บทที่ 4

ทฤษฎี

4.1 ทั่วไป

การคำนวณออกแบบโครงสร้างสำหรับองค์อาคารวัสดุก่อรับน้ำหนัก ทั้งที่มี เหล็ก เสริมและไม่มี เหล็ก เสริม สามารถกระทำได้ทั้งโดยทฤษฎีอีลาสติคและทฤษฎีกำลังประลัย ในปัจจุบันทฤษฎีอีลาสติคยังคง เป็นที่นิยมกันมาก ด้วย เหตุผลในด้านความปลอดภัยในการใช้งานสืบ เนื่องจากความไม่แน่นอนในคุณภาพของวัสดุและฝีมือในการก่อ มาตรฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบยังยึดถือทฤษฎีอีลาสติค เป็นส่วนใหญ่ เช่น มาตรฐานของสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (ANSI), มาตรฐานของสมาคมวัสดุก่อคอนกรีตแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (NCMA), มาตรฐานของสถาบันมาตรฐานของอังกฤษ (BSI) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้มาตรฐานในการผลิตคอนกรีตบล็อคสูงขึ้น ประกอบกับมีการนำมอร์ต้ากำลังสูง (high strength mortar) มาใช้ ทำให้โครงสร้างวัสดุก่อมีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น การใช้ทฤษฎีอีลาสติคในการคำนวณออกแบบอาจจะไม่ได้ใช้กำลังที่สูงขึ้นมาให้ เป็นประโยชน์ ในการศึกษานี้จะใช้ทฤษฎีกำลังประลัยในการวิเคราะห์ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุก่อ เพื่อนำมาใช้ เปรียบ เทียบกับพฤติกรรมที่แท้จริงจากการทดสอบถึงขั้นประลัย และนำไปสู่การวิวัฒนาการ เพื่อออกแบบโดยทฤษฎีกำลังประลัย ทั้งนี้โดยยึดถือสมมุติฐานดังต่อไปนี้

ก) ระนาบของหน้าตัดก่อนและหลังบรรทุกน้ำหนักยังคง เป็นระนาบ เช่น เดิม

ข) ที่ประลัย หน่วยแรงและความ เครียดไม่ เป็นสัดส่วนกัน

ค) ความ เครียดที่ เกิดขึ้นในวัสดุก่อ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะ เทิน และสำหรับวัสดุก่อคอนกรีต เสริม เหล็ก ความ เครียดใน เหล็ก เสริมมีค่า เท่ากับความ เครียดของวัสดุก่อที่ตำแหน่ง เดียวกัน

ง) วัสดุก่อไม่สามารถรับแรงดึงได้

4.2 การวิเคราะห์เมื่อกำหนดการกระจายของหน่วยแรงอัดของวัสดุก่อเป็นรูปพาราโบลา

สภาพสมดุลย์ของผนังคอนกรีตบล็อครับน้ำหนักกระทำตามแนวดิ่งและโมเมนต์พร้อมกัน แสดงดังรูปที่ 4.1ก โดยที่สมมุติให้หน่วยแรงต้านทานต่อน้ำหนักภายนอกของวัสดุก่อเป็นรูปพาราโบลา น้ำหนักกระทำภายนอกตามแนวดิ่ง P กระทำเยื้องศูนย์เป็นระยะ e จากศูนย์กลางผนังดังแสดงตามรูปที่ 4.1ข มีผลสมมูลย์ (equivalent) กับน้ำหนักกระทำ P ที่ศูนย์กลางผนังพร้อมกับโมเมนต์ดัด M โดยที่ระยะเยื้องศูนย์ e มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของโมเมนต์ดัด M ต่อน้ำหนัก P ดังนั้นในการวิเคราะห์ตลอดจนการทดลองจึงนิยมใช้ลักษณะของน้ำหนักกระทำภายนอกตามรูปที่ 4.1ข เพื่อให้เกิดลักษณะของน้ำหนักกระทำตามแนวดิ่งพร้อมกับโมเมนต์ดัด และลักษณะหน้าตัดของคอนกรีตบล็อคแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่รูปที่ 4.2ก เป็นลักษณะที่แท้จริง และสามารถประมาณมิติต่าง ๆ ได้โดยหน้าตัดที่แสดงดังรูปที่ 4.2ข

พฤติกรรมในการรับน้ำหนักของผนังที่ก่อด้วยคอนกรีตบล็อคมีลักษณะแตกต่างจากผนังคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตโดยทั่วไปคือ คอนกรีตบล็อคมีลักษณะเป็นก้อนกลวง พฤติกรรมในการรับน้ำหนักของผนังเมื่อรูกลวง (core) ของบล็อคได้รับการกรอกด้วยคอนกรีตหรือมอร์ต้าสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก) คอนกรีตบล็อคทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้ส่วนหนึ่ง ขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่โอบปูนกรอก อันเป็นผลให้ปูนกรอกมีความสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น

ข) ปูนกรอกทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอกได้อีกส่วนหนึ่ง โดยที่ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกของปูนกรอกในคอนกรีตบล็อคมีมากขึ้น เนื่องจากการโอบของคอนกรีตบล็อค กำลังของปูนกรอกที่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการโอบของคอนกรีตบล็อคมีผลตั้งแต่ผนังเริ่มรับน้ำหนัก โดยกำลังที่เพิ่มขึ้นมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดที่เกิดขึ้น จนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ความเครียดค่าหนึ่ง

ค) ในกรณีที่เป็นผนังคอนกรีตบล็อคเสริมเหล็ก เหล็กเสริมจะทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักบรรทุกส่วนที่เหลือ

4.2.1 ผนังก่อคอนกรีตบล็อคไม่มี เหล็ก เสริม

พิจารณาผนังก่อคอนกรีตบล็อคไม่มี เหล็ก เสริม หน้าตัดประกอบด้วยพื้นที่ของคอนกรีตบล็อคและพื้นที่ของปูนกรอก การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดสามารถกระทำได้โดยวิธีแทนค่า อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความ เครียดที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้น เมื่อผนังรับน้ำหนักกระทำภายนอก P ด้วยระยะ เยื้องศูนย์ e จากศูนย์กลางผนัง จะทำให้ เกิดการกระจายของความ เครียดดังแสดงในรูปที่ 4.3ข และ เกิดการกระจายของหน่วยแรงในวัสดุต่าง ๆ คือ คอนกรีตบล็อคและปูนกรอก ดังแสดงในรูปที่ 4.3ค ถึง 4.3จ โดยที่พิจารณาว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความ เครียดของคอนกรีตบล็อคและปูนกรอก เป็นไปดังสมการ[25]

$$f = \frac{f'}{\varepsilon_o^2}(2\varepsilon_o\varepsilon - \varepsilon^2) \qquad (4.1)$$

โดยที่ f = หน่วยแรงอัด ณ จุดใด ๆ

f' = หน่วยแรงอัดสูงสุด

ε = ความ เครียดซึ่งสอดคล้องกับหน่วยแรงอัด f

ε_o = ความ เครียด ณ หน่วยแรงอัดสูงสุด

และ เมื่อผนังก่อคอนกรีตบล็อครับน้ำหนัก คอนกรีตบล็อคจะทำหน้าที่โอบปูนกรอกซึ่ง เป็นผลให้ปูนกรอกมีกำลัง เพิ่มขึ้น โดยที่กำหนดให้หน่วยแรงอัดที่มีค่า เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลการโอบของคอนกรีตบล็อค เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความ เครียด และ เป็นไปตามสมการ

$$\Delta f = 2(1-n)\frac{f'_g}{\varepsilon_{cmax}}\varepsilon \qquad \text{เมื่อ } 0 \le \varepsilon \le \frac{\varepsilon_{cmax}}{2} \qquad (4.2ก)$$

$$\Delta f = (1-n)f'_g \qquad \text{เมื่อ } \varepsilon > \frac{\varepsilon_{cmax}}{2} \qquad (4.2ข)$$

โดยที่ Δf = หน่วยแรงอัดที่ เพิ่มขึ้นของปูนกรอก อัน เนื่องจากการโอบของคอนกรีตบล็อค

f'_g = หน่วยแรงอัดสูงสุดของปูนกรอก

ε = ความเครียด ณ จุดใด ๆ

ε_{cmax} = ความเครียดของหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ณ จุดประลัยของปูนกรอก

η = อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดสุทธิต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตบล็อค

การวิบัติของผนังรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดร่วมกันจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเกินความสามารถที่วัสดุจะสามารถต้านทานได้ ดังนั้นสำหรับแรงกระทำภายนอก P ค่าหนึ่งซึ่งกระทำเยื้องศูนย์เป็นระยะ e จากศูนย์กลางผนังวัสดุก่อไม่มีเหล็กเสริม แล้วเป็นผลให้ความเครียดที่หน้าหนึ่งของผนังมีค่าเท่ากับ ε_u ในขณะที่ความเครียดที่อีกหน้าหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ อันเป็นการวิบัติในสภาวะวิบัติสมดุลย์ ซึ่งค่าของแรงกระทำและระยะเยื้องศูนย์อาจเขียนเป็น P_b และ e_b ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 ซึ่งได้แสดงการกระจายของความเครียดและหน่วยแรงของวัสดุในสภาวะวิบัติสมดุลย์ สามารถหาแรงกระทำตามแนวดิ่งได้โดยพิจารณาจากสภาวะสมดุลย์

$$P_b = \frac{2}{3}f_{bu}tb + (b-2b_1)\left[\frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{t^2}(-t^3+3tt_1^2+t^2t_1-2t_1^3) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{t^2}(t^3-3tt_1^2-t^2t_1+2t_1^3) + f_{cu}(\frac{3}{4}t-t_1-\frac{t_1^2}{t})\right] \quad (4.3)$$

และโมเมนต์รอบศูนย์กลางผนังสามารถหาได้จาก

$$M_b = P_be_b$$

$$= \frac{1}{12}f_{bu}t^2b + (b-2b_1)\left[\frac{1}{12}\frac{f_{bu}}{t^2}(-t^4+6t^3t_1-12t^2t_1^2+8tt_1^3) + \frac{1}{12}\frac{f_{gu}}{t^2}(t^4-6t^3t_1+12t^2t_1^2-8tt_1^3) + f_{cu}(\frac{t^2}{12}-\frac{1}{2}tt_1+t_1^2-\frac{2}{3}\frac{t_1^3}{t})\right] \quad (4.4)$$

แต่ถ้าการวิบัติของผนัง เกิดขึ้นในขณะที่ผิวหน้าทั้งสองข้างของผนัง เกิดหน่วยแรงต้านทานต่อแรงกระทำภายนอก เป็นหน่วยแรงอัด ถือเป็นการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก การวิบัติในลักษณะนี้จะ เกิดขึ้น เมื่อระยะ เยื้องศูนย์ของแรงกระทำภายนอกมีค่าน้อยกว่าระยะ เยื้องศูนย์ในสภาวะวิบัติสมดุลย์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 จะ เป็นการกระจายของความ เครียดและหน่วยแรงของวัสดุในสภาวะวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก และสามารถ เขียนสมการของแรงตามแนวดิ่งจากสภาวะสมดุลย์ได้ดังนี้

$$P = \frac{2}{3}f_{bu}(x+t)b + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+t)^2}\left[-2x^2b_1(x+2t) + (b-2b_1)\right.$$
$$\left.(-x^3-3x^2t-3xt^2-t^3+3tt_1^2+2x^2t_1+6xtt_1+t^2t_1-2t_1^3)\right]$$
$$+ \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+t)^2}(b-2b_1)(x^2t + 3xt^2 + t^3 - 3tt_1^2 -$$
$$2x^2t_1 - 6xtt_1 - t^2t_1 + 2t_1^3) + f_{cu}(b-2b_1)$$
$$\left[\frac{3}{4}x + \frac{3}{4}t - t_1 - \frac{(x+t_1)^2}{(x+t)}\right]$$

เมื่อ $(x+t_1) \leq \frac{(x+t)}{2} < (x+t-t_1)$ (4.5n)

และ $P = \frac{2}{3}f_{bu}(x+t)b + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+t)^2}\left[-2x^2b_1(x+2t) + \right.$
$$(b-2b_1)(-x^3 - 3x^2t - 3xt^2 - t^3 + 3tt_1^2 + 2x^2t_1$$
$$\left. + 6xtt_1 + t^2t_1 - 2t_1^3)\right] + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+t)^2}(b-2b_1)$$
$$(x^2t + 3xt^2 + t^3 - 3tt_1^2 - 2x^2t_1 - 6xtt_1 - t^2t_1$$
$$+ 2t_1^3) + f_{cu}(t-2t_1)(b-2b_1)$$

เมื่อ $(x+t_1) \geq \frac{(x+t)}{2}$ (4.5ข)

และโมเมนต์รอบศูนย์กลางผนังสามารถหาได้จาก

$$M = \frac{1}{12} f_{bu}(x+t)b(-3x+t) + \frac{1}{12}\frac{f_{bu}}{(x+t)^2}\Big[2b_1 (3x^4 + 10x^3t + 8x^2t^2) + (b-2b_1)(3x^4 + 8x^3t + 6x^2t^2 + 6xtt_1^2 + 4x^3t_1 + 4x^2tt_1 - 2xt^2t_1 - 4xt_1^3 - t^4 - 12t^2t_1^2 + 6t^3t_1 + 8tt_1^3)\Big] + \frac{1}{12}\frac{f_{gu}}{(x+t)^2}(b-2b_1)(2x^3t + 2x^2t^2 - 6xtt_1^2 - 4x^3t_1 - 4x^2tt_1 + 2xt^2t_1 + 4xt_1^3 + t^4 + 12t^2t_1^2 - 6t^3t_1 - 8tt_1^3) + f_{cu}(b-2b_1)\Big[-\frac{7}{24}x^2 - \frac{5}{24}xt + \frac{1}{12}t^2 - \frac{1}{2}tt_1 + \frac{1}{2}t_1^2 - \frac{(x+t_1)^2}{(x+t)}\left(-\frac{x}{3} + \frac{2}{3}t_1 - \frac{t}{2}\right)\Big]$$

เมื่อ $(x+t_1) \leq \frac{(x+t)}{2} < (x+t-t_1)$ (4.6ก)

และ $$M = \frac{1}{12} f_{bu}(x+t)b(-3x+t) + \frac{1}{12}\frac{f_{bu}}{(x+t)^2}\left[2b_1(3x^4+10x^3t + 8x^2t^2) + (b-2b_1)(3x^4 + 8x^3t + 6x^2t^2 + 6xtt_1^2 + 4x^3t_1 - 4x^2tt_1 - 2xt^2t_1 - 4xt_1^3 - t^4 - 12t^2t_1^2 + 6t^3t_1 + 8tt_1^3)\right] + \frac{1}{12}\frac{f_{gu}}{(x+t)^2}(b-2b_1)(2x^3t + 2x^2t^2 - 6xtt_1^2 - 4x^3t_1 - 4x^2tt_1 + 2xt^2t_1 + 4xt_1^3 + t^4 + 12t^2t_1^2 - 6t^3t_1 - 8tt_1^3)$$

เมื่อ $(x+t_1) \geq \frac{(x+t)}{2}$ (4.6ข)

โดยที่ $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon} t$ (4.7)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าการวิบัติของผนังเกิดจากแรงดึงเป็นหลัก พบว่าหน้าหนึ่งของผนังเกิดหน่วยแรงต้านทานต่อแรงกระทำภายนอกเป็นหน่วยแรงอัด ในขณะที่อีกหน้าหนึ่งของผนังเกิดหน่วยแรงดึง การวิบัติในลักษณะนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อระยะเยื้องศูนย์ของแรงกระทำภายนอกจากศูนย์กลางผนังมีค่ามากกว่าระยะเยื้องศูนย์ในสภาวะวิบัติสมดุลย์ รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายของความเครียดและหน่วยแรงของวัสดุในสภาวะวิบัติโดยแรงดึงเป็นหลักจากสภาวะสมดุลย์ของแรงตามแนวดิ่งจะได้

$$P = \frac{2}{3} f_{bu}(t-x)b + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(-t^3 + 3xt^2 - x^2t$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$+ 3tt_1^2 + t^2t_1 - 6xtt_1 + 2x^2t_1 - 2t_1^3) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}$$

$$(b-2b_1)(t^3 - 3xt^2 + x^2t - 3tt_1^2 - t^2t_1 + 6xtt_1$$

$$- 2x^2t_1 + 2t_1^3) + f_{cu}(b-2b_1)\left[\frac{3}{4}(t-x) - t_1 - \frac{(t_1-x)^2}{(t-x)}\right]$$

เมื่อ $t \geq (t-x) \geq (t-t_1)$ (4.8ก)

$$P = \frac{2}{3} f_{bu}(t-x)b + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(-t^3 + 3xt^2 + t^2t_1 -$$

$$3x^2t + x^3 + tt_1^2 - xt_1^2 - 2xtt_1 + x^2t_1 - t_1^3) +$$

$$\frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(t^3 - 3xt^2 + 3x^2t - x^3 - tt_1^2$$

$$+ xt_1^2 - t^2t_1 + 2xtt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + f_{cu}(b-2b_1)$$

$$\left[\frac{3}{4}(t-x) - t_1\right]$$

เมื่อ $(t-t_1) \geq (t-x) \geq t_1$ และ $(\frac{t-x}{2}) > t_1$ (4.8ข)

และ $P = \frac{2}{3} f_{bu}(t-x)b + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(-t^3 + 3xt^2 -$

$$3x^2t + x^3 + tt_1^2 - xt_1^2 + t^2t_1 + x^2t_1 - t_1^3 - 2xtt_1) +$$

$$\frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(t^3 - 3xt^2 + 3x^2t - x^3 - tt_1^2$$

$$+ xt_1^2 - t^2t_1 + 2xtt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + f_{cu}\frac{(t-x-t_1)^2}{(t-x)}$$

$$(b-2b_1)$$

เมื่อ $(t-t_1) \geq (t-x) \geq t_1$ และ $(\frac{t-x}{2}) < t_1$ (4.8ค)

และในทำนองเดียวกันโมเมนต์รอบศูนย์กลางผนังสามารถหาได้จาก

$$M = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{t^2}{8} + \frac{tx}{4} - \frac{3}{8}x^2) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)$$

$$(\frac{3}{4}t^3t_1 + \frac{3}{2}xt^2t_1 + \frac{1}{2}x^2tt_1 - \frac{1}{2}x^3t_1 -$$

$$- \frac{1}{4}x^2t^2 + \frac{1}{4}x^3t - \frac{3}{2}t^2t_1^2 - \frac{3}{4}xtt_1^2 - \frac{5}{4}xt^2t_1 +$$

$$tt_1^3 + \frac{1}{2}xt_1^3 - \frac{1}{8}t^4) + \frac{3}{2}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(-\frac{3}{4}t^3t_1$$

$$- \frac{3}{2}xt^2t_1 - \frac{1}{2}x^2tt_1 + \frac{1}{2}x^3t_1 - \frac{1}{4}x^3t + \frac{3}{2}t^2t_1^2$$

$$+ \frac{3}{4}xtt_1^2 + \frac{5}{4}xt^2t_1 - tt_1^3 + \frac{1}{8}t^4 - \frac{1}{2}xt_1^3) - f_{cu}$$

$$(b-2b_1)\left[\frac{1}{12}t^2 + \frac{5}{24}tx - \frac{7}{24}x^2 - \frac{1}{2}tt_1 + \frac{1}{2}t_1^2\right.$$

$$\left. - \frac{(t_1+x)^2}{(t-x)}(-\frac{t}{2} + \frac{x}{3} + \frac{2}{3}t_1)\right]$$

เมื่อ $t \geq (t-x) \geq (t-t_1)$ (4.9ก)

$$M = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{1}{8}t^2 + \frac{1}{4}tx - \frac{3}{8}x^2) + \frac{3}{2}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)$$

$$(-\frac{1}{8}t^4 + \frac{3}{4}x^2t^2 - x^3t + \frac{3}{8}x^4 - \frac{1}{2}t^2t_1^2 +$$

I 18047348

$$\frac{3}{2}xtt_1^2 - x^2t_1^2 + \frac{3}{4}t^3t_1 - \frac{7}{4}xt^2t_1 + \frac{5}{4}x^2tt_1 -$$

$$\frac{1}{4}x^3t_1 - \frac{3}{4}tt_1^3 + \frac{1}{4}xt_1^3 + \frac{5}{8}t_1^4) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}$$

$$(b-2b_1)(\frac{1}{8}t^4 - \frac{3}{4}x^2t^2 + x^3t - \frac{3}{8}x^4 + \frac{1}{2}t^2t_1^2$$

$$- \frac{3}{2}xtt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{3}{4}t^3t_1 + \frac{7}{4}xt^2t_1 -$$

$$\frac{5}{4}x^2tt_1 + \frac{1}{4}x^3t_1 + \frac{3}{4}tt_1^3 - \frac{1}{4}xt_1^3 - \frac{5}{8}t_1^4) + f_{cu}$$

$$(b-2b_1)(\frac{1}{12}t^2 + \frac{5}{24}tx - \frac{7}{24}x^2 - \frac{1}{2}tt_1 + \frac{1}{2}t_1^2)$$

เมื่อ $(t-t_1) \geq (t-x) \geq t_1$ และ $(\frac{t-x}{2}) > t_1$ (4.9ข)

และ $M = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{1}{8}t^2 + \frac{1}{4}tx - \frac{3}{8}x^2) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(-\frac{1}{8}t^4$

$$+ \frac{3}{4}x^2t^2 - x^3t + \frac{3}{8}x^4 - \frac{1}{2}t^2t_1^2 + \frac{3}{2}xtt_1^2 - x^2t_1^2$$

$$+ \frac{3}{4}t^3t_1 - \frac{7}{4}xt^2t_1 + \frac{5}{4}x^2tt_1 - \frac{1}{4}x^3t_1 - \frac{3}{4}tt_1^3$$

$$+ \frac{1}{4}xt_1^3 + \frac{5}{8}t_1^4) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(t-x)^2}(b-2b_1)(\frac{t^4}{8} - \frac{3}{4}x^2t^2$$

$$+ x^3t - \frac{3}{8}x^4 + \frac{1}{2}t^2t_1^2 - \frac{3}{2}xtt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{3}{4}t^3t_1$$

$$+ \frac{7}{4}xt^2t_1 - \frac{5}{4}x^2tt_1 + \frac{1}{4}x^3t_1 + \frac{3}{4}tt_1^3 - \frac{1}{4}xt_1^3$$

$$- \frac{5}{8}t_1^4) + f_{cu}(b-2b_1)\left[\frac{(t-t_1-x)^2}{(t-x)}(\frac{t}{6} + \frac{x}{3} - \frac{2}{3}t_1)\right]$$

เมื่อ $(t-t_1) \geq (t-x) \geq t_1$ และ $(\frac{t-x}{2}) < t_1$ (4.9ค)

โดยที่ $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_u+\varepsilon} t$ (4.10)

4.2.2 ผนังก่อคอนกรีตบล็อคมี เหล็ก เสริม

สำหรับผนังคอนกรีตบล็อคมี เหล็ก เสริม การ เสริม เหล็กยืนสามารถกระทำได้ใน รูกลวง (core) ของคอนกรีตบล็อค ส่วนการ เสริม เหล็กปลอกจะ เสริมได้ เฉพาะที่รอยต่อ (joint) ระหว่างก้อนคอนกรีตบล็อคสำหรับคอนกรีตบล็อคชนิดที่มีรูกลวงมากกว่าหนึ่งรู การวิบัติของผนังในสภาวะวิบัติสมดุลย์ เกิดขึ้น เมื่อหน้าหนึ่งของผนังรับแรงอัดจนถึงความ เครียดประลัย ε_u ในขณะที่ เหล็ก เสริม รับแรงดึงถึงจุดคลาก รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายของความ เครียดและหน่วยแรงของวัสดุในสภาวะวิบัติสมดุลย์ของหน้าตัดที่มี เหล็ก เสริม

กรณี ก. เมื่อ $(d-x) \geq t_1$ จากสภาวะสมดุลย์ของแรงตามแนวดิ่ง สามารถหาค่าแรงกระทำได้จาก

$$P_b = \frac{2}{3} f_{bu}(d-x)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3-3d^2x+3x^2d - x^3 - t_1^2d + xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3-3d^2x+3x^2d - t_1^2d + xt_1^2 - x^3 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + f_{cu}(b-2b_1)\left[\frac{3}{4}(d-x) - t_1\right] + A_s'\varepsilon_s E_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) \geq t_1$ (4.11ก)

และ $P_b = \frac{2}{3} f_{bu}(d-x)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3 - 3d^2x + 3x^2d - x^3 - t_1^2d + xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3)$

$$+ \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3-3d^2x + 3x^2d - x^3 - t_1^2d + xt_1^2$$

$$- t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + \frac{f_a(d-x-t_1)^2}{(d-x)}(b-2b_1)$$

$$+ A'_s\varepsilon_sE_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) < t_1$ (4.11ข)

และโม เมนต์รอบศูนย์กลางผนังสามารถหาได้จาก

$$M_b = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{dt}{2} - \frac{3}{8}d^2 - \frac{xt}{2} + \frac{3}{4}xd - \frac{3}{8}x^2) - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}$$

$$(b-2b_1)(\frac{1}{2}td^3 - \frac{3}{2}d^2xt + \frac{3}{2}x^2dt - \frac{1}{2}t_1^2dt - \frac{1}{2}x^3t +$$

$$\frac{1}{2}xt_1^2t - \frac{1}{2}t_1td^2 + xdt_1t - \frac{1}{2}x^2tt_1 + \frac{1}{2}tt_1^3 -$$

$$\frac{1}{4}t_1d^3 + \frac{3}{4}d^2xt_1 - \frac{3}{4}t_1x^2d + \frac{1}{4}t_1x^3 + \frac{1}{4}dt_1^3 -$$

$$\frac{1}{4}t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{5}{8}t_1^4 - \frac{3}{8}d^4 +$$

$$\frac{3}{2}xd^3 - \frac{9}{4}d^2x^2 + \frac{3}{2}dx^3 - \frac{3}{8}x^4) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)$$

$$(\frac{td^3}{2} - \frac{3}{2}d^2xt + \frac{3}{2}x^2dt - \frac{1}{2}x^3t - \frac{1}{2}t_1^2dt + \frac{1}{2}xt_1^2t$$

$$- \frac{1}{2}t_1td^2 + xdt_1t - \frac{1}{2}x^2tt_1 + \frac{1}{2}tt_1^3 - \frac{1}{4}t_1d^3$$

$$+ \frac{3}{4}d^2xt_1 - \frac{3}{4}t_1x^2d + \frac{1}{4}dt_1^3 - \frac{1}{4}t_1^3x + t_1^2d^2 + \frac{1}{4}t_1x^3 -$$

$$2xdt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{5}{8}t_1^4 - \frac{3}{8}d^4 + \frac{3}{2}xd^3 - \frac{9}{4}d^2x^2 +$$

$$\frac{3}{2} dx^3 - \frac{3}{2} x^4) + f_{cu} (b-2b_1) (\frac{3}{8} dt - \frac{3}{8} xt - \frac{tt_1}{2}$$

$$- \frac{7}{24} d^2 + \frac{7}{12} xd + \frac{1}{2} t_1^2 - \frac{7}{4} x^2) +$$

$$A'_s \varepsilon_s E_s (\frac{t}{2} - d') - A_s \varepsilon_{sy} E_s (\frac{t}{2} - d)$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) \geq t_1$ (4.12ก)

และ $M_b = \frac{2}{3} f_{bu} b (\frac{1}{2} dt - \frac{3}{8} d^2 - \frac{1}{2} xt + \frac{3}{4} xd - \frac{3}{8} x^2)$

$$- \frac{2}{3} \frac{f_{bu}}{(d-x)^2} (b-2b_1) (\frac{1}{2} td^3 - \frac{3}{2} d^2xt + \frac{3}{2} x^2dt -$$

$$\frac{1}{2} x^3t - \frac{1}{2} t_1^2dt + \frac{1}{2} xt_1^2t - \frac{1}{2} t_1td^2 + xdt_1t -$$

$$\frac{1}{2} x^2tt_1 + \frac{1}{2} tt_1^3 - \frac{1}{4} t_1d^3 + \frac{3}{4} d^2xt_1 - \frac{3}{4} t_1x^2d$$

$$+ \frac{1}{4} t_1x^3 + \frac{1}{4} dt_1^3 - \frac{1}{4} t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2$$

$$- \frac{5}{8} t_1^4 - \frac{3}{8} d^4 + \frac{3}{2} xd^3 - \frac{9}{4} d^2x^2 + \frac{3}{2} dx^3 - \frac{3}{8} x^4)$$

$$+ \frac{2}{3} \frac{f_{gu}}{(d-x)^2} (b-2b_1) (\frac{1}{2} td^3 - \frac{3}{2} d^2xt + \frac{3}{2} x^2dt -$$

$$\frac{1}{2} x^3t - \frac{1}{2} t_1^2dt + \frac{1}{2} xt_1^2t - \frac{1}{2} t_1td^2 + xdt_1t -$$

$$\frac{1}{2} x^2tt_1 + \frac{1}{2} tt_1^3 - \frac{1}{4} t_1d^3 + \frac{3}{4} d^2xt_1 - \frac{3}{4} t_1x^2d$$

$$+ \frac{1}{4} t_1x^3 + \frac{1}{4} t_1x^3 + \frac{1}{4} dt_1^3 - \frac{1}{4} t_1^3x + t_1^2d^2 -$$

$$2xdt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{5}{8} t_1^4 - \frac{3}{8} d^4 + \frac{3}{2} xd^3 - \frac{9}{4} d^2x^2$$

$$+ \frac{3}{2} dx^3 - \frac{3}{8} x^4) + \frac{f_{cu}(d-x-t_1)^2}{(d-x)} (b-2b_1)(- \frac{d}{3} +$$

$$\frac{x}{3} - \frac{2}{3} t_1 + \frac{t}{2}) + A'_s \varepsilon_s E_s (\frac{t}{2} - d') - A_s \varepsilon_{sy} E_s$$

$$(\frac{t}{2} - d)$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) < t_1$ (4.12ข)

โดยที่ $x = \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_u + \varepsilon_{sy}} d$ (4.13)

และ $\varepsilon_s = \frac{d-x-d'}{d-x} \varepsilon_u$ (4.14)

