

บทที่ 1

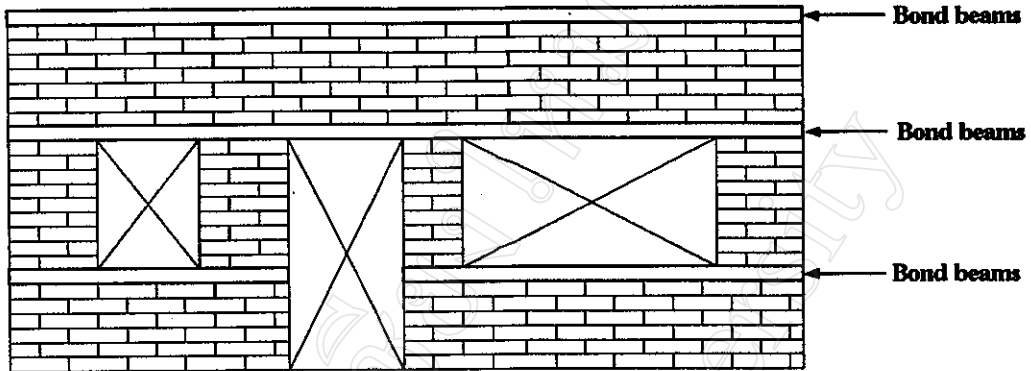
บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการ

การก่อสร้างบ้านพักอาศัย หรืออาคารต่างๆในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้ระบบพื้นคาน เสา ส่วนผนังจะถือว่าเป็นเพียงส่วนประกอบส่วนหนึ่งของอาคารเท่านั้น ไม่ได้นำมาพิจารณาเพื่อรับน้ำหนักขององค์อาคารเลย ทั้งที่ผนังก็มีกำลังสูงพอที่จะรับน้ำหนักขององค์อาคารได้ เนื่องจากผนังจะมีอยู่ทั่วไปในอาคาร เมื่อรวมพื้นที่หน้าตัดแล้วจะพบว่าในพื้นที่ในการรับแรงจำนวนมาก ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าไม่มากนัก ในต่างประเทศได้มีการใช้ผนังรับน้ำหนักในรูปแบบของผนังวัสดุก่อ เช่น อิฐ คอนกรีตบล็อก มานานแล้ว อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยก็ยังไม่มีการใช้ระบบผนังรับน้ำหนักอย่างจริงจัง เนื่องจากผู้ออกแบบยังขาดข้อมูลและพฤติกรรมที่แท้จริงของกำแพงคอนกรีตบล็อก ภายใต้อิทธิพลของแรงที่แตกต่างกันออกไป เพราะในการหาข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต้องทำการทดสอบกับตัวอย่างในแต่ละกรณีไป ซึ่งเป็นการทดสอบที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์วิธีการสำหรับวิเคราะห์กำแพงคอนกรีตบล็อกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม วิธีการนี้จะเสียค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับวิธีเดิม เนื่องจากข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์นั้น จะใช้ข้อมูลจากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาทำผนัง นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์กำแพงคอนกรีตบล็อกภายใต้อิทธิพลต่างๆ เช่น ลักษณะของการใส่แรงรูปแบบต่างๆโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุที่หาไว้แล้ว ไม่จำเป็นต้องก่อผนังขึ้นมาใหม่ แล้วทำการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักของผนังในกรณีต่างๆ

ในการก่อกำแพงคอนกรีตบล็อกโดยทั่วไปพบว่า ส่วนของผนังที่มีช่องเปิดจะใช้คานเอ็น (Bond Beams) เพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นเฉพาะที่ (Stress Concentration) ที่เกิดขึ้น และคานเอ็นนี้จะก่อเป็นแนวตลอดความยาวของผนัง โดยตำแหน่งของคานเอ็นในอาคารทั่วไป สามารถดูได้จากรูปที่ 1.1 ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยพยายามศึกษาผลของคานเอ็นที่มีต่อพฤติกรรมกำแพงคอนกรีตบล็อก ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยการก่อกำแพงคอนกรีตบล็อกที่มีคานเอ็นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แล้วทำการใส่น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่นสม่ำเสมอ เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของกำแพงคอนกรีตบล็อก ซึ่งการทดสอบนี้จะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและเสียเวลาในการทดสอบมาก

ดังนั้นหากนำวิธีการไฟไนท์อลลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์ จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่าย และประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ได้อย่างมาก



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของคานเอ็นในอาคาร โดยทั่วไป
(ที่มา : วัจนวงศ์ กริพละ, 2542)

1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโครงการวิจัย

1.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับกำแพงคอนกรีตบล็อก

ก. พฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในการก่อกำแพงคอนกรีตบล็อก

จากการศึกษาพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก จะพบว่ามีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมไม่แน่นอน เนื่องจากกำแพงจะประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลายชนิด ซึ่งพฤติกรรมของกำแพงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาก่อกำแพง หากแยกเป็นวัสดุหลักได้แก่ คอนกรีต บล็อก ปูนก่อและปูนกรอก นอกจากนี้ทั้งคอนกรีตบล็อก ปูนก่อและปูนกรอกก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตและส่วนประกอบ ดังนั้นหากเราต้องการศึกษาพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก เราจึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตบล็อก ปูนก่อและปูนกรอกด้วย

คอนกรีตบล็อกประกอบด้วย ปูน ทรายและหิน ดังนั้นคุณสมบัติจึงมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับ กระบวนการผลิตและสัดส่วนผสม จะพบว่าคอนกรีตบล็อกมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ปูนก่อจะเป็นตัวประสานระหว่างคอนกรีตบล็อกให้ยึดติดกัน ซึ่งพฤติกรรมของปูนก่อจะเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น และปูนกรอกจะใช้สำหรับกรอกลงในช่องว่างของคอนกรีตบล็อกเพื่อทำคานเอ็น พฤติกรรมของปูนกรอกจะเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น จึงทำให้พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อกมีลักษณะการเปลี่ยนรูปแบบไม่ยืดหยุ่น ตามไปด้วย

ข. ทฤษฎีการวิบัติของปริซึม

จากการศึกษาการวิบัติของกำแพงอิฐ พบว่าเกิดจากคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่เท่ากันระหว่างอิฐและปูนก่อ ปูนก่อในแนวราบ (Bed Joint) จะรับน้ำหนักที่ถ่ายมาทั้งหมดเช่นเดียวกับอิฐ แต่เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนก่อน้อยกว่าอิฐประมาณ 2-3 เท่า ดังนั้นการเปลี่ยนรูปร่างด้านข้างของปูนก่อจะเกิดขึ้นสูงกว่าอิฐในภาวะปกติ แต่การยึดเหนี่ยวระหว่างอิฐและปูนก่อ ทำให้การขยายตัวถูกจำกัดส่งผลให้เกิดแรงดึงขึ้นในอิฐ เป็นเหตุให้เกิดการวิบัติของกำแพงในที่สุด ส่วนปริซึมคอนกรีตบล็อก จะมีพฤติกรรมต่างกันออกไป โดยในคอนกรีตบล็อกหากก่อปูนก่อเฉพาะเปลือกบล็อก จะทำให้เกิดแรงดึงในเอวบล็อก และจะเกิดการแตกร้าวของเอวบล็อก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติ ดังนั้นจึงมีการสร้างสมการสำหรับใช้หาค่ากำลังของปริซึมคอนกรีตบล็อกขึ้นมาโดยเฉพาะ

Hamid and Drysdale (1979) สร้างสมการสำหรับใช้ประมาณกำลังของปริซึมคอนกรีตบล็อกกลางขึ้นมา โดยกำหนดแรงที่กระทำต่อปริซึมคอนกรีตบล็อกค้ำรูปที่ 1.2 แล้วใช้เงื่อนไขการวิบัติค้ำรูปที่ 1.3 คือเมื่อเกิดแรงดึงในอิฐและแรงอัดในปูนก่อ จะทำให้บริเวณของวัสดุค้ำกล่าวเกิดแรงเฉือนสูงมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียหาย

สมการประเมินกำลังที่ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ปริซึมที่มีปูนกรอก และไม่มีปูนกรอก สมการสำหรับปริซึมที่มีปูนกรอกแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

- กรณีที่ปูนกรอกมีความเครียดที่ค้ำอัดสูงสุดต่ำกว่าบล็อก นั่นคือวัสดุที่ใช้กรอกจะถึงจุดวิบัติก่อน การวิบัติของปูนกรอกทำให้ปริมาตรของปูนกรอกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลก็คือจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในบล็อกตามมา สมการที่ได้ในกรณีนี้คือ

$$f'_{mg} = \frac{4.1\sigma_{tb} + 1.14\alpha\sigma_{cm} + \beta\sigma_{cg}}{4.1\sigma_{tb} + (1.14\alpha + \frac{c\beta}{n})\sigma_{cb}} \times \frac{\sigma_{cb}}{n\gamma_K} \quad (1.1)$$

โดยที่

f'_{mg} คือ กำลังรับแรงอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกที่มีปูนกรอก

σ_{tb} คือ กำลังรับแรงดึงของบล็อก

σ_{cb} คือ กำลังรับแรงอัดของบล็อก

σ_{cm} คือ กำลังรับแรงอัดของปูนก่อ

σ_{cg} คือ กำลังรับแรงอัดของปูนกรอก

α คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาของปูนก่อกต่อความสูงของบล็อกมีค่าเท่ากับ $\frac{t_m}{t_b}$

n คือ อัตราส่วนระหว่าง โมดูลัสยืดหยุ่นของบล็อกต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของปูนกรอกมีค่าเท่ากับ $\frac{E_{block}}{E_{grout}}$

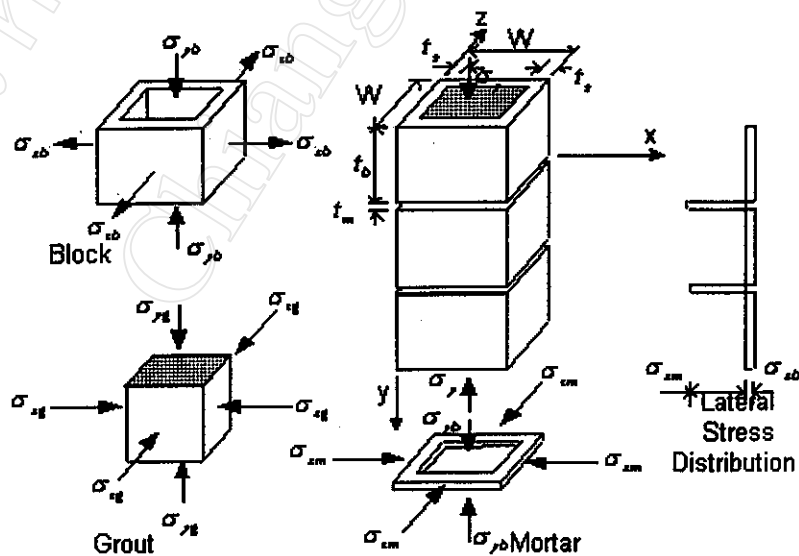
η คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดสุทธิของบล็อกในด้านที่น้อยต่อพื้นที่หน้าตัดรวม มีค่าเท่ากับ $(\frac{A_{block}}{A_{block} + A_{grout}})$

c คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านที่มากที่สุดต่อด้านที่น้อยที่สุดของปูนกรอก

β มีค่าเท่ากับ $(\frac{\sqrt{1-\eta}}{1-\sqrt{1-\eta}})$

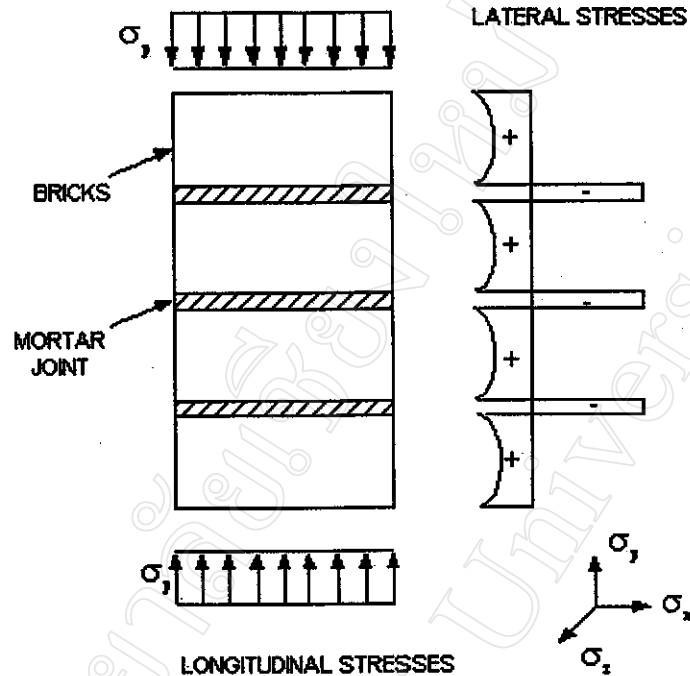
γ มีค่าเท่ากับ $(\frac{1}{1-(n-1)\eta})$

K คือ ตัวประกอบการปรับแก้หน่วยแรงมีค่าเท่ากับ $1.08 - \frac{0.21}{n}$



รูปที่ 1.2 ลักษณะของแรงที่กระทำต่อปริซึมคอนกรีตบล็อกแบบกลวง

(ที่มา : Hamid and Drysdale, 1979)



รูปที่ 1.3 แบบจำลองอิฐก่อในการวิเคราะห์
(ที่มา : Hilsdorf, 1967)

- กรณีที่เปลือกบรรจุถึงค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดที่ความเครียดต่ำกว่าปูนกรอก ในกรณีนี้กำลังของปริซึมจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของเปลือก หรือกำลังรับแรงอัดของปูนกรอกอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยทั่วไปกำลังของปูนกรอกไม่สูงมาก สมการที่ได้คือ

$$f'_{mg} = \frac{3.6\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cm}}{3.6\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cb}} \times \frac{\sigma_{cb}}{n\gamma K} \quad (1.2)$$

แต่บางกรณีที่กำลังของปูนกรอกสูงมาก ถึงแม้เปลือกเปลือกที่อยู่ด้านนอกแตกออกแต่ปูนกรอกก็สามารถรับกำลังต่อไปได้ เพราะฉะนั้นกำลังของปริซึมจึงขึ้นอยู่กับกำลังของปูนกรอกเพียงอย่างเดียวดังสมการที่ (1.3)

$$f'_{mg} = (1 - \eta)\sigma_{cg} \quad (1.3)$$

สำหรับปริซึมที่ไม่มีปูนกรอก Hamid and Drysdale (1983) ก็ใช้หลักการเดียวกันกับสมการที่ (1.2) ถึงสมการที่ (1.3) ในการวิเคราะห์ ได้ผลดังสมการที่ (1.4)

$$f'_{mu} = \eta \frac{3.6\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cm}}{3.6\sigma_{tb} + \alpha\sigma_{cb}} \times \frac{\sigma_{cb}}{K} \quad (1.4)$$

โดยที่

f'_{mu} คือ กำลังรับแรงอัดของปริซึมคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีปูนกรอก

Boult (1979) ทำการทดลองหาอิทธิพลของ สัดส่วนความสูงต่อความหนาของคอนกรีตบล็อก (h/t) ต่อเงื่อนไขการยืคปลายของกำแพง โดยพบว่า เมื่อค่า h/t มีค่าอยู่ระหว่าง 1-3 ผลของการยืคปลายจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อค่า h/t มีค่าอยู่ระหว่าง 3-5 จะทำให้อิทธิพลของการยืคปลายมีผลน้อยลง และเมื่อค่า h/t มีค่าอยู่ระหว่าง 5-12 การยืคปลายจะไม่มีผลต่อกำแพง ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อค่า h/t เพิ่มขึ้นจะทำให้อิทธิพลของการยืคปลายน้อยลง

