



## ผลของวัสดุเชื่อมประสานต่อพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท

### Effect of Bonding Materials on Behavior of Metal-Sheet Confined Concrete Cylinders

ไกรฤกษ์ บุญญรัตน์ (Krailerk Boonyaratana)<sup>1</sup>\* ชันยดา พรรณเชษฐ์ (Tanyada Pannachet)\*\*

เมธี บุญพิเชฐวงศ์ (Maetee Boonpichetvong)\*\*\*

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาผลของวัสดุเชื่อมประสานต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของทรงกระบอกคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยการพันโอบรัดด้วยเมทัลชีท โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างที่ไม่มีการโอบรัดด้วยเมทัลชีท กลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทแต่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานระหว่างชั้น กลุ่มที่ 3 โอบรัดด้วยเมทัลชีทโดยใช้กาวอีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และกลุ่มที่ 4 โอบรัดด้วยเมทัลชีทโดยใช้กาวซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ผลการทดสอบพบว่า ทรงกระบอกคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยเมทัลชีทสามารถเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนได้ทั้งกรณีที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานและไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสาน โดยลักษณะการวิบัติที่พบจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การฉีกขาดของแผ่นเมทัลชีทและการเปิดออกของแผ่นเมทัลชีท อย่างไรก็ตาม ระบบการเสริมกำลังโดยไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานจะมีข้อจำกัดในการเพิ่มกำลังเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของการโอบรัด

#### ABSTRACT

The paper presented effect of bonding materials on axial compressive strength of concrete cylinders confined by metal sheet. Four groups of concrete cylinders, in size of 15 cm x 30 cm, were chosen; Group 1 consisted of unconfined specimens, Group 2 consisted of confined specimens without any bonding material in the interfacial layers, Group 3 consisted of metal sheet confined specimens using epoxy resin in the interfacial layers, and Group 4 consisted of metal sheet confined specimens using cement glue in the interfacial layers. The results revealed that metal sheet confined concrete cylinders could resist more axial loads for both samples with and without bonding materials. Two failure mechanisms, namely tearing and opening of metal sheet, were observed in the experiments. However, the strengthening system using the unbonded metal sheet showed limitation of the axial strength increase regardless of more layers of metal sheet.

**คำสำคัญ:** คอนกรีต เมทัลชีท วัสดุประสาน การเสริมกำลัง การโอบรัด

**Keywords:** Concrete, Metal sheet, Bonding materials, Strengthening, Confinement

<sup>1</sup>Correspondent author: krailerknoom@gmail.com

\* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อผ่านระยะเวลาการใช้งานมานาน มักจะพบปัญหาและข้อจำกัดต่างๆ ในการใช้งาน เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเป็นสนิมหรือมีการปรับเปลี่ยนภาพแบบการใช้งานอาคาร ทำให้โครงสร้างต้องรับน้ำหนักมากกว่าที่สามารถรับได้ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งานอาคาร เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการวิบัติของโครงสร้างอาคาร วิศวกรจึงต้องหาวิธีการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ เพื่อให้โครงสร้างสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ในปัจจุบัน วิธีที่นิยมนำมาเสริมกำลังภายนอกให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การพันรอบด้วยวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Plastic; FRP) [1-10] ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรง กำลังรับน้ำหนักและความเหนียวของเสาได้โดยไม่ต้องมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก ทำให้การเสริมกำลังสามารถทำได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษา [11-12] พบว่า ผลของวัสดุเชื่อมประสานมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของเสาที่ถูกโอบรัดด้วย FRP เมื่อใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นวัสดุเชื่อมประสาน เสาที่ถูกโอบรัดด้วย FRP สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นกว่าเดิมถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับเสาที่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่ถูกโอบรัดด้วย FRP อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีงานวิจัยบางส่วนที่เห็นขัดแย้งในเรื่องผลกระทบของวัสดุเชื่อมประสานว่าไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการโอบรัดเสาคอนกรีตด้วย FRP [13-15]

ในหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้ทำการศึกษาวิจัยการประยุกต์ใช้วัสดุเมทัลลิก (Metal sheet) ในการโอบรัดเสาคอนกรีตเพื่อเป็นทางเลือกในการเสริมกำลังตามแนวแกนให้กับเสาขนาดความสูง 30 และ 75 ซม. หน้าตัดต่างๆ เช่น ทรงกระบอก สี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนการใช้วัสดุ FRP [16-24] ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างเสาที่เสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังอัดได้สูงขึ้นและมีความเหนียวมากกว่าเสาที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยในตัวอย่างเสาที่เสริมกำลังด้วยเมทัลลิกจำนวน 1 ชิ้น สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 45% เมื่อเทียบกับเสาที่ไม่ได้เสริมกำลัง [16] ในปัจจุบันระบบการเสริมกำลังด้วยเมทัลลิกได้ใช้กาวยีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก ซึ่งกาวยีพ็อกซีนับว่าเป็นกาวสารพัดประโยชน์สามารถใช้ ปะ อุด เชื่อม ประสาน หรือฉนวนกันความร้อน รอยรั่วซึม ของวัสดุต่างๆ เช่น ไม้ เหล็ก อลูมิเนียม สังกะสี คอนกรีต ไฟเบอร์กลาส แต่เนื่องจากกาวยีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีราคาสูงและมีระยะเวลาในการทำงานที่น้อยหลังจากเริ่มผสมกาวยีพ็อกซีแล้ว จึงมีความจำเป็นที่จะดำเนินการศึกษาผลของวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกอื่นๆ ที่มีต่อพฤติกรรมและการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของเสา เนื่องจากเป็นประเด็นที่น่าสนใจและยังไม่มีการศึกษาปัจจัยของวัสดุประสานต่อการเพิ่มกำลังด้วยเมทัลลิก ซึ่งจะเป็นส่วนเพิ่มเติมให้กับระบบการเสริมกำลังเสาด้วยเมทัลลิก

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ มีหลักเกณฑ์ในการเลือกวัสดุเชื่อมประสานมาใช้ในระบบการเสริมกำลังเสาด้วย เมทัลลิก โดยวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกจะต้องหาซื้อได้ตามท้องตลาดราคาถูกและมีคุณสมบัติยึดเกาะกับพื้นผิวได้ พบว่า กาวซีเมนต์ซึ่งมีการเพิ่มสารยึดเกาะที่มีคุณสมบัติพิเศษช่วยในการยึดเกาะให้สูงขึ้น สามารถรับแรงหรือน้ำหนักได้มากกว่าปกติ ใช้งานได้ง่าย เพียงเติมน้ำและผสมให้เข้ากันก็สามารถใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องมีขั้นตอนของการเตรียมปูนทรายหลายขั้นตอน อีกทั้งจากการศึกษาทดลองเบื้องต้น กาวซีเมนต์มีคุณสมบัติที่เหนียวยึดเกาะพื้นผิวคอนกรีตได้ดีและราคาไม่แพง เราจึงเลือกใช้กาวซีเมนต์เป็นวัสดุทางเลือกในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสามารถด้วย โดยจุดมุ่งหมายของการศึกษานี้คือพิจารณาผลของวัสดุเชื่อมประสานต่อพฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิก



## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของวัสดุเชื่อมประสานที่มีต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในแนวแกนและพฤติกรรมของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตจำนวน 1 และ 2 ชั้น

## วิธีการวิจัย

### 1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

#### 1.1 คอนกรีต

ในการศึกษานี้คอนกรีตที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 213-2552 [25] จากการทดสอบกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM C39 [26] เท่ากับ 263.84 กก/ซม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน

#### 1.2 แผ่นเมทัลลิต

แผ่นเมทัลลิตเป็นแผ่นเหล็กที่ผลิตจากเหล็กกล้ากำลังสูงถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียมและสังกะสีสามารถป้องกันสนิมและการผุกร่อนได้ดี สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทัลลิตชั้นคุณภาพ G550 (ค่ากำลังดึงประลัยเท่ากับ 5,500 กก/ซม<sup>2</sup>) มีความหนา 0.23 มม. ผลจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M [27] พบว่ามีค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 7,902.90 กก/ซม<sup>2</sup> และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 986,950 กก/ซม<sup>2</sup>

#### 1.3 วัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้การศึกษานี้มี 2 ชนิด ดังนี้

1) อีพ็อกซี่ ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับงานเชื่อมประสานประเภทอิโซโทรปิก (Thixotropic) ชนิด 2 ส่วนผสม ประกอบด้วย อีพ็อกซี่เรซินกับสารเติมแต่งพิเศษ ทนต่อความชื้น ใช้ได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 10 ถึง 30°C สามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดติดในงานโครงสร้างสำหรับชิ้นงานคอนกรีต ผลการทดสอบอ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิต ที่อายุ 7 วันสามารถรับกำลังอัดเท่ากับ 600-700 กก/ซม<sup>2</sup> และค่ากำลังยึดเกาะคอนกรีตผิวแห้งที่อายุ 1 วันมีค่ามากกว่า 40 กก/ซม<sup>2</sup> [28]

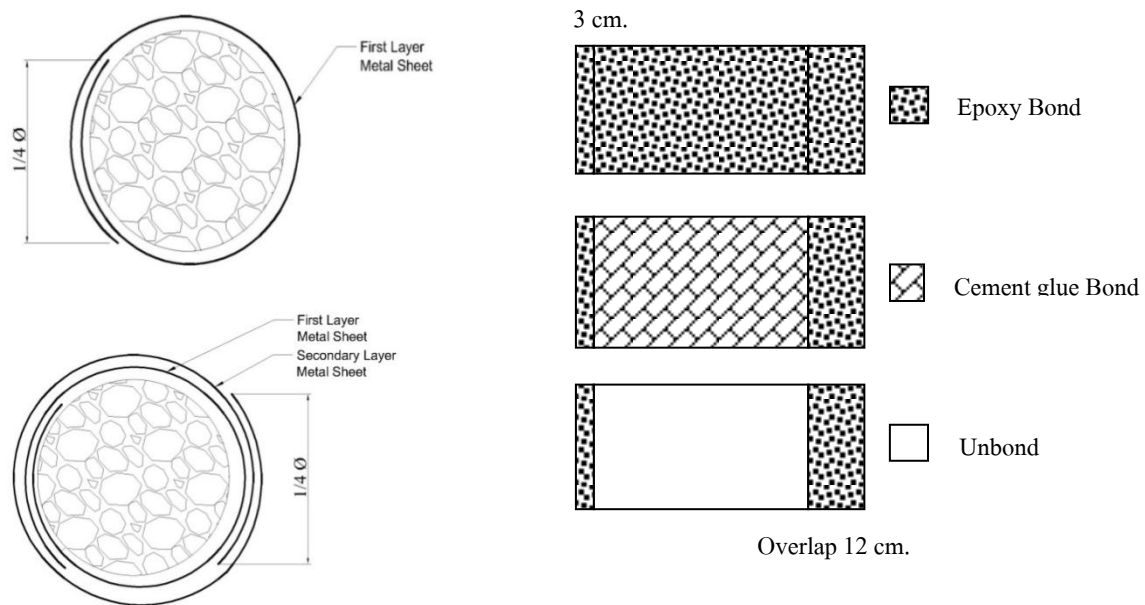
2) กาวซีเมนต์ชนิดส่วนผสมเดียว ประกอบด้วย ซีเมนต์ ทรายและสารเคมีพิเศษเพิ่มการยึดเกาะ สามารถยึดเกาะกับผิวคอนกรีตแห้งได้ดี เมื่อทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วันตามมาตรฐาน ASTM C109 [29] มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 105.79 กก/ซม<sup>2</sup> และค่ากำลังยึดเกาะที่อายุ 1 วันตามมาตรฐาน ASTM C234 [30] มีค่าเท่ากับ 11.83 กก/ซม<sup>2</sup>

### 2. ตัวอย่างการทดสอบ

ในการศึกษาผลของวัสดุเชื่อมประสานต่อกำลังรับน้ำหนักในแนวแกนของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม สูง 30 ซม แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต (Control specimen; ระบุสัญลักษณ์ C) กลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตแบบไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานระหว่างชั้น (Unbonded; ระบุสัญลักษณ์ UB) กลุ่มที่ 3 เป็นตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตโดยใช้กาวอีพ็อกซี่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Bonded with epoxy; ระบุสัญลักษณ์ BE) และกลุ่มที่ 4 เป็นตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตโดยใช้กาวซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Bonded with cement glue; ระบุสัญลักษณ์ BC) โดยการโอบรัดด้วยเมทัลลิตจะแบ่งเป็นการโอบรัดจำนวน 1 และ 2 ชั้น จำนวน 4 ตัวอย่างต่อกลุ่ม รวมเป็นจำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 28 ตัวอย่าง

การพันโอบรัดด้วยเมทัลลิตแต่ละชั้นจะจัดให้มีระยะทับ 1/4 ของเส้นรอบภาพในกรณีที่มีการพันโอบรัด 2 ชั้นจะจัดให้ระยะทับของชั้นที่ 2 อยู่ตรงข้ามกับระยะทับของชั้นที่ 1 โดยเคลือบวัสดุประสานให้มีความหนา 2 มม

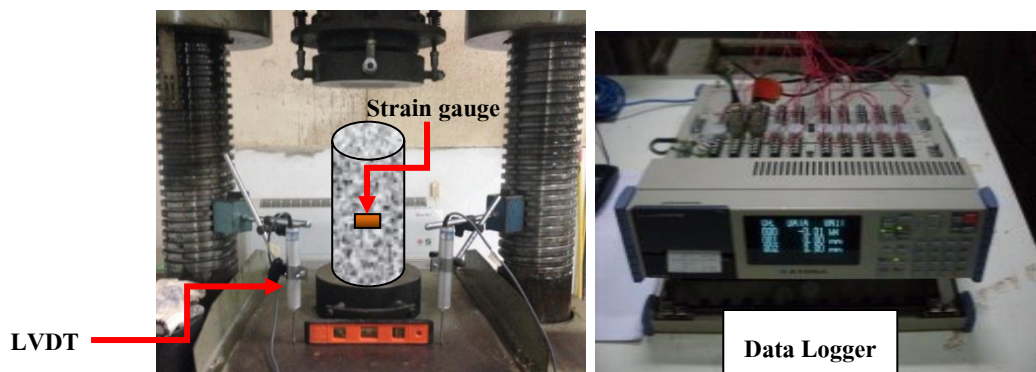
ทุกชั้น นอกจากนั้น เพื่อไม่ให้มีการเลื่อนไถลของเมทัลชีทระหว่างการพัน โอบรัดจึงมีการใช้อีพ็อกซี่เพื่อยึดเมทัลชีทให้ติดกับพื้นผิวที่ขอบของเมทัลชีทเป็นระยะ 3 ซม. ในทุกตัวอย่างทดสอบรายละเอียดลักษณะการพัน โอบรัดและวิธีการทาวาสตูประสานบนเมทัลชีท ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะการพัน โอบรัดด้วยเมทัลชีทและลักษณะการทาวาสตูประสานบนแผ่นเมทัลชีทในการศึกษา

### 3.วิธีการทดสอบ

การทดสอบใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine; UTM) โดยการให้แรงอัดแบบควบคุมการเสียรูป (Displacement control) การวัดค่าการเสียรูปเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C39-C39M [26] การวัดค่าการเสียรูปในแนวแกนใช้เซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Linear variable displacement transducer; LVDT) ที่มีความยาวแกน 50 มม จำนวน 2 ตัว โดยวัดจากแท่นเครื่องกดดังภาพที่ 2 การบันทึกข้อมูลใช้เครื่องบันทึกอัตโนมัติ (Data logger) ในการจัดเก็บข้อมูลและการติดเกจวัดความเครียด (Strain gauge) 2 ตัว โดยติดที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบด้านซ้ายและด้านขวา เพื่อวัดค่าความเครียดในทิศทางตามแนววงรอบ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือตรวจวัดและเครื่องบันทึกข้อมูล

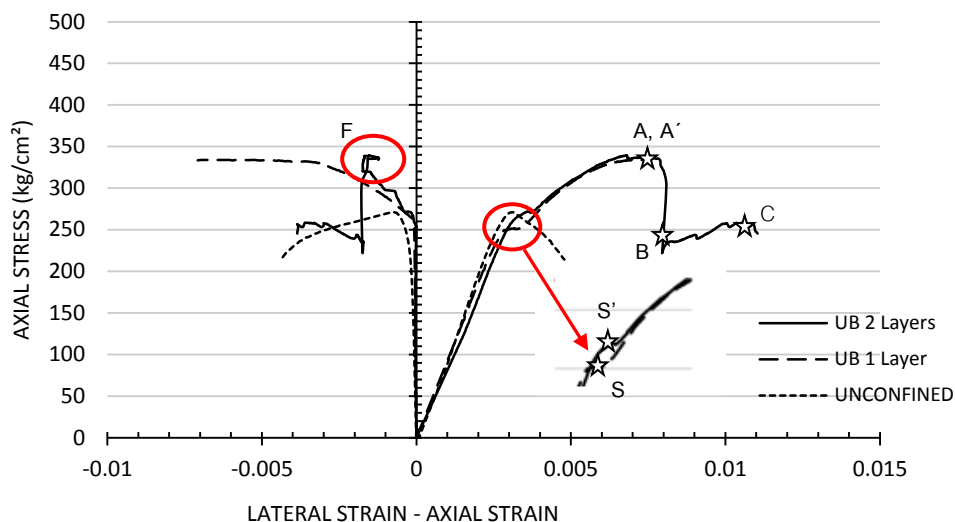


## ผลการทดสอบ

จากการทดสอบ พบว่า ตัวอย่างในแต่ละกลุ่มมีพฤติกรรมที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงเลือกตัวอย่างแต่ละกลุ่มมาแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเพียงกลุ่มละ 1 ตัวอย่าง เพื่อให้ง่ายต่อการเห็นพฤติกรรมอย่างชัดเจน โดยกำหนดให้ค่าหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึง (ขยายตัว) มีค่าเป็นลบ และหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัด (หดตัว) มีค่าเป็นบวก ทั้งนี้ ผลการทดสอบจะแสดงผลตามลักษณะของวัสดุเชื่อมประสาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 1. ทงกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตจำนวน 1 และ 2 ชั้น โดยไม่มีวัสดุประสาน

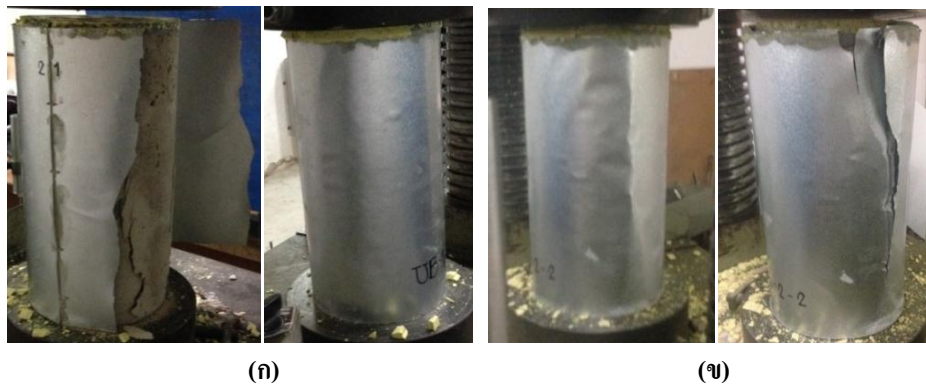
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังโดยการพันโอบรัดด้วยเมทัลลิตจำนวน 1 และ 2 ชั้น โดยไม่มีวัสดุเชื่อมประสานนั้นสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยในแนวแกนเท่ากันคือ 331 กก/ซม<sup>2</sup> หรือรับน้ำหนักได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกโอบรัดประมาณ 25% จะเห็นได้ว่าการพันโอบรัดด้วยเมทัลลิตโดยไม่มีวัสดุเชื่อมประสานนั้นจำนวนชั้นที่มากขึ้นไม่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนให้สูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต 1 และ 2 ชั้น โดยไม่มีวัสดุเชื่อมประสาน

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของตัวอย่างที่พันโอบรัดด้วยเมทัลลิตโดยไม่มีวัสดุเชื่อมประสานเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการโอบรัดด้วยเมทัลลิต ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า สำหรับตัวอย่างที่ไม่ได้พันโอบรัดด้วยเมทัลลิต เมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน คอนกรีตจะเริ่มหดตัวตามแนวแกนและขยายตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนปัวซอง จนกระทั่งรับแรงอัดสูงสุด หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะรับแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต เมทัลลิตจะมีหน้าที่คอยต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเมื่อตัวอย่างรับแรงที่ประมาณ 250-270 กก/ซม<sup>2</sup> จะเกิดการเลื่อนไถลของปลอกเมทัลลิตที่จุด S' ของตัวอย่างที่มีการโอบรัด 2 ชั้น โดยจะเกิดในเวลาใกล้เคียงกับที่เกิดในตัวอย่างที่พันโอบรัดเพียงชั้นเดียวที่จุด S เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างเพิ่มขึ้น จนกระทั่งรับแรงอัดสูงสุด พบว่าตัวอย่างที่มีการโอบรัด 1 ชั้น จะเกิดการบิดเบือนกลับป้นเนื่องจากเมทัลลิตหักขาด (ที่จุด A') ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างที่มีการโอบรัดสองชั้นที่เมื่อรับแรงอัด

สูงสุด (ที่จุด A') แล้วยังสามารถรับแรงอัดได้แต่ลดลงจนถึงจุด B และรับแรงเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุด C จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า ณ จุด B นี้ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะปรากฏรอยร้าวอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4ข ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่เมทัลชีทชั้นในฉีกขาดก่อน ในขณะที่เมทัลชีทยังคงรับแรงตามแนวแกนร่วมด้วยจนในสุดที่จุด C ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติจากสาเหตุที่แผ่นเมทัลชีทชั้นนอกฉีกขาด โดยพบว่าตำแหน่งการฉีกขาดของเมทัลชีทชั้นนอกตรงกับการฉีกขาดของเมทัลชีทชั้นใน ซึ่งเป็นการฉีกขาดบริเวณที่เกิดค่าความเค้นต่างกันมาก คือ บริเวณใกล้เคียงกับรอยทาบ ดังแสดงในภาพที่ 4ก และที่จุด F เนื่องจากเกิดการฉีกขาดของเมทัลชีทชั้นที่ 2 บริเวณที่ติดสตรีนเกททำให้ค่าความเครียดเกิดการหดตัวและขยายตัวต่อเนื่องจากเมทัลชีทชั้นที่ 1 ยังไม่วิบัติ

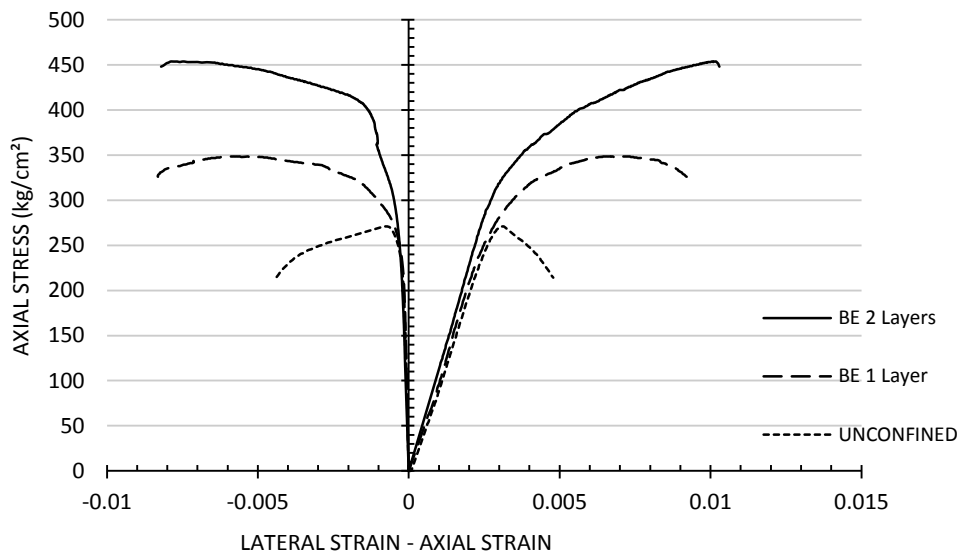


ภาพที่ 4 การวิบัติของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 และ 2 ชั้น โดยไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสาน

(ก) การฉีกขาดและรอยร้าวที่ปรากฏบนเมทัลชีทที่โอบรัด 1 ชั้น, (ข) การฉีกขาดและรอยร้าวบนเมทัลชีทที่โอบรัด 2 ชั้น

## 2. ทดลองกระบอกคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทจำนวน 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวอีพ็อกซีเป็นวัสดุประสาน

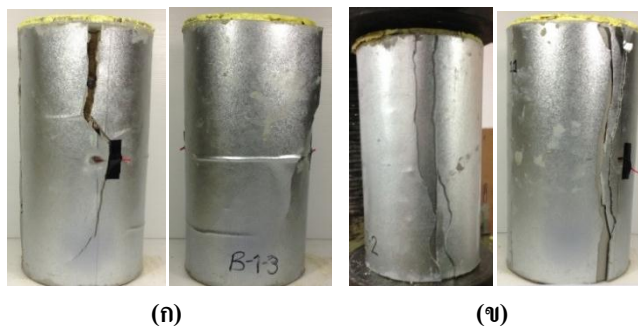
ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังโดยการพันโอบรัดด้วยเมทัลชีทโดยมีกาวอีพ็อกซีเป็นวัสดุเชื่อมประสานนั้น สามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยในแนวแกนเท่ากับ 347 กก/ซม<sup>2</sup> และ 456 กก/ซม<sup>2</sup> สำหรับการโอบรัดด้วยเมทัลชีทจำนวน 1 และ 2 ชั้นตามลำดับ หรือรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้จากตัวอย่างที่ไม่ได้มีการโอบรัดด้วยเมทัลชีทประมาณ 31% และ 73% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณการโอบรัดที่มากขึ้นช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดในแนวแกนให้สูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวยีพ็อกซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตามแนวแกนกับความเครียดตามแนวแกนและแนววงรอบดังแสดงในภาพที่ 5 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิตจำนวน 1 ชั้น เมื่อให้แรงกระทำตามแนวแกน ตัวอย่างจะเริ่มหดตัวตามแนวแกนและจะพยายามเบ่งตัวออกทางด้านข้าง ทำให้เกิดความเครียดดึงตามแนววงรอบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะนั้น เมทัลลิตก็จะทำหน้าที่โอบรัดแกนคอนกรีตและพยายามต้านทานการขยายตัวของแกนคอนกรีต จนตัวอย่างสามารถรับแรงกระทำสูงสุด หลังจากนั้นจะพบว่า ตัวอย่างสามารถรับแรงได้น้อยลงแต่เมทัลลิตยังทำหน้าที่ต้านทานการเสียภาพของแกนคอนกรีตที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง การปรากฏรอยอยู่บนเมทัลลิตแสดงให้เห็นว่าเมทัลลิตไม่ได้รับแรงดึงตามแนววงรอบเพียงอย่างเดียว แต่ยังรับแรงในแนวแกนร่วมด้วย จนกระทั่งทรงกระบอกเกิดการวิบัติ การวิบัติที่พบเกิดจากการฉีกขาดของเมทัลลิตและระยะทาบมีการเปิดออกเล็กน้อยบางตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 6

เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นการโอบรัดด้วยเมทัลลิตเป็น 2 ชั้น พบว่าทรงกระบอกมีความแข็งแรง (Stiffness) เพิ่มขึ้นและมีพฤติกรรมที่เหนียวขึ้น เมื่อเทียบกับทรงกระบอกที่โอบรัดด้วยเมทัลลิต 1 ชั้น เมื่อตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต 2 ชั้น รับแรงกระทำสูงสุด จะเกิดการวิบัติแบบฉับพลัน การวิบัติที่พบเกิดจากการฉีกขาดของเมทัลลิตและไม่ปรากฏรอยอยู่บนเมทัลลิตในทุกตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 6

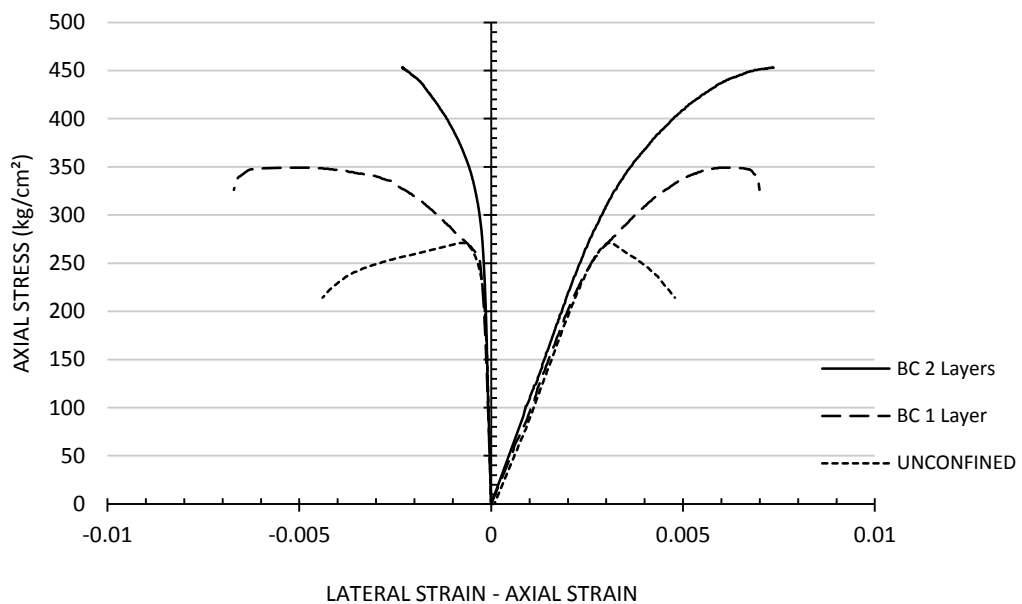


ภาพที่ 6 การวิบัติของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวยีพ็อกซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

(ก) ตัวอย่างการฉีกขาดและรอยร้าวของเมทัลลิต 1 ชั้น (ข) ตัวอย่างการฉีกขาดของเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิต 2 ชั้น

### 3. ทรงแรงบดคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิกจำนวน 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังโดยการพันโอบรัดด้วยเมทัลลิกโดยมีกาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานนั้นสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยในแนวแกนเท่ากับ 355 กก/ซม<sup>2</sup> และ 456 กก/ซม<sup>2</sup> หรือรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้จากตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิกประมาณ 34% และ 73% สำหรับการโอบรัดด้วยเมทัลลิกจำนวน 1 และ 2 ชั้นตามลำดับ ซึ่งกรณีการเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานจากกาวยาซีเป็นกาวยาซีเมนต์พบว่า การใช้กาวยาซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังได้เทียบเคียงกับกาวยาซีทั้งในการโอบรัด 1 และ 2 ชั้น แต่อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมและรูปแบบการวิบัติของกาวยาซีจะแตกต่างจากตัวอย่างที่ใช้กาวยาซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน



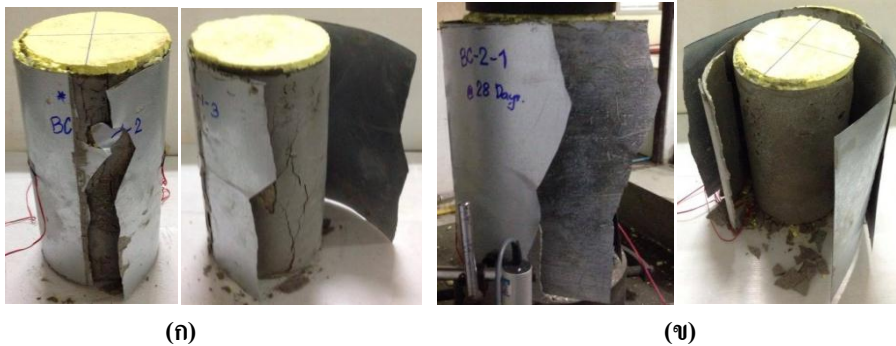
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิก 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวยาซีเมนต์วัสดุเชื่อมประสาน

เช่นเดียวกับกลุ่มที่ใช้กาวยาซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน พฤติกรรมของตัวอย่างในกลุ่มนี้สามารถอธิบายได้ในภาพของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในภาพที่ 7 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้กาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตัวอย่างสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น แต่แสดงพฤติกรรมที่มีความเหนียวน้อยกว่าในกรณีที่ใช้กาวยาซีเป็นวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับการโอบรัดด้วยเมทัลลิก 1 ชั้น ทุกตัวอย่างจะเกิดการวิบัติจากการร้าวของเมทัลลิก ดังภาพที่ 8ก

สำหรับในกรณีของการพันโอบรัดแบบสองชั้น พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนการโอบรัดทรงกระบอกสามารถรับแรงตามแนวแกนได้เพิ่มขึ้นเทียบเคียงกับกรณีใช้กาวยาซีของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิก 2 ชั้น หลังจากตัวอย่างรับแรงกระทำสูงสุด ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติแบบฉับพลัน โดยเป็นการวิบัติใน 2 รูปแบบ คือ แผ่นเมทัลลิกร้าวและการเปิดออกของเมทัลลิกที่บริเวณรอยทาบ ซึ่งการเปิดออกของเมทัลลิก ดังภาพที่ 8ข การเปิดออกของเมทัลลิกที่พบในบางตัวอย่างอาจเกิดจากการใช้กาวยาซีความคุณภาพไม่เหมาะสมทำให้ยากต่างจากกรณีการใช้กาวยาซีที่มีความสม่ำเสมอในทุกตัวอย่าง



และอาจจะมาจากการที่ค่าแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีมีค่าสูงกว่ากาวยาซีเมนต์ประมาณ 4 เท่า ทำให้สามารถยึดเกาะและส่งถ่ายแรงระหว่างแกนคอนกรีตกับเมทัลชีทและเมทัลชีทกับเมทัลชีทได้ดีกว่าเมื่อวัสดุเชื่อมประสานแข็งตัวเต็มที่แล้ว



**ภาพที่ 8** การวินิจฉัยของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 และ 2 ชั้น โดยใช้กาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน  
(ก) ตัวอย่างการฉีกขาดของเมทัลชีท 1 ชั้น, (ข) การฉีกขาดและเปิดออกของตัวอย่างที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท 2 ชั้น

#### 4. ภาพรวมของกำลังที่เพิ่มขึ้น

ตัวอย่างที่มีวัสดุเชื่อมประสานสามารถเพิ่มกำลังได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากการยึดเหนี่ยวระหว่างแกนคอนกรีตกับเมทัลชีทและระหว่างเมทัลชีทกับเมทัลชีท วัสดุเชื่อมประสานจะช่วยให้การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเมทัลชีทเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ สำหรับการพันโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น พบว่าค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานและตัวอย่างที่ไม่ใช้วัสดุประสานจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mirmiran [14] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณการโอบรัดเป็น 2 ชั้น จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานกับตัวอย่างที่ไม่ใช้วัสดุประสานจะมีความแตกต่างกันอย่างมากโดยสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wakodikar [11] ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานจะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้วัสดุประสานที่ถูกโอบรัดด้วย FRP จำนวน 2 ชั้น

จากการทดสอบตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าพฤติกรรมการวินิจฉัยของตัวอย่างทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทจำนวน 1 และ 2 ชั้น มี 2 แบบ คือพฤติกรรมการวิบัติแบบทันทีทันใดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด และพฤติกรรมการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปหลังจากตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุดแล้ว เมื่อใช้กาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น จะพบว่าเมื่อตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุดแล้วตัวอย่างยังสามารถรับแรงได้แต่ลดลงจนกระทั่งแผ่นเมทัลชีทฉีกขาด เมื่อเพิ่มการโอบรัดเป็น 2 ชั้นจะพบว่า ตัวอย่างสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นกว่าการโอบรัด 1 ชั้น แต่เมื่อรับแรงอัดสูงสุดตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดเป็นการฉีกขาดของเมทัลชีททั้งชั้นในและชั้นนอก เมื่อเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานเป็นกาวยาซีเมนต์จะพบว่า เมื่อเสารับแรงอัดสูงสุด ตัวอย่างที่ถูกโอบรัด 1 ชั้น และ 2 ชั้น จะมีพฤติกรรมการวิบัติแบบทันทีทันใดและมีรูปแบบการวิบัติทั้งการฉีกขาดของเมทัลชีทและการเปิดออกของรอยร้าว ซึ่งในตัวอย่างการโอบรัด 1 ชั้น เป็นการฉีกขาดของเมทัลชีททั้งหมดทุกตัวอย่างและการโอบรัด 2 ชั้น เป็นการฉีกขาดร่วมกับการเปิดออกที่รอยร้าวของเมทัลชีท สำหรับกรณีไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานในการโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 และ 2 ชั้นนั้น พฤติกรรมการวิบัติที่พบจะเป็นแบบทันทีทันใด ณ จุดที่ตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งเป็นการฉีกขาดของเมทัลชีททั้งหมดทุกตัวอย่างในการโอบรัดทั้ง 1 และ 2 ชั้น

ค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนและภาพแบบการวินิจฉัยของทุกกลุ่มตัวอย่างจะเป็นไปดังสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำลังอัดประลัยสูงสุดเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์กำลังที่เพิ่มขึ้นและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

| ตัวอย่าง    | กำลังอัดประลัยสูงสุดเฉลี่ย<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | เปอร์เซ็นต์กำลังที่เพิ่มขึ้น<br>(เฉลี่ย) | รูปแบบการวิบัติที่พบ* |
|-------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|
| Control     | 263.84                                                | -                                        | -                     |
| UB-1 Layer  | 331.49                                                | 25                                       | Fr, Wr                |
| UB-2 Layers | 331.16                                                | 25                                       | Fr, Wr                |
| BE-1 Layer  | 347.06                                                | 31                                       | Fr, Wr                |
| BE-2 Layers | 456.98                                                | 73                                       | Fr                    |
| BC-1 Layer  | 355.80                                                | 34                                       | Fr                    |
| BC-2 Layers | 456.70                                                | 73                                       | Fr, De                |

\*หมายเหตุ Fr คือ การวิบัติโดยแผ่นเมทัลลิกหักงอจนขาด

Wr คือ มีรอยร้าวเกิดขึ้นบนแผ่นเมทัลลิก

De คือ แผ่นเมทัลลิกเปิดออกตรงรอยทาบบ

## สรุปผล

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมและการเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนของทรงกระบอกคอนกรีตคือการเลือกใช้วัสดุเชื่อมประสาน สำหรับการพันโอบรัดด้วยเมทัลลิกเพียงชั้นเดียว พฤติกรรมของทรงกระบอกคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุเชื่อมประสานและที่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานระหว่างผิวของวัสดุโอบรัดกับแกนกลางวัสดุจะแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของการพันโอบรัด พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างที่มีการใช้วัสดุเชื่อมประสานจะมีความเหนียวและสามารถเพิ่มกำลังต่อไปได้อีก ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ใช้วัสดุเชื่อมประสานจะไม่สามารถเพิ่มกำลังต่อไปได้ ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ปลอกเมทัลลิกแต่ละชั้นทำหน้าที่แยกจากกันโดยไม่มีการช่วยกันรับแรง สำหรับการเลือกใช้วัสดุเชื่อมประสานนั้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้กาวยาโฟมและการใช้กาวยาซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างชั้นส่งผลให้ทรงกระบอกคอนกรีตมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งส่วนหนึ่งน่าจะเกิดจากการควบคุมระยะทาบบของปลอกด้วยกาวยาโฟมที่เพียงพอ อย่างไรก็ตาม ด้วยคุณสมบัติกำลังยึดเหนี่ยวที่แตกต่างกันของวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองชนิด การเลือกใช้วัสดุประสานที่มีกำลังยึดเหนี่ยวสูงกว่าน่าจะช่วยให้มีการส่งถ่ายแรงเฉือนระหว่างชั้นวัสดุที่ดีกว่า จึงส่งผลให้การโอบรัดที่ใช้กาวยาโฟมเป็นวัสดุเชื่อมประสานมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความเหนียวได้มากกว่าการใช้กาวยาซีเมนต์ และยังส่งผลต่อภาพแบบการวิบัติโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการโอบรัดด้วยเมทัลลิกมากกว่า 1 ชั้น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่นและศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน (SIRDC) มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนในการศึกษา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย “ผลของวัสดุประสานต่อพฤติกรรมการเพิ่มกำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลลิก”



## เอกสารอ้างอิง

1. Wu G, Lu ZT, Wu ZS. Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites. *Construction and Building Materials*. 2006; 20: 134-148.
2. Miyauchi K, Inoue S, Kuroda T, Kobayashi A. Experimental study on the confinement effect of concrete cylinders confined by carbon fiber sheets. *Proc Jpn Concr Inst* 2001; 23(1): 865–870.
3. Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, El Echary H. Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *Journal of Composites for Construction, ASCE* 1998; 2(4): 175–185.
4. Joaquim A, Barros O, Debora RSM. Ferreira. Assessing the Efficiency of CFRP Discrete Confinement Systems for Concrete Cylinders. *Journal of Composites for Construction, ASCE* 2008;12(2): 134–148.
5. Berthet JF, Ferrier E, Hamelin P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets Part B: modeling. *Construction and Building Materials*. 2006; 20: 338–347.
6. Bank LC. *Composites for construction: Structural design with FRP materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2006.
7. Wu YF, Wei YY. Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns. *Engineering Structures*. 2010;32:32-45.
8. Thériault M, Neale K, Claude S. Fiber-Reinforced Polymer-Confined Circular Concrete Columns: Investigation of Size and Slenderness Effects. *Journal of Composites for Construction*. 2004;8(4):323-31.
9. Toutanji HA. Stress–strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. *ACI Materials Journal* 1999; 96(3): 397–404.
10. Lam L, Teng JG. Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*. 2003; 17: 471-89.
11. Wakodikar AA. Behaviour of FRP Jacketed RC Column. [PhD thesis]. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India; 2002.
12. Rajanikanth G. Characterisation of fiber reinforced polymer wrapped concrete elements. [PhD thesis]. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India; 2005.
13. Pico O, “Confinement Effectiveness of Square FRP Tubes in Hybrid Columns,” *Research Report*, University of Central Florida, Fla., 1997.
14. Mirmiran A. “FRP-concrete composite column and pile jacketsplicing—Phase II.” Final Rep., Contract Nn. B-9895, Florida Dept. of Transp. Tallahassee, Fla., 1997b.
15. Deb A, Bhattacharyya SK. An investigation into the effect of bonding on FRP wrapped cylindrical concrete columns. *J Compos Constr ASCE* 2010; 14(6): 706–719
16. Khamthong M, Boonpichetvong M, Pannachet T. Axial Compression Strengthening of Concrete Columns Confined by Metal Sheet, in *Proceedings of the Seventh Annual Concrete Conference (ACC-7)*, October, 2011, Rayong, Thai.

17. Horsilachai K, Chanbang K, Saisri N. Strengthening of RC slab using metal sheet, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2009. Thai.
18. Somnamee K, Kruakam T, Kaewsuwan S. Flexural resistance of RC member Strengthened by metal sheet, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2009. Thai.
19. Saisaen W, Damnernpol H, Ruangsak A. Compression Strengthening of RC column by metal sheet, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2010. Thai.
20. Pitakpupan K, Groomrenthong W, Tongskunork Ch. Confining mechanical behavior of metal sheet bonded around concrete column, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2010. Thai.
21. Siramunin G, Pila Y, Benjaprayunsak W. Effect of column sheet on failure mode of bonded metal sheet in strengthened column, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2010. Thai.
22. Wangsa K, Inla T, Charoensri P. Study on Increasing Efficiency of Metal-Sheet Bonded Square Concrete Column under Uniaxial Compression, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2011. Thai.
23. Boonyaratana K, Pinitkarnwakul S, Janpila A. Effect of concrete compression strength on axial load carrying capacity of concrete column strengthened with metal sheets, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2012. Thai.
24. Thongsila Ch, Tosomboon I, Gobkuea A. Effect of Metal sheet Arrangement on Load Carrying Capacity of Metal Sheet Confined Column, Undergraduate Engineering Student Project Report, Khon Kaen University; 2013. Thai.
25. Standard industrial products. Ready mixed concrete. TIS 213; 2552.
26. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39/C39M-05. Annual Book of ASTM Standard; 2001.
27. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8M. Annual Book of ASTM Standard; 2001.
28. Sika (Thailand) Ltd. Sikadur®-31 CF Normal is a moisture tolerant, thixotropic, structural 2-component adhesive and repair mortar, based on a combination of epoxy resins and special fillers; 2551.
29. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). ASTM C109. Annual Book of ASTM Standard; 2008.
30. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel. ASTM C234. Annual Book of ASTM Standard; 2000.