บทที่ 3

การศึกษาตัวแปรหลักต่อพฤติกรรมการตัด

ในบทนี้ ได้แสดงถึงผลการดำเนินการวิจัยจากการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ว่า มีผลต่อพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนอย่างไร โดยการวิจัยนี้ครอบคลุมถึงพฤติกรรมทั้งที่สภาวะประลัยและสภาวะรับน้ำหนักใช้งาน การวิเคราะห์หน้าตัดใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง และหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมอย่างง่ายขึ้นเพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ พร้อมกันนี้ได้เสนอขีดจำกัดตัวแปร ที่สามารถใช้ ควบคุมพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ทั้งทางด้านกำลังดัดประลัย , ความเหนียว, รอยแตกร้าว และ การแอ่นตัว

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยปริมาณลวดอัดแรง (A_{ps}) , ปริมาณเหล็กเสริมธรรมดา (A_s), แรงอัดประสิทธิผล (f_{sc}) , กำลังคลากของเหล็กเสริม (f_y) และ กำลังอัดคอนกรีต (f_c') จากตัวแปรดังกล่าวข้างต้น ยังสามารถทำการแปลงให้อยู่ในรูปดัชนีเหล็กเสริม ($\bar{\omega}$) และ อัตราส่วนการอัดแรง (Partial Prestressing Ratio,PPR) ซึ่งสามารถใช้ควบคุมพฤติกรรรมของหน้าตัดทางด้านกำลัง,ความเหนียว และความกว้างรอยแตกร้าวได้ สำหรับพฤติกรรมด้านการแอ่นตัวของโครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องทั้งคุณสมบัติของหน้าตัด และรูปแบบของโครงสร้าง เช่น ความต่อเนื่องและความยาวช่วง งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนการอัดแรง (PPR) และอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้น (L/t) ที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมการแอ่นตัวไม่ให้เกินตามที่มาตรฐานกำหนดได้

3.1 ตัวแปรหลักด้านกำลังและความเหนียว

ก. อิทธิพลของปริมาณลวดอัดแรง

ในการดำเนินการวิจัยถึงอิทธิพลของปริมาณลวดอัดแรง ที่มีต่อคอนกรีตอัดแรง

บางส่วน โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด และความโค้ง ได้ทำการกำหนดตัวแปรคงที่ดังนี้คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิผล 10961 กก./ซม.^{2} , กำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2}, กำลังคลากของเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2} ,และปริมาณเหล็กเสริม 0.5% สำหรับตัวแปรที่ทำการแปรเปลี่ยนคือปริมาณลวดอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.3 % , 0.4% และ 0.5% ตามลำดับ ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 จากตารางที่ 3.1 พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณลวดอัดแรง จะมีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงบางส่วน คือ การเพิ่มปริมาณลวดอัดแรงลงในหน้าตัดจะทำให้หน้าตัดมีกำลังดัดประลัยและโมเมนต์แตกร้าวเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเหนียวจะมีค่าลดลง จากตัวอย่างงานวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณลวดอัดแรงในหน้าตัดจาก 0.30% เป็น 0.40% (เพิ่มขึ้น 33%) จะทำให้กำลังดัดประลัยเพิ่มขึ้นประมาณ 18% และโมเมนต์แตกร้าวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 25% ในขณะที่ความเหนียวจะมีค่าลดลงประมาณ 25%

ข. อิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริม

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริม ที่มีต่อพฤติกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรคงที่ คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิผล 10961 กก./ ซม.^{2} ,กำลังอัดคอนกรีต (f_c') 300 กก./ซม.^{2} ,กำลังคลากของเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2} , และปริมาณลวดอัดแรง 0.25 % สำหรับตัวแปรที่ทำการแปรเปลี่ยนคือปริมาณเหล็กเสริม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริม คือ 0.25 % , 0.5% และ 0.75% ตามลำดับ ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.2 จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็กเสริมจะมีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงบางส่วน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมลงในหน้าตัดจะทำให้หน้าตัดมีกำลังดัดประลัยเพิ่มขึ้นขณะที่ความเหนียวจะมีค่าลดลง ส่วนโมเมนต์แตกร้าว มีความแตกต่างกันน้อยมาก จากตัวอย่างงานวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดจาก 0.25% เป็น 0.50% (เพิ่มขึ้น 100%) จะทำให้กำลังดัดประลัยเพิ่มขึ้นประมาณ 13% และโมเมนต์แตกร้าวเพิ่มขึ้นเพียง 0.7% ในขณะที่ความเหนียวมีค่าลดลงประมาณ 18%

