

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษแบบแห้งสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่
เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก

นายวรพล ภัทรกรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A STUDY FOR SHEAR RESISTING BEHAVIOR OF SPECIAL DRY JOINTS FOR PRECAST
PRESTRESSED CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBER

Mr. Worapon Pattharakorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University



3972945745

CU ThesIs 5970301621 thesis / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษแบบ แห้งสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก
โดย	นายวรพล ภัทรภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิทธการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิทธการ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤดายุทธ์ ชมภูมิ่ง)

วรพล ภัทรกรรม : การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษแบบแห้ง
สำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่เสริมด้วยเส้นใยเหล็ก. (A STUDY FOR SHEAR
RESISTING BEHAVIOR OF SPECIAL DRY JOINTS FOR PRECAST PRESTRESSED
CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.วิวัฒน์ชัย
สมิทธากร

การประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้างสะพานเอื้อประโยชน์หลายอย่าง
ทั้งช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่าย สามารถควบคุมคุณภาพได้เป็นอย่างดี และการก่อสร้างทำได้ง่าย
รวดเร็ว ในอดีตชิ้นส่วนสำเร็จรูปแต่ละชิ้นส่วนจะเชื่อมต่อกันโดยใช้อิฐฟ็อกซีเป็นตัวเชื่อมประสานทำ
ให้ใด้รอยต่อที่แข็งแรง แต่ก็มีข้อเสียคือจะเป็นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการก่อสร้างให้ยุ่งยากและเสียเวลา
มากขึ้น ต่อมาจึงมีการใช้งานรอยต่อแบบแห้งขึ้น ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการก่อสร้างให้สะดวกมาก
ยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามรอยต่อแบบแห้งก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน นั่นคือ ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนแต่
ละชิ้นส่วนซึ่งมักทำเป็นสลักรับแรงเฉือน ไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างแนบสนิทพอดี โดยเฉพาะ
อย่างยิ่งรอยต่อประเภทหลายสลัก ดังนั้นการถ่ายกำลังรับแรงเฉือนจึงไม่สามารถพัฒนาได้อย่างเต็ม
ความสามารถ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งประเภท
หลายสลัก โดยการหล่อชิ้นงานเป็นรอยต่อพิเศษแบบแห้ง และทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรง
เฉือนของรอยต่อพิเศษที่ทำจากวัสดุต่างกัน ดังนี้ คอนกรีตปกติ คอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตผสมเส้น
ใยเหล็ก 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมแรงอัดด้านข้างให้มีค่าคงที่จะทำ
ใ้รอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักมีพฤติกรรมการรับเฉือนคล้ายกับรอยต่อสลักเดี่ยว รอยต่อ
พิเศษที่ทำจากคอนกรีตกำลังสูงมีค่า Normalized shear strength น้อยกว่าคอนกรีตปกติ และ
การผสมเส้นใยเหล็กในคอนกรีตจะช่วยเพิ่มค่า Normalized shear strength ให้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม
ตามกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบเกือบทุกกรณีก็ยังมีค่าน้อยกว่าสูตรคำนวณของ AASHTO
และ Rombach and Specker

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970301621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: special dry joints, precast prestressed concrete, shear key, shear resisting behavior

The application of precast concrete segments in the bridge construction provides many advantages: economy, high quality and rapid construction. In the past, precast concrete segments are connected together by wet joints using epoxy. Epoxy fills in the gaps and makes strong connection, but it takes time. Later, dry joints have been introduced which help to reduce the construction time. However, the use of dry joints has some drawbacks. The contact surface between segments or shear keys can hardly be made well fit together, especially for multiple shear keys. Consequently, the transfer of shear strength cannot be developed to its full capacity. In this study multiple-keyed dry joints are constructed as special dry joints. Shear test are conducted for sample specimens with shear keys made from different materials: normal concrete, high strength concrete, concrete mixed with 0.5% and 1% steel fiber. Results from experiments are found such that controlling the confining stress to be constant makes the special dry joints with multiple keys behave like single-key dry joints. Special dry joints made from high strength concrete have lower normalized shear strength than those made from normal concrete. Mixing steel fiber into concrete help increase the normalized shear strength. However, shear strengths of almost all of the specimens are smaller than those calculated from formulas given by AASHTO, and Rombach and Specker.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำในปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง และสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้ งานวิจัยนี้สมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรรัตน์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็น ประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤดา ยุทธ์ ชมภูมิ่ง ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบขอบพระคุณนาย สมพงษ์ ขำแจ่ม เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สละเวลาช่วยเหลือตลอดช่วง ระยะเวลาในการทดสอบ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมารดา นางวรพรรณ ภัทรภรณ์ และครอบครัวที่คอย ช่วยเหลือให้ความรัก กำลังใจ และความสนับสนุนต่อข้าพเจ้าเสมอมา และสุดท้ายขอขอบพระคุณครูบา อาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษา ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วรพล ภัทรภรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง	4
2.1.1 รอยต่อแบบเปียก.....	4
2.1.2 รอยต่อแบบแห้ง.....	5
2.1.3 สลักรับแรงเฉือน	6
2.2 การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูป	10
2.3 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อแบบราบแบบแห้งและอีพ็อกซี.....	11
2.3.1 รอยต่อแบบราบแบบแห้ง (Flat Dry Joints).....	11
2.3.2 รอยต่อแบบราบแบบอีพ็อกซี (Flat Epoxied Joints).....	12



3972945745

CD IThesis 5970301621 thesis / rev: 01082562 14:40:21 / seq: 11

2.4 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งและอีพ็อกซี	14
2.4.1 รอยต่อสลักรับรับแรงเฉือนแบบแห้ง (Keyed Dry Joints)	14
2.4.2 รอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบอีพ็อกซี (Keyed Epoxied Joints).....	17
2.5 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก	20
2.6 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ	23
บทที่3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	25
3.1 ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ.....	25
3.2 วัสดุที่ใช้.....	27
3.3 การเตรียมชิ้นตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	29
3.3.1 การเตรียมชิ้นส่วนตัวอย่าง	29
3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ	32
3.3.3 วิธีการทดสอบ.....	34
บทที่4 ผลการวิจัย.....	37
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง	37
4.2 รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน.....	46
4.3 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ	55
บทที่5 บทสรุป	57
บรรณานุกรม.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	62



3972945745

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตาม AASHTO Recommendations และ PCI Design Handbook.....	6
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบ [11].....	9
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการอัดแรงด้านข้างของชิ้นตัวอย่างทดสอบ	27
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC 65/35 BN.....	28
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสัดส่วนผสมคอนกรีตของรอยต่อพิเศษแบบแห้ง	28
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ	55
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนรอยต่อของ AASHTO และ Rombach and Specker	56

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงประเภทกล่อง	2
รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับรอยต่อแบบเปียก ก.) สลักตัวเมีย - ตัวผู้ ข.) ราบ ค.) สลักตัวเมีย - ตัวผู้.....	5
รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปรอยต่อแบบแห้ง ก.) สลักตัวเมีย - ตัวผู้ ข.) Dapped	5
รูปที่ 2.3 ก.) สลักรับแรงเฉือนเดี่ยว ข.) สลักรับแรงเฉือนหลายสลัก.....	7
รูปที่ 2.4 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน AASHTO 2010	7
รูปที่ 2.5 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน JSCE 2007.....	8
รูปที่ 2.6 รายละเอียดลักษณะของสลักรับแรงเฉือน [11].....	9
รูปที่ 2.7 ก.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่มีการแตกร้าวก่อน ข.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวก่อน [13]	10
รูปที่ 2.8 การจัดเตรียมตัวอย่างการทดสอบรอยต่อแบบแบนราบ [14]	11
รูปที่ 2.9 รายละเอียดรอยต่อแบบแบนราบ [15]	12
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อแบบแห้งแบนราบ [15]	12
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อแบบอีพ็อกซีแบนราบ [15]	13
รูปที่ 2.12 รายละเอียดของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน ก.) แบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joints) ข.) แบบหลายสลัก (Multiple-Keyed Joints) [15]	14
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว [15]	15
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก [15]	15
รูปที่ 2.15 รูปแบบลำดับการแตกร้าวก่อนของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว [15].....	16

รูปที่ 2.16 รูปแบบลำดับการแตกตัวของรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก [15]..... 16

รูปที่ 2.17 ลักษณะการแตกตัวของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน [4]..... 17

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15]..... 18

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15]..... 18

รูปที่ 2.20 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15] 19

รูปที่ 2.21 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีหลายสลัก [15] 19

รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบการรับแรงของรอยต่อ [7] 20

รูปที่ 2.23 รายละเอียดของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน ก.) แบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joints) ข.) แบบหลายสลัก (Multiple-Keyed Joints) [17] 21

รูปที่ 2.24 ก.) ตัวอย่างเส้นใยเหล็ก ข.) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก [17]..... 21

รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]..... 22

รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]..... 22

รูปที่ 2.27 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17].. 23

รูปที่ 2.28 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17].. 23

รูปที่ 3.1 รอยต่อพิเศษแบบแห้ง (special dry joint)..... 25

รูปที่ 3.2 รายละเอียดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ 26

รูปที่ 3.3 เส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC 65/35 BN 28

รูปที่ 3.4 แบบหล่อชิ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลัก – สลักตัวผู้..... 30

รูปที่ 3.5 แบบหล่อชิ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลัก – สลักตัวเมีย ก.) ก่อนเท ข.) หลังเท.. 30

รูปที่ 3.6 แบบหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบก่อนเท 31

รูปที่ 3.7 แบบหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบหลังเท..... 31

รูปที่ 3.8 การบ่มชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ 32

รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงกด AMSLER 500T 32

รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 30 ตัน 33

รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 200 ตัน 33

รูปที่ 3.12 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง 34

รูปที่ 3.13 เครื่องบันทึกข้อมูล 34

รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงเฉือน 35

รูปที่ 3.15 โครงรับแรงสำหรับอัดแรงด้านข้างชิ้นส่วนทดสอบ 35

รูปที่ 3.16 แม่แรงไฮดรอลิคสำหรับดันโครงรับแรงให้เกิดแรงด้านข้าง 36

รูปที่ 3.17 การทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่าง 36

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ 38

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ 38

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่ 39

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่ 39

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ 40

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ 41

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่ 41

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่ 42



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต..... 43

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต 43

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต 44

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต 45

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต
..... 46

รูปที่ 4.14 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-1* 47

รูปที่ 4.15 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-2* 47

รูปที่ 4.16 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-3..... 47

รูปที่ 4.17 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-1..... 48

รูปที่ 4.18 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-2* 48

รูปที่ 4.19 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-3* 48

รูปที่ 4.20 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-1 49

รูปที่ 4.21 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-2 49

รูปที่ 4.22 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-3 49

รูปที่ 4.23 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-1 50

รูปที่ 4.24 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-2 50

รูปที่ 4.25 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-3 50

รูปที่ 4.26 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-1* 51

รูปที่ 4.27 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-2* 51

รูปที่ 4.28 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-3..... 51

รูปที่ 4.29 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-1 52

รูปที่ 4.30 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-2* 52

รูปที่ 4.31 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-3* 52



3972945745

รูปที่ 4.32 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-1 53

รูปที่ 4.33 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-2 53

รูปที่ 4.34 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-3 53

รูปที่ 4.35 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-1 54

รูปที่ 4.36 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-2 54

รูปที่ 4.37 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-3 54

รูปที่ 4.38 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อจากผลการทดสอบและสูตรการคำนวณ 56



3972945745

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง (precast prestressed concrete segment) มีส่วนช่วยพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแทนการก่อสร้างแบบหล่อในที่ สามารถเอื้อประโยชน์หลายประการ อาทิช่วยให้การก่อสร้างเสร็จรวดเร็ว ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง และลดผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง ปัจจุบันคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงนิยมใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างประเภทช่วงยาว เช่น สะพานข้ามแม่น้ำที่มีช่วงเสาตั้งแต่ 60-200 เมตร สะพานซึ่งที่มีช่วงเสาห่างกันตั้งแต่ 250-1000 เมตร [1] และโครงการทางด่วนและรถไฟฟ้าที่กำลังขยายตัวมากขึ้นในประเทศ อย่างไรก็ตามการก่อสร้างด้วยคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงก็ยังมีประสบปัญหาหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ต่อเชื่อมกัน

ในการก่อสร้างสะพานแบบคานารูปกล่องคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง (ดังรูปที่ 1.1) บริเวณรอยต่อทั้งในส่วนของเอวและปีก มีจุดสำคัญเรียกว่าสลักรับแรงเฉือน (shear key) สลักรับแรงเฉือนนี้ทำหน้าที่ในการจัดแนวชิ้นส่วนระหว่างการติดตั้ง และถ่ายแรงเฉือนระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน การใช้งานรอยต่อนี้แบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ รอยต่อแบบเปียก (wet joint) และรอยต่อแบบแห้ง (dry joint) รอยต่อแบบเปียกจะใช้วัสดุในการเชื่อมประสาน เช่น อีพ็อกซีที่มีความหนาประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร [2, 3] โดยอีพ็อกซีจะทำหน้าที่ประสานรอยต่อให้ชิ้นส่วนติดกันได้ดีขึ้น และเป็นการอุดช่องว่างระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วน ส่งผลให้สามารถกระจายแรงระหว่างรอยต่อได้ดี ทำให้รอยต่อมีกำลังรับแรงได้ดี ส่วนข้อจำกัดของรอยต่อแบบเปียก คือขั้นตอนการทำงานที่ยุ่งยากต้องทาอีพ็อกซีที่บริเวณรอยต่อและต้องทำการบ่ม ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น และพฤติกรรมการวิบัติของรอยต่ออีพ็อกซีเป็นแบบเปราะ ส่วนรอยต่อแบบแห้งนั้นจะไม่มีอีพ็อกซีหรือสารผสมใด ๆ ที่ช่วยในการยึดเกาะของชิ้นส่วนนั้น การใช้งานรอยต่อแบบแห้งมีข้อดี คือการใช้เวลาและต้นทุนการก่อสร้างน้อย พฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียว ส่วนข้อจำกัดในรอยต่อแบบแห้ง คือมีกำลังรับแรงของโครงสร้างน้อยกว่ารอยต่ออีพ็อกซี และยังพบปัญหาบริเวณสลักรับแรงเฉือนหลายสัณฐานเกิดจากความบกพร่องในการผลิตชิ้นส่วนทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของขนาดของสลักรับแรงเฉือนหลายสัณฐาน เมื่อนำชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปมาประกอบกันส่งผลให้เกิดช่องว่างบริเวณสลักขึ้น เมื่อรอยต่อรับแรงจะทำให้ประสิทธิภาพรับแรงของรอยต่อบริเวณสลักรับแรงได้ไม่เต็มความสามารถ



3972945745

CU-Thesis 5970301621 thesis / rev: 01082562 14:40:21 / seq: 11



รูปที่ 1.1 ชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงประเภทกล่อง

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นทำให้งานวิจัยนี้ทำการคิดวิธีลดข้อต่อและเพิ่มข้อดีของรอยต่อแบบแห้งให้เป็นรอยต่อที่มีประสิทธิภาพและการใช้งานที่สะดวกรวดเร็วขึ้น จึงได้ออกแบบรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก (Multiple-keyed dry joints) ขึ้นใหม่ โดยทำการหล่อรอยต่อพิเศษแบบแห้ง (Special dry joint) ขึ้นมาก่อนเพื่อให้ผิวสัมผัสของสลักรับแรงเฉือนระหว่างรอยต่อสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ โดยรอยต่อพิเศษในที่นี้จะทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ คอนกรีตปกติ คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก (steel fiber) 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตร หลังจากนั้นจะทำการหล่อส่วนที่เหลือด้วยคอนกรีตธรรมดาเพื่อเป็นชั้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อ ภายใต้แรงเฉือนโดยตรงและปราศจากผลของแรงดัด

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งหลายสลักในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงสำหรับรอยต่อพิเศษแบบแห้ง (special dry joint) ที่ทำจากคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก (Steel fiber)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ทำรอยต่อประกอบด้วย คอนกรีตปกติ และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก
2. ใช้เส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC-65/35-BN มาตรฐาน ASTM A820
3. ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงกับชิ้นตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีแรงกระทำตามแนวแกนแบบต่อเนื่อง (Monotonic Loading) โดยไม่พิจารณาผลของแรงดัด และเหล็กเดือย
4. วิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO และงานวิจัยของ Rombach and Specker

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยจะช่วยให้สามารถออกแบบและพัฒนารอยต่อแบบแห้งหลายสลักให้มีกำลังรับแรงเฉือนที่ดียิ่งขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงรอยต่อในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงต่อไป

1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีในอดีตที่เกี่ยวข้อง
- ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบชิ้นตัวอย่างทดสอบและออกแบบวิธีการทดสอบ
- ขั้นตอนที่ 3 เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบชิ้นตัวอย่างและบันทึกผลการทดสอบ
- ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อไป
- ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตของรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง ซึ่งประกอบด้วย ประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง พฤติกรรมการถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีต การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อประเภทต่างๆ การแตกร้าวและการวิบัติของรอยต่อ และกำลังรับแรงเฉือน

2.1 ประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง

รอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รอยต่อแบบเปียก (wet joint) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า รอยต่อแบบอีพ็อกซี (epoxy joint) และรอยต่อแบบแห้ง (dry joint) โดยรอยต่อทั้งสองประเภทอาจมีการเสริมสลักรับแรงเฉือน (shear key) บริเวณรอยต่อด้วย

ในปัจจุบันยังคงมีการใช้งานรอยต่อทั้งสองประเภท เนื่องจากยังคงมีข้อขัดแย้งถึงความสามารถของรอยต่อทั้งสองแบบ ในด้านสภาพแวดล้อมในการใช้งานก่อสร้าง ด้านพฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อ และด้านความทนทานของรอยต่อในการใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบในการเลือกใช้ตามความเหมาะสม [4]

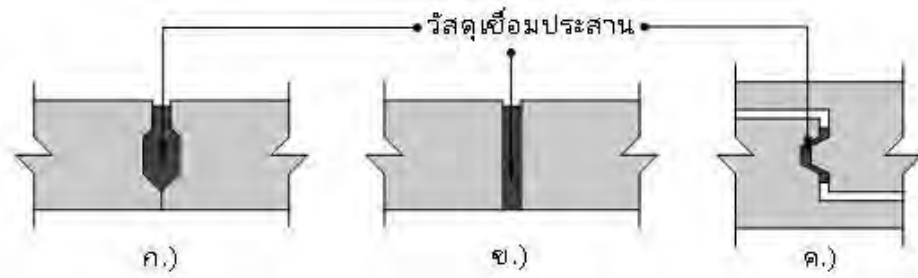
2.1.1 รอยต่อแบบเปียก

รอยต่อแบบเปียก (wet joint) เป็นรอยต่อที่มีการใช้งานวัสดุเชื่อมประสานระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน เช่น มอร์ตาร์ซีเมนต์ Non-Shrink Grout หรืออีพ็อกซี ทำหน้าที่ประสานรอยต่อให้ชิ้นส่วนติดกันได้ดีมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1 การเลือกใช้มอร์ตาร์ซีเมนต์ Non-Shrink Grout ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงการหดตัวสูงสุดที่ยอมให้ กำลังขั้นต่ำในการประสาน และกำลังที่ต้องการ การใช้อีพ็อกซีโดยทั่วไปจะใช้ที่ความหนาประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร อีพ็อกซีจะทำให้ผิวรอยต่อของชิ้นส่วนสม่ำเสมอกันทำให้ลดการเกิดความเข้มข้นของความเค้นสูงเฉพาะจุดและช่วยให้ความเค้นกระจายสม่ำเสมอตลอดแนวรอยต่อ ส่งผลให้โครงสร้างบริเวณรอยต่อแข็งแรงและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังช่วยป้องกันการกัดกร่อนของลวดอัดแรงเนื่องจากความชื้นที่เข้าสู่ลวดอัดแรง [5]

รอยต่อแบบเปียกสามารถทำให้โครงสร้างรับแรงได้มากกว่ารอยต่อแบบแห้ง แต่พฤติกรรมการวิบัติของรอยต่อเมื่อรับแรงเปลี่ยนไป โดยจะกลายเป็นการวิบัติแบบเปราะ และการใช้งานรอยต่อ



แบบเปียกยังมีข้อจำกัด เช่น ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการเลือกใช้วัสดุประสาน เวลาทำงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องรอให้วัสดุเชื่อมประสานได้ระยะเวลาในการบ่มหรือเซตตัวและต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อม เช่น ฝนตก หรืออุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานรอยต่อแบบเปียกได้อย่างเต็มประสิทธิภาพได้ [6]



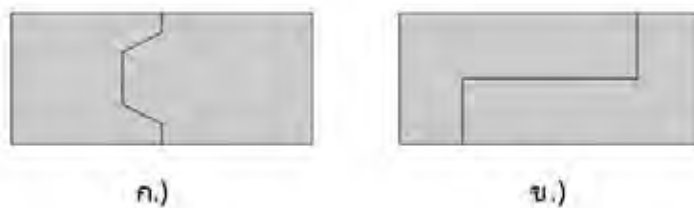
รูปที่ 2.1 ชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับรอยต่อแบบเปียก

ก.) สลักตัวเมีย - ตัวเมีย ข.) ราบ ค.) สลักตัวเมีย - ตัวผู้

2.1.2 รอยต่อแบบแห้ง

รอยต่อแบบแห้ง (dry joint) เป็นรอยต่อที่ไม่มีการใช้งานอีพ็อกซี หรือวัสดุเชื่อมประสาน บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ติดกัน แสดงดังรูปที่ 2.2 การใช้งานรอยต่อแบบแห้งจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย และระยะเวลาในการก่อสร้างลงเมื่อเทียบกับรอยต่อแบบเปียกที่ต้องรอให้วัสดุเชื่อมประสานเซตตัวและสภาพอากาศที่เหมาะสม

บริเวณชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ติดกันของรอยต่อแบบแห้งจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานแรงเฉือนซึ่งเกิดจากการถ่ายแรงเฉือนของแต่ละเอลิเมนต์ผ่านทางผิวสัมผัสระหว่างชิ้นส่วน โดยที่แรงเฉือนจะตัดผ่านรอยแตกร้าวหรือระนาบวิกฤติ (plane of weakness) ตารางที่ 2.1 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) ตามคำแนะนำของ AASHTO และ PCI Design Handbook โดยที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับตำแหน่งของคอนกรีต ผิวสัมผัส และประเภทของวัสดุ [7]



รูปที่ 2.2 ชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปรอยต่อแบบแห้ง ก.) สลักตัวเมีย - ตัวผู้ ข.) Dapped

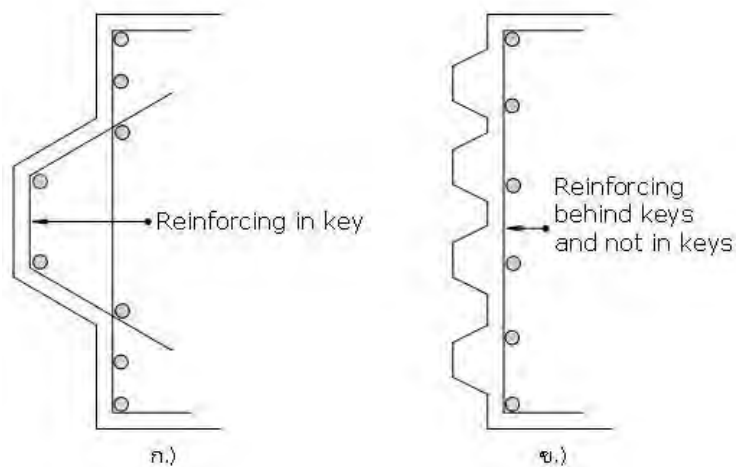
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตาม AASHTO Recommendations และ PCI Design Handbook

Concrete placement	Friction coefficient, μ	
	AASHTO	PCI Design Handbook
Concrete placed monolithically	1.4	1.4
Concrete placed against hardened concrete with roughened interface	1.0	1.0
Concrete cast against steel	0.7	0.6
Concrete cast against smooth concrete surface	-	0.4

2.1.3 สลักรับแรงเฉือน

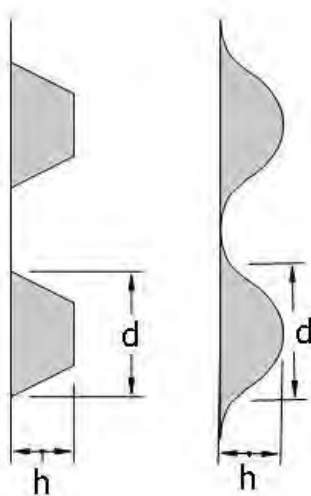
สลักรับแรงเฉือน (Shear keys) ในชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงจะมีอยู่ตรงบริเวณเอวของชั้นส่วน หรือบางชั้นส่วนจะมีบริเวณปีกของชั้นส่วนด้วย โดยจะอยู่บริเวณปลายของชั้นส่วนทั้งสองฝั่งเพื่อทำหน้าที่จัดแนวชั้นส่วนของคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงในระหว่างติดตั้งชั้นส่วนและถ่ายแรงเฉือนระหว่างชั้นส่วน ขณะระหว่างก่อสร้างและแล้วเสร็จ ในส่วนรอยต่อแบบอีพ็อกซีนั้นสลักรับแรงเฉือนจะทำหน้าที่ช่วยโครงสร้างถ่ายแรงขณะที่อีพ็อกซียังไม่กลายเป็นลักษณะพอลิเมอร์ (polymerization) [4]

สลักรับแรงเฉือนที่ใช้ในปัจจุบันมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ในอดีตมีการใช้งานเป็นสลักรับแรงเฉือนเดี่ยว (single key) ที่มีขนาดใหญ่บริเวณเอวของชั้นส่วน แสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ก่อนมีการเปลี่ยนไปใช้เป็นสลักรับแรงเฉือนหลายสลัก (multiple keys) ที่มีขนาดเล็กลงอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 20 ต่อความสูงของบริเวณเอวของชั้นส่วน แสดงในรูปที่ 2.4 (ข) การใช้สลักรับแรงเฉือนหลายสลักทำให้มั่นใจได้ว่าการถ่ายความเค้นกระจายสม่ำเสมอตลอดแนวรอยต่อระหว่างชั้นส่วน และทำให้สัมผัสเชิงกลที่ดีกว่า [8]



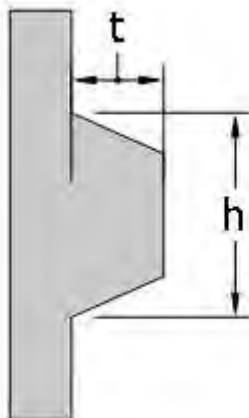
รูปที่ 2.3 ก.) สลักรับแรงเฉือนเดี่ยว ข.) สลักรับแรงเฉือนหลายสลัก

อัตราส่วนลักษณะของสลักรับแรงเฉือน มาตรฐานของ AASHTO 2010 [9] ได้ให้รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยที่ h คือ ความยาวของสลักรับแรงเฉือน และ d คือ ความสูงของสลักรับแรงเฉือน โดยที่อัตราส่วนของ h ต่อ d คือ $h:d \approx 1:2$



รูปที่ 2.4 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน AASHTO 2010

มาตรฐานของ JSCE 2007 [10] แสดงรายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยที่ t คือ ความยาวของสลักรับแรงเฉือนต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 30 มิลลิเมตร และ h คือ ความสูงของสลักรับแรงเฉือน ที่อัตราส่วนของ $t/h \leq 1/2$

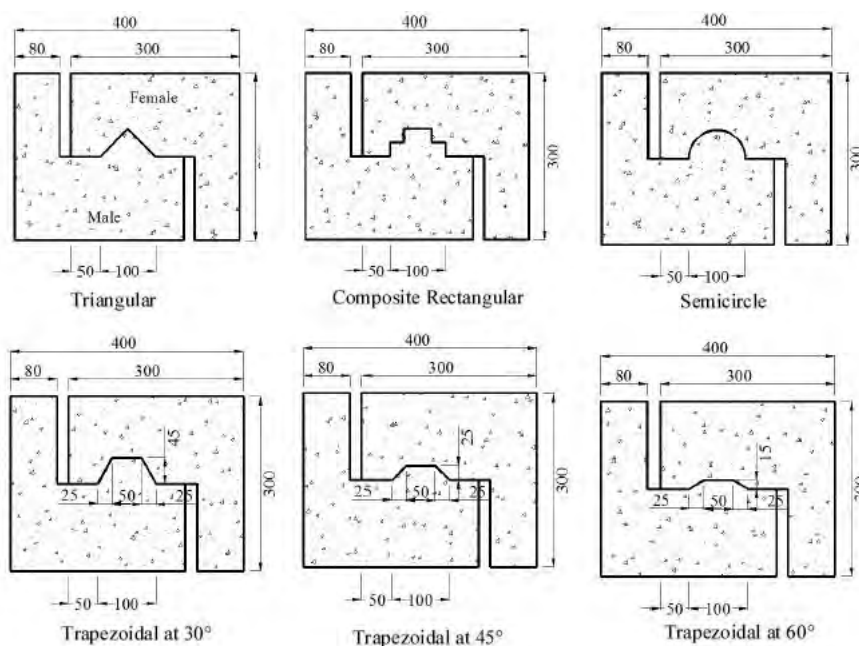


รูปที่ 2.5 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน JSCE 2007

Ibrahim et al. (2014). [11] ศึกษาลักษณะของสลักรับแรงเฉือนเดี่ยวที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและลักษณะของการวิบัติโดยได้ออกแบบลักษณะของสลักรับแรงเฉือนเดี่ยวใช้ในการทดสอบ 6 ประเภท ได้แก่ ลักษณะสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมประกอบ, ครึ่งวงกลม และสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมเอียง 30, 45 และ 60 องศา แสดงดังรูปที่ 2.6 ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะของสลักรับแรงเฉือนส่งผลต่อความสามารถในด้านกำลังรับแรงเฉือน สลักรับแรงเฉือนลักษณะเป็นครึ่งวงกลมรับแรงเฉือนได้มากที่สุด คือ 55.6 kN เนื่องจากรูปทรงครึ่งวงกลมทำให้สามารถกระจายแรงเฉือนได้อย่างสม่ำเสมอบริเวณรอยต่อระหว่างสลักตัวผู้และตัวเมีย สลักรับแรงเฉือนลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมเอียง 30 และ 60 องศา รับแรงเฉือนได้น้อยที่สุด คือ 31.9 kN และ 31.7 kN ตามลำดับ สลักรับแรงเฉือนลักษณะเป็นสามเหลี่ยมเกิดการลื่นไถลระหว่างทดสอบเนื่องจากการหมุนของอุปกรณ์ทดสอบด้านบนเพื่อดำเนินการเคลื่อนที่แนวราบ รูปแบบของการวิบัติขึ้นอยู่กับลักษณะของสลักรับแรงเฉือนที่ประกอบไปด้วยแรงเฉือน รอยแตกร้าวในแนวเอียง การแยกออกและการลื่นไถล (splitting and slip) งานวิจัยได้แนะนำการเลือกใช้ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมเอียง 30 และ 45 องศา และสี่เหลี่ยมประกอบซึ่งมีรูปแบบการวิบัติที่ดีกว่ารูปทรงอื่นถึงแม้มีความสามารถในการรับแรงเฉือนน้อยกว่าลักษณะครึ่งวงกลม



3972945745



รูปที่ 2.6 รายละเอียดลักษณะของสลักรับแรงเฉือน [11]

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบ [11]

Description	Specimen	Ultimate shear capacity (kN)	Average ultimate shear capacity (kN)	Interface shear stress (N/mm ²)	Interface slip at ultimate shear capacity (mm)	Shear crack length at failure (mm)
Triangular	A1	37.6		3.27	7.35	50
	A2	39.6	35.7	4.60	-	100
	A3	30.0		4.70	0.80	85
Composite Rectangular	B1	58.1		7.10	6.52	90
	B2	36.1	46.5	3.20	2.49	100
	B3	45.3		5.40	3.16	110
Semicircle	C1	47.8		7.50	4.60	85
	C2	62.9	**55.6	8.40	-	100
	*C3	33.8		4.70	1.07	-
	C4	56.1		7.50	-	95
Trapezoidal at 60°	D1	37.8		3.48	0.94	145
	D2	27.5	31.7	-	1.89	-
	D3	29.8		2.94	1.77	135
Trapezoidal at 45°	E1	37.9		5.05	2.05	100
	E2	44.1	40.3	6.91	1.90	85
	E3	38.8		7.95	1.70	65
Trapezoidal at 30°	F1	27.5		4.58	1.41	80
	F2	38.3	31.9	4.09	2.93	125
	F3	30.0		4.21	1.35	95

Note:

*Specimen C3 is not included in the following discussion due to error of the test frame during the test

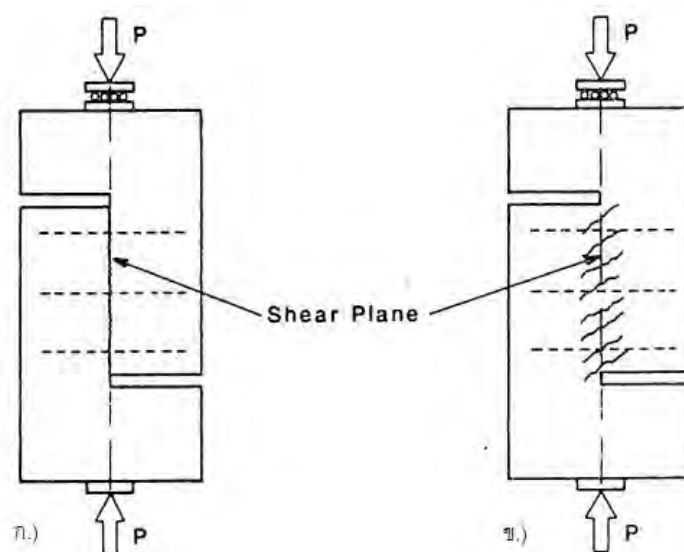
** The average ultimate shear capacity does not include specimen C3

2.2 การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูป

แรงเฉือนอาจสร้างปัญหาให้กับโครงสร้างคอนกรีตได้หากเกิดแรงเฉือนขึ้นบริเวณที่เป็นระนาบวิกฤติหรือไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง [12] อาจทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างจากการเลื่อนไถลจากแรงเฉือนได้ซึ่งเป็นปัญหาที่พบโดยทั่วไปในการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงเมื่อนำขึ้นส่วนหลายๆ ชั้นมาต่อกันในช่วงของการก่อสร้าง

ปัจจัยสำหรับการทดสอบถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีตประกอบด้วย การต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตจากแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตในระนาบแรงเฉือน เดียวของเหล็กเสริมที่ตั้งฉากหรือทำมุมน้อยกว่า 90 องศาแต่ไม่ขนานกับระนาบแรงเฉือน ผลจากการขีดตัวของมวลรวมของคอนกรีตที่บริเวณระนาบการวิบัติของแรงเฉือน และผลของแรงเสียดทานบนระนาบแรงเฉือนระหว่างบริเวณผิวของคอนกรีต

Hsu et al. (1987). [13] ศึกษาการถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีตด้วยวิธีการทดสอบให้เห็นพฤติกรรมของการถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีตออกเป็นสองประเภท คือการถ่ายแรงเฉือนบนระนาบที่มีการแตกร้าวยู่ก่อนแล้ว และบนระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวยุ่ก่อน โดยการทดสอบได้คำนึงถึงปัจจัยสำหรับการถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีตที่กล่าวมาข้างต้น จากการทดสอบพบว่าระนาบที่มีการแตกร้าวยู่ก่อนแล้วพบรอยแตกเล็กน้อยหรือไม่พบรอยแตกเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.7(ก) และบนระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวยุ่ก่อนพบรอยแตกเพิ่มขึ้นมากในลักษณะเอียงกับระนาบแรงเฉือน แสดงดังรูปที่ 2.7(ข)



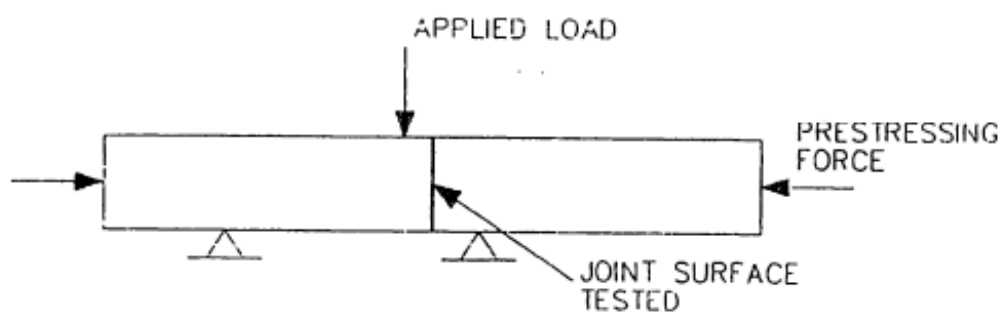
รูปที่ 2.7 ก.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่มีการแตกร้าวยู่ก่อน ข.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวยุ่ก่อน [13]

การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อแบบอีพ็อกซีสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงสามารถจำลองให้รอยต่อเป็นระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวจากอีพ็อกซีทำให้อายุต่อระหว่างชิ้นส่วนที่ติดกันสามารถให้กำลังรับแรงในระดับเดียวกับโครงสร้างทั่วไป ในส่วนของการถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อแบบแห้งสามารถจำลองแยกออกได้เป็นระนาบที่มีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้วและระนาบที่ไม่ได้มีการแตกร้าว โดยจากช่องว่างระหว่างสลักรับแรงเฉือนที่ติดกันนั้นมีลักษณะคล้ายรอยแตกที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และสลักรับแรงเฉือนจะทำหน้าที่คล้ายกับการขัดของมวลรวมที่บริเวณรอยแตก แต่ในส่วนของพื้นที่บริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือนนั้นไม่ได้มีการรับแรงและไม่ได้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นจึงสามารถจำลองเป็นส่วนของระนาบที่ไม่มีการแตกร้าว [4, 13]

2.3 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อแบบราบแบบแห้งและอีพ็อกซี

2.3.1 รอยต่อแบบราบแบบแห้ง (Flat Dry Joints)

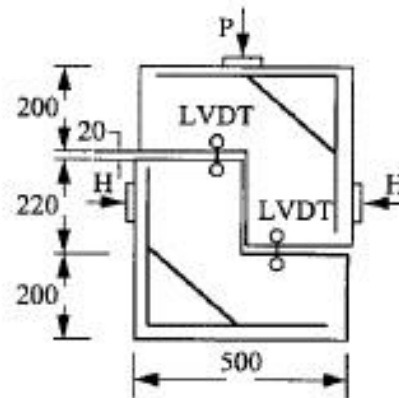
Jones, L.L. (1959). [14] ศึกษาการทดสอบแรงเฉือนด้วยตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้รอยต่อแห้งแบบแบบราบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรอยต่อ ทำการทดสอบด้วยวิธีการยึดชิ้นส่วนคอนกรีตติดกันด้วยวิธีการอัดแรง (prestressing) และให้แรงกดอัดด้านบนขึ้นตัวอย่างทดสอบบริเวณใกล้กับรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.8 ทำการให้แรงกดทดสอบจนกระทั่งรอยต่อเกิดการเลื่อนไถล ทำการทดสอบจำนวนหลายครั้งตัวอย่างโดยการเพิ่มแรงอัดด้านข้างมากที่สุดที่ 19.9 MPa และหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรอยต่อได้ค่าน้อยสุดที่ 0.391 และค่าที่มากที่สุดที่ 0.691 และมุมของแรงเสียดทานที่ 21.5 และ 35 องศา



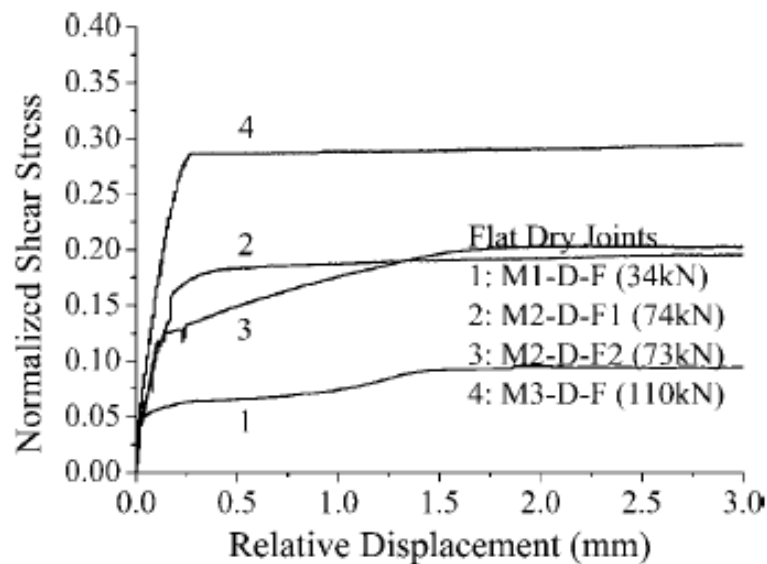
รูปที่ 2.8 การจัดเตรียมตัวอย่างการทดสอบรอยต่อแบบแบบราบ [14]

Zhou et al. (2005). [15] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อ และกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบแห้งแบบราบที่มีขนาดชิ้นส่วนตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยจำแนกตัวอย่างออกเป็น 3 ประเภทตามการให้แรงอัดด้านข้าง คือ 1, 2 และ 3 MPa ผลการ

ทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีการให้แรงอัดด้านข้างที่ 3 MPa สามารถรับรับแรงเฉือนได้สูงสุด คือ 110 kN ส่วนตัวอย่างที่มีการให้แรงอัดด้านข้างที่ 1 MPa สามารถรับรับแรงเฉือนได้ต่ำสุด คือ 34 kN รูปที่ 2.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized shear stress) และระยะการเคลื่อนที่ (Relative Displacement) และจากผลการทดสอบได้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยประมาณที่ 0.72



รูปที่ 2.9 รายละเอียดรอยต่อแบบแบนราบ [15]



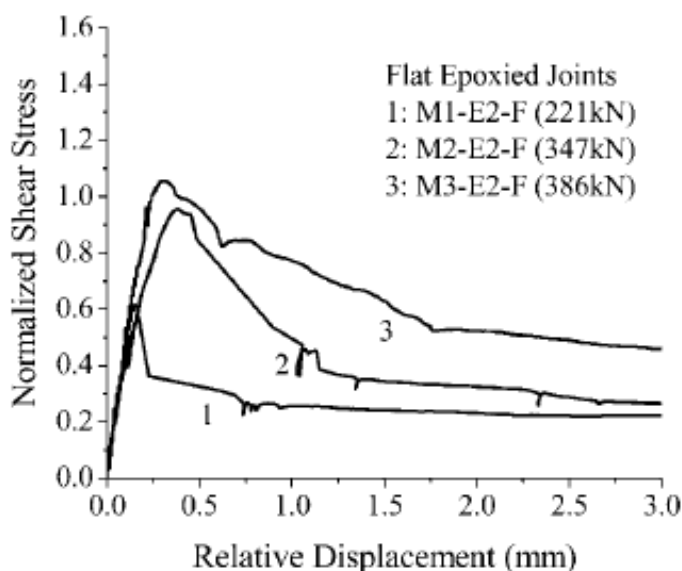
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อแบบแห้งแบนราบ [15]

2.3.2 รอยต่อแบบราบแบบอีพ็อกซี (Flat Epoxied Joints)

Moustafa S.E. (1974). [16] ศึกษากำลังรับแรงของชิ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอด้วยวิธีการทดสอบนำตัวอย่างคอนกรีตลักษณะลูกบาศก์ 3 ลูกแต่ละลูกมีขนาด 6 นิ้วนำมาต่อกันด้วยวัสดุ

ประสานอีพ็อกซีบริเวณรอยต่อให้เป็นลักษณะคาน ทำการอัดแรงด้านข้างขึ้นตัวอย่างทดสอบด้วยแรงแตกต่างกัน 3 ขนาด และทดสอบด้วยการกดอัดน้ำหนัkd้านบนสำหรับการทดสอบด้วยแรงเฉือนอย่างเดียว (pure shear) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเกิดการวิบัติขึ้นจะเกิดรูปแบบการแตกบริเวณเนื้อคอนกรีตส่วนผิวหน้าที่อยู่ติดกับวัสดุประสานอีพ็อกซี

Zhou et al. (2005). [15] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อ และกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบอีพ็อกซีแบนราบโดยจำแนกตัวอย่างออกเป็น 6 ประเภทตามการให้แรงอัดด้านข้าง คือ 1, 2 และ 3 MPa และการให้ความหนาของอีพ็อกซี คือ 1 และ 2 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีการให้แรงอัดด้านข้างที่ 3 MPa สามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุด คือ 386 kN ส่วนตัวอย่างที่มีการให้แรงอัดด้านข้างที่ 1 MPa สามารถรับแรงเฉือนได้ต่ำสุด คือ 221 kN โดยที่ความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้งานไม่มีผลต่อกำลังรับแรงของรอยต่อ รูปที่ 2.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized shear stress) และระยะการเคลื่อนที่ (Relative Displacement) ของรอยต่อแบบอีพ็อกซีที่มีความหนา 2 mm จากการทดสอบรอยแตกช้าพบว่าเกิดรอยแตกช้าก่อนขึ้นรับแรงเฉือนสูงสุด และรอยแตกช้าแพร่กระจายบริเวณเนื้อคอนกรีตที่ติดอยู่กับบริเวณอีพ็อกซี แสดงให้เห็นว่ารอยต่อจะพังแบบการแยกออกจากกันระหว่างผิวคอนกรีตและอีพ็อกซี โดยกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อได้มาจากความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน และการศึกษาขึ้นตรงกับการศึกษาของ Moustafa [16]



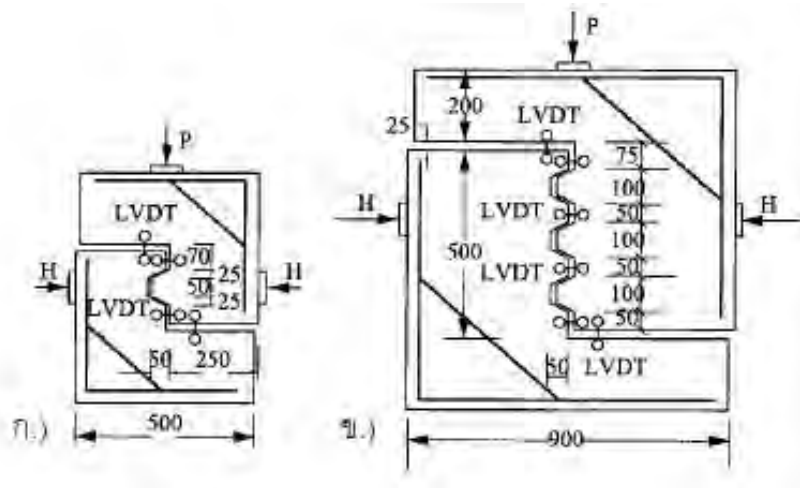
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อแบบอีพ็อกซีแบนราบ

[15]

2.4 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งและอีพ็อกซี

2.4.1 รอยต่อสลักรับรับแรงเฉือนแบบแห้ง (Keyed Dry Joints)

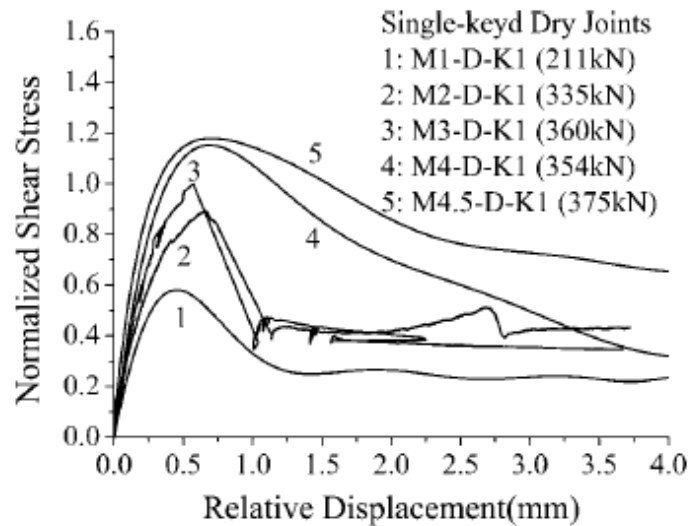
Zhou et al. (2005). [15] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อ และกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบแห้งสลักเดี่ยว (Single-Keyed Dry Joints) แสดงดังรูปที่ 2.12 (ก) และหลายสลัก (Multiple-Keyed Dry Joints) ด้วยการใช้สลัก 3 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.12 (ข) ทำการทดสอบโดยให้แรงอัดด้านข้างที่แตกต่างกัน และให้แรงกระทำด้านบนบนชิ้นตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบเฉพาะแรงเฉือนจนกระทั่งเกิดการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนหรือรอยต่อจนไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีก



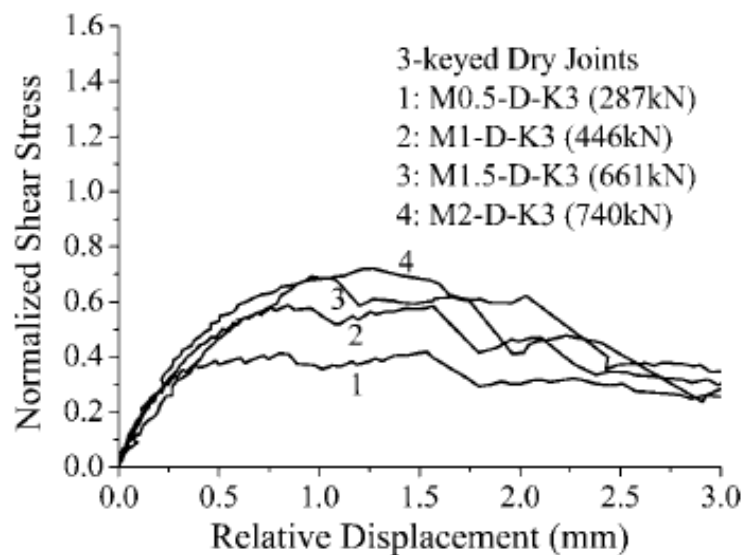
รูปที่ 2.12 รายละเอียดของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน ก.) แบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joints) ข). แบบหลายสลัก (Multiple-Keyed Joints) [15]

ผลการทดสอบพฤติกรรมรับแรงของชิ้นตัวอย่างทดสอบในหลายๆ ตัวอย่าง พบว่าการให้แรงอัดด้านข้างสูงสุด ชิ้นตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงเฉือนสูงสุดได้มากกว่าชิ้นตัวอย่างที่ให้แรงอัดด้านข้างที่น้อยกว่า รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized Shear Stress) และระยะการเคลื่อนที่ (Relative Displacement) ของรอยต่อสลักเดี่ยว โดยในช่วงแรกพบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงตามแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น บริเวณสลักรับแรงเฉือนจะเกิดรอยแตกกว้างขึ้นจนกระทั่งสลักพังลง รอยต่อจึงไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อหลายสลัก โดยรูปแบบความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับรอยต่อแบบสลักสลักเดี่ยวในช่วงแรก แต่รูปแบบของความสัมพันธ์จะต่างกันในช่วงของการพังของสลักรับแรงเฉือนเนื่องจากรอยต่อมีสลักรับแรงเฉือนหลายตัวทำให้

รอยต่อแบบหลายสลักมีสลักรับแรงเฉือนที่ยังไม่พังลงนั้นสามารถช่วยให้โครงสร้างรับแรงได้ต่อไปจนกระทั่งสลักสุดท้ายพังลง



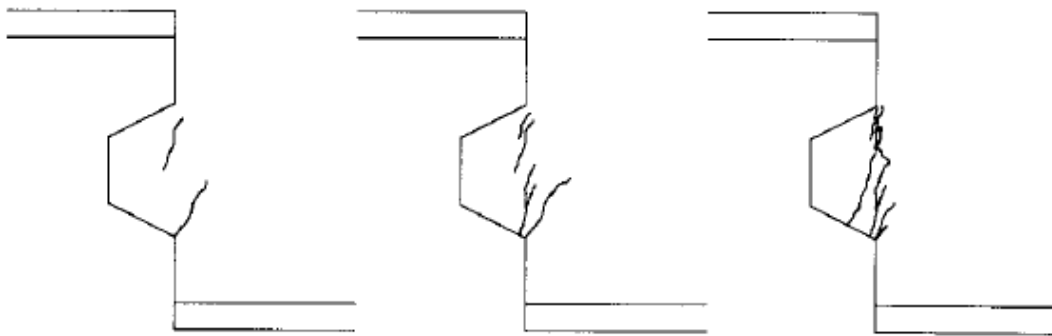
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว [15]



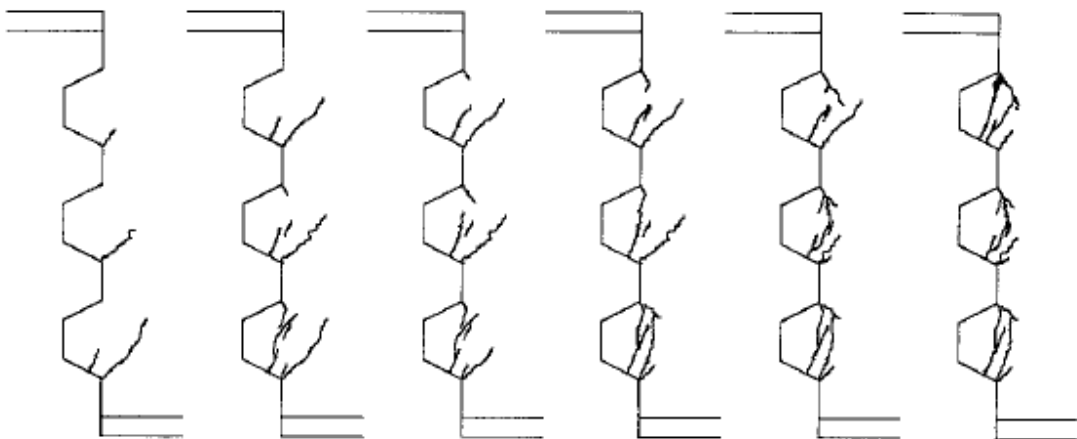
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก [15]

รูปแบบของการแตกร้าวสำหรับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.15 และหลายสลักแสดงดังรูปที่ 2.16 จะมีลักษณะคล้ายกันโดยรอยแตกร้าวเริ่มจากบริเวณมุมด้านล่างของตัวสลักเมื่อ

รอยต่อรับแรงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นเฉือนสูงสุด โดยมีลักษณะเป็นแนวเอียงประมาณ 45 องศา กับแนวระนาบแรงเฉือนและยาวขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อรอยต่อรับแรงมากขึ้น หลังจากนั้นจะเริ่มมีรอยแตกร้าวเล็กๆ ตามบริเวณฐานของสลัก และรอยต่อแตกร้าวจะค่อยๆ เพิ่มจำนวนขึ้นจนกระทั่งรอยแตกเชื่อมต่อกัน เป็นเหตุให้สลักรับแรงเฉือนถูกตัดขาดออกจากตัวชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป และเป็นจุดสิ้นสุดของการรับแรงเฉือนของรอยต่อ

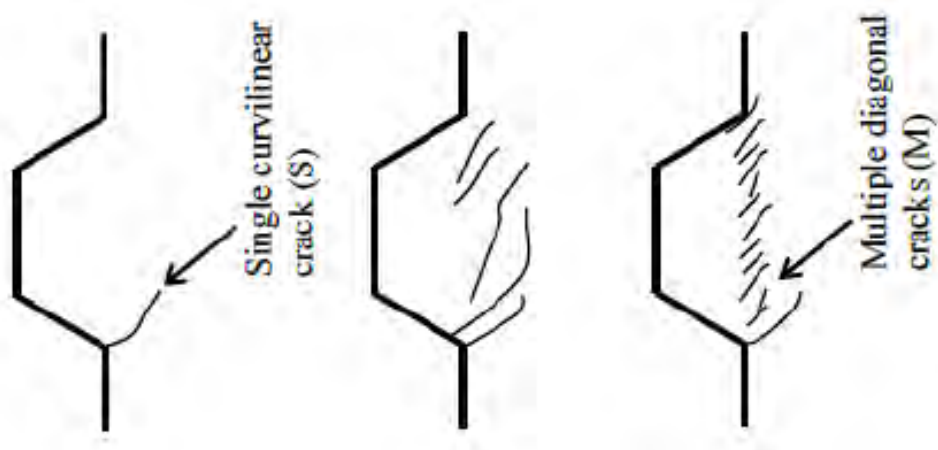


รูปที่ 2.15 รูปแบบลำดับการแตกร้าวของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว [15]



รูปที่ 2.16 รูปแบบลำดับการแตกร้าวของรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก [15]

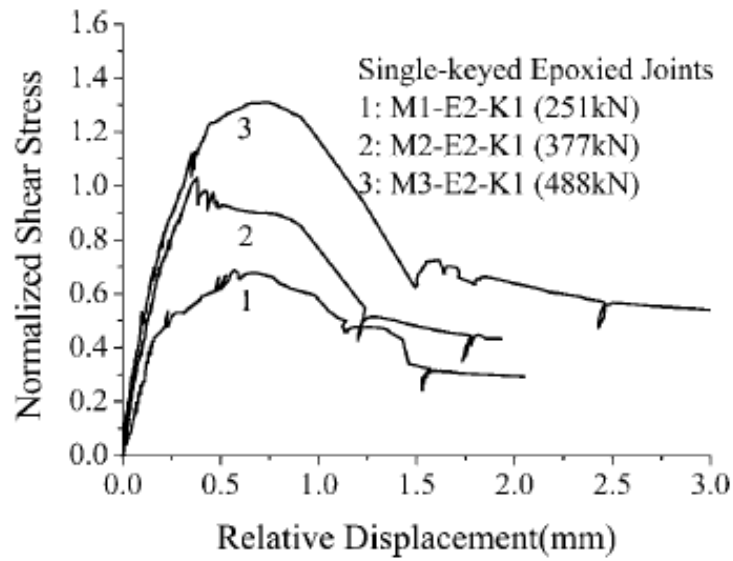
Bakhoun, M.M. (1990). [4] ได้แบ่งรูปแบบการแตกร้าวของสลักรับเฉือนเป็นสองลักษณะ โดยเป็นการแตกแบบรอยแตกโค้งเดี่ยว (Single curvilinear crack) เป็นรอยแตกเริ่มต้นเมื่อเกิดความเค้นเฉือนสูงสุดของสลักที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ บริเวณมุมล่างของสลัก และรอยแตกหลายเส้น (Diagonal multiple cracks) เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นเมื่อแรงยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง รอยแตกจะเกิดขึ้นบริเวณฐานของสลัก และเมื่อรอยแตกเชื่อมกันทำให้เกิดการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน แสดงดังรูปที่ 2.17



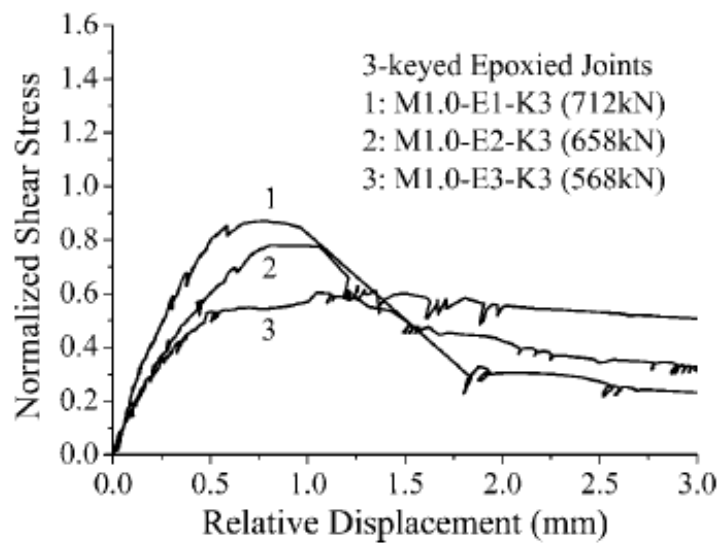
รูปที่ 2.17 ลักษณะการแตกร้าวของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน [4]

2.4.2 รอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบอีพ็อกซี (Keyed Epoxied Joints)

Zhou et al. (2005). [15] ศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อ และกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว (Single-Keyed Dry Joints) และหลายสลัก (Multiple-Keyed Dry Joints) มีขนาดชิ้นส่วนตัวอย่างและวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบรอยต่อของสลักรับแรงเฉือนแบบแห้ง แต่เพิ่มการใช้อีพ็อกซีที่มีความหนา 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร ที่บริเวณรอยต่อของชิ้นตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่าความหนาของอีพ็อกซีไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized Shear Stress) และระยะการเคลื่อนที่ (Relative Displacement) ของรอยต่ออีพ็อกซีแบบสลักเดี่ยว โดยรอยต่อมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Deformation) ทุกตัวอย่างการทดสอบวิบัติในรูปแบบเปราะเมื่ออีพ็อกซีไม่สามารถช่วยรับแรงได้อีก และเกิดการไหลของทั้งสลักรับแรงเฉือนทั้งสองชิ้นออกจากกัน สำหรับรอยต่ออีพ็อกซีแบบหลายสลักได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 2.19 มีลักษณะคล้ายกับรอยต่อสลักเดี่ยว แต่จะมีพฤติกรรมการเสียรูปที่ดีกว่าเนื่องจากการช่วยรับแรงของสลักรับแรงเฉือนตัวอื่นที่ยังสามารถรับแรงได้อยู่



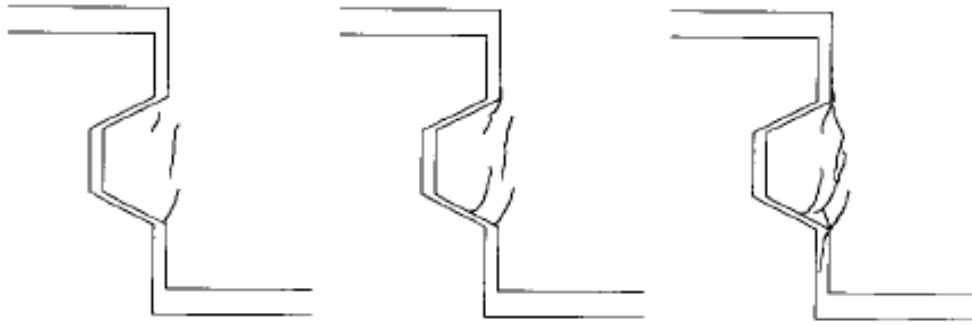
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบ อีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15]



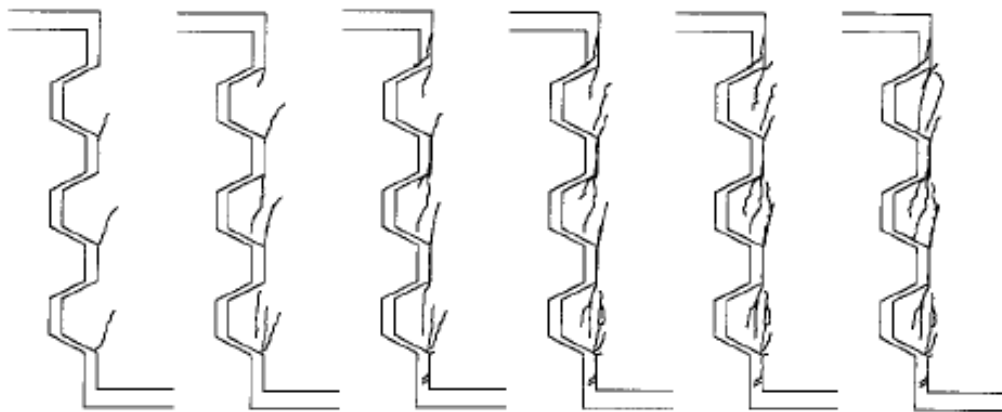
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบ อีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15]

รูปแบบการแตกร้าวของสลักรับแรงเฉือนแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.20 รอยแตกเริ่มต้นที่บริเวณมุมด้านล่างของสลักรับแรงเฉือนและยาวมากขึ้นตลอดระยะนาบแรงเฉือน โดยเมื่อรอยต่อรับแรงเพิ่มมากขึ้นพบรอยแตกบางส่วนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของคอนกรีตที่ติดอยู่กับอีพ็อกซี เมื่อใกล้ถึงจุดสูงสุดของกำลังรับแรงเฉือน รอยแตกร้าวจะปรากฏเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณฐานของ

สลักรับแรงเฉือน เมื่อรอยแตกเชื่อมต่อกันทำให้เกิดการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน รูปแบบการแตกร้าวของของสลักรับแรงเฉือนแบบอีพ็อกซีหลายสลัก มีรูปแบบคล้ายกับสลักเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยอีพ็อกซีจะช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นเฉือนในแต่ละสลักลง ช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งของรอยต่อ (increasing rigidity) และทำให้แต่ละสลักติดกันได้ดีมากขึ้น ตามการศึกษาของ Koseki et al. [7]

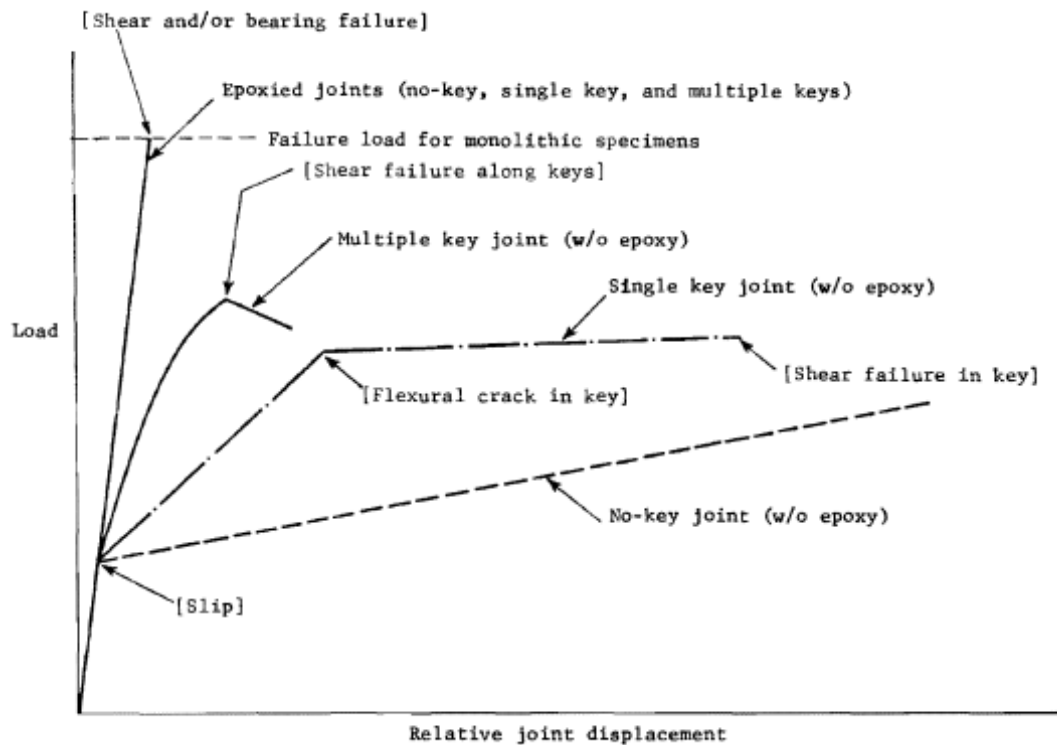


รูปที่ 2.20 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว [15]



รูปที่ 2.21 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีหลายสลัก [15]

Koseki, K. and Breen, J.E. (1983). [7] ศึกษาการรับแรงเฉือนของรอยต่อสำหรับชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง ทำการทดสอบกับรอยต่อแบบไม่มีสลัก สลักเดี่ยว และแบบหลายสลัก และใช้เป็นรอยต่อแบบแห้งและอีพ็อกซี ผลการทดสอบพบว่ารอยต่อที่มีการใช้อีพ็อกซีมีการรับแรงเฉือนมากกว่ารอยต่อแบบแห้งประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 2.22 เนื่องจากอีพ็อกซีทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวขึ้น และทำให้สลักรับแรงเฉือนของรอยต่อติดกันได้ดีมากขึ้น

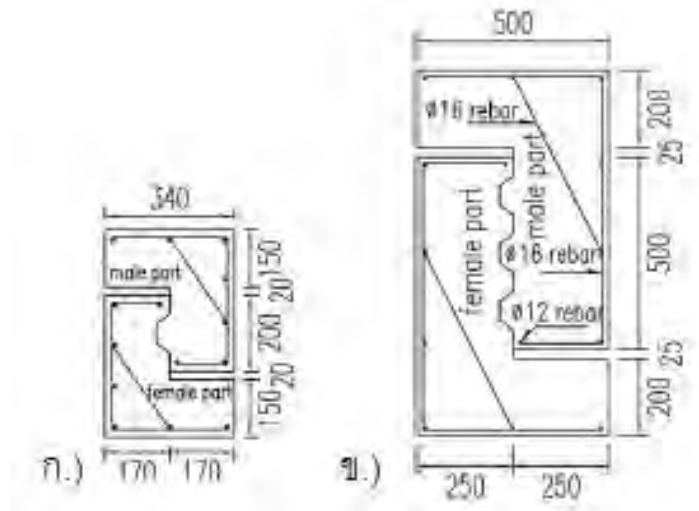


รูปที่ 2.22 การเปรียบเทียบการรับแรงของรอยต่อ [7]

2.5 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก

Jiang et al. (2016). [17] ศึกษาพฤติกรรม และกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก ขนาดของชิ้นตัวอย่างทดสอบของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.23(ก) และรอยต่อแบบแห้งหลายสลักแสดงดังรูปที่ 2.23(ข) โดยชิ้นตัวอย่างทดสอบมีการผสมผสมเส้นใยเหล็กที่มีขนาดความยาวต่อชิ้น 40 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณ 80 กิโลกรัมต่อปริมาตร แสดงดังรูปที่ 2.24 ด้วยวิธีการให้แรงอัดด้านข้างที่แตกต่างกัน คือ 0.5 ,1 และ 1.5 MPa รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized Shear Stress) และระยะการเคลื่อนที่ (Relative Displacement) ของรอยต่อแห้งแบบสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก โดยในช่วงแรกความสัมพันธ์ลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงเหมือนกับสลักทั่วไปแตกต่างกันเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจนสลักรับแรงเฉือนเกิดการวิบัติ ทำให้กราฟความสัมพันธ์มีลักษณะลดลง แต่ความชันที่ลดลงน้อยกว่าสลักทั่วไปทำให้การผสมเส้นใยเหล็กในสลักรับแรงเฉือนมีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่าสลักทั่วไปเช่นเดียวสลักรับแรงเฉือนหลายสลักที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กดังรูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อแห้งแบบสลักหลายสลัก

ที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก นอกจากมีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่าคอนกรีตทั่วไป การเพิ่มเส้นใยเหล็กทำให้พัฒนาประสิทธิภาพต่อกำลังรับแรงเฉือน



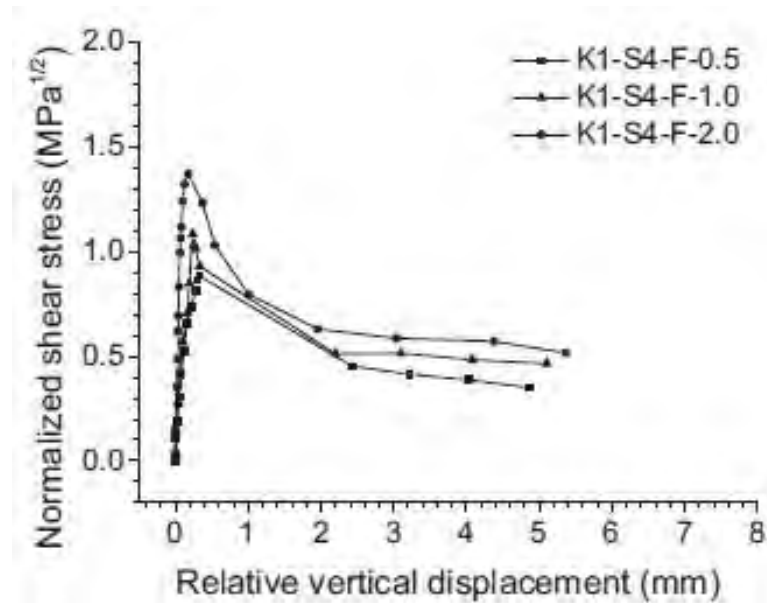
รูปที่ 2.23 รายละเอียดของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน ก.) แบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joints) ข.) แบบหลายสลัก (Multiple-Keyed Joints) [17]



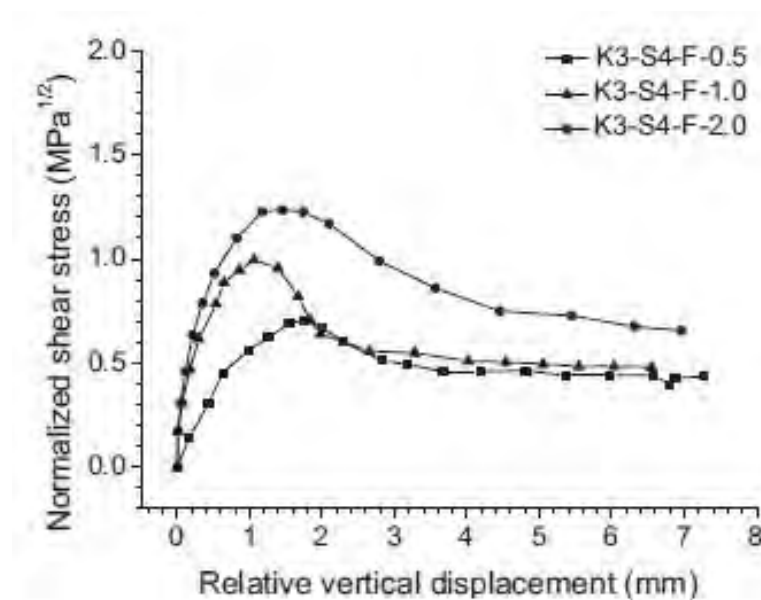
รูปที่ 2.24 ก.) ตัวอย่างเส้นใยเหล็ก ข.) คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก [17]

รูปแบบการแตกร้าวของสลักรับแรงเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.27 หรือหลายสลักแสดงดังรูปที่ 2.28 มีลักษณะคล้ายกันโดยเกิดรอยแตกร้าวที่มุมด้านล่างของตัวสลัก รอยแตกร้าวมีลักษณะเป็นแนวเอียงประมาณ 45 องศาับระนาบแรงเฉือน และรอยแตกยาวขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อรับแรงมากขึ้น รอยแตกจะเพิ่มจำนวนขึ้นจนกระทั่งรอยแตกเชื่อมต่อกัน ซึ่งทำให้สลักรับแรงเฉือนถูกแยกออกจากตัวขึ้นส่วนคอนกรีต สำหรับสลักรับแรงเฉือนหลายสลักจะเกิดการแยกออกจากตัวขึ้นส่วนคอนกรีต

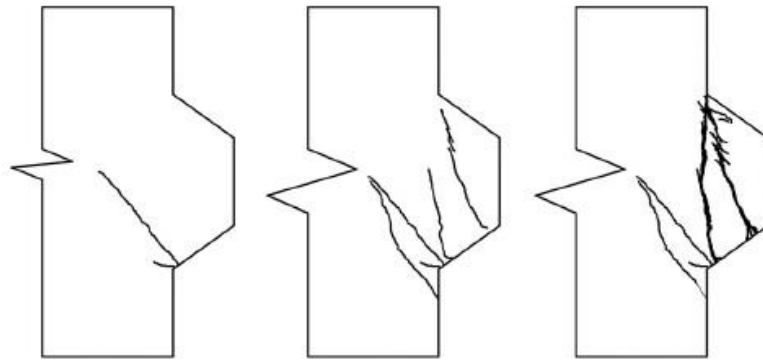
บริเวณสลักบนสุดก่อนหลังจากนั้นจะเป็นตัวกลาง และตัวล่างตามลำดับ การเพิ่มเส้นใยเหล็กทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กๆ จำนวนมากกระจายทั่วสลักรับแรงเฉือน และยังส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวเริ่มต้นช้าลง



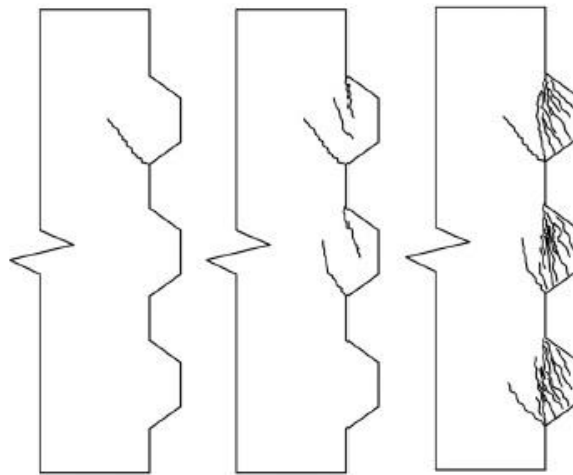
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้ง สลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบแห้ง สลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]



รูปที่ 2.27 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]



รูปที่ 2.28 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก [17]

2.6 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อตามมาตรฐาน ACI 2014 [18] เสนอสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณาเฉพาะแรงเสียดทานสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงของรอยต่อแบบแบนราบหรือไม่มีสลักรับแรงเฉือนไว้ดังสมการที่ 2.1

$$V = \mu A_{joint} \sigma_n \quad (2.1)$$

โดยที่ V คือ กำลังรับแรงเฉือนสำหรับรอยต่อแบบแบนราบ [MN]

μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (coefficient of friction)

σ_n คือ ความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress) [MPa]

กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีความสำคัญ ได้แก่ กำลังรับแรงอัดคอนกรีต (compressive strength) แรงอัดด้านข้าง (confining stress) รูปทรงและขนาดของสลักรับแรงเฉือน และพื้นที่สัมผัสของรอยต่อ โดย AASHTO 2010 [9] เสนอสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนสำหรับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูหลายสลักแบบแห้งไว้ดังสมการที่ 2.2

$$V_j = A_k \sqrt{f'_c} (1 + 0.205 \sigma_n) + (0.6 A_{sm} \sigma_n) \quad (2.2)$$

โดยที่	V_j	คือ กำลังรับแรงเฉือน	[MN]
	A_k	คือ พื้นฐานทั้งหมดของสลักรับแรงเฉือน	[m ²]
	A_{sm}	คือ พื้นที่สัมผัสในแนวตั้งนอกเหนือจากสลักรับแรงเฉือน	[m ²]
	f'_c	คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	[MPa]
	σ_n	คือ ความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress)	[MPa]

งานวิจัยของ Rombach and Specker [19] ได้ทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเสนอสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนสำหรับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูหลายสลักแบบแห้งไว้ดังสมการที่ 2.3

$$V_j = 0.14 f'_c A_k + 0.65 \sigma_n A_{joint} \quad (2.3)$$

โดยที่	V_j	คือ กำลังรับแรงเฉือน	[MN]
	A_k	คือ พื้นฐานทั้งหมดของสลักรับแรงเฉือน	[m ²]
	A_{joint}	คือ พื้นที่ทั้งหมดของรอยต่อในระนาบตั้ง โดยที่ $A_{joint} = A_k + A_{sm}$	[m ²]
	f'_c	คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	[MPa]
	σ_n	คือ ความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress)	[MPa]

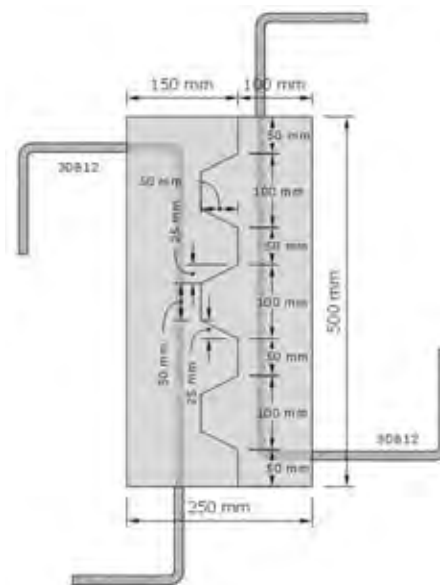
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

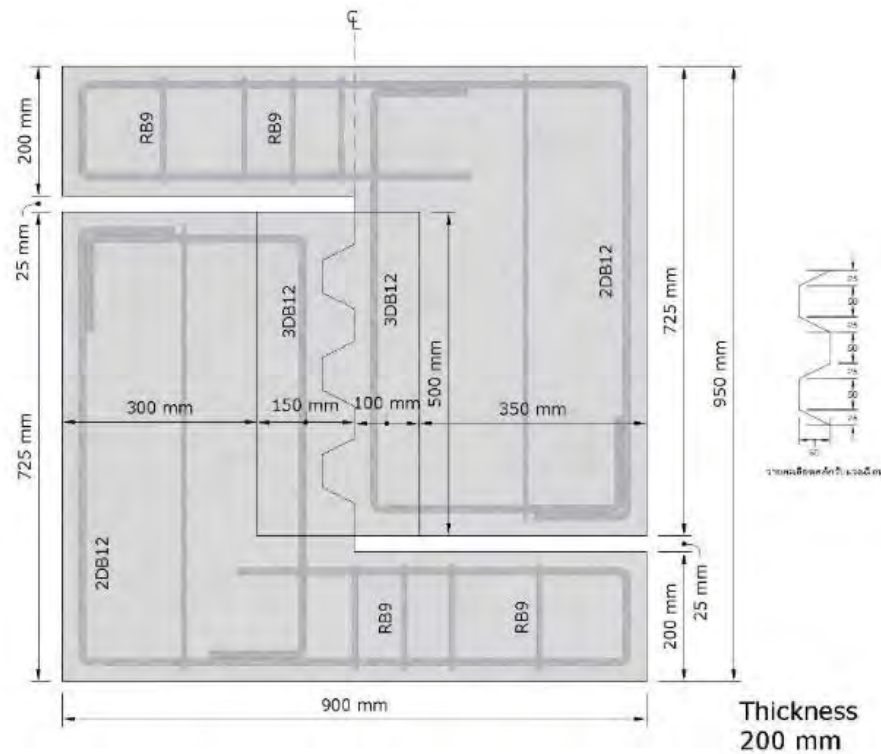
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งหลายสลัก โดยขึ้นตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ ประกอบด้วยรอยต่อพิเศษ (special joint) จำนวน 4 ชนิด ที่ทำจากคอนกรีตปกติ, คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% และ 1% ของสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) รอยต่อพิเศษนี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สลักรับแรงเฉือนสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมขึ้นตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ กับขึ้นตัวอย่างทดสอบ และการทดสอบโดยการกดอัดขึ้นตัวอย่างด้วยการให้แรงแบบสม่ำเสมอ (Monotonic Load)

3.1 ขึ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

ขึ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบรับแรงเฉือนนั้น ออกแบบให้เป็นรอยต่อแบบแห้ง 3 สลัก (3-Keyed Joints) โดยมีขนาดคล้ายกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2005). [15] และวริศร์ ศิริโสสม (2017). [20] แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนารอยต่อขึ้นใหม่ โดยทำการหล່รรอยต่อพิเศษ (special joint) (ดังรูปที่ 3.1) ขึ้นมาก่อน โดยให้สลักรับแรงเฉือนเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีมุมเอียง 45 องศา ยื่นออกมาจากตัวรอยต่อ หลังจากนั้นจึงทำการหล่อส่วนที่เหลือด้วยคอนกรีตธรรมดาเพื่อเป็นขึ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบพฤติกรรมของรอยต่อภายใต้แรงเฉือนโดยตรงที่ปราศจากผลของแรงดัดต่อไป (ดังรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 รอยต่อพิเศษแบบแห้ง (special dry joint)



รูปที่ 3.2 รายละเอียดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

ชื่อชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ประเภท ย่อกำกับด้วยตัวพยัญชนะภาษาอังกฤษและตัวเลขโดยความหมายดังนี้

- NC หมายถึง รอยต่อสำหรับคอนกรีตปกติ
- HSC หมายถึง รอยต่อสำหรับคอนกรีตกำลังสูง
- 0.5SF หมายถึง คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อพิเศษแบบแห้ง 0.5 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction)
- 1SF หมายถึง คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อพิเศษแบบแห้ง 1 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction)

ตัวเลขลำดับสุดท้าย หมายถึง หมายเลขของชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยที่รอยต่อสำหรับคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ขณะที่ทำการทดสอบจะมีลักษณะการให้แรงอัดด้านเป็นแบบคงที่และไม่คงที่ ส่วนรอยต่อที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กมีเฉพาะการให้แรงอัดด้านข้างคงที่ รายละเอียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ การให้แรงอัดด้านข้างเริ่มต้นและลักษณะการให้แรงอัดด้านข้างแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1



39772945745

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการอัดแรงด้านข้างของชิ้นตัวอย่างทดสอบ

Name	Initial confining stress (MPa)	ลักษณะการให้แรงอัดด้านข้าง
NC-1*	0.4	ไม่คงที่
NC-2*	0.4	ไม่คงที่
NC-3	1	คงที่
HSC-1	1	คงที่
HSC-2*	0.4	ไม่คงที่
HSC-3*	0.4	ไม่คงที่
0.5SF-1	1	คงที่
0.5SF-2	1	คงที่
0.5SF-3	1	คงที่
1SF-1	1	คงที่
1SF-2	1	คงที่
1SF-3	1	คงที่

หมายเหตุ * หมายถึง ชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะการให้แรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่

3.2 วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, มวลรวมหยาบ, มวลรวมละเอียด, น้ำ, น้ำยาผสมคอนกรีตซูเปอร์พลาสติกไฮเซเซอร์ ประเภทโพลีคาร์บอเนต คุณสมบัติเทียบเท่ากับมาตรฐาน EN 934-2 และเส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC-65/35-BN ตามมาตรฐาน ASTM A820 แสดงดังรูปที่ 3.3 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กแสดงดังตารางที่ 3.2 ปริมาณสัดส่วนผสมคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงของรอยต่อพิเศษแบบแห้งแสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC 65/35 BN

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กชนิด Dramix RC 65/35 BN

Aspect Ratio (l/d)	Length (mm)	Diameter (mm)	Fiber Network (fibers/kg)	Tensile Strength (N/mm ²)	Young's Modulus (MPa)
65	35	55	14500	1100	210000

การผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อพิเศษแบบแห้ง มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการให้รอยต่อพัฒนาประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนได้ดียิ่งขึ้น สามารถในชะลอการแตกร้าวเริ่มต้น และพฤติกรรมการวิบัติที่เหนียวกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสัดส่วนผสมคอนกรีตของรอยต่อพิเศษแบบแห้ง

Name	พอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ (kg/m ³)	มวลรวม หยาบ (kg/m ³)	มวลรวม ละเอียด (kg/m ³)	น้ำ (litre/m ³)	น้ำยาผสม คอนกรีต ชูเปอร์พลาสติก ไฮเซออร์ (mL)	เส้นใยเหล็ก (kg/m ³)
NC	434	1040	628	216	-	-
HSC	594	1090	540	180	156	-
0.5SF	434	1040	628	216	-	39.3
1SF	434	1040	628	216	-	78.6

3.3 การเตรียมชิ้นตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

วัตถุประสงค์สำหรับการทดสอบรอยต่อของสลักรับแรงเฉือน การทดสอบทำขึ้นเพื่อศึกษา กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ พฤติกรรมของรอยต่อเมื่อรับแรงเฉือน และรูปแบบการวิบัติของรอยต่อ รวมถึงศึกษาข้อดีข้อด้อยของรอยต่อในประเภทต่าง ๆ เมื่อรอยต่อรับแรง การทดสอบจะเริ่มโดยการหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างรอยต่อพิเศษแบบแห้งแต่ละประเภทขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นทำการหล่อส่วนที่เหลือด้วยคอนกรีตธรรมดา ที่มีกำลังอัด 30 เมกะปาสคาล สำหรับทำการทดสอบ นำชิ้นส่วนตัวอย่างให้แรงด้านข้างเริ่มต้น 0.4, 1 เมกะปาสคาล (0.4, 1 MPa) โดยระหว่างทำการทดสอบจะมีชิ้นตัวอย่างให้แรงอัดด้านข้างคงที่ และไม่คงที่ หลังจากนั้นให้แรงกดอัดแบบคงที่บริเวณด้านบนของชิ้นตัวอย่างทดสอบ จนกระทั่งรอยต่อไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป

3.3.1 การเตรียมชิ้นส่วนตัวอย่าง

การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบอันดับแรกคือ การสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำหรับการทดสอบของรอยต่อขึ้น โดยทำการหล่อชิ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักที่เป็นรอยต่อสลักตัวผู้ ลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูขึ้นมาก่อนในแบบหล่อที่ทำขึ้นจากแผ่นเหล็กประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อได้ชิ้นส่วนรอยต่อสลักตัวผู้แล้ว หลังจากนั้นทำการเข้าแบบใหม่โดยให้รอยต่อสลักตัวผู้เป็นแบบข้างเพื่อทำการหล่อรอยต่อสลักตัวเมียแสดงดังรูปที่ 3.5 วิธีการหล่อในลักษณะนี้เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ เมื่อนำมาประกอบกันทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างรอยต่อ ขณะทำการทดสอบเพื่อให้รับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ทำการหล่อรอยต่อพิเศษมีการใส่เหล็กเสริมพิเศษขนาด 12 มิลลิเมตรจำนวน 3 เส้นเพื่อป้องกันการวิบัติที่ไม่ได้เกิดจากการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนในรอยต่อ



รูปที่ 3.4 แบบหล่อขึ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลัก - สลักตัวผู้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 แบบหล่อขึ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลัก - สลักตัวเมีย ก.) ก่อนเท ข.) หลังเท

หลังจากที่ทำการหล่อขึ้นส่วนรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักไปแล้วทั้ง 4 ประเภท จากนั้นจึงจะทำการหล่อส่วนที่เหลือด้วยคอนกรีตธรรมดาที่กำลังอัด 30 เมกะปาสคาล เพื่อเป็นชิ้นส่วนตัวอย่างที่จะใช้สำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นทำการบ่มคอนกรีต

เป็นเวลา 28 วัน ด้วยการใช้กระสอบป่านคลุมชิ้นส่วนตัวอย่างและทำการพรมน้ำทุกๆ 3-4 วัน แสดงดังรูปที่ 3.8 ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นส่วนเสร็จสมบูรณ์ และพร้อมสำหรับการเตรียมการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.6 แบบหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบก่อนเท



รูปที่ 3.7 แบบหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบหลังเท



3972945745

CU Thesisis 5970301621 thesisis / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11



รูปที่ 3.8 การบ่มชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ

1.) เครื่องทดสอบแรงกด

เครื่องทดสอบแรงกด AMSLER 500T (Universal Testing Machine) แสดงดังรูปที่ 3.9 ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ จุดประสงค์หลักเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุวัสดุที่สามารถใช้ทดสอบ อย่างเช่น ยาง, พลาสติก, เหล็ก, โลหะ, คอนกรีต, ไม้ และอื่นๆ โดยใช้สำหรับการทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบแรงกด, การทดสอบแรงดัด, การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบอื่น ๆ ที่ถูกกำหนดตามมาตรฐานของการทดสอบ



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงกด AMSLER 500T

2.) โหลดเซลล์

โหลดเซลล์ (Load Cell) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงค่าจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า สามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปจ่ายเข้าจอแสดงผล (Display) แสดงค่าเป็นน้ำหนักหรือแรงที่กระทำ โดยโหลดเซลล์ที่ใช้เป็นโหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 30 ตัน แสดงดังรูปที่ 3.10 และโหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 200 ตัน แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 30 ตัน



รูปที่ 3.11 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 200 ตัน

3.) อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง

อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) แสดงดังรูปที่ 3.12 หลักการทำงานจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่ง

4.) เครื่องบันทึกข้อมูล

เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) แสดงดังรูปที่ 3.13 เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ บันทึกข้อมูลและแสดงผลโดยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลขณะที่ทำการทดสอบได้

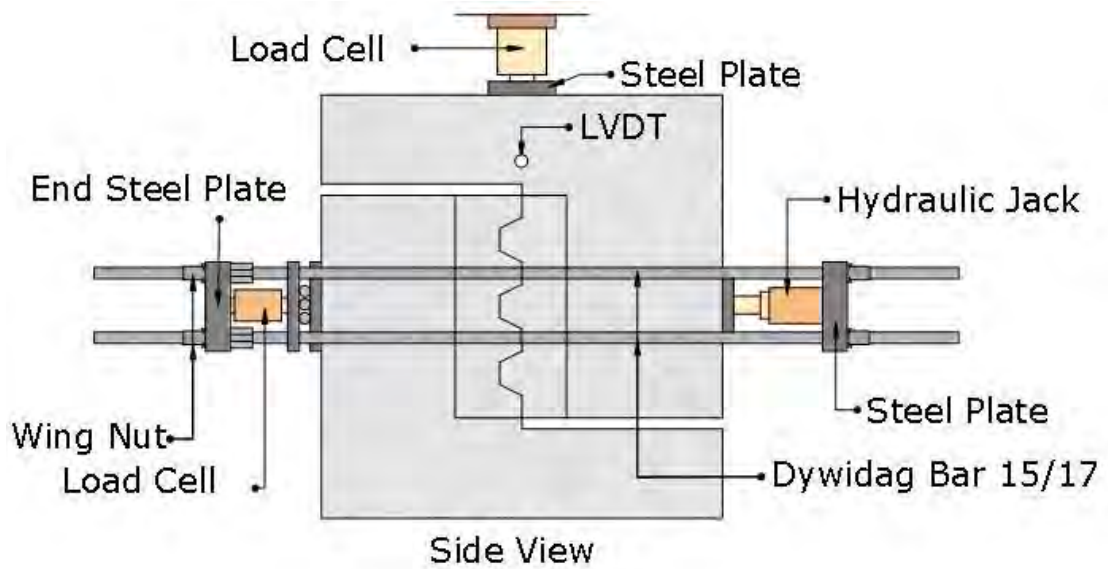


รูปที่ 3.13 เครื่องบันทึกข้อมูล

3.3.3 วิธีการทดสอบ

วิธีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ แสดงดังรูปที่ 3.14 ก่อนทำการทดสอบรับแรงต้องมีการให้แรงอัดด้านข้าง (Confining Stress) แก่ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ เป็นการจำลองแรงจากลวดอัดแรงจริงในงานก่อสร้าง โดยขั้นตอนในการอัดแรงด้านข้างนั้น จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ในลักษณะโครงรับแรง แสดงดังรูปที่ 3.15 จากนั้นใช้แม่แรงไฮดรอลิก

(Hydraulic Jack) สำหรับดันกับโครงรับแรงเพื่อเกิดแรงดันด้านข้างเริ่มต้น 0.4, 1 เมกะปาสคาล (0.4, 1MPa) ตามการทดสอบของชิ้นตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.16 การวัดแรงอัดด้านข้างได้จากอุปกรณ์ โหลดเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 30 ตัน



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงเฉือน



รูปที่ 3.15 โครงรับแรงสำหรับอัดแรงด้านข้างชิ้นส่วนทดสอบ



รูปที่ 3.16 แม่แรงไฮดรอลิคสำหรับต้นโครงรับแรงให้เกิดแรงด้านข้าง

หลังจากทำการอัดแรงด้านข้างแล้วจึงนำชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงกด ติดตั้งโพลีเซลล์รับน้ำหนักขนาดพิกัด 200 ตัน ไว้ด้านบนของชิ้นตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลแรงเฉือน และติดตั้งอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนาแบบเชิงเส้น (LVDT) ด้านข้างทั้งสองฝั่งของชิ้นตัวอย่างสำหรับวัดระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 3.17 หลังจากนั้นเริ่มการทดสอบโดยการให้แรงแบบสม่ำเสมอ (Monotonic Load) และควบคุมการให้แรงด้านข้างตลอดการทดสอบ



