

การเสริมเหล็กปลอกภายนอกสำหรับรับแรงเฉือน

Externally Anchored Stirrups for Shear Reinforcement

ญาณวุฒิ หลวงคลัง¹ อสิริยศ ดอกไม้² และ วัฒนชัย สมิตากร³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการซ่อมแซมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการเสริมเหล็กปลอกภายนอก เพื่อเสริมกำลังให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้มากขึ้นและพัฒนาวิธีการซ่อมแซมให้มีประสิทธิภาพและความสะดวกมากขึ้น และเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งานโครงสร้าง โดยใช้วิธีการเจาะเสียบเหล็กและยึดติดกับโครงสร้างเดิมด้วยน้ำยาอีพอกซี ในการจัดทำโครงการแบ่งตัวอย่างการทดสอบเป็น 4 ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่แตกต่างกัน โดยจะทำการทดสอบแบบคานรับแรง 3 จุด และบันทึกค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานด้วย LVDT และความเครียดในเหล็กปลอกด้วย strain gauge แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ผลการทดสอบพบว่า การเสริมเหล็กปลอกภายในและภายนอกสำหรับรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, การเสริมเหล็กรับแรงเฉือน, เหล็กปลอกภายนอก

Abstract

This project aims to study and develop a method for repairing shear reinforcement of reinforced concrete beams by using external stirrups to strengthen the structure to be able to withstand more force and create a repair method that is more efficient and convenient and to increase safety for the users of the structure, by using the method of drilling and inserting steel and attaching it to the original structure with epoxy. The study included four test specimens, each featuring a unique shear reinforcement configuration, which tested under a three-point loading setup. Deflections at the midspan of the beams were measured using the LVDT, and strain in the stirrups was monitored with strain gauges. The findings revealed that varying internal and external stirrup configurations significantly influenced the load capacities of the reinforced concrete beam

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Shear Reinforcement, External stirrups

1 บทนำ

โครงสร้างของอาคารส่วนใหญ่นิยมสร้างเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากก่อสร้างง่ายและมีราคาถูก เมื่ออาคารใช้งานเป็นเวลานานก็จะมีอาการเสื่อมสภาพของอาคารหรือโครงสร้างผุพังไปและต้องดำเนินการซ่อมแซมเพื่อการใช้งานต่อไป และในประเทศไทยมีอาคารที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเป็นอาคารเก่าที่ไม่เคยผ่านการตรวจสอบอาคารและดูแลให้เหมาะสมอยู่มากมาย ดังนั้นการตรวจสอบและซ่อมแซมอาคารถือเป็นสิ่งสำคัญและเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไข เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของอาคารส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและผู้คนโดยรอบ หากปล่อยไว้หรือละเลยการซ่อมแซมอาจส่งผลให้เกิดปัญหาในอนาคตได้ ซึ่งความเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารเกิดได้จากปัจจัยหลายอย่าง เช่น การเกิดสนิมบริเวณเหล็กเสริมซึ่งมาจากอุณหภูมิหรือความชื้นบริเวณนั้น ดังนั้นจึงควรมีวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสมกับสภาพของแต่ละอาคารและมีประสิทธิภาพเพื่อช่วยในการเสริมกำลังของโครงสร้างที่เหล็กเสริมเสื่อมสภาพจากการเกิดสนิม

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้คิดค้นวิธีซ่อมแซมเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารที่เกิดสนิม ด้วยวิธีการเจาะเสียบเหล็กเข้าไปในบริเวณที่เหล็กเสริมเกิดสนิมและใช้น้ำยาอีพอกซีในการช่วยยึดเหล็กที่เจาะเสียบเข้าไปให้ติดแน่นและเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับโครงสร้างเดิม ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการซ่อมแซมกรณีเหล็กเสริมเกิดสนิมนั้นอาจจะต้องมีการสกัดเนื้อคอนกรีตออกแล้วเชื่อมเหล็กเสริมใหม่เข้าไป ซึ่งอาจจะเป็นวิธีที่ทำได้ยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้นการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมแบบใหม่ ๆ จึงมีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อการทำงานในอนาคต

2 การทบทวนวรรณกรรม

2.1 วัสดุเสริมกำลัง

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตจำเป็นต้องใช้วัสดุเสริมกำลังเพื่อต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดจากแรงดัด แรงเฉือน และแรงตามแนวแกน วัสดุเสริมกำลังที่ใช้ในงานซ่อมแซมมีหลากหลายประเภท รวมทั้งเหล็กเสริมธรรมดา และประเภทที่ทนต่อการกัดกร่อนดังนี้

2.1.1 เหล็กตามมาตรฐาน มอก.

เหล็กข้ออ้อยที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน มอก. 24 เหล็กเส้นกลมที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน มอก. 20 และตะแกรงลวดผิวเรียบที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน มอก. 737 มาตรฐาน

2.1.2 เหล็กเสริมเคลือบอีพอกซี

เหล็กเสริมเคลือบอีพอกซีได้มีการนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อประมาณกลางปี ค.ศ. 1970 อีพอกซีที่ใช้เคลือบเหล็กเสริมจะทำหน้าที่เป็นชั้นปกป้องเหล็กเสริมจากปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิม ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และคลอไรด์ แม้ว่าวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพดีในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตในแผ่นพื้นสะพาน แต่ในบริเวณที่เผชิญกับคลื่นทะเล หรือละอองคลื่นทะเลโดยตรง พบว่าประสิทธิภาพการป้องกันของอีพอกซีเคลือบผิวขึ้นอยู่กับคุณภาพของการเคลือบ ความเสียหายของผิวเคลือบระหว่างติดตั้ง ขนาดของรอยร้าว ความหนาของระยะหุ้ม การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเคลือบผิวและเหล็กเสริม และระดับความเข้มข้นของคลอไรด์

2.1.3 เหล็กเสริมกล้าปาวาไนซ์

เหล็กเสริมกล้าปาวาไนซ์เป็นเหล็กเสริมที่เคลือบสังกะสี ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ลดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยใช้การเคลือบด้วยชั้นวัสดุกล้าปาวาไนซ์ห่อหุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริม เพื่อใช้เป็นชั้นกักกร่อนแทนเหล็กเสริม

2.1.4 เหล็กเสริมสแตนเลส

เหล็กเสริมสแตนเลสต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก ชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือเกรด 304 และ 316 โดยเกรด 316 จะมีความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ดีกว่าและได้รับผลกระทบน้อยกว่า รอยร้าวในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมสแตนเลสสามารถประกอบใช้ที่หน้างานได้ โดยไม่ได้รับผลกระทบจากการทำงานงาน ประกอบและติดตั้งเหล็กเสริมที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายของผิวเหล็ก เช่น จากการตัด การวางตำแหน่ง การผูกเหล็ก และการเทคอนกรีต

2.1.5 เหล็กเสริมหุ้มสแตนเลส

เหล็กเสริมหุ้มสแตนเลสมีสมบัติเท่าเทียมกับเหล็กเสริมสแตนเลสแต่มีราคาที่ถูกกว่า สามารถประกอบ ตัด ดัดและเชื่อมที่หน้างานได้อย่างไร้ที่ตามการซ่อมแซมที่ต้องตัดปลาย จำเป็นต้องมีการเคลือบผิวปลายที่ตัดอย่างเหมาะสม

2.1.6 วัสดุเสริมกำลังประเภทสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะ

วัสดุเสริมกำลังประเภทสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber reinforced plastic; FRP) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยกำลังสูงโดยมีเรซินเป็นตัวประสาน โดยทั่วไปเรซินที่ใช้ คือ อีพอกซี และเรซินประเภทที่ได้รับความนิยมน้อยกว่า เช่น ไวนิลเอสเตอร์ และ พอลิเอสเตอร์ ประเภทของเส้นใยที่ใช้คือ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิด ซึ่งมีสมบัติเชิงกล ความทนทาน และราคาที่แตกต่างกัน

