บทที่ 1

บทนำ

1.1.ความนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีผู้ให้ความสนใจในการใช้คอนกรีตหล่อสำเร็จรูปในอุตสาหกรรมการก่อสร้างจำนวนมากไม่ว่าจะเป็น ผนังสำเร็จรูป คาน แผ่นพื้นฯ เนื่องจากทำให้สามารถลดระยะเวลาการดำเนินงานก่อสร้าง และ ค่าใช้จ่ายได้มาก การใช้คอนกรีตสำเร็จรูปสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง อาทิ บ้านพักอาศัย อาคารพาณิชย์ โรงแรม สะพานฯ ซึ่งสิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการนำระบบคอนกรีตสำเร็จรูปไปใช้ คือ การถ่ายเทแรงเฉือนที่รอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปเหล่านั้น

สำหรับรอยต่อในโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป ได้นิยมสร้างสลักคอนกรีตที่บริเวณผิวรอยต่อของชิ้นส่วน เพื่อลดการลื่นไถลของชิ้นส่วน และ ช่วยในการรับแรงเฉือน เนื่องจากรอยต่อที่ไม่มีสลักคอนกรีตจะมีการเลื่อนไถลสูงมาก เปรียบเทียบกับผิวรอยต่อที่มีสลักคอนกรีตตลอดจนกำลังการรับแรงเฉือนจะมีค่าต่ำกว่า และ เนื่องจากกำลังการรับแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าค่อนข้างจำกัด การแก้ปัญหาได้มีการใช้การอัดแรงที่รอยต่อเพื่อเพิ่มกำลังการรับน้ำหนัก ดังนั้นกำลังการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบที่มีสลักคอนกรีตในการรับแรงเฉือนนี้ เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบรอยต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาทฤษฎี และ ทำการทดสอบเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบสลักแรงเฉือนคอนกรีตล้วนนี้ให้สอดคล้องกับการออกแบบโครงสร้างต่อไป

1.2.งานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาการถ่ายเทแรงเฉือนผ่านหน้าตัด

Hofbeck, Ibrahim และ Mattock (1) ได้ศึกษากลไกการถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีต (Shear Transfering) พบว่าเมื่อคอนกรีตถ่ายแรงเฉือนผ่านหน้าตัดหนึ่งจะเกิดรอยแตกทแยงเนื่องจากแรงดึงทแยงในหน้าตัดที่รับแรงเฉือนนั้น โดยทำมุมอยู่ระหว่าง 40 องศา - 50 องศามีความยาวประมาณ 5 ซม. หลังจากนั้นคอนกรีตจะเกิดการพังทลายเนื่องจากการแตกออก (Spalling) เนื่องจากแรงอัดของคอนกรีตส่วนที่อยู่ระหว่างรอยแตกทแยงร่วมกับการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในลักษณะที่รอยแตกทแยงเชื่อมเข้าด้วยกันในแนวดิ่ง

ในปี 1972 Hawkins และ Mattock (2) ได้ศึกษาผลของกำลังอัดของคอนกรีต ลักษณะรูปร่างของหน้าตัดที่รับแรงเฉือน (Shear plane characteristics) และแรงกระทำโดยตรง (Direct stress) ทั้งทางด้านแนวดิ่งและแนวราบที่มีผลต่อกำลังการถ่ายแรงเฉือนผ่านหน้าตัดหนึ่งๆ ของคอนกรีต โดยผลการทดสอบสรุปว่า ผลของหน่วยความเค้นดึง (Tension stress) ที่กระทำขนานกับหน้าตัดรับแรงเฉือนจะลดกำลังการถ่ายแรงเฉือนผ่านหน้าตัดของคอนกรีตลงในกรณีที่ไม่มีการแตกร้าวก่อนการทดสอบ (Initially uncracked concrete) แต่จะไม่มีผลต่อกำลังการถ่ายแรงเฉือนของหน้าตัดที่มีการแตกร้าวก่อนการทดสอบ (Initially cracked concrete) นอกจากนี้ Hawkins ได้เสนอกลไกการถ่ายเทแรงเฉือนของหน้าตัดที่ไม่มีการแตกร้าวก่อนการทดสอบ (Initially uncracked concrete) โดยเมื่อหน้าตัดของคอนกรีตรับแรงเฉือนจะเกิดการแตกร้าวทแยงเนื่องจากการปฏิสัมพัทธ์ของหน่วยแรงเฉือนทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหลัก (Principle normal tension Stress) เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวดังกล่าว ส่วนของคอนกรีตที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวดังกล่าวจะประพฤติตัวในลักษณะที่เรียกว่าโครงจั่วเสมือน (Truss like action) และการพังทลายของหน้าตัดที่รับแรงเฉือนนั้นจะเกิดจากการพังทลายของส่วนของคอนกรีตเอียงที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าว (Concrete strut) ภายใต้ผลร่วมของแรงเฉือนและแรงอัดตามแกน Mattocks (2) ยังได้พบว่า สำหรับหน้าตัดที่ไม่มีการเสริมเหล็กผ่านหน้าตัดที่รับแรงเฉือนนั้น รอยแตกร้าวจะทำมุมประมาณ 45 องศา กับหน้าตัดนั้น

Vechio และ Collins (4) ได้ค้นพบข้อเท็จจริงที่ว่า เมื่อเกิดการแตกร้าว (Crack) ขึ้นในคอนกรีต คอนกรีตส่วนที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวนั้น จะประพฤติตัวคล้ายกับวัสดุตัวใหม่ที่มีคุณลักษณะของความสัมพันธ์ ระหว่าง ความเครียดและความเค้น (Stress-strain relation) เป็นของตัวเอง ซึ่งแตกต่างจากความสัมพันธ์ของคอนกรีตเมื่อยังไม่มีการแตกร้าว

Hsu,Mau และ Chen (5) ได้เสนอข้อพิจารณาเพิ่มเติมจากแบบจำลอง Truss model ของ Mattock โดยรวมพฤติกรรมการอ่อนตัวของคอนกรีต (Softened compression Stress - Strain relation) ในการคำนวนกำลังการถ่ายแรงเฉือนของคอนกรีตที่หน้าตัดที่รับแรงเฉือนภายหลังเกิดการแตกร้าว (Crack) ที่เสนอโดย Vechio และ Collins (4) โดย Vechio ได้พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตในส่วนของคอนกรีต ที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าว (Compression strut) จะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังอัดทดสอบมาตรฐาน (Cylinder test compression strength) โดยเสนอปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการอ่อนตัวของคอนกรีต (The softening of concrete) ซึ่งค่าการอ่อนตัวของคอนกรีตนี้มีความสัมพันธ์กับค่าความเค้นดึง (Tensile strain) ของคอนกรีตในทิศทางที่ตั้งฉากกับส่วนรับแรงอัดนั้น (Compression strut) โดย Hsu, ยังได้พบว่าอัตราส่วนของความยาวของหน้าตัดที่รับแรงเฉือน (Length of shear plane) ต่อความกว้างของตัวอย่างที่ทดสอบมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดนั้น แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนเนื่องจากขาดข้อมูลที่เพียงพอ

การศึกษากำลังของรอยต่อแบบมีสลักแรงเฉือน

Annamalai และ Brown (6) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายแรงเฉือนของรอยต่อแบบสลักรับแรงเฉือนของคาน และ เสาหล่อสำเร็จรูปแบบอัดแรงที่รอยต่อ (Post - tension grout - shear keys) โดยใช้อัตราส่วนของความลึกต่อความหนาของสลักคงที่ (l/d) = 4 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) อัตราส่วนของพื้นที่ของสลัก (Shear keys) ที่รับแรงเฉือนต่อพื้นที่ที่รับแรงเฉือนทั้งหมด (B/Acr) และแรงอัดด้านข้างที่กระทำที่รอยต่อนั้นโดยเสนอว่า อัตราส่วนของพื้นที่ของสลักต่อพื้นที่ทั้งหมดที่รับแรงเฉือนไม่ควรเกิน 0.5 เพื่อหลีกเลี่ยงการพังทลาย (Fail) ของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปก่อนที่รอยต่อ และ ค่าอัตราส่วนนี้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.5

Kaneko, Connor (10) ได้เสนอแบบจำลองของการพังทลายของสลักแรงเฉือนคอนกรีตล้วน (Failure of concrete shear key) โดยใช้หลักกลศาสตร์ของการแตกร้าว (Fracture mechanics) โดยกลไกการเกิดแรงเฉือนขาดในคอนกรีตล้วน หรือ คอนกรีตเสริมไฟเบอร์สลัก อธิบายได้ด้วย กลไก-การแตกร้าว 2 ส่วน คือการเกิดรอยแตกร้าวแบบ โค้งเดี่ยว (Single-curvilinear crack) และ การเกิดรอยร้าวทแยงจำนวนมาก (Multiple diagonal cracks) ซึ่งกลไกการแตกร้าวทั้ง 2 นี้ จะครอบคลุมพฤติกรรมของสลักคอนกรีตนี้โดยพิจารณากรณีของรอยแตกร้าว แบบโค้งเดี่ยวภายใต้แรงกระทำแบบลิ่ม (Wedging force) ภายใต้การกำหนดโดยกลไกการแตกร้าวยืดหยุ่นแบบเป็นเส้นตรง (Linear elastic fracture mechanism) และการหมุนของส่วนของคอนกรีตส่วนที่อยู่ระหว่างรอยแตกร้าวทแยง (Rotating Smeared Crack Band Model) ซึ่งกำหนดด้วย ทฤษฎี - ของโครงจั่ว (Truss - model theory) อย่างไรก็ตามเพราะว่ายังมีตัวแปรที่จำเป็นต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติมมากขึ้น อาทิเช่น พลังงานของการแตกร้าว (fracture energy, G_f) และความกว้างของรอยแตกทแยง (width of crack band, h) รวมอยู่ในแบบจำลองของ Kaneko นี้ ทำให้ในการออกแบบต้องใช้ความระมัดระวังมากเป็นพิเศษ นอกจากนี้การศึกษาเพิ่มเติมตัวแปรต่างๆ ยังเป็นสิ่งสำคัญ

สำหรับคุณลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตสลักนี้ PCI Committee 1976 (8) เสนอลักษณะทางกายภาพโดยทั่วๆไปของสลักคอนกรีต โดยเสนอข้อกำหนดอัตราส่วนสูงสุดของความยาว และ ความลึกของคอนกรีตสลักนี้คือ 6 มุมเอียงจากโคนถึงปลายสลักต้องน้อยกว่า 30 องศาถึง 35 องศา CEB - FIP 1990 (3) กำหนดค่าความลึกของคอนกรีตสลักต้องไม่ต่ำกว่า 2 ซม. และความหนาของสลักคอนกรีตต้องไม่น้อยกว่า 5 ซม.

การศึกษาผลของแรงอัดที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัดที่รับแรงเฉือน

ในปี 1990 Anamalai และ Brown ได้ทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบกำลังประลัยของรอยต่อแบบที่มีสลักคอนกรีตรับแรงเฉือนเมื่อมีการอัดแรงที่หลัง โดยมีค่ากำลังอัดของคอนกรีต และ อัตราส่วนของความลึกต่อความหนาของสลักคงที่ (l/d = 4) กำหนดให้ค่ากำลังแรงเฉือนประลัยของรอยต่อหาได้จาก $v_u = 0.16\,(B/A_{cr})\,f_c' + 0.66\,N_p / A_{cr}$ และพบว่าการวิบัติของคอนกรีตสลักนี้สอดคล้องกับที่เสนอโดย Hsu นอกจากนี้ Anamalai ได้เสนอให้พิจารณาเหล็กเสริมที่ผ่านหน้าตัดที่รับแรงเฉือน ในกรณีของรอยต่อแบบมีสลักคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็ก

ผ่านหน้าตัด โดยให้พิจารณาค่า $A_s f_y$ ใน ACI และ PCI Committee เสมือนเป็นแรงอัดที่กระทำต่อหน้าตัดนั้น ซึ่งค่าที่ได้ให้ค่าที่ค่อนข้างอนุรักษ์เกินไป โดยแนะนำให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเป็น 1.1

CEB - FIP Model code 1990 เสนอการหาค่ากำลังเฉือนประลัยของรอยต่อรับแรงเฉือนแบบที่มีคอนกรีตสลักจาก $v_r = \{ \mu/A_{cr} (A_s f_y (1 + \cot\alpha) \sin\alpha + N_d) + 0.1 f_{ck} \}$ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานคือ 0.9 จะเห็นว่าในขณะที่ CEB - FIP Code 1990 พิจารณากำลังของรอยต่อจากกำลังอัดของคอนกรีตและแรงอัดที่กระทำต่อหน้าตัดที่รับแรงเฉือน Anamalai ได้พิจารณาอัตราส่วนของพื้นที่ทั้งหมดของสลักต่อพื้นที่ทั้งหมดที่รับแรงเฉือนด้วย

ในปี 1993 Kaneko และ Connor (10) อ้างถึงผลการทดสอบของ Bakhoum ที่กระทำการทดสอบกำลังการรับแรงเฉือนประลัยของสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตนี้ โดยใช้กำลังอัดของคอนกรีต และ รูปร่างของคอนกรีตสลักคงที่ และ เสนอการหาค่ากำลังแรงเฉือนประลัยของสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตนี้จาก หลักกลศาสตร์ของการแตกร้าว (Fracture mechanics) โดยเสนอวิธีวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนประลัยของสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตล้วนที่เรียกว่า Rotating Smeared Crack Band Model นอกจากนี้ Kaneko ได้แนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาผลของกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับหน้าตัดที่มีแรงกระทำตั้งฉากยังไม่มี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของกำลังอัดของคอนกรีตต่อกำลังรับแรงเฉือนประลัยของสลักแรงเฉือนคอนกรีตล้วน

1.3.วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการโอบรัดด้านข้าง (แรงอัดที่กระทำตั้งฉากต่อหน้าตัด) และกำลังอัดของคอนกรีตที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของสลักแรงเฉือนคอนกรีตล้วน โดยให้กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') และ แรงอัดที่กระทำตั้งฉากกับหน้าตัดเป็นตัวแปร ทั้งนี้จะศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับ

1. กำลังการรับแรงเฉือน
2. ลักษณะการวิบัติ

1.4.ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยจะศึกษาเฉพาะกำลังการถ่ายแรงเฉือนของสลักคอนกรีตล้วน เมื่อมีแรงอัดกระทำตั้งฉากกับหน้าตัดอยู่ระหว่าง 6.77 กก./ซม.^{2} 13.54 กก./ซม.^{2} 27.08 กก./ซม.^{2} และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตคือ 210 - 350 กก./ซม.^{2} โดยมีลักษณะของสลักคอนกรีตคือ ค่ามุมเอียงของสลักเท่ากับ 30 องศาซึ่งเป็นค่ามุมเอียงสูงสุดที่กำหนดโดย PCI Committee และอัตราส่วนความยาว และ ความลึก = 4 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ (Anamalai , (6)) การทดสอบจะพิจารณาเฉพาะแรงเฉือนเท่านั้น และนำค่าที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธี Rotating Smeared Crack Band Model ที่เสนอโดย Kaneko และสูตรทำนายกำลังของสลักแรงเฉือนคอนกรีตล้วนที่เสนอโดย Bakhoum.