ค. อิทธิพลของหน่วยแรงอัดประสิทธิผล

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของหน่วยแรงอัดประสิทธิผลที่มีต่อพฤติกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรคงที่คือกำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2},กำลังคลากของเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2} ,ปริมาณลวดอัดแรง 0.30% และปริมาณเหล็กเสริม 0.30% ในงานวิจัยนี้ได้ ทำการแปรเปลี่ยนปริมาณแรงอัดประสิทธิผล คือ 0.58 f_{pu} , 0.64 f_{pu} และ 0.77 f_{pu} ตามลำดับ ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด และความโค้งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.3 จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าการแปรเปลี่ยนปริมาณแรงอัดประสิทธิผล จะมีผลต่อพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน การเพิ่มแรงอัดประสิทธิผล จะทำให้โมเมนต์แตกร้าวมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัดประลัยและความเหนียวมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก จากตัวอย่างงานวิจัย การเพิ่มปริมาณแรงอัดประสิทธิผลในหน้าตัด จาก 0.58f_{pu} เป็น 0.64f_{pu} (เพิ่มขึ้น 10%) จะทำให้โมเมนต์แตกร้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 8 % ในขณะที่กำลังดัดประลัยเพิ่มขึ้นเพียง 0.4% และ ความเหนียวมีค่าลดลงเพียง 3%

ง. อิทธิพลของกำลังอัดคอนกรีต

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังอัดคอนกรีตที่มีต่อพฤติกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรคงที่คือแรงอัดประสิทธิผล 10961 กก./ซม.^{2}, กำลังคลากของเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2}, ปริมาณลวดอัดแรง 0.05% และปริมาณเหล็กเสริม 0.38% และแปรเปลี่ยนกำลังอัดคอนกรีต คือ 100, 300 และ 500 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.4 และ รูปที่ 3.4 ซึ่งพบว่า การเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในหน้าตัดเดียวกัน จะทำให้หน้าตัดมีกำลังดัดประลัย, โมเมนต์แตกร้าวและความเหนียวเพิ่มขึ้น

จ. อิทธิพลของดัชนีเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาแรงภายในหน้าตัดที่สภาวะประลัย จะสามารถเขียนสมการสมดุลย์

ของแรงภายในได้ดังนี้

$$A_{ps} f_{ps} + A_s f_y = 0.85 f_c' b \beta_1 c$$

จัดรูปใหม่ได้

$$(A_{ps} f_{ps}/bdf_c') + (A_s f_y/bdf_c') = 0.85 \beta_1 (c/d) \qquad (3.1)$$

เมื่อ d คือ ระยะจากผิวรับแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของแรงดึงในเหล็กเสริม

กำหนดให้ $\omega_p = (A_{ps} f_{ps}/bdf_c')$ และ $\omega_s = (A_s f_y/bdf_c')$

ดังนั้น $$\omega_p + \omega_s = 0.85 \beta_1 (c/d) \qquad (3.2)$$

ดัชนีเหล็กเสริม $$\bar{\omega} = 0.85 \beta_1 (c/d) \qquad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 จะพบว่าดัชนีเหล็กเสริม ($\bar{\omega}$) และอัตราส่วน c/d มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่สภาวะประลัย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของดัชนีเหล็กเสริม ($\bar{\omega}$) ที่มีต่อพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง โดยกำหนดตัวแปรคงที่คือ กำลังอัดคอนกรีต 300 กก/ซม.^{2} และกำลังคลากเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2} สำหรับตัวแปรที่ทำการแปรเปลี่ยนคือ ปริมาณลวดอัดแรง และปริมาณเหล็กเสริม โดย ρ_{ps} และ ρ_s จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของดัชนีเหล็กเสริม ($\bar{\omega}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.30 ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าดัชนีเหล็กเสริมจะพิจารณาที่ PPR เท่ากับ 0 (คอนกรีตเสริมเหล็ก) และ PPR เท่ากับ 1 (คอนกรีตอัดแรง) ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง แสดงดังตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.5 พบว่าการเพิ่มค่าดัชนีเหล็กเสริม($\bar{\omega}$)ในหน้าตัดเดียวกัน จะทำให้หน้าตัดมีกำลังดัดประลัย และโมเมนต์แตกร้าวเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเหนียวจะมีค่าลดลง จากงานวิจัยการเพิ่มดัชนีเหล็กเสริมจาก 0.20 เป็น 0.30 (เพิ่มขึ้น 50%) จะทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังดัดประลัยเพิ่มขึ้นประมาณ 40 % และโมเมนต์แตกร้าวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 9 % ในขณะที่คอนกรีตอัดแรงมีกำลังประลัยเพิ่มขึ้นประมาณ 45 % และมีโมเมนต์แตกร้าวเพิ่มขึ้น 45 % และความเหนียวของทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงมีค่าลดลงประมาณ 43 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉ. ปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์