กรณี ข. เมื่อ $(d-x) < t_1$ จะได้ว่า

$$P_b = \frac{2}{3} f_{bu}(d-x)b + A'_s \varepsilon_s E_s - A_s \varepsilon_{sy} E_s \quad (4.15)$$

$$M_b = \frac{2}{3} f_{bu} b(\frac{1}{2} dt - \frac{3}{8} d^2 - \frac{1}{2} xt + \frac{3}{4} xd - \frac{3}{8} x^2) +$$

$$A'_s \varepsilon_s E_s (\frac{t}{2} - d') - A_s \varepsilon_{sy} E_s (\frac{t}{2} - d) \quad (4.16)$$

ทั้งนี้ x และ ε_s จะต้องสอดคล้องตามสมการ (4.13) และ (4.14) ตามลำดับ ส่วนเมื่อผนังเกิดการวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.10 เป็นการกระจายของความเครียดและหน่วยแรงของวัสดุซึ่งสามารถเขียนสมการที่สภาวะสมดุลย์ของแรงได้ดังนี้

กรณี ก. เมื่อ $(x+d) > t$

$$P = \frac{2}{3} f_{bu}(x+d)b - \frac{3}{2} \frac{f_{bu}}{(x+d)^2} b(x^3 + 3x^2 d + 3xd^2 + d^3$$

$$- t^2 x - t^2 d - x^2 t - 2xdt - d^2 t + t^3) - \frac{2}{3} \frac{f_{bu}}{(x+d)^2}$$

$$(b-2b_1)(-2t_1x^2 - 4xdt_1 - 2d^2t_1 + 2t_1^3 - 2xtt_1$$

$$- 2dtt_1 + xt^2 + dt^2 + x^2t + 2xdt + td^2 + 3t^2t_1$$

$$- t^3 - 3tt_1^2) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(-2t_1x^2 - 4xdt_1$$

$$- 2d^2t_1 + 2t_1^3 - 2xtt_1 - 2dtt_1 + xt^2 + dt^2 +$$

$$x^2t + 2xdt + td^2 + 3t^2t_1 - t^3 - 3tt_1^2) + f_{cu}$$

$$(b-2b_1)\left[\frac{3}{4}(x+d) - t_1 - \frac{(x+d-t+t_1)^2}{(x+d)}\right] +$$

$$A'_s\varepsilon_{s1}E_s + A_s\varepsilon_{s2}E_s$$

เมื่อ $(x+d-t+t_1) \leq (\frac{x+d}{2}) < (x+d-t_1)$ (4.17ก)

$$P = \frac{2}{3}f_{bu}(x+d)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}b(x^3 + 3x^2d + 3xd^2 +$$

$$d^3 - t^2x - t^2d - x^2t - 2xdt - d^2t + t^3) - \frac{2}{3}$$

$$\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(-2t_1x^2 - 4xdt_1 - 2d^2t_1 + 2t_1^3$$

$$-2xtt_1 - 2dtt_1 + xt^2 + dt^2 + x^2t + 2xdt + td^2$$

$$+ 3t^2t_1 - t^3 - 3tt_1^2) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(-2t_1x^2$$

$$- 4xdt_1 - 2d^2t_1 + 2t_1^3 - 2xtt_1 - 2dtt_1 + xt^2 +$$

$$dt^2 + x^2t + 2xdt + td^2 + 3t^2t_1 - t^3 - 3tt_1^2) +$$

$$f_{cu}(t - 2t_1)(b-2b_1) + A_s'\varepsilon_{s1}E_s + A_s\varepsilon_{s2}E_s$$

เมื่อ $(x+d-t+t_1) \geq (\frac{x+d}{2})$ (4.17ข)

$$M = \frac{2}{3} f_{bu}(x+d)b(-\frac{3}{8}x - \frac{3}{8}d + \frac{t}{2}) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2} b(\frac{3}{8}x^4$$

$$+ \frac{3}{8}x^3d + \frac{9}{4}x^2d^2 + \frac{3}{2}xd^3 + \frac{3}{8}d^4 - \frac{1}{2}t^2x^2 - t^2xd$$

$$- \frac{1}{2}t^2d^2 - \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3 +$$

$$\frac{1}{4}t^3x + \frac{1}{4}t^3d + \frac{1}{8}t^4) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2}t_1x^3$$

$$+ \frac{3}{2}t_1x^2d + \frac{3}{2}t_1xd^2 + \frac{1}{2}t_1d^3 - \frac{1}{2}t_1^3x - \frac{1}{2}t_1^3d$$

$$- \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3 + \frac{3}{4}tt_1^2x +$$

$$\frac{3}{4}tt_1^2d - tt_1x^2 - 2tt_1xd - tt_1d^2 + \frac{7}{4}tt_1^3 + \frac{1}{2}t^2x^2$$

$$+ t^2xd + \frac{1}{2}t^2d^2 + \frac{1}{4}t^2t_1x + \frac{1}{4}t^2t_1d - \frac{1}{4}t^3x -$$

$$\frac{1}{4}t^3d + t^3t_1 - \frac{1}{8}t^4 - \frac{9}{4}t^2t_1^2) - \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+d)^2}$$

$$(b-2b_1)(\frac{1}{2}t_1x^3 + \frac{3}{2}t_1x^2d + \frac{3}{2}t_1xd^2 + \frac{1}{2}td^3 -$$

$$\frac{1}{2}t_1^3x - \frac{1}{2}t_1^3d - \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3$$

$$+ \frac{3}{4}tt_1^2x + \frac{3}{4}tt_1^2d - tt_1x^2 - 2tt_1xd - tt_1d^2 +$$

$$\frac{7}{4}tt_1^3 + \frac{1}{2}t^2x^2 + t^2xd + \frac{1}{2}t^2d^2 + \frac{1}{4}t^2t_1x$$

$$+ \frac{1}{4} t^2 t_1 d - \frac{1}{4} t^3 x - \frac{1}{4} t^3 d + t^3 t_1 - \frac{1}{8} t^4 - \frac{9}{4} t^2 t_1^2)$$

$$+ f_{cu}(b-2b_1) \left[- \frac{7}{24} x^2 - \frac{7}{12} xd - \frac{7}{24} d^2 + \frac{3}{8} tx + \right.$$

$$\frac{3}{8} td - \frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{2} tt_1 - \frac{(x+d-t+t_1)^2}{(x+d)} (- \frac{1}{3} (x+d) +$$

$$\left. \frac{2}{3} t_1 - \frac{t}{6}) \right] + A'_s \varepsilon_{s1} E_s (\frac{t}{2}-d') + A_s \varepsilon_{s2} E_s (\frac{t}{2}-d)$$

เมื่อ $(x+d-t+t_1) \leq \frac{(x+d)}{2} < (x+d-t_1)$ (4.18ก)

$$M = \frac{2}{3} f_{bu}(x+d) b(- \frac{3}{8}x - \frac{3}{8}d + \frac{t}{2}) + \frac{2}{3} \frac{f_{bu}}{(x+d)^2} b(\frac{3}{8}x^4 +$$

$$\frac{3}{2}x^3 d + \frac{9}{4}x^2 d^2 + \frac{3}{2}xd^3 + \frac{3}{8}d^4 - \frac{1}{2}t^2 x^2 - t^2 xd - \frac{1}{2}t^2 d^2$$

$$- \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2 d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3 + \frac{1}{4}t^3 x + \frac{1}{4}t^3 d +$$

$$\frac{1}{8}t^4) + \frac{2}{3} \frac{f_{bu}}{(x+d)^2} (b-2b_1)(\frac{1}{2}t_1 x^3 + \frac{3}{2}t_1 x^2 d + \frac{3}{2}t_1 xd^2$$

$$+ \frac{1}{2}t_1 d^3 - \frac{1}{2}t_1^3 x - \frac{1}{2}t_1^3 d - \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2 d - \frac{3}{4}txd^2 -$$

$$\frac{1}{4}td^3 + \frac{3}{4}tt_1^2 x + \frac{3}{4}tt_1^2 d - tt_1 x^2 - 2\, tt_1 xd - tt_1 d^2$$

$$+ \frac{7}{4}tt_1^3 + \frac{1}{2}t^2 x^2 + t^2 xd + \frac{1}{2}t^2 d^2 + \frac{1}{4}t^2 t_1 x + \frac{1}{4}t^2 t_1 d$$

$$- \frac{1}{4}t^3 x - \frac{1}{4}t^3 d + t^3 t_1 - \frac{1}{8}t^4 - \frac{9}{4}t^2 t_1^2) +$$

$$A'_s \varepsilon_{s1} E_s (\frac{t}{2}-d') + A_s \varepsilon_{s2} E_s (\frac{t}{2}-d)$$

เมื่อ $(x+d-t+t_1) \geq \frac{(x+d)}{2}$ (4.18ข)

โดยที่ $x = \frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{s2}} d$ (4.19)

และ $\varepsilon_{s1} = \frac{x+d-d'}{x+d} \varepsilon_u$ (4.20)

กรณี ข เมื่อ $t > (x+d) > (t-t_1)$

$$P = \frac{3}{2} f_{bu}(x+d)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(-2t_1x^2 - 4xdt_1 - 2d^2t_1 + 2t_1^3 - 2xtt_1 - 2dtt_1 + xt^2 + dt^2 + x^2t + 2xdt + td^2 + 3t^2t_1 - t^3 - 3tt_1^2) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(-2t_1x^2 - 4xdt_1 - 2d^2t_1 + 2t_1^3 - 2xtt_1 - 2dtt_1 + xt^2 + dt^2 + x^2t + 2xdt + td^2 + 3t^2t_1 - t^3 - 3tt_1^2) + f_{cu}(b-2b_1)\left[\frac{3}{4}(x+d) - t_1 - \frac{(x+d-t+t_1)^2}{(x+d)}\right] + A_s'\varepsilon_{s1}E_s + A_s\varepsilon_{s2}E_s \quad (4.21)$$

$$M = \frac{2}{3} f_{bu}(x+d)b(-\frac{3}{8}x - \frac{3}{8}d + \frac{t}{2}) + \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2}t_1x^3 + \frac{3}{2}t_1x^2d + \frac{3}{2}t_1xd^2 + \frac{1}{2}t_1d^3 - \frac{1}{4}t_1^3x - \frac{1}{2}t_1^3d - \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3 + \frac{3}{4}tt_1^2x + \frac{3}{4}tt_1^2d - tt_1x^2 + \frac{7}{4}tt_1^3 + \frac{1}{2}t^2x^2 - 2tt_1xd + t^2xd + \frac{1}{2}t^2d^2 + \frac{1}{4}t^2t_1x + \frac{1}{4}t^2t_1d - \frac{1}{4}t^3x - tt_1d^2 - \frac{1}{4}t^3d + t^3t_1 - \frac{1}{8}t^4 - \frac{9}{4}t^2t_1^2) - \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(x+d)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2}t_1x^3 + \frac{3}{2}t_1x^2d + \frac{3}{2}t_1xd^2 + \frac{1}{2}t_1d^3 -$$

$$\frac{1}{2}t_1^3x - \frac{1}{2}t_1^3d - \frac{1}{4}tx^3 - \frac{3}{4}tx^2d - \frac{3}{4}txd^2 - \frac{1}{4}td^3$$

$$+ \frac{3}{4}tt_1^2x + \frac{3}{4}tt_1^2d - tt_1x^2 - 2tt_1xd - tt_1d^2 +$$

$$\frac{7}{4}tt_1^3 + \frac{1}{2}t^2x^2 + t^2xd + \frac{1}{2}t^2d^2 + \frac{1}{4}t^2t_1x +$$

$$\frac{1}{4}t^2t_1d - \frac{1}{4}t^3x - \frac{1}{4}t^3d + t^3t_1 - \frac{1}{8}t^4 - \frac{9}{4}t^2t_1^2)$$

$$+ f_{cu}(b-2b_1)\left[-\frac{7}{24}x^2 - \frac{7}{12}xd - \frac{7}{24}d^2 + \frac{3}{8}tx +\right.$$

$$+ \frac{3}{8}td - \frac{t_1^2}{2} - \frac{1}{2}tt_1 - \frac{(x+d-t+t_1)^2}{(x+d)}\left(-\frac{x+d}{3} +\right.$$

$$\left.\left.\frac{2}{3}t_1 - \frac{t}{6}\right)\right] + A'_s\varepsilon_{s1}E_s\left(\frac{t}{2} - d'\right) +$$

$$A_s\varepsilon_{s2}E_s\left(\frac{t}{2} - d\right) \qquad (4.22)$$

ทั้งนี้ x และ ε_{s1} ต้องสอดคล้องตามสมการ (4.19) และ (4.20) ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกัน เมื่อผนังคอนกรีตบล็อคที่มีเหล็กเสริมเกิดการวิบัติโดยแรงดึงเป็นหลัก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.11 ภายใต้สภาวะสมดุลย์ เขียนสมการได้ดังนี้คือ

กรณี ก. เมื่อ $(d-x) \geq t_1$

$$P = \frac{2}{3}f_{bu}(d-x)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3 - 3d^2x + 3x^2d$$

$$- x^3 - t_1^2d + xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3)$$

$$+ \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3 - 3d^2x + 3x^2d - x^3 - t_1^2d$$

$$+ xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) +$$

$$f_{cu}(b-2b_1)\left[\frac{3}{4}(d-x)-t_1\right] + A'_s\varepsilon_{s1}E_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) \geq t_1$ (4.23ก)

$$P = \frac{2}{3}f_{bu}(d-x)b - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3 - 3d^2x + 3x^2d - x^3 - t_1^2d + xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(d^3 - 3d^2x + 3x^2d - x^3 - t_1^2d + xt_1^2 - t_1d^2 + 2dxt_1 - x^2t_1 + t_1^3) + f_{cu}\frac{(d-x-t_1)^2}{(d-x)}(b-2b_1) + A'_s\varepsilon_{s1}E_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) < t_1$ (4.23ข)

$$M = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{1}{2}dt - \frac{3}{8}d^2 - \frac{1}{2}xt + \frac{3}{4}xd - \frac{3}{8}x^2) - \frac{2}{3}\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2}td^3 - \frac{3}{2}d^2xt + \frac{3}{2}x^2dt - \frac{1}{2}x^3t - \frac{1}{2}t_1^2dt + \frac{1}{2}xt_1^2t - \frac{1}{2}t_1td^2 + xdt_1t - \frac{1}{2}x^2tt_1 + \frac{1}{2}tt_1^3 - \frac{1}{4}t_1d^3 + \frac{3}{4}d^2xt_1 - \frac{3}{4}t_1x^2d + \frac{1}{4}t_1x^3 + \frac{1}{4}dt_1^3 - \frac{1}{4}t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{5}{8}t_1^4 - \frac{3}{8}d^4 + \frac{3}{2}xd^3 - \frac{9}{4}d^2x^2 + \frac{3}{2}dx^3 - \frac{3}{8}x^4) + \frac{2}{3}\frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2}td^3 - \frac{3}{2}d^2xt + \frac{3}{2}x^2dt -$$

$$\frac{1}{2} x^3t - \frac{1}{2} t_1^2dt + \frac{1}{2} xt_1^2t - \frac{1}{2} t_1td^2 + xdtt_1 -$$

$$\frac{1}{2} x^2tt_1 + \frac{1}{2} tt_1^3 - \frac{1}{4} t_1d^3 + \frac{3}{4} d^2xt_1 - \frac{3}{4} t_1x^2d$$

$$+ \frac{1}{4} t_1x^3 + \frac{1}{4} dt_1^3 - \frac{1}{4} t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2$$

$$- \frac{5}{8} t_1^4 - \frac{3}{8} d^4 + \frac{3}{2} xd^3 - \frac{9}{4} d^2x^2 + \frac{3}{2} dx^3 - \frac{3}{8} x^4)$$

$$+ f_{cu}(b-2b_1)(\frac{3}{8} dt - \frac{3}{8}xt - \frac{1}{2} tt_1 - \frac{7}{24} d^2 + \frac{7}{12} xd$$

$$+ \frac{1}{2} t_1^2 - \frac{7}{24} x^2) + A'_s\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') - A_s\varepsilon_{sy}E_s$$

$$(\frac{t}{2} - d)$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) \geq t_1$ (4.24ก)

$$M = \frac{2}{3} f_{bu}b(\frac{1}{2} dt - \frac{3}{8} d^2 - \frac{1}{2} xt + \frac{3}{4} xd - \frac{3}{8} x^2) - \frac{2}{3}$$

$$\frac{f_{bu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2} td^3 - \frac{3}{2} d^2xt + \frac{3}{2} x^2dt - \frac{1}{2} x^3t$$

$$- \frac{1}{2} t_1^2dt + \frac{1}{2} xt_1^2t - \frac{1}{2} t_1td^2 + xdt_1t - \frac{1}{2} x^2tt_1$$

$$+ \frac{1}{2} tt_1^3 - \frac{1}{4} t_1d^3 + \frac{3}{4} d^2xt_1 - \frac{3}{4} t_1x^2d + \frac{1}{4} t_1x^3$$

$$+ \frac{1}{4} dt_1^3 - \frac{1}{4} t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2 - \frac{5}{8} t_1^4$$

$$- \frac{3}{8} d^4 + \frac{3}{2} xd^3 - \frac{9}{4} d^2x^2 + \frac{3}{2} dx^3 - \frac{3}{8} x^4) +$$

$$\frac{2}{3} \frac{f_{gu}}{(d-x)^2}(b-2b_1)(\frac{1}{2} td^3 - \frac{3}{2} d^2xt + \frac{3}{2} x^2dt -$$

$$\frac{1}{2}x^3t - \frac{1}{2}t_1^2dt + \frac{1}{2}xt_1^2t - \frac{1}{2}t_1td^2 + xdt_1t -$$

$$\frac{1}{2}x^2tt_1 + \frac{1}{2}tt_1^3 - \frac{1}{4}t_1d^3 + \frac{3}{4}d^2xt_1 - \frac{3}{4}t_1x^2d$$

$$+ \frac{1}{4}t_1x^3 + \frac{1}{4}dt_1^3 - \frac{1}{4}t_1^3x + t_1^2d^2 - 2xdt_1^2 + x^2t_1^2$$

$$- \frac{5}{8}t_1^4 - \frac{3}{8}d^4 + \frac{3}{2}xd^3 - \frac{9}{4}d^2x^2 + \frac{3}{2}dx^3 - \frac{3}{8}x^4)$$

$$+ f_{cu}\frac{(d-x-t_1)^2}{(d-x)}(b-2b_1)(-\frac{d}{3} + \frac{x}{3} - \frac{2}{3}t_1 + \frac{t}{2}) +$$

$$A_s'\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') - A_s\varepsilon_{sy}E_s(\frac{t}{2} - d)$$

เมื่อ $(\frac{d-x}{2}) < t_1$ (4.24ข)

โดยที่ $x = \frac{\varepsilon_{s2}}{\varepsilon_u+\varepsilon_{s2}}d$ (4.25)

และ $\varepsilon_{s1} = \frac{d-x-d'}{d-x}\varepsilon_u$ (4.26)

กรณี ข. เมื่อ $(d-x) < t_1$

$$P = \frac{2}{3}f_{bu}(d-x)b + A_s'\varepsilon_{s1}E_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s \quad (4.27)$$

$$M = \frac{2}{3}f_{bu}b(\frac{1}{2}dt - \frac{3}{8}d^2 - \frac{1}{2}xt + \frac{3}{4}xd - \frac{3}{8}x^2) +$$

$$A_s'\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') - A_s\varepsilon_{sy}E_s(\frac{t}{2} - d) \quad (4.28)$$

ทั้งนี้ x และ ε_{s1} ต้องสอดคล้องตามสมการ (4.25) และ (4.26) ตามลำดับ

4.3 การวิเคราะห์เมื่อกำหนดการกระจายของหน่วยแรงอัดของวัสดุก่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดด้วยทฤษฎีกำลังประลัย โดยการสมมุติให้การกระจายของหน่วยแรงอัดของวัสดุเป็นรูปพาราโบลา เป็นการแทนค่ากำลังการรับน้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิดตามค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะพบว่ามีความยุ่งยากและใช้เวลาพอสมควรจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาวิธีโดยประมาณเพื่อลดความยุ่งยาก โดยกำหนดให้การกระจายของหน่วยแรงอัดของวัสดุเป็นบล็อครูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พร้อมทั้งพิจารณาให้หน้าตัดของผนังคอนกรีตบล็อคที่ได้รับการกรอกด้วยปูนเสมือนว่าประกอบด้วยวัสดุเพียงอย่างเดียว อันเป็นการสะดวกในการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัด

กำลังอัดประลัย (ultimate compressive strength) ของพื้นที่หน้าตัด ซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตบล็อคและปูนกรอกสามารถหาได้จากกำลังอัดประลัยของคอนกรีตบล็อคและของปูนกรอก แต่ทั้งนี้มิได้เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของคอนกรีตบล็อคและของปูนกรอก[23] พิจารณาสมการ

$$f'm = nf'_{mu} + (1-n)\sigma_{cg} + A(1-n)\sigma_{cg} \qquad (4.29)$$

โดยที่ f'_m = กำลังอัดประลัยเชิงประกอบของคอนกรีตบล็อคและปูนกรอก

f'_m = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตบล็อคจากการทดสอบปริซึม

σ_{cg} = กำลังอัดประลัยของปูนกรอก

n = อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดสุทธิต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีตบล็อค

A = ตัวประกอบ

จากสมการ (4.29) จะเห็นว่าเทอมแรกเป็นกำลังอัดประลัยของหน้าตัดที่ได้จากคอนกรีตบล็อค เทอมที่สองเป็นกำลังอัดประลัยของหน้าตัดที่ได้จากปูนกรอก และเทอมที่สามเป็นกำลังประลัยของหน้าตัดที่ได้จากปูนกรอกเนื่องจากการโอบของคอนกรีตบล็อค ซึ่งเป็นผลเพิ่มเติมในการวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาสมการ (4.29) ประกอบกับการทดสอบ ในกรณีที่หน้าตัดเป็นปูนกรอกเพียงอย่างเดียว กล่าวคือ $n = 0$ กำลังอัดประลัยของหน้าตัดมีค่าเท่ากับกำลังอัดประลัยของปูนกรอก

จะได้ $\sigma_{cg} = 0 + \sigma_{cg} + A\sigma_{cg}$

ดังนั้น $A = 0$

ทำนองเดียวกัน พิจารณาในกรณีที่หน้าตัดเป็นคอนกรีตบล็อคตัน กล่าวคือ $n = 1$ กำลังอัดประลัยของหน้าตัดมีค่าเท่ากับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตบล็อค

จะได้ $f'_{mu} = f'_{mu} + 0 + 0$

ดังนั้น $A \neq 0$

พิจารณาสมการ (4.29) เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตบล็อคมีค่าเท่ากับกำลังอัดประลัยของปูนกรอก กล่าวคือ $f'_{mu} = \sigma_{cg}$ กำลังอัดประลัยของหน้าตัดมีค่าเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตบล็อคหรือปูนก่อ

จะได้ $f'_{mu} = nf'_{mu} + (1-n)f'_{mu} + A(1-n)f'_{mu}$

หรือ $\sigma_{cg} = n\sigma_{cg} + (1-n)\sigma_{cg} + A(1-n)\sigma_{cg}$

ดังนั้น $A = 0$

จะเห็นได้ว่าตัวประกอบ A มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ $n = 0$ หรือ $f'_{mu} = \sigma_{cg}$ และตัวประกอบ A มีค่าใด ๆ เมื่อ $n = 1$ หรือ $f'_{mu} \neq \sigma_{cg}$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของตัวประกอบ A ได้เป็น

$$A = (1 - \frac{\sigma_{cg}}{f'_{mu}})n = Kn \qquad (4.30)$$

จากสมการ (4.29) เมื่อแทนค่าสมการ (4.30) จะได้

$$f'_m = nf'_{mu} + (1-n)\sigma_{cg} + n(1 - \frac{\sigma_{cg}}{f'_{mu}})(1-n)\sigma_{cg} \qquad (4.31)$$

สมการ (4.31) เป็นสมการสำหรับหากำลังอัดประลัยของหน้าตัด เมื่อทราบค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตบล็อคและปูนกรอก

4.3.1 ผนังก่อคอนกรีตบล็อคไม่มี เหล็ก เสริม

การวิบัติในสภาวะวิบัติสมดุลย์ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 คือ หน้าหนึ่งของผนังเกิดความ เครียดประลัย ε_u ในขณะที่อีกหน้าหนึ่งมีค่าความ เครียด เป็นศูนย์ และ เมื่อการกระจายของหน่วยแรงอัดของวัสดุก่อ เป็นบล็อครูปสี่ เหลี่ยม พิจารณาที่สภาวะสมดุลย์ของแรงจะได้

$$P_b = 0.85f'_m bk_1 t \qquad (4.32)$$

และ $$M_b = P_b e_b = 0.425f'_m bk_1 t^2(1-k_1) \qquad (4.33)$$

การวิบัติในสภาวะวิบัติโดยแรงอัด เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อการกระจายของความ เครียดทั้งสองหน้าของผนัง เป็นความ เครียดอัดโดยที่ความ เครียดที่หน้าหนึ่งมีค่าสูงถึงความ เครียดประลัย ภายใต้สภาวะสมดุลย์ของแรงจะได้

$$P = 0.85f'_m bk_1 k_u d \qquad \text{เมื่อ } k_1 k_u d < t \qquad (4.34ก)$$

$$P = 0.85f'_m bt \qquad \text{เมื่อ } k_1 k_u d \geq t \qquad (4.34ข)$$

และ $$M = 0.425f'_m bk_1 k_u d(t-k_1 k_u d) \qquad \text{เมื่อ } k_1 k_u d < t \qquad (4.35ก)$$

$$M = 0 \qquad \text{เมื่อ } k_1 k_u d \geq t \qquad (4.35ข)$$

โดยที่ $$k_u d = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u - \varepsilon} t \qquad (4.36)$$

การวิบัติในสภาวะวิบัติโดยแรงดึง เป็นหลักตามที่แสดงในรูปที่ 4.14 โดยที่มีความเครียดทางหน้าที่วิบัติ เป็นความ เครียดดึงและมีค่า เกินพิกัด ดังนั้นจากสภาวะสมดุลย์ของแรงจะได้

$$P = 0.85f'_m bk_1 k_u d \qquad (4.37)$$

และ $$M = 0.425f'_m bk_1 k_u d(t-k_1 k_u d) \qquad (4.38)$$

$$\text{โดยที่ } k_u d = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u+\varepsilon} t \qquad (4.39)$$

4.3.2 ผนังก่อคอนกรีตบล็อคมีเหล็กเสริม

เมื่อผนังก่อคอนกรีตบล็อคเสริมด้วยเหล็กเสริมยืน ความสามารถในการรับน้ำหนักในสภาวะวิบัติสมดุลย์ตามที่แสดงในรูปที่ 4.15 สามารถหาได้จากสภาวะสมดุลย์ของแรงได้เป็น

$$P_b = 0.85f'_m k_1 k_u db + A'_s \varepsilon_s E_s - A_s f_y \qquad (4.40)$$

$$\text{และ } M_b = P_b e_b = 0.425f'_m k_1 k_u db(t-k_1 k_u d) + A'_s \varepsilon_s E_s (\tfrac{1}{2}-d')$$

$$- A_s f_y (\tfrac{t}{2} - d) \qquad (4.41)$$

$$\text{โดยที่ } k_u d = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{sy}+\varepsilon_u} d \qquad (4.42)$$

$$\text{และ } \varepsilon_s = \frac{k_u d-d'}{d-k_u d} \varepsilon_{sy} \qquad (4.43)$$

และสำหรับการวิบัติในสภาวะวิบัติโดยแรงอัดเป็นหลัก ดังแสดงการกระจายของความเครียดและหน่วยแรงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ความสามารถในการรับน้ำหนักสามารถหาได้ดังนี้

กรณี ก. เมื่อทั้งสองหน้าของผนังรับหน่วยแรงอัด จะได้

$$P = 0.85f'_m bk_1 k_u d+A'_s \varepsilon_{s1} E_s+A_s \varepsilon_{s2} E_s \quad \text{เมื่อ } k_1 k_u d<t \qquad (4.44ก)$$

$$P = 0.85f'_m bt + A'_s \varepsilon_{s1} E_s + A_s \varepsilon_{s2} E_s \quad \text{เมื่อ } k_1 k_u d \geq t \qquad (4.44ข)$$

$$\text{และ } M = 0.425f'_m bk_1 k_u d(t-k_1 k_u d) + A'_s \varepsilon_{s1} E_s (\tfrac{t}{2} - d)$$

$$+ A_s \varepsilon_{s2} E_s (\tfrac{t}{2} - d) \quad \text{เมื่อ } k_1 k_u d<t \qquad (4.45ก)$$

$$M = A'_s\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') + A_s\varepsilon_{s2}E_s(\frac{t}{2} - d) \quad \text{เมื่อ } k_1k_ud \geq t \tag{4.45ข}$$

โดยที่ $$k_ud = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u - \varepsilon} t \tag{4.46}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{k_ud - d'}{k_ud} \varepsilon_u \tag{4.47}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{k_ud - d}{k_ud} \varepsilon_u \tag{4.48}$$

กรณี ข. เมื่อหน้าหนึ่งของผนังรับหน่วยแรงอัดในขณะที่อีกหน้าหนึ่งรับหน่วยแรงดึง จากสภาวะสมดุลย์ของแรงจะได้

$$P = 0.85f'_mbk_1k_ud + A'_s\varepsilon_{s1}E_s - A_s\varepsilon_{s2}E_s \tag{4.49}$$

และ $$M = 0.425f'_mbk_1k_ud(t - k_1k_ud) + A'_s\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') - A_s\varepsilon_{s2}E_s(\frac{t}{2} - d) \tag{4.50}$$

โดยที่ $$k_ud = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon + \varepsilon_u} t \tag{4.51}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{k_ud - d'}{k_ud} \varepsilon_u \tag{4.52}$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{d - k_ud}{k_ud} \varepsilon_u \tag{4.53}$$

และสำหรับการวิบัติในสภาวะวิบัติโดยแรงดึงเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จากสภาวะสมดุลย์ของแรงจะได้

$$P = 0.85f'_mbk_1k_ud + A'_s\varepsilon_{s1}E_s - A_s\varepsilon_{sy}E_s \tag{4.54}$$

และ $$M = 0.425f'_mbk_1k_ud(t - k_1k_ud) + A'_s\varepsilon_{s1}E_s(\frac{t}{2} - d') - A_s\varepsilon_{sy}E_s(\frac{t}{2} - d) \tag{4.55}$$

โดยที่ $k_u d = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon+\varepsilon_u} t$ (4.56)

$$\varepsilon_{s1} = \frac{k_u d - d'}{k_u d} \varepsilon_u \quad (4.57)$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{d - k_u d}{k_u d} \varepsilon_u \quad (4.58)$$