หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

การรับแรงด้านข้างของผนังก่ออิฐ อาจคำนวณหาความแข็งแรงโดยวิธีประมาณ (Approximate Method) ทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้กับผนังก่ออิฐนั้น จะต้องอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า "ผนังก่ออิฐมีความยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง (Linearly Elastic) และมีความยืดหยุ่นเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic Elastic)[13] ในการคำนวณจะต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมในการรับแรงต่าง ๆ ของผนังก่ออิฐมาประกอบด้วย ผนังก่ออิฐเมื่อบรรจุอยู่ในโครงข้อแข็งซึ่งประกอบด้วยเสาและคานสามารถรับแรงเฉือนได้สูงพอสมควร โดยอาศัยปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างโครงข้อแข็งและผนังก่ออิฐ การวิบัติที่เกิดขึ้นอาจสมมุติให้เป็นผลเนื่องมาจากแรงอัด (Compressive Failure) โดยผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งจะทำหน้าที่เป็นค้ำยันเสมือน (Equivalent Strut)[19] อย่างไรก็ดีในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาสติฟเนส (Stiffness) ของโครงข้อแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่จะถือว่าแรงที่เกิดขึ้นจะถ่ายจากโครงข้อแข็งเข้าสู่ผนังก่ออิฐโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1 ทฤษฎีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือน (Brick Shear Walls)

ผนังก่ออิฐซึ่งรับแรงด้านข้างหรือแรงเฉือนนั้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยด้วยวิธีการทดสอบต่าง ๆ กัน ผลการทดสอบและวิจัยพบว่า ทฤษฎีกำลังของวัสดุ (Strength of Material) สามารถนำมาใช้ประมาณกำลังความแข็งแรงของผนังก่ออิฐซึ่งรับแรงด้านข้างได้[11,12,13] ทฤษฎีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือนสามารถจำแนกได้ 3 กรณี ดังนี้

2.1.1 ทฤษฎีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือน เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงดัด (Flexural Failure) ผนังก่ออิฐซึ่งมีความสูงของผนังมากกว่าความยาว และผนังก่ออิฐได้ยึดติดแน่นกับฐาน ในลักษณะเช่นนี้ผนังก่ออิฐจะมีลักษณะเหมือนคานยื่น (Cantilever Beam) ดังรูปที่ 2.2 โดยที่การวิบัติอันสืบเนื่องมาจากแรงดัด จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวใกล้ ๆ ฐานของผนัง ทั้งนี้เพราะหน่วยแรงดึงเนื่องจากแรงดัดจะสูงสุดบริเวณนั้น และแนวรอยแตกร้าวจะขนานกับฐานของผนังก่ออิฐนั้น โดยประมาณ หลังจากการวิบัติแล้วกำลังความต้านทานของผนังก่ออิฐจะหมดไป เหลือเฉพาะแรงเสียดทานระหว่างผนังก่ออิฐเท่านั้น ผนังก่ออิฐที่เกิดการวิบัติเนื่องจากการดัด จะรับแรงด้านข้างได้ต่ำมาก การทำนายพฤติกรรมของผนังก่ออิฐ สามารถใช้ทฤษฎีกำลังของวัสดุ โดยสมมุติให้ผนังก่ออิฐเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) วัสดุนั้นจะต้องเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law) และระนาบหน้าตัดก่อนและหลังการดัดยังคงสภาพของระนาบไว้ได้ ดังนั้นหน่วยแรงดึงสูงสุดอาจคำนวณจากทฤษฎีการดัดของคาน ดังนี้ คือ

$$\sigma = \frac{MC}{I} \qquad (2.1)$$

โดยที่ σ = หน่วยแรงดึงเนื่องจากการดัดที่เกิดขึ้นในผนังก่ออิฐ กก./ซม.^{2}

C = ระยะทางจากแกนสะเทิน (Neutral Axis) ซม.

I = โมเมนต์เฉื่อยของผนังก่ออิฐรอบแกนสะเทิน ซม.^{4}

M = โมเมนต์เนื่องจากแรงด้านข้างที่กระทำกับผนังก่ออิฐ กก.-ซม.

จากรูปที่ 2.2 ผนังก่ออิฐมีความสูง ความยาว และความหนาเป็น H, L และ t ซม. ตามลำดับ มีแรง P กก. กระทำที่ปลายผนังก่ออิฐ

$$M = PH$$

$$C = \frac{L}{2}$$

$$I = \frac{tL^3}{12}$$

แทนค่า M, C และ I ในสมการ (2.1)

$$\sigma_{max} = \frac{6\,PH}{t\,L^2}$$

$$P = \frac{\sigma_{max}\,tL^2}{6\,H} \qquad (2.2)$$

จากผลการทดสอบผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้าง[7] พบว่า กำลังดึงเนื่องจากแรงดัดมีค่าประมาณ 4 % ของกำลังอัด, f'_m

$$\sigma_{max} = \frac{4}{100} f'_m$$

แทนค่า σ_{max} ในสมการ (2.2) จะได้กำลังรับแรงเฉือนของผนังก่ออิฐที่เกิดจากการดัดวิบัติ, P

$$P = \frac{1}{150} f'_m\, t\, \frac{L^2}{H} \qquad (2.3)$$

2.1.2 ทฤษฎีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือน เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) Benjamin และ Williams[11] ได้ศึกษาพฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่บรรจุในโครงข้อแข็ง โดยมีเงื่อนไขว่าผนังก่ออิฐจะเกิดการแตกร้าวเป็นอิสระกับโครงข้อแข็ง โดยสมมุติว่าโครงข้อแข็งยังไม่ถึงจุดวิกฤติดังรูปที่ 2.1 (ก.) ในกรณีนี้จะถือว่าโครงข้อแข็งถ่ายแรงด้านข้างให้ผนังก่ออิฐโดยตรง และการทำนายพฤติกรรมของผนังก่ออิฐจำเป็นจะต้องทดสอบอิฐก่อคู่ (Brick Couplet) เพื่อหากำลังเฉือนที่ตัวอย่างก่ออิฐจะรับได้เมื่อมีหน่วยแรงอัดกระทำตั้งฉากกับตัวอย่างก่ออิฐ หน่วยแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่ามากขึ้น ดังความสัมพันธ์ข้างล่างนี้

$$\tau_{xy} = \tau_b + \mu\,\sigma_n \qquad (2.4)$$

โดยที่ τ_{xy} = หน่วยแรงเฉือนระหว่างอิฐและปูนก่อ กก./ซม.^{2}

τ_b = ค่ากำลังเฉือนเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวได้จากผลการทดสอบ กก./ซม.^{2}

μ = สัมประสิทธิ์การเสียดทานของอิฐมอญ = 0.66 และของอิฐชลบุรี = 0.40

σ_n = หน่วยแรงอัดที่กระทำตั้งฉากกับตัวอย่างก่ออิฐ, กก./ซม.^{2}

ในงานก่ออิฐนั้น จะมีผลของฝีมือการก่ออิฐ (Workmanship) เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้กำลังความแข็งแรงของผนังก่ออิฐลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สัมประสิทธิ์ลดกำลัง "C"

$$\tau_{xy} = C(\tau_b + \mu \sigma_n) \qquad (2.5)$$

สัมประสิทธิ์ลดกำลัง "C" จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 ถึง 1.00[11]

จากทฤษฎีของคาน (Beam Theory) ถ้าพิจารณาผนังก่ออิฐเป็นคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้ว หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) ที่แกนสะเทินจะมีค่ามากที่สุด หน่วยแรงเฉือนสูงสุด ที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐมีค่าเป็น $\frac{3}{2}$ เท่าของหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย[11,17] จากการทดลองพบว่ารอยร้าวเริ่มแรกจะเกิดที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐ ดังนั้นขณะที่ผนังก่ออิฐเกิดรอยร้าวพอดีนั้น หน่วยแรงเฉือนที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐจะมีค่าสูงสุด และมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากสมการ (2.5)

$$\tau_{xy} = \frac{3}{2}\frac{P}{Lt} = C(\tau_b + \mu\sigma_n) \qquad (2.6)$$

ขณะที่ผนังก่ออิฐมีแรงด้านข้าง P มากระทำนั้น จำเป็นจะต้องมีแรงในแนวดิ่งมากดทับ เพื่อมิให้ผนังก่ออิฐเกิดการพลิกคว่ำ และเกิดภาวะสมดุลย์ จากลักษณะของแรงที่กระทำตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 (ค.) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของแรง P และ P_v ได้ โดยพิจารณาสมดุลย์ของโมเมนต์รอบจุด O

$$\Sigma M_{@o} = 0 \qquad P(\tfrac{5}{6}H - \tfrac{H}{6}) = P_v(\tfrac{5}{6}L - \tfrac{L}{6})$$

$$P_v = \frac{H}{L}P$$

และแรงกดทับนี้ จะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงอัดตั้งฉากกระจายอย่างสม่ำเสมอที่แถบกลางของผนังก่ออิฐ

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} = \frac{P_v}{Lt}$$

$$\sigma_n = \frac{H}{L}\cdot\frac{P}{Lt} \qquad (2.7)$$

โดยที่ σ_n = หน่วยแรงตั้งฉาก กก./ซม.^{2}

A = พื้นที่หน้าตัดตามยาวของผนังก่ออิฐ ซม.^{2}

P_v = แรงกดทับที่จุดรองรับ กก.

จากสมการ (2.6) และ (2.7) จะได้

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_n} = 1.5 \frac{L}{H} \qquad (2.8)$$

จากสมการ (2.5), (2.7) และ (2.8)

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_n} = C \left(\frac{\tau_b}{\sigma_n} + \mu\right)$$

$$1.5\frac{L}{H} = C\left(\frac{\tau_b}{\sigma_n} + \mu\right)$$

$$\sigma_n = \frac{\tau_b C}{1.5\frac{L}{H} - C\mu}$$

$$\frac{H}{L} \cdot \frac{P}{Lt} = \frac{\tau_b C}{1.5\frac{L}{H} - \mu C}$$

จะได้กำลังรับแรงเฉือนของผนังก่ออิฐที่เกิดเนื่องจากการเฉือนวิบัติ

$$P = \frac{\tau_b C Lt \left(\frac{L}{H}\right)}{1.5\frac{L}{H} - \mu C} \qquad (2.9)$$

2.1.3 ทฤษฎีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือน เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทะแยง (Diagonal Tension Failure) Like Borchelt, Turnsek และ Cacovic[20] ได้ทำการวิจัยผนังก่ออิฐที่รับแรงด้านข้าง โดยพิจารณาผนังก่ออิฐดังรูปที่ 2.3 และได้สมมุติว่าขณะที่ผนังก่ออิฐวิบัติด้วยแรงเฉือนนั้น หน่วยแรงดึงหลัก (Principal Tensile Stress) จะถึงค่าวิกฤตพอดี พิจารณาจุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐเป็นจุดวิกฤติ ณ ที่จุดนี้ หน่วยแรงดัน

$\sigma_n = \frac{P_v}{A}$ การกระจายของหน่วยแรงเฉือนตามหน้าตัดตามยาวของผนังก่ออิฐจะมีลักษณะโค้งเป็นพาราโบลา (Parabola) และที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐหน่วยแรงเฉือนมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.5 เท่าของหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย τ_{xyav} จากมอห์รเซอเคิล (Mohr's Circle) สามารถหาค่าหน่วยแรงดึงหลักได้ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2})^2 + \tau_{xy}^2}$$

เมื่อ $\sigma_x = 0$ ดังนั้น

$$\sigma_t = \sqrt{(\frac{\sigma_n}{2})^2 + (1.5\tau_{xyav})^2} - \frac{\sigma_n}{2} \qquad (2.10)$$

แทนค่า $\sigma_n = \frac{HP}{Lt^2}$ และ $\tau_{xyav} = \frac{P}{Lt}$ ในสมการ (2.10) จะได้

$$(\frac{2.25}{L^2t^2})P^2 - (\frac{H.\sigma_t}{L^2t})P - \sigma_t^2 = 0 \qquad (2.11)$$

และแก้สมการได้ค่า

$$P = \frac{\sigma_t L t\,(1 + \sqrt{1 + 9(\frac{L}{H})^2})}{4.5(\frac{L}{H})} \qquad (2.12)$$