รูปที่ 3.17 การทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่าง

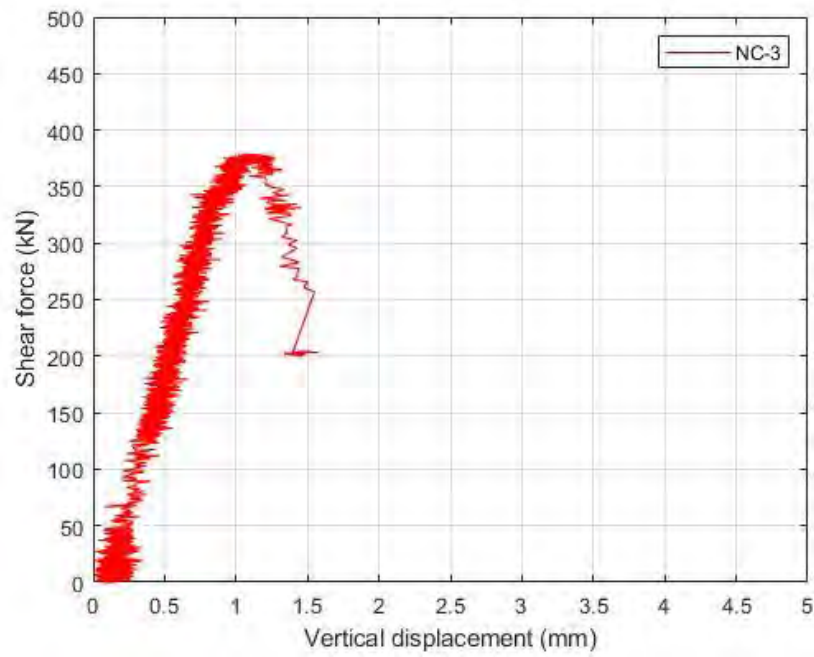
บทที่ 4

ผลการวิจัย

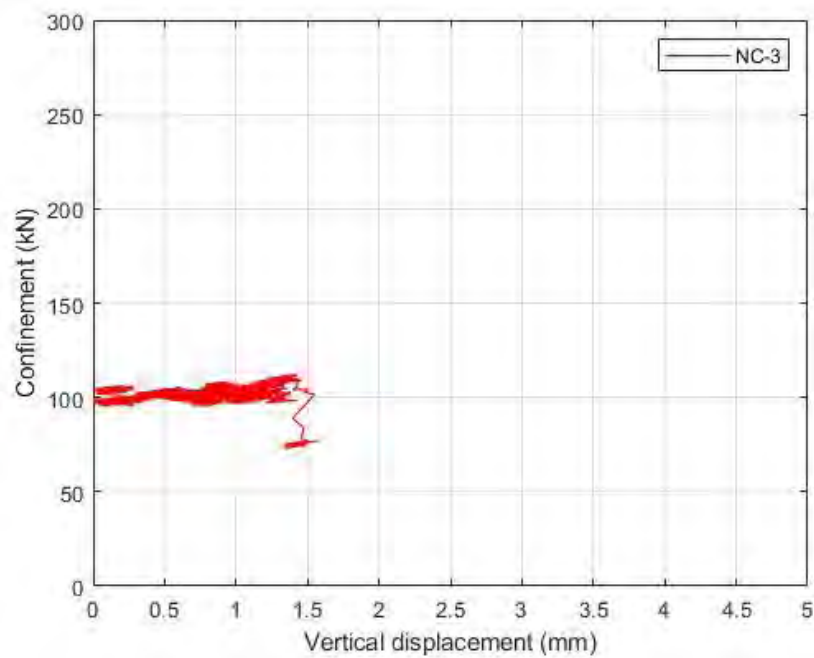
จากการทดสอบการรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักกับชิ้นตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในบทที่ 3 ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบในด้าน พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อ รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ เปรียบเทียบความสามารถ การรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษทั้ง 4 ประเภทที่ทำจากคอนกรีตปกติ คอนกรีตกำลังสูง และ คอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตร อีกทั้งเปรียบเทียบกำลังรับ แรงเฉือนของรอยต่อระหว่างผลการทดสอบกับสูตรการออกแบบตามมาตรฐาน AASHTO (สมการที่ 2.2) และสูตรที่เสนอโดย Rombach and Specker (สมการที่ 2.3)

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

การทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างที่มีรอยต่อพิเศษเป็นคอนกรีตปกติได้ผลของแรงเฉือนแสดงดังรูป ที่ 4.1 โดยในระหว่างการทดสอบมีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่แสดงดังรูปที่ 4.2 จาก กราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกความสัมพันธ์ลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงเหมือนกับสลักรับแรงเฉือนทั่วไป แตกต่างกันเมื่อชิ้นตัวอย่าง NC-3 ที่มีลักษณะการให้แรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ เมื่อถึงจุดรับแรง เฉือนสูงสุดแล้ว แรงเฉือนตกลงโดยที่แรงเฉือนไม่เพิ่มขึ้น ลักษณะดังกล่าวคล้ายกับพฤติกรรมการรับ แรงของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยวเช่นเดียวกับงานวิจัย Zhou et al. [15] ในส่วนของชิ้นตัวอย่าง NC-1* และ NC-2* ที่มีผลของแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยในระหว่างการทดสอบมีการควบคุม แรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่แสดงดังรูปที่ 4.4 จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อถึงจุดรับแรงเฉือนสูงสุด แล้วจะเป็นจุดที่สลักรับแรงเฉือนขึ้นแรกได้วิบัติลง หลังจากแรงเฉือนตกลง พบว่าบางช่วงแรงเฉือน เพิ่มขึ้นตามการให้แรงอัดด้านข้าง แต่ไม่ถึงค่าของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด จนกระทั่งสลักรับแรงขึ้น สุดทำยได้วิบัติลง จึงเป็นจุดสิ้นสุดการรับแรงเฉือนของรอยต่อลักษณะดังกล่าวคล้ายกับพฤติกรรมการ รับแรงของรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก



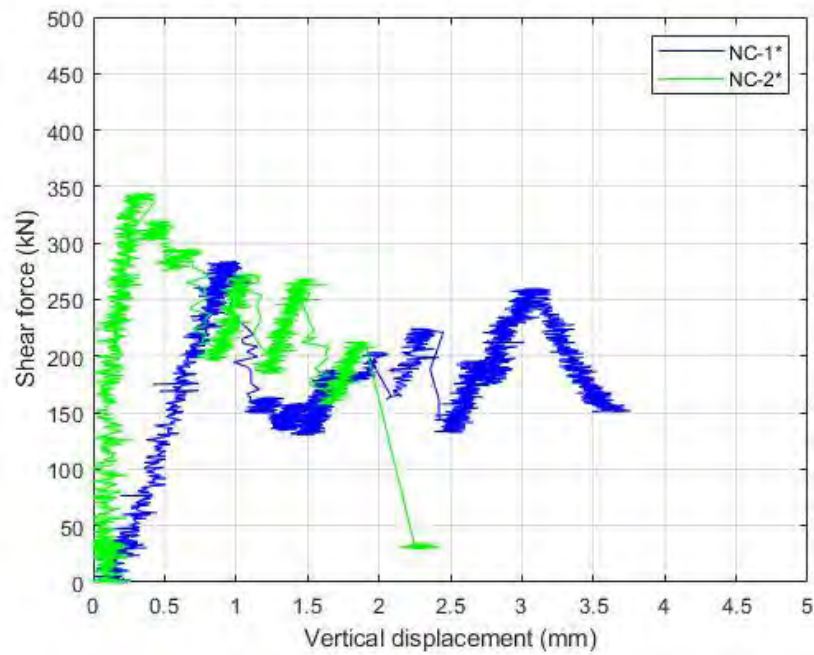
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่



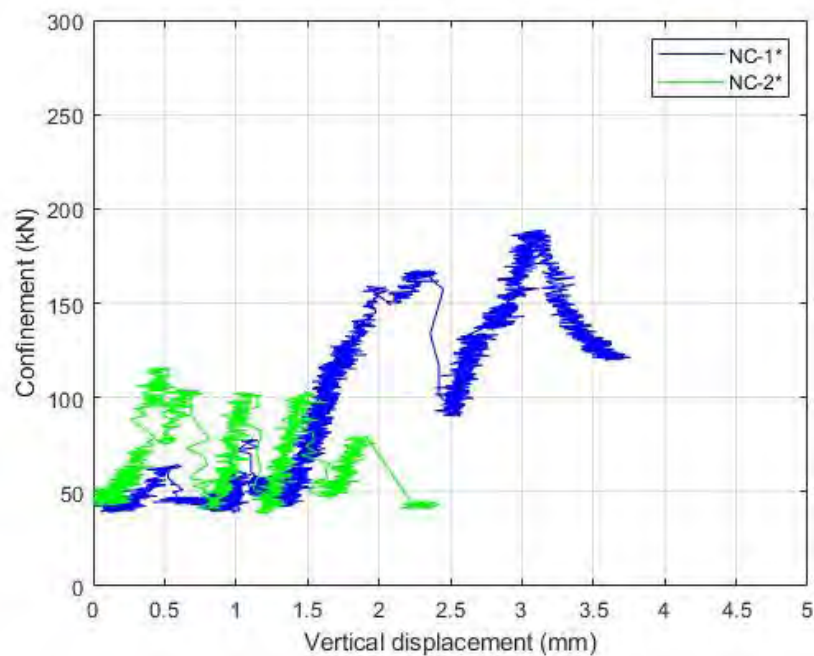
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่



3972945745

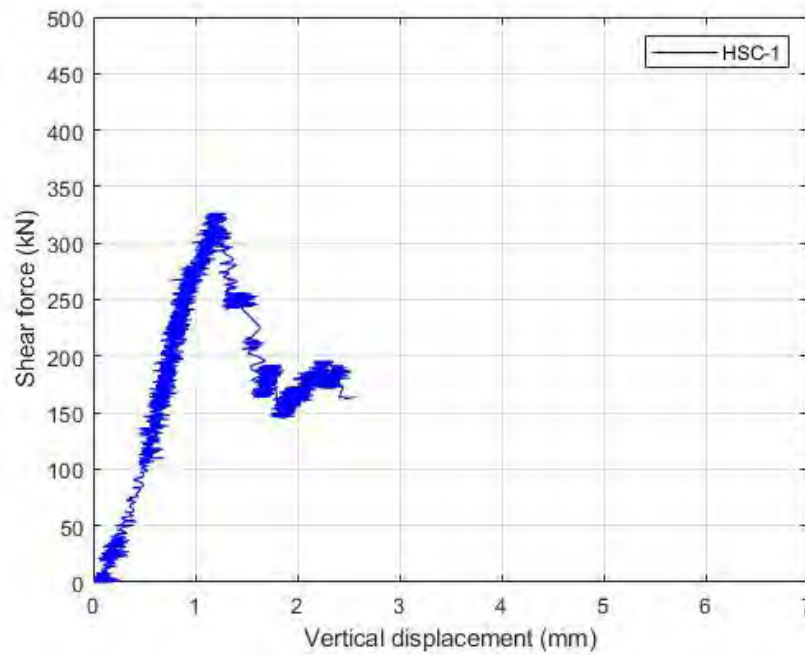


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่

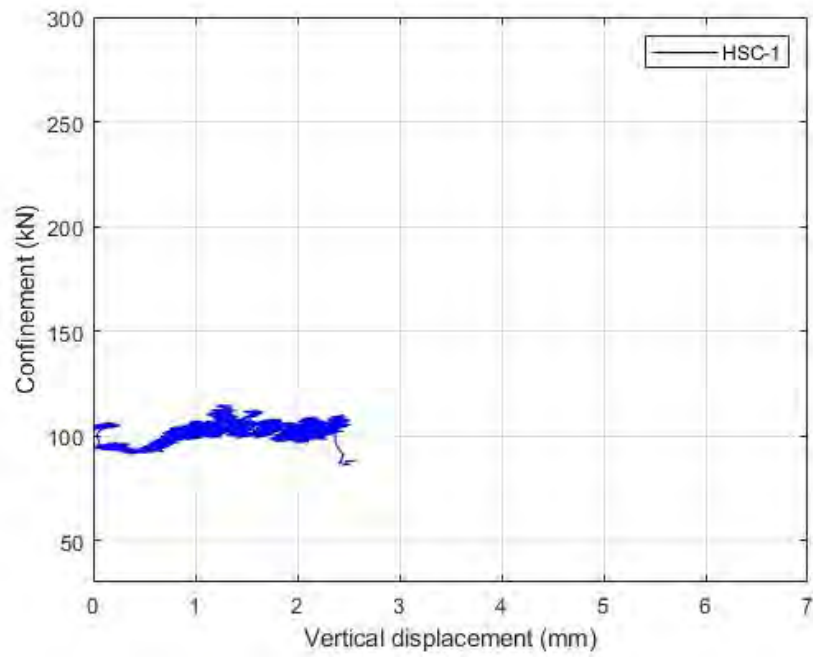


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตปกติที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่

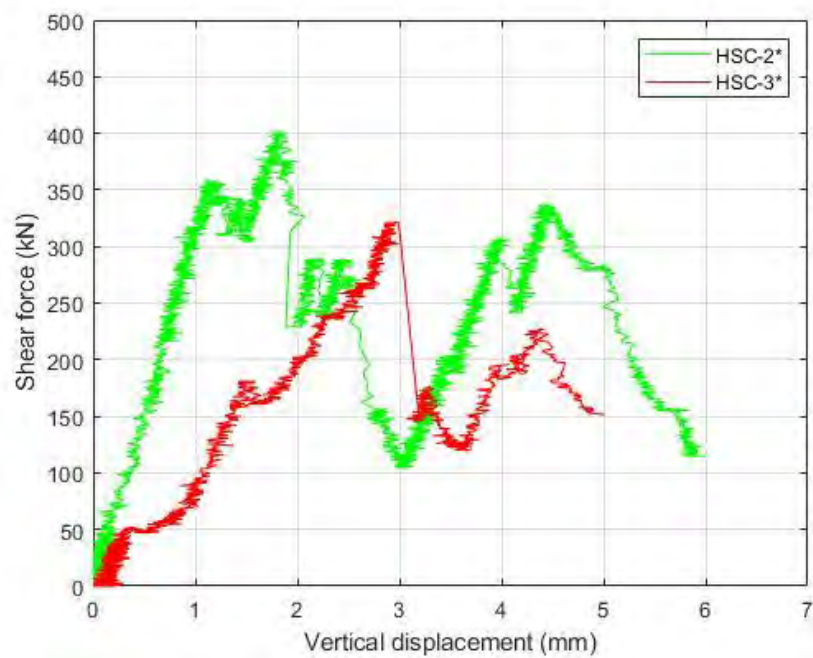
การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีรอยต่อพิเศษเป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ผลของแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 โดยในระหว่างการทดสอบมีการควบคุมแรงอัดด้านข้างไว้แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 ลักษณะกราฟจะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมคล้ายกับรอยต่อพิเศษที่ทำจากคอนกรีตปกติ โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกัน



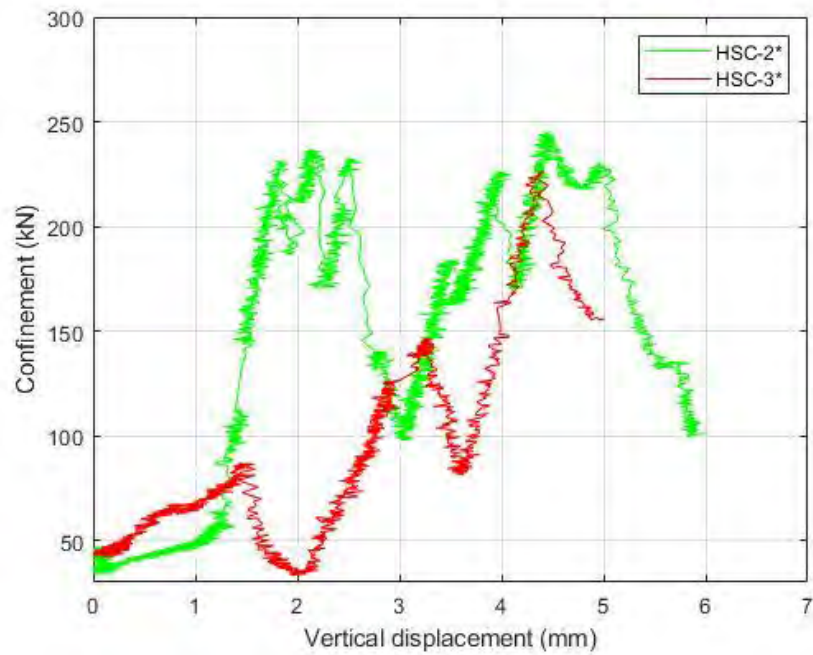
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่

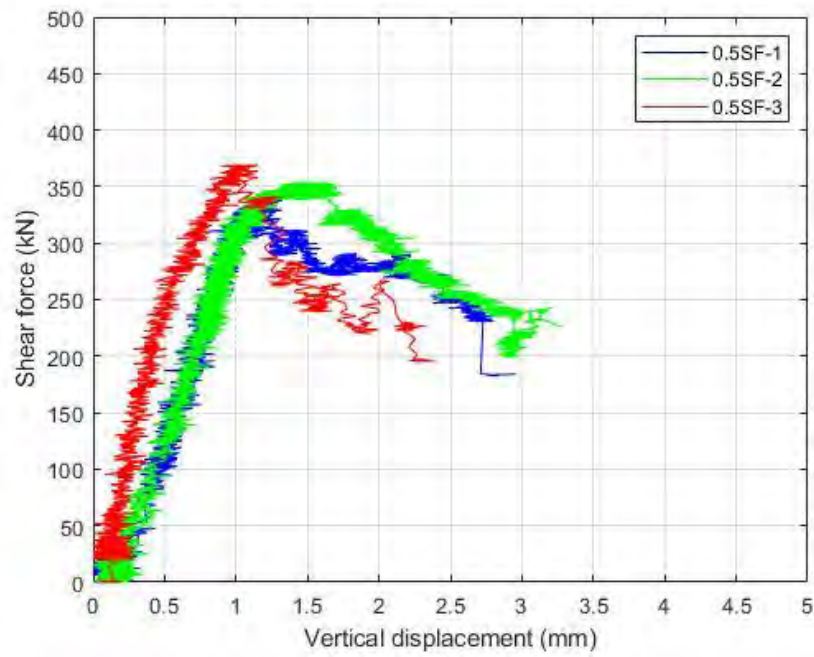


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่

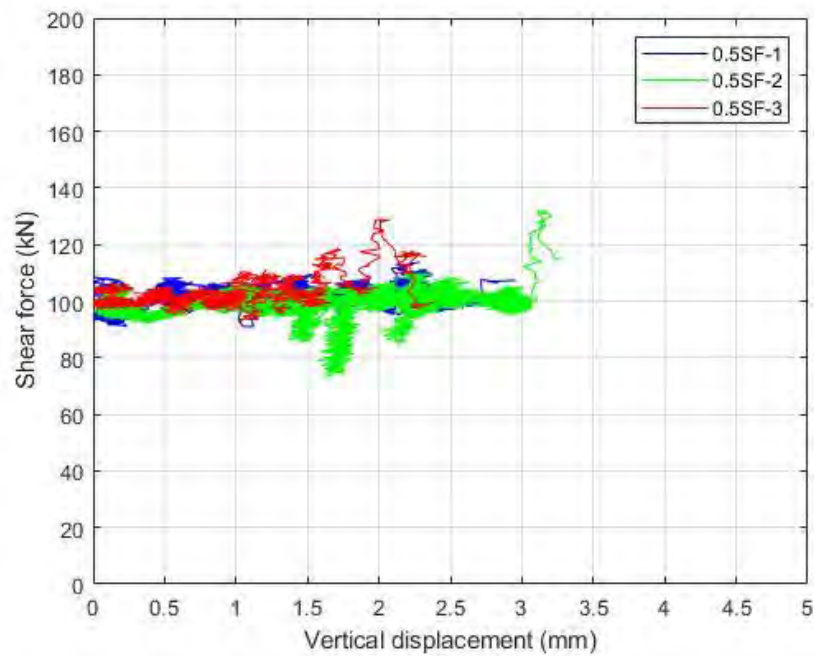


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการควบคุมแรงอัดด้านข้างเป็นแบบไม่คงที่

การทดสอบขึ้นตัวอย่างที่มีรอยต่อพิเศษทำจากคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตรได้ผลของแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยในระหว่างการทดสอบมีการควบคุมแรงอัดด้านข้างไว้แสดงดังรูปที่ 4.10 จากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกความสัมพันธ์ลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงแต่มีความชันน้อยกว่าสลักรับแรงเฉือนทั่วไป แต่เมื่อหลังจากแรงกระทำเพิ่มขึ้นจนสลักรับแรงเฉือนเกิดการวิบัติ ทำให้กราฟความสัมพันธ์มีลักษณะลดลง แต่ความชันที่ลดลงน้อยกว่ารอยต่อที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ทำให้การผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อของสลักรับแรงเฉือนมีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่ารอยต่อของสลักรับแรงเฉือนที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง

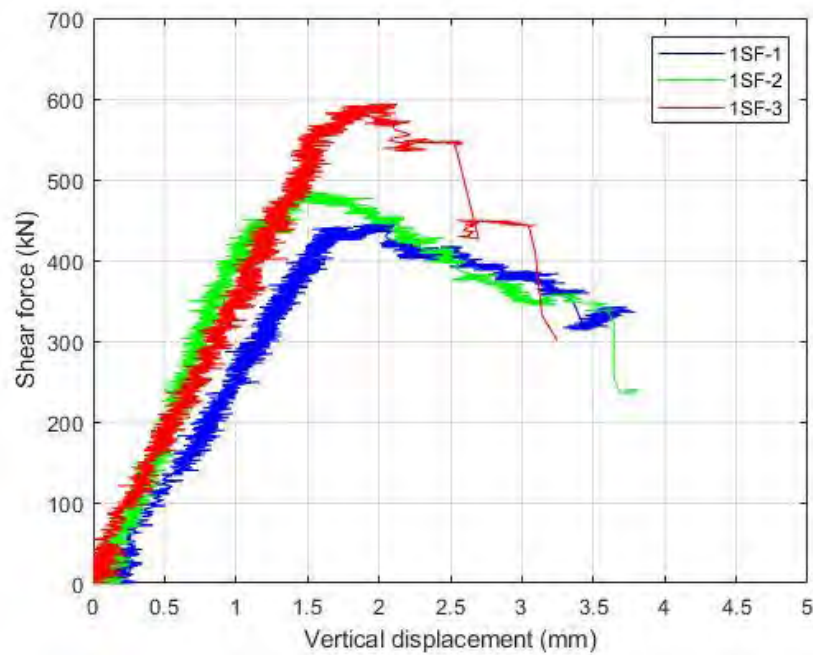


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์

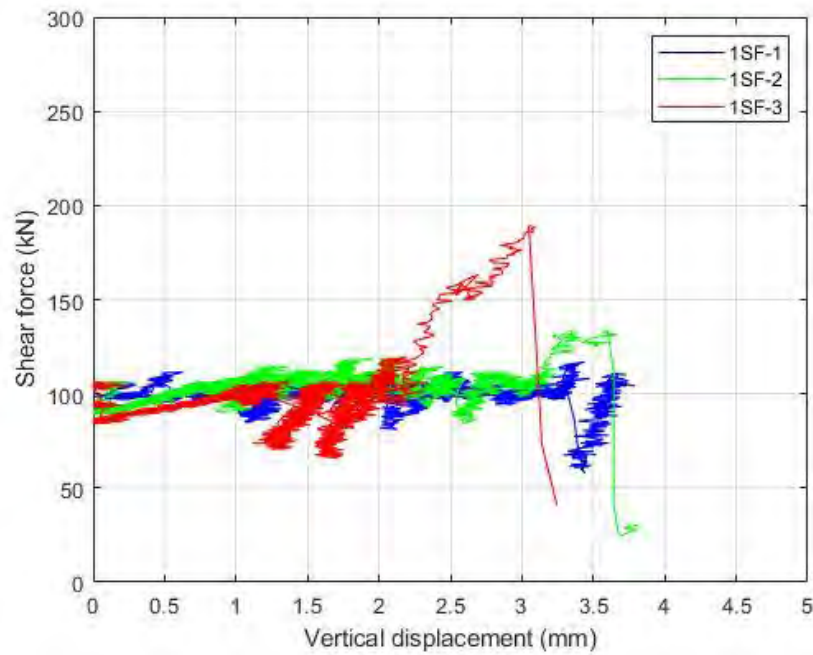


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีรอยต่อพิเศษเป็นคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์ของ สัดส่วนโดยปริมาตรได้ผลของแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยในระหว่างการทดสอบมีการควบคุม แรงอัดด้านข้างไว้แสดงดังรูปที่ 4.12 จากลักษณะกราฟจะเห็นได้ว่าคล้ายกับรอยต่อพิเศษที่ทำจาก คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์ และการผสมเส้นใยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์จากกราฟจะเห็นได้ ว่าทำให้รับแรงเฉือนได้มากขึ้น และลักษณะการวิบัติเป็นแบบเหนียว

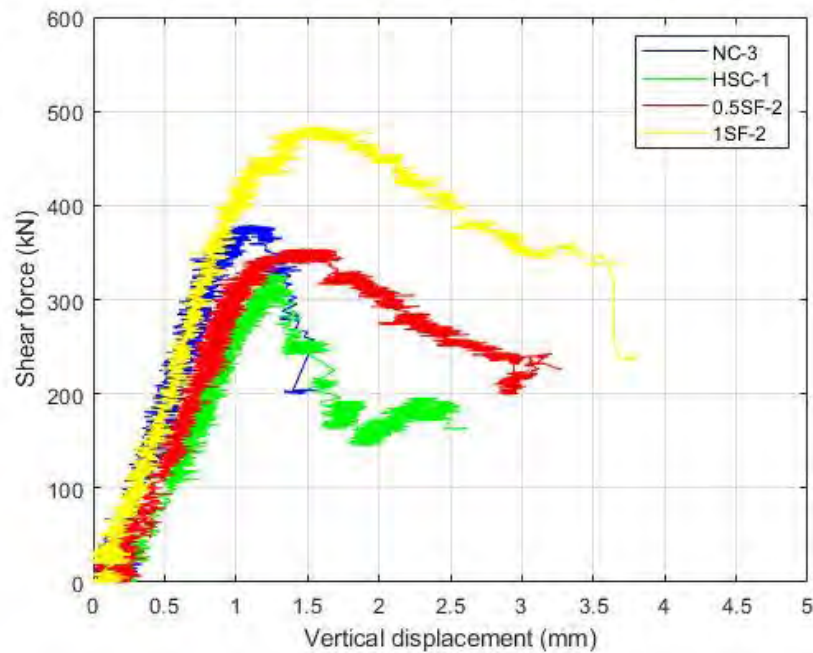


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดด้านข้าง และระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของรอยต่อพิเศษทั้ง 4 ประเภทที่มีลักษณะการให้แรงอัดด้านข้างเป็นแบบคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นตัวอย่าง 1SF-2 ที่เป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างอื่น และการเพิ่มเส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมในรอยต่อส่งผลให้มีพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียวมากกว่ารอยต่อพิเศษที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง

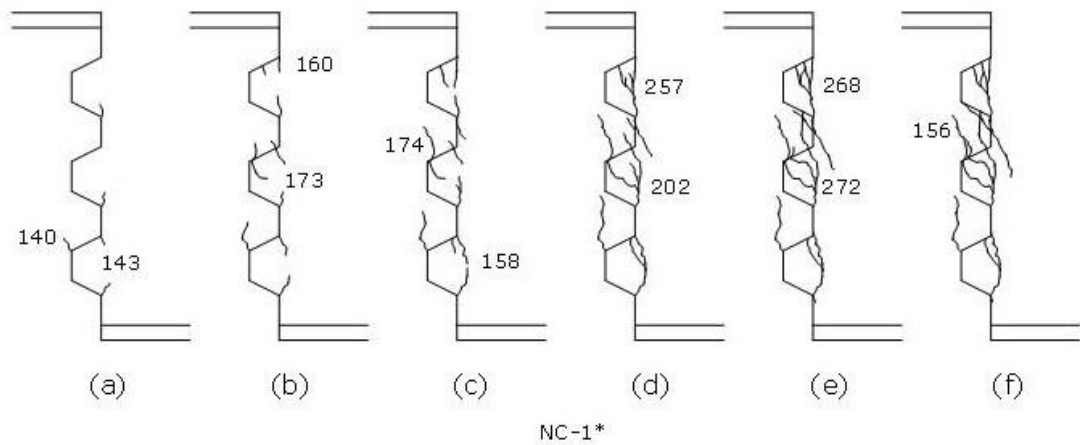


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีต

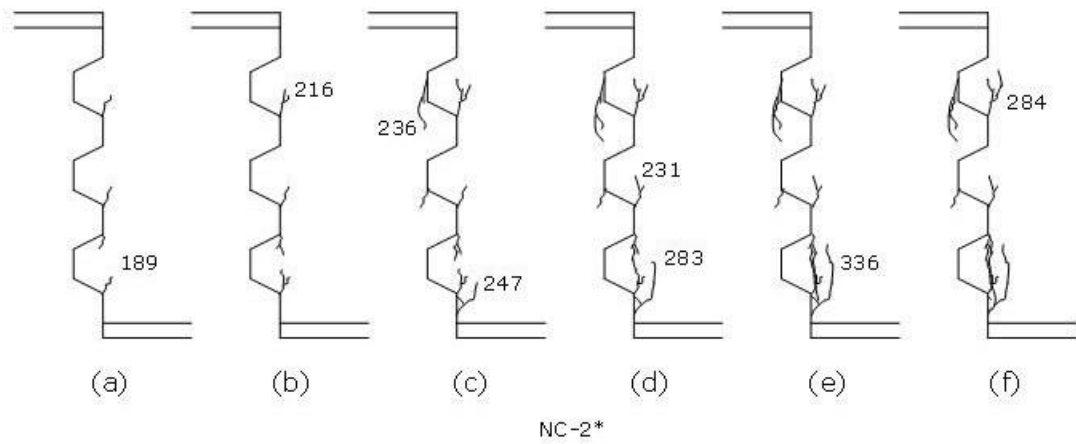
ทั้ง 4 ชนิด

4.2 รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน

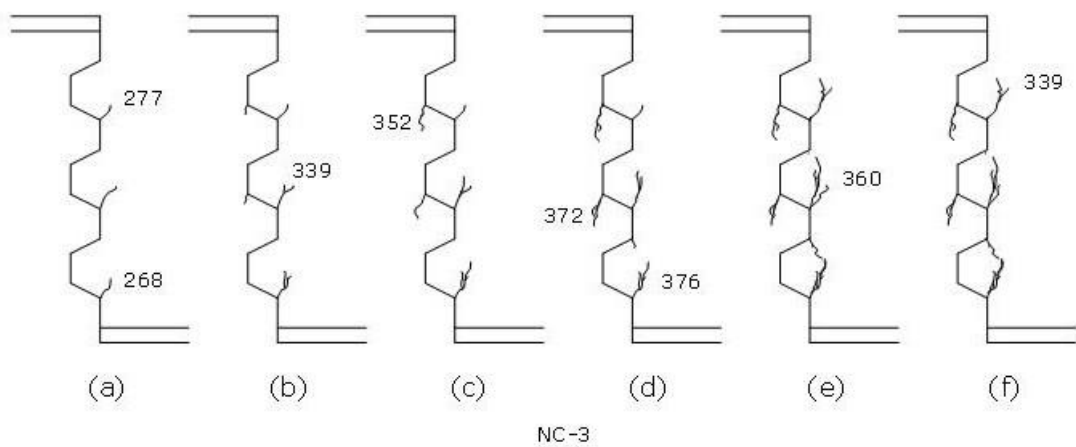
รูปแบบของรอยแตกและการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบ เริ่มพบรอยแตกแรกเมื่อกำลังรับแรงเฉือนประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด โดยพบรอยแตกแรกบริเวณมุมล่างสุดของสลักรับแรงเฉือนซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นของความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างมากตรงบริเวณมุมของสลักรับแรงเฉือน ลักษณะของรอยแตกจะทำมุม 45 องศากับระนาบแรงเฉือน และเมื่อเพิ่มแรงกดมากขึ้นพบรอยแตกเล็กๆ เพิ่มขึ้นตามบริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือน จนกระทั่งรอยแตกทั้งหมดเชื่อมต่อกันเป็นจุดวิบัติของสลักรับแรงเฉือน และสิ้นสุดการรับแรงของรอยต่อ ลักษณะของการแตกร้าวมักมีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับรอยต่อทั้ง 4 ประเภท แตกต่างกันว่ารอยต่อที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กจะเกิดรอยแตกร้าวนขนาดเล็กๆ กระจายทั่วสลักรับแรงเฉือน และจากการสังเกตพบว่ารอยแตกร้าวนเกิดช้ากว่ารอยแตกร้าวนที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jiang et al. [17] รูปแบบการแตกร้าวนของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อทั้ง 4 ประเภทแสดงดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.25



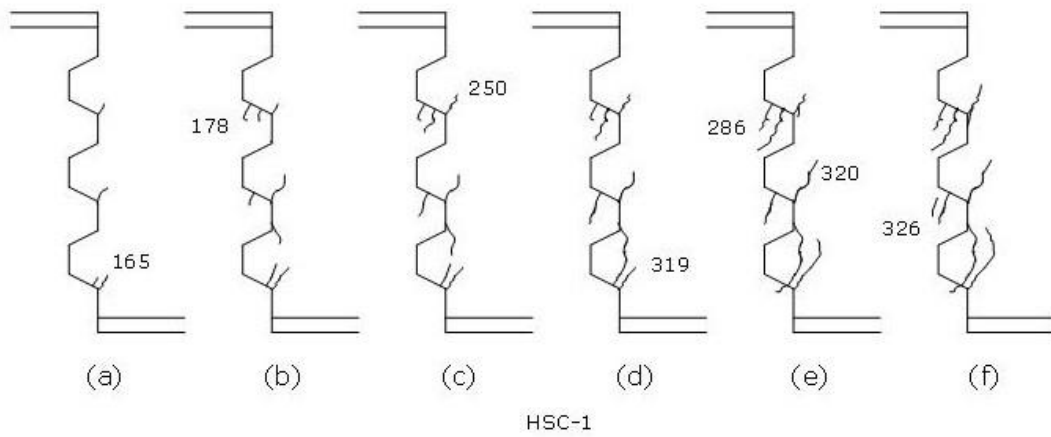
รูปที่ 4.14 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-1*



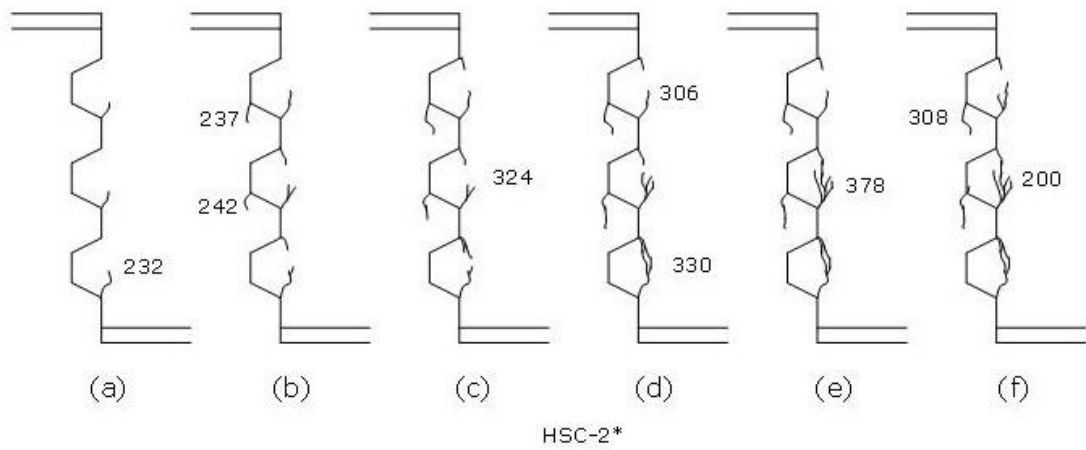
รูปที่ 4.15 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-2*



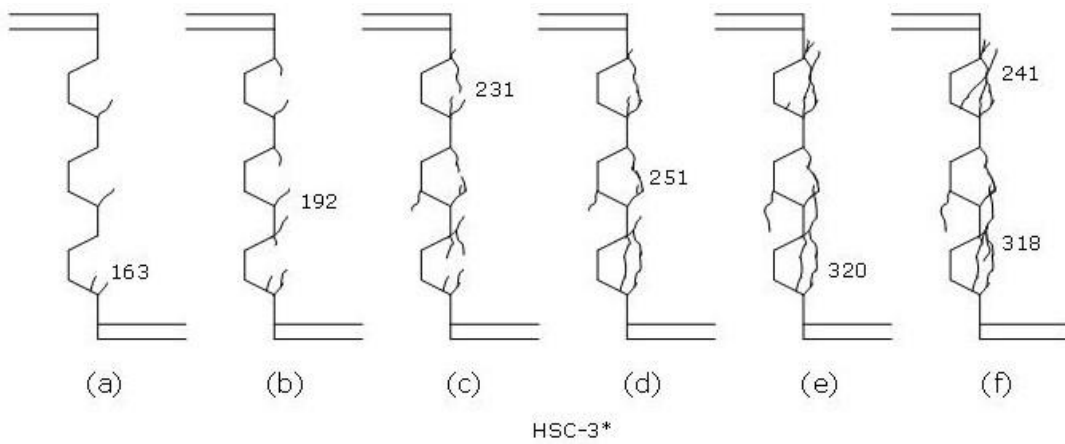
รูปที่ 4.16 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ NC-3



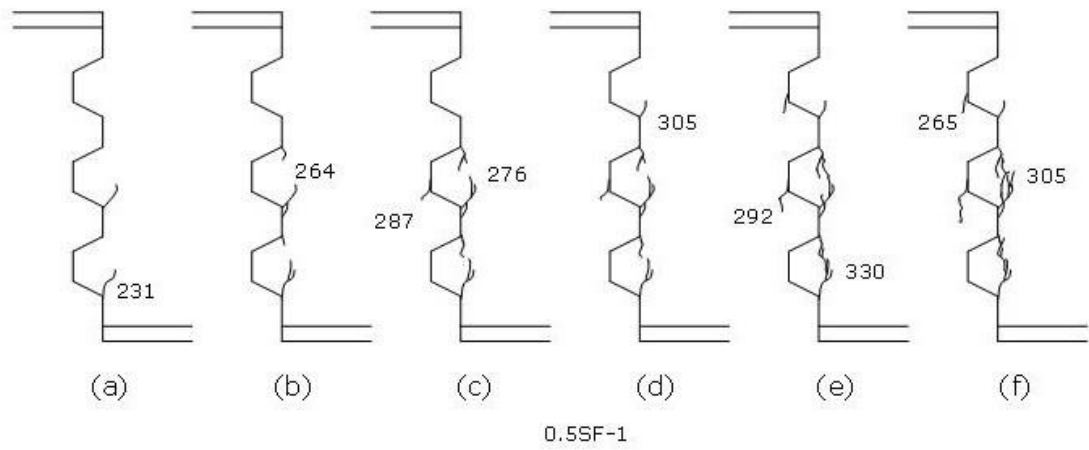
รูปที่ 4.17 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-1



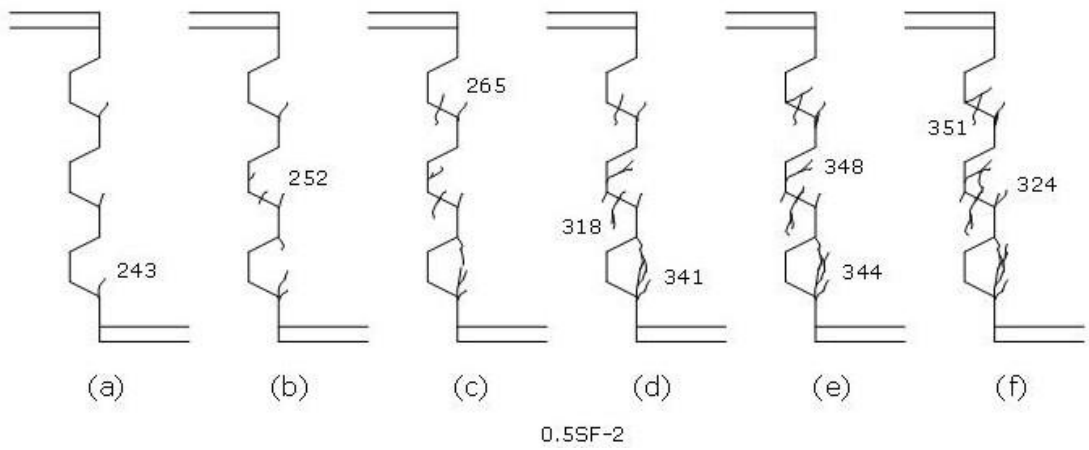
รูปที่ 4.18 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-2*



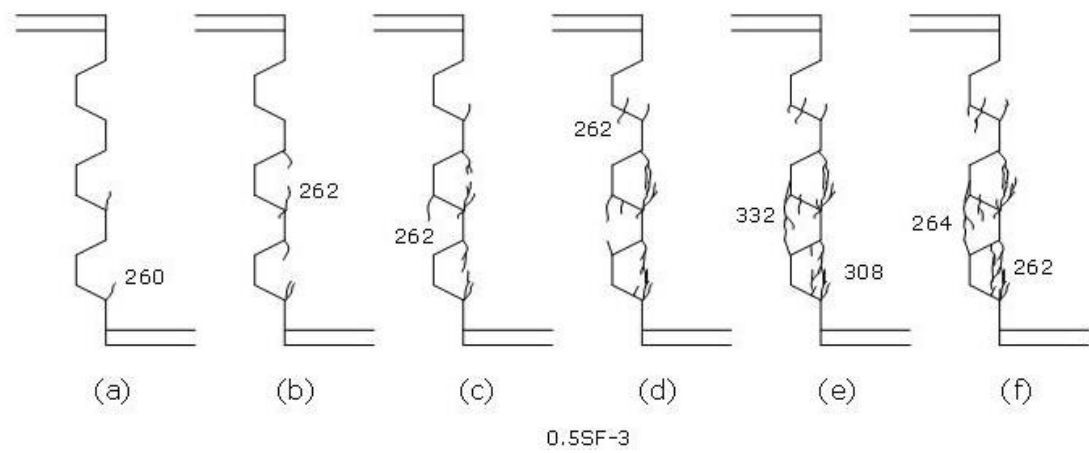
รูปที่ 4.19 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ HSC-3*



รูปที่ 4.20 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลับกับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-1



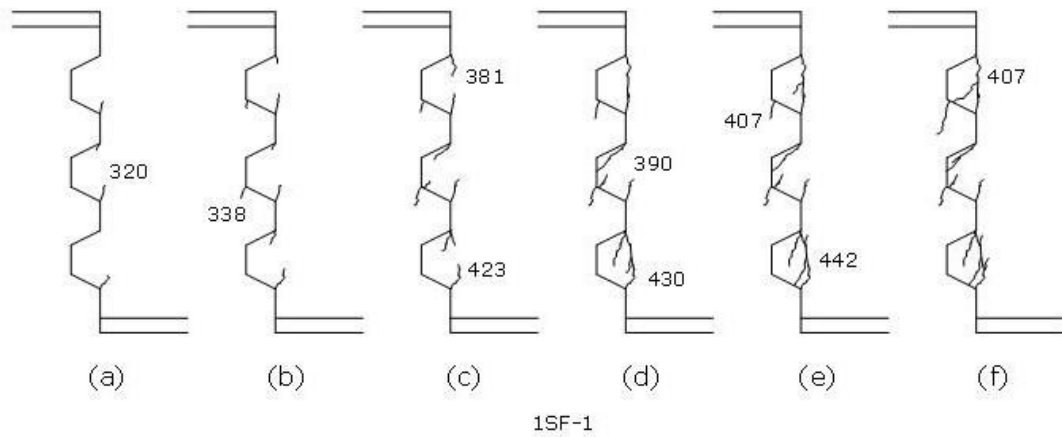
รูปที่ 4.21 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลับกับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-2



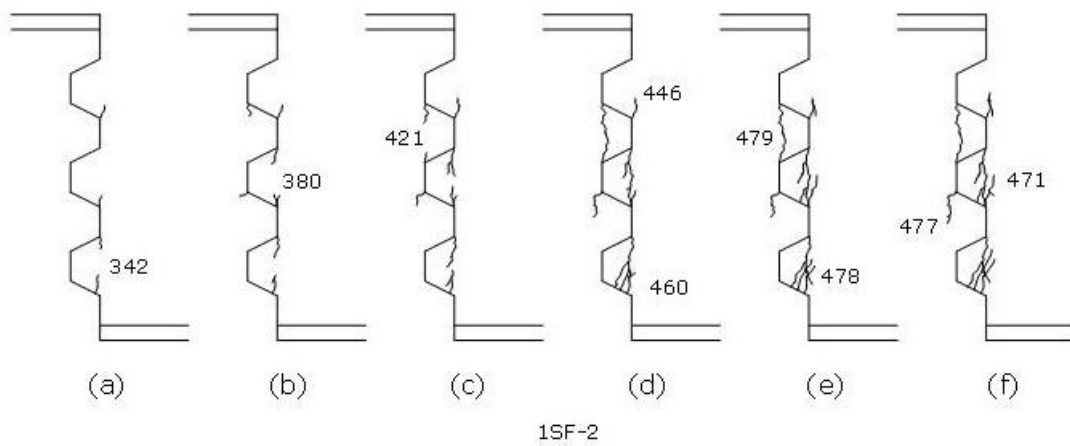
รูปที่ 4.22 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลับกับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 0.5SF-3

3972945745

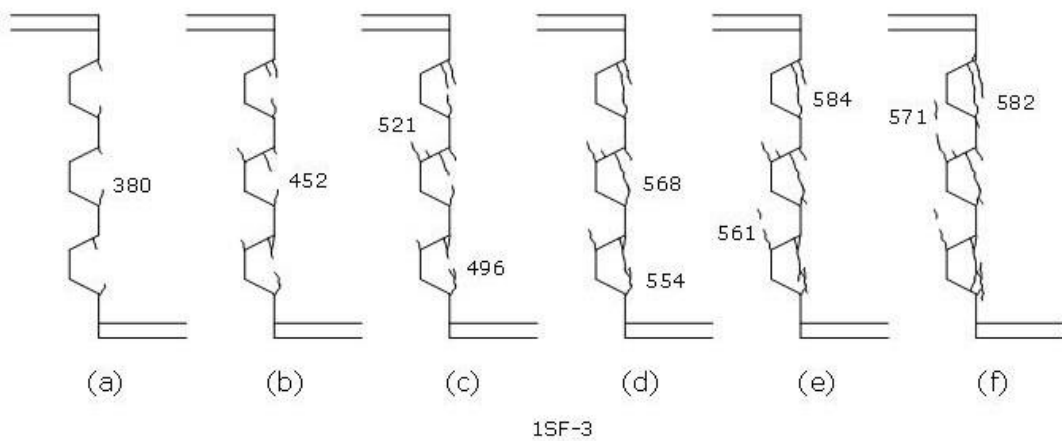
CD IThesis 5970301621 thesis / rev: 01082562 14:40:21 / seq: 11



รูปที่ 4.23 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-1



รูปที่ 4.24 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-2



รูปที่ 4.25 รูปแบบรอยแตกการวิบัติสลักรับแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ 1SF-3

ลักษณะการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนในรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักทั้ง 4 ประเภท แสดงดังรูปที่ 4.26 – รูปที่ 4.37 โดยที่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบการรับแรงของรอยต่อแล้ว รอยต่อพิเศษที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงมีความคล้ายคลึงกันที่สลักรับแรงเฉือนบางตัวจะถูกตัดขาดแยกออกจากชิ้นส่วนคอนกรีต แตกต่างกับรอยต่อพิเศษที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กที่สลักรับแรงเฉือนจะไม่ถูกตัดขาดแต่จะปรากฏรอยแตกร้าวลักษณะเป็นแนวยาวในสลักรับแรงเฉือน



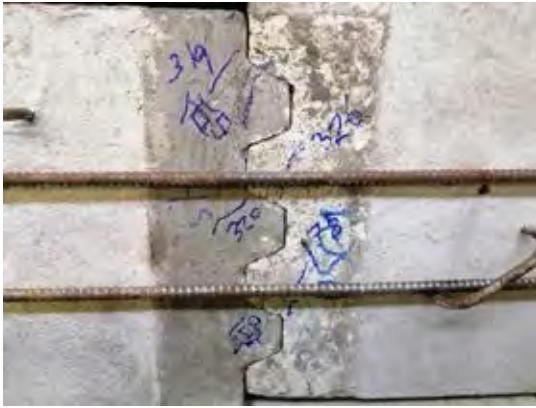
รูปที่ 4.26 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-1*



รูปที่ 4.27 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-2*



รูปที่ 4.28 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง NC-3



รูปที่ 4.29 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-1



รูปที่ 4.30 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-2*



รูปที่ 4.31 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง HSC-3*



รูปที่ 4.32 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-1



รูปที่ 4.33 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-2



รูปที่ 4.34 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 0.5SF-3



รูปที่ 4.35 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-1



รูปที่ 4.36 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-2



รูปที่ 4.37 การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 1SF-3

4.3 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของการทดสอบรวมไปถึงผลการวิเคราะห์แบบ Normalized shear strength (shear strength divided by compressive strength) แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางจะเห็นได้ว่าคอนกรีตกำลังสูงที่มีกำลังอัดคอนกรีต 75.1 MPa มีค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ ในส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก ถึงแม้ว่ากำลังอัดคอนกรีตลดลงแต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

ชิ้นตัวอย่าง ทดสอบ	กำลังอัดคอนกรีต, f'_c (MPa)	กำลังรับแรงเฉือน (kN)	กำลังรับแรงเฉือน โดยเฉลี่ย (kN)	Normalized shear strength* (%)
NC-1*	48.6 (1.00)	283.5	335.4 (1.00)	6.9 (1.00)
NC-2*		343.9		
NC-3		378.7		
HSC-1	75.1 (1.55)	326.5	349.6 (1.04)	4.7 (0.68)
HSC-2*		400.8		
HSC-3*		321.6		
0.5SF-1	48.4 (1.00)	338.7	353.7 (1.05)	7.3 (1.06)
0.5SF-2		353.6		
0.5SF-3		368.8		
1SF-1	46.5 (0.96)	445.6	507.3 (1.51)	10.9 (1.58)

หมายเหตุ: *Normalized shear strength = shear strength / f'_c

() คือ สัดส่วนเทียบกับตัวอย่าง NC

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบต่างๆ โดยเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือน รอยต่อของ AASHTO จากสมการที่ (2.2) และ Rombach and Specker จากสมการที่ (2.3) แสดง ดังตารางที่ 4.2 โดยที่จริงๆ แล้วสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนเหล่านี้มีไว้สำหรับคอนกรีตธรรมดา

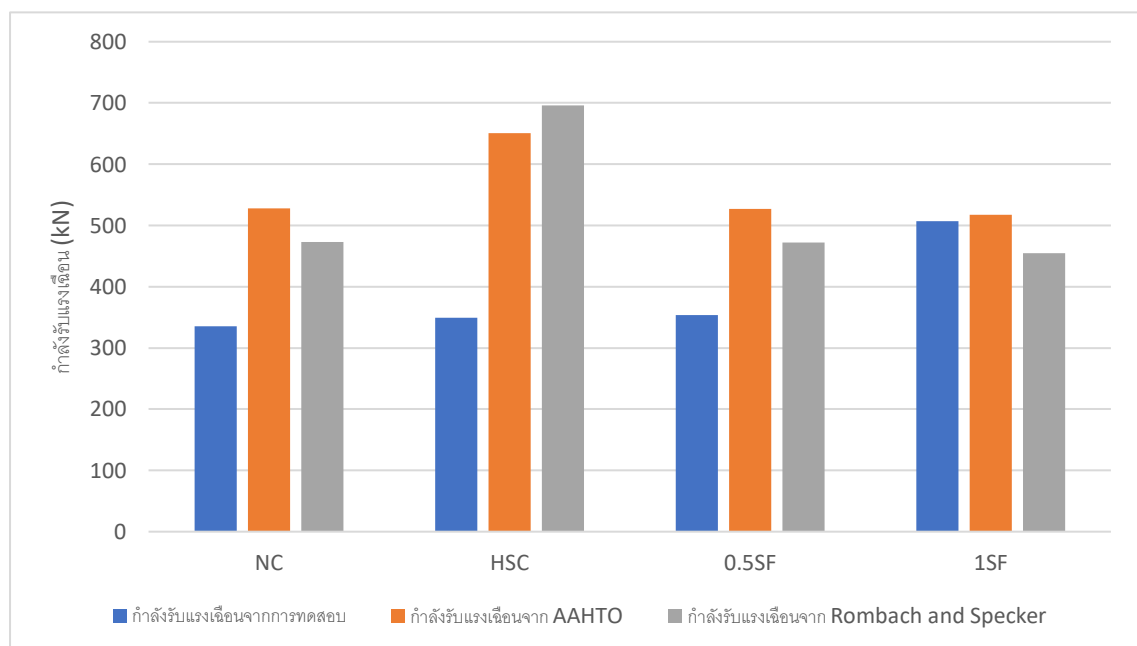
เท่านั้น (ไม่มีการเพิ่มเส้นใยเหล็ก) จากสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งหลาย สลักตามมาตรฐาน AASHTO และที่เสนอโดย Rombach and Specker ได้ค่ามากกว่าผลการทดสอบ แสดงว่าทั้งสองสูตรนี้ไม่ปลอดภัยสำหรับรอยต่อที่มีสลักรับแรงเฉือนหลายสลัก เช่นเดียวกับกับ งานวิจัยของ Zhou et al. (2005). [15]

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบสูตรการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนรอยต่อของ AASHTO และ Rombach and Specker

ชนิดตัวอย่าง ทดสอบ	กำลังอัดคอนกรีต, f'_c (MPa)	กำลังรับแรงเฉือน โดยเฉลี่ย (kN)	AASHTO* (kN)	Rombach and Specker* (kN)
NC	48.6	335.4	528	473
HSC	75.1	349.6	651	696
0.5SF	48.4	353.7	527	527
1SF	46.5	507.3	517	517

หมายเหตุ: * $\sigma_n = 1MPa$

รูปที่ 4.38 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อที่ได้จากการทดสอบ, จาก สูตรการคำนวณของ AASHTO และ Rombach and Specker



รูปที่ 4.38 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อจากผลการทดสอบและสูตรการคำนวณ

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนารอยต่อแบบแห้งหลายสลักสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง โดยออกแบบพัฒนารอยต่อพิเศษขึ้นใหม่เพื่อช่วยให้รอยต่อที่มีหลายสลักแนบสนิทกันเพื่อให้สลักรับแรงเฉือนได้เต็มประสิทธิภาพ ทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อพิเศษแบบแห้งหลายสลักทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ รอยต่อพิเศษที่ทำจากคอนกรีตปกติ คอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ได้ผลสรุปดังนี้

1.) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งพบว่า การควบคุมแรงอัดด้านข้างให้คงที่ขณะทดสอบส่งผลให้รอยต่อมีพฤติกรรมการรับแรงคล้ายกับรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว แสดงว่ารอยต่อพิเศษนี้ช่วยให้ผิวสัมผัสแนบสนิทกันมากกว่ารอยต่อแบบแห้งหลายสลักทั่วไป

2.) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก หลังจากเลยจุดรับแรงเฉือนสูงสุดแล้วกำลังรับแรงเฉือนในรอยต่อจะลดลงแต่ความชันที่ลดลงน้อยกว่ารอยต่อที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง แสดงว่าการผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อช่วยให้ลักษณะการวิบัติเป็นแบบเหนียว

3.) ลักษณะการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนในรอยต่อพิเศษที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงมีรอยแตกขนาดใหญ่บริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือนและสลักรับแรงเฉือนบางตัวจะถูกตัดขาดแยกออกจากชิ้นส่วนคอนกรีต แตกต่างจากคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กที่จะพบรอยแตกขนาดเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณฐานสลักรับแรงเฉือน โดยที่รอยแตกแรกจะเกิดขึ้นช้ากว่ารอยต่อที่ทำจากคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง และสลักรับแรงเฉือนจะไม่ถูกตัดขาดออกจากชิ้นส่วนคอนกรีตแต่จะปรากฏรอยแตกกว้างเป็นแนวยาวในสลักรับแรงเฉือน

4.) การผสมเส้นใยเหล็กในรอยต่อจะช่วยเพิ่มความสามารถกำลังรับแรงเฉือน เมื่อผสมเส้นใยเหล็ก 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ทำให้ Normalized shear strength เพิ่มขึ้น 6 และ 58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อที่ทำจากคอนกรีตธรรมดา แตกต่างจากรอยต่อที่ทำจากคอนกรีตกำลังสูงที่มี Normalized shear strength ลดลง 33 เปอร์เซ็นต์



3972945745

CD IThesis 5970301621 thesis / rev: 01082562 14:40:21 / seq: 11

6.) สูตรคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งตามมาตรฐาน AASHTO และที่เสนอโดย Rombach and Specker ได้ค่ามากกว่าผลการทดสอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะของคอนกรีตทำให้สลักแต่ละอันวิบัติไม่พร้อมกัน



3972945745

CU Thesais 5970301621 thesis / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11

บรรณานุกรม

1. ทศพล ปิ่นแก้ว และมนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา, การออกแบบสะพาน *Bridge Design*, ed. 1st. 2015.
2. AASHTO, I.J.S., *Guide specifications for design and construction of segmental concrete bridges*. 1999.
3. Poston, R.W. and J.P. Wouters, *Durability of precast segmental bridges*. 1998.
4. Bakhoun, M.M., *Shear behavior and design of joints in precast concrete segmental bridges*. 1990, Massachusetts Institute of Technology.
5. Bouvy J.J., *Segmental Construction with Epoxy Joints*. Contribution to FIP Congress, 1978.
6. Roberts, C.L., J.E. Breen, and M.E. Kreger, *Measurement based revisions for segmental bridge design and construction criteria*. 1993, University of Texas at Austin.
7. Koseki, K. and J.E. Breen, *Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges*. 1983, Computer Microfilm International.
8. FIP, *Guide to Good Practice: Recommendations for Segmental Construction in Prestressed Concrete* 1978.
9. AASHTO, *Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges*, ed. 2. 2010.
10. JSCE, *Standard Specification for Concrete Structures*. JSCE2010 Concrete Committee Printed in Japan, 2007.
11. Ibrahim, I.S., et al., *Ultimate shear capacity and failure of shear key connection in precast concrete construction*. 2014. 26(3).



3972945745

CU Thesisis 5970301621 thesis / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11

12. Nawy, E.G., M.M.J.J.o.T. Ukadike, and Evaluation, *Shear transfer in concrete and polymer modified concrete members subjected to shearing loads*. 1983. 11(2): p. 89-98.
13. Hsu, T.T., S. Mau, and B.J.S.J. Chen, *Theory on shear transfer strength of reinforced concrete*. 1987. 84(2): p. 149-160.
14. Jones, L.J.M.o.C.R., *Shear test on joints between precast post-tensioned units*. 1959. 11(31): p. 25-30.
15. Zhou, X., N. Mickleborough, and Z.J.A.s.j. Li, *Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges*. 2005. 102(1): p. 3.
16. Moustafa, S.E., *Ultimate load test of a segmentally constructed prestressed concrete I-beam*. 1974: Prestressed Concrete Institute.
17. Jiang, H., et al., *Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges*. 2016. 21(11): p. 04016085.
18. ACI, A.J.A.C.I., Farmington Hills, Michigan, 318–14. *Building Code Requirements for Structural Concrete*. 2014.
19. Specker, G.R.A., *DESIGN OF JOINTS IN SEGMENTAL HOLLOW BOX GIRDER BRIDGES*.
20. วริศร์ ศิริโสสม, พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีตสำเร็จรูปที่เสริมด้วยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค. 2017, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.



3972945745

CU IThesis 5970301621 thesis / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Worapon Pattharakorn
วัน เดือน ปี เกิด	4 Jan 1993
สถานที่เกิด	Nan Hospital
วุฒิการศึกษา	Strisrinan School
	Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, THAMMASAT UNIVERSITY
ที่อยู่ปัจจุบัน	74 Village No.4, Muang Tuet, Amphoe Phuphiang, Nan, 55000



3972945745

CU Thesais 5970301621 thesais / recv: 01082562 14:40:21 / seq: 11