ในการพิจารณาถึงขีดจำกัดปริมาณเหล็กเสริมที่มากที่สุดที่ยอมให้มีในหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนนั้นจะพิจารณาถึงการวิบัติของหน้าตัดซึ่งจะต้องเป็นแบบแรงดึงเป็นหลัก (Tension Failure) กล่าวคือ หน่วยแรงในเหล็กเสริมจะถึงจุดคลาก ก่อนการวิบัติของคอนกรีต ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความปลอดภัยมากกว่าการวิบัติแบบเปราะ หรือแรงอัดเป็นหลัก (Compression Failure) งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หน้าตัดที่ภาวะการวิบัติแบบสมดุลย์ (Balance Failure)โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง เพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ ซึ่งเป็นภาวะที่ความเครียดในเหล็กเสริมถึงจุดคลากในขณะที่คอนกรีตวิบัติ (ϵ_c เท่ากับ0.003) โดยกำหนดตัวแปรที่ศึกษา คือ กำลังอัดคอนกรีตซึ่งมีค่าระหว่าง 100-500 กก./ซม.^{2} และกำลังคลากของเหล็กเสริมมีค่าอยู่ระหว่าง 3000 - 5000 กก./ซม.^{2} ตามมาตรฐานท้องตลาดในประเทศไทย จากคุณสมบัติหน้าตัดดังกล่าวจะทำการทดลองแทนค่าปริมาณเหล็กเสริม และลวดอัดแรง ลงในหน้าตัดและวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง จนกระทั่งได้ปริมาณเหล็กเสริมและลวดอัดแรงที่ภาวะสมดุลย์ ดังแสดงผลการวิจัยในตารางที่ 3.6 และ 3.7 แล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์($\rho_{sb}+\rho_{pb}$)และกำลังอัดคอนกรีต และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ ($\bar{\omega}_b$) และกำลังอัดคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8

กราฟรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมในหน้าตัดที่ภาวะสมดุลย์ และกำลังคอนกรีต เมื่อกำลังคลากของเหล็กเสริมเท่ากับ 5000 กก./ซม^2. ปริมาณเหล็กเสริมและลวดอัดแรงพิจารณาเฉพาะปริมาณที่ให้ค่า PPR เท่ากับ 0,0.5 และ 1.0 จากกราฟพบว่าเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ขึ้นอยู่กับทั้งค่า PPR และกำลังอัดคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็ก (PPR = 0)จะมีค่าสูงสุดและเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง (PPR =1.0) จะมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากผลของการอัดแรงในลวดนั่นเองการควบคุมปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดโดยใช้เปอร์เซนต์เหล็กเสริมไม่เหมาะสม เนื่องจากขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว

กราฟรูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่ภาวะสม

ดุลย์และกำลังอัดคอนกรีต เมื่อกำลังคลากของเหล็กเสริมเท่ากับ 3000 กก./ซม.^{2} ปริมาณเหล็กเสริมและลวดอัดแรงพิจารณาที่เฉพาะปริมาณที่ให้ค่า PPR = 0,0.5 และ 1.0 เช่นเดียวกับกราฟรูป 3.5 จากกราฟรูปที่ 3.6 มีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับกราฟ รูปที่ 3.5 จะแตกต่างกันเพียงอัตราการเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์เท่านั้น ปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์สำหรับกำลังคลาก 3000 กก./ซม.^{2} จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์สำหรับกำลังคลาก 5000 กก./ซม.^{2}

จากกราฟรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก คือ เปอร์เซ็นต์เหล็กเสริม ,กำลังอัดคอนกรีต ,กำลังคลากของเหล็กเสริม และ PPR การที่เปอร์เซนต์เหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้ควบคุมหน้าตัด งานวิจัยนี้ได้เสนอให้ใช้ตัวแปรดัชนีเหล็กเสริมเป็นตัวแปรควบคุม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.8 ซึ่งพบว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์มีค่าคงที่สำหรับกำลังคลากเหล็กเสริมเดียวกัน จากกราฟพบว่าดัชนีเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ (ω_b) มีค่าเท่ากับ 0.503 สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนที่ใช้เหล็กเสริมกำลังคลาก 3000 กก./ซม.^{2} และเท่ากับ 0.413 สำหรับเหล็กเสริมกำลังคลาก 5000 กก./ซม.^{2} โดยที่กำลังอัดคอนกรีตมีผลต่อดัชนีเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์น้อยมาก มาตรฐาน ACI ได้กำหนดปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดภายในหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ให้เกิน 75% ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ ($0.75\rho_b$) ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะวิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก และมีความเหนียวอยู่บ้าง ดังนั้นหากพิจารณาให้ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดภายในหน้าตัดมีได้ไม่เกิน 75% ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลย์ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดที่ใช้เหล็กเสริมเกรด SD30 ไม่ควรมีค่าเกิน $0.75\omega_b$ หรือเท่ากับ 0.38 และไม่ควรมีค่าเกิน 0.31 สำหรับหน้าตัดที่ใช้เหล็กเสริม เกรด SD50

จากสมการที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า นอกจากตัวแปรดัชนีเหล็กเสริมจะเป็นตัวแปรที่สัมพันธ์กับกำลังของหน้าตัดที่สภาวะประลัยแล้ว อัตราส่วนระหว่างระยะแกนสะเทินและความลึกประสิทธิผลยังเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่อกำลังประลัยของหน้าตัดอีกด้วย จากการวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง พบว่าอัตราส่วน c/d ที่ภาวะสมดุลย์สำหรับคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ซึ่งใช้เหล็กเสริมเกรด SD30 มีค่าเท่ากับ 0.671 และสำหรับเหล็กเสริมเกรด SD50 c/d มีค่าเท่ากับ 0.550 และที่ปริมาณเหล็กเสริม 75% ของภาวะสมดุลย์ c/d มีค่าเท่ากับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.50 และ 0.42 สำหรับเหล็กเสริมเกรด SD30 และ SD50 ตามลำดับ

ซ. ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริม (ω) และ PPR

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริม และ PPR โดยกำหนดตัวแปรคงที่ คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิผล $0.6f_{pu}$ กก./ซม.^{2} กำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2} และ กำลังคลากเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2} สำหรับตัวแปรที่ทำการแปรเปลี่ยน คือ ดัชนีเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 0.1,0.2 และ 0.3 หรือเท่ากับ $0.2\omega_b$,$0.4\omega_b$ และ $0.6\omega_b$ ตามลำดับ ในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริมจะทำการแปรเปลี่ยนค่า PPR เท่ากับ 0,0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 ตามลำดับ ผลการดำเนินการวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.8, 3.9 และ 3.10 และรูปที่ 3.9,3.10 และ 3.11 จะเห็นได้ว่าในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริมสามารถแปรเปลี่ยน PPR ได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่งโดยที่กำลังดัดประลัยยังคงมีค่าเท่ากัน แต่โมเมนต์แตกร้าวของหน้าตัดที่มีค่า PPR สูง จะสูงมากหน้าตัดที่มีค่า PPR ต่ำ จากงานวิจัยสำหรับดัชนีเหล็กเสริม เท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.30 พบว่าแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง (PPR = 1) จะมีค่าโมเมนต์แตกร้าวมากกว่าแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (PPR = 0) ประมาณ 112% , 121% และ 315% ตามลำดับ การแอ่นตัวหรือความโค้งของแผ่นพื้นในช่วงก่อนการแตกร้าวสำหรับหน้าตัดที่มีค่า PPR สูงจะน้อยกว่าหน้าตัดที่มีค่า PPR ต่ำ อย่างไรก็ตามหลังจากแผ่นพื้นเกิดการแตกร้าว พฤติกรรมการแอ่นตัวของ PPR ทุกค่าจะเริ่มเข้าใกล้กันจนกระทั่งเมื่อโมเมนต์กระทำ มีค่าประมาณ 70-80 % ของโมเมนต์ดัดประลัย การแอ่นตัวของแผ่นพื้นทุกค่า PPR จะเท่ากันพอดี และหลังจากนั้นการแอ่นตัวของแผ่นพื้นที่หน้าตัดที่มีค่า PPR สูงจะมากกว่าหน้าตัดที่มีค่า PPR ต่ำจนถึงภาวะประลัย นอกจากนี้ยังพบว่า PPR มีอิทธิพลต่อความเหนียวของหน้าตัดน้อยมาก โดยความเหนียวของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างจากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสูงสุดเพียง 8 % เท่านั้น

ช. ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริมและความเหนียว

ความเหนียวของหน้าตัดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อโครงสร้างโดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากหน้าตัดที่มีความเหนียวเพียงพอจะสามารถส่งสัญญาณเตือนภัยก่อนการวิบัติทำให้สามารถ

หลีกเลี่ยงความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินได้ นอกจากนี้การเกิดภาวะพลาสติกบนโครงสร้างจะต้องอาศัยหน้าตัดที่มีความเหนียวพอเพียงจึงจะเกิดขึ้นได้ ค่าดัชนีความเหนียวของหน้าตัดมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความโค้งที่ภาวะประลัย (ϕ_u) และ ความโค้งที่จุดคลาก (ϕ_y) ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Ductility Index (D.I.)} = \phi_u / \phi_y \qquad (3.4)$$