ค. ทฤษฎีการวิบัติของกำแพง

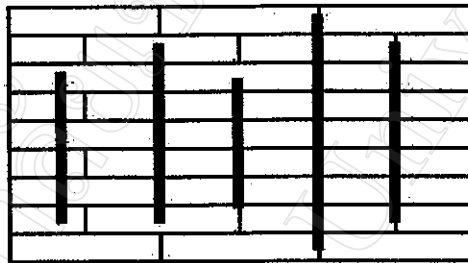
การศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของกำแพง มีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์กำแพงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของกำแพงจะต้องใส่เงื่อนไขการเสียหายที่จะเกิดขึ้น เพื่อที่จะได้ทราบว่าความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อใด ที่กำลังอัดเท่าใด นอกจากนี้ในการหารูปแบบการเสียหาย (Failure mode) ของกำแพงก็ต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับการวิบัติของกำแพงเช่นกัน ซึ่งพฤติกรรมการแตกร้าวของกำแพงมีความแตกต่างจากปริซึมมาก เนื่องจากมีความกว้างของกำแพงและอิทธิพลของบล็อกข้างเคียงมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงทำให้รูปแบบการเสียหายของกำแพงมีได้หลายรูปแบบ

Andreus (1996) สรุปว่าการวิบัติของกำแพงเนื่องจากน้ำหนักกระทำในแนวราบเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ

- ก. การรูดของแนวปูนก่อ (Slipping of Mortar Joint)
- ข. การแตกร้าวของอิฐและการปริแยกของแนวปูนก่อ (Cracking of Bricks and Splitting of Mortar Joint)
- ค. การแยกตัวกลางระนาบของกำแพง (Middle Plan Spalling)

จากสาเหตุทั้ง 3 ประการดังกล่าว เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่มีน้ำหนักกระทำในแนวตั้งเท่านั้น พบว่ารูปแบบของการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ มี 3 รูปแบบ คือ

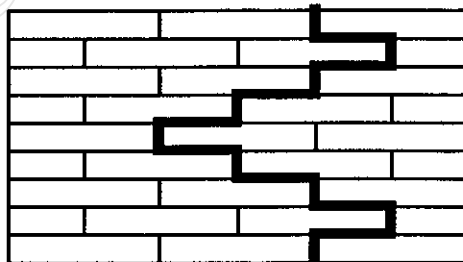
- เกิดการปริแยกของอิฐและแนวปูนก่อในแนวตั้ง (Splitting of Brick and Head Joint) การวิบัติในรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อิฐมีความแข็งแรงน้อย และจะเกิดขึ้นในระนาบตั้งตั้งฉากกับกำแพง ดังรูปที่ 1.4 รอยร้าวอยู่ในแนวปูนก่อ (Head Joint) และผ่านกลางอิฐที่ตำแหน่งตรงกับแนวปูนก่อ จากลักษณะดังกล่าวสรุปได้ว่า เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดึง (Tension Failure) โดยเกิดแรงดึงสลายแรงยึดเหนี่ยว (Tension Debonding) ขึ้นระหว่างปูนก่อกับอิฐ เป็นผลให้กำแพงวิบัติในที่สุด



รูปที่ 1.4 ลักษณะการปริแยกของอิฐและแนวปูนก่อในแนวตั้ง

(ที่มา : Andreaus, 1996)

- เกิดการรูดของแนวปูนก่อในแนวราบและปริแยกของแนวปูนก่อในแนวตั้ง (Slipping of Bed Joints and Splitting of Head Joint) การวิบัติในรูปแบบนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับรูปแบบแรก แต่จะเกิดขึ้นในกรณีที่อิฐมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับปูนก่อ การวิบัติจะเริ่มจากการรูดของแนวปูนก่อในแนวราบก่อน หลังจากนั้นจะเกิดการปริแยกของแนวปูนก่อในแนวตั้งก่อให้เกิดรอยร้าว ดังรูปที่ 1.5 เมื่อเกิดการแตกร้าวดังกล่าวแล้ว กำแพงยังคงรับน้ำหนักต่อไปได้ระดับหนึ่งก่อนที่จะยุบพังลงด้วยแรงอัด



รูปที่ 1.5 ลักษณะการรูดของแนวปูนก่อในแนวราบและการปริแยกของแนวปูนก่อในแนวตั้ง

(ที่มา : Andreaus, 1996)

- เกิดการแยกตัวกลางระนาบของกำแพง (Middle Plane Spalling) รูปแบบการวิบัตินี้เกิดขึ้นเมื่อมีแรงอัดกระทำต่อกำแพงสูงมาก ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โอกาสที่จะเกิดกำแพงแยกตัวออกทางด้านข้างแบบกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 นั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากถูกบีบอัดด้วยแรงทางด้านข้าง ดังนั้นการวิบัติจะเกิดขึ้นในแนวที่ขนานกับระนาบของกำแพงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนา ดังรูปที่ 1.6 การแยกตัวจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันจากบริเวณขอบแล้วขยายผลไปทั่วทั้งกำแพง การวิบัติในรูปแบบนี้จะเห็นได้ ในกรณีที่กำแพงยาวมากทำให้เกิดหน่วยแรงบีบอัด (Confining Stress) ทางด้านข้าง

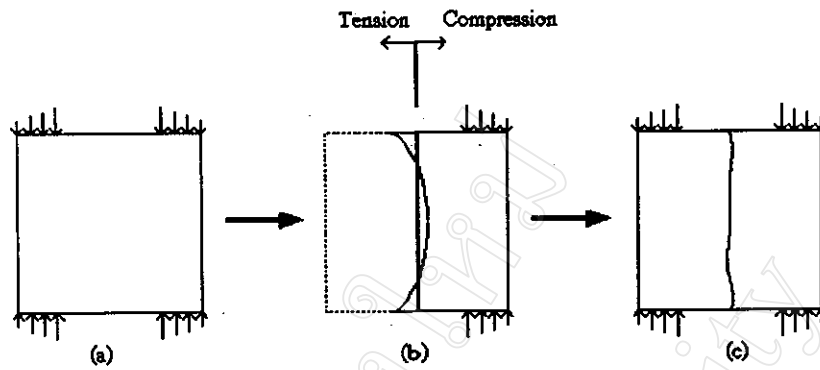
รูปแบบการวิบัติทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวล้วนเกิดจากหน่วยแรงดึงในวัสดุทั้งสิ้น ดังนั้นคานเอ็นเสริมเหล็กซึ่งสามารถรับแรงดึงได้มากกว่า และมีความยาวตลอดแนวของกำแพงจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวในระนาบตั้งฉากกับกำแพง (วังนังศ์ กรีพละ, 2542) นอกจากนี้ยังช่วยกระจายแรงไปตามคานเอ็นก่อนที่จะถ่ายลงบล็อก ทำให้การแตกร้าวของบล็อกในจุดที่แรงกระทำ โดยเฉพาะในกรณีแรงกระทำเฉพาะที่ เกิดที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น (Page and Shrive, 1990)



รูปที่ 1.6 ลักษณะการแยกตัวกลางระนาบของกำแพง

(ที่มา : Andreaus, 1996)

Shrive (1982) พบว่าปริซึมคอนกรีตบล็อกที่ก่อโดยวางปูนก่อเฉพาะเปลือกบล็อก จะมีกำลังภายใต้น้ำหนักที่กระทำเชิงศูนย์กลางมากกว่าปริซึมที่มีน้ำหนักกระทำตรงศูนย์กลาง เนื่องจากน้ำหนักที่กระทำตรงศูนย์กลางจะทำให้ความเค้นดึงที่เอวบล็อกมีค่าสูงกว่าแบบเชิงศูนย์กลาง ทำให้เกิดการแตกร้าวที่เอวบล็อกได้ง่ายกว่า ลักษณะการถ่ายแรงของคอนกรีตบล็อกจะเป็นแบบ Double Deep-Beam Action ซึ่งลักษณะการถ่ายแรงแบบนี้จะทำให้เกิดความเค้นดึงด้านบนและล่างของเอวบล็อก ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การวิบัติของบล็อกเมือวางปูนก่อเฉพาะเปลือกบล็อก

(ที่มา : Shrive, 1982)

ง. กำลังของกำแพงภายใต้น้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณกำลังอัดของกำแพงภายใต้น้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอ มีหลายสูตรแต่ที่นี้จะสนใจเฉพาะสูตรที่ได้จากผลการทดลอง (Empirical Formula)

Parsons (1931) ได้สร้างสูตรจากการวิเคราะห์ผลการทดลองกำแพงบล็อกกลวงรับน้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอ พบว่ากำลังรับแรงอัดของกำแพงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดรวม สมการของ Parsons (1931) ดังสมการที่ (1.5)

$$M = Kb\sqrt{mu} \quad (1.5)$$

โดยที่

M คือ กำลังอัดของกำแพงคอนกรีตบล็อก (กก./ซม.²)

m คือ กำลังรับแรงอัดของปูนก่อ (กก./ซม.²)

K คือ สัมประสิทธิ์ใช้ปรับค่ากำลังอัด เท่ากับ 1.0 โดยประมาณ

b คือ สัดส่วนของพื้นที่รับแรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดรวม ในกรณีก่อบล็อกแบบแนวปูนก่อไม่เต็มหน้าตัด หรือสัดส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดสุทธิต่อพื้นที่หน้าตัดรวม ในกรณีก่อแบบเต็มหน้าตัด

u คือ กำลังอัดของบล็อกเมือคิดจากพื้นที่หน้าตัดรวม (กก./ซม.²)

Eurocode 6 (1995) ได้แนะนำสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังอัดของกำแพงวัสดุก่อ ดังสมการที่ (1.6)

$$f_k = K(f_b)^{0.65} (f_m)^{0.25} \quad (1.6)$$

โดยที่

f_k คือ กำลังอัดของกำแพงวัสดุก่อ (กก./ซม.²)

K คือ ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.6

f_b คือ กำลังอัดของก้อนวัสดุก่อมาตรฐาน หาได้จาก $f_b' \times \left(\frac{h}{\sqrt{A}} \right)^{0.37}$

f_b' คือ กำลังของก้อนวัสดุก่อที่ใช้ (กก./ซม.²)

f_m คือ กำลังรับแรงอัดของปูนก่อ (กก./ซม.²)

h คือ ความสูงของก้อนวัสดุก่อ

A คือ พื้นที่ที่รับแรง

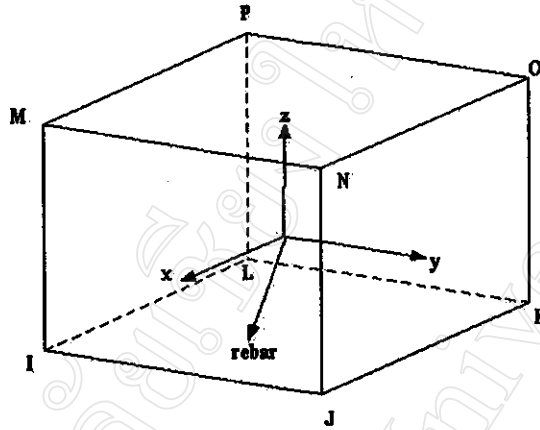
สำหรับค่า K ที่ใช้ออกแบบ Eurocode 6 (1995) แนะนำให้ใช้ K=0.6 ในกรณีที่ก่อกำแพงแบบแห้งเดี่ยว โดยความหนาของกำแพงเท่ากับความหนาของก้อนวัสดุก่อ

1.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2.1 ทฤษฎีและหลักการของโปรแกรม ANSYS (Version 5.4)

โปรแกรมที่นำมาใช้ในการวิจัยคือ โปรแกรม ANSYS (Version 5.4) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นคอนกรีต ได้ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติแบบเป็นเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ของวัสดุได้ โปรแกรม ANSYS จะมีแบบจำลองสามมิติ สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก (3-D Reinforced Concrete Solid) ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้สำหรับวิเคราะห์วัสดุที่เป็นคอนกรีต ทั้งเสริมเหล็ก และไม่เสริมเหล็ก โดยจะพิจารณาอิทธิพลของ การแตกร้าว (Crack) การแตกหลุด (Crush) และการขยายของรอยแตก ของเนื้อคอนกรีต แบบจำลองนี้จะใช้ ชิ้นส่วน (Element) ที่ประกอบขึ้นด้วย 8 จุด (Node) ดังรูปที่ 1.8 โดยแต่ละจุดจะมีระดับความอิสระ (Degree of Freedom, DOF) เท่ากับ 3 มีทิศทางเคลื่อนที่ตามแกน x, y และ z สำหรับเหล็กเสริมชิ้นส่วนจะถูกจำลองเป็นเส้นตรง ซึ่งจะ

มีสติเฟนสในแนวแกนเดียว (Uniaxial Stiffness) และจะถูกสมมุติให้แบบกระจาย (Smear) ทั่วทั้งชิ้นส่วน โดยเหล็กเสริมสามารถกำหนดให้วางตัวได้ทุกทิศทางตามต้องการ



รูปที่ 1.8 3-D Reinforced Concrete Solid

(ที่มา : Moaveni, 1999)

สมมุติฐานและข้อจำกัดของแบบจำลองสามมิติสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก

- การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ทิศทาง (แกน x , y และ z) ในตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (Integration Point)

- ถ้ามีการแตกร้าวเกิดขึ้นบนตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ การแตกร้าวนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นการแตกร้าวแบบกระจาย (Smear Crack) ซึ่งเป็นการจำลองการแตกร้าวที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการจำลองการแตกร้าวเป็นแบบแยกออกจากกัน (Discrete Crack)

- คอนกรีตจะถูกสมมุติให้มีคุณสมบัติเป็นไอโซโทรปิก ในช่วงเริ่มทำการวิเคราะห์

- หากชิ้นส่วนที่วิเคราะห์มีการเสริมเหล็ก เหล็กเสริมนั้นจะสมมุติให้กระจายทั่วทั้งชิ้นส่วน

1.2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ ที่มีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะหาได้จากกฎของฮุก ถ้าวัสดุมีคุณสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) จะใช้ค่า ยังโมดูลัส (Young's Modulus, E) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) ในการหาความสัมพันธ์ จากความสัมพันธ์กฎของฮุกจะได้

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}\end{aligned}\quad (1.7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

โดย โมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus, G) หาได้จาก

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.8)$$

จากสมการที่ (1.7) สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (1.9)$$

โดยที่

$\{\sigma\}$ คือ เมทริกซ์ความเค้น

$\{\varepsilon\}$ คือ เมทริกซ์ความเครียด

$[D]$ คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ ของความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Matrix)

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

1.2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถหาได้จาก

$$[D] = \left[1 - \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R \right] [D^C] + \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R [D^R] \quad (1.12)$$

โดยที่

N_r คือ จำนวนชนิดของเหล็กเสริม (ต้องไม่เกิน 3 ชนิด ในหนึ่งชิ้นส่วน)

V_i^R คือ อัตราส่วนปริมาตรเหล็กเสริม i ต่อปริมาตรรวมของชิ้นส่วน

$[D^c]$ คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต หาได้จากสมการที่ (1.11)

$[D^R]$ คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมหาได้จากสมการที่ (1.13)

1.2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม

ลักษณะการวางตัวของเหล็กเสริม ชนิด i ในชิ้นส่วนสามารถดูได้จากรูปที่ 1.9 โดยระบบพิกัดรวมของชิ้นส่วน (Global Coordinate) จะอยู่ในแกน X, Y และ Z ส่วนระบบพิกัดของเหล็กเสริมชนิด i (Local Coordinate) แสดงในแกน x_i^r , y_i^r และ z_i^r เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx}^r \\ \epsilon_{yy}^r \\ \epsilon_{zz}^r \\ \epsilon_{xy}^r \\ \epsilon_{yz}^r \\ \epsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = [D^r] \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx}^r \\ \epsilon_{yy}^r \\ \epsilon_{zz}^r \\ \epsilon_{xy}^r \\ \epsilon_{yz}^r \\ \epsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} \quad (1.13)$$

E_i^r คือ ยั่งโมดูลัสของเหล็กเสริมชนิดที่ i

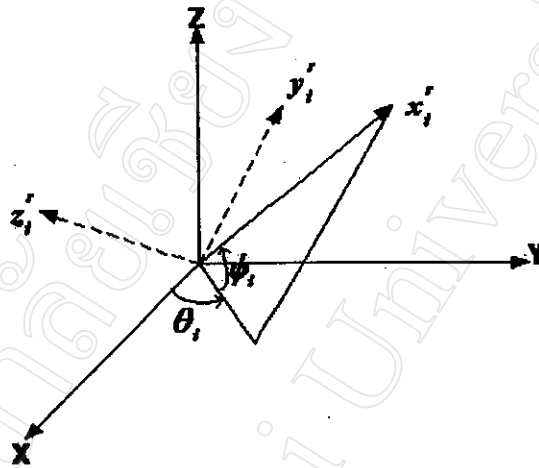
จากสมการที่ (1.13) จะพบว่าเฉพาะในทิศทางที่มีเหล็กเสริม (ดูรูปที่ 1.9 เหล็กเสริมจะวางตัวในแกน x_i^r) เท่านั้นที่เทอมของความเค้นจะไม่เท่ากับศูนย์ คือ σ_{xx}^r

การแปลงระบบพิกัดของเหล็กเสริม เข้าสู่ระบบพิกัดรวมของชิ้นส่วน สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (1.14)

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \end{Bmatrix} x_i^r = \begin{Bmatrix} l_1^r \\ l_2^r \\ l_3^r \end{Bmatrix} x_i^r \quad (1.14)$$

โดยที่

- θ_i คือ มุมระหว่างโปรเจกชันของแกน x_i^r บนระนาบ XY และ แกน X
- ϕ_i คือ มุมระหว่างแกน x_i^r กับระนาบ XY
- l_i^r คือ ค่าโคเรกชันโคไซน์ระหว่างแกน x_i^r กับระนาบ X, Y, Z



รูปที่ 1.9 การวางตัวของเหล็กเสริม

(ที่มา : Moaveni, 1999)

เมทริกซ์ $[D^r]$ หามาจากระบบพิกัดของเหล็กเสริมชนิด i ดังนั้นจึงต้องแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดรวมของชิ้นส่วน โดยใช้สมการที่ (1.15)

$$[D^R] = [T^r]^T [D^r] [T^r] \quad (1.15)$$

โดยที่

- $[D^R]$ คือ เมทริกซ์ของเหล็กเสริม ที่แปลงเข้าสู่ระบบพิกัดรวมของชิ้นส่วน
- $[T^r]$ คือ เมทริกซ์ทรานฟอร์ม (Transformed Matrix) ดูสมการที่ (1.16)

$$\begin{aligned}
 [T^r] = & \begin{bmatrix}
 a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{11}a_{12} & a_{12}a_{13} & a_{11}a_{13} \\
 a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{21}a_{22} & a_{22}a_{23} & a_{21}a_{23} \\
 a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & a_{31}a_{32} & a_{32}a_{33} & a_{31}a_{33} \\
 2a_{11}a_{21} & 2a_{12}a_{22} & 2a_{13}a_{23} & (a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}) & (a_{12}a_{23} + a_{13}a_{32}) & (a_{11}a_{23} + a_{13}a_{21}) \\
 2a_{21}a_{31} & 2a_{22}a_{32} & 2a_{23}a_{33} & (a_{21}a_{32} + a_{22}a_{31}) & (a_{22}a_{33} + a_{23}a_{32}) & (a_{21}a_{33} + a_{13}a_{21}) \\
 2a_{11}a_{31} & 2a_{12}a_{32} & 2a_{13}a_{33} & (a_{11}a_{32} + a_{12}a_{31}) & (a_{12}a_{33} + a_{13}a_{32}) & (a_{11}a_{33} + a_{13}a_{31})
 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_{ij} หาได้จากสมการที่ (1.17)

$$\begin{bmatrix}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33}
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 l_1^r & l_2^r & l_3^r \\
 m_1^r & m_2^r & m_3^r \\
 n_1^r & n_2^r & n_3^r
 \end{bmatrix}
 \tag{1.17}$$

เมทริกซ์ $\begin{bmatrix} l_1^r & l_2^r & l_3^r \end{bmatrix}^T$ เป็นโคเวกซ์ของแกน x_i^r หาได้จากสมการที่ (1.14) ส่วนเมทริกซ์ $\begin{bmatrix} m_1^r & m_2^r & m_3^r \end{bmatrix}^T$ และ $\begin{bmatrix} n_1^r & n_2^r & n_3^r \end{bmatrix}^T$ เป็นโคเวกซ์ของแกน y_i^r และ z_i^r ตามลำดับ

1.2.2.5 พฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต

พฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีตเกิดขึ้นจาก

- Material Non-Linearity คือ โครงสร้างของคอนกรีตมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งการวิเคราะห์ในช่วงแรกจะใช้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มต้น (Initial Modulus of Elasticity) จนเมื่อถึงกำลังคราก (Yield Stress) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นก็จะเปลี่ยนไป
- Geometrical Non-Linearity จะเกิดเมื่อคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างมาก (Large Deflection) เกิดการแตกร้าว (Crack) หรือ เกิดการแตกหลุด (Crush)

ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะเปลี่ยนไป ดังนั้นจะพบว่า การแตกร้าว และการแตกหลุด จะส่งผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตอย่างมาก

ก. พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีต

ลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ

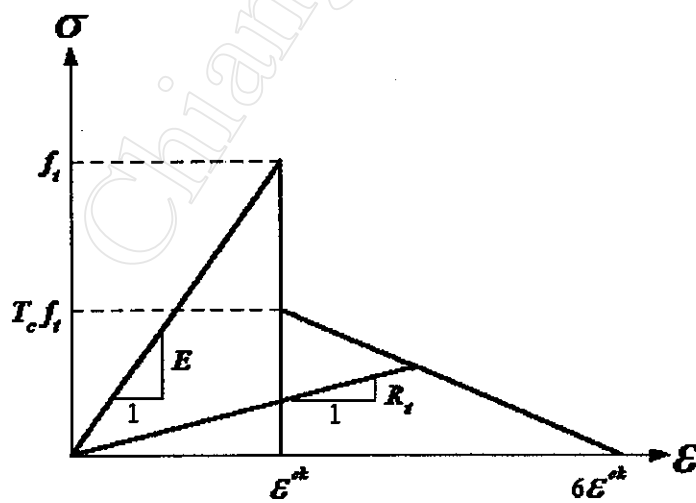
- การแตกร้าวแบบปิด (Closed Crack) คือ เมื่อเกิดการแตกร้าวระนาบของรอยแตกจะไม่มีแยกออกจากกัน ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับระนาบของรอยแตกสามารถส่งผ่านไปได้ ส่วนการถ่ายโอนแรงเฉือนที่ส่งผ่านรอยแตกจะมีค่าลดลง การปรับค่านี้สามารถทำได้โดยใช้ตัวคูณซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนแรงเฉือนแบบปิด (Shear Transfer Coefficient, β_c)
- การแตกร้าวแบบเปิด (Opened Crack) คือ เมื่อเกิดการแตกร้าวระนาบของรอยแตกจะแยกออกจากกัน การถ่ายโอนแรงเฉือนที่ส่งผ่านรอยแตกจะมีค่าลดลงการปรับค่านี้สามารถทำได้โดยใช้ตัวคูณ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนแรงเฉือนแบบเปิด (Shear Transfer Coefficient, β_o)

การจำลองการแตกร้าวของคอนกรีตจะจำลองให้มีลักษณะเป็นแบบกระจาย (Smearred Crack Model) ซึ่งหากเกิดการแตกร้าวที่ชิ้นส่วนใดระนาบของรอยแตกจะถูกจำลองให้มีจำนวนไม่จำกัดและขนานกันกระจายทั่วทั้งชิ้นส่วน โดยระนาบของรอยแตกที่ขนานกันนี้จะสมมุติให้เกิดในทิศตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นสูงสุด หลังจากเกิดการแตกร้าวคุณสมบัติของคอนกรีตจะเปลี่ยนจากแบบไอโซโทรปิก เป็น แบบออร์โทโทรปิก ดังนั้นเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลง

ในกรณีที่เกิดการแตกร้าวแบบเปิดในหนึ่งทิศทาง โดยระนาบของรอยแตกตั้งฉากกับแกน x เมทริกซ์จะเป็นคังสมการที่ (1.18)

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

โดย R^t คือ ค่าโมดูลัสซีแกนท์ ซึ่งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ค่าความเค้นในสภาวะที่มีการแตกร้าวของคอนกรีต (ที่มา : Hinton and Owen, 1986)

โดยที่

ϵ_c คือ ค่าความเค้นการแตกร้าวจากแรงดึงในแนวแกน (Uniaxial Tensile Cracking Stress)

T_c คือ ตัวคูณปรับค่าการคลายตัวของความเค้นดึง (Multiplier for Tensile Stress Relaxation) โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 0.6

ถ้าการแตกร้าวเป็นแบบปิด เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะเป็นดังสมการที่ (1.19)

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแตกร้าวสองทิศทาง คือในแนวแกน x และ y และเป็นการแตกร้าวแบบเปิดจะเป็นดังสมการที่ (1.20)

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

ถ้าการแตกร้าวเป็นแบบปิดในสองทิศทาง คือในแนวแกน x และ y เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นดังสมการที่ (1.21)

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

ถ้ามีการแตกร้าวเกิดขึ้นสามทิศทาง คือ แกน x , y และ z และเป็นการแตกร้าวแบบเปิด เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะเป็น ดังสมการที่ (1.22)

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

ถ้าการแตกร้าวเป็นแบบปิด และเกิดขึ้นในสามทิศทางคือ แกน x , y และ z เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต จะเป็นดังสมการที่ (1.21) การแปลงระบบพิกัดของคอนกรีต เข้าสู่ระบบพิกัดรวมของชิ้นส่วน สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (1.23)

$$[D_c] = [T^{ck}]^T [D_c^{ck}] [T^{ck}] \quad (1.23)$$

เมทริกซ์ $[T^{ck}]$ คือ เมทริกซ์ทรานฟอร์ม ซึ่งหาได้จากสมการที่ (1.16) และ (1.17) การพิจารณาว่าการแตกร้าวที่เกิดขึ้น เป็นการแตกร้าวแบบเปิดหรือแบบปิด จะพิจารณาจากค่าความเครียดขณะเกิดการแตกร้าว ϵ^{ck} สำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวแกน x หาได้จากสมการที่ (1.24)

$$\epsilon^{ck} = \begin{cases} \epsilon_x^{ck} + \frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_y^{ck} + \epsilon_z^{ck}) & \text{ไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้น} \\ \epsilon_x^{ck} + \nu \epsilon_z^{ck} & \text{มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในทิศทางแกน } y \\ \epsilon_x^{ck} & \text{มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในทิศทางแกน } y \text{ และ } z \end{cases} \quad (1.24)$$

โดย ϵ_x^{ck} , ϵ_y^{ck} และ ϵ_z^{ck} คือ ค่าความเครียดในแนวแกน x , y และ z ในจุดที่มีการแตกร้าว

ถ้า ϵ^{ck} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ จะเป็นการแตกร้าวแบบเปิด และถ้า ϵ^{ck} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะเป็นการแตกร้าวแบบปิด

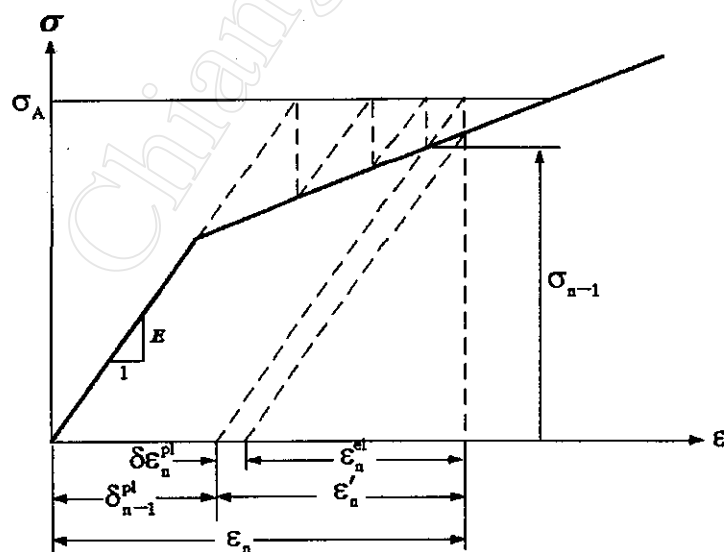
ข. พฤติกรรมการแตกหลุดของคอนกรีต

เมื่อเนื้อคอนกรีตในจุดที่วิเคราะห์เกิดการเสียหายเนื่องจากแรงกด ไม่ว่าจะเกิดจากแรงกดใน แกนเดียว (Uniaxial), สองแกน (Biaxial) หรือสามแกน (Triaxial) จะถือว่าคอนกรีตที่จุดนั้นเกิดการแตกหลุด โดยความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และค่าสทิเฟนสของคอนกรีตที่จุดที่เกิดการแตกหลุดจะไม่นำมาคำนวณ

1.2.2.6 เงื่อนไขการลู่เข้าสู่ค่าตอบสำหรับพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะใช้ Newton Raphson Iteration Method ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้สมการของพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะใช้การคำนวณเป็นวงรอบไปเรื่อยๆ จนกว่าจะลู่เข้าสู่ค่าตอบ (Convergence) ดังรูปที่ 1.11 การลู่เข้าสู่ค่าตอบจะเกิดขึ้นเมื่อค่า Plasticity Ratio ($\delta\epsilon^p/\epsilon^e$) ที่ทุกจุดที่ทำกรวิเคราะห์ มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Preset Value, ρ) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ค่าเท่ากับ 0.001 (Swanson Analysis Systems Inc., 1990) หากค่า ρ มีค่ามากจะทำให้ ได้ค่าตอบที่มีความถูกต้องน้อย แต่หากใช้ค่า ρ น้อย จะทำให้ วงรอบในการคำนวณ (Iterations) มาก ซึ่งต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

ในการวิเคราะห์จะถือว่าค่าไม่ลู่เข้าสู่ค่าตอบเมื่อค่า Plasticity Ratio มีค่ามากกว่าค่า ρ หรือจำนวนวงรอบการคำนวณมากกว่าค่าที่กำหนดไว้



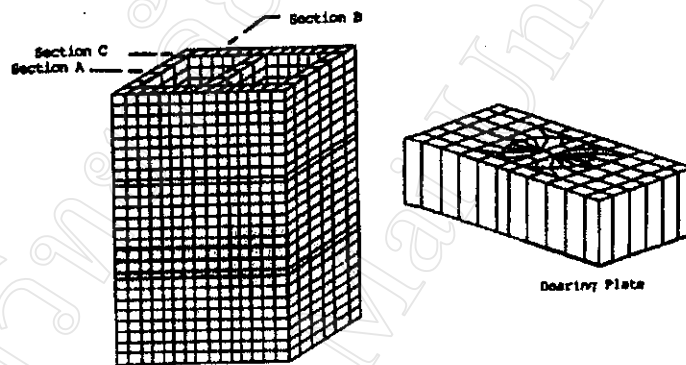
รูปที่ 1.11 แสดง Newton Raphson Iteration Method ของวงรอบการคำนวณ n

(ที่มา : Swanson Analysis Systems Inc., 1990)

1.3 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตบล็อกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Hamid and Chukwunye (1986) ได้วิเคราะห์ปริซึมคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดในแนวแกน ซึ่งบล็อกวางเรียงซ้อนกันสามชั้น โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมที่ใช้คือโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS (Version 5.4) แบบจำลองที่ใช้จะถือว่าบล็อกและปูนก่อก่อมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น และใช้แบบจำลองสามมิติ รูปแบบการแบ่งชิ้นส่วน ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 แบบจำลองของปริซึมคอนกรีตบล็อก

(ที่มา : Hamid and Chukwunye, 1986)

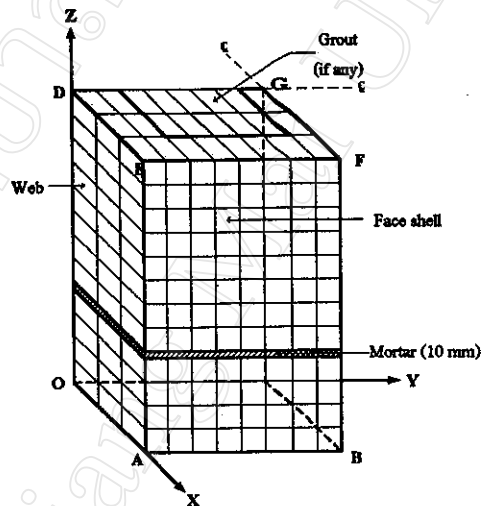
สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือ

- รูปร่างของบล็อกจะให้ป็นเหลี่ยมทั้งหมด จะไม่คำนึงถึงความโค้งที่จุดต่างๆ ของบล็อก
- ผิวสัมผัสระหว่างบล็อกและปูนก่อก่อถือว่ายึดกันแบบสมบูรณ์ ไม่มีการลื่นไถล เนื่องจากมีความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสจากแรงกดในแนวแกน
- ไม่คิดลักษณะการเรียวลง (Taper) ของบล็อก

จากการศึกษาพบว่า การก่อปูนเฉพาะเปลือกบล็อก (Face-Shell) จะทำให้เกิดความเค้นดึงในเอวบล็อกมากกว่าการก่อแบบเต็มหน้าตัดของบล็อก ถ้าอัตราส่วนความสูงต่อความหนาของ

บล็อก มีค่าเท่ากับ 2 การวิเคราะห์ปริซึมคอนกรีตบล็อกควรให้มีจำนวนชั้นของปูนก่อตั้งแต่ สอง ชั้นขึ้นไป ขนาดของบล็อกและกำลังของปูนก่อไม่มีผลต่อกำลังของปริซึม

Fahmy and Ghoneim (1995) ได้วิเคราะห์ปริซึมคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดในแนวแกน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมที่ใช้คือโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS (Version 5.4) แบบจำลองที่ใช้จะถือว่าบล็อกและปูนก่อมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น และใช้แบบจำลองสามมิติ รูปแบบการแบ่งชิ้นส่วน ดังรูปที่ 1.13 การแตกร้าวของคอนกรีตจะสมมุติให้เป็นแบบกระจาย (Smear Crack) และพิจารณาการขยายของรอยแตก ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกจะต้องปรับค่า (Calibrate) กับโปรแกรมก่อน เพื่อหาลำดับของเนื้อวัสดุที่นำมาทำบล็อก แล้วจึงจะนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ปริซึม ส่วนกำลังของปูนก่อใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 1.13 แบบจำลองของปริซึมคอนกรีตบล็อก

(ที่มา : Fahmy and Ghoneim, 1995)

สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือ

- การก่อปูนจะก่อเต็มหน้าตัดของบล็อก
- ผิวสัมผัสระหว่างบล็อกและปูนก่อถือว่ายึดกันแบบสมบูรณ์ ไม่มีการลื่นไถล เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานเนื่องจากแรงกดมาก
- ไม่กีดลักษณะการเรียวลง (Taper) ของบล็อก
- ที่ปลายล่างของบล็อกจะยึดเฉพาะในแนวตั้ง ส่วนด้านบนจะให้มีการทรุดลงทั้งหน้าตัดเท่ากัน (Uniform Displacement) เพื่อกำจัดอิทธิพลของแผ่นเหล็กรองที่ใช้ในการทดสอบ

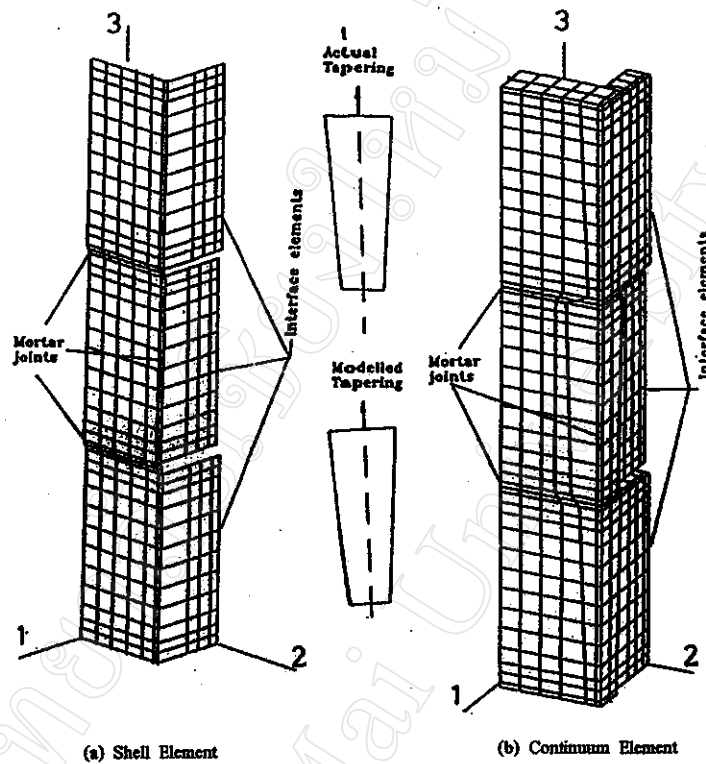
จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่ใช้มีประสิทธิภาพในการแสดงพฤติกรรมของปริซึมคอนกรีตบล็อกได้เป็นอย่างดี กำลังของปริซึมและค่าโมดูลัสเริ่มต้นจะลดลงถ้าจำนวนชั้นของบล็อกเพิ่มขึ้น

Sayed and Shrive (1995) ได้วิเคราะห์กำแพงคอนกรีตบล็อกภายใต้น้ำหนักกระทำเฉพาะที่ ก่อรูปเฉพาะเปลือกบล็อก โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้โปรแกรม ANSYS (Version 5.4) ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ และใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์ แบบจำลองนี้จะพิจารณาพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ของวัสดุ และพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นของกำแพง รวมถึงอิทธิพลของการขยายรอยแตกและการร้าวลงของบล็อก การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะถูกสมมุติให้เป็นแบบกระจาย และแบบเฉพาะที่ (Discrete Crack) โดยที่กึ่งกลางของเอวบล็อกจะจำลองให้เกิดการแตกร้าวแบบเฉพาะที่ ส่วนบริเวณอื่นๆ ของบล็อก และปูนก่อ จะจำลองให้เกิดการแตกร้าวแบบกระจาย

จากการศึกษาพบว่า การแตกร้าวของกำแพงที่มีคานเอ็นด้านบน และไม่มีคานเอ็น การแตกร้าวของเอวบล็อกเริ่มแรกจะเกิดที่ 30-50 % ของกำลังประลัยของกำแพง โดยการแตกร้าวของเอวบล็อกจะเกิดเฉพาะได้แนวที่แรงเฉพาะที่กระทำเท่านั้น จะไม่ขยายไปเอวบล็อกส่วนอื่น กำแพงที่ไม่มีคานเอ็นการกระจายของความเค้นภายใต้แรงกระทำจะทำมุม 25° - 30° กับแนวตั้ง ส่วนกำแพงที่มีคานเอ็นการกระจายความเค้นภายใต้แรงจะทำมุม 30° - 35° กับแนวตั้ง

Sayed and Shrive (1996) ได้วิเคราะห์ปริซึมคอนกรีตบล็อกภายใต้แรงกดในแนวแกน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปริซึมจะใช้คอนกรีตวางเรียงซ้อนกันสามก้อนและมีการแบ่งชิ้นส่วนดังรูปที่ 1.14 โดยใช้แบบจำลองแบบแผ่น (Shell) เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบก้อน (Continuum) การยึดปลายคานล่างของปริซึมจะยึดทุกแกน ส่วนคานบนจะยึดในแนวราบและให้มีการทรุดตัวลงเท่ากันทั้งหน้าตัด วิธีวิเคราะห์จะใช้แบบเดียวกับ Sayed and Shrive (1995)

จากการศึกษาพบว่า กำลังของปริซึมที่จำลองแบบแผ่นจะมีค่า 85 % ของการจำลองแบบก้อน ลักษณะการกระจายความเค้นของแบบจำลองทั้งสองจะเหมือนกัน การแตกร้าวเริ่มต้นเกิดที่ 15 % ของกำลังประลัย โดยการแตกร้าวจะเกิดที่เอวบล็อกเป็นจุดแรก และที่แรงกระทำสูงๆ จะเกิดการแตกหลุดที่ปูนก่อ แบบจำลองทั้งสองจะให้ค่ากำลังของปริซึมน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 1.14 แบบจำลองของปริซึมคอนกรีตค้ำ
(ที่มา : Sayed and Shrive, 1996)

1.3.2 ผลของคานเอ็นต่อพฤติกรรมของค้ำแขงคอนกรีตค้ำ

Simbeya et al. (1986) ได้วิเคราะห์ค้ำแขงคอนกรีตค้ำที่มีคานเอ็น ภายใต้แรงกระทำเฉพาะที่ การวิเคราะห์นี้เพื่อพิจารณาศึกษาพฤติกรรมของค้ำแขงคอนกรีตค้ำ อิทธิพลของความสูงของคานเอ็น และจุดที่วางแผ่นเหล็ก จากการศึกษพบว่าที่ฐานของคานเอ็นจะมีค่าความเค้นดึงมากกว่าบล็อกที่อยู่ใต้คานเอ็น ถ้าวางแผ่นเหล็ก (Bearing Plate) เหนือเอวบล็อก การแตกร้าวจะเริ่มที่ด้านล่างของคานเอ็นและเอวบล็อกใต้คานเอ็น การเพิ่มความสูงของคานเอ็นจะทำให้ความเค้นในเปลือกบล็อกลดลงแต่จะไม่ส่งผลต่อกำลังประลัยของค้ำแขง การเสียหายหลักของค้ำแขงเกิดจากการแตกร้าวของเอวบล็อก สำหรับค้ำแขงที่มีคานเอ็นการกระจายของความเค้นภายใต้เหล็กเสริมจะทำมุม 45° กับแนวตั้ง

Page and Shrive (1990) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตบล็อกกลวง ภายใต้น้ำหนักกระทำเฉพาะที่ ในการทดสอบจะก่อกำแพง โดยจะใส่เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. จำนวน 2 เส้น และกรอกปูน แล้วใส่แรงกระทำเฉพาะที่ โดยมีแผ่นเหล็กวางระหว่างกำแพงและตัวน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า ทฤษฎีการออกแบบบล็อกตันไม่สามารถใช้ได้กับบล็อกกลวง การวิบัติของบล็อกกลวงจะเป็นการปริแยกของบล็อกบริเวณเอวบล็อก (Web) ในบริเวณที่มีน้ำหนักกด และเกิดรอยแตกในแนวตั้งตามกำแพง ในส่วนของคานเอ็นจะพบว่ากำลังของปูนกรอกที่ใส่ในคานเอ็นไม่มีผลต่อกำลังของกำแพง และการใช้คานเอ็นช่วยให้กำแพงรับน้ำหนักได้มากขึ้น เนื่องจากจะช่วยกระจายแรงไปตามคานเอ็นก่อนที่จะถ่ายลงบล็อก คานเอ็นที่มีความลึกมากกว่าจะช่วยกระจายแรงได้ดีกว่า การกระจายน้ำหนักจากแผ่นเหล็กลงสู่คานเอ็นและลงสู่บล็อกสามารถประมาณค่าน้ำหนักที่แผ่กระจายได้ โดยจะทำมุม 30° กับแนวตั้ง เมื่อก่อคานเอ็น 1 แถว และ ทำมุม 25° เมื่อก่อคานเอ็น 2 แถว นอกจากนี้ยังพบว่ากำแพงที่มีคานเอ็นจะรับน้ำหนักได้มากขึ้นเมื่อลดสัดส่วนของแรงต่อความยาวของแผ่นเหล็กลง เมื่อแรงกระทำเอียงศูนย์กำแพงจะรับน้ำหนักได้น้อยกว่าเมื่อแรงกระทำตรงศูนย์

วังนวงศ์ กริพละ (2542) ได้ทำการศึกษาผลของคานเอ็นต่อพฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniformed Load) โดยทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีความสูงไม่เท่ากัน ยกเว้นชุดแรกกับชุดสอง ซึ่งชุดแรกจะเป็นชุดควบคุม กำแพงตัวอย่างทั้งหมดจะทำการทดสอบ โดยมีคานเอ็นในตำแหน่งบนสุดและล่างสุด ในส่วนที่เป็นคานเอ็นจะใช้คอนกรีตบล็อกรูปตัวยู แล้วกรอกปูนและเสริมเหล็ก SD30 ขนาด 12 มม. จำนวน 2 เส้น ตลอดความยาวของคาน ผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของกำแพงจะมีค่าลดลงตามความสูงของกำแพงและกำลังรับแรงอัดของกำแพงที่มีคานเอ็นเสริมมีค่าน้อยกว่ากำแพงที่ไม่มีคานเอ็น จากลักษณะของการเสียหายจะพบว่าคานเอ็นจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวในระนาบตั้งฉากกับกำแพง แต่อาจเร่งรอยร้าวในระนาบเดียวกับกำแพงให้เกิดเร็วขึ้น

1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.4.1 เพื่อศึกษาผลของคานเอ็นต่อ พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอ โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

1.4.2 เพื่อให้ได้เครื่องมือวิเคราะห์กำแพงคอนกรีตบล็อกที่มีคานเอ็นเป็นส่วนประกอบ

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาผลของคานเอ็นต่อ พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสม่ำเสมอ โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยลักษณะการก่อกำแพงเป็นแบบเรียงสลับ (Running Bond) และสมมุติว่าไม่เกิดการลื่นไถลระหว่างเหล็ก และปูนกรอกในคานเอ็น

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงประยุกต์

1.6.1 รู้พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตบล็อก ที่มีคานเอ็นเป็นส่วนประกอบ

1.6.2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบสำหรับการก่อสร้างที่ต้องการใช้กำแพงคอนกรีตบล็อกในการรับแรง