ซึ่งสมการ (2.12) จะใช้ได้เมื่อ $\frac{L}{H} \leqslant 0.67$

2.2 การวิเคราะห์ผนังก่ออิฐด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้าง จะต้องถือว่าผนังก่ออิฐมีลักษณะเป็นแผ่นบาง แรงด้านข้างที่กระทำกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนาของผนังก่ออิฐ และองค์ประกอบของหน่วยแรง (Stress Components) ในทิศทางตั้งฉากกับผนังก่ออิฐมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการศึกษาหน่วยแรงตามทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of Elasticity) จะเกี่ยวข้องกับปัญหาหน่วยแรงในระนาบ (Plane Stress) ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์สำหรับงาน

วิจัยนี้ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนและปรับปรุงโดย R.S.Sandhu[18] โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้จะช่วยในการคำนวณหาการเปลี่ยนรูป (Deformation) และค่าหน่วยแรงในโครงสร้าง โดยที่ความยืดหยุ่นของวัสดุจะต้องเป็นเส้นตรง รูปแบบของเอลลิเมนต์ในโปรแกรมมีทั้งที่เป็นเอลลิเมนต์รูปท่อนตรง ซึ่งมีความเครียดคงที่ (One - Dimensional Constant Strain Element) เอลลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมซึ่งมีความเครียดคงที่ (Constant Strain Triangular) และเอลลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม (Four-Point Rectangular Element) สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้เอลลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นเอลลิเมนต์ชนิดไอโซพาราเมตริก ควอดริเลเตอร์รอล (Isoparametric Quadrilateral) ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรมแสดงในรูปที่ 2.4 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์ ถือว่า แรงด้านข้างที่กระทำกับผนังก่ออิฐเป็นแรงแบบจุด (Concentrated Load) โดยใช้ค่าแรงซึ่งได้จากผลการทดสอบผนังก่ออิฐขณะวิบัติ เพื่อศึกษาหน่วยแรงภายในผนังขณะใกล้จะวิบัติชนิดของที่รองรับ (Supports)สมมุติให้เป็นแบบรอลเลอร์ (Roller) ดังรูปที่ 2.1 (ง.) ในการวิเคราะห์นี้ ได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ IBM 360 ช่วยในการคำนวณข้อมูล ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณ คือ การเคลื่อนที่ของจุดต่าง ค่าหน่วยแรงต่าง ๆ พิจารณาที่จุดกึ่งกลางของเอลลิเมนต์ มีหน่วยแรงตั้งฉาก(Normal Stress) หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) และหน่วยแรงหลัก (Principal Stresses) และทิศทางของหน่วยแรงหลัก (Angles of Principal Stresses) แล้วนำค่าหน่วยแรงหลักที่จุดต่าง ๆ มาเขียนเส้นระดับ เพื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรง (Stress Distribution) จากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า แรงดึงทะแยงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในผนังก่ออิฐ และค่าแรงดึงทะแยงจะมีค่ามากบริเวณจุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐ

ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์ เมื่อ $1 \leqslant \frac{L}{H} \leqslant 2$ ค่าหน่วยแรงตั้งฉาก (σ_x , σ_y) จะเป็นหน่วยแรงอัด หน่วยแรงเฉือนที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐ (τ_{xy}) จะมีค่าเป็น 1.5 เท่าของหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย

$(\frac{P}{Lt})$ ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{\sigma_x}{\tau_{xy}})$ และ $(\frac{L}{H})$ แสดงไว้ด้วยเส้นกราฟ ดังรูปที่ 2.5 และความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{\sigma_x}{\sigma_y})$ และ $(\frac{L}{H})$ แสดงไว้ด้วยเส้นกราฟดังรูปที่ 2.6 ในการหาความสัมพันธ์นี้ ได้ใช้วิธีลีสต์สะแควร์ (Least Square) สำหรับช่วยในการกำหนดรูปร่างของเส้นโค้งที่เหมาะสม

ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{\sigma_x}{\tau_{xy}})$ และ $(\frac{L}{H})$

$$\frac{\sigma_x}{\tau_{xy}} = \frac{1}{6.4(\frac{L}{H})^3 - 14.5(\frac{L}{H})^2 + 10\frac{L}{H}} \qquad (2.13)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\frac{\sigma_x}{\sigma_y})$ และ $(\frac{L}{H})$

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{1}{8.5(\frac{L}{H})^3 - 17.1(\frac{L}{H})^2 + 9.6\frac{L}{H}} \qquad (2.14)$$