ค่าความโค้งที่จุดคลาก (ϕ_y) หมายถึง ค่าความโค้งเมื่อความเครียดในเหล็กเสริม เท่ากับ ϵ_y (Yield) ในกรณีคอนกรีตอัดแรงเต็มซึ่งไม่มีเหล็กเสริมอยู่เลยนั้น M.Z.COHN, F.ASCE และ M.BASTLETT (20) ได้นิยามให้หาค่าดัชนีความเหนียว โดยการสมมุติให้ใส่ปริมาณเหล็กเสริมจำนวนน้อยมาก ๆ ลงในหน้าตัดซึ่งจะทำให้หา ϵ_y ได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของดัชนีเหล็กเสริมที่มีต่อค่าดัชนีความเหนียวของหน้าตัด โดยในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริมยังได้พิจารณาตัวแปรย่อยคือค่า PPR , แรงอัดประสิทธิผล และกำลังคลากเหล็กเสริม จากแบบจำลองหน้าตัดแผ่นพื้นได้ควบคุมปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดให้มีค่าดัชนีเหล็กเสริม 0.05,0.15, 0.20,0.25 และ 0.30 ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริม จะทำแปรเปลี่ยนค่า PPR ให้มีค่าเท่ากับ 0,0.5 และ 1.0 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด และความโค้งจะทำให้ทราบถึงความโค้งที่ภาวะประลัยและที่จุดคลาก ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าดัชนีความเหนียวได้ ตารางที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริมและดัชนีความเหนียว โดยกราฟแต่ละเส้นเป็นความสัมพันธ์ เมื่อ PPR = 0, 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากกราฟรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีความเหนียวของหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน ทั้งที่ใช้เหล็กเสริม เกรด SD30 และ SD50 จะมีค่าลดลงเมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการลดลงของดัชนีความเหนียว ในช่วงดัชนีเหล็กเสริม ประมาณ 0 - 0.18 จะสูงมาก หลังจากนั้นอัตราการลดลงของดัชนีความเหนียวจะต่ำลงจนค่อนข้างคงที่ในช่วงดัชนีเหล็กเสริมตั้งแต่ 0.30 เป็นต้นไป ดัชนีความเหนียวสำหรับเหล็กเสริมเกรด SD30 จะมีค่ามากกว่าเหล็กเสริมเกรด SD50 โดยเฉพาะในช่วงที่ดัชนีเหล็กเสริมมีค่าน้อย ๆ และจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น จากกราฟยังอธิบายได้อีกว่าค่าอัตราส่วน

การอัดแรง (PPR) มีผลต่อดัชนีความเหนียวน้อยมาก โดย PPR เท่ากับ 0.0 และ 1.0 ให้ค่าดัชนีความเหนียวแตกต่างกันเพียงประมาณ 4-6 % เท่านั้น

ในโครงสร้างต่อเนื่อง (Continuous Structure) อาจยอมให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนต์(Moment Redistribution) ได้ ในกรณีที่หน้าตัดมีความเหนียวเพียงพอที่จะทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge) Furlong (21) ได้เสนอสูตรกำหนดดัชนีความเหนียวต่ำสุดสำหรับการเกิดจุดหมุนพลาสติกในคาน คือ $\phi_u / \phi_y = 1 + 0.25(l/d)$ เมื่อ l คือความยาวช่วง และ d คือ ความลึกประสิทธิผล จากสูตรจะให้ค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วง 4 - 6 และหากพิจารณาให้ หน้าตัดมีดัชนีความเหนียวอย่างน้อยเท่ากับ 4 จากกราฟรูปที่ 3.12 พบว่า ค่าดัชนีเหล็กเสริม ($\bar{\omega}$) มีค่าไม่ควรเกิน 0.18 สำหรับเหล็กเสริมเกรด SD50 และไม่ควรเกิน 0.25 สำหรับเหล็กเสริมเกรด SD30

3.2 ตัวแปรหลักด้านการให้บริการ

ก. การควบคุมความกว้างรอยแตกร้าว

ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนจำเป็นต้องตรวจสอบขนาดความกว้างรอยแตกร้าวไม่ให้เกินตามที่มาตรฐานกำหนดดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 งานวิจัยนี้ได้เสนอตัวแปรที่สามารถควบคุมความกว้างรอยแตกร้าวไม่ให้เกินตามมาตรฐานกำหนดโดยพิจารณาความกว้างรอยแตกร้าวมากที่สุดที่ยอมให้ คือ 0.1,0.2,0.3 และ 0.4 มม. ตามลำดับ สูตรที่ใช้คำนวณรอยแตกร้าว คือสูตรของ CEB - FIP , ACI และ Nawy และ Chiang ดังสมการที่ 2.12 ,2.13 และ 2.19 ตามลำดับ

- ผลการเปรียบเทียบสูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าว

งานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณความกว้างรอยแตกร้าวสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นบนหน้าตัดตามสูตรที่พิจารณาสามสูตร คือ Nawy และ Chiang, CEB และ ACI ภายใต้แรงกระทำเดียวกัน โดยกำหนดตัวแปรคงที่ดังนี้ คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิผล $0.6f_{pu}$

กก./ซม.^{2} , กำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2},กำลังคลากเหล็กเสริม 3000 กก./ซม.^{2}, ปริมาณเหล็กเสริม 1% และปริมาณลวดอัดแรง 0.1646% จากคุณสมบัติหน้าตัดที่กำหนดสามารถคำนวณค่า PPR และดัชนีเหล็กเสริม ได้เท่ากับ 0.5 และ 0.20 ตามลำดับ และคำนวณความกว้างรอยแตกร้าวเมื่อโมเมนต์กระทำมีค่าเท่ากับ 0.4 M_{ult} ,0.5 M_{ult}, 0.6 M_{ult}, 0.7 M_{ult}, และ 0.8 M_{ult} ตามลำดับ ซึ่งแรงกระทำที่พิจารณานี้เทียบได้กับน้ำหนักใช้งานนั่นเอง ในทางปฏิบัติน้ำหนักใช้งานจะอยู่ในช่วงประมาณ 60-65 % ของน้ำหนักประลัยเท่านั้น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.12 ผลการเปรียบเทียบสูตรแสดงดังตารางที่ 3.13 และรูปที่ 3.13 ซึ่งทำการเปรียบสูตรโดยแยกตามขนาดเหล็กเสริมเล็กสุด (DB10) และใหญ่ที่สุด (DB28) ที่น่าจะสอดคล้องต่อการทำงานในภาคปฏิบัติ จากรูปที่ 3.13 และตารางที่ 3.13 พบว่าความกว้างรอยแตกร้าวมีความสัมพันธ์กับโมเมนต์กระทำ (M_{serv}) แบบเส้นตรง โดยเฉลี่ยแล้วสูตรทำนายของ Nawy และ Chiang ให้ค่าทำนายสูงสุด ในขณะที่สูตร ACI ให้ค่าทำนายต่ำสุด ความแตกต่างของผลทำนายจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดเหล็กเสริมและโมเมนต์กระทำที่เพิ่มขึ้น เช่นที่ โมเมนต์กระทำเท่ากับ 0.4 M_{ult} สำหรับเหล็ก DB10 มม. สูตรของ Nawy ให้ผลทำนายแตกต่างจาก CEB และ ACI 22% และ 33% ตามลำดับ ในขณะที่เหล็ก DB28 มม. สูตร Nawy ให้ผลทำนายแตกต่างจาก CEB และ ACI 10% และ 50% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ อาจกล่าวได้ว่าการเลือกใช้สูตรของ Nawy และ Chiang ในการทำนายความกว้างจะให้ความปลอดภัยสูงสุด

- <u>ผลของกำลังอัดคอนกรีตต่อความกว้างรอยแตกร้าว</u>

จากการศึกษาถึงผลของกำลังอัดคอนกรีต ที่มีต่อขนาดความกว้างรอยแตกร้าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.14 ซึ่งพบว่า ในช่วงกำลังอัดคอนกรีตระหว่าง 100 ถึง 500 กก./ซม.^{2} สูตรคำนวณรอยแตกร้าวทั้งสามให้ผลการคำนวณแตกต่างกันสูงสุดในช่วงประมาณ 3 - 19 % เท่านั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2} ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยและนิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- <u>การควบคุมความกว้างรอยแตกร้าวด้วยดัชนีเหล็กเสริม และ PPR</u>

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราส่วนโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ประลัย (M_{serv}/M_{ult}),ความกว้างรอยแตกร้าว, ดัชนีเหล็กเสริม และ PPR เพื่อใช้ประกอบการออกแบบและตรวจสอบโครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วน โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ขนาดความกว้างรอยแตกร้าว 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 มม. และดัชนีเหล็กเสริมมีค่า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.3 โดยในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริม จะพิจารณาเฉพาะปริมาณเหล็กเสริมที่ให้ค่า PPR เท่ากับ 0, 0.5 และ 1.0 ตามลำดับ จากคุณสมบัติหน้าตัดและความกว้างรอยแตกร้าวที่กำหนดให้ เมื่อแทนค่าลงในสูตรทำนายความกว้างรอยแตกร้าวทั้งสามสูตรจะทำให้ทราบค่าหน่วยแรงภายในเหล็กเสริม และจากการวิเคราะห์หน้าตัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง จะทำให้ทราบค่าโมเมนต์ดัดใช้งานที่กระทำบนหน้าตัดจนกระทั่งเกิดหน่วยแรงภายในเหล็กเสริมที่สัมพันธ์กับความกว้างรอยแตกร้าวที่กำหนดให้ จากข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ประลัย และดัชนีเหล็กเสริม โดยแยกตามค่า PPR และขนาดเหล็กเสริม ผลการวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.15 ถึง 3.26 และ รูปที่ 3.14 ถึง 3.25

จากตารางที่ 3.15, 3.16 และ 3.17 และกราฟรูปที่ 3.14, 3.15 และ 3.16 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง M_{serv}/M_{ult} และดัชนีเหล็กเสริม (ω) เมื่อกำหนดความกว้างรอยแตกร้าวเท่ากับ 0.1 มม. โดยสูตรของ CEB, Nawy และ Chiang และ ACI ตามลำดับ จากกราฟทั้งสามพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วดัชนีเหล็กเสริมไม่ค่อยมีผลต่ออัตราส่วน M_{serv}/M_{ult} มากนัก ในขณะที่ PPR มีผลต่อ M_{serv}/M_{ult} ค่อนข้างมาก เหล็กเสริมขนาดใหญ่จะให้ค่า M_{serv}/M_{ult} ต่ำกว่าเหล็กขนาดเล็ก สูตรทำนายทั้งสามสูตรให้ผลการทำนายค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.12 ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบอัตราส่วน M_{serv}/M_{ult} จากมาตรฐาน ว.ส.ท. และ ACI ซึ่งพบว่า อัตราส่วน M_{serv}/M_{ult} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 - 0.65 จากกราฟรูปที่ 3.14, 3.15 และ 3.16 หากพิจารณาขีดจำกัดล่างของค่า PPR พบว่า ควรใช้ PPR เท่ากับ 1.0 หรือ คอนกรีตอัดแรง สำหรับการควบคุมความกว้างรอยแตกร้าวไม่ให้เกิน 0.1 มม.

จากตารางที่ 3.18,3.19 และ 3.20 และกราฟรูปที่ 3.17, 3.18 และ 3.19 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง M_{serv}/M_{ult} และดัชนีเหล็กเสริม เมื่อกำหนดความกว้างรอยแตกร้าวเท่ากับ 0.2 มม. โดยสูตรของ CEB , Nawy และ Chiang และ ACI ตามลำดับ จากกราฟทั้งสามพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วดัชนีเหล็กเสริมไม่ค่อยมีผลต่ออัตราส่วน M_{serv}/M_{ult} มากนัก ในขณะที่ PPR มีผลต่อ M_{serv}/M_{ult} ค่อนข้างมาก เหล็กเสริมขนาดใหญ่จะให้ค่า M_{serv}/M_{ult} ต่ำกว่าเหล็กเสริมขนาดเล็ก สูตรทำนายทั้งสามสูตรให้ผลการทำนายค่อนข้างแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่า PPR ที่ M_{serv}/M_{ult} มีค่าประมาณ 0.60 - 0.65 จะได้ขีดจำกัดล่างของค่า PPR ที่เหมาะสม คือ PPR เท่ากับ 1.0

จากตารางที่ 3.21, 3.22 และ 3.23 และกราฟรูปที่ 3.20, 3.21 และ 3.22 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง M_{serv}/M_{ult} และดัชนีเหล็กเสริมเมื่อกำหนดความกว้างรอยแตกร้าวเท่ากับ 0.3 มม. โดยสูตรของ CEB, Nawy และ Chiang และ ACI ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ 3.19 และ 3.21 พบว่าสูตรของ CEB และ ACI ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างจากสูตรของ Nawy และ Chiang ค่อนข้างมากโดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมขนาดใหญ่ จากกราฟพบว่าค่า PPR ที่เหมาะสมสำหรับค่า M_{serv}/M_{ult} ในช่วง 0.60 - 0.65 แยกเป็นสองกรณี กรณีที่หนึ่ง คือ เมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่าน้อยกว่า 0.20 ควรใช้ PPR เท่ากับ 1.0 และกรณีที่สองคือ เมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่า มากกว่า 0.2 สามารถใช้ PPR ได้ทุกค่า

จากตารางที่ 3.24, 3.25 และ 3.26 และกราฟรูปที่ 3.23, 3.24 และ 3.25 แสดงผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง M_{serv}/M_{ult} และดัชนีเหล็กเสริม เมื่อกำหนดความกว้างรอยแตกร้าวเท่ากับ 0.4 มม. โดยสูตรของ CEB, Nawy และ Chiang และ ACI ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ 3.22 และ 3.24 พบว่าสูตรของ CEB และ ACI ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างจากสูตรของ Nawy และ Chiang ค่อนข้างมากโดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมขนาดใหญ่ จากกราฟพบว่าขีดจำกัดล่างของค่า PPR ที่เหมาะสมสำหรับ M_{serv}/M_{ult} ในช่วง 0.60 - 0.65 แยกเป็นสองกรณี กรณีที่หนึ่งคือ เมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่าน้อยกว่า 0.15 ควรใช้ PPR เท่ากับ 1.0 และกรณีที่สองคือเมื่อดัชนีเหล็กเสริมมีค่ามากกว่า 0.15 สามารถใช้ PPR ทุกค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเหล็กเสริม PPR และความกว้างรอยแตกร้าว พบว่า ความกว้างรอยแตกร้าว ในหน้าตัดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนมีความสัมพันธ์กับทั้ง PPR, ดัชนีเหล็กเสริม และ ขนาดเหล็กเสริม ค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมความกว้างรอยแตกร้าวสามารถหาได้จากกราฟรูปที่ 3.14 - 3.25 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้ อย่างไรก็ตามจากกราฟทั้งหมดสามารถหาขีดจำกัดล่างของค่า PPR เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.27

ข. <u>การควบคุมการแอ่นตัว</u>

การแอ่นตัวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับรูปแบบของโครงสร้าง,แรงกระทำ, ความยาวช่วง และคุณสมบัติหน้าตัด การคำนวณค่าการแแอ่นตัวค่อนข้างยุ่งยาก งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรที่เหมาะสมในการควบคุมการแอ่นตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนไม่ให้เกินตามที่มาตรฐานกำหนด โดยได้สร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ดังรูป ก.1 ซึ่งแทนแผ่นพื้นอย่างง่ายช่วงเดียว (Simply Support) และ รูป ก.2 ซึ่งแทนแผ่นพื้นต่อเนื่อง การหาค่าการแอ่นตัวสามารถทำได้โดยการแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และ การแอ่นตัวของโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาแผ่นพื้นอย่างง่าย ดังรูปที่ ก.1 การแอ่นตัวสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก W มีค่าเท่ากับ (Δ_1)

$$\Delta_1 = 5WL^4 / 384EI$$

แต่ $M_w = WL^2/8$ ดังนั้น $\Delta_1 = 5M_wL^2 / 48EI$

การโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรง $\Delta_2 = 5(F.e)L^2/48EI$

ดังนั้น การแอ่นตัว $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$

$$= 5L^2 (M_w - F.e)/48EI$$

แต่ $\phi = M/EI$ ดังนั้น $\Delta = 5\phi L^2/48$ (3.5)

เมื่อพิจารณาแผ่นพื้นต่อเนื่อง ดังรูปที่ ก.2 การแอ่นตัวสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก W มีค่าเท่ากับ (Δ_1)

$$\Delta_1 = WL^4 / 384EI$$

แต่ $M_w = WL^2/24$ ดังนั้น $\Delta_1 = M_w L^2 / 16EI$

การโก่งตัวเนื่องจากการอัดแรง $\Delta_2 = (F.e)L^2/16EI$

ดังนั้น การแอ่นตัว $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$

$$= L^2 (M_w - F.e)/16EI$$

แต่ $\phi = M/EI$ ดังนั้น $\Delta = \phi L^2/16$ (3.6)

งานวิจัยนี้ ได้กำหนดตัวแปรคงที่จากแบบจำลองหน้าตัด คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิผล $0.6f_{pu}$, กำลังอัดคอนกรีต 300 กก./ซม.^{2} และกำลังคลากเหล็กเสริม 3,000 กก./ซม.^{2} สำหรับตัวแปรที่ทำการแปรเปลี่ยนคือ ดัชนีเหล็กเสริม มีค่าเท่ากับ 0.1 , 0.2 และ 0.3 โดยในแต่ละค่าของดัชนีเหล็กเสริมจะพิจารณาเฉพาะปริมาณเหล็กเสริม ที่ให้ค่า PPR เท่ากับ 0, 0.25, 0.5,0.75 และ 1.0 ตามลำดับ ระยะแอ่นตัวสูงสุดจะพิจารณาที่ L/180, L/360 และ L/480 เมื่อแทนค่าระยะแอ่นตัวที่ยอมให้ คือ L/180 , L/360 และ L/480 ลงในสมการที่ 3.5 และ 3.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้ง (ϕ) และความยาวช่วงดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- <u>สำหรับแผ่นพื้นช่วงเดียว</u>

ϕL = 0.053 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/180

ϕL = 0.027 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/360

ϕL = 0.020 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/480

- <u>สำหรับแผ่นพื้นต่อเนื่อง</u>

ϕL = 0.089 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/180

ϕL = 0.044 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/360

ϕL = 0.033 สำหรับการแอ่นตัวไม่เกิน L/480

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาให้โมเมนต์ใช้งานเฉลี่ยมีค่าประมาณ 60% ของโมเมนต์ดัดประลัย จากคุณสมบัติหน้าตัดและความสัมพันธ์ ϕL ที่ทราบ จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้องซึ่งจะสามารถหาค่า ϕ ที่โมเมนต์ดัดเท่ากับ 0.60 M_{ult} ได้ และสามารถหาค่า L จากความสัมพันธ์ ϕL ได้เช่นกัน จากนั้นเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง L/t และ PPR โดยกราฟแต่ละเส้นแยกตามค่าดัชนีเหล็กเสริมคือ 0.1, 0.2 และ 0.3 ผลการวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.28 และ 3.29 และรูปที่ 3.26 ถึง 3.31 ซึ่งพบว่าดัชนีเหล็กเสริมมีอิทธิพลต่ออัตราส่วน L/t ไม่มากนัก โดยให้ค่า L/t แตกต่างกันสูงสุดประมาณ 28 % นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วง PPR ระหว่าง 0-0.75 การเปลี่ยนแปลงค่า PPR มีผลต่อ L/t น้อยมาก การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน L/t ขึ้นอยู่กับดัชนีเหล็กเสริมเป็นส่วนใหญ่ แต่ในช่วง PPR ระหว่าง 0.75 - 1.0 ค่า PPR จะมีผลต่ออัตราส่วน L/t เป็นอย่างมาก จากกราฟรูปที่ 3.28 ถึง 3.31 อาจพิจารณานำไปประกอบการออกแบบ หรือตรวจสอบโครงสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงบางส่วนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาขีดจำกัดล่างจากกราฟโดยการประมาณด้วยสมการเส้นตรง เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย