

พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
ที่เสริมด้วยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์



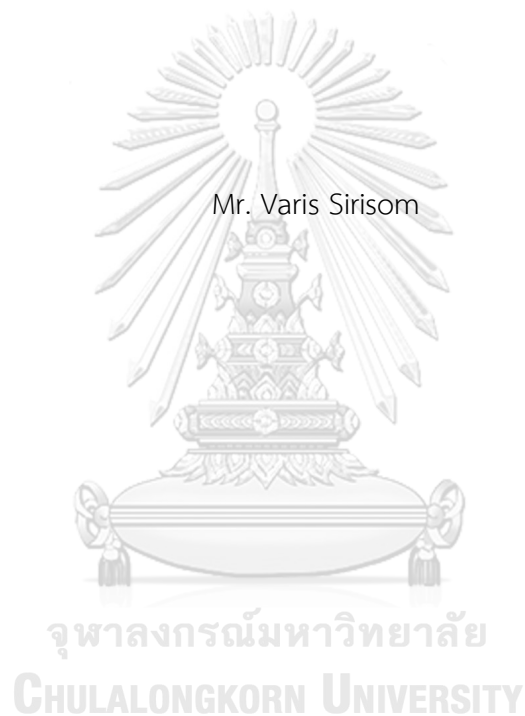
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SHEAR BEHAVIOUR OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE DRY JOINTS
WITH ELASTOMERIC PADS

Mr. Varis Sirisom



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีต

อัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมด้วยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค

โดย

นายวิศิษฐ์ ศิริโสสม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตินาถ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตินาถ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยโสธร ทรัพย์เสถียร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วริศร์ ศิริโสม : พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมด้วยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ริค (SHEAR BEHAVIOUR OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE DRY JOINTSWITH ELASTOMERIC PADS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วัฒนชัย สมิตาการ, 62 หน้า.

การประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในงานก่อสร้างประเภทช่วงยาวให้ผลที่ดีมาก ทั้งในด้านความประหยัด คุณภาพงานที่สูง การก่อสร้างที่รวดเร็วและผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียงน้อย ในอดีตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละชิ้นจะเชื่อมต่อกันโดยอาศัยอิพ็อกซีเป็นตัวเชื่อมประสาน แต่การใช้อิพ็อกซีจะทำให้การก่อสร้างเสียเวลามาก ต่อมาจึงได้มีการใช้งานรอยต่อแบบแห้งขึ้น ซึ่งใช้เวลาก่อสร้างน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม รอยต่อแบบแห้งก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน นั่นคือผิวสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้นหรือบริเวณสลักรับแรงเฉือนไม่สามารถต่อเข้ากันได้อย่างแนบสนิทพอดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรอยต่อประเภทหลายสลัก ส่งผลให้รอยต่อไม่สามารถรับแรงเฉือนได้อย่างเต็มที่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้ง โดยอาศัยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ริค และได้ทำการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่าง เปรียบเทียบกับรอยต่อแบบแห้ง ผลการทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนและพฤติกรรมขณะรับแรงของรอยต่อ การใช้ยางอีลาสโตเมอร์ริคช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นและช่วยกระจายแรงได้ดีขึ้นจากพฤติกรรมการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนแต่มีกำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่ารอยต่อแบบแห้งประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ผลการปรับเปลี่ยนใช้ยางอีลาสโตเมอร์ริค 60IRHD และ 70IRHD รอยต่อมีพฤติกรรมรับแรงคล้ายกัน และตำแหน่งการใส่ยางกับสลักรับแรงเฉือน ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมขณะรับแรงของรอยต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5970307421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: DRYJOINT / SHEAR KEY / SHEAR CAPACITY / STRENGTH IMPROVEMENT /
PRECAST PRESTRESSED CONCRETE SEGMENT

VARIS SIRISOM: SHEAR BEHAVIOUR OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE DRY
JOINTSWITH ELASTOMERIC PADS. ADVISOR: ASST. PROF. WATANACHAI
SMITTAKORN, Ph.D., 62 pp.

The use of precast prestressed concrete segments in long span constructions yields many benefits: economy, high quality work, rapid construction and less disturbance to vicinity. In the past, the precast concrete segments were glued together by epoxy. But the use of epoxy resulted in longer construction time. Later, dry joints were introduced which helped to reduce the construction time. However, there exists limitations in using the dry joints. The contact surfaces between segments or shear keys can hardly be perfectly fit together, especially for those with multiple shear keys. Consequently, these dry joints cannot reach their full capacity for shear. This research is an attempt to improve the shear capacity of dry joints by using elastomeric pad. Sample specimens are tested and compared with the ordinary dry joint. Elastomeric pads help in distributing the shear force to all of the shear keys. However, these joints have ultimate shear strengths approximately 30% less than that of dry joint. Exchanging of 60IRHD and 70IRHD elastomeric pads as well as relocating the positions put on the keys do not significantly affect the shear behavior of the joints.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษางานวิจัยในหัวข้อ การปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีต สำเร็จรูปอัดแรง สามารถสำเร็จจลุล่วงได้ด้วย ความกรุณาและอนุเคราะห์การช่วยเหลือ ข้อมูล ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒน์ชัย สมิตถากร ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยสธร ทรัพย์เสถียร ที่สละเวลาอันมีค่าในการเป็นกรรมการสอบ ให้ความรู้ คำแนะนำในการทำวิจัยนี้สมบูรณ์มากขึ้น พร้อมขอขอบคุณ คุณกานต์ จันทร์ประสิทธิ์ ครูช่าง เจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมโยธาที่กรุณาช่วยเหลือ การทดสอบ แนะนำต่างๆ งานงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี สุดท้ายขอขอบขอบคุณ บิดา นายศิริ ศิริโสม มารดา นางณิชากร ศิริโสม และครอบครัวที่คอยเลี้ยงดูและสนับสนุนตลอดมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 ประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง.....	4
2.1.2 รอยต่อแบบแห้ง.....	4
2.1.1 รอยต่ออีพ็อกซี.....	5
2.1.3 สลักรับแรงเฉือน.....	6
2.2 การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูป.....	8
2.3 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อแบบราบแบบแห้งและอีพ็อกซี.....	10
2.4 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งและอีพ็อกซี.....	12
2.5 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ.....	20
2.6 ปัญหาของรอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง.....	21

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	24
3.1 ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ	24
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
3.3 การเตรียมการและการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือน.....	33
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ.....	33
3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	37
3.3.3 วิธีการทดสอบ	39
3.4 แผนผังการดำเนินงาน	43
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	44
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะเคลื่อนตัว.....	44
4.2 รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน.....	47
4.3 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ.....	54
บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	59
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	62

สารบัญรูป

รูปที่ 2. 1 ค่าคุณลดกำลังของรอยต่อ รอยต่ออีพ็อกซี (Epoxy Joint) หรือ Type A และ แบบแห้ง (Dry Joint) หรือ Type B.....	5
รูปที่ 2. 2 การใช้งานสารเชื่อมประสานอีพ็อกซีกับรอยต่อ.....	6
รูปที่ 2. 3 ก). สลักรับแรงเค้นเดี่ยว ข). สลักรับแรงเค้นหลายสลัก.....	7
รูปที่ 2. 4 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเค้น.....	7
รูปที่ 2. 5 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเค้น.....	8
รูปที่ 2. 6 ก.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่มีการแตกแตกร้าวยู่ก่อน และ ข.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่ไม่มีการแตกแตกร้าวย.....	9
รูปที่ 2. 7 การจัดเตรียมตัวอย่างรอยต่อแบบแบนราบสำหรับการทดสอบ.....	10
รูปที่ 2. 8 รายละเอียดรอยต่อแบบแบนราบ.....	11
รูปที่ 2. 9 รายละเอียดรอยต่อสลักรับแรงเค้น.....	12
รูปที่ 2. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเค้น และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบสลักเดี่ยวแบบแห้ง.....	13
รูปที่ 2. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเค้น และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบหลายสลักแบบแห้ง.....	13
รูปที่ 2. 12 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว.....	14
รูปที่ 2. 13 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก.....	14
รูปที่ 2. 14 ลักษณะการแตกของรอยต่อสลักรับแรงเค้น.....	15
รูปที่ 2. 15 การเตรียมการทดสอบแรงเค้น.....	16
รูปที่ 2. 16 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของรอยต่อ.....	16
รูปที่ 2. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเค้น และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว.....	17
รูปที่ 2. 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเค้น และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีหลายสลัก.....	18

รูปที่ 2. 19 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว	19
รูปที่ 2. 20 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีพ็อกซีหลายสลัก.....	19
รูปที่ 2. 21 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนของสลักระหว่างสลักเดี่ยวและหลายสลักของรอยต่อแบบไม่ใช้อีพ็อกซี.....	22
รูปที่ 2. 22 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนของสลักระหว่างสลักเดี่ยวและหลายสลักของรอยต่อแบบใช้อีพ็อกซี.....	22
รูปที่ 3. 1 รายละเอียดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ.....	24
รูปที่ 3. 2 รายละเอียดรอยต่อแบบแห้ง.....	25
รูปที่ 3. 3 รายละเอียดรอยต่ออีพ็อกซี.....	26
รูปที่ 3. 4 รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำด้านบนและล่างสลักรับแรงเฉือน:แบบ A.....	27
รูปที่ 3. 5 รายละเอียดรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้น:แบบ B.....	27
รูปที่ 3. 6 รายละเอียดรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำข้างและล่างสลักรับแรงเฉือน:แบบ C.....	27
รูปที่ 3. 7 แผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค.....	28
รูปที่ 3. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่น.....	29
รูปที่ 3. 9 ค่าโมดูลัสแรงเฉือนและค่าการโก่งตัวทันทีสำหรับอายุการออกแบบ 25 ปี.....	29
รูปที่ 3. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและระยะโก่งของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค.....	30
รูปที่ 3. 11 รายละเอียดแบบหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบ.....	34
รูปที่ 3. 12 แบบหล่อชิ้นส่วนไม้อัด.....	34
รูปที่ 3. 13 แผ่นเหล็กและโฟมกั้นคอนกรีตเป็นรูปสลักรับแรงเฉือน.....	35
รูปที่ 3. 14 เหล็กเสริมดัดรูปตามชิ้นส่วนทดสอบ.....	35
รูปที่ 3. 15 เทคอนกรีตในแบบหล่อครั้งที่ 1.....	36
รูปที่ 3. 16 เทคอนกรีตในแบบหล่อครั้งที่ 2.....	37
รูปที่ 3. 17 เครื่องทดสอบแรงกด.....	37

รูปที่ 3. 18 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์.....	38
รูปที่ 3. 19 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว	39
รูปที่ 3. 20 เครื่องบันทึกข้อมูล.....	39
รูปที่ 3. 21 การติดตั้งอุปกรณ์กับชิ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือน	40
รูปที่ 3. 22 โครงรับแรงสำหรับอัดแรงด้านข้างชิ้นส่วนทดสอบ.....	40
รูปที่ 3. 23 แม่แรงไฮดรอลิคดันโครงรับแรงให้เกิดแรงด้านข้าง	41
รูปที่ 3. 24 วัดแรงอัดด้านข้างจากเครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์.....	41
รูปที่ 3. 25 ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวอย่างน้อยสองจุด	42
รูปที่ 3. 26 ชิ้นตัวอย่างทดสอบเข้าเครื่องมือทดสอบให้แรงกดอัดเพิ่มขึ้นคงที่.....	42
รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ.....	45
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ รอยต่อ เสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60 IRHD และ 70 IRHD ในรูปแบบการใส่ยาง A, B และ C	46
รูปที่ 4. 3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อแบบแห้ง เสริมยางอีลาสโตเมอร์ค60IRHDและ70IRHD.....	46
รูปที่ 4. 4 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน รอยต่อแบบแห้ง.....	47
รูปที่ 4. 5 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค ด้านบนและด้านล่างสลักรับแรงเฉือนแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD.....	48
รูปที่ 4. 6 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค ด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้นแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD.....	49
รูปที่ 4. 7 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค ด้านข้างและด้านล่างสลักรับแรงเฉือนแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD.....	50
รูปที่ 4. 8 การวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบรอยต่ออีพ็อกซีด้านบนก่อนรอยต่อเกิดการวิบัติ.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1 สัดส่วนผสมคอนกรีต.....	32
ตารางที่ 3. 2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	32
ตารางที่ 3. 3 คุณสมบัติของแผ่นรองรับอิลาสโตเมอร์ค.....	33
ตารางที่ 3. 4 จำนวนชั้นตัวอย่างทดสอบครั้งแรก.....	36
ตารางที่ 3. 5 จำนวนชั้นตัวอย่างทดสอบครั้งที่สอง.....	36
ตารางที่ 4. 1 การวิบัติของสลักรับแรงเฉือน.....	50
ตารางที่ 4. 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยแรงเพิ่มขึ้นคงที่เปรียบเทียบสูตรการออกแบบ มาตรฐาน AASHTO.....	54
ตารางที่ 4. 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยแรงเพิ่มขึ้นคงที่เปรียบเทียบสูตรออกแบบ Rombach and Specker.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการพัฒนาประสิทธิภาพในการก่อสร้างขึ้นอย่างมาก มีวิธีการที่ช่วยให้ก่อสร้างเสร็จรวดเร็วยิ่งขึ้น ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างน้อยลง ด้วยการใช้งานชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง (precast prestressed concrete segment) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นแทนการก่อสร้างแบบหล่อในที่ สำหรับการก่อสร้างโครงสร้างประเภทช่วงยาว เช่น สะพานข้ามแม่น้ำและโครงการรถไฟที่กำลังขยายตัวมากขึ้นในประเทศ การก่อสร้างลักษณะนี้ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของการผลิตได้ดีกว่า สามารถลดน้ำหนักโครงสร้างได้และช่วยประหยัดเวลาในการก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้นหากเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อในที่แบบเดิม ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาและออกแบบการก่อสร้างประเภทคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงให้ดีขึ้นอยู่เสมอ แต่ก็ยังพบปัญหาหลายๆ อย่างเกิดขึ้น โดยปัญหาสำคัญที่พบสำหรับการก่อสร้างที่ใช้ชิ้นส่วนประเภทนี้อยู่ นั่นคือ ปัญหาบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่ติดกัน

รอยต่อในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงคือ บริเวณระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่ติดกันซึ่งเป็นจุดสำคัญของโครงสร้าง โดยบริเวณรอยต่อทั้งในส่วนเอวและปีกด้านบนมีชิ้นส่วนที่เรียกว่าสลักรับแรงเฉือน (shear key) ทำหน้าที่ในการจัดแนวชิ้นส่วนระหว่างติดตั้ง รับน้ำหนักโครงสร้างและถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน ปัจจุบันการใช้งานรอยต่อแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ รอยต่อแบบแห้ง (dry joint) และรอยต่ออีพ็อกซี (epoxy joint) การใช้งานรอยต่อแบบแห้งมีข้อดีคือ ใช้เวลาและงบประมาณในการก่อสร้างน้อย พฤติกรรมการวิบัติของรอยต่อเป็นลักษณะเหนียว ส่วนข้อจำกัดของรอยต่อแบบแห้ง รอยต่อมีกำลังรับแรงของโครงสร้างน้อยกว่ารอยต่ออีพ็อกซี และน้ำอาจสามารถซึมผ่านบริเวณรอยต่อได้ส่งผลต่อการกัดกร่อนของลวดอัดแรง นอกจากนี้ยังพบปัญหาบริเวณสลักรับแรงเฉือน โดยปัญหาเกิดจากความบกพร่องในการผลิตชิ้นส่วนทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของขนาดสลักรับแรงเฉือน เมื่อนำชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปมาต่อกันส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้นบริเวณสลัก และเมื่อรอยต่อรับแรง รอยต่อจะใช้ประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่ ส่วนรอยต่ออีพ็อกซีมีข้อดีคือ อีพ็อกซีจะทำหน้าที่หล่อลื่น ประสานรอยต่อให้ชิ้นส่วนติดกันได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้กระจายแรงระหว่างรอยต่อได้ดี ทำให้รอยต่อมีกำลังรับแรงของโครงสร้างที่มากกว่ารอยต่อแบบแห้ง ส่วนข้อจำกัดของรอยต่ออีพ็อกซี การใช้งานอีพ็อกซีนี้นั้นมีข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิ

และสภาพอากาศที่ต้องเหมาะสมต่อการใช้ ระยะเวลาที่ต้องการเปลี่ยนสภาพให้พร้อมใช้งาน ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อสร้างเพิ่มขึ้น และพฤติกรรมการวิบัติของรอยต่ออีพ็อกซีเป็นแบบเปราะ

จากปัญหาที่กล่าวมาทำให้งานวิจัยนี้ ทำการคิดวิธีลดข้อด้อยและเพิ่มข้อดีจากรอยต่อแบบแห้งและแบบอีพ็อกซี ให้เป็นรอยต่อมีประสิทธิภาพและการใช้งานที่สะดวกรวดเร็วขึ้น จึงได้ออกแบบรอยต่อแบบหลายสลัก (multiple-keyed joint) ขึ้นใหม่ โดยมีการประยุกต์นำแผ่นยางอีลาสโตเมอร์มาใช้ร่วมกับรอยต่อ สำหรับแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงอัด, แรงเฉือนและสามารถยืดหยุ่นได้ดี จะช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างบริเวณสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อ และทำให้การกระจายแรงของรอยต่อทำได้ดีขึ้นแทนการใช้งานอีพ็อกซี โดยคาดว่ารอยต่อจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงดีขึ้น หลังจากสร้างขึ้นส่วนตัวอย่างทดสอบขึ้นมาใหม่ จะทำการทดสอบแรงเฉือน วิเคราะห์ประสิทธิภาพและพฤติกรรมของชิ้นส่วนเปรียบเทียบกับการใช้งานแบบเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและปรับปรุงรอยต่อแบบแห้งหลายสลักในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง โดยการใช้แผ่นยางอีลาสโตเมอร์เสริมบริเวณรอยต่อ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีและการทำงานที่รวดเร็วขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งและรอยต่ออีพ็อกซีของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง
2. สร้างแบบชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบรอยต่อหลายสลัก แบบแห้ง แบบอีพ็อกซีกับอีพ็อกซี Sikadur-31 SBA S-02 Segmental Bridge Adhesive มาตรฐาน ASTM และเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ แบบยางธรรมชาติที่ความแข็งของยางแตกต่างกัน มาตรฐาน AASHTO
3. ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงกับชิ้นตัวอย่างทดสอบ โดยไม่พิจารณาผลของแรงตัดและเหล็กเดือย
4. วิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือน เปรียบเทียบมาตรฐาน AASHTO วิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงเฉือน รูปแบบการวิบัติของรอยต่อจากแรงเฉือนของรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์เปรียบเทียบกับรอยต่อแบบแห้งและอีพ็อกซี

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่ซึ่งประกอบด้วย รอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง ประเภทของรอยต่อหน้าที่ยของรอยต่อในโครงสร้าง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง เช่นการศึกษาพฤติกรรมรับแรงเฉือน กำลังรับแรงเฉือน การวิบัติของรอยต่อโดยสลักรับแรงเฉือน และปัญหาของรอยต่อที่พบจากการทดสอบต่างๆ

2.1 ประเภทรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง

รอยต่อในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือรอยต่อแบบแห้ง (Dry Joint) และแบบอีพ็อกซี (Epoxy Joint) รอยต่อประเภทนี้จะมีการเสริมสลักรับแรงเฉือน (Shear keys) บริเวณรอยต่อด้วย ซึ่งจะแตกต่างกับรอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ไม่มีอัดแรง ที่มีการสร้างช่องว่างในรอยต่อขนาด 75 ถึง 100 มิลลิเมตร สำหรับการเติมซีเมนต์มอร์ตาร์หรือการเกราท์ (Grout) โดยอีพ็อกซี

ในปัจจุบันนั้นยังคงมีการใช้งานรอยต่อทั้งแบบแห้งและแบบอีพ็อกซีอยู่ เนื่องจากยังคงมีข้อขัดแย้งถึงความสามารถของรอยต่อทั้งสองแบบ ในด้านการใช้งานการก่อสร้าง ด้านพฤติกรรมรับแรงของรอยต่อ และด้านความทนทานของรอยต่อในการใช้งาน (Bakhoun 1991)

2.1.2 รอยต่อแบบแห้ง

รอยต่อแบบแห้ง (Dry Joint) เป็นรอยต่อที่ไม่ได้มีการใช้งานอีพ็อกซีบริเวณรอยต่อชิ้นส่วนของคอนกรีตสำเร็จรูปที่ติดกัน การใช้งานรอยต่อประเภทนี้จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อแบบอีพ็อกซี จากค่าใช้จ่ายส่วนอีพ็อกซีและอุปกรณ์ที่ใช้งานกับอีพ็อกซี นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดระยะเวลาการก่อสร้างที่เสียไปจากการใช้อีพ็อกซีลงด้วย เนื่องจากอีพ็อกซีจะพบปัญหาทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ในสภาพอากาศฝนตกหรืออุณหภูมิของอากาศไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน (AASHTO 2010)

กำลังรับแรงของรอยต่อ (AASHTO 2010) ให้ค่าลดกำลัง (Reduction Factor) ของรอยต่อแบบแห้งกับลวดอัดแรงที่มีแรงยึดเหนี่ยวทั้งหมด (Fully Bonded Tendons) อยู่ที่ 0.90 และ 0.85 และกับลวดอัดแรงที่ไม่มีการยึดเหนี่ยวหรือยึดเหนี่ยวบางส่วน (Unbonded or Partially Bonded

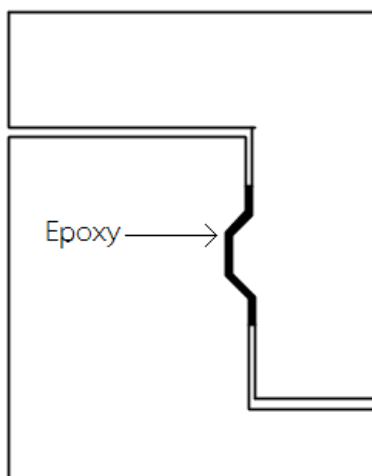
Tendons) อยู่ที่ 0.85 และ 0.75 สำหรับการตัดและเชื่อมตามลำดับแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งน้อยกว่าของรอยต่อแบบอีพ็อกซี เพราะว่ารอยต่อแบบแห้งจะมีกำลังรับแรงของโครงสร้างที่น้อยกว่ารอยต่อแบบมีอีพ็อกซี และได้แนะนำให้ใช้รอยต่อแบบแห้งกับการดึงลวดอัดแรงภายนอกของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (external posttensioning tendons) ในบริเวณที่ไม่เกิดการแช่แข็งของน้ำเกิดขึ้นได้ เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านบริเวณรอยต่อทำให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างลดลง

Type	ϕ_f	ϕ_v
	<u>Flexure</u>	<u>Shear</u>
Fully Bonded Tendons		
Type A joints	0.95	0.85
Type B joints	0.90	0.80
Unbonded or Partially Bonded Tendons		
Type A joints	0.90	0.80
Type B joints	0.85	0.75

รูปที่ 2.1 ค่าคุณลดกำลังของรอยต่อ รอยต่ออีพ็อกซี (Epoxy Joint) หรือ Type A และ แบบแห้ง (Dry Joint) หรือ Type B (AASHTO 2010)

2.1.1 รอยต่ออีพ็อกซี

รอยต่ออีพ็อกซี (Epoxy Joint) เป็นรอยต่อที่มีการใช้งานวัสดุเชื่อมประสานอีพ็อกซีแสดงดังรูปที่ 2.2 ระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่อยู่ติดกัน โดยรอยต่อประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากกว่ารอยต่อแบบแห้ง สำหรับหน้าที่ของอีพ็อกซีจะทำให้การจัดวางชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปทำได้ง่ายขึ้น โดยช่วยหล่อลื่นพื้นที่ของคอนกรีตบริเวณที่ติดกันทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตสามารถต่อเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ขึ้น อีพ็อกซีจะทำให้ผิวรอยต่อของชิ้นส่วนสม่ำเสมอซึ่งจะช่วยลดการเกิดความเข้มข้นของความเค้นสูงเฉพาะจุดและช่วยให้ความเค้นกระจายสม่ำเสมอตลอดแนวรอยต่อ ส่งผลให้โครงสร้างแข็งแรงและใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของลวดอัดแรงจากความชื้นที่เข้าสู่ลวดอัดแรงด้วย (Bouvy 1978)



รูปที่ 2. 2 การใช้งานสารเชื่อมประสานอีพ็อกซีกับรอยต่อ

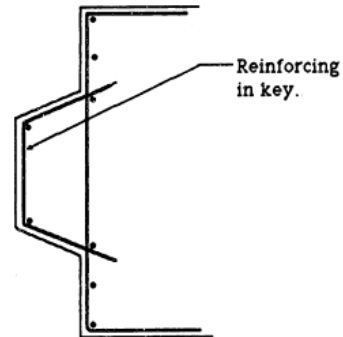
รอยต่อแบบอีพ็อกซีจะทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้มากกว่ารอยต่อแบบแห้งแต่ทำให้พฤติกรรมการพังทลายของรอยต่อเมื่อรับแรงเปลี่ยนไป โดยจะกลายเป็นการพังทลายแบบเปราะ และการใช้งานอีพ็อกซียังพบข้อจำกัดเช่น ค่าใช้จ่ายของงานที่เพิ่มขึ้นในการใช้อีพ็อกซีและอุปกรณ์เกี่ยวกับการใช้งานอีพ็อกซี เวลางานที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งานอีพ็อกซี เนื่องจากการใช้งานต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมเช่น ฝนตก หรืออุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน จะทำให้ไม่สามารถใช้งานอีพ็อกซีได้เต็มประสิทธิภาพได้ (Roberts, Breen et al. 1993)

2.1.3 สลักรับแรงเฉือน

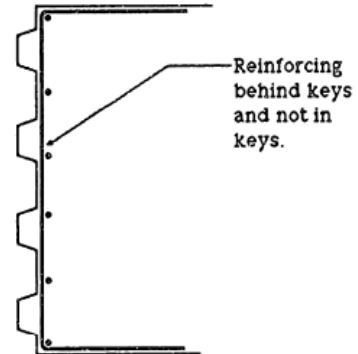
สลักรับแรงเฉือน (Shear Keys) ในชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงจะมีอยู่บริเวณเอวขึ้นส่วนหรือบางชิ้นส่วนจะมีบริเวณปีกของชิ้นส่วนด้วย โดยมีอยู่บริเวณปลายของชิ้นส่วนทั้งสองฝั่ง หน้าที่ของสลักรับแรงเฉือนจะช่วยจัดแนวของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในระหว่างติดตั้งชิ้นส่วนและถ่ายแรงกดอัด แรงเฉือน รวมถึงแรงดัดระหว่างชิ้นส่วนไปสู่ชิ้นส่วนที่ติดกัน และในส่วนรอยต่อแบบอีพ็อกซินั้นสลักรับแรงเฉือนจะทำหน้าช่วยโครงสร้างถ่ายแรงขณะอีพ็อกซียังไม่กลายเป็นลักษณะพอลิเมอร์ (Polymerization) (Bakhom 1991)

สลักรับแรงเฉือนที่ใช้กันในปัจจุบันมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู และในอดีตมีการใช้งานเป็นสลักเฉือนเดี่ยว (Single Key) แสดงดังรูปที่ 2.3(ก) ก่อนจะเปลี่ยนเป็นสลักรับแรงเฉือนหลายสลัก (Multiple Keys) โดยจะมีอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 20 สลักต่อความสูงของชิ้นส่วนแสดงดังรูปที่ 2.3(ข) เนื่องจากพบว่าสามารถกระจายความเข้มของความเค้นให้สม่ำเสมอได้มากกว่าแบบสลักเฉือนเดี่ยว

ก).

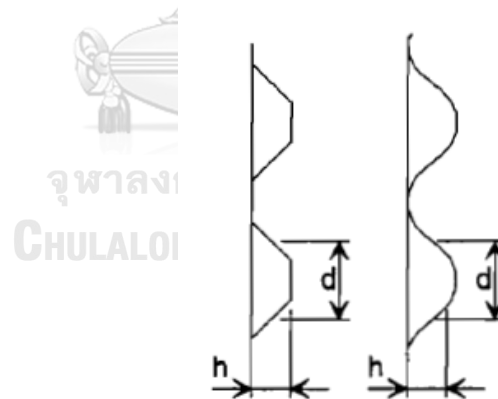


ข).



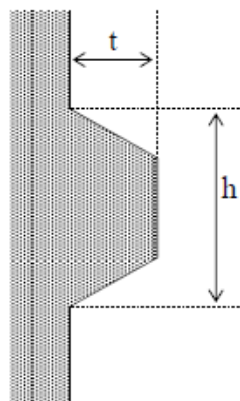
รูปที่ 2. 3 ก). สลักรับแรงเฉือนเดี่ยว ข). สลักรับแรงเฉือนหลายสลัก
(Bakhoum 1991)

อัตราส่วนลักษณะของสลักรับแรงเฉือน AASHTO ได้ให้รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.4 ที่ h มีขนาดมากกว่า 1.25 นิ้ว หรือ 32 มิลลิเมตร หรือมากกว่า 2 เท่าของขนาดมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด และอัตราส่วนของ h ต่อ d อยู่ที่ $h:d \approx 1:2$



รูปที่ 2. 4 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือน
(AASHTO 2010)

มาตรฐานของ (JSCE 2007) มีรายละเอียดอัตราส่วนลักษณะของสลักรับแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 2.5 t คือความสูงของสลักรับแรงเฉือนต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 30 มิลลิเมตร และ h คือความยาวของสลักรับแรงเฉือน โดยให้อัตราส่วน $t/h \leq 1/2$



รูปที่ 2. 5 รายละเอียดอัตราส่วนของสลักรับแรงเฉือน

(JSCE 2007)

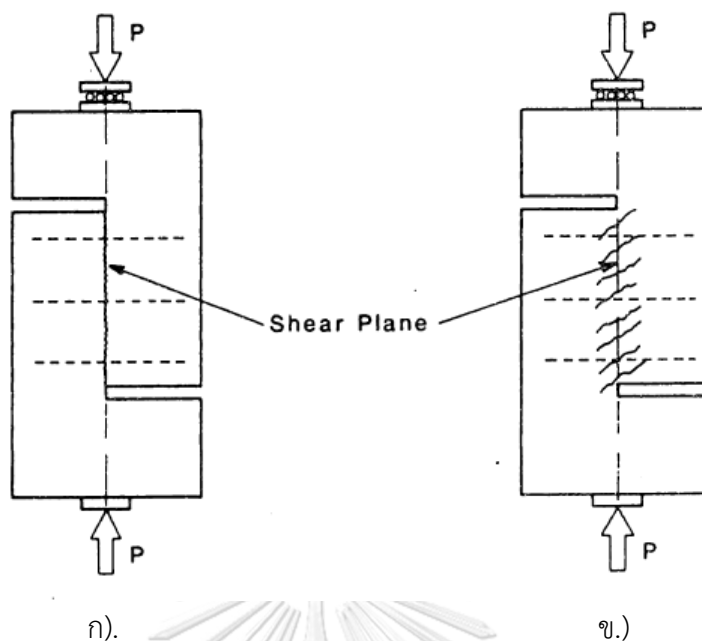
2.2 การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูป

แรงเฉือนอาจสร้างปัญหาให้กลับโครงสร้างได้ หากเกิดการถ่ายแรงเฉือนขึ้นในบริเวณที่เป็นระนาบที่ไม่มั่นคงหรือไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง อาจจะทำให้เกิดการพังของโครงสร้างจากการเลื่อนไถลจากแรงเฉือนได้ ซึ่งก็เป็นปัญหาที่พบในการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่ต้องนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมาใช้ต่อกันในการก่อสร้าง

การทดสอบถ่ายแรงเฉือนในคอนกรีต ปัจจัยสำหรับการทดสอบประกอบไปด้วย การต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตจากแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตในระนาบแรงเฉือน เตี้ยของเหล็กเสริมที่ตั้งฉากหรือทำมุมน้อยกว่า 90 องศาแต่ไม่ขนานกับระนาบแรงเฉือน ผลจากการขีดตัวของมวลรวมที่อยู่ในคอนกรีตที่บริเวณระนาบการพัง และแรงเสียดทานที่ระนาบแรงเฉือนบริเวณผิวคอนกรีต

การศึกษาของ (Hsu, Mau et al. 1987) ทำการทดสอบการถ่ายของแรงเฉือนในคอนกรีต ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการถ่ายแรงเฉือนออกเป็นสองประเภท คือการถ่ายแรงเฉือนระหว่างระนาบที่มีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้ว และระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวแสดง

ผลของการทดสอบได้แสดงถึงรูปแบบการพังของรอยต่อ พบว่าในระนาบระนาบที่มีการแตกร้าวอยู่ก่อนพบรอยแตกเล็กน้อยหรือไม่พบรอยแตกเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และในระนาบที่ไม่มีการแตกร้าวพบรอยแตกเกิดขึ้นมากในลักษณะเอียงกับระนาบแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 2.6(ข)



รูปที่ 2. 6 ก.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่มีการแตกแตกร้าวก่อน และ ข.) ตัวอย่างการทดสอบจำลองระนาบที่ไม่มีการแตกแตกร้าวก่อน (Hsu, Mau et al. 1987)

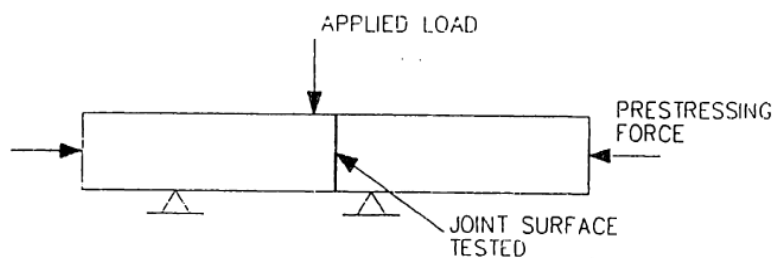
การถ่ายแรงเฉือนในรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูป สำหรับรอยต่อแบบอ็อกซี่สามารถจำลองให้รอยต่อเป็นรอยต่อที่ไม่ได้มีการแตกร้าวก่อนตามงานวิจัยของ (Hsu, Mau et al. 1987) เพราะแรงยึดเหนี่ยวจากอ็อกซี่นั้นสามารถทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสองชิ้นที่ต่อเข้าด้วยกันและสามารถให้กำลังรับแรงในระดับเดียวกับโครงสร้างทั่วไป

รอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้ง สามารถจำลองแยกออกได้เป็นทั้งระนาบที่ไม่ได้มีการแตกร้าวก่อนและระนาบที่มีการแตกร้าวก่อน โดยจากช่องว่างระหว่างสลักรับแรงเฉือนที่ต่อกันนั้นจะมีลักษณะคล้ายรอยแตกที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และสลักรับแรงเฉือนจะทำหน้าที่คล้ายกับการขัดของมวลรวมที่บริเวณรอยแตก แต่ในส่วนของพื้นที่บริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือนซึ่งไม่ได้มีการรับแรงและไม่ได้เกิดรอยแตกขึ้นจึงสามารถจำลองเป็นส่วนของระนาบที่ไม่ได้มีการแตกร้าวก่อน (Bakhoum 1991)

2.3 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อแบบราบแบบแห้งและอีพ็อกซี

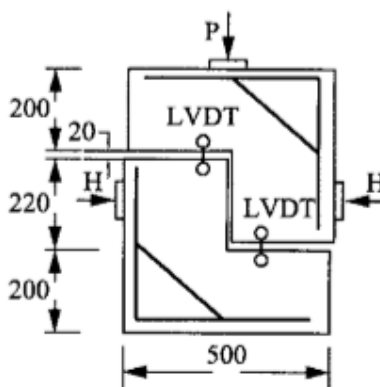
1). รอยต่อแบบราบแบบแห้ง (Flat Dry Joints)

การศึกษาของ (Jones 1959) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้รอยต่อแบบแบบราบ และแบบมอร์ตาร์ ในการทดสอบหากล้ารับแรงเฉือนของรอยต่อและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรอยต่อ ทำการทดสอบด้วยวิธีการยึดชิ้นส่วนคอนกรีตติดกันด้วยการอัดแรง (prestressing) และให้แรงกดด้านบนขึ้นตัวอย่างทดสอบบริเวณใกล้กับรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.7 ทำการให้แรงกดทดสอบจนกระทั่งรอยต่อเกิดการเลื่อนไถล ทำการทดสอบจำนวนหลายครั้งโดยการเพิ่มแรงอัดด้านข้างมากขึ้น จนถึงที่ 19.19 เมกกะปาสคาล และหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรอยต่อได้ค่าน้อยที่สุดที่ 0.391 และค่าที่ดีที่สุดที่ 0.691 ซึ่งสรุปแนะนำให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรอยต่ออยู่ที่ 0.4



รูปที่ 2. 7 การจัดเตรียมตัวอย่างรอยต่อแบบแบบราบสำหรับการทดสอบ
(Jones 1959)

การศึกษาของ (Zhou, Mickelborough et al. 2005) ทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อกับแรงเฉือน กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ และกลไกการถ่ายแรงเฉือนของชนิดรอยต่อที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบราบแบบแห้งแสดงดังรูปที่ 2.8 กับแรงเฉือนและปราคาจากแรงดัด ด้วยการให้แรงอัดด้านข้างเป็นแรงคงที่และเพิ่มแรงกระทำด้านบนตัวอย่างทดสอบ เมื่อรอยต่อถูกแรงกระทำจนกระทั่งเกิดการเปิดออกของรอยต่อในลักษณะเลื่อนไถลและไม่สามารถรับแรงจากด้านบนได้อีกต่อไป จะเป็นการสิ้นสุดของกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแบบราบ และผลการทดสอบได้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยประมาณที่ 0.72



รูปที่ 2. 8 รายละเอียดครอยต่อแบบแบนราบ
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

2). รอยต่อแบนราบอีพ็อกซี (Flat Epoxied Joints)

การศึกษาของ (Moustafa 1975) ทำการทดสอบหากล้ารับแรงของชิ้นส่วนคานคอนกรีตสำเร็จรูปตัวไอ ทำการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตลักษณะลูกบาศก์ 3 ลูกแต่ละลูกมีขนาด 6 นิ้ว นำมาต่อกันด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีบริเวณรอยต่อให้เป็นลักษณะของคาน ทำการอัดแรงด้านข้าง ชิ้นตัวอย่างทดสอบด้วยแรงที่แตกต่างกัน 3 ขนาด และทดสอบด้วยการกดอัดน้ำหนักด้านบน สำหรับทำการทดสอบด้วยแรงเฉือนอย่างเดียว (Pure Shear) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเกิดรอยแตกขึ้นจะเกิดรูปแบบการแตกบริเวณระหว่างเนื้อคอนกรีตส่วนผิวหน้าที่อยู่ติดกับวัสดุประสานอีพ็อกซี

การศึกษาของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) ทำการทดสอบกับตัวอย่างรอยต่อแบนราบมีอีพ็อกซี ซึ่งมีการปรับความหนาของอีพ็อกซีในการทดสอบที่แตกต่างกันไป

ผลการทดสอบสำหรับรอยต่อแบนราบมีการใช้อีพ็อกซีนั่น เมื่อเกิดการพังของรอยต่อชิ้นที่น้ำหนักรับสูงสุดนั้น พบว่ารอยแตกเกิดขึ้นบริเวณเนื้อของคอนกรีตที่ติดอยู่กับบริเวณอีพ็อกซี และสรุปว่าโดยทั่วไปการพังของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีการใช้งานอีพ็อกซี รอยต่อจะพังแบบการแยกออกจากกันระหว่างผิวคอนกรีตและอีพ็อกซี ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อนั้นได้มาจากความสามารถรับแรงดึงของคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน และผลการทดสอบนี้ตรงกับการทดสอบของ (Moustafa 1975) นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้งานจะไม่มีผลต่อกำลังของรอยต่อเมื่อมีการใช้ความหนาของอีพ็อกซีที่ 1 หรือ 2 มิลลิเมตร

2.4 การทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งและอีพ็อกซี

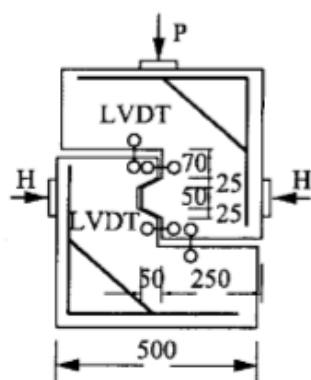
1). รอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้ง (Keyed Dry Joints)

การศึกษาของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) แบ่งรอยต่อสำหรับการทดสอบเป็นแบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joint) แสดงดังรูปที่ 2.9(ก) และแบบหลายสลัก (แทนรอยต่อแบบหลายสลักด้วยสลัก 3 ตัว) (Multiple-Keyed or 3-Keyed Joint) แสดงดังรูปที่ 2.9(ข) ให้แรงอัดด้านข้างที่แตกต่างกัน และให้แรงกระทำด้านบนขึ้นตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นการทดสอบเฉพาะแรงเฉือนจนกระทั่งเกิดการพังของสลักรับแรงเฉือนหรือรอยต่อไม่สามารถรับแรงกระทำได้อีกต่อไป

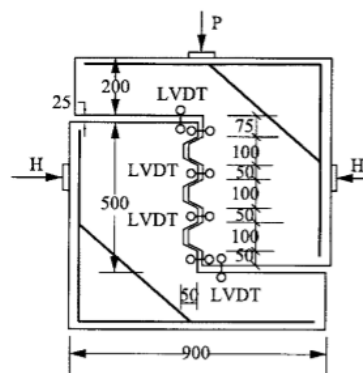
ผลการทดสอบพฤติกรรมรับแรงของชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบในหลายๆ ตัวอย่าง เมื่อทำการเพิ่มแรงอัดด้านข้างขึ้น จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized Shear Stress) และระยะการเคลื่อนตัว (Relative Displacement) ของรอยต่อ สำหรับสลักเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยในช่วงแรกความสัมพันธ์มีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง และเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นบริเวณสลักรับแรงเฉือนจะเกิดการแตกร้าวขึ้นจนกระทั่งสลักพังลง รอยต่อจะไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป

สำหรับรอยต่อแบบหลายสลักนั้น มีลักษณะรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงเฉือนกับระยะเคลื่อนตัวในช่วงแรกคล้ายคลึงกับรอยต่อแบบสลักเดี่ยว แต่รูปแบบความสัมพันธ์จะต่างกันในช่วงของการพังของสลักรับแรงเฉือนแสดงดังรูปที่ 2.11 เนื่องจากรอยต่อมีสลักรับแรงเฉือนหลายตัวจะทำให้รอยต่อแบบหลายสลักมีสลักรับแรงเฉือนตัวที่ยังไม่พังลงนั้นสามารถช่วยโครงสร้างรับแรงต่อไปได้จนกระทั่งสลักตัวสุดท้ายจะพังลง

ก).



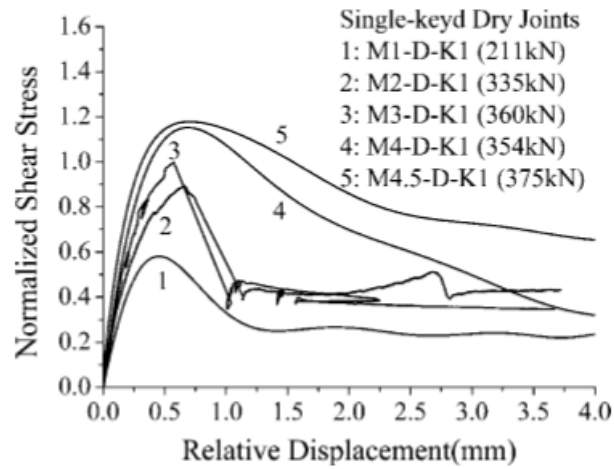
ข).



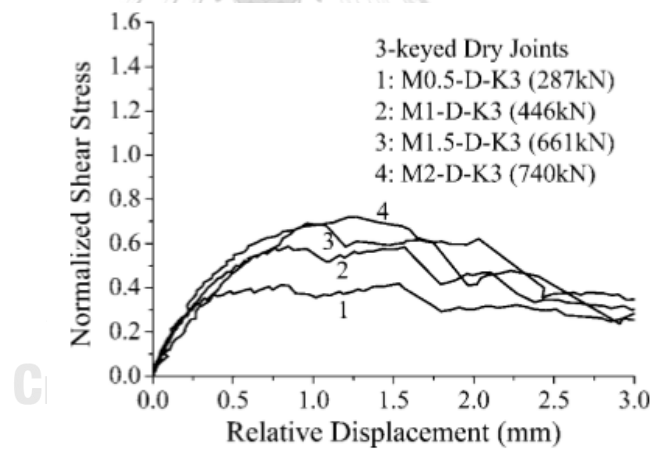
รูปที่ 2. 9 รายละเอียดรอยต่อสลักรับแรงเฉือน

ก). แบบสลักเดี่ยว (Single-Keyed Joint) ข). แบบหลายสลัก (3-Keyed Joint)

(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

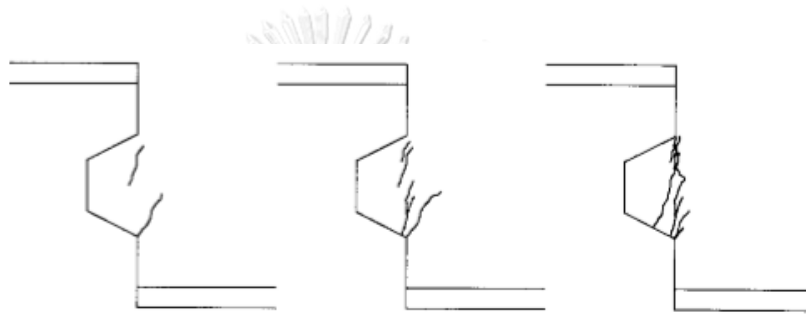


รูปที่ 2. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบสลักเดี่ยวแบบแห้ง (Zhou, Mickleborough et al. 2005)

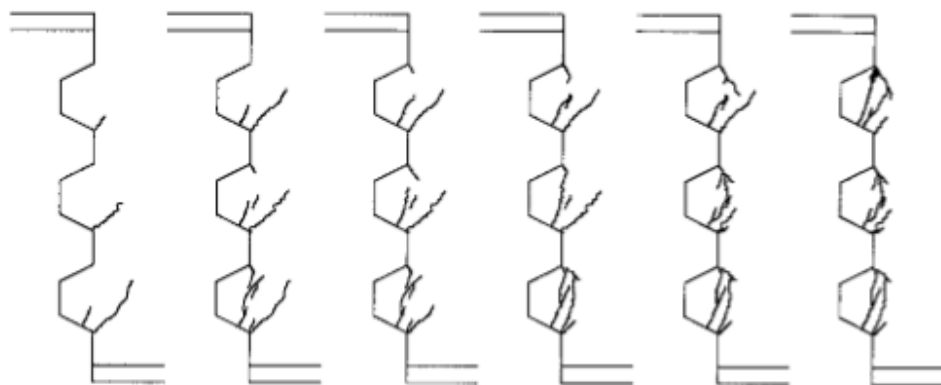


รูปที่ 2. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบหลายสลักแบบแห้ง (Zhou, Mickleborough et al. 2005)

รูปแบบการพังของสลักรับแรงเฉือนตามงานศึกษาของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) สำหรับสลักเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.12 หรือหลายสลักแสดงดังรูปที่ 2.13 จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยรอยแตกเริ่มจากบริเวณมุมด้านล่างของตัวสลักเมื่อรอยต่อรับแรงประมาณ 70% ของความเค้นเฉือนสูงสุด รอยแตกมีรูปแบบเป็นแนวเอียงประมาณ 45 องศากับแนวระนาบแรงเฉือนและยาวขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อรอยต่อรับแรงมากขึ้น หลังจากนั้นจะเริ่มมีรอยแตกเล็กๆ บริเวณที่ฐานของสลัก รอยแตกจะค่อยๆ เริ่มแตกและเพิ่มจำนวนขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งรอยแตกเชื่อมต่อกัน ซึ่งจะทำให้สลักรับแรงเฉือนถูกแยกออกจากตัวชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป และเป็นจุดสูงสุดของกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

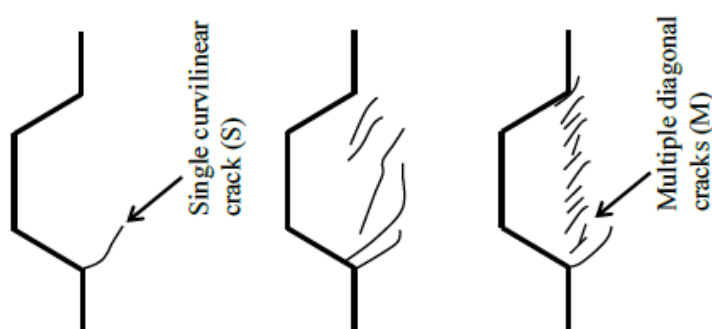


รูปที่ 2. 12 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งสลักเดี่ยว
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)



รูปที่ 2. 13 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบแห้งหลายสลัก
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

งานศึกษาของ (Bakhoum 1991) ได้มีการแบ่งรูปแบบการพังของสลักรับแรงเฉือนเป็น 2 ลักษณะ โคนแบ่งเป็นการแตกแบบ รอยแตกโค้งเดียว (Single curvilinear crack) ซึ่งเป็นรอยแตกเริ่มต้นที่ประมาณ 70% ของความเค้นเฉือนสูงสุดของสลักรับแรงเฉือนโดยเกิดขึ้นบริเวณมุมล่างของสลัก และรอยแตกหลายเส้น (Diagonal multiple cracks) เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นเมื่อแรงยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง รอยแตกจะเกิดขึ้นบริเวณฐานของสลัก และเมื่อรอยต่อเชื่อมต่อกันก็จะเกิดการพังทลายของสลักแสดงดังรูปที่ 2.14

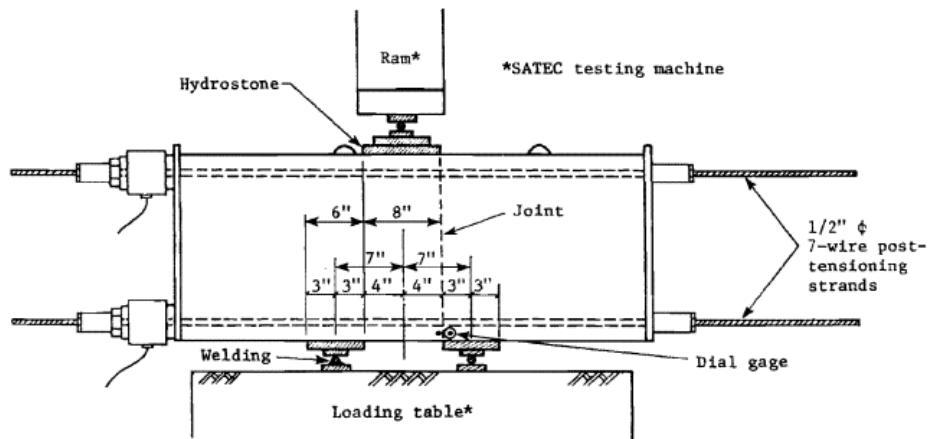


รูปที่ 2. 14 ลักษณะการแตกของรอยต่อสลักรับแรงเฉือน

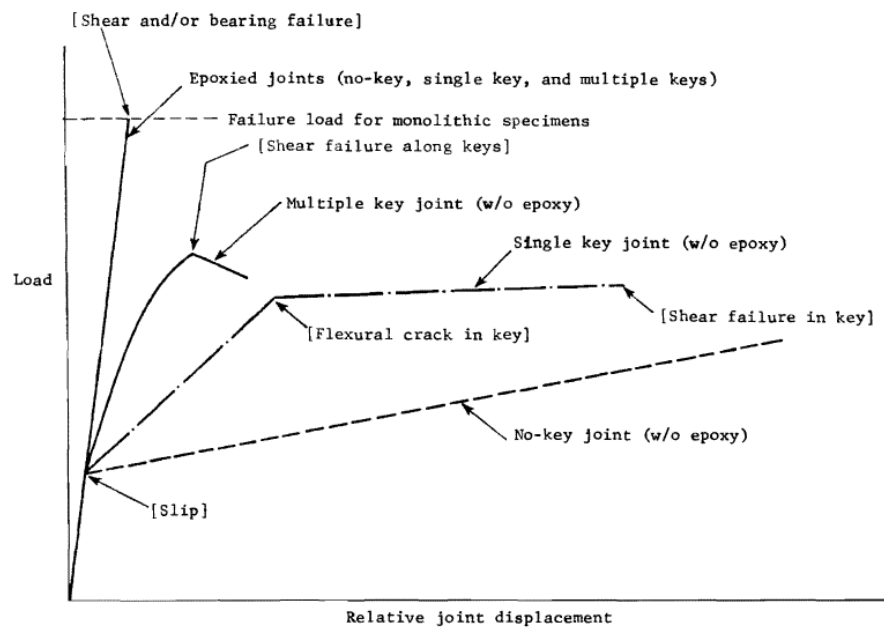
(Bakhoum 1991)

2). รอยต่อสลักรับแรงเฉือนอีพ็อกซี (Keyed Epoxyed Joints)

งานวิจัยของ (Koseki and Breen 1983) ทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อขึ้นส่วนสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง แสดงดังรูปที่ 2.15 กับรอยต่อแบบไม่มีสลัก แบบสลักเดี่ยว และแบบหลายสลักและใช้รอยต่อแบบแห้งและแบบอีพ็อกซี ผลการทดสอบพบว่า รอยต่อที่มีการใช้อีพ็อกซีมีกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อมากกว่ารอยต่อแบบแห้งอยู่ถึง 60-80% แสดงดังรูปที่ 2.16 เพราะอีพ็อกซีจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวขึ้นและทำให้การรับแรงของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับแบบโครงสร้างด้วยวิธีเทคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยให้สลักรับแรงเฉือนของรอยต่อติดกันได้ดีขึ้น ทำให้สลักรับแรงเฉือนมีประสิทธิภาพมากกว่ารอยต่อแบบแห้ง



รูปที่ 2.15 การเตรียมการทดสอบแรงเฉือน
(Koseki and Breen 1983)

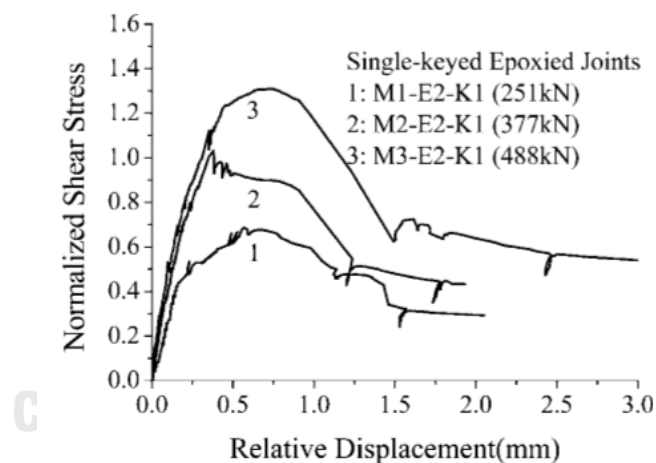


รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของรอยต่อ
(Koseki and Breen 1983)

ในปี 2005 งานวิจัยของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) ทำการทดสอบรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบมีอีพ็อกซี มีการทดสอบด้วยขนาดชิ้นส่วนตัวอย่างการทดสอบและวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบในรอยต่อสลักรับแรงเฉือนแบบแห้ง แต่ได้เพิ่มการใช้อีพ็อกซีที่บริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนด้วย

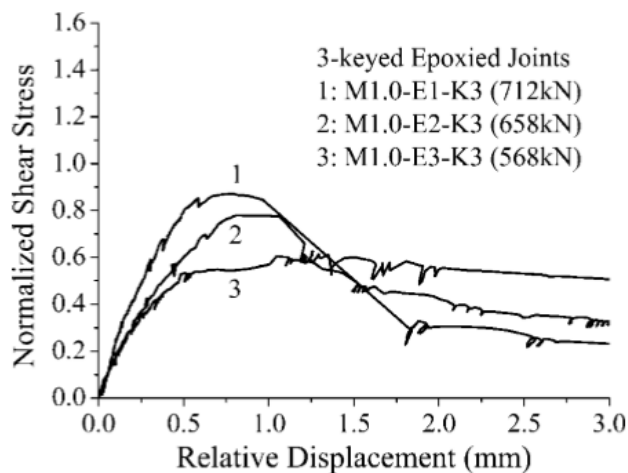
ผลการทดสอบแบบรอยต่อสลักเดี่ยวได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Normalized Shear Stress) และระยะการเคลื่อนตัว (Relative Displacement) ของรอยต่อแสดงดังรูป 2.17 โดยรอยต่ออีพ็อกซีมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear deformation) ทุกตัวอย่างการทดสอบพังลงในรูปแบบเปราะเมื่ออีพ็อกซีไม่สามารถรับแรงได้อีกและเกิดการไหลของของชิ้นส่วนสลักรับแรงเฉือนสองชิ้นส่วนออกจากกัน

ผลการทดสอบของรอยต่อของหลายสลักได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวแสดงดังรูปที่ 2.18 คล้ายกับรอยต่อสลักเดี่ยว แต่จะมีพฤติกรรมการเสียรูปที่ดีกว่าเพราะมีการช่วยรับแรงของสลักรับแรงเฉือนตัวที่สามารถรับแรงได้อยู่



รูปที่ 2. 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีสลักเดี่ยว

(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

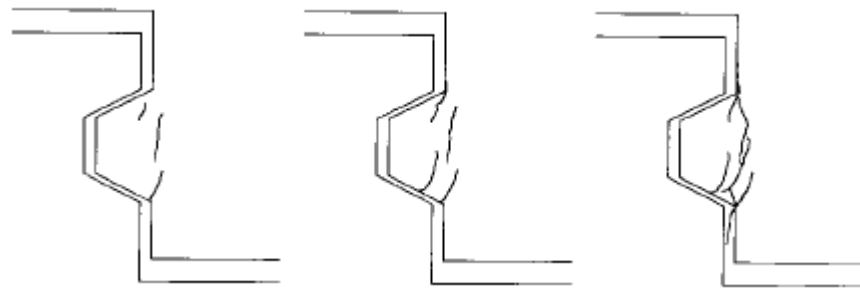


รูปที่ 2. 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ สำหรับรอยต่อแบบอีพ็อกซีหลายสลัก

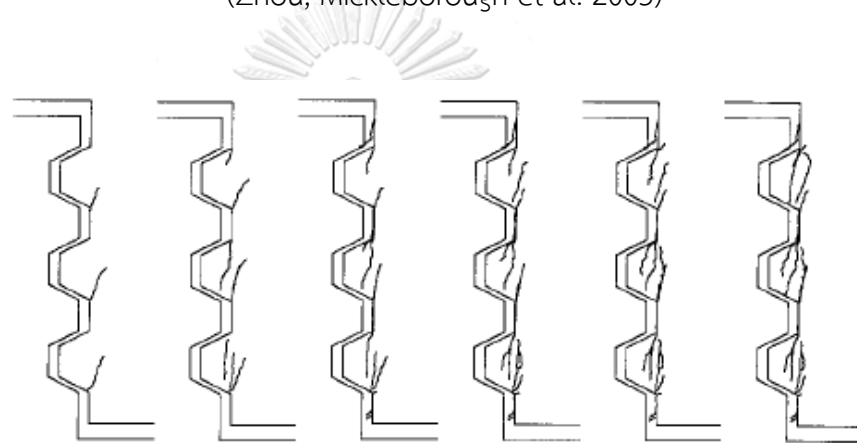
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

รูปแบบการพังของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบสลักเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.19 รอยแตกเริ่มต้นที่บริเวณมุมด้านล่างของสลักรับแรงเฉือนและยาวขึ้นตลอดระยะนาบแรงเฉือน โดยเมื่อรอยต่อรับแรงเพิ่มมากขึ้นพบรอยแตกบางส่วนเกิดขึ้นบริเวณผิวของคอนกรีตที่อยู่ติดกับอีพ็อกซี เมื่อใกล้จุดสูงสุดของกำลังรับแรงของรอยต่อ รอยแตกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ฐานของสลักรับแรงเฉือน และรอยแตกจะเชื่อมต่อกันทำให้สลักรับแรงเฉือนพังลง

รูปแบบพังของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบหลายสลักแสดงดังรูปที่ 2.20 นั้นมีรูปแบบคล้ายกับรอยต่อแบบสลักเดี่ยว โดยอีพ็อกซีจะช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นเฉือนในแต่ละสลักลง ช่วยทำให้แรงเฉือนมีรูปแบบคงที่มากขึ้น และทำให้สลักในรอยต่อนั้นต่อกันได้ดีมากขึ้น ซึ่งตรงกับข้อสรุปของ (Koseki and Breen 1983) เป็นเหตุผลให้การเสีรูปร่างของรอยต่อแบบอีพ็อกซีดีกว่าการเสีรูปร่างของรอยต่อแบบแห้ง



รูปที่ 2. 19 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีฟ็อกซี่สลักเดี่ยว
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)



รูปที่ 2. 20 รูปแบบลำดับการแตกของรอยต่อแบบอีฟ็อกซี่หลายสลัก
(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

2.5 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อโดย (ACI 2014) สามารถคำนวณออกแบบกำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณาเฉพาะแรงเสียดทานสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงของรอยต่อแบบไม่มีสลักรับแรงเฉือนหรือรอยต่อแบบแบนราบ ได้ดังสมการ 2.1

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

A_{joint} คือพื้นที่ฐานทั้งหมดของสลักรับแรงเฉือนบนระนาบของการพัง; σ_n คือความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress) และ μ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (coefficient of friction) ตาม (ACI 2014) แนะนำให้ใช้ 0.6 สำหรับคอนกรีตทั่วไป

รอยต่อสลักรับแรงเฉือนรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สามารถคำนวณออกแบบกำลังรับแรงเฉือนตาม (AASHTO 2010) ได้ดังสมการ 2.2

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

A_k คือพื้นที่ฐานทั้งหมดของสลักรับแรงเฉือนบนระนาบของการพัง; f'_c คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต; σ_n คือความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress) ทั้งหมดที่ได้จากการการดึงลวดอัดแรงหลังจากสูญเสียแรงอัดในลวด (prestress loss) แล้วโดยวัดที่กึ่งกลางของหน้าตัด และ A_{sm} คือพื้นที่พื้นที่บริเวณเรียบที่ติดกันระหว่างชิ้นส่วนบนระนาบของการพัง

งานวิจัยของ (Rombach and Speaker 2004) ได้มีการปรับแต่งและเสนอการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนสำหรับรอยต่อสลักรับแรงเฉือนรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมูดังสมการ 2.3

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

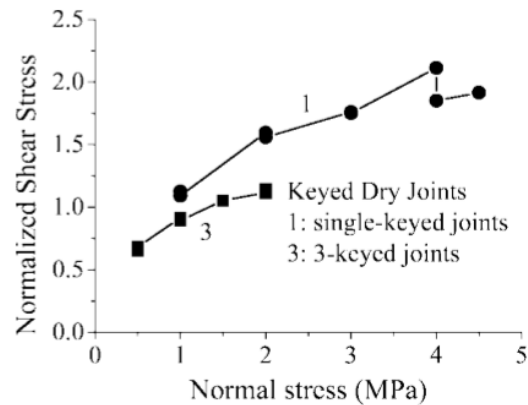
A_k คือพื้นที่ผิวของรอยต่อหรือบริเวณเรียบที่ติดกันระหว่างชิ้นส่วน; σ_n คือความเค้นอัดด้านข้าง (confining stress) และ $A_{joint} = A_k + A_{sm}$ คือพื้นที่ฐานทั้งหมดของรอยต่อในระนาบการพัง

2.6 ปัญหาของรอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง

ปัญหาที่พบสำหรับการใช้งานคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง ปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากวิธีการก่อสร้างของคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีขั้นตอนต้องควบคุมมากพอสมควร เช่น เริ่มจากการหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป การนำชิ้นส่วนออกจากแบบหล่อที่ไม่ระมัดระวังอาจทำให้สลักรับแรงเฉือนเสียหายได้ ในส่วนของการขนส่ง การขนส่งชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังในการขนส่ง เพราะชิ้นส่วนอาจถูกกระทบหรือเกิดการกระแทกแรงๆ ระหว่างการขนส่ง อาจทำให้ชิ้นส่วนเกิดรอยแตกและเสียหายได้

ปัญหารอยต่อแบบแห้ง รอยต่อที่มีสลักรับแรงเฉือนแบบแห้งของงานวิจัย (Zhou, Mickleborough et al. 2005) ที่ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ โดยผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยต่อสลักของรอยต่อหลายสลักน้อยกว่าแบบสลักเดี่ยวอยู่เสมอ โดยพบปัญหาจากข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน ส่งผลให้สลักรับแรงเฉือนมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ในแต่ละชิ้นส่วนคอนกรีต เมื่อนำชิ้นส่วนมาต่อกันบริเวณสลักที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น เมื่อชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงส่งผลให้รอยต่อไม่สามารถใช้งานเต็มประสิทธิภาพเหมือนกับรอยต่อแบบสลักเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.21 ปัญหาของรอยต่อแบบแห้งหลายสลักสามารถแก้ไขได้จากการใช้งานอีพ็อกซีกับรอยต่อ โดยรอยต่อแบบอีพ็อกซีมีกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของสลักในรอยต่อระหว่างรอยต่อสลักเดี่ยวและหลายสลักได้ผลใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพ็อกซีจะมีส่วนช่วยในการลดปัญหาขนาดของสลักไม่สม่ำเสมอกลงได้ แต่การใช้อีพ็อกซีกับรอยต่อนั้นยังคงพบปัญหาในการใช้งาน

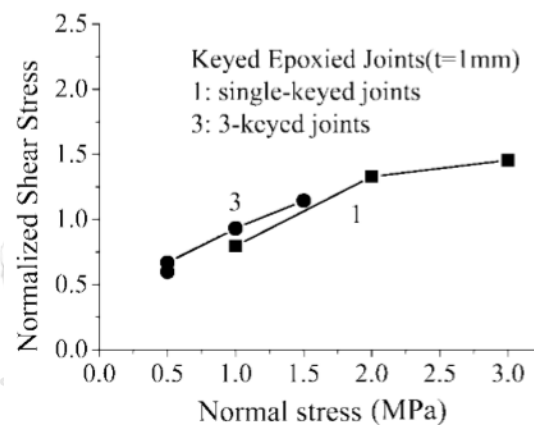
ปัญหาการใช้งานอีพ็อกซีกับรอยต่อ แม้อีพ็อกซีจะช่วยให้ในการรับแรงของรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้นจากการทำให้สลักรับแรงเฉือนต่อเข้ากันได้ดีขึ้นและช่วยกระจายแรงในสลักรับแรงเฉือนได้อย่างดี แต่ยังพบปัญหาอยู่ โดยการศึกษาของ (Bakhoum 1991) พุถึงการใช้งานอีพ็อกซีในสภาพงานจริง อีพ็อกซีต้องใช้ระยะเวลาพอสมควรในการเปลี่ยนสถานะภาพให้สามารถพร้อมรับแรงได้ จึงส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อสร้าง นอกจากนี้การควบคุมความหนาของอีพ็อกซีให้สม่ำเสมอทำได้ยาก กลายเป็นสาเหตุให้เกิดความเข้มของความเค้นเฉือนในรอยต่อไม่เท่ากัน และการผสมอีพ็อกซีหรือการเลือกประเภทอีพ็อกซีใช้งานไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสม ก็เป็นอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการพังของโครงสร้างได้



รูปที่ 2. 21 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนของสลักระหว่างสลักเดี่ยวและหลายสลักของรอยต่อแบบ

ไม่ใช้อีพ็อกซี

(Zhou, Mickleborough et al. 2005)



รูปที่ 2. 22 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนของสลักระหว่างสลักเดี่ยวและหลายสลักของรอยต่อแบบ

ใช้อีพ็อกซี

(Zhou, Mickleborough et al. 2005)

ปัญหากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของของ AASHTO และเกณฑ์การออกแบบอื่นๆ (Rombach and Speaker 2004, AASHTO 2010) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อประเภทสลักเดี่ยวและหลายสลักแบบอีพ็อกซีจากการทดสอบมีกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าจากผลการคำนวณตามมาตรฐานของ AASHTO และเกณฑ์การออกแบบอื่นๆ อยู่ถึง 40% แต่ในส่วนกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อประเภทหลายสลักแบบแห้งนั้นพบว่าน้อยกว่าผลการคำนวณจาก AASHTO และเกณฑ์การออกแบบ

อื่นๆ โดยงานวิจัยของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) เสนอให้ควรมีการปรับค่าลดกำลัง (Reduction Factor) ลงสำหรับการใช้งานรอยต่อหลายสลักแบบแห้ง ส่งผลให้ในปัจจุบันนั้นยังคงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปกับการใช้งานอีพ็อกซีอยู่อย่างต่อเนื่อง



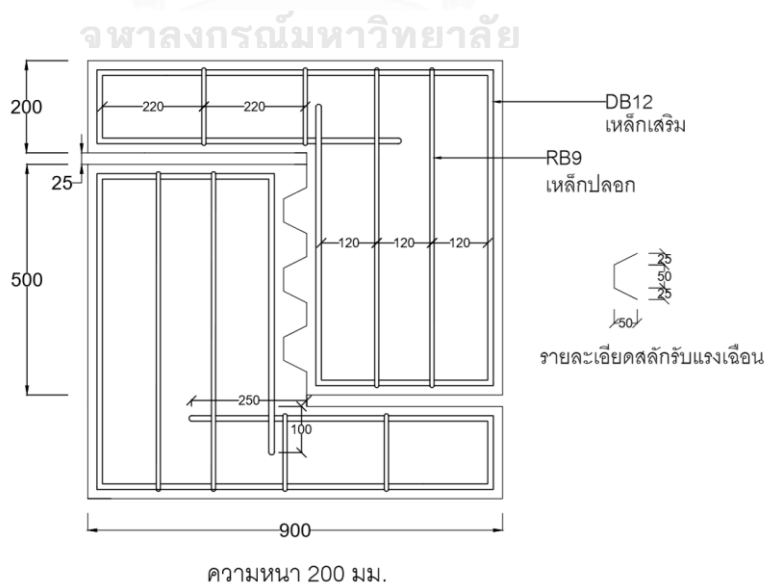
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำการทดสอบตามวัตถุประสงค์ที่คาดหวังไว้ โดยเริ่มจากรายละเอียดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบสลักรับแรงเฉือนหลายสลัก ประกอบด้วยรอยต่อแบบแห้ง แบบอีพ็อกซี และรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ และอธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ กับชิ้นตัวอย่างทดสอบ การกดอัดชิ้นส่วนตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อ

3.1 ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นส่วนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบสำหรับรับแรงเฉือนนั้น ออกแบบให้ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบแบบหลายสลักแสดงดังรูปที่ 3.1 มีขนาดคล้ายกับงานวิจัยของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) ที่มีการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อในคอนกรีตสำเร็จรูป การออกแบบนั้นมีการหล่อชิ้นตัวอย่างขึ้นมาสองชิ้นส่วนและนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ในส่วนของรอยต่อได้มีการออกแบบสลักรับแรงเฉือนรูปสี่เหลี่ยมคางหมูยื่นออกมาจากตัวรอยต่อ สำหรับเป็นแนวในการประกอบชิ้นส่วนสองชิ้นเข้าด้วยกันและทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตสามารถถ่ายแรงได้ โดยรอยต่อของตัวอย่างแบบทดสอบนี้มีลักษณะคล้ายกับรอยต่อที่มีการใช้งานในการก่อสร้างจริง



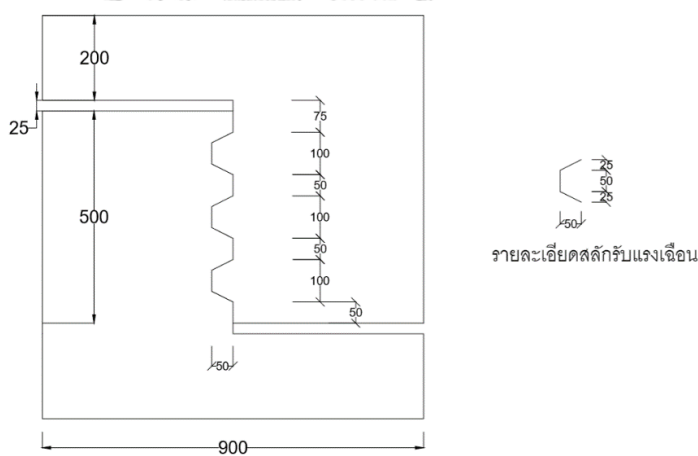
รูปที่ 3. 1 รายละเอียดชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบได้ทำการจำแนกรอยต่อสำหรับการทดสอบออกเป็น 3 ประเภท

สำหรับชื่อชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกย่อเป็นรหัส กำกับด้วยตัวพยัญชนะภาษาอังกฤษและตัวเลขความหมายดังนี้ ตัวพยัญชนะตัวแรกระบุชนิดของรอยต่อชิ้นตัวอย่างทดสอบ ตัว D หมายถึง รอยต่อแบบแห้ง (Dry Joints) ตัว E หมายถึง รอยต่อแบบอีพ็อกซี (Epoxy joints) ตัว R หมายถึง รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ (Elastomeric Rubber Joints) และตามด้วยตัวเลขติดกันระบุความแข็งของยางในหน่วย IRHD ตัวพยัญชนะตำแหน่งที่สองระบุ ประเภทของแรงที่ทดสอบ ตัว M หมายถึง การให้แรงที่ทดสอบแบบสม่ำเสมอ (Monotonic Load) ตัวเลขติดกันระบุ ค่าของแรงด้านข้างในหน่วยเมกะปาสคาล และพยัญชนะตำแหน่งสุดท้ายระบุตำแหน่งของการใส่ยาง ตัว A ใส่ยางทั้งบนและล่างของสลักรับแรงเฉือน ตัว B ใส่ยางด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้นและ C ใส่ยางด้านข้างและด้านล่างสลักรับแรงเฉือน

1) รอยต่อแบบแห้ง หรือ D-M1

รอยต่อแบบแห้ง แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นรอยต่อที่ไม่ได้มีการใช้งานวัสดุประสานอีพ็อกซี

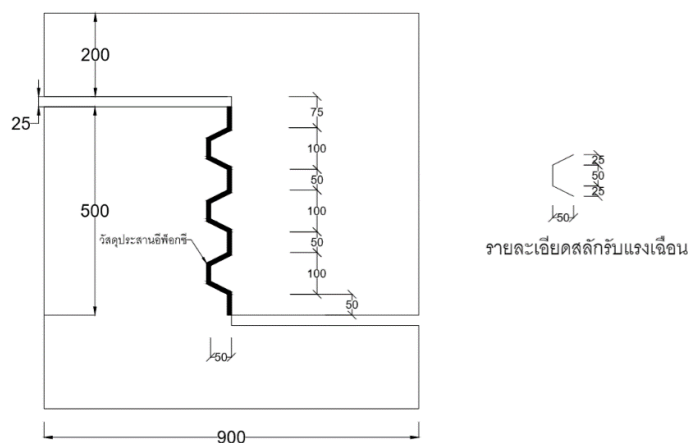


รูปที่ 3. 2 รายละเอียดรอยต่อแบบแห้ง

2) รอยต่ออีพ็อกซี หรือ E-M1

รอยต่ออีพ็อกซี รายละเอียดของชิ้นตัวอย่างทดสอบจะเหมือนกับ 1) รอยต่อแบบแห้ง แต่มีการเพิ่มใช้งานวัสดุประสานอีพ็อกซีบริเวณรอยต่อ แสดงดังรูปที่ 3.3 การเตรียมรอยต่อสำหรับการทดสอบรอยต่อแบบอีพ็อกซี ใช้งานอีพ็อกซีสำหรับรอยต่อที่ความหนา 1-2 มิลลิเมตรและไม่ควรเกินความหนาที่ 2 มิลลิเมตร ตามการแนะนำในงานวิจัยของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005)

หลังจากทออีพ็อกซีบริเวณรอยต่อ นำขึ้นตัวอย่างทดสอบมาให้แรงอัดด้านข้างประมาณ 0.3 เมกะปาสคาล สำหรับการรักษาสภาพการใช้งานและให้อีพ็อกซีเปลี่ยนสถานะพร้อมใช้งาน (PTI 1978)

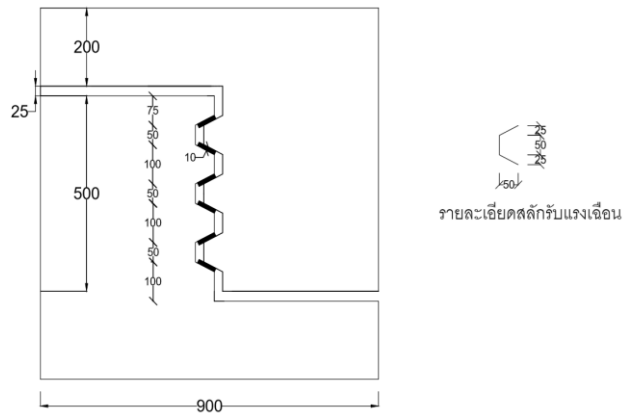


รูปที่ 3.3 รายละเอียดรอยต่ออีพ็อกซี

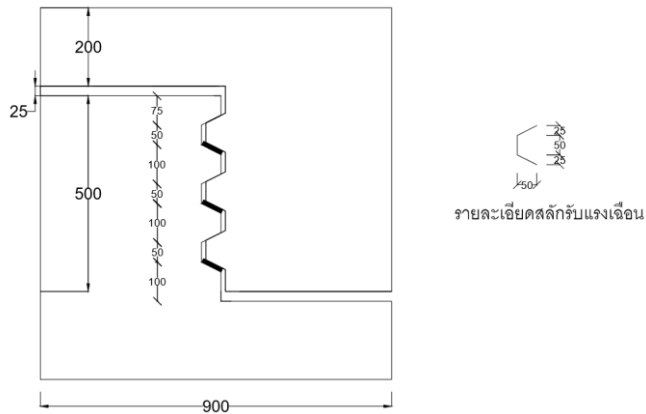
3) รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค หรือ R-M1

รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค เป็นรอยต่อในลักษณะรอยต่อแห้งที่ไม่ได้มีการใช้อีพ็อกซี แต่นำในส่วนของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค ความแข็ง 60 IRHD หรือ R60-M1 และ 70 IRHD หรือ R70-M1 มาใส่ไว้บริเวณสลักรับแรงเฉือนโดยแบ่งลักษณะการใส่ยาง 3 ประเภทดังนี้

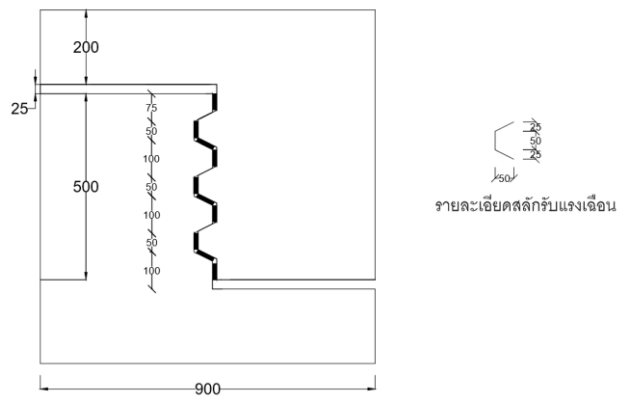
1. ด้านบนและล่างของสลักรับแรงเฉือน หรือแบบ A ประกอบไปด้วย R60-M1-A และ R70-M1-A แสดงดังรูปที่ 3.4
2. บริเวณด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้น หรือแบบ B ประกอบไปด้วย R60-M1-B และ R70-M1-B แสดงดังรูปที่ 3.5
3. บริเวณแนวตั้งด้านข้างและด้านล่างสลักรับแรงเฉือน หรือแบบ C ประกอบไปด้วย R60-M1-C และ R70-M1-C แสดงดังรูปที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยแผ่นยางอีลาสโตเมอร์คที่ใช้งานมีความหนา 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3. 4 รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำด้านบนและล่างสลักรับแรงเฉือน:แบบ A



รูปที่ 3. 5 รายละเอียดรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้น:แบบ B



รูปที่ 3. 6 รายละเอียดรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค้ำข้างและล่างสลักรับแรงเฉือน:แบบ C

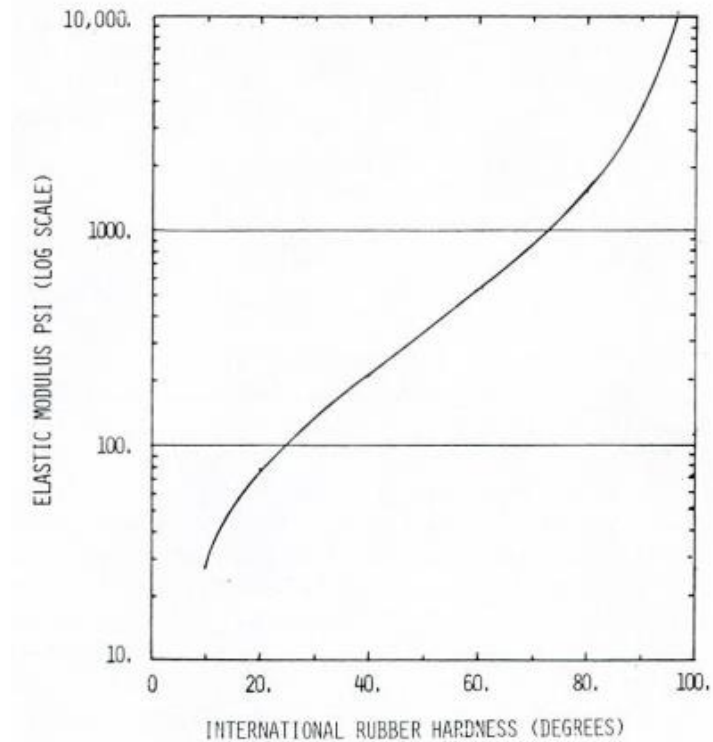
แผ่นยางอีลาสโตเมอร์แสดงดังรูปที่ 3.7 เป็นวัสดุที่ใช้กันในอุตสาหกรรมการก่อสร้างอย่างกว้างขวางในส่วนของฐานรองรับ เช่นการใช้งานเกี่ยวกับสะพาน ปัจจุบันมีทั้งแบบที่เป็นยางล้วน ที่ใช้วัสดุประเภทยางจากธรรมชาติ หรือวัสดุประเภทยางสังเคราะห์ และวัสดุที่ไม่ใช่ยางล้วนที่นำเอาวัสดุประเภทต่างๆ มาผสมเช่น เหล็ก พลาสติก และเส้นใยแก้วเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น



รูปที่ 3.7 แผ่นยางอีลาสโตเมอร์

ยางอีลาสโตเมอร์นั้นจะอยู่ระหว่างโครงสร้างส่วนบนและส่วนล่างของสะพาน ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักโครงสร้างส่วนบนลงสู่ส่วนล่างและยอมให้โครงสร้างส่วนบนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ (Displacement) และการหมุน (Rotation) ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงมากเกินไปถ่ายลงสู่ส่วนล่างของโครงสร้างและฐานราก

คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ มีค่าความแข็ง ซึ่งความแข็งของวัสดุประเภทยางนั้นสามารถวัดด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ดูโรมิเตอร์ (Durometer) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะหัวกดเหล็กปลายรูปกรวยแหลม โดยตัวเลขความแข็งนั้นจะมีค่า 1 ถึง 100 นอกจากนั้นความแข็ง ของอีลาสโตเมอร์อาจจำแนกและแสดงในหน่วย International Rubber Hardness Degree; IRHD ซึ่งเมื่อทราบถึงค่าความแข็งจะสามารถทราบถึงค่าคุณสมบัติที่นำไปออกแบบแผ่นอีลาสโตเมอร์ได้ คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) แสดงดังรูปที่ 3.8 ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus, G) และค่าการโก่งตัวทันทีได้สำหรับอายุการออกแบบ 25 ปี แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและโมดูลัสยืดหยุ่น
(J. F. STANTON and ROEDER 1982)

HARDNESS (SHORE 'A')	50	60	70
Shear Modulus at 73°F (psi) (MP _a)	85-110 (0.60-0.77)	120-155 (0.85-1.10)	160-260
($\frac{\text{creep deflection}}{\text{instantaneous deflection}}$) at 25 years	25%	35%	45%

รูปที่ 3. 9 ค่าโมดูลัสแรงเฉือนและค่าการโก่งตัวทันทีสำหรับอายุการออกแบบ 25 ปี
(J. F. STANTON and ROEDER 1982)

ด้านการรับแรงของแผ่นอีลาสโตเมอร์ที่นำมาใช้งาน จะต้องสามารถรับแรงกดอัดและแรงเฉือนได้ จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมด้านการรับของแผ่นอีลาสโตเมอร์ ในการรับแรงกดอัดแผ่นยางจะมีพฤติกรรมไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) ดังแสดงรูปที่ 3.10 และตามมาตรฐานการออกแบบ (AASHTO 2010) ได้กำหนดการออกแบบแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ให้หน่วยแรงกดอัดนั้นมีค่าไม่เกิน ดังสมการที่ 3.1 หรือไม่เกิน 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

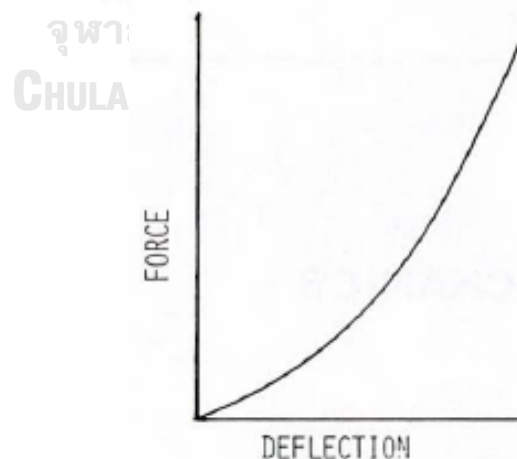
$$\sigma_c = \frac{G \cdot S}{\beta} \quad (3.1)$$

σ_c คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้; G คือโมดูลัสแรงเฉือน; S คือ ปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) $S = \frac{L \cdot W}{2 \cdot h \cdot (L + W)}$; β คือ ตัวคูณแรง จะเท่ากับ 1.0 สำหรับยางชั้นใน และ 1.4 สำหรับยางชั้นนอก

สำหรับการรับแรงเฉือนของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$S = \frac{G \cdot A \cdot \Delta_h}{T} \quad (3.2)$$

S คือ แรงเฉือน; G คือโมดูลัสแรงเฉือน; A คือ พื้นที่ผิวของแผ่นยางรองสะพาน; Δ_h คือ การเคลื่อนที่ทั้งหมดของแผ่นยางในแนวราบ; T คือ ความหนาทั้งหมดของแผ่นยาง



รูปที่ 3. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและระยะโก่งของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์

(J. F. STANTON and ROEDER 1982)

การเลือกใช้แผ่นยางอีลาสโตเมอร์เสริมรอยต่อ มีวัตถุประสงค์คือ การนำข้อดีและข้อจำกัดของรอยต่อแบบแห้งและรอยต่อแบบอีพอกซีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 มารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งการเลือกใช้งานแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ เพราะเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงอัดแรงแรงเฉือนและสามารถยืดหยุ่นได้ดี จะมีหน้าที่เติมเต็มช่องว่างของสลักรับแรงเฉือนที่เกิดจากข้อบกพร่อง จากความไม่สม่ำเสมอของสลักรับแรงเฉือนจากการผลิตชิ้นส่วน ทำให้เกิดช่องว่างเมื่อนำชิ้นส่วนมาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อตัวสลักรับแรงภายนอกได้เพียงบางส่วน ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานได้ไม่เต็มที่ โดยเมื่อเสริมแผ่นยางที่รอยต่อจะส่งผลให้การรับแรงของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อนั้นทำงานได้ดีขึ้นและมีพฤติกรรมในการรับแรงที่เปลี่ยนไป



3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีตสำหรับหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบ ที่กำลังอัด 30 เมกะปาสคาล โดยสัดส่วนการผสม แสดงดังตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมตามที่ออกแบบในหัวข้อ 3.1 คุณภาพมาตรฐาน มอก. ดังแสดงตารางที่ 3.2 และส่วนสุดท้ายคือแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค ใช้ที่ความหนา 10 มม. ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3. 1 สัดส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุ	สัดส่วน/ลูกบาศก์เมตร	
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	380	กก.
มวลรวมหยาบ(ขนาดใหญ่สุด 20 มม.)	1060	กก.
มวลรวมละเอียด	740	กก.
น้ำ	200	ลิตร
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.53	

ตารางที่ 3. 2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

ประเภท	เส้นผ่านศูนย์กลาง	พื้นที่ (ตาราง มิลลิเมตร)	ความ	ความ	มอดูลัสของ
			ต้านทานแรงดึงที่จุดคราก	ต้านทานแรงดึงสูงสุด	สภาพยืดหยุ่น
เหล็กเสริม RB9 SR24	9	63.62	(เมกกะปาสคาล) 240	(เมกกะปาสคาล) 390	(เมกกะปาสคาล) 2.1×10^5
เหล็กเสริม DB12 SD40	12	113.04	(เมกกะปาสคาล) 400	(เมกกะปาสคาล) 570	(เมกกะปาสคาล) 2.1×10^5

ตารางที่ 3. 3 คุณสมบัติของแผ่นยางอีลาสโตเมอร์

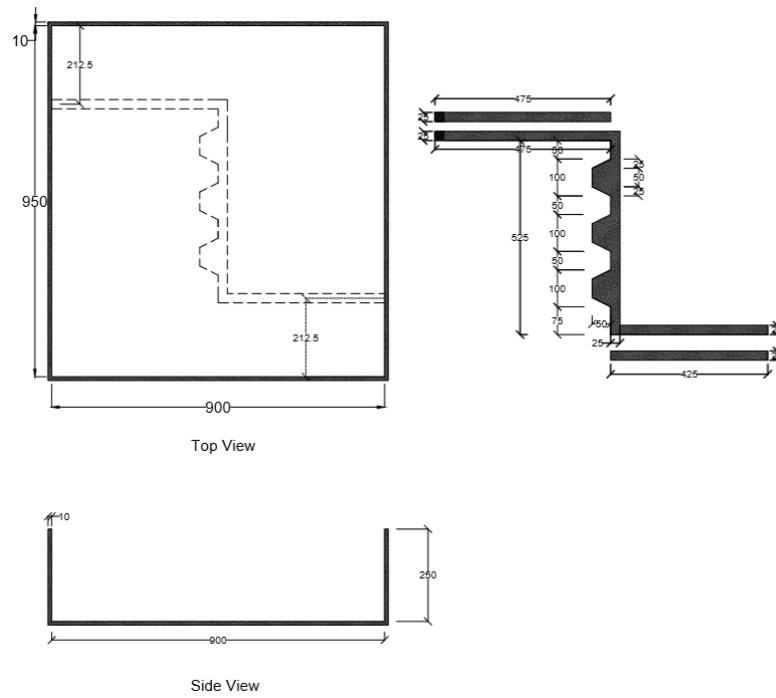
คุณสมบัติ	ยางธรรมชาติ	ยางธรรมชาติ
ความแข็ง	60	70
กำลังรับแรงดึง(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	2,500	2,500
ระยะยืดตัว ณ จุดขาด,น้อยที่สุด	400%	300%
ค่าสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงได้จากค่าเริ่มต้น เมื่อโดนความร้อน 168 ชั่วโมง 70 องศาเซลเซียส		
ความแข็ง	+10	+10
กำลังรับแรงดึง(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	-25%	-25%
ระยะยืดตัว ณ จุดขาด,น้อยที่สุด	-25%	-25%
Compression set		
ความหนาของยางที่เปลี่ยนไปสูงสุด เมื่อ โดนความร้อน 70 องศาเซลเซียส 22 ชั่วโมง	25%	25%

3.3 การเตรียมการและการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือน

วัตถุประสงค์สำหรับการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือน การทดสอบทำขึ้นเพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ พฤติกรรมของรอยต่อเมื่อรับแรงเฉือน และรูปแบบการพังทลายของรอยต่อ รวมถึงปัญหาของรอยต่อในประเภทต่างๆ เมื่อรอยต่อรับแรง การทดสอบจะเริ่มโดยการสร้างชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบและนำชิ้นส่วนมาทดสอบ ด้วยการให้แรงเพิ่มขึ้นคงที่กอดัดบริเวณด้านบนของชิ้นตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปกับประเภทรอยต่อดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบอันดับแรกคือ การสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำหรับการทดสอบขึ้น โดยทำการหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบในแบบหล่อที่ทำขึ้นดังแสดงรูปที่ 3.11 แบบหล่อชิ้นส่วนทำจากไม้อัดเป็นกล่องสี่เหลี่ยมดังแสดงรูปที่ 3.12 ใช้แผ่นเหล็กและโฟมกันคอนกรีตเป็นรูปสลักรับแรงเฉือนและแยกชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบสองชิ้นออกจากกันแสดงดังรูปที่ 3.13 และป้องกันการแตกของชิ้นส่วนด้วยเหล็กเสริมดัดรูปตามชิ้นส่วนทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.14 ทำการหล่อชิ้นส่วนการทดสอบสองครั้ง สำหรับการทดสอบครั้งแรก จำนวนตัวอย่างชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 3.4 และจำนวนสำหรับการทดสอบครั้งที่สอง ดังแสดงไว้ตารางที่ 3.5



รูปที่ 3. 11 รายละเอียดแบบหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3. 12 แบบหล่อขึ้นส่วนไม้อัด



รูปที่ 3. 13 แผ่นเหล็กและโฟมกันคอนกรีตเป็นรูปสลักรับแรงเฉือน



รูปที่ 3. 14 เหล็กเสริมตัดรูปตามชิ้นส่วนทดสอบ

ตารางที่ 3. 4 จำนวนชิ้นตัวอย่างทดสอบครั้งแรก

ชนิดของรอยต่อ	จำนวนการหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบ
รอยต่อแบบแห้ง	1
รอยต่ออีพ็อกซี	1
รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค ยางธรรมชาติ ความแข็ง 60 IRHD	2

ตารางที่ 3. 5 จำนวนชิ้นตัวอย่างทดสอบครั้งที่สอง

ชนิดของรอยต่อ	จำนวนการหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบ
รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค ยางธรรมชาติความแข็ง 60 IRHD	1
รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ค ยางสังเคราะห์ ความแข็ง 70 IRHD	3

หลังจากเตรียมแบบหล่อเสร็จสมบูรณ์ เทคอนกรีตลงในแบบหล่อ โดยการเทคอนกรีตแบ่งการเทออกเป็นสองครั้งสำหรับแยกชิ้นส่วนทดสอบออกเป็นสองชิ้นและเกิดรอยต่อขึ้นระหว่างชิ้นส่วน แสดงดังรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 บ่มคอนกรีตหลังจากหล่อเสร็จเป็นเวลา 28 วัน ด้วยน้ำยาบ่มคอนกรีตหลังจาก 28 วัน จะได้กำลังอัดของคอนกรีตที่ 90% ของกำลังอัดที่ได้ออกแบบไว้ ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นส่วนเสร็จสมบูรณ์และ พร้อมสำหรับการเตรียมการทดสอบขั้นต่อไป



รูปที่ 3. 15 เทคอนกรีตในแบบหล่อครั้งที่ 1



รูปที่ 3. 16 เทคอนกรีตในแบบหล่อครั้งที่ 2

3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบ

1.) เครื่องทดสอบสำหรับกดอัดชิ้นตัวอย่างทดสอบ

เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine) แสดงดังรูปที่ 3.17 ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบโดยจุดประสงค์หลักเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งสามารถใช้กับชิ้นงานทดสอบ ได้แก่ ยาง, พลาสติก, โลหะ, คอนกรีต, ไม้ โดยใช่กับการทดสอบแบบต่างๆ เช่น การทดสอบแรงกด, การทดสอบแรงดึง, การทดสอบแรงเฉือน, การทดสอบแรงเสียดทาน, การ และอื่นๆที่ถูกกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ



รูปที่ 3. 17 เครื่องทดสอบแรงกด

การทดสอบนอกจากจะประกอบด้วยเครื่องทดสอบ อุปกรณ์ติดตั้งกับชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ ขณะทดสอบมีการบันทึกเก็บข้อมูลการทดสอบ แรงกดอัดเพิ่มขึ้นคงที่ ระยะเคลื่อนตัวของชิ้นตัวอย่างทดสอบ ด้วยอุปกรณ์ดังนี้

2.) โหลดเซลล์

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ในการเปลี่ยนแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปจ่ายเข้าจอแสดงผล Display แสดงค่าเป็น น้ำหนักหรือแรงที่กระทำให้ได้ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3. 18 เครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์

3.) เครื่องมือวัดการตัว

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนียวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) แสดงดังรูปที่ 3.19 ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนตัว ใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน เช่นทดสอบระยะเคลื่อนตัว หรือน้ำหนักได้



รูปที่ 3. 19 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว

4.) เครื่องบันทึกข้อมูล

เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) แสดงดังรูปที่ 3.20 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ จัดเก็บตามระยะเวลาผู้ใช้งานต้องการ บันทึกผลข้อมูลและสามารถเชื่อมต่อกอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เป็นตารางหรือกราฟ

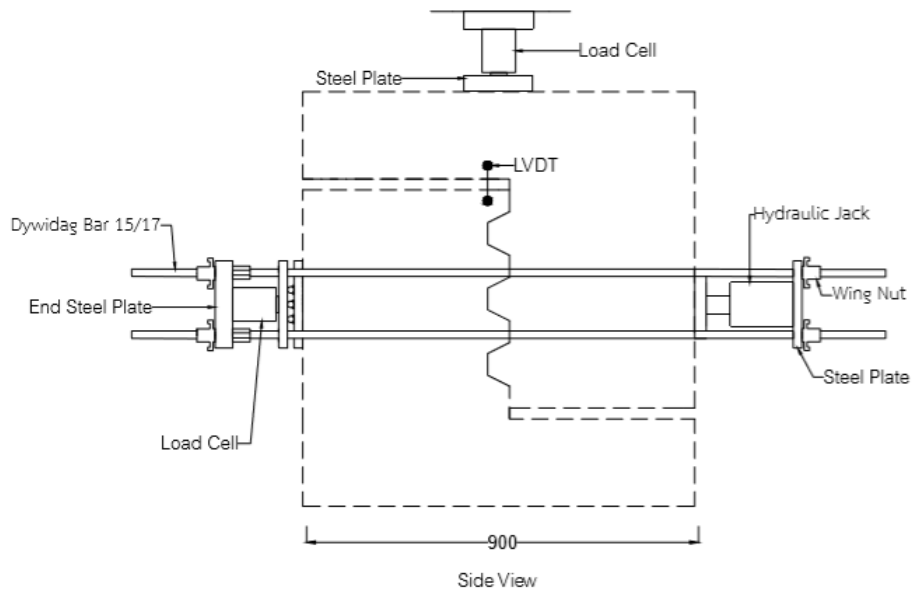


รูปที่ 3. 20 เครื่องบันทึกข้อมูล

3.3.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแสดงดังรูปที่ 3.21 ก่อนทำการทดสอบรับแรงกดอัดด้านบนต้องมีการให้แรงอัดด้านข้างขึ้นส่วนตัวอย่างทดสอบก่อน สำหรับการอัดแรงด้านข้างจะเป็นการจำลองแรงที่เกิดจากการดึงลวดอัดแรงจริงในการก่อสร้าง โดยการอัดแรงด้านข้างนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ เป็นลักษณะโครงรับแรงแสดงดังรูปที่ 3.22 จากนั้นใช้แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic

Jack 30tons) สำหรับดันกับโครงรับแรงให้เกิดแรงด้านข้าง 0.5 - 1 เมกะปาสคาลแสดงดังรูปที่ 3. 23 การวัดแรงอัดด้านข้างส่วนนี้จะได้จากเครื่องมือโหลดเซลล์ (Load Cell 30tons) ติดตั้งไว้แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3. 21 การติดตั้งอุปกรณ์กับชิ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับทำการทดสอบแรงเฉือน



รูปที่ 3. 22 โครงรับแรงสำหรับอัดแรงด้านข้างชิ้นส่วนทดสอบ



รูปที่ 3. 23 แม่แรงไฮดรอลิคดันโครงรับแรงให้เกิดแรงดันท่าง



รูปที่ 3. 24 วัดแรงอัดดันท่างจากเครื่องมือวัดหน่วยแรง โหลดเซลล์

ก่อนเริ่มทำการทดสอบ ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งด้วยเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว แสดงดังรูปที่ 3.25 อย่างน้อยสองจุดสำหรับทำหน้าที่ในการวัดระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Relative-Displacement) ในแนวดิ่ง การติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวยังใช้เป็นการควบคุมการทดสอบด้วยระยะ (The Displacement-control test) ในอัตราการเคลื่อนตัวของรอยต่อ 0.005 มิลลิเมตรต่อวินาที (0.3 มิลลิเมตรต่อนาที) ตามแบบงานวิจัยของ (Zhou, Mickleborough et al. 2005) ข้อมูลระหว่างการทดสอบนี้จะถูกเก็บไปพร้อมกับแรงกดด้านบนที่ให้กับชิ้นตัวอย่างทดสอบ วัดจากเครื่องมือวัดหน่วยแรงโหลดเซลล์ต่อเข้ากล่องอุปกรณ์เก็บข้อมูลและต่อข้อมูลเข้าระบบคอมพิวเตอร์ สำหรับการบันทึกผลการทดสอบ

นำชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบติดตั้งกับเครื่องมือทดสอบกดอัดแรงเพิ่มขึ้นคงที่ เตรียมพร้อมสำหรับการกดอัดเพื่อทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อแสดงดังรูปที่ 3.26

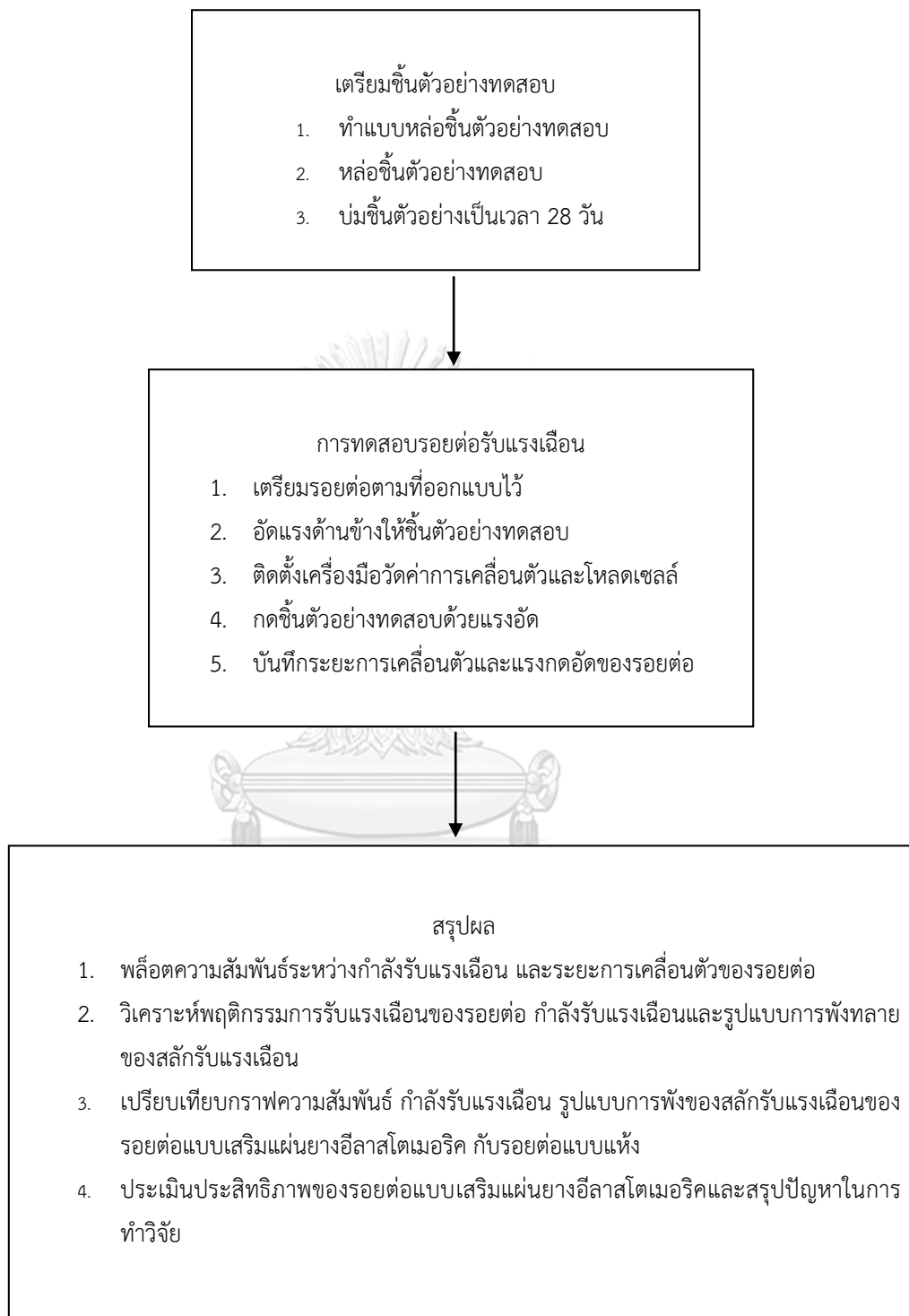


รูปที่ 3. 25 ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวอย่างน้อยสองจุด



รูปที่ 3. 26 ชิ้นตัวอย่างทดสอบเข้าเครื่องมือทดสอบให้แรงกดอัดเพิ่มขึ้นคงที่

3.4 แผนผังการดำเนินงาน



บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

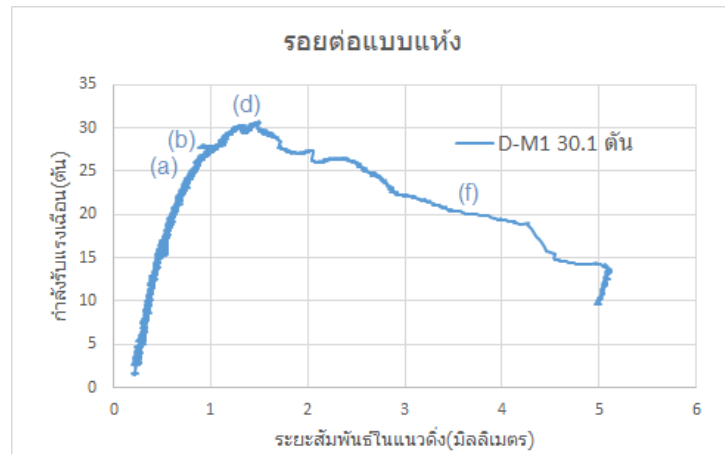
ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบ จากการทดสอบแรงเฉือนกับชิ้นตัวอย่างทดสอบดังแสดงวิธีการในบทที่ 3 และวิเคราะห์ผลการทดสอบในด้าน พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อ รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ เปรียบเทียบระหว่างรอยต่อแบบแห้งกับรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค อีกทั้งเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อระหว่างผลการทดสอบกับสูตรการออกแบบมาตรฐาน AASHTO และ Rombach and Speaker

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะเคลื่อนตัว

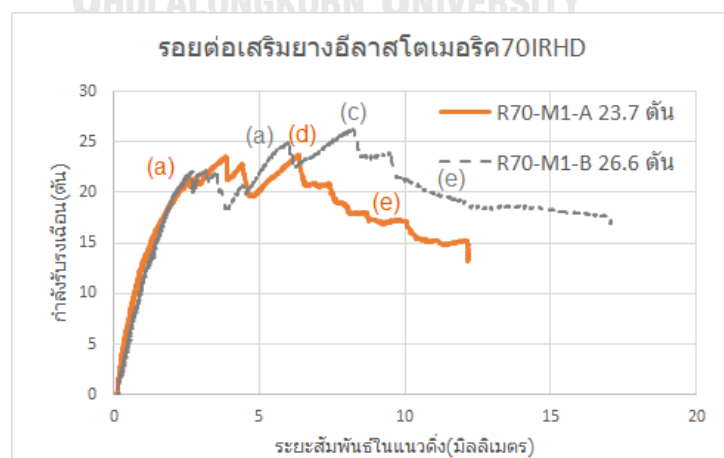
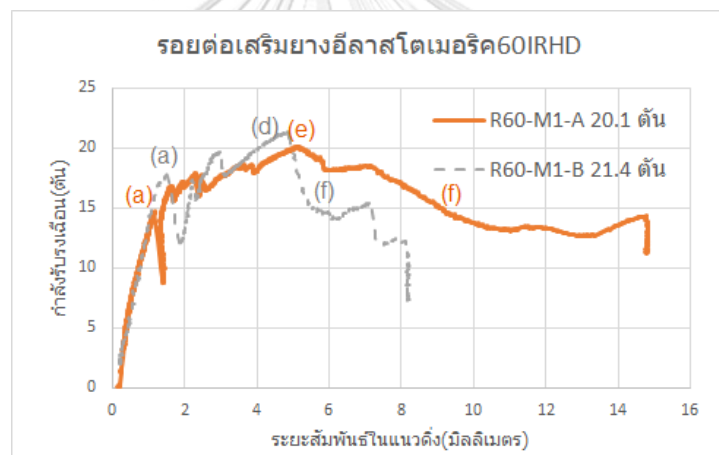
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นตัวอย่างทดสอบรอยต่อแบบแห้งและเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60IRHD และ 70IRHD ดังแสดงในบทที่ 3

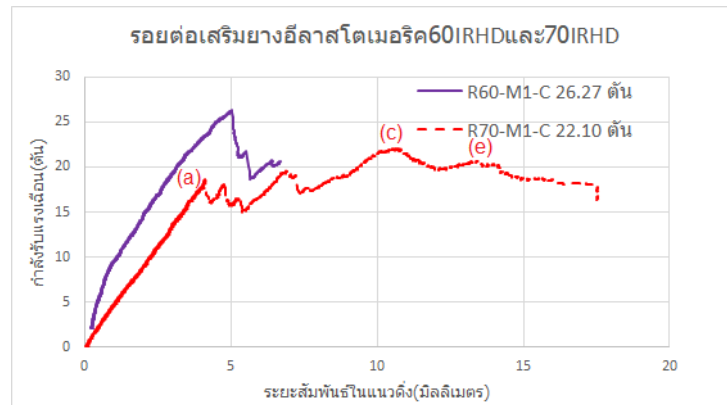
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวแสดงดังรูปที่ 4.1 พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อแบบแห้ง ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัว ค่อนข้างเป็นเส้นตรงจนถึงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อและเป็นจุดที่รอยแตกเริ่มเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.2(a) กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อเริ่มตกลงหลังจากจุดสูงสุดเป็นจุดที่สลักรับแรงเฉือนชิ้นแรกได้วิบัติลง แสดงดังรูปที่ 4.2(d) หลังจากกำลังรับแรงเฉือนตกลง บางช่วงพบว่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่ถึงค่าของของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด จนกระทั่งสลักรับแรงเฉือนชิ้นสุดท้ายวิบัติลงแสดงดังรูปที่ 4.2(f) จะเป็นจุดสิ้นสุดการรับแรงเฉือนของรอยต่อ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวแสดงดังรูปที่ 4.2 พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60 IRHD และ 70 IRHD ในการใส่ยางรูปแบบ A, B และ C มีพฤติกรรมการรับแรงในช่วงแรกคล้ายคลึงกับรอยต่อแบบแห้ง เกือบเป็นเส้นตรงถึงช่วง 70-80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเกิดการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนตัวแรกขึ้น เมื่อรอยต่อรับแรงเพิ่มขึ้นจนถึงกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดจะเป็นจุดที่สลักรับแรงเฉือนตัวแรกวิบัติ หลังจากนั้นกำลังการรับแรงของรอยต่อจะลดลงจนกระทั่งสลักรับแรงเฉือนตัวสุดท้ายวิบัติลง



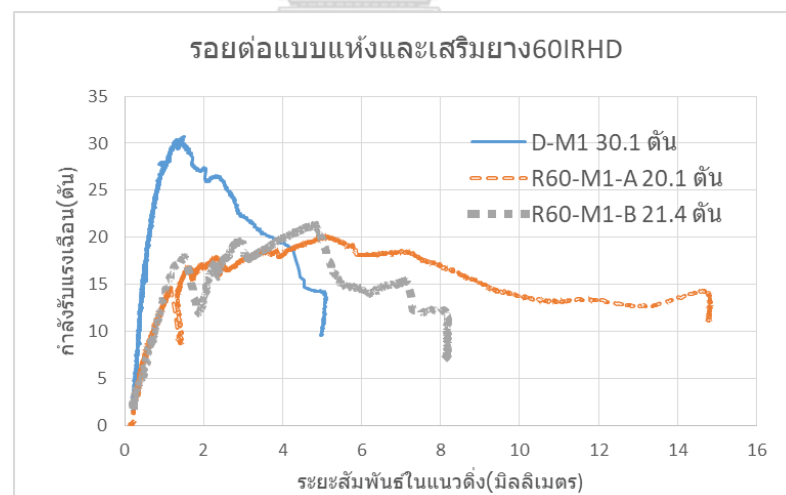
รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ
รอยต่อแบบแห้ง





รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ รอยต่อเสริมยางอีลาสต์อเมริกา 60 IRHD และ 70 IRHD ในรูปแบบการใส่ยาง A, B และ C

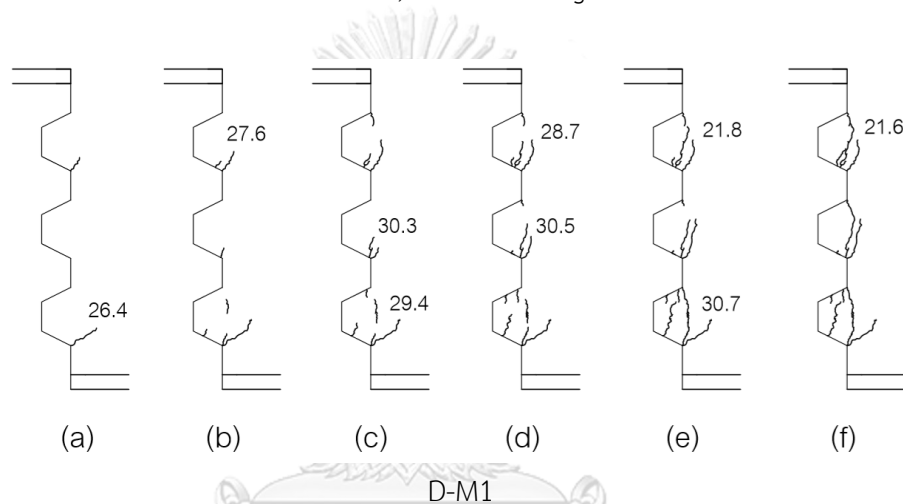
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวของรอยต่อ ระหว่างรอยต่อแบบแห้ง รอยต่อเสริมยางอีลาสต์อเมริกา60IRHDและ70IRHD แสดงดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็น แต่รอยต่อแบบแห้งมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะมากกว่ารอยต่อเสริมยางอีลาสต์อเมริกาทั้ง 60IRHDและ70IRHD การใช้ยางอีลาสต์อเมริกากับรอยต่อยางอีลาสต์อเมริกาที่มีความยืดหยุ่น ส่งผลให้พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของรอยต่อเปลี่ยนไป



รูปที่ 4. 3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนตัวรอยต่อแบบแห้ง เสริมยางอีลาสต์อเมริกา60IRHDและ70IRHD

4.2 รูปแบบการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน

รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.3 รอยแตกแรกพบเมื่อกำลังรับแรงเฉือนถึงประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด เริ่มพบรอยแตกแรกบริเวณสลักรับแรงเฉือนขึ้นล่างสุดบริเวณมุมล่างของสลักรับแรงเฉือน แสดงถึงความเข้มข้นของความเค้นเกิดขึ้นมากบริเวณมุมของสลักรับแรงเฉือน ลักษณะรอยแตกทำมุม 45 องศากับระนาบแรงเฉือน และเมื่อเพิ่มแรงกดอัดขึ้นส่วนขึ้น พบรอยแตกเล็กๆ เพิ่มขึ้นบริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือน จนกระทั่งรอยแตกทั้งหมดเชื่อมต่อกัน เป็นจุดวิบัติของสลักรับแรงเฉือนและสิ้นสุดการรับแรงของของรอยต่อ คล้ายกับงานวิจัย (Zhou, Mickleborough et al. 2005)

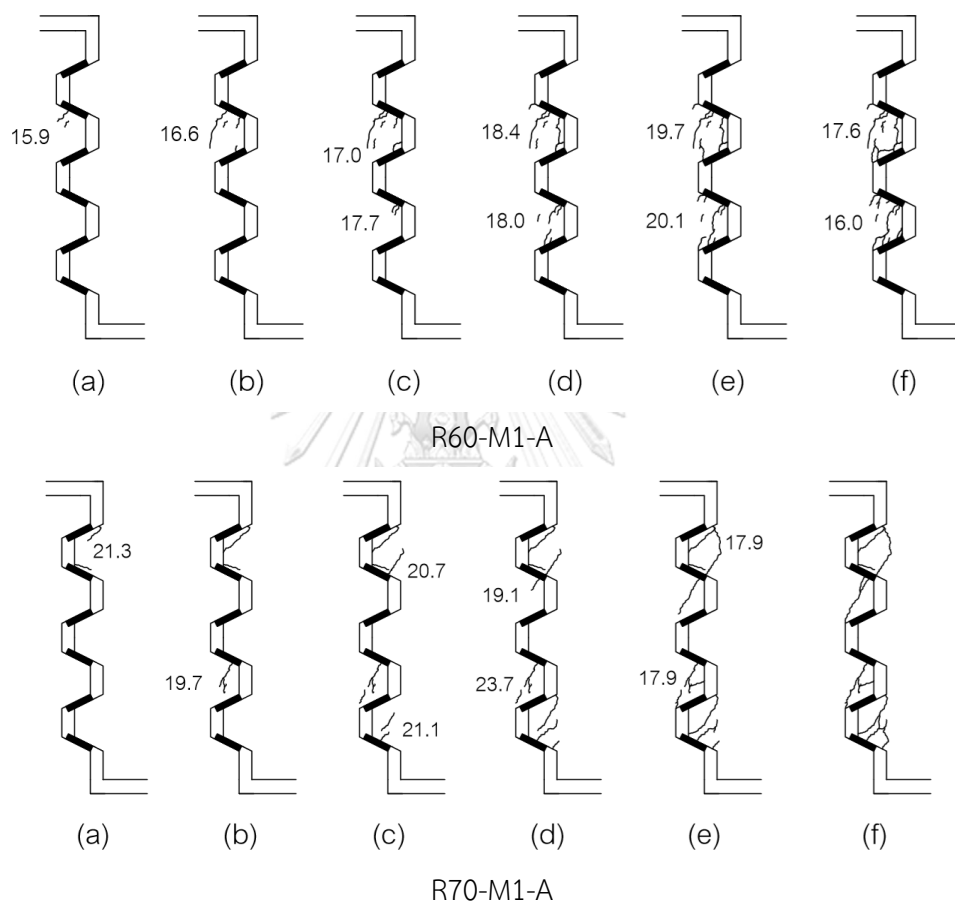


รูปที่ 4.4 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน รอยต่อแบบแห้ง

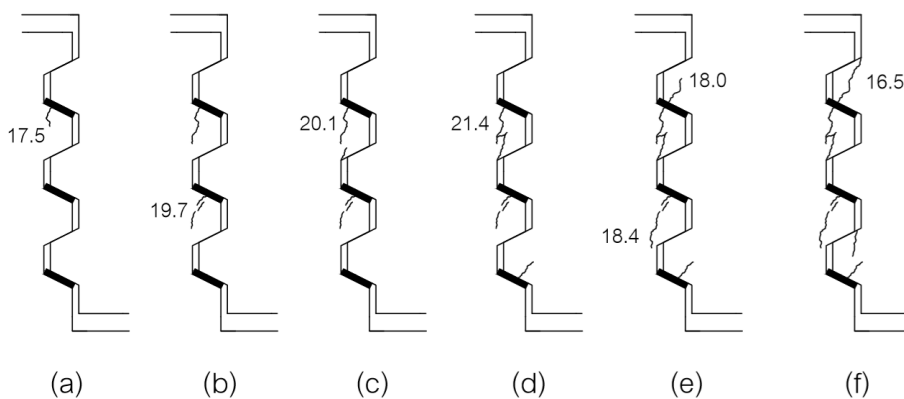
รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนของรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60IRHD และ 70IRHD รอยแตกของสลักรับแรงเฉือนสำหรับรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์คนั้นเกิดขึ้นทั้งขึ้นส่วนตัวอย่างทดสอบขึ้นบนและขึ้นล่างแตกต่างจากรอยต่อแบบแห้งที่วิบัติเฉพาะขึ้นส่วนบนเท่านั้น รอยแตกแรกพบเมื่อขึ้นส่วนรับแรงถึงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด สำหรับการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนของขึ้นตัวอย่างทดสอบล่าง รอยแตกจะเริ่มจากขอบด้านบนบนแล้วขยายลงผ่านสลักรับแรงเฉือน ส่วนสลักรับแรงเฉือนของขึ้นตัวอย่างทดสอบบน รอยแตกจะเริ่มจากขอบด้านล่างแล้วขยายขึ้นด้านบนของสลัก เมื่อรอยต่อรับแรงมากขึ้นพบรอยแตกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งรอยแตกทั้งหมดเชื่อมกัน สลักรับแรงเฉือนจะค่อยๆ แตกแยกออกจากขึ้นส่วนทดสอบเป็นจุดวิบัติของสลักรับแรงเฉือน

สำหรับลักษณะการวิบัติของรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60IRHD และ 70IRHD ทั้งการเสริมยางบนและล่างแสดงดังรูปที่ 4.4 เสริมยางล่างเท่านั้นแสดงดังรูปที่ 4.5 และเสริมยาง

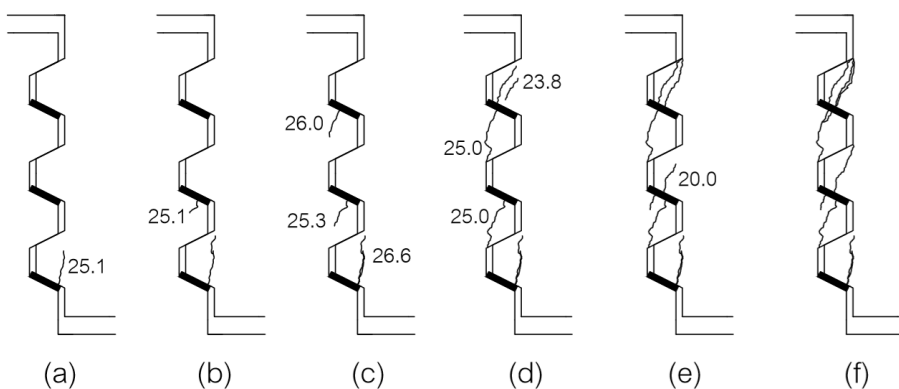
ด้านข้างและล่างแสดงดังรูปที่ 4.6 มีลักษณะคล้ายกัน รอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนมีรอยแตกเล็กๆ ตลอดสลักรับแรงเฉือนต่างจากรอยต่อแบบแห้งที่ลักษณะรอยแตกมีขนาดใหญ่และแตกแนวเดียวหรือสองแนวเท่านั้น เมื่อมีการเสริมยางอีลาस्टาเมอริคทำให้การวิบัติของสลักรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไป การใช้ยางช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นที่เกิดสะสมบริเวณมุมของสลักรับแรงเฉือนและกระจายแรงให้แบบสม่ำเสมอตลอดสลักรับแรงเฉือนมากขึ้น



รูปที่ 4. 5 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือน รอยต่อแบบเสริมยางอีลาस्टาเมอริค ด้านบนและด้านล่างสลักรับแรงเฉือนแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD

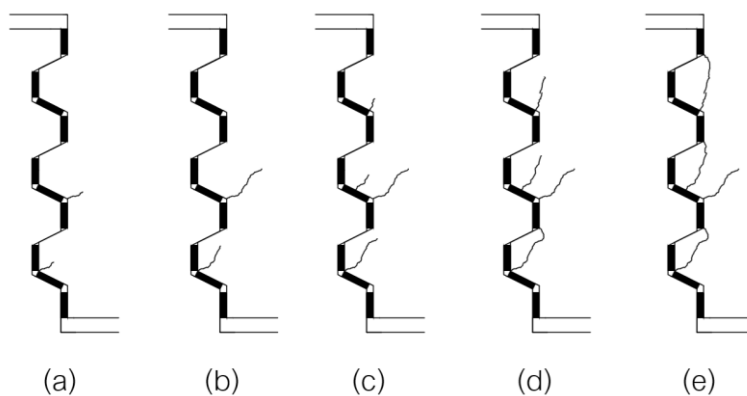


R60-M1-B

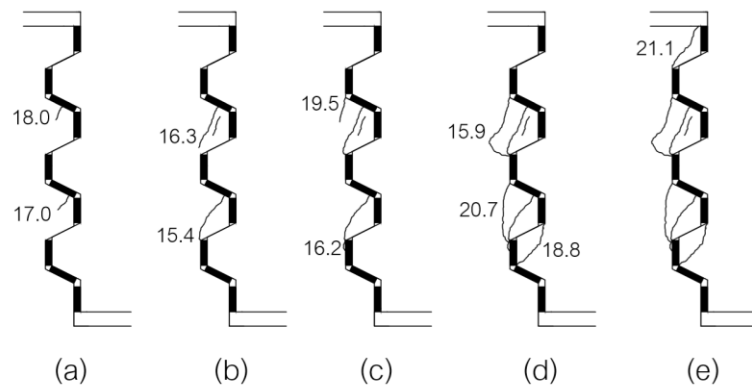


R70-M1-B

รูปที่ 4. 6 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค
 ด้านล่างสลักรับแรงเฉือนเท่านั้นแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD



R60-M1-C



R70-M1-C

รูปที่ 4. 7 รูปแบบรอยแตกการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค
ด้านข้างและด้านล่างสลักรับแรงเฉือนแบบยาง 60IRHD และแบบยาง 70 IRHD



การวิบัติของสลักรับแรงเฉือนใน รอยต่อแบบแห้งกับรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60
IRHD และ 70 IRHD ตามรูปแบบการเสริมยางต่างๆ แสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4. 1 การวิบัติของสลักรับแรงเฉือน

ประเภทของรอยต่อ	ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ
รอยต่อแบบแห้ง หรือ D-M1	

ประเภทของรอยต่อ	ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60 IRHD ด้านบนและด้านล่าง สลักรับแรงเฉือน หรือ R60-M1-A</p>	
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60 IRHD ด้านล่างสลักรับแรงเฉือน เท่านั้นหรือ R60-M1-B</p>	

ประเภทของรอยต่อ	ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 70 IRHD ด้านบนและด้านล่าง สลักรับแรงเฉือน หรือ R70-M1-A</p>	
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 70 IRHD ด้านล่างสลักรับแรงเฉือน เท่านั้นหรือ R70-M1-B</p>	

ประเภทของรอยต่อ	ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบ
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 60 IRHD ด้านข้างและด้านล่าง สลักรับแรงเฉือน หรือ R60-M1-C</p>	
<p>รอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์ค 70 IRHD ด้านข้างและด้านล่าง สลักรับแรงเฉือน หรือ R70-M1-C</p>	

4.3 กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบต่างๆ เปรียบเทียบสูตรการออกแบบมาตรฐาน AASHTO ดังสมการที่ 2.2

ตารางที่ 4. 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเปรียบเทียบสูตรการออกแบบมาตรฐาน AASHTO

ชิ้นตัวอย่างทดสอบ*	กำลังอัดคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)	กำลังรับ แรงเฉือน, T (ตัน)	AASHTO, A (ตัน)	$\frac{(T - A)}{A} \times 100$
D-M1		30.7	32.1	-4.36
E-M1**		-	-	-
R60-M1-A	169	20.1	29.7	-32.4
R60-M1-B		21.4		-28.0
R70-M1-A		23.7		-34.3
R70-M1-B	249	26.6	36.1	26.3
R60-M1-C		26.3		-28.7
R70-M1-C	257	22.1	36.9	-40.1

*รหัสแสดงชิ้นตัวอย่างทดสอบอธิบายไว้ในบทที่ 3.1

**ชิ้นตัวอย่างทดสอบ E-M1 หรือ รอยต่ออีพ็อกซีไม่มีผลการทดสอบ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างทดสอบก่อนเกิดการวิบัติบริเวณด้านบนก่อนรอยต่อจะเกิดการวิบัติขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4. 8 การวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบรอยต่ออีพ็อกซีด้านบนก่อนรอยต่อเกิดการวิบัติ

การทดสอบแบ่งออกเป็นสามชุดตามวันทดสอบขึ้นตัวอย่างทดสอบ สำหรับการหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบสองครั้งได้กำลังอัดคอนกรีต จากการทดสอบแรงอัด เป็น 169, 249 และ 257 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อ การทดสอบชุดแรกที่กำลังอัดคอนกรีต 169 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อแบบแห้ง 30.7 ตัน มากกว่ารอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ 60IRHD ทั้งสองแบบ 20.1 ตัน และ 21.4 ตันตามลำดับ การทดสอบชุดที่สองที่กำลังอัดคอนกรีต 249 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ 70IRHD บนและล่าง มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด 23.7 ตันน้อยกว่าแบบเสริมยางล่างเท่านั้น 26.6 ตัน และการทดสอบชุดที่สามที่กำลังอัดคอนกรีต 257 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ 60IRHD มีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด 26.3 ตันมากกว่ารอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ 70IRHD

กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งมากกว่ารอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ การใช้ยางเสริมเข้าไปบริเวณรอยต่อส่งผลให้พื้นที่รับแรงของสลักรับแรงเฉือนน้อยลง และรูปแบบการวิบัติของรอยต่อเปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบต่างๆ เปรียบเทียบสูตรการออกแบบมาตรฐาน Rombach and Specker ดังสมการที่ 2.3

ตารางที่ 4. 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยแรงเพิ่มขึ้นคงที่เปรียบเทียบสูตรออกแบบ Rombach and Specker

ขึ้นตัวอย่างทดสอบ	กำลังอัดคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)	กำลังรับ แรงเฉือน, T (ตัน)	Rombach and Specker, R (ตัน)	$\frac{(T - R)}{R} \times 100$
D-M1		30.7	25.9	18.5
R60-M1-A	169	20.1	18.1	11.1
R60-M1-B		21.4		18.3
R70-M1-A		23.7		-4.50
R70-M1-B	249	26.6	24.8	7.19
R60-M1-C		26.3		2.33
R70-M1-C	257	22.1	25.7	-14.0

เปรียบเทียบสูตรการออกแบบของ AASTHO ดังตารางที่ 4.2 สำหรับรอยต่อแบบแห้งมีกำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่า 4.36 เพอร์เซ็นต์ซึ่งแตกต่างจากรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์คทั้งแบบ 60 IRHD และ 70 IRHD ที่ได้กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยน้อยกว่าถึง 32 เพอร์เซ็นต์ และตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสูตรการออกแบบของ Rombach and Specker สำหรับรอยต่อแบบแห้งมีกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าถึง 18.5 เพอร์เซ็นต์ แตกต่างจากรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์คทั้งแบบ 60 IRHD และ 70 IRHD ที่ได้กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยมากกว่าเล็กน้อย 3.34 เพอร์เซ็นต์

ผลของการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนจากสูตรการออกแบบ AASHTO และ Rombach and Specker ดังในสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ สำหรับรอยต่อแบบแห้งมีผลของการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อ ได้จากพื้นที่ของตัวสลักรับแรงเฉือนและแรงเสียดทาน ส่วนรอยต่อแบบเสริมยางอีลาสโตเมอร์คนั้น ผลกำลังรับแรงเฉือน ได้จากการรับแรงเฉือนจากพื้นที่ของตัวสลักรับแรงเฉือนเท่านั้น ไม่มีแรงเสียดทาน การใส่ยางทำให้ผิวของคอนกรีตไม่สัมผัสกันโดยตรง

กำลังรับแรงเฉือนจากมาตรฐานของ AASHTO นั้นมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ จึงไม่ปลอดภัยสำหรับใช้ในการออกแบบ เนื่องจากสูตรการออกแบบของ AASHTO เป็นสูตรการออกแบบจากการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบแบบสลักเดี่ยว แตกต่างจากสูตรการออกแบบของ Rombach and Specker ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดลในการประมาณกำลังรับแรงเฉือน

บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัย การปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง ได้ทำการศึกษาข้อมูลวิจัย สร้างขึ้นตัวอย่างทดสอบ ทำการทดสอบแรงเฉือนกับรอยต่อ เพื่อปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้ง โดยการใช้แผ่นยางอีลาสโตเมอร์เสริมบริเวณรอยต่อ เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดี และปรับเปลี่ยนพฤติกรรมระหว่างรับแรงของรอยต่อแบบแห้งให้ดีขึ้น ได้ผลสรุปดังผลการทดสอบดังนี้

1). จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวรอยต่อแบบแห้งและรอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์มีลักษณะคล้ายกัน แต่กำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อแบบแห้งมากกว่ารอยต่อเสริมแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการใช้ยางเสริมเข้าไปบริเวณรอยต่อส่งผลให้ รอยต่อได้จากการรับแรงเฉือนจากพื้นที่ของตัวสลักรับแรงเฉือนเท่านั้น ไม่มีแรงเสียดทาน การใส่ยางทำให้ผิวของคอนกรีตไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง

2). ลักษณะการวิบัติของสลักรับแรงเฉือนในรอยต่อแบบแห้งมีรอยแตกลักษณะใหญ่เป็นแนวเดียวหรือสองแนวเกิดขึ้นบริเวณฐานของสลักรับแรงเฉือนต่างจากรอยแตกของรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์ มีรอยแตกเล็กกว่าและรอยแตกพบตลอดแนวของสลักรับแรงเฉือน และการใช้ยางอีลาสโตเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นทำให้รอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์มีพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียวกว่า

3). ผลการปรับเปลี่ยนใช้ยางอีลาสโตเมอร์ 60IRHD และ 70IRHD ในสลักรับแรงเฉือน รอยต่อมีพฤติกรรมรับแรงคล้ายกัน สำหรับวิธีการใส่ยางด้านบนและล่างสลักรับแรงเฉือน ด้านล่างเท่านั้น และ ด้านข้างและด้านล่างสลักรับแรงเฉือน การใส่ยางด้านล่างเท่านั้นได้กำลังรับแรงเฉือนดีกว่าเล็กน้อย

4). สูตรการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนรอยต่อของมาตรฐาน AASHTO นั้นมีผลการคำนวณมากกว่าผลกำลังรับแรงเฉือนรอยต่อจากการทดสอบ จึงไม่ปลอดภัยสำหรับใช้ในการออกแบบ ส่วนกำลังรับแรงเฉือนจากสูตรการออกแบบ Rombach and Specker ได้ผลการคำนวณน้อยกว่าการทดสอบ แนะนำให้ใช้สูตรการออกแบบ Rombach and Specker ในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนรอยต่อแบบแห้งและรอยต่อเสริมยางอีลาสโตเมอร์

การทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นและกระจายแรงเมื่อรับแรง ส่งผลให้รอยต่อมีพฤติกรรมการวิบัติที่ดีขึ้น แต่การเลือกใช้ยางอีลาสโตเมอร์ได้ผลในด้านกำลังรับแรงเฉือนไม่ดี อาจต้องพิจารณาใช้วัสดุอื่น และหากมีการศึกษาพัฒนาในด้านรอยต่อของคอนกรีต

สำเร็จรูปอัดแรงต่อไป อาจพิจารณามาตรฐานสูตรการออกแบบกำลังรับแรงเฉือน AASHTO ใหม่ในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนเพื่อความปลอดภัย

นอกจากนี้การทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างแต่ละประเภทแค่ 1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบ อาจมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนมาก เนื่องจากเป็นงานวิจัยเริ่มต้นการทดสอบปรับปรุงรอยต่อและจากข้อจำกัดทางทุนวิจัย ผู้วิจัยขออภัยอย่างสูง



รายการอ้างอิง

AASHTO (2010). Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges. Second Edition: 3-118.

ACI (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) Commentary (ACI 318R-14). Farmington Hills, Mich, American Concrete Institute: 316.

Bakhoun, M. M. (1991). "Shear behavior and design of joints in precast concrete segmental bridges." Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Bouvy, J. J. (1978). "Segmental Construction with Epoxy Joints." Contribution to FIP Congress.

Hsu, T. T. C., et al. (1987). "Theory on Shear Transfer Strength of Reinforced Concrete." ACI Structural Journal 84(2): 149-160.

J. F. STANTON and C. W. ROEDER (1982). ELASTOMERIC BEARINGS DESIGN, CONSTRUCTION, AND MATERIALS. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL, WASHINGTON, D.C.

Jones, L. L. (1959). "Shear Tests on Joints Between Precast Post-Tensioned Units." Magazine of Concrete Research 11.

JSCE (2007). Standard Specification for Concrete Structures, JSCE2010 Concrete Committee Printed in Japan.

Koseki, K. and J. E. Breen (1983). "Exploratory study of shear strength of joints for precast segmental bridges." Exploratory Study of Shear Strength of Joints for Precast Segmental Bridges.

Moustafa, S. E. (1975). "Ultimate Load Test of a Segmentally Constructed Prestressed Concrete I-Beam." PCI Journal 19(4): 54-75.

Roberts, C. L., et al. (1993). MEASUREMENT BASED REVISIONS FOR SEGMENTAL BRIDGE DESIGN AND CONSTRUCTION CRITERIA Texas Department of Transportation

Rombach, G. A. and Speaker (2004). "Segmentbrücken." Beton-Kalender, Teil 1, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, Germany: 177-211.

Zhou, X., et al. (2005). "Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges." ACI Structural Journal 102(1): 3-11.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศิษฐ์ ศิริโสสม เกิดวันที่ 22 มีนาคม 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา พ.ศ. 2558