2.3 การพิจารณาความมั่นคง (Stability) ของผนังก่ออิฐ

ผนังก่ออิฐเมื่อรับแรงด้านข้าง ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน อาจมีการโก่งบิดตัว (Buckling) ในทิศทางตั้งฉากกับผนังก่ออิฐได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นอาจสมมุติให้ผนังก่ออิฐมีลักษณะเป็นคานยื่น ซึ่งความหนาของหน้าตัดคานมีลักษณะแคบมากเมื่อเทียบกับความลึกของคาน มีแรงแบบจุด (Concentrated Load) กระทำที่ปลายคาน เมื่อแรงมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงวิกฤติ (Critical Load) ก็ทำให้เกิดการโก่งบิดตัวขึ้นได้ แรงวิกฤติของโครงสร้างแบบนี้อาจวิเคราะห์โดยใช้สูตรของ Timoshenko[21]

$$P_{cr} = \frac{4.013\sqrt{EI_\eta GJ}}{H^2}\left(1 - \frac{a}{H}\sqrt{\frac{EI_\eta}{GJ}}\right) \qquad (2.15)$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ คือ

$$J = \frac{Lt^3}{3}$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)}$$

$$I_\eta = \frac{Lt^3}{12}$$

$$I_{\xi} = \frac{tL^3}{12}$$

$$a = \frac{L}{2}$$

$$\nu = 0.2$$

จะได้ $$P_{cr} = 0.432 \frac{Et^3 L}{H^2} \left(1 - 0.387 \frac{L}{H}\right) \qquad (2.16)$$

โดยอาศัยทฤษฎีของคาน (Beam Theory) อาจคำนวณเป็นหน่วยแรงได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{cr} = \frac{(P_{cr}H)(\frac{L}{2})}{I_{\xi}} = \frac{P_{cr}H(\frac{L}{2})}{\frac{t\,L^3}{12}} = \frac{6\,P_{cr}\,H}{tL^2}$$

หรือ $$\sigma_{cr} = 2.59 \frac{Et^2}{HL} \left(1 - 0.387 \frac{L}{H}\right) \qquad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) จะพบว่าเมื่อ $\frac{L}{H} = 2.58$ หน่วยแรงวิกฤติ $\sigma_{cr} = 0$ นั่นคือผนังก่ออิฐจะโก่งบิดตัว (Buckling) เมื่อสัดส่วนความยาวและความสูง ($\frac{L}{H}$) ของผนังก่ออิฐมากกว่า 2.58

007637

2.4 ความแข็งแรงของผนังก่ออิฐในการรับแรงด้านข้างที่พัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้

โดยอาศัยพฤติกรรมจากการทดสอบผนังก่ออิฐ พบว่า รอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอิฐและปูนก่อ ในแนวทะแยง และแนวแตกร้าวจะผ่านใกล้จุดกึ่งกลางของผนัง[13] ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลลิเมนต์ ก็ปรากฏว่าที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐมีค่าหน่วยแรงดึงหลัก (Principal Tensile Stress) สูงสุด กอปรด้วยคุณสมบัติเชิงกลของอิฐก่อรับแรงดึงได้น้อยมาก ดังนั้น การวิบัติที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐจะเป็นผลจากหน่วยแรงดึงทะแยง และเกิดขึ้นทันทีที่มีการแตกร้าว ดังนั้น การวิเคราะห์กำลังของผนังก่ออิฐรับแรงเฉือน (Brick Shear Wall) อาจพิจารณาหน่วยแรงในแผ่นระนาบสองทิศทาง คือ

$$\sigma_t = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \qquad (2.18)$$

โดยที่ σ_t = หน่วยแรงดึงหลัก (Principal Tensile Stress) กก./ซม.^{2}

σ_x, σ_y = หน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) กก./ซม.^{2}

τ_{xy} = หน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) กก./ซม.^{2}

จากสมการที่ (2.13) กำหนดให้

$$\frac{\sigma_x}{\tau_{xy}} = \frac{1}{6.4\left(\frac{L}{H}\right)^3 - 14.5\left(\frac{L}{H}\right)^2 + 10\frac{L}{H}} = K_1$$

เพราะฉะนั้น $\sigma_x = K_1\tau_{xy}$ (2.19)

และจากสมการที่ (2.14) กำหนดให้

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 8.5\left(\frac{L}{H}\right)^3 - 17.1\left(\frac{L}{H}\right)^2 + 9.6\frac{L}{H} = K_2$$

หรือ $\sigma_y = K_2\sigma_x = K_1K_2\tau_{xy}$ (2.20)

จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลลิเมนต์ σ_x และ σ_y เป็นหน่วยแรงอัด (Compressive Stresses) ดังนั้น จึงต้องคิดเครื่องหมายลบก่อนแทนค่า กล่าวคือ

$$\sigma_x = -K_1\tau_{xy}, \quad \sigma_y = -K_1K_2\tau_{xy} \qquad (2.21)$$

แทนค่าในสมการ (2.18)

$$\sigma_t + \frac{K_1(1 + K_2)\tau_{xy}}{2} = \sqrt{\left(\frac{K_1(K_2 - 1)\tau_{xy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$(1 - K_1^2K_2)\tau_{xy} - K_1(1 + K_2)\sigma_t\tau_{xy} - \sigma_t^2 = 0$$

ถอดสมการได้

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_t\left(1 + K_2 + \sqrt{(1 - K_2)^2 + \frac{4}{K_1^2}}\right)}{2\left(\frac{1}{K_1} - K_1K_2\right)} \qquad (2.22)$$

ที่จุดกึ่งกลางของผนังก่ออิฐ $\tau_{xy} = \frac{1.5\,P}{Lt}$

จะได้ $$P = \frac{\sigma_t Lt\,(1 + K_2 + \sqrt{(1 - K_2)^2 + \frac{4}{K_1^2}})}{3\,(\frac{1}{K_1} - K_1 K_2)} \qquad (2.23)$$

สำหรับในกรณีของอิฐมอญ พบว่ากำลังดึงของอิฐก่อมีค่าโดยเฉลี่ย 4 % ของกำลังอัด ซึ่งสอดคล้องกับการค้นคว้าวิจัยของนักวิจัย[7]

$$\sigma_t = \frac{4}{100} fm' = \frac{fm'}{25}$$

เมื่อ fm' = กำลังอัดของอิฐก่อ กก./ซม.^{2}

ดังนั้น กำลังรับแรงด้านข้างของผนังก่ออิฐมอญขณะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทะแยงพอดีจะมีค่า คือ

$$P = \frac{fm'\,Lt\,(1 + K_2 + \sqrt{(1 - K_2)^2 + \frac{4}{K_1^2}})}{75\,(\frac{1}{K_1} - K_1 K_2)} \qquad (2.24)$$

สำหรับในกรณีของอิฐชลบุรี ซึ่งมีผิวเรียบ พบว่า กำลังดึงของอิฐก่อจะมีค่าโดยเฉลี่ย 2 % ของกำลังอัด

$$\sigma_t = \frac{2}{100} fm' = \frac{fm'}{50}$$

ดังนั้น กำลังรับแรงด้านข้างของผนังก่ออิฐชลบุรี ขณะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทะแยงพอดีจะมีค่า คือ

$$P = \frac{fm'\,Lt\,(1 + K + \sqrt{(1 - K_2)^2 + \frac{4}{K_1^2}})}{150\,(\frac{1}{K_1} - K_1 K_2)} \qquad (2.25)$$

ผนังก่ออิฐซึ่งรับแรงด้านข้าง เมื่อไม่พิจารณาผลการโอบอุ้ม (Confining Effect) ของโครงข้อแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง และรอยแตกร้าวของผนังก่ออิฐอยู่ในแนวทะแยงขณะเกิดการวิบัติ ในกรณีของผนังก่ออิฐมอญสามารถคาดคะเนกำลังรับแรงด้านข้างด้วยสมการ (2.24) และในกรณีของผนังก่ออิฐชลบุรีสามารถคาดคะเนกำลังรับแรงด้านข้างด้วยสมการ (2.25) ค่าตัวแปร K_1 และ K_2 แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามสมการ (2.24) จะให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบผนังก่ออิฐมอญ สำหรับสมการ (2.25) จะให้ผลแตกต่าง การทดสอบผนังก่ออิฐชลบุรีค่อนข้างมาก ดังนั้นการคาดคะเนกำลังรับแรงด้านข้างจะใช้ได้ดีสำหรับกรณีของผนังก่ออิฐมอญ