2.2 ปัจจัยในการเลือกใช้วัสดุในการเสริมกำลัง

เนื่องจากวัสดุซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีหลายชนิดทั้งแบบธรรมดาทั่วไป และแบบพิเศษ ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการ ความเสียหายที่เกิดขึ้น สมบัติขององค์อาคารเดิม ลักษณะการใช้งาน และสิ่งแวดล้อมของโครงสร้าง ผู้ผลิตวัสดุซ่อมแซมควรให้ข้อมูลสมบัติของวัสดุด้านการยึดเกาะและกำลังอัด ซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม อย่างไรก็ตาม สมบัติอื่นๆ ที่มีความจำเป็นต้องพิจารณาประกอบ มีดังต่อไปนี้

2.2.1 เสถียรภาพด้านขนาด

วัสดุในงานซ่อมแซมนอกจากจะต้องมีกำลังและความแข็งแรงเป็นสมบัติหลักแล้วจำเป็นจะต้องมีเสถียรภาพในด้านมิติด้วยความสามารถในการยึดเกาะจะเป็นตัวทำให้วัสดุซ่อมแซมและคอนกรีตมีสภาพเหมือนวัสดุชิ้นเดียวกัน หากวัสดุซ่อมแซมและคอนกรีตไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันไว้ได้ย่อมเกิดความเสียหายขึ้นก่อนเวลาอันควร

2.2.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดการยึดหรือหดตัวของวัสดุจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์นี้ เมื่อมีการซ่อมแซมโดยการปะหรือการเททับที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่หรือลึก โดยต้องเผชิญกับสภาวะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากในช่วงการใช้งานองค์อาคารหรือโครงสร้างนั้น มีความจำเป็นมากที่ต้องพิจารณาเลือกใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตเดิม มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการรื้อรื้อขึ้นในแนวรอยต่อของการซ่อมแซม หรือในวัสดุที่มีกำลังต่ำกว่าใกล้เคียงแนวรอยต่อ

2.2.3 การหดตัวแห้ง

เนื่องด้วยการซ่อมแซมส่วนใหญ่จะกระทำบนคอนกรีตเดิมที่ไม่เกิดการหดตัวแล้ว ดังนั้นวัสดุซ่อมแซมควรมีการหดตัวต่ำเพื่อไม่ให้เกิดการรื้อรื้อของการยึดเกาะบริเวณแนวรอยต่อของการซ่อมแซม วิธีการควบคุมให้วัสดุซ่อมแซมหดตัวน้อยเช่น ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (กรณีวัสดุซ่อมแซมมีปูนซีเมนต์ และวัสดุประสานชนิดวัสดุซีเมนต์ เป็นส่วนผสมหลัก) ใช้ขนาดและปริมาณของมวลรวมหยาบให้มากที่สุด ใช้สารลดการหดตัวหรือสารขยายตัว และใช้วิธีการซ่อมแซมที่มีโอกาสเกิดการหดตัวได้น้อยที่สุด

2.2.4 โมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเป็นการวัดค่าสติฟเนส (stiffness) ของวัสดุ วัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำจะมีการเสียรูปมากกว่าวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง เมื่อวัสดุเชื่อมต่อกันและมีค่าโมดูลัสแตกต่างกันมากจะทำให้เกิดการเสียรูปที่แตกต่างกันมากโดยเฉพาะเมื่อเกิดแรงกระทำในทิศทางขนาดกับความยืดหยุ่น วัสดุที่มีค่าโมดูลัสต่ำมีการเสียรูปมากทำให้แรงกระทำจะถูกถ่ายไปยังวัสดุที่มีค่าโมดูลัสสูง และอาจก่อให้เกิดการสูญเสียกำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแตกต่างกันได้ นอกจากนี้การสูญเสียกำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแตกต่างกันอาจเกิดจากการหดหรือขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุซ่อมแซมควรใกล้เคียงกับวัสดุเดิม ในกรณีการซ่อมแซมส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างหลักที่ไม่ต้องการให้วัสดุซ่อมแซมรับกำลัง หรือการซ่อมแซมแบบป้องกันการใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ จะสามารถช่วยลดหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งที่ถูกยึดไว้ได้

2.2.5 ความสามารถในการซึมผ่านได้

ความสามารถในการซึมผ่านได้ หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่จะส่งผ่านของเหลว ก๊าซ หรือไอน้ำ คอนกรีตที่มีคุณภาพดีควรมีสัมบัติในการซึมผ่านได้ที่ต่ำ การใช้วัสดุซ่อมแซมที่มีความทึบน้ำสูงในงานซ่อมแซมขนาดใหญ่ งานเททับหรืองานเคลือบ ไอบของผิวพื้นที่ซึมผ่านคอนกรีตเดิมขึ้นมาจากจะถูกกักไว้ที่บริเวณรอยต่อบริเวณผิวของคอนกรีตเดิมกับวัสดุซ่อมแซม ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นบริเวณแนวรอยต่อได้ หรืออาจทำให้บริเวณแนวรอยต่ออิมมิดีด้วยน้ำ ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดจากวัฏจักรการแข็งตัวและหลอมเหลว

ของน้ำได้ หากโครงสร้างนั้นอยู่ในเขตประเทศที่สภาพอากาศหนาวจัด

2.2.6 ความเข้ากันได้ของสมบัติทางเคมี

ในสภาวะปกติ pH ของคอนกรีตจะมีค่าประมาณ 12 หรือสูงกว่า ซึ่งการอยู่ในสภาวะดังกล่าวนั้นจะช่วยในการปกป้องเหล็กเสริมต่อการกัดกร่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น ดังนั้นวัสดุเคลือบผิวกับวัสดุซ่อมแซมที่มีความเป็นด่างต่ำถึงปานกลาง จึงอาจไม่ได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมากนัก ในการเลือกวัสดุซ่อมแซมควรคำนึงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุซ่อมแซมกับคอนกรีตเดิมที่อาจมีผลต่อความแตกต่างในคอนกรีตด้วย ดังนั้นหากจำเป็นต้องใช้วัสดุซ่อมแซมเหล่านี้ อาจจำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมควบคู่ไปด้วย เช่น วิธีการป้องกันคาโทดิก (Cathodic protection) หรือการเคลือบเหล็กเสริม

2.2.7 สมบัติทางไฟฟ้า

ความต้านทานทางไฟฟ้าหรือเสถียรภาพทางไฟฟ้าของวัสดุซ่อมแซมอาจมีผลต่อความคงทนของวัสดุซ่อมแซมและคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้ว วัสดุซ่อมแซมที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงหรือไม่นำไฟฟ้าจะแยกพื้นที่ซ่อมแซมออกจากพื้นที่คอนกรีตรอบ ๆ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เมื่อวัสดุซ่อมแซมและคอนกรีตเดิมมีความทึบน้ำ หรือปริมาณคลอไรด์ที่แตกต่างกัน อาจส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเพิ่มสูงขึ้น และก่อให้เกิดความเสียหายก่อนเวลาอันควรบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ซ่อมแซม หรือที่เรียกว่า Anodic ring หรือ Halo effect

2.2.8 สีและลักษณะของพื้นผิว

สำหรับงานซ่อมแซมงานสถาปัตยกรรม สีและลักษณะพื้นผิวของวัสดุซ่อมแซมไม่ควรแตกต่างจากพื้นผิวเดิมโดยรอบ ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบโดยการจำลองงานจริงเพื่อเปรียบเทียบที่หน้างานก่อนลงมือปฏิบัติในพื้นที่จริง

2.2.9 สภาพการทำงานจริงในนาม

แนวทางในการเลือกวัสดุ นอกจากการพิจารณาสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุแล้ว ควรพิจารณาสภาพการทำงานประกอบกันด้วย ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานและสภาพการทำงานเป็นข้อมูลสำคัญ รวมถึงรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะต้องมีการประเมินเพื่อให้สามารถพิจารณาเลือกวัสดุได้อย่างเหมาะสม

2.3 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร

การเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารหรือที่นิยมเรียกว่า การเสริมกำลังโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างด้านการรับน้ำหนักบรรทุก เช่น แรงดัด แรงเฉือน แรงตามแนวแกน และแรงบิด หลักการเสริมกำลังสามารถทำได้โดยเพิ่มกำลังขององค์อาคารหรือโครงสร้าง หรือการลดแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคารหรือโครงสร้าง อาจทำได้โดยวิธีการถ่ายแรงหรือน้ำหนักบรรทุกจาก

องค์อาคารหรือโครงสร้างที่มีปัญหาไปยังจุดรองรับอื่น เช่น การเพิ่มขนาดหน้าตัดหรือขนาดขