การศึกษากำลังการรับแรงเฉือนของสลักรับแรงเฉือนโดยการเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือน และเสริมแผ่นเหล็กรับแรงเฉือนของรอยต่อชิ้นส่วนสะพานรูปกล่องคอนกรีตสำเร็จรูป

Study of Shear strength of Shear Keys by reinforcing with Shear Reinforcement and Steel Plates at the joints of Precast Concrete Box Girder Bridge Segments

อภิสิทธิ์ มุคุระ[1] และ ทรงพล จารุวิศิษฏ์[2,*]

[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)
[2] อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)
**Corresponding author; E-mail address: fengspc@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

สลักรับแรงเฉือนตรงบริเวณรอยต่อชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปรูปกล่องถือเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างที่รับแรงเฉือนและเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดการวิบัติของโครงสร้าง โดยรูปแบบของการวิบัติจะเกิดในลักษณะแบบทันทีทันใด ดังนั้นสลักที่ดีจะต้องมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงเฉือนที่กระทำได้เป็นอย่างดี อีกทั้งต้องมีอายุการใช้งานที่คงทนยาวนาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของรอยต่อชิ้นส่วนสะพานรูปกล่อง ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยการจำลองส่วนเอวของสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีสลักรับแรงเฉือนหลายสลัก โดยจะทำการศึกษารูปแบบของสลักรับแรงเฉือน 3 รูปแบบ คือ สลักรับแรงเฉือนคอนกรีตทั่วไป สลักรับแรงเฉือนเสริมเหล็กรับแรงเฉือน และสลักรับแรงเฉือนเสริมแผ่นเหล็กที่มีเหล็ก dowel รับแรงเฉือน โดยแต่ละรูปแบบจะประกอบไปด้วยสลักที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ดังนี้ รูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปสามเหลี่ยม และ รูปครึ่งวงกลม จากการทดสอบพบว่าสลักรับแรงเฉือนเสริมแผ่นเหล็กที่มี dowel รับแรงเฉือนให้กำลังรับแรงเฉือนได้สูงที่สุด รองลงมาคือสลักเสริมเหล็กรับแรงเฉือนและสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตทั่วไปตามลำดับ นอกจากนี้รูปทรงเรขาคณิตของสลักมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน โดยรูปครึ่งวงกลมจะให้กำลังสูงสุดรองลงมา คือรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ

คำสำคัญ: สลักรับแรงเฉือน, กำลังรับแรงเฉือน, รอยต่อแบบแห้ง, สะพานคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

Shear keys at the joints of precast box girder bridges are critical components because they are subjected to shear forces and are potential points of structural failure. The failure mode is typically sudden. Therefore, an effective shear key must be strong and durable against shear forces and have a long service life. This research aims to enhance the shear capacity of joints in box girder bridges by doing experiments of the simulated web section of precast concrete bridges with multiple shear keys. Three types of shear keys were examined: standard concrete shear keys, reinforced shear keys with additional shear reinforcement, and steel plate-reinforced shear keys with dowel bars. Each type consists of different geometric shapes: trapezoidal, triangular, and semi-circular. From test results, the steel plate-reinforced shear keys with dowel bars provided the highest shear capacity, followed by reinforced shear keys with additional shear reinforcement, and standard concrete shear keys, respectively. Additionally, the geometry of the shear keys also influenced the shear capacity, with the semi-circular shape providing the highest strength, followed by the triangular and trapezoidal shapes, respectively.

Keywords: Shear keys, Shear strength, Dry joint, Segmental bridges.

1. คำนำ

ในปัจจุบันภาครัฐได้ลงทุนในโครงการโครงสร้างพื้นฐานเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะสะพานและทางรถไฟฟ้ายกระดับเพื่อทำให้การคมนาคมการขนส่งนั้นสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเพื่อเป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจของประเทศ และนอกเหนือจากโครงการที่มีในปัจจุบันทางภาครัฐยังมีแผนที่จะก่อสร้างโครงการต่าง ๆ อีกมากมายในอนาคต ซึ่งสะพานยกระดับและทางวิ่งรถไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกล่อง (Segments Box Girder) โดยชิ้นส่วนจะถูกผลิตจากโรงงานและขนส่งมาติดตั้งหน้างาน ซึ่งในการก่อสร้างสะพานในรูปแบบนี้จะช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาการก่อสร้างให้น้อยลง ส่งผลให้ลดจำนวนแรงงานในการก่อสร้างที่หน้างาน ลดปัญหาการจราจรเนื่องจากการก่อสร้างสำหรับพื้นที่ในตัวเมือง อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างได้ดีกว่าแบบหล่อในที่

สำหรับชิ้นส่วนสะพานรูปกล่องคอนกรีตสำเร็จรูปที่ถูกนำมาติดตั้งหรือประกอบกันที่หน้างานโดยยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันด้วยระบบการดึงลวดอัดแรง ในรูปแบบการก่อสร้างนี้บริเวณรอยต่อชิ้นส่วนถือเป็นบริเวณที่มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นบริเวณที่มาประกบกันของชิ้นส่วนสะพานซึ่งเป็นบริเวณที่ความยาวของสะพานสูญเสียความต่อเนื่อง แรงที่ถ่ายลงในจุดรอยต่อดังกล่าวอาจทำให้เกิดวิบัติแบบเฉือนเลื่อน (Sliding Failure Mode) ทำให้ชิ้นส่วนสะพานหลุดออกจากกันในแนวขนานกับระนาบของรอยต่อและเป็นการวิบัติของโครงสร้างแบบฉับพลันซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่อันตรายเป็นอย่างมากในทางวิศวกรรม ซึ่งรอยต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวจะมีสลักรับแรงเฉือน (Shear Key) เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่ช่วยป้องกันการหลุดออกจากกันจากการไถล

ของชิ้นส่วนสะพาน ดังนั้นสลักรับแรงเฉือน (Shear Key) ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อโครงสร้างสะพานเพราะเป็นส่วนของโครงสร้างที่รับแรงเฉือนบริเวณดังกล่าวและเป็นส่วนที่ทำให้โครงสร้างแต่ละส่วนยึดเกาะกันอยู่ได้โดยไม่ร่วงหล่นลงมา

สลักรับแรงเฉือนที่ใช้ก่อสร้างในปัจจุบันนั้นจะใช้รูปแบบสลักคอนกรีตล้วนรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ไม่มีการเสริมเหล็กบริเวณสลัก โดยสลักจะพึ่งพาแรงกัดทางกล (mechanical interlock) ระหว่างรูปร่างของสลักกับเนื้อคอนกรีตขึ้นตัวอย่างด้านข้าง เพื่อถ่ายแรงเฉือน ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่พยายามศึกษาความสัมพันธ์ของรูปทรงเรขาคณิตของสลักกับกำลังรับแรงเฉือนของสลักแต่ละรูปทรง ผลการทดสอบจากหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ารูปทรงของสลักที่แตกต่างกันให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการหากำลังรับแรงเฉือนของสลักโดยรูปทรงของสลัก และเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนโดยการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตหรือเพิ่มแรงอัดด้านข้าง Prestressing Force รวมถึงการใส่วัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น Steel Fiber เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบสลักรับแรงเฉือนที่เพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนได้ดียิ่งขึ้น โดยรอยต่อในการศึกษานี้จะเป็นรอยต่อแบบแห้งซึ่งประกอบไปด้วยรูปแบบสลัก 3 รูปแบบ คือ 1) สลักรับแรงเฉือนคอนกรีตแบบทั่วไปที่เป็นสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปสามเหลี่ยม และครึ่งวงกลม 2) สลักรับแรงเฉือนใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปสามเหลี่ยม และครึ่งวงกลม 3) สลักรับแรงเฉือนเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มิลิเมตรและเสริมเหล็ก dowel รับแรงเฉือนเป็นสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และ รูปสามเหลี่ยม ตัวอย่างทดสอบใช้ข้อต่อแบบ 3 ชิ้น และอัดแรงด้วย Prestressing Force ผลการศึกษาที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO และการศึกษาของงานวิจัยอื่น ๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบการก่อสร้าง

การก่อสร้างงานสะพานในปัจจุบันจะมีรูปแบบการก่อสร้างด้วยกัน 2 รูปแบบหลักๆ คือ การก่อสร้างแบบหล่อในที่ (Cast-in-Place) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน โดยมีขั้นตอนในการก่อสร้างคือผูกเหล็กเข้าแบบและเทคอนกรีตในตำแหน่งของโครงสร้างนั้นเลยที่หน้างาน การก่อสร้างในลักษณะนี้นิยมใช้ทั้งในงานโครงสร้างอาคารและสะพานบางโครงการ ข้อดีของการก่อสร้างรูปแบบนี้คือ ก่อสร้างได้ง่าย มีความยืดหยุ่นในการออกแบบและแก้ไขแบบ เหมาะกับพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในการขนส่ง ข้อเสียในการก่อสร้างรูปแบบนี้คือ ใช้ระยะเวลาและจำนวนแรงงานในการก่อสร้างค่อนข้างมากรวมถึงข้อจำกัดเรื่องสภาพอากาศสำหรับการทำงาน การก่อสร้างที่นิยมกันอีกรูปแบบคือ การก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast) การก่อสร้างในรูปแบบนี้คือการหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างที่โรงงานแล้วขนส่งมาติดตั้งที่หน้างาน ข้อดีของการก่อสร้างในรูปแบบนี้คือ ลดระยะเวลาและแรงงานในการก่อสร้าง สามารถควบคุมคุณภาพชิ้นงานได้ง่ายกว่า ข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง เหมาะกับงานที่มีรูปแบบโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่เป็นรูปแบบเดียวกันจำนวนมาก เช่น งานสะพานทางยกระดับหรือรถไฟฟ้า งานอาคารประเภทคอนโดมิเนียม โครงการหมู่บ้านจัดสรร

2.2 วิธีการหล่อชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป

2.2.1 วิธี Short-Line

เป็นวิธีการหล่อแบบมี Match Casting คือในการผลิตแบบหล่อที่ใช้ในการผลิตจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นแบบ formwork และส่วนที่สองจะเป็น Match Casting ที่เป็นชิ้นส่วนสะพานที่หล่อมาก่อนหน้านี้มาเป็นแบบด้านหลัง ตามรูปที่ 1 ในการหล่อในวิธีนี้จะทำการหล่อตัวต้นแบบมาก่อนหนึ่งตัว หลังจากนั้นจะขยับที่ตัวต้นแบบที่หล่อมาด้านหลังเพื่อมาเป็นแบบหล่อตัวต่อไปซึ่งเรียกว่า Match Casting เช่นในสะพานหนึ่งช่วงประกอบไปด้วยชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป 11 ตัว ซึ่งจะทำการหล่อตัวที่หนึ่งเป็นตัวแรก หลังจากคอนกรีตได้อายุการใช้งานก็ขยับคอนกรีตตัวที่หนึ่งออกมาเป็นแบบหล่อเพื่อหล่อตัวที่สอง เมื่อคอนกรีตของตัวที่สองได้อายุการใช้งานก็จะทำการยกชิ้นงานตัวที่หนึ่งออกไปเก็บในโซนสต๊อกแล้วขยับชิ้นส่วนตัวที่สองออกมาเป็นแบบหล่อเพื่อหล่อในตัวที่สาม ซึ่งในการหล่อจะทำในลักษณะนี้จนครบตามจำนวนชิ้นส่วนในหนึ่งช่วง

2.2.2 วิธีหล่อแบบ Long-Line

เป็นวิธีที่คล้ายกับการหล่อแบบ Short-Line ซึ่งแบบหล่อจะมีพื้นหล่อ (Soffit) ที่ยาวตามไลน์ของเส้นทางการหล่อ และมีแบบข้างที่สามารถขยับหรือเลื่อนตามชิ้นงานที่ต้องการจะหล่อได้ เมื่อหล่อชิ้นงานตัวแรกเสร็จแบบหล่อด้านข้างจะเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่จะหล่อตัวถัดไปและทำการหล่อตัวถัดไปได้ ข้อดีของการหล่อในลักษณะนี้คือชิ้นงานที่หล่อไม่จำเป็นที่จะต้องยกออกหรือขยับทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องของความแข็งแรงของอายุคอนกรีต ข้อเสียก็คือต้องใช้พื้นที่ในการหล่อมากพอสมควร อีกทั้งค่าใช้จ่ายในเรื่องของแบบหล่อที่สูงกว่าหล่อแบบ Short-Line ดังนั้นในปัจจุบันวิธีนี้ไม่ได้เป็นที่นิยม

2.3 ชนิดของรอยต่อชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตสำเร็จรูป

2.3.1 รอยต่อแบบเปียก

รอยต่อแบบเปียก (wet joint) เป็นรอยต่อที่ต้องใช้วัสดุในการเชื่อมประสานระหว่างชิ้นงานเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจใช้ epoxy ทาตรงบริเวณรอยต่อหรือใช้มอร์ตาซีเมนต์ grout ตรงรอยต่อ การใช้รอยต่อแบบเปียกในการเชื่อมประสานจะทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกันได้แน่นมากยิ่งขึ้น สามารถรับแรงได้ดีกว่ารอยต่อแบบแห้ง แต่การใช้รอยต่อแบบเปียกอาจต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆด้าน เช่น ลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเปียกจะวิบัติในลักษณะเปราะ รวมถึงรอยต่อแบบเปียกยังมีข้อจำกัดในเรื่องสภาพแวดล้อม ถ้าในช่วงขณะฝนตกก็จะไม่สามารถทำงานได้ อีกทั้งการใช้รอยต่อแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น ต้องใช้ระยะเวลาและจำนวนคนในการทำงานมากยิ่งขึ้น

2.3.2 รอยต่อแบบแห้ง

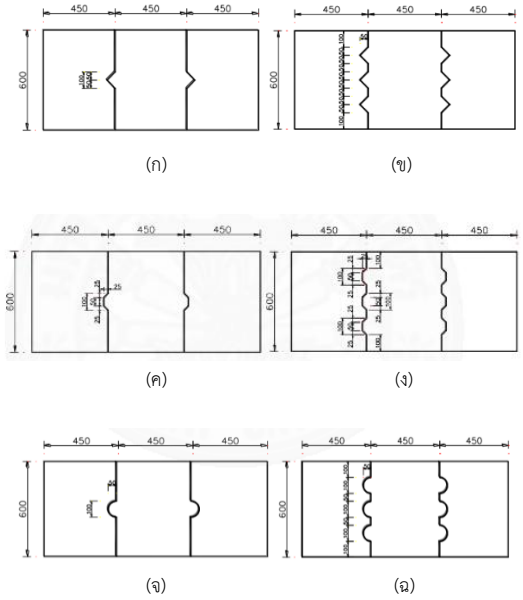
รอยต่อแบบแห้ง (dry joint) เป็นรอยต่อที่ไม่มีวัสดุเชื่อมประสานหรือ epoxy ทาตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งรอยต่อแบบนี้มีข้อดีคือ ลดค่าใช้จ่ายและจำนวนแรงงานลงได้ อีกทั้งสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องรอสภาพอากาศที่เหมาะสม รอยต่อแบบแห้งสามารถยึดชิ้นงานให้ติดกันโดยไม่ให้ร่วงหล่นได้โดยการขัดกันของสลักรับแรงเฉือน

2.4 สลักรับแรงเฉือน

สลักรับแรงเฉือน (shear keys) อยู่ตรงบริเวณรอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ทำหน้าที่เป็นแนวในการต่อชิ้นงานระหว่างสองชิ้นให้เข้ากันพอดี อีกทั้งหน้าที่หลักของสลักรับแรงเฉือนคือการรับแรงเฉือนในแนวดิ่งและกระจายแรงระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันการไถลของชิ้นส่วน ในปัจจุบันรูปแบบสลักรับแรงเฉือนที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ในอดีตรูปแบบสลักรับแรงเฉือนจะใช้เป็นรูปแบบสลักเดี่ยว (single shear key) ขนาดใหญ่ แต่ปัจจุบันจะใช้สลักรับแรงเฉือนแบบหลายๆสลัก (multiple shear key) ขนาดสลักเล็กลง ซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสและช่วยกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอ

2.5 รูปทรงเรขาคณิตกับการรับแรงเฉือนของสลักรับแรงเฉือน

อนุรักษ์ สังข์คร [1] ได้ทำการศึกษาสลักรับแรงเฉือน 3 รูปแบบ โดยรอยต่อเป็นแบบแห้ง ซึ่งประกอบไปด้วยสลักรับแรงเฉือนรูปสามเหลี่ยม รูปครึ่งวงกลม รูปสี่เหลี่ยมคางหมูมุม 45 องศา ซึ่งแต่ละรูปแบบจะถูกแยกย่อยเป็น 2 แบบ คือ สลักเดียว และสลักแบบกลุ่ม (3 keys) และนำตัวอย่างมาประกอบเข้าคู่กันของแต่ละตัวอย่างด้วยการอัดแรง โดยใช้แรงอัดจาก Prestressing Tendon ขนาดของความเค้นจากการอัดแรงที่ใช้มี 2 ชุดคือ 0.833-MPa และ 1.267-MPa นำมาทดสอบเพื่อหากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด จากการทดสอบพบว่า สำหรับ Shear Key สลักเดี่ยวและสลักกลุ่มรูปแบบครึ่งวงกลมให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดตามด้วยสลักรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ

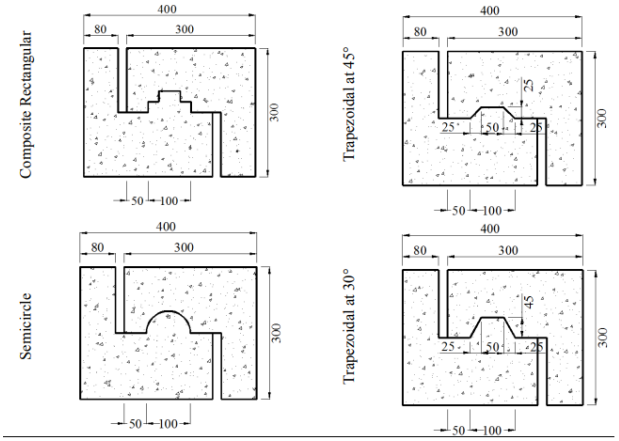


รูปที่ 1 รูปแบบสลักรับแรงเฉือนแบบเดี่ยวและแบบกลุ่มของสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สลักรูปสามเหลี่ยม และสลักรูปครึ่งวงกลม

Koseki, K. และ Breen, J. E. [2] ได้ทำการศึกษารูปแบบสลักรับแรงเฉือนในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงเฉือนสัมพัทธ์ของแต่ละรูปแบบรวมถึงลักษณะการเลื่อนไถลและการวิบัติ โดยทำการทดสอบตัวอย่างรอยต่อแบบแห้งและแบบเปียก (ทา epoxy) ประกอบสองชิ้นเข้าด้วยกัน (Two Segment) โดยรูปแบบที่ศึกษาประกอบไปด้วย แบบ No Key (ไม่มีสลัก), Single Large Key (ใช้สลักเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมคางหมูขนาดใหญ่) และ Multiple Lug Key (สลักกลุ่มรูปสี่เหลี่ยมคางหมูขนาดเล็ก) ผลทดสอบทั้ง Single Shear และ Double Shear แสดงให้เห็นว่าในกรณีของข้อต่อแบบแห้งจะให้ผลการเคลื่อนตัวและความสามารถในการรับแรงที่ให้ค่าแตกต่างกัน แต่ในกรณีของข้อต่อแบบเปียกที่ทา epoxy ทุกชิ้นตัวอย่างไม่มีการลื่นไถลของสลักรับแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญจนถึงค่าแรงของการวิบัติ อีกทั้งยังให้กำลังความแข็งแรงสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน

Yu Zou, Dong Xu. [3] ได้ศึกษาและทำการทดลองตัวอย่างรูปแบบสลักรับแรงเฉือน 4 แบบที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย แบบเรียบ สลักรับแรงเฉือนคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (concrete key) สลักแบบปุ่มเหล็ก (steel shear key) สลักแบบสอดใส่เหล็กเสริม (inserted reinforcement key) เพื่อศึกษาการพัฒนาของรอยแตกร้าว รูปแบบการวิบัติจากแรงเฉือน ความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงสุด ซึ่งผู้ทำการศึกษาได้ทำการแบ่งตัวอย่างตามรูปแบบของสลักรับแรงเฉือน โดยแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ 1.ไม่มีสลักรับแรงเฉือน 2. สลักรับแรงเฉือนคอนกรีตหนึ่งสลักและสองสลัก 3.สลักรับแรงเฉือนแบบปุ่มเหล็กหนึ่งปุ่มและสองปุ่ม 4.สลักรับแรงเฉือนใส่เหล็กเสริมคอนกรีต นำตัวอย่างแต่ละรูปแบบเข้าทดสอบโดยการทดสอบแบบยึดประกบกันสองชิ้นโดยใช้การดึงลวดแบบ external prestressing แล้วทำการกดชิ้นตัวอย่างทดสอบตรงรอยต่อจนเกิดการวิบัติของข้อต่อสลักรับแรงเฉือน จากการนำตัวอย่างแต่ละประเภทไปทดสอบกับเครื่องทดสอบโดยการให้แรงกดเพิ่มขึ้นจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ เมื่อนำผลการทดสอบตัวอย่างแต่ละตัวมาเปรียบเทียบ พบว่าสลักรับแรงเฉือนแบบปุ่มเหล็กสามารถรับแรงได้มากที่สุดและป้องกันการเลื่อนไถลของชิ้นตัวอย่างได้ดีที่สุด รองลงมาคือสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมคางหมู นอกจากนี้แล้วมีการเกิดความเค้นอัดเฉพาะจุดที่สลักแบบสอดใส่เหล็กเสริมทำให้เกิดแรงเฉือนจำนวนมากและเกิดการขาดของเหล็กเสริม ซึ่งไม่เหมาะในการนำมาเป็นสลักรับรงเฉือน

Ibrahim, I. S., et al. [4] ได้ทำการศึกษาลักษณะของสลักรับแรงเฉือนที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันเพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงสุด รวมถึงลักษณะรูปแบบการแตกร้าวของรอยต่อสลักและโหมดของการวิบัติ โดยลักษณะรูปแบบสลักที่ทำการศึกษานั้นประกอบไปด้วย รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมเชิงประกอบ รูปครึ่งวงกลม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะแบ่งเป็นมุม 30 45 60 องศา โดยตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนด้วยวิธีผลักออก (Push-Off Method) และนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 2 สลักแต่ละรูปแบบในการศึกษาของ Ibrahim [4]

จากทดสอบพบว่าสลักรับแรงเฉือนแบบครึ่งวงกลมมีความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 62.9 kN ส่วนกรณีสลักรับแรงเฉือนรูปสี่เหลี่ยมคางหมู พบว่า มุมของรูปคางหมูมีความสามารถทำให้ได้โหมดของการวิบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือเมื่อมุมของสลักรับแรงเฉือนประมาณ 45 องศา ความยาวของรอยแตกแบบแรงเฉือน (Shear Crack) มีค่าลดลง และผลการศึกษาสรุปว่า สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ที่มีมุม 30 และ 45 องศาและรวมถึง รูปสี่เหลี่ยมเชิงประกอบ (Composite Rectangular) มีโหมดของการวิบัติ ที่ดีกว่า แบบครึ่งวงกลม

2.6 ข้อกำหนดมาตรฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน AASHTO 1999 ได้แนะนำสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปดังสมการที่ (1)

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c}(1 + 0.205\sigma_n) + (0.6A_{sm}\sigma_n) \qquad (1)$$

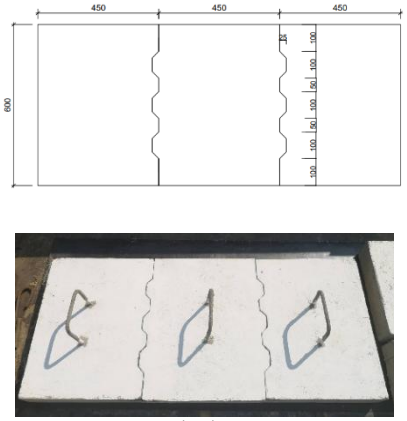
โดยที่ V_j = กำลังรับแรงเฉือน (MN)
A_k = พื้นที่ฐานทั้งหมดของสลักรับแรงเฉือน (m^2)
A_{sm} = พื้นที่สัมผัสในแนวดิ่งนอกเหนือจากสลักรับแรงเฉือน (m^2)
f'_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)
σ_n = ความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

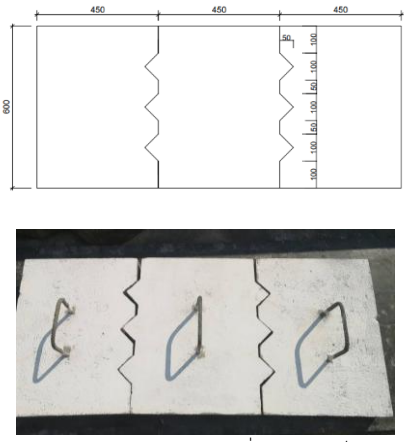
3.1 รูปแบบตัวอย่างทดสอบของสลักรับแรงเฉือน

ในการศึกษานี้จะประกอบด้วยรูปแบบสลักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 3 รูปแบบ คือ สลักที่เป็นคอนกรีตล้วน สลักเสริมเหล็กรับแรงเฉือน และสลักเสริมแผ่นเหล็กรับแรงเฉือน ซึ่งแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปสามเหลี่ยม และรูปครึ่งวงกลม เว้นแต่รูปแบบสลักเสริมแผ่นเหล็กรับแรงเฉือนที่มีเฉพาะสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและสามเหลี่ยม โดยแต่ละตัวอย่างทดสอบจะประกอบด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 3 แผ่น ที่ถูกอัดแรงให้ชิ้นตัวอย่างติดกันด้วย Prestressing Tendon ขนาดของชิ้นตัวอย่างแต่ละแผ่นจะมีขนาดเท่ากันคือ กว้าง 450 มิลลิเมตร สูง 600 มิลลิเมตร และหนา 100 มิลลิเมตร กำลังอัดคอนกรีตที่ได้ออกแบบไว้ 32 MPa และใช้เหล็กข้ออ้อยเกรด SD40 และเหล็กกลมเกรด SR24

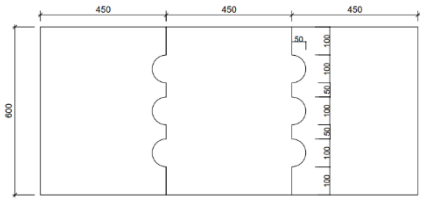
3.1.1 รูปแบบตัวอย่างทดสอบของสลักรับแรงเฉือนแบบสลักคอนกรีตล้วน

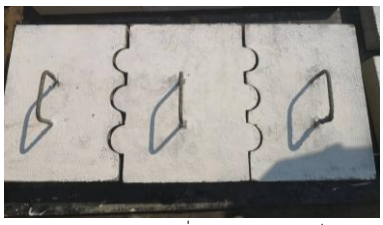


รูปที่ 3 Multiple Shear Key รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



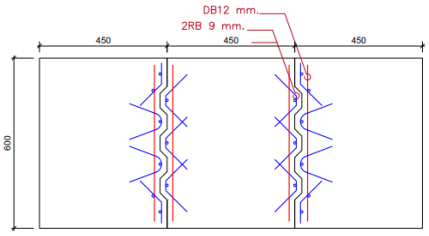
รูปที่ 4 Multiple Shear Key รูปสามเหลี่ยม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



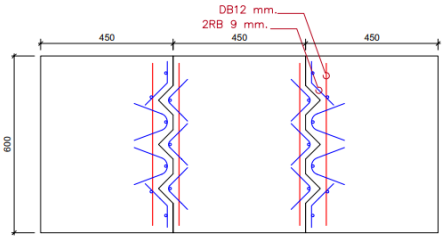


รูปที่ 5 Multiple Shear Key รูปครึ่งวงกลม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

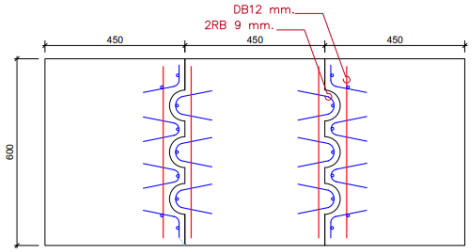
3.1.2 รูปแบบตัวอย่างทดสอบของสลักรับแรงเฉือนแบบสลักใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน



รูปที่ 6 Multiple Shear Key ใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

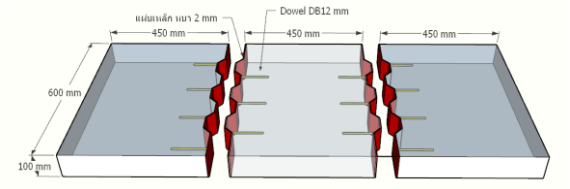


รูปที่ 7 Multiple Shear Key ใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนรูปสามเหลี่ยม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

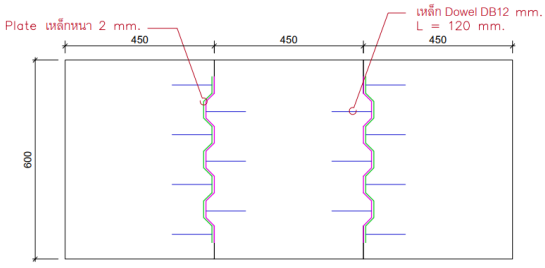


รูปที่ 8 Multiple Shear Key ใส่เหล็กเสริมรับแรงเฉือนรูปทรงกลม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

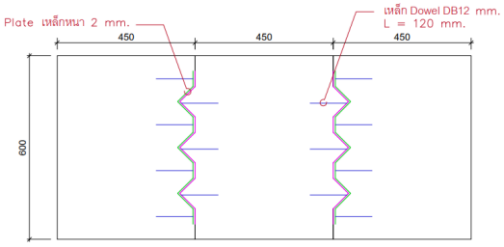
3.1.3 รูปแบบตัวอย่างทดสอบของสลักรับแรงเฉือนแบบสลักเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และ Dowel



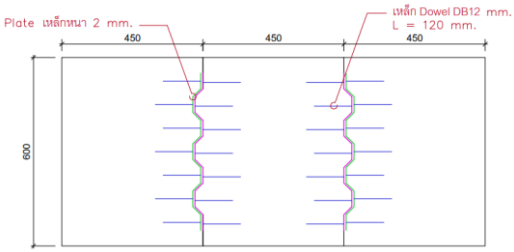
รูปที่ 9 ตัวอย่างรูปแบบ Multiple Shear Key สลักเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และเสริม Dowel



รูปที่ 10 Multiple Shear Key สลักเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และเสริม Dowel ช่องเว้นช่อง สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 11 Multiple Shear Key สลักเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และเสริม Dowel ช่องเว้นช่อง สลักรูปสามเหลี่ยม (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



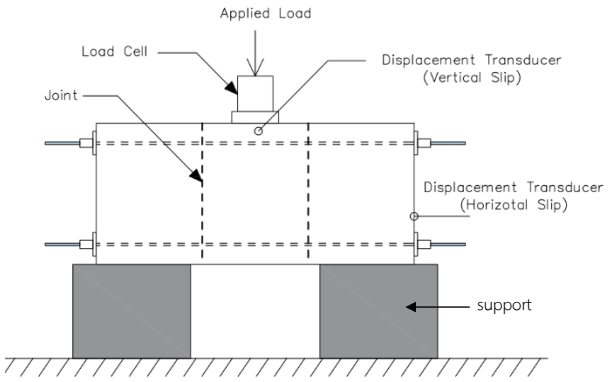
รูปที่ 12 Multiple Shear Key สลักเสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และเสริม Dowel ทุกช่อง สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ตารางที่ 1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Test samples	Type of Joint	Shape of Shear Keys	Name of Specimen	Stress	Number of Specimen
Normal	Multiple Key	Trapezoid	NZ-1	1.26 MPa	1
			NZ-2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Triangle	NT-1	1.26 MPa	1
			NT-2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Semi-circle	NC-1	1.26 MPa	1
			NC-2	1.26 MPa	1
Shear reinforcement	Multiple Key	Trapezoid	RZ-1	1.26 MPa	1
			RZ-2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Triangle	RT-1	1.26 MPa	1
			RT-2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Semi-circle	RC-1	1.26 MPa	1
			RC-2	1.26 MPa	1
Steel plate and dowel	Multiple Key	Trapezoid	SZ -1/2	1.26 MPa	1
			SZ -2/2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Trapezoid	SZ-1	1.26 MPa	1
			SZ-2	1.26 MPa	1
	Multiple Key	Triangle	ST-1/2	1.26 MPa	1
			ST-2/2	1.26 MPa	1

3.2 วิธีการดำเนินการทดสอบ

หล่อชิ้นตัวอย่างแต่ละรูปแบบ รูปแบบละ 2 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะประกอบไปด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 3 ชิ้น แต่ละชิ้นจะมีขนาด กว้าง 450 มม. สูง 600 มม. และหนา 100 มม. แล้วนำตัวอย่างทดสอบ 3 ชิ้นของแต่ละรูปแบบประกอบกันโดยใช้แรงอัดจาก Prestressing Tendon ยึดชิ้นตัวอย่างเข้าหากัน โดยใช้แรงขนาด 1.26 MPa. นำตัวอย่างทดสอบเข้าเครื่องทดสอบและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ในการดำเนินการทดสอบจะเพิ่มแรงกระทำที่กึ่งกลางของชิ้นงานจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติจนไม่สามารถทดสอบต่อได้ นำผลที่ได้ของแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงสุดของสลักแต่ละรูปแบบ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการเลื่อนไถลในแนวดิ่งของรอยต่อ การวิเคราะห์โหมดของการวิบัติ และเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น ๆ รวมถึงนำผลแรงเฉือนสูงสุดเปรียบเทียบกับสมการตามมาตรฐานอื่น ๆ



รูปที่ 13 รูปแบบติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 14 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของสลักรับแรงเฉือนแต่ละรูปแบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการรับเฉือนของสลักแต่ละรูปแบบโดยการอัดแรงด้านข้าง 1.267 MPa แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบโดยการให้แรงกดจนชิ้นงานวิบัติ สำหรับสลักรับแรงเฉือนทั่วไปที่เป็นสลักคอนกรีตจากผลการทดสอบพบว่าสลักรับแรงเฉือนรูปครึ่งวงกลมให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดอยู่ที่ 240 kN และ 248 kN ตามลำดับ ใกล้เคียงกับสลักรูปสามเหลี่ยมให้กำลังรับแรงเฉือนอยู่ที่ 246 kN และสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูให้กำลังรับแรงเฉือนน้อยที่สุดอยู่ที่ 209 kN และ 232 kN ตามลำดับ

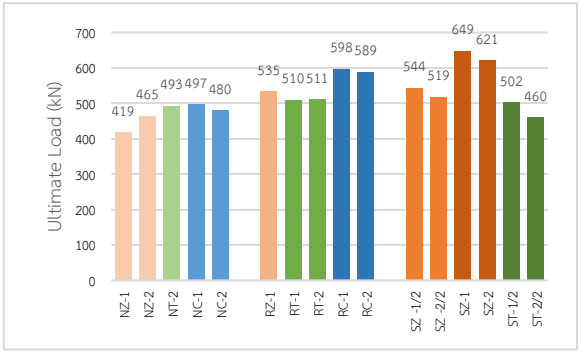
สำหรับสลับรับแรงเฉือนที่ทำการใส่เหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของสลักตรงรอยต่อชิ้นส่วนตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าสลักรูปครึ่งวงกลมที่เสริมเหล็กเสริมให้กำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุดอยู่ที่ 299 kN และ 294 kN ตามลำดับ ขณะที่สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมเหล็กเสริมกลับให้กำลังรับแรงเฉือนมากกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมที่เสริมเหล็กซึ่งอยู่ที่ 267 kN และสลักรูปสามเหลี่ยมอยู่ที่ 255 kN และ 256 kN

และสำหรับสลักรับแรงเฉือนที่เสริมแผ่นเหล็กหนา 2 มม. และเสริม Dowel เหล็ก DB12 ยาว 12 ซม. ที่มีความแตกต่างกันสามรูปแบบคือ สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริม Dowel แบบตาเว้นตากับเสริมทุกตา และสลักรูปสามเหลี่ยมที่เสริม Dowel แบบตาเว้นตา จากการทดสอบพบว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและเสริม Dowel ทุกตาให้กำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุดอยู่ที่ 324 kN และ 311 kN ตามลำดับ ขณะที่สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริม Dowel แบบตาเว้นตา มีกำลังรับแรงเฉือนอยู่ที่ 272 kN และ 259 kN ให้กำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมที่เสริม Dowel แบบตาเว้นตา ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงเฉือนอยู่ที่ 251 kN และ 230 kN ตามลำดับ

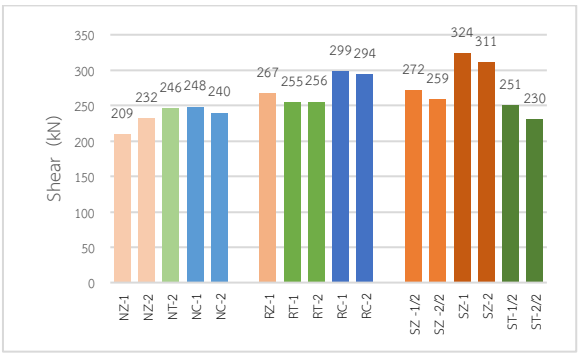
ตารางที่ 2 ความสามารถในการรับเฉือนของแต่ละชิ้นตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ

Test samples	Type of Joint	Shape of Shear Keys	Name of Specimen	Ultimate Load (kN)	Shear Force (kN)
Normal	Multiple Key	Trapezoid	NZ-1	419	209
			NZ-2	465	232
	Multiple Key	Triangle	NT-1	-	-
			NT-2	493	246
	Multiple Key	Semi-circle	NC-1	497	248
			NC-2	480	240
Shear reinforcement	Multiple Key	Trapezoid	RZ-1	535	267
			RZ-2	-	-
	Multiple Key	Triangle	RT-1	510	255
			RT-2	511	256
	Multiple Key	Semi-circle	RC-1	598	299
			RC-2	589	294
Steel plate and dowel	Multiple Key	Trapezoid	SZ -1/2	544	272
			SZ -2/2	519	259
	Multiple Key	Trapezoid	SZ-1	649	324
			SZ-2	621	311
	Multiple Key	Triangle	ST-1/2	502	251
			ST-2/2	460	230

หมายเหตุ: ตัวอย่าง NT-1 และ RZ-2 ไม่มีผลทดสอบเนื่องจากเกิดความเสียหายจากกระบวนการอัดแรง Prestressing



รูปที่ 15 แรงกระทำสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 16 กำลังรับแรงเฉือนของแต่ละตัวอย่าง

จากการทดสอบเมื่อนำผลการทดสอบรับแรงเฉือนของสลักแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบจะให้เห็นได้ว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและเสริม Dowel ทุกตานั้นให้กำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุดซึ่งมากกว่าสลักคอนกรีตทั่วไปรูปสี่เหลี่ยมคางหมูถึง 1.4 เท่า และมากกว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมเหล็กเสริม 1.2 เท่า อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือสลักที่เสริมเหล็กเสริมรูปครึ่งวงกลมนั้นสามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่าสลักที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel แบบตาเว้นตารูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปสามเหลี่ยม

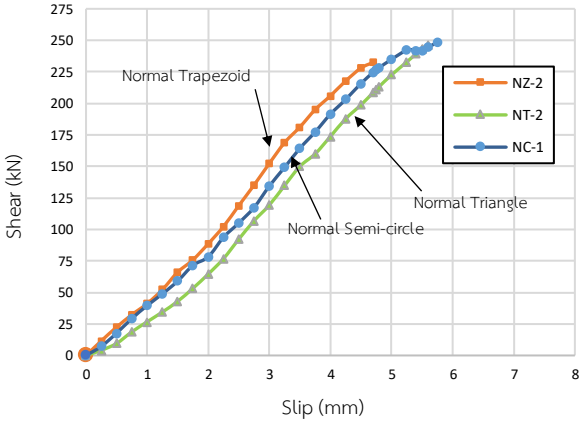
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการเลื่อนไถลในแนวดิ่งของรอยต่อ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่กระทำกับระยะการเลื่อนไถลของตัวอย่างทดสอบนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อชิ้นตัวอย่างรวมถึงบ่งบอกถึงลักษณะความเหนียวของสลักแต่ละรูปแบบ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่กระทำกับระยะการเลื่อนไถลของสลักคอนกรีตแบบทั่วไปดังแสดงใน รูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ารูปแบบความชันของกราฟมีลักษณะที่คล้ายกันเกือบเป็นเส้นตรง โดยที่สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูรับแรงเฉือนได้น้อยกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมและสลักรูปครึ่งวงกลม และลักษณะกราฟของสี่เหลี่ยมคางหมูมีความชันกว่าและมีค่าการเลื่อนไถลน้อยกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมและสลักรูปครึ่งวงกลม นอกจากสลักรูปครึ่งวงกลมจะให้กำลังแรงเฉือนสูงกว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและสลักรูปสามเหลี่ยมแล้วยังมีค่าระยะการเลื่อนไถลที่สูงกว่าด้วย

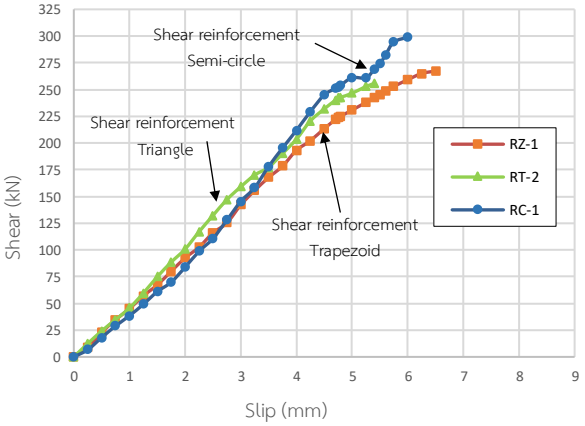
เมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่กระทำกับระยะการเลื่อนไถลของสลักที่เสริมเหล็กเสริมดังแสดงใน รูปที่ 18 จะเห็นได้ว่ากราฟของสลักที่เสริมเหล็กเสริมรูปรูปครึ่งวงกลมสามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่าและมีความชันของกราฟมากกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนสลักที่เสริมเหล็กเสริมรูปสามเหลี่ยมให้ค่าการเลื่อนไถลน้อยกว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและสลักรูปครึ่งวงกลม

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่กระทำกับระยะการเลื่อนไถลของสลักที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel ดังแสดงใน รูปที่ 19 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel ทุกตานั้นให้กำลังรับแรงเฉือนและมีระยะการเลื่อนไถลของรอยต่อสูงที่สุด และสลักรูปสามเหลี่ยมที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel ตาเว้นตาให้กำลังรับแรงเฉือนรวมถึงระยะการเลื่อนไถลน้อยสุด

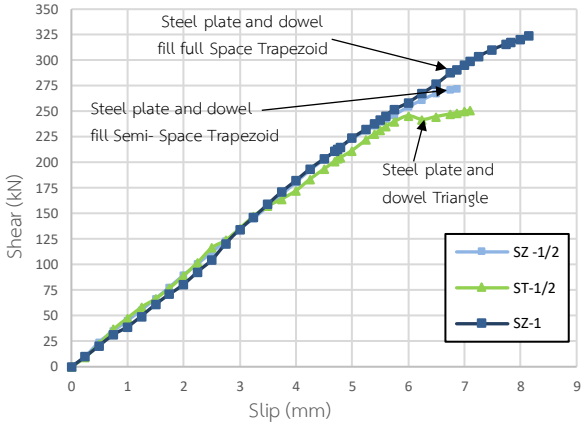
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่กระทำกับระยะการเลื่อนไถลของสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแบบคอนกรีตทั่วไปกับสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมเหล็กเสริมและสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel ดังแสดงใน รูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel แบบทุกตาจะให้กำลังแรงเฉือนและระยะการเลื่อนไถลได้สูงที่สุด ส่วนสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel แบบตาเว้นตาจะให้กำลังแรงแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกับสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่เสริมเหล็กเสริมแต่จะมีระยะการเลื่อนไถลที่มากกว่า ส่วนสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแบบคอนกรีตทั่วไปให้กำลังรับแรงเฉือนและระยะการเลื่อนไถลน้อยที่สุด



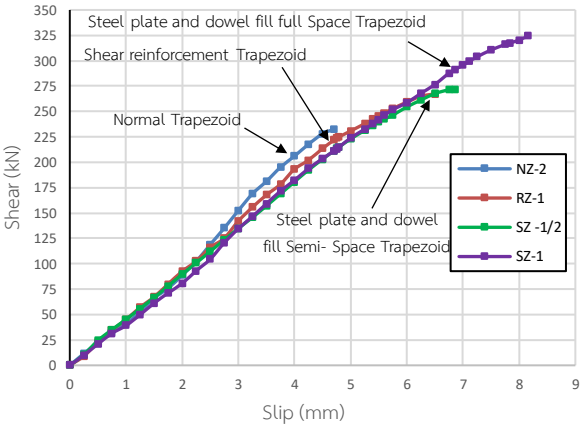
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear กับ Slip ของสลักคอนกรีตแบบทั่วไป



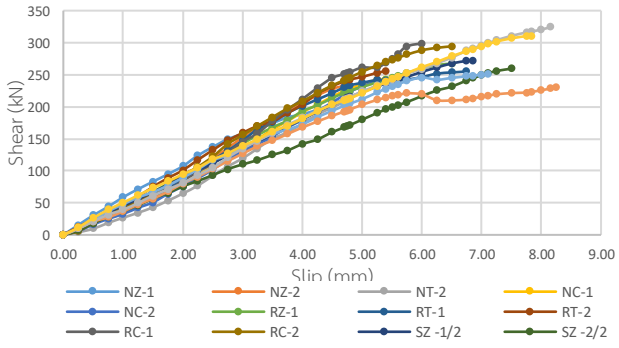
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear กับ Slip ของสลักที่เสริมเหล็กเสริม



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear กับ Slip ของสลักที่เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear กับ Slip ของสลักคอนกรีตแบบต่าง ๆ ของสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

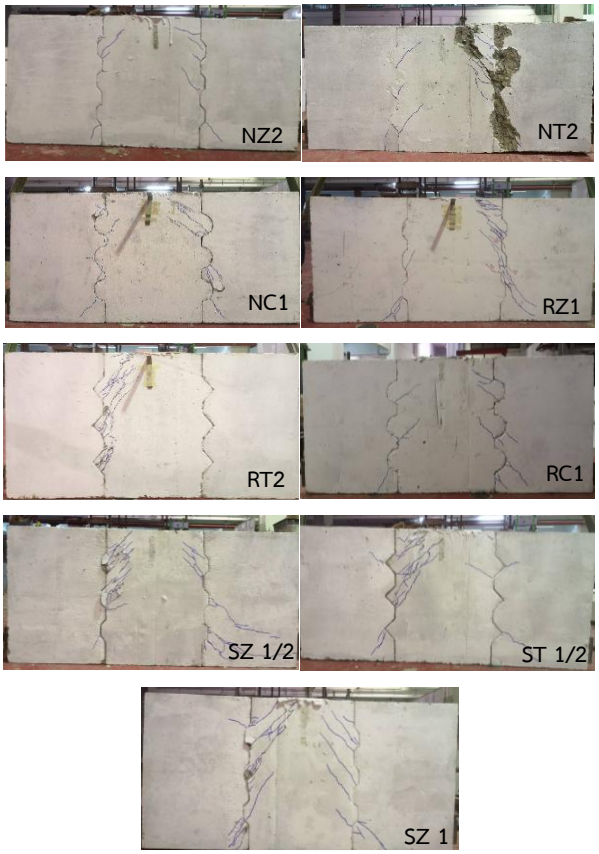


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear กับ Slip ของสลักทุกตัวอย่าง

4.3 ลักษณะและโหมดของการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน

โหมดของการวิบัติและลักษณะรอยร้าวของตัวอย่างแต่ละชิ้นแสดงไว้ในรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าลักษณะรอยร้าวของสลักแต่ละรูปแบบจะเกิดรอยร้าวในแนวทแยงทำมุม 45 องศา โดยรอยร้าวส่วนใหญ่จะเกิดที่ชิ้นกลางของตัวอย่าง ซึ่งเป็นสลักตัวผู้ โดยในขณะทดสอบร้อยร้าวจะเริ่มก่อตัวเล็กที่บริเวณโคนด้านล่างของสลักและจะค่อยๆเพิ่มขนาดและความยาวของรอยร้าวในแนวทแยงเข้าหาแรงกดที่กระทำตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่าง ซึ่งโหมดของการวิบัติของตัวอย่างสลักคอนกรีตแบบทั่วไปจะเป็นแบบ Diagonal Tension Crack แต่สำหรับสลักรูปสามเหลี่ยมจะเป็นทั้งในรูปแบบ Diagonal Tension Crack และ Splitting ซึ่งลักษณะการวิบัติค่อนข้างที่จะรุนแรงกว่าสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและสลักรูปครึ่งวงกลม

สำหรับสลักที่เสริมเหล็กเสริมและเสริมแผ่นเหล็กรับแรงเฉือนจะมีลักษณะรอยร้าวแนวทแยงที่เป็นรอยร้าวขนาดใหญ่และมีรอยร้าวเล็ก ๆ ที่แตกแขนงออกมาจากรอยร้าวหลักโดยเฉพาะสำหรับสลักที่เสริมแแผ่นเหล็กและ Dowel ที่มีมากกว่าสลักรูปแบบอื่นและรูปแบบการวิบัติจะเป็นแบบ Diagonal Tension Crack และ Splitting และ สลักที่เสริมแแผ่นเหล็กและ Dowel นั้นมีการวิบัติแบบเลื่อนไถลให้ตัวได้มากกว่าสลักรูปแบบอื่น เนื่องจากเมื่ออัดแรงด้านข้างให้ชิ้นตัวอย่างยึดเข้าหากัน แรงเสียดทานของรอยต่อที่เป็นผิวแผ่นเหล็กนั้นมีความลื่นมากกว่าผิวคอนกรีต



รูปที่ 22 ลักษณะรอยร้าวของสลักที่มีค่าแรงเฉือนมากที่สุดของแต่ละรูปแบบ

4.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตฐาน

ปัจจุบันการออกแบบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการออกแบบรอยต่อชิ้นส่วนสะพานรูปกล่องหรือสลักรับแรงเฉือนในประเทศไทยนิยมใช้สมการของมาตรฐาน AASHTO งานวิจัยนี้จึงจะนำผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับสมการของมาตรฐาน AASHTO โดยแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 3

รูปแบบสลักรับแรงเฉือนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือสลักรับแรงเฉือนคอนกรีตแบบทั่วไปรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของสลักคอนกรีตแบบทั่วไปรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่ได้จากการทดสอบนั้นมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการ AASHTO สำหรับสลักที่เสริมเหล็กเสริมได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกับสมการดังกล่าว และสลักที่เสริมเหล็กเสริมรูปครึ่งวงกลม สลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่

เสริมแผ่นเหล็กและ Dowel ทุกตา ให้กำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าสมการ AASHTO

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นตัวอย่างทดสอบกับสมการมาตรฐาน AASHTO

Test samples	Shape of Shear Keys	Name of Specimen	Shear Force From Test (kN)	AASHTO (kN)
Normal	Trapezoid	NZ-1	209	268
		NZ-2	232	268
	Triangle	NT-1	-	-
		NT-2	246	268
	Semi-circle	NC-1	248	268
		NC-2	240	268
Shear reinforcement	Trapezoid	RZ-1	267	268
		RZ-2	-	-
	Triangle	RT-1	255	268
		RT-2	256	268
	Semi-circle	RC-1	299	268
		RC-2	294	268
Steel plate and dowel	Trapezoid	SZ -1/2	272	268
		SZ -2/2	259	268
	Trapezoid	SZ-1	324	268
		SZ-2	311	268
	Triangle	ST-1/2	251	268
		ST-2/2	230	268

หมายเหตุ: 1.กำลังอัดที่ใช้ในการคำนวณอยู่ที่ 42 MPa ซึ่งเป็นกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบรับแรงอัดของแท่งปูนลูกทรงกระบอกที่ 28 วัน ของชิ้นตัวอย่าง
2.สมการ AASHTO จากสมการ (1) ที่นำมาคำนวณไม่ได้พิจารณาสมการการรับแรงของเหล็กเสริม

5. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษารูปแบบสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ของแต่ละรูปแบบแสดงให้เห็นว่ารูปทรงทางเรขาคณิตของสลักรับแรงเฉือนนั้นมีผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนและรูปแบบลักษณะการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนซึ่งในสมการมาตรฐาน AASHTO ไม่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบ โดยสำหรับสลักคอนกรีตแบบทั่วไปสลักรูปครึ่งวงกลมจะให้กำลังแรงเฉือนสูงสุด รองลงมาคือสลักรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ตามลำดับ เนื่องจากสลักรูปครึ่งวงกลมมีผิวโค้งเรียบต่อเนื่องช่วยให้กระจายความเค้นเฉือนได้สม่ำเสมอกว่ารูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมแหลมมากกว่าส่งผลให้เกิดการกระจุกตัวของความเค้นเฉือนบริเวณจุดเปลี่ยนมุมมากกว่า นอกจากนี้แล้วสลักรูปครึ่งวงกลมมีผิวสัมผัสในทิศทางรับแรงเฉือนที่มากกว่าสลักรูปสามเหลี่ยมและสลักรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่งผลให้มีค่าเลื่อนไถลที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นก่อนหน้านี้เช่น ของอนุรักษ์ สังข์คร[1] และจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าการเสริมเหล็กเสริมและการเสริมแผ่นเหล็กและ Dowel จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนได้ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อสลักเริ่มเกิดรอยร้าวเหล็กเสริมจะช่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นช่วยให้เกิดการกระจายแรงเฉือนได้ดีขึ้นลดความเค้นเฉพาะจุดของสลักให้ลดลง สำหรับการเพิ่มจำนวนเหล็ก Dowel ของสลักแบบเสริมแผ่นเหล็กจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างเมื่อเสริมแผ่นเหล็กและ Dowel จะช่วยให้ลักษณะการวิบัติเป็นแบบเหนียวมากขึ้นซึ่งจะปลอดภัยมากกว่าสำหรับการนำมาใช้งานจริง

6 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ไม่สามารถที่จะประสบผลสำเร็จได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จากบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) ข้าพเจ้าขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] อนุรักษ์ สังข์คร (2559). การทดสอบหากำลังของรอยต่อชิ้นส่วนสะพานที่มีสลักรับแรงเฉือนรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ ของสะพานคอนกรีตชิ้นส่วนสำเร็จรูป. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,หน้าที่ 60-77.

[2] Koseki K., Breen J. E. (1983). Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges. Research Report 248- 1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, Tex., September 1983, pp. 1-89.

[3] Yu Zou, Dong Xu. (2022). Experimental study on shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges. Structures 39, 323–336.

[4] Ibrahim S. I., Padil H. K., Bady A. M. H., Saim A. A. and Sarbini N. N. (2014). Ultimate shear capacity and failure of shear key connection in precast concrete construction. Malaysian Journal of Civil Engineering 26(3), pp.414-430.

[5] AASHTO, (2010). Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, ed. 2.