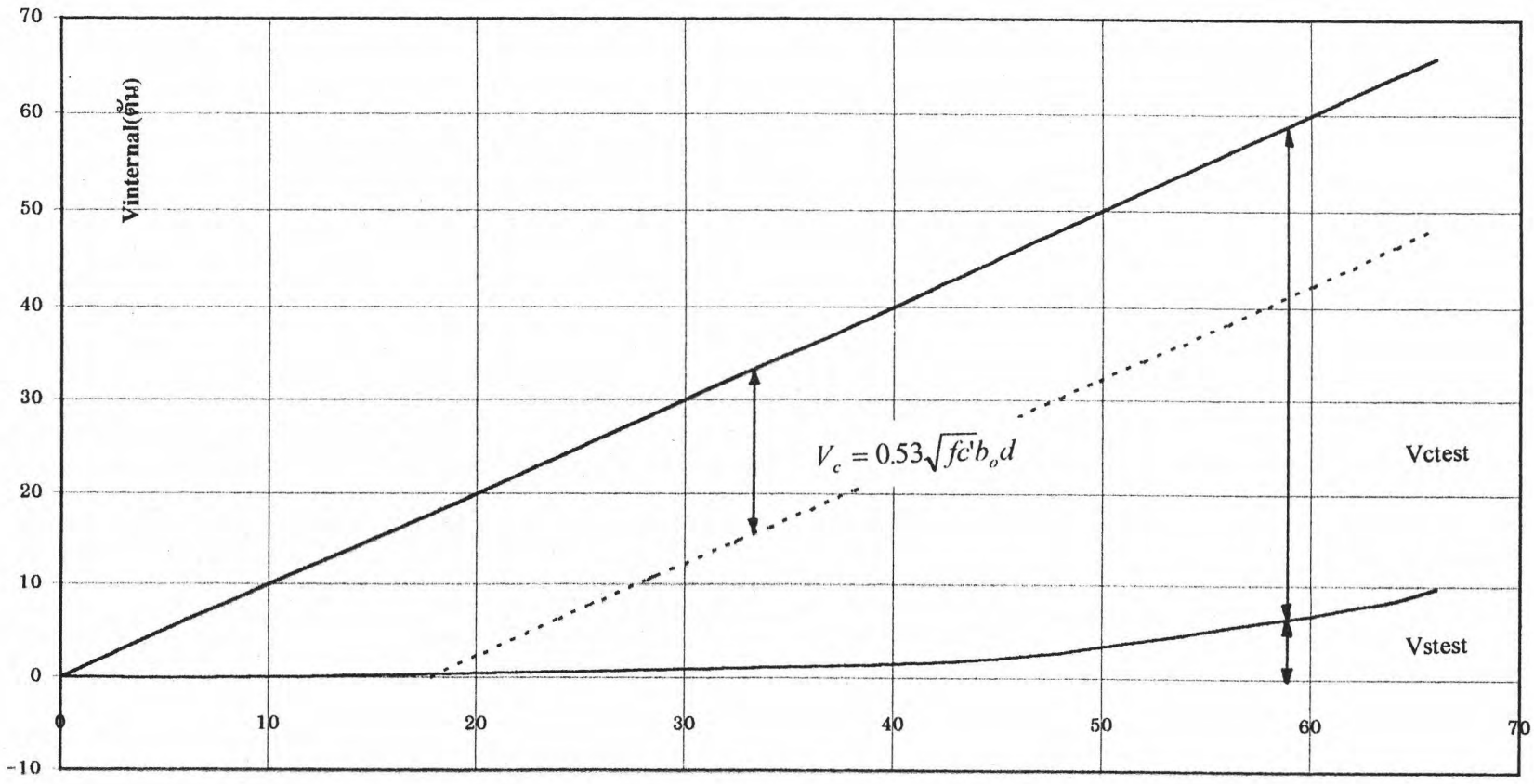
แรงกด(ตัน)



รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดในหมุดแถบ d

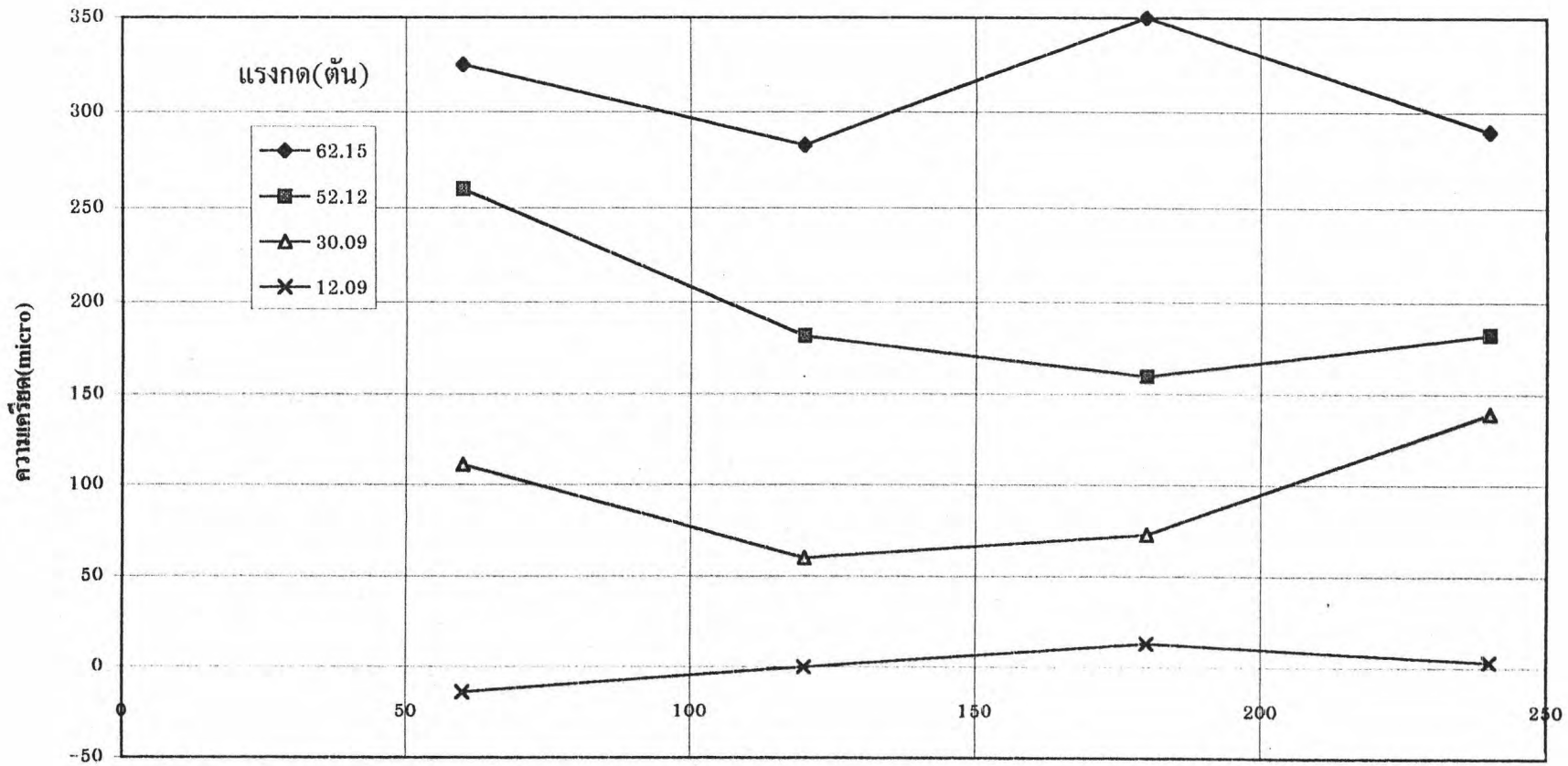


รูปที่ 29 กราฟแสดงแรงที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนของตัวอย่าง S2

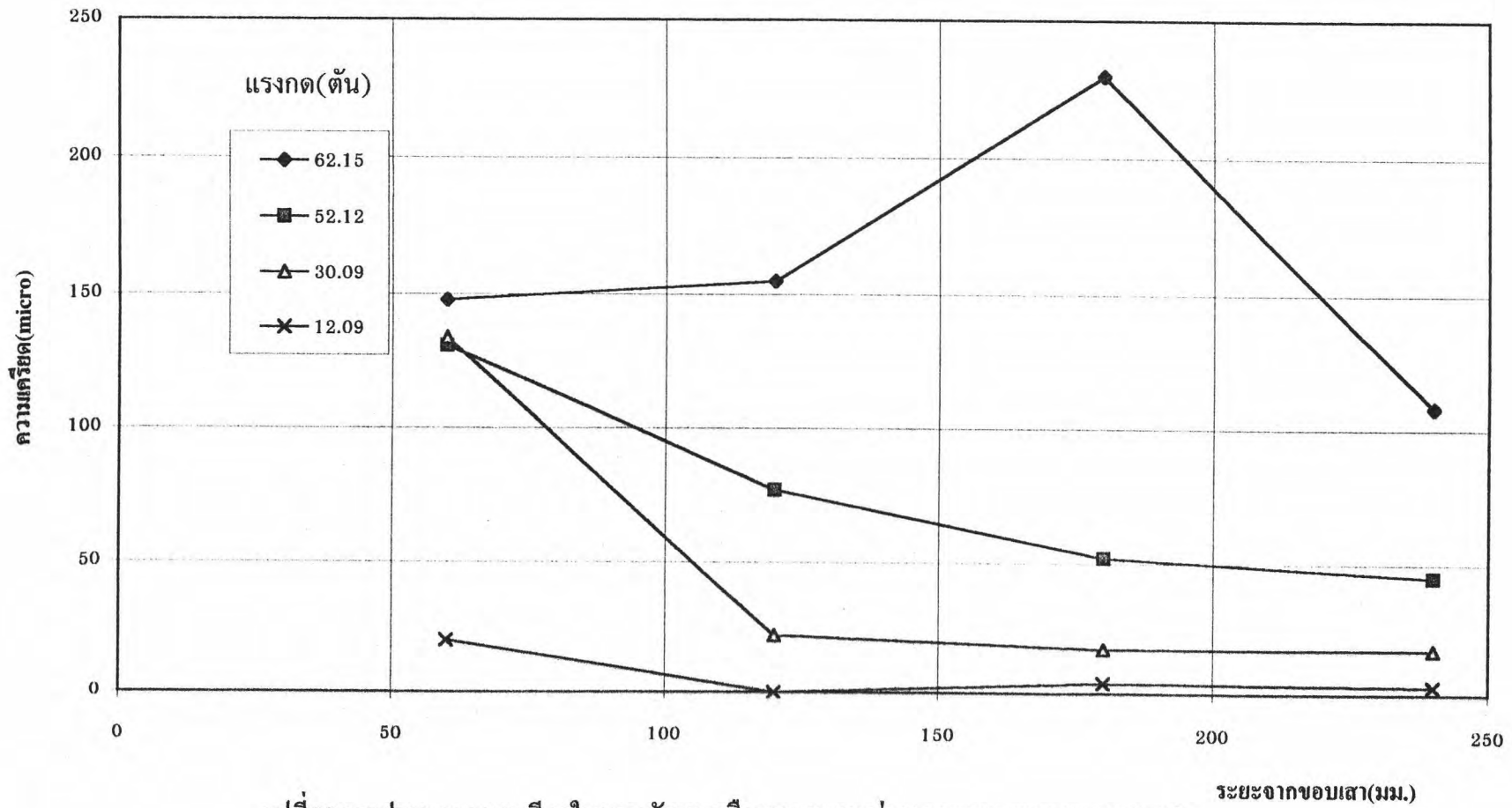


รูปที่ 30 กราฟแสดงแรงที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนของตัวอย่าง S3

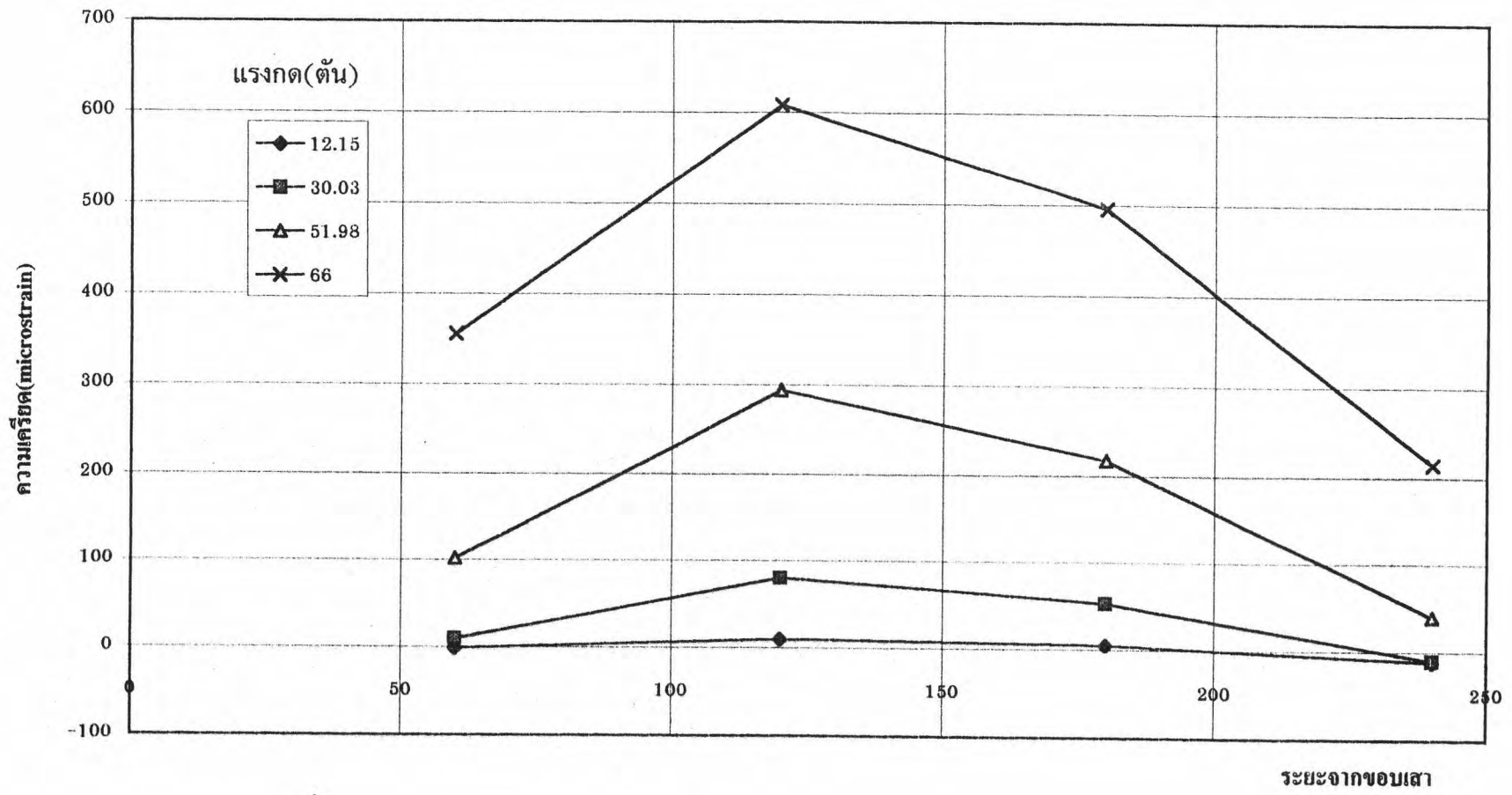
แรงกด(ตัน)



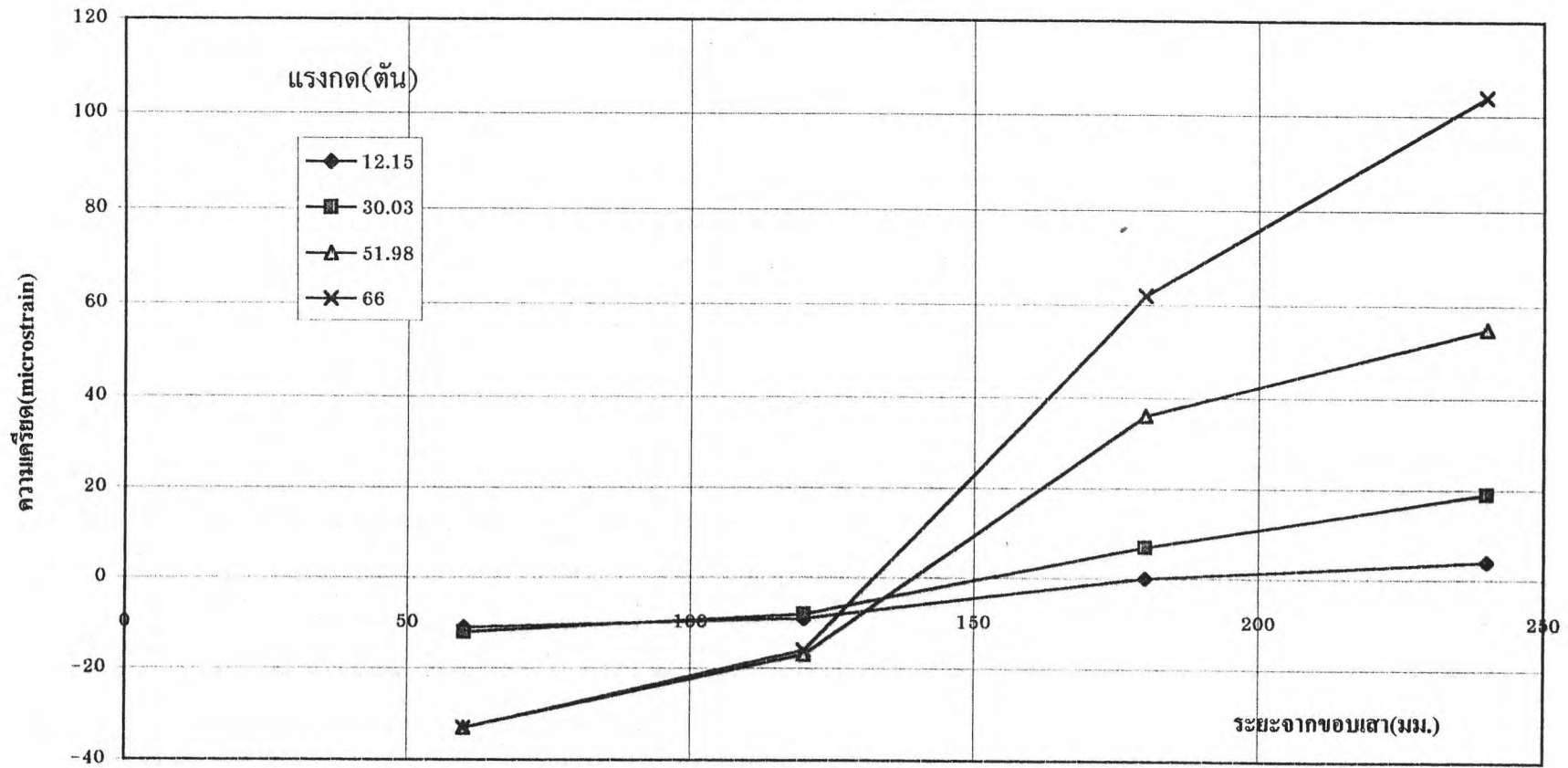
รูปที่ ๑ กราฟแสดงความเครียดในหมุดรับแรงเฉือนและระยะห่างจากขอบเสาของหมุดแถบ a



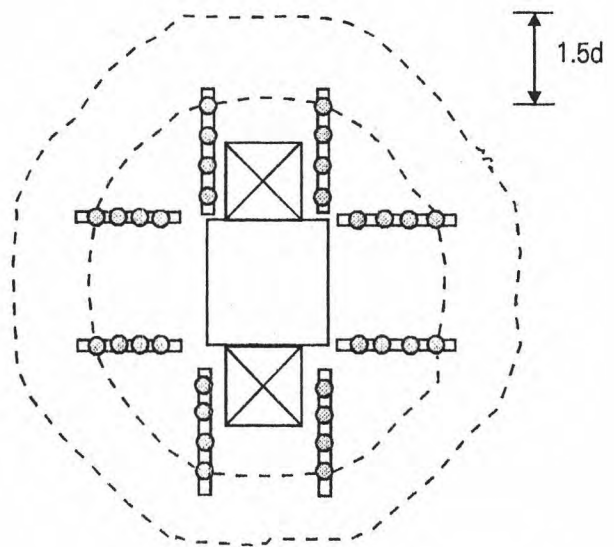
รูปที่ 2 กราฟแสดงความเคี้ยวตในหมุดรับแรงเดือนและระยะห่างจากขอบเสาของหมุดแถบ b



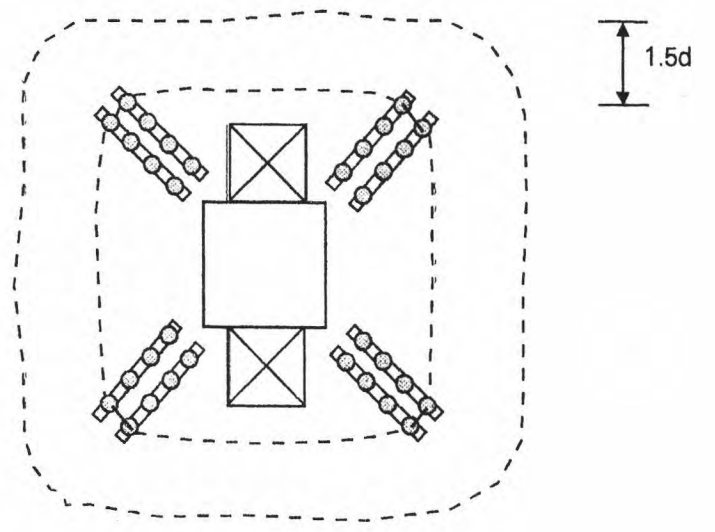
รูปที่ 3 กราฟแสดงความเครียดในหมุดรับแรงเฉือนและระยะห่างจากขอบเสาของหมุดแถบ c



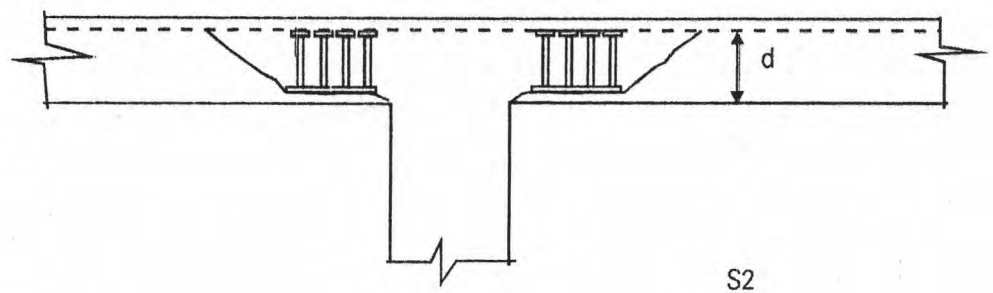
รูปที่ 34 กราฟแสดงความเครียดในหมุดรับแรงเฉือนและระยะห่างจากขอบเสาของหมุดแถบ d



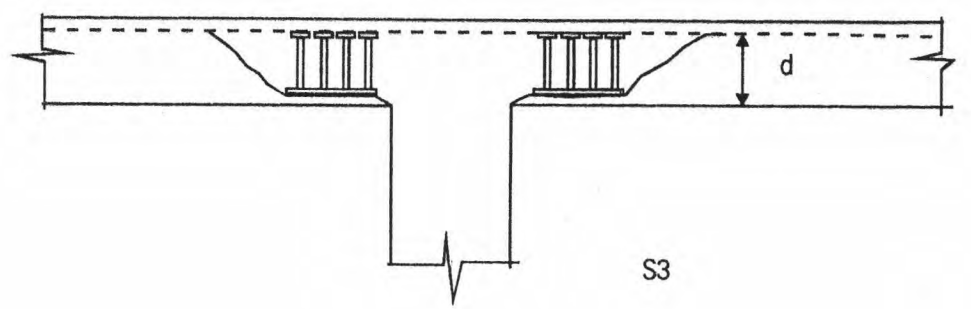
แปลน $1.5d$



แปลน $1.5d$

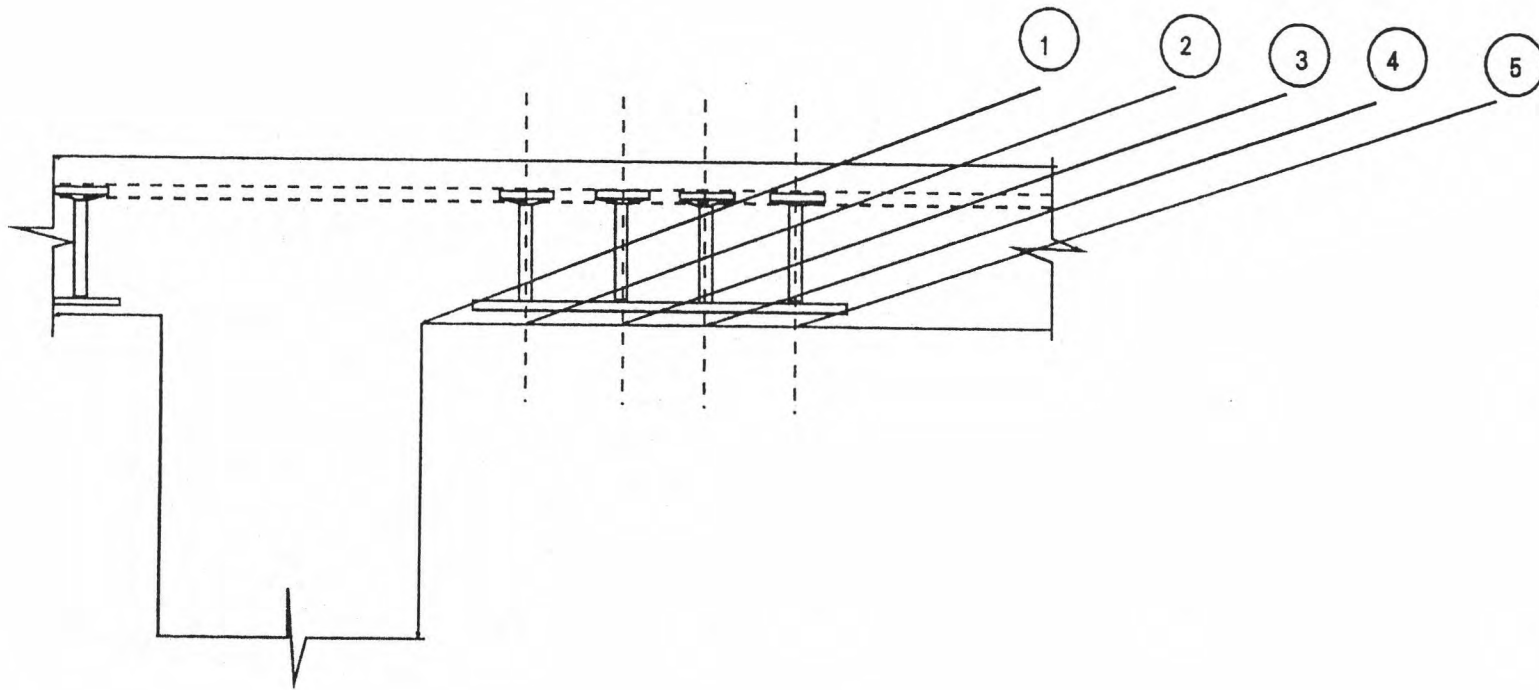


รูปตัด



รูปตัด

รูปที่ ๖ รูปแสดงฉนวนการพังเนื่องจากการเฉือนทะลุที่แรงกดประลัยของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 รูปตัดแสดงหน้าตัดที่เป็นไปได้ที่อาจจะพังเนื่องจากการเฉือนทะลุ

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของตัวอย่างทดสอบ

การพิจารณากำลังรับน้ำหนักประลัยของตัวอย่างทดสอบตามทฤษฎีจะพิจารณาได้ดังนี้

ก.1 กำลังต้านทานต่อการคด (Flexural Capacity) , V_{flex} ⁽²²⁾

ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้ Johansen's Yield Line Theory ซึ่งพิจารณาเป็นแผ่นพื้นที่เหลี่ยมสี่เหลี่ยม และมีจุดรองรับอย่างง่ายโดยรอบมีน้ำหนักบรรทุกกระทำตรงกลางโดยไม่คำนึงถึงผลของช่องเปิดครอบหัวเสาจะได้ว่า

$$V_{flex} = m \left(\frac{8}{\frac{b}{c} - 1} + 2\pi \right) \quad (ก.1)$$

โดยที่ b = ความยาวของจุดรองรับของแผ่นพื้น

c = ความกว้างของเสา

m = กำลังต้านทานต่อการคดประลัยต่อความกว้างหนึ่งหน่วยของแผ่นพื้น

ซึ่งคำนวณโดย
$$m = \rho d^2 f_y \left(1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{f_c'} \right)$$

โดยที่ $\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$, ρ_x และ ρ_y เป็นอัตราส่วนของเหล็กเสริมในทิศทางที่ขนานกับแกน x และ แกน y ตามลำดับ $d = \frac{(d_x + d_y)}{2}$, d_x และ d_y เป็นความลึกประสิทธิภาพในทิศทาง x และ y ตามลำดับ, f_y เป็นกำลังที่จุดคดงของเหล็กเสริมต้านทานการคด

ก.2 กำลังต้านทานต่อการเฉือนทะลุ (Punching Shear Strength)

ก.2.1 สมการที่เสนอโดย Amin Ghali และคณะ ⁽¹⁹⁾

การออกแบบแบบเหล็กเสริม โดยใช้หมุ่รับแรงเฉือน A.Ghali และคณะ ⁽¹⁹⁾ ก็ได้กำหนดรูปแบบคล้ายกับ ACI318 การออกแบบหน้าตัดวงกตที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่นพื้นกำหนดโดย

$$V_u \leq \phi V_n \quad (ก.2)$$

ซึ่งค่า V_u เป็นค่าแรงเฉือนที่หน้าตัดวิกฤตเนื่องจากการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นพื้นและแรงในแนวแกนที่คูณเพิ่มของเสา หรือแรงในแนวแกนที่คูณเพิ่มรวมกับโมเมนต์

ที่หน้าตัดวิกฤตที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่นพื้นห่างจากหน้าเสา $d/2$ และที่หน้าตัดวิกฤตที่มีเส้นรอบรูป b_o น้อยที่สุดแต่จะต้องมีระยะห่างจากมุมตัวนอกสุดไม่น้อยกว่า $d/2$ จะต้องเป็นไปตามสมการที่ ก.2

A.Ghali และคณะ ได้เสนอสมการสำหรับคำนวณกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของคอนกรีตในกรณีที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไว้ดังนี้

$$V_n = 0.530 \left[1 + \frac{2(4-\alpha)}{3\beta_c} \right] \sqrt{f_c'} b_o d \quad (ก.3)$$

ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.530 \sqrt{f_c'} b_o d$ และในกรณีที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของหน้าตัดวิกฤตในบริเวณที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคำนวณได้โดย

$$V_n = V_c + V_s \quad (ก.4)$$

ไม่เกิน $2.121 \sqrt{f_c'} b_o d$ และ

$$V_c = 0.530 \left(1 + \frac{4-\alpha}{3\beta_c} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (ก.5)$$

ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.530 \sqrt{f_c'}$ ในส่วนของ V_s นั้นจากเอกสารอ้างอิงที่ 4 และ 5 ได้ทำการทดสอบตัวอย่างและกำหนดให้แนวการแตกร้าวในแนวทแยงบริเวณใกล้หัวเสาทำมุมประมาณ 45° กับแนวราบและตัดผ่านเหล็กรับแรงเฉือนที่อยู่ในระยะ d ดังนั้นถ้าสมมติว่าเหล็กเสริมรับแรงเฉือนถึงจุดกลางจะได้ว่า

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (ก.6)$$

ระยะห่าง s_o ระหว่างหมุดรับแรงเฉือนแถวแรกตามแนวเส้นรอบวงรอบหัวเสา จะต้องห่างจากหน้าเสาไม่น้อยกว่า $d/4$ และระยะห่างที่มากที่สุดของค่า s_o และ s ซึ่งเป็นค่าระยะห่างระหว่างหมุดแต่ละแถวในแนวเส้นรอบวง จะขึ้นอยู่กับค่า V_u ที่หน้าตัดวิกฤต $d/2$ จากหน้าเสา

$$\left. \begin{array}{l} s_o \leq 0.50d \\ s \leq 0.75d \end{array} \right\} \text{เมื่อ } \frac{V_u}{\phi} \leq 1.591\sqrt{f_c'b_o}d \quad (\text{ก.7})$$

และ

$$\left. \begin{array}{l} s_o \leq 0.35d \\ s \leq 0.50d \end{array} \right\} \text{เมื่อ } \frac{V_u}{\phi} > 1.591\sqrt{f_c'b_o}d \quad (\text{ก.8})$$

หมุดรับแรงเฉือนจะต้องจัดให้มีจนกระทั่งแรงเฉือน V_u ที่ระยะ $d/2$ จากหมุดรับแรงเฉือนตัวนอกสุดมีค่าไม่เกิน ϕV_u

โดยที่ α = ระยะระหว่างหน้าเสาและหน้าตัดวิกฤตหารด้วย d และต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1

β_c = เป็นอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของหน้าตัดเสาหรือพื้นที่หน้าตัดและมีค่ามากกว่า 2

b_o = เป็นความยาวของเส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤต

d = ความลึกประสิทธิผลของแผ่นพื้น

A_v = พื้นที่หน้าตัดของหมุดรับแรงเฉือนรอบหัวเสาแถวเดียวที่ขนานกับหน้าตัดวิกฤต

s = ระยะห่างระหว่างหมุดรับแรงเฉือนในแถวเดียวกัน

s_o = ระยะห่างระหว่างหมุดรับแรงเฉือนในแถวแรกกับหน้าเสา

ก.2.2 ACI318-95

ใน ACI318-95 นั้นยังไม่ได้มีข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนโดยใช้หมุดรับแรงเฉือน แต่ก็ได้กล่าวถึงไว้สั้นๆ ในหัวข้อ R11.12.3 นอกจากนี้หัวข้อ 11.5.3 ของ ACI318-95 กำหนดว่าเหล็กปลอก, ลวดหรือเหล็กเสริมอื่นๆที่จะนำมาใช้เป็นเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

จะต้องมีความยาวตลอดระยะ d ของพื้นและลึกลงเข้าไปในบริเวณรับแรงอัดของหน้าตัด และจะต้องจัดให้มีการยึดเหนี่ยวที่ปลายทั้งสองด้านเป็นไปตามหัวข้อ 12.13 ด้วยเพื่อที่จะทำให้สามารถรับแรงดึงจนถึงจุดคลากได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาใช้มุมรับแรงเฉือนซึ่งใช้มุมรับแรงเฉือนมีรายละเอียดตามรูปที่ 5 นั้นผลที่ได้ก็เป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI318 ด้วย ⁽²⁰⁾

A.Ghali ⁽²⁶⁾ ก็ได้แนะนำว่ามุมรับแรงเฉือนแต่ละตัวนั้นอาจจะพิจารณาเป็นเสมือนกับเหล็กปลอกหนึ่งขา ดังนั้นวิธีการออกแบบสามารถใช้ขั้นตอนเดียวกันกับการออกแบบเมื่อใช้มุมรับแรงเฉือนได้ ACI318 สมการที่ 11.1 กำหนดสมการพื้นฐานในการออกแบบไว้โดย

$$V_u \leq \phi V_n \quad (\text{ก.2})$$

ACI318-95 หัวข้อ 11.12 กำหนดกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตโดยเลือกใช้ค่าที่น้อยที่สุดต่อไปนี้

$$V_c = 1.061 \sqrt{f_c'} b_o d \quad (\text{ก.9.1})$$

$$V_c = 0.265 \left(2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (\text{ก.9.2})$$

$$V_c = 0.265 \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2 \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (\text{ก.9.3})$$

ซึ่งค่า f_c' = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ksc.)

β_c = อัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของพื้นที่หน้าตัด

α_s = 40 สำหรับเสาภายใน , 30 สำหรับเสาริม และ 20 สำหรับเสามุม

b_o = เส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤต

d = ความลึกประสิทธิผลของพื้น

ในกรณีที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของหน้าตัดวิกฤตในบริเวณที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนคำนวณโดย

$$V_n = V_c + V_s \quad (\text{ก.4})$$

ต้องมีค่าไม่เกิน $1.590 \sqrt{f_c'} b_o d$ โดยที่

$$V_c = 0.530\sqrt{f'_c}b_o d \quad (\text{ก.10})$$

และ

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (\text{ก.6})$$

โดยที่

A_v = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับรับแรงเฉือนรอบหัวเสาแถวเดียว
ที่ขนานกับหน้าตัดวิกฤต

s = ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแถวเดียวกัน

ถ้าพิจารณาหน้าตัดวิกฤตเกิดที่ระยะ $d/2$ จากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแถวนอกสุดกำหนดให้

$$V_c = 0.530\sqrt{f'_c}b_o d \quad (\text{ก.10})$$

ก.3 ผลของช่องเปิดบริเวณหัวเสา

ACI318-95 ได้กำหนดว่า ในกรณีที่มีช่องเปิดในแผ่นพื้นที่มีตำแหน่งที่ระยะน้อยกว่า 10 เท่าของความหนาของแผ่นพื้นจากหัวเสาหรือน้ำหนักที่กระทำเป็นจุด หรือ ในกรณีที่ช่องเปิดอยู่ในตำแหน่งของแถบเสา ในการคำนวณนั้นความยาวของเส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤตจะต้องถูกลดด้วยระยะระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเสาหรือน้ำหนักที่กระทำเป็นจุดไปสัมผัสกับของช่องเปิด ถ้าใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเส้นรอบรูปก็ให้ลดเพียงครั้งเดียว

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของตัวอย่างทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงกดประลัยที่ได้จากการทดสอบนั้น จะกำหนดให้ค่าตัวคูณลด $\phi=1$ เพราะว่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ นั้นจะเป็นค่าจริงได้จากการทดสอบ ข้อมูลของตัวอย่างทดสอบกำหนดขนาดเสา 25x25 ซม. ขนาดของช่องเปิด 15x15 ซม. จำนวน 2 ช่อง ความหนาของพื้น 18 ซม. และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 2.5 ซม. $f'_c=360$ ksc $f_y=4139$ ksc. และ $f_{ys}=4100$ ksc.

ข.1 การคำนวณกำลังต้านทานต่อโมเมนต์ดัดประลัย

ความหนาของแผ่นพื้นกำหนดใช้ 18.00 ซม. และความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กใช้ 2.50 ซม. สมมติใช้เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. ดังนั้นความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ $18.00-2.50-2.00 = 13.50$ ซม.

ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในทิศทางแกน x 19-DB20 ดังนั้น $A_{sx} = 59.279$ ตร.ซม.

$$\text{จะได้ว่า } \rho_x = 0.0221$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในทิศทางแกน y 18-DB20 ดังนั้น $A_{sy} = 56.538$ ตร.ซม.

$$\text{จะได้ว่า } \rho_y = 0.0209$$

$$\text{ดังนั้น } \rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} = 0.0215$$

$$\text{จากสมการ } V_{flex} = m \left(\frac{8}{\frac{b}{c} - 1} + 2\pi \right)$$

โดยที่ $b =$ ความยาวของจตุรกรงรับของแผ่นพื้น

$c =$ ความกว้างของเสา

$m =$ กำลังต้านทานต่อการดัดประลัยต่อความกว้างหนึ่งหน่วยของแผ่นพื้น

$$\text{ซึ่งคำนวณโดย } m = \rho d^2 f_y \left(1 - 0.59 \frac{\rho f_y}{f'_c} \right)$$

แทนค่า $b = 200.00$ ซม. และ $c = 25.00$ ซม. จะได้ว่า

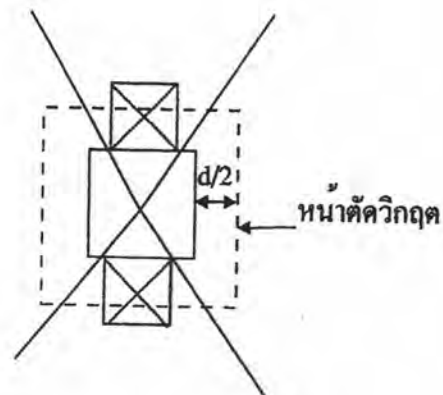
$$\begin{aligned} m &= (0.0215)(13.5^2)(4139) \left(1 - 0.59 \frac{(0.0215)(4139)}{360} \right) \\ &= 13852.861 \text{ kgf-cm/cm} \end{aligned}$$

$$V_{flex} = (13852.861) \left(\frac{8}{\frac{200}{25} - 1} + 2\pi \right)$$

$$= 102871.934 \text{ kgf.}$$

ข.2 การคำนวณกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนตามวิธีของ A.Ghali และคณะ

ข.2.1 ตัวอย่าง S1



รูปที่ ข.1 การคำนวณหน้าตัดวิกฤตของตัวอย่าง S1

จากรูปที่ ข.1 พิจารณาความยาวของเส้นรอบรูปประสิทธิผลเนื่องจากผลของช่องเปิดบริเวณหัวเสาที่ระยะ $d/2$ จะได้ว่า

$$b_o = (25.00 + 13.5)4 - 4(11.50) = 107.80 \text{ ซม.}$$

$$\alpha = \frac{6.75}{13.5} = 0.5 < 1 \text{ ดังนั้นใช้ } \alpha = 1$$

$$\beta = \frac{25.0}{25.0} = 1 < 2 \text{ ดังนั้นใช้ } \beta = 2$$

$$V_c = 0.530 \left[1 + \frac{2(4 - \alpha)}{3\beta_c} \right] \sqrt{f_c'} b_o d$$

$$= 0.53 \left[1 + \frac{2(4 - 1)}{3(2)} \right] \sqrt{360} (107.8) (13.50)$$

$$= 29,269.117 \text{ kgf.} < V_{flex}$$

ข.2.2 ตัวอย่าง S2

ในตัวอย่างนี้จะใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.27 ซม. และมีพื้นที่หน้าตัดต่อตัว 1.267 ตรซม. $A_v=8(1.267)=10.136$ ตรซม. เมื่อพิจารณาหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่ระยะ $d/2$ ดังนี้

$$b_o=(25.00+13.5)4-2(11.5)=131.00\text{ซม.}$$

$$\alpha = \frac{6.75}{13.5} = 0.5 < 1 \quad \text{ดังนั้นใช้ } \alpha = 1$$

$$\beta = \frac{25.0}{25.0} = 1 < 2 \quad \text{ดังนั้นใช้ } \beta = 2$$

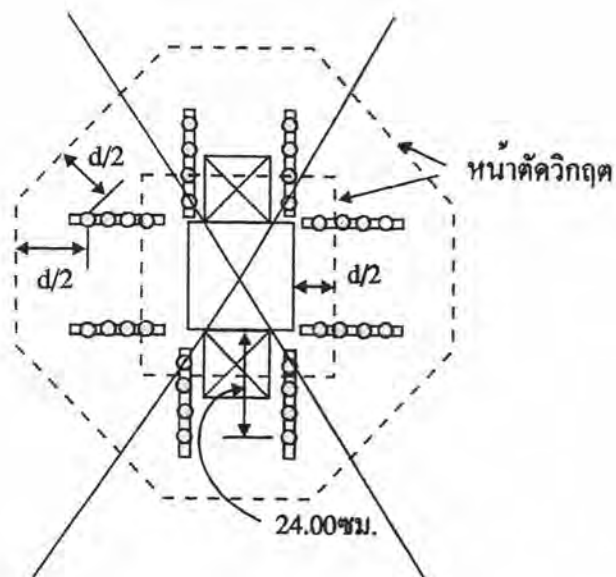
$$V_c = 0.530 \left[1 + \frac{(4-\alpha)}{3\beta_c} \right] \sqrt{f_c} b_o d$$

$$= 0.53 \left[1 + \frac{(4-1)}{3(2)} \right] \sqrt{360} (131.0)(13.5) = 26676.160 \text{ kgf.}$$

$$V_s = \frac{A_v f_{ys} d}{s} = \frac{(10.136)(4100)(13.5)}{6.00} = 94394.034 \text{ kgf.}$$

$$\text{ดังนั้น } V_n = V_c + V_s = 26676.160 + 94394.034$$

$$= 121070.194 \text{ kgf}$$



รูปที่ ข.2 การคำนวณหน้าตัดวิกฤตของตัวอย่าง S2

ในกรณีที่พิจารณาหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นนอกมุมรับแรงเฉือนที่ระยะ $d/2$ จากมุมรับแรงเฉือนแถว
นอกสุด โดยวิธีการวัดจากมาตราส่วนจริงจากรูปที่ ข.2 จะได้ว่า

$$b_o = 280.500 - 2(24.71) = 231.08 \text{ ซม.}$$

$$\alpha = \frac{(24.00 + 6.75)}{13.50} = 2.278$$

$$\beta_c = 2$$

$$V_c = 0.530 \left[1 + \frac{2(4 - \alpha)}{3\beta_c} \right] \sqrt{f_c'} b_o d$$

$$= 0.53 \left[1 + \frac{2(4 - 2.278)}{3(2)} \right] \sqrt{360} (231.08) (13.50) = 49377.372 \text{ kgf.} < V_{flex}$$

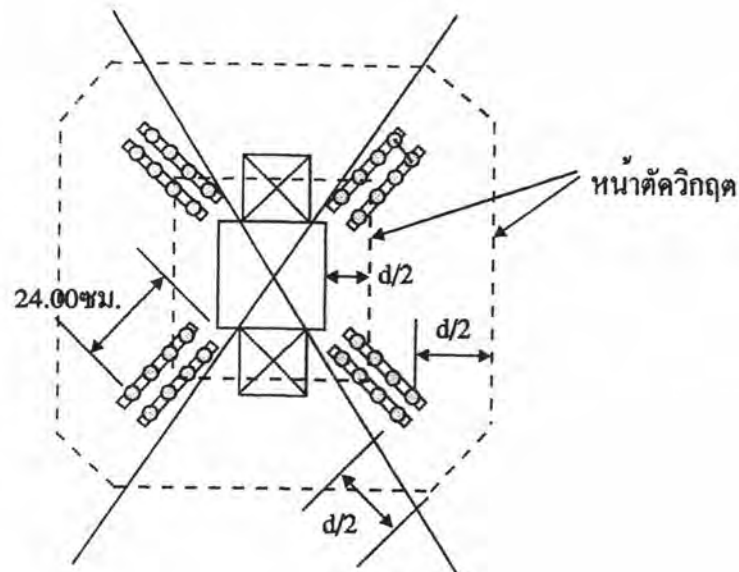
$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{62150.00}{49377.372} = 1.259$$

ถ้าไม่พิจารณาผลของช่องเปิดถ้าหน้าตัด विकฤตเกิดขึ้นรอบนอกช่องเปิด โดยวิธีการวัดจาก
มาตราส่วนจริงตามรูปที่ ข.2 จะได้ $b_o = 280.50$ ซม. ดังนั้น

$$V_{calc} = 59,937.480 \text{ kgf.}$$

$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{62150.00}{59937.480} = 1.034$$

ข.2.3 ตัวอย่าง S3



รูปที่ข.3 การคำนวณหน้าตัด विकฤตของตัวอย่าง S3

ในกรณีหน้าตัดวิกฤตเกิดที่ระยะ $d/2$ ก็คำนวณเช่นเดียวกับตัวอย่าง S2 แต่ถ้าหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่ระยะ $d/2$ จากมุมรับแรงเฉือนแกนออกสุดโดยวิธีการวัดจากมาตราส่วนจริงตามรูปที่ ข.2 จะได้ว่า

$$b_o = 287.50 - 2(23.00) = 241.50 \text{ ซม.}$$

$$\alpha = \frac{(24.00 + 6.75)}{13.50} = 2.278$$

$$\beta_c = 2$$

$$V_c = 0.530 \left[1 + \frac{2(4 - \alpha)}{3\beta_c} \right] \sqrt{f_c'} b_o d$$

$$= 0.530 \left[1 + \frac{2(4 - 2.278)}{3(2)} \right] \sqrt{360} (241.515)(13.50)$$

$$= 51603.327 \text{ kgf.}$$

$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{66000.00}{51603.327} = 1.279$$

ถ้าไม่พิจารณาผลของช่องเปิด เส้นรอบรูปที่หน้าตัดวิกฤตตามรูปวัดจากมาตราส่วนตามรูป ข.3 จะได้ว่า $b_o = 287.50$ ซม. จะได้ว่า

$$V_{calc} = 61,43.240 \text{ kgf.}$$

$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{66000.00}{61436.240} = 1.074$$

ข.3 การคำนวณตามหัวข้อ 11.12.3.2 ของ ACI318-95

ข.3.1 ตัวอย่าง S2

เมื่อหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่ $d/2$ จากขอบเสา

$$b_o = 131.00 \text{ ซม. ดังนั้น}$$

$$V_c = 0.530 \sqrt{360} (131.00)(13.50) = 17784.112 \text{ kgf.}$$

$$V_s = 93726.00 \text{ kgf.}$$

$$V_n = V_c + V_s = 17784.112 + 93726.00 = 111510.112 \text{ kgf.}$$

เมื่อหน้าตัดวิกฤตเกิดขึ้นที่ระยะ $d/2$ จากมุมรับแรงเฉือนตัวนอกสุด $b_o = 231.1$ ซม.

$$V_c = 0.530 \sqrt{360} (231.074)(13.50)$$

$$= 31373.346 \text{ kgf.}$$

$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{62150.00}{31373.346} = 1.981$$

เมื่อไม่พิจารณาผลของช่องเปิด จะได้ $b_o = 280.50$ ซม.

$$\text{ดังนั้น } V_u = 0.530\sqrt{360}(280.50)(13.50)$$

$$= 38079.721 \text{ kgf.}$$

$$\frac{V_{test}}{V_{calc}} = \frac{62150.00}{38079.721} = 1.628$$

ตารางข้อมูล

ตารางที่ ก.1 ตารางข้อมูลของแรงกดและค่า Dial gage จากการทดสอบตัวอย่าง S1

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.05 | -0.08 | 0 | -0.04 | -0.05 | 0.07 |
| 4.11 | -0.18 | 0 | -0.08 | -0.08 | 0.14 |
| 6.07 | -0.29 | 0 | -0.12 | -0.12 | 0.21 |
| 8.13 | -0.39 | 0 | -0.17 | -0.19 | 0.28 |
| 10.03 | -0.50 | 0 | -0.23 | -0.22 | 0.33 |
| 12.09 | -0.62 | 0 | -0.27 | -0.27 | 0.37 |
| 14.01 | -0.76 | 0 | -0.32 | -0.30 | 0.44 |
| 16.04 | -0.92 | 0 | -0.41 | -0.34 | 0.51 |
| 18.07 | -1.10 | 0 | -0.46 | -0.36 | 0.58 |
| 20.09 | -1.31 | 0 | -0.53 | -0.41 | 0.64 |
| 22.15 | -1.51 | 0 | -0.60 | -0.46 | 0.69 |
| 24.01 | -1.73 | 0 | -0.65 | -0.50 | 0.74 |
| 26.01 | -1.99 | 0 | -0.72 | -0.58 | 0.78 |
| 28.03 | -2.25 | 0 | -0.79 | -0.61 | 0.84 |
| 30.23 | -2.51 | 0 | -0.84 | -0.66 | 0.89 |
| 32.19 | -2.78 | 0 | -0.90 | -0.71 | 0.94 |
| 34.05 | -3.07 | 0 | -0.94 | -0.74 | 0.98 |
| 36.01 | -3.37 | 0 | -0.99 | -0.79 | 1.03 |
| 38.10 | -3.66 | 0 | -1.05 | -0.84 | 1.08 |
| 40.12 | -3.97 | 0 | -1.11 | -0.88 | 1.13 |
| 42.25 | -4.27 | 0 | -1.16 | -0.93 | 1.16 |
| 44.18 | -4.53 | -0.02 | -1.21 | -0.97 | 1.19 |
| 46 | -4.84 | -0.06 | -1.26 | -1.01 | 1.25 |
| 48.06 | -5.15 | -0.09 | -1.29 | -1.05 | 1.28 |
| 50.09 | -5.50 | -0.12 | -1.36 | -1.09 | 1.31 |
| 52.28 | -5.9 | -0.16 | -1.41 | -1.14 | 1.37 |

ตารางที่ ค.1(ต่อ)

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 54.08 | -0.63 | -0.19 | -1.45 | -1.18 | 1.37 |
| 56.01 | -6.74 | -0.23 | -1.51 | -1.23 | 1.38 |
| 58.10 | -7.18 | -0.27 | -1.54 | -1.27 | 1.41 |
| 28.53 | -8.01 | 0 | -1.10 | -0.80 | 1.03 |

ตารางที่ ก.2 ตารางข้อมูลของแรงกดและค่า Dial gage จากการทดสอบตัวอย่าง S2

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.22 | -0.08 | -0.03 | -0.01 | -0.05 | -0.05 |
| 4.11 | -0.17 | -0.06 | -0.05 | -0.10 | -0.07 |
| 6.24 | -0.23 | -0.08 | -0.08 | -0.12 | -0.10 |
| 8.23 | -0.32 | -0.1 | -0.13 | -0.16 | -0.13 |
| 10.36 | -0.4 | -0.13 | -0.17 | -0.19 | -0.17 |
| 12.09 | -0.48 | -0.15 | -0.20 | -0.22 | -0.19 |
| 14.08 | -0.64 | -0.19 | -0.24 | -0.27 | -0.22 |
| 15.97 | -0.78 | -0.22 | -0.28 | -0.32 | -0.26 |
| 18.2 | -1.06 | -0.27 | -0.33 | -0.39 | -0.31 |
| 20.09 | -1.18 | -0.29 | -0.36 | -0.42 | -0.34 |
| 22.09 | -1.40 | -0.33 | -0.40 | -0.48 | -0.39 |
| 24.15 | -1.66 | -0.37 | -0.44 | -0.53 | -0.42 |
| 26.14 | -1.92 | -0.42 | -0.48 | -0.58 | -0.45 |
| 28.13 | -2.16 | -0.46 | -0.52 | -0.64 | -0.49 |
| 30.09 | -2.41 | -0.50 | -0.55 | -0.67 | -0.52 |
| 32.09 | -2.73 | -0.55 | -0.59 | -0.73 | -0.55 |
| 34.15 | -2.98 | -0.58 | -0.62 | -0.76 | -0.58 |
| 36.17 | -3.29 | -0.63 | -0.65 | -0.81 | -0.62 |
| 38.16 | -3.55 | -0.67 | -0.68 | -0.85 | -0.65 |
| 40.12 | -3.92 | -0.72 | -0.73 | -0.92 | -0.68 |
| 42.12 | -4.16 | -0.76 | -0.76 | -0.95 | -0.71 |
| 44.14 | -4.45 | -0.79 | -0.79 | -0.99 | -0.74 |
| 46.24 | -4.81 | -0.85 | -0.83 | -1.05 | -0.77 |
| 48.16 | -5.09 | -0.90 | -0.86 | -1.10 | -0.80 |
| 50.16 | -5.41 | -0.94 | -0.89 | -1.14 | -0.83 |
| 52.12 | -5.78 | -0.98 | -0.92 | -1.19 | -0.86 |

ตารางที่ ก.2(ต่อ)

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 54.14 | -6.15 | -1.03 | -0.96 | -1.24 | -0.89 |
| 56.17 | -6.51 | -1.07 | -0.99 | -1.29 | -0.92 |
| 58.16 | -6.88 | -1.12 | -1.03 | -1.34 | -0.94 |
| 60.16 | -7.23 | -1.15 | -1.05 | -1.37 | -0.98 |
| 62.15 | -7.76 | -1.21 | -1.09 | -1.44 | -1.01 |
| 59.72 | -8.71 | -1.16 | -1.09 | -1.45 | -1.05 |
| 56.37 | -9.00 | -1.12 | -1.05 | -1.40 | -1.04 |
| 53.11 | -9.18 | -1.04 | -1.02 | -1.36 | -1.02 |
| 49.53 | -9.50 | -0.95 | -0.97 | -1.33 | -1.03 |
| 47.33 | -9.92 | -0.89 | -0.95 | -1.31 | -1.06 |
| 45.91 | -11.22 | -0.82 | -0.93 | -1.32 | -1.23 |
| 43.95 | -12.76 | -0.75 | -0.92 | -1.29 | -1.84 |
| 42.02 | -13.98 | -0.71 | -0.91 | -1.25 | -2.9 |
| 40.29 | -17.07 | -0.60 | -0.91 | -1.26 | -4.41 |
| 38.1 | -17.50 | -0.58 | -0.95 | -1.26 | -4.55 |
| 35.91 | -20.76 | 0.44 | -1.02 | -0.93 | -6.48 |
| 34.08 | -20.89 | 0.51 | -1.02 | -1.18 | -6.66 |

ตารางที่ ค.3 แสดงแรงกดและความเครียดที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนตัวอย่าง S2 หมุดแถบ a

| แรงกด (ตัน) | หมุด a1 (microstrain) | หมุด a2 (microstrain) | หมุด a3 (microstrain) | หมุด a4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.11 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 6.24 | -3 | 0 | 1 | 0 |
| 8.23 | -7 | 0 | 4 | 0 |
| 10.36 | -11 | 0 | 9 | 0 |
| 12.09 | -14 | 0 | 13 | 3 |
| 14.08 | -17 | 1 | 21 | 29 |
| 15.97 | -20 | 3 | 29 | 46 |
| 18.20 | -14 | 15 | 36 | 65 |
| 20.09 | -3 | 20 | 36 | 73 |
| 22.09 | 12 | 27 | 42 | 87 |
| 24.15 | 35 | 33 | 48 | 103 |
| 26.14 | 62 | 41 | 55 | 120 |
| 28.13 | 86 | 51 | 63 | 134 |
| 30.09 | 111 | 60 | 73 | 139 |
| 32.09 | 127 | 70 | 84 | 137 |
| 34.15 | 136 | 78 | 94 | 129 |
| 36.17 | 150 | 88 | 100 | 132 |
| 38.16 | 165 | 99 | 105 | 136 |
| 40.12 | 180 | 111 | 110 | 141 |
| 42.12 | 191 | 120 | 115 | 145 |
| 44.14 | 203 | 130 | 124 | 152 |
| 46.24 | 217 | 141 | 131 | 157 |
| 48.16 | 229 | 154 | 141 | 165 |
| 50.16 | 243 | 169 | 151 | 172 |

ตารางที่ ค.3(ต่อ)

| แรงกด(ตัน) | หมวด a1 (microstrain) | หมวด a2 (microstrain) | หมวด a3 (microstrain) | หมวด a4 (microstrain) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 52.12 | 260 | 182 | 160 | 183 |
| 54.14 | 287 | 195 | 170 | 194 |
| 56.17 | 313 | 209 | 182 | 204 |
| 58.16 | 337 | 224 | 197 | 213 |
| 60.16 | 334 | 239 | 226 | 224 |
| 62.15 | 325 | 283 | 350 | 290 |
| 59.72 | 245 | 333 | 441 | 465 |
| 56.37 | 235 | 324 | 426 | 452 |
| 53.11 | 216 | 284 | 410 | 438 |
| 49.53 | 198 | 260 | 386 | 425 |
| 47.33 | 190 | 240 | 382 | 407 |
| 45.91 | 186 | 244 | 390 | 410 |
| 43.95 | 188 | 239 | 397 | 412 |
| 42.02 | 187 | 233 | 398 | 411 |
| 40.29 | 189 | 211 | 411 | 413 |
| 38.10 | 189 | 204 | 414 | 413 |
| 35.91 | 195 | 205 | 420 | 419 |
| 34.08 | 196 | 200 | 417 | 419 |

ตารางที่ ก.4 แสดงแรงกดและความเครียดที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนตัวอย่าง S2 หมุดแถบ b

| แรงกด (ตัน) | หมุด b1 (microstrain) | หมุด b2 (microstrain) | หมุด b3 (microstrain) | หมุด b4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.22 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 4.11 | -2 | -1 | 0 | 3 |
| 6.24 | -4 | -2 | -1 | 1 |
| 8.23 | -4 | -4 | -2 | 1 |
| 10.36 | -2 | 0 | 2 | 3 |
| 12.09 | 20 | 0 | 4 | 3 |
| 14.08 | 45 | 0 | 6 | 11 |
| 15.97 | 63 | 0 | 7 | 10 |
| 18.20 | 75 | 3 | 8 | 7 |
| 20.09 | 81 | 4 | 8 | 7 |
| 22.09 | 96 | 6 | 9 | 20 |
| 24.15 | 113 | 12 | 12 | 18 |
| 26.14 | 114 | 14 | 13 | 14 |
| 28.13 | 126 | 18 | 14 | 14 |
| 30.09 | 134 | 22 | 17 | 17 |
| 32.09 | 141 | 26 | 19 | 17 |
| 34.15 | 136 | 30 | 21 | 16 |
| 36.17 | 129 | 36 | 26 | 19 |
| 38.16 | 127 | 41 | 29 | 28 |
| 40.12 | 113 | 46 | 33 | 41 |
| 42.12 | 111 | 51 | 35 | 42 |
| 44.14 | 111 | 55 | 35 | 43 |
| 46.24 | 107 | 58 | 39 | 44 |
| 48.16 | 110 | 63 | 42 | 45 |
| 50.16 | 122 | 70 | 47 | 42 |

ตารางที่ ค.4(ต่อ)

| แรงกด (ตัน) | หมวด b1 (microstrain) | หมวด b2 (microstrain) | หมวด b3 (microstrain) | หมวด b4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 52.12 | 131 | 77 | 52 | 45 |
| 54.14 | 137 | 82 | 57 | 43 |
| 56.17 | 140 | 85 | 62 | 42 |
| 58.16 | 146 | 92 | 68 | 46 |
| 60.16 | 145 | 104 | 82 | 46 |
| 62.15 | 148 | 155 | 230 | 108 |
| 59.72 | 144 | 191 | 329 | 295 |
| 56.37 | 163 | 198 | 319 | 279 |
| 53.11 | 155 | 194 | 316 | 282 |
| 49.53 | 145 | 187 | 315 | 285 |
| 47.33 | 146 | 183 | 314 | 288 |
| 45.91 | 195 | 183 | 321 | 306 |
| 43.95 | 151 | 184 | 325 | 328 |
| 42.02 | 187 | * | 322 | 343 |
| 40.29 | 183 | * | 324 | 380 |
| 38.10 | 177 | * | 326 | 391 |
| 35.91 | 147 | * | 337 | 423 |
| 34.08 | 145 | * | 331 | 418 |

ตารางที่ ค.5 ตารางข้อมูลของแรงกดและค่า Dial gage จากการทดสอบตัวอย่าง S3

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.02 | -0.06 | 0.05 | -0.01 | 0.01 | -0.05 |
| 4.11 | -0.15 | 0.12 | -0.04 | -0.02 | -0.1 |
| 6.14 | -0.28 | 0.18 | -0.14 | -0.07 | -0.17 |
| 8.17 | -0.38 | 0.25 | -0.20 | -0.11 | -0.23 |
| 10.13 | -0.52 | 0.31 | -0.26 | -0.16 | -0.28 |
| 12.12 | -0.70 | 0.36 | -0.33 | -0.19 | -0.34 |
| 14.08 | -0.90 | 0.44 | -0.46 | -0.25 | -0.40 |
| 16.11 | -1.11 | 0.50 | -0.57 | -0.31 | -0.46 |
| 18.13 | -1.39 | 0.56 | -0.68 | -0.37 | -0.52 |
| 20.09 | -1.65 | 0.61 | -0.76 | -0.42 | -0.58 |
| 22.42 | -1.97 | 0.67 | -0.87 | -0.47 | -0.65 |
| 24.21 | -2.23 | 0.71 | -0.94 | -0.51 | -0.70 |
| 26.4 | -2.56 | 0.77 | -1.03 | -0.56 | -0.76 |
| 28.10 | -2.84 | 0.81 | -1.10 | -0.51 | -0.81 |
| 30.39 | -3.16 | 0.84 | -1.18 | -0.57 | -0.86 |
| 32.22 | -3.46 | 0.89 | -1.23 | -0.61 | -0.91 |
| 34.11 | -3.67 | 0.92 | -1.28 | -0.64 | -0.95 |
| 36.04 | -3.95 | 0.96 | -1.34 | -0.74 | -0.99 |
| 38.10 | -4.28 | 0.99 | -1.39 | -0.78 | -1.03 |
| 40.19 | -4.61 | 1.03 | -1.44 | -0.80 | -1.08 |
| 42.12 | -4.89 | 1.07 | -1.49 | -0.84 | -1.12 |
| 44.04 | -5.18 | 1.10 | -1.55 | -0.87 | -1.15 |
| 46.20 | -5.59 | 1.10 | -1.61 | -0.92 | -1.20 |
| 48.03 | -6.26 | * | -1.67 | -0.97 | -1.25 |
| 49.86 | -6.90 | * | -1.73 | -1.02 | -1.30 |
| 51.98 | -7.07 | * | -1.79 | -1.07 | -1.35 |

ตารางที่ ค.5(ต่อ)

| แรงกด(ตัน) | Dial gage1 | Dial gage2 | Dial gage3 | Dial gage4 | Dial gage5 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 53.88 | -7.26 | * | -1.85 | -1.12 | -1.40 |
| 56.04 | -7.70 | * | -1.91 | -1.17 | -1.45 |
| 57.93 | -8.20 | * | -1.97 | -1.22 | -1.50 |
| 60.06 | -8.38 | * | -2.03 | -1.27 | -1.55 |
| 61.98 | -8.81 | * | -2.09 | -1.32 | -1.60 |
| 64.08 | -9.26 | * | -2.15 | -1.37 | -1.65 |
| 66.00 | -9.81 | * | -2.21 | -1.42 | -1.70 |
| 63.31 | -10.45 | * | -2.27 | -1.47 | -1.75 |
| 58.13 | -10.68 | * | -2.33 | -1.52 | -1.80 |
| 56.07 | -10.85 | * | -2.39 | -1.57 | -1.85 |
| 53.61 | -11.20 | * | -2.45 | -1.62 | -1.90 |
| 51.88 | -11.49 | * | -2.51 | -1.67 | -1.95 |
| 49.86 | -11.62 | * | -2.57 | -1.72 | -2.00 |
| 47.53 | -14.34 | * | -2.63 | -1.77 | -2.05 |
| 43.15 | -14.57 | * | -2.69 | -1.82 | -2.10 |
| 41.75 | -15.41 | * | -2.75 | -1.87 | -2.15 |
| 39.66 | -16.42 | * | -2.81 | -1.92 | -2.20 |
| 37.63 | -17.26 | * | -2.87 | -1.97 | -2.25 |
| 35.87 | -18.16 | * | -2.93 | -2.02 | -2.30 |
| 34.24 | -18.47 | * | -2.99 | -2.07 | -2.35 |

ตารางที่ ค.6 แสดงแรงกดและความเครียดที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนตัวอย่าง S3 หมุดแถบ c

| แรงกด (ตัน) | หมุด c1 (microstrain) | หมุด c2 (microstrain) | หมุด c3 (microstrain) | หมุด c4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.02 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.11 | 0 | -1 | -1 | 0 |
| 6.14 | -1 | -3 | -3 | -1 |
| 8.17 | -1 | -4 | -4 | -2 |
| 10.13 | -2 | -6 | -6 | -4 |
| 12.12 | -4 | -7 | -8 | -6 |
| 14.08 | -8 | -10 | -8 | -7 |
| 16.11 | -12 | -12 | -9 | -11 |
| 18.13 | -16 | -17 | -13 | -17 |
| 20.09 | -22 | -21 | -13 | -19 |
| 22.42 | -25 | -20 | -7 | -20 |
| 24.21 | -26 | -17 | -2 | -22 |
| 26.4 | -27 | -15 | 0 | -24 |
| 28.10 | -25 | -11 | 5 | -26 |
| 30.39 | -25 | -7 | 11 | -28 |
| 32.22 | -22 | 0 | 19 | -28 |
| 34.11 | -21 | 7 | 26 | -28 |
| 36.04 | -17 | 18 | 36 | -26 |
| 38.10 | -11 | 39 | 51 | -21 |
| 40.19 | -3 | 64 | 66 | -17 |
| 42.12 | 4 | 90 | 84 | -12 |
| 44.04 | 16 | 124 | 104 | -5 |
| 46.20 | 34 | 187 | 138 | -4 |
| 48.03 | 57 | 211 | 148 | 13 |
| 49.86 | 78 | 251 | 181 | 25 |

ตารางที่ ก.6(ต่อ)

| แรงกด(ตัน) | หมวด c1 (microstrain) | หมวด c2 (microstrain) | หมวด c3 (microstrain) | หมวด c4 (microstrain) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 51.98 | 102 | 294 | 218 | 40 |
| 53.88 | 127 | 325 | 245 | 52 |
| 56.04 | 167 | 372 | 288 | 74 |
| 57.93 | 194 | 404 | 317 | 90 |
| 60.06 | 224 | 442 | 352 | 106 |
| 61.98 | 264 | 485 | 394 | 134 |
| 64.08 | 301 | 533 | 432 | 161 |
| 66.00 | 356 | 608 | 496 | 215 |
| 63.31 | 396 | 737 | 575 | 347 |
| 58.13 | 429 | 785 | 593 | 381 |
| 56.07 | 430 | 791 | 596 | 395 |
| 53.61 | 414 | 780 | 575 | 478 |
| 51.88 | 408 | 776 | 571 | 491 |
| 49.86 | 402 | 766 | 562 | 490 |
| 47.53 | 384 | 789 | 584 | 443 |
| 43.15 | 372 | 764 | 570 | 426 |
| 41.75 | 364 | 761 | 573 | 390 |
| 39.66 | 363 | 746 | 552 | 363 |
| 37.63 | 363 | 724 | 530 | 348 |
| 35.87 | 363 | 708 | 522 | 349 |
| 34.24 | 361 | 694 | 525 | 362 |

ตารางที่ ค.7 แสดงแรงกดและความเครียดที่เกิดขึ้นในหมุดรับแรงเฉือนตัวอย่าง S3 หมุดแถบ d

| แรงกด (ตัน) | หมุด d1 (microstrain) | หมุด d2 (microstrain) | หมุด d3 (microstrain) | หมุด d4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.02 | -26 | -14 | 3 | 0 |
| 4.11 | -16 | -10 | 37 | 0 |
| 6.14 | -13 | -8 | 10 | 0 |
| 8.17 | -10 | -7 | 9 | 0 |
| 10.13 | 0 | -3 | 1 | -1 |
| 12.12 | 0 | -3 | 3 | -2 |
| 14.08 | -26 | -14 | -1 | -6 |
| 16.11 | -27 | -14 | -2 | -12 |
| 18.13 | -29 | -16 | 6 | -18 |
| 20.09 | -29 | -16 | -10 | -20 |
| 22.42 | -30 | -16 | 41 | -14 |
| 24.21 | -30 | -16 | -5 | -11 |
| 26.4 | -33 | -16 | -4 | -7 |
| 28.10 | -33 | -18 | 0 | -2 |
| 30.39 | -33 | -17 | 28 | 2 |
| 32.22 | -34 | -16 | -35 | 8 |
| 34.11 | -33 | -17 | 9 | 11 |
| 36.04 | -33 | -18 | 14 | 16 |
| 38.10 | -33 | -17 | 23 | 24 |
| 40.19 | -34 | -18 | 30 | 32 |
| 42.12 | -33 | -16 | 38 | 37 |
| 44.04 | -33 | -16 | 86 | 44 |
| 46.20 | -30 | -15 | 40 | 53 |
| 48.03 | -34 | -14 | 22 | 44 |
| 49.86 | -33 | -16 | 31 | 49 |

ตารางที่ ค.7(ต่อ)

| แรงกด (ตัน) | หมวด d1 (microstrain) | หมวด d2 (microstrain) | หมวด d3 (microstrain) | หมวด d4 (microstrain) |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 51.98 | -33 | -17 | 36 | 55 |
| 53.88 | -34 | -17 | 36 | 59 |
| 56.04 | -34 | -17 | 44 | 63 |
| 57.93 | -33 | -17 | 58 | 68 |
| 60.06 | -33 | -18 | 50 | 74 |
| 61.98 | -34 | -17 | 53 | 81 |
| 64.08 | -34 | -17 | 55 | 90 |
| 66.00 | -33 | -16 | 62 | 104 |
| 63.31 | -26 | -15 | 322 | 166 |
| 58.13 | -4 | -4 | 450 | 171 |
| 56.07 | -3 | -4 | 491 | 168 |
| 53.61 | -3 | -4 | 446 | 135 |
| 51.88 | -33 | -16 | 449 | 133 |
| 49.86 | -33 | -17 | 451 | 132 |
| 47.53 | -8 | -7 | 463 | 138 |
| 43.15 | -4 | -4 | 465 | 135 |
| 41.75 | -25 | -14 | 436 | 133 |
| 39.66 | -19 | -12 | 381 | 121 |
| 37.63 | -18 | -11 | 374 | 111 |
| 35.87 | -31 | -16 | 369 | 93 |
| 34.24 | -34 | -16 | 359 | 83 |

หมายเหตุ

*ข้อมูลใช้ไม่ได้

Dial gage No.1 ติดตั้งที่กึ่งกลางของแผ่นพื้น

ประวัติของผู้เขียน

นายสมพร หนองฝื่อ เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2509 ที่ อ.อุบลรัตน์ จ.ขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2532 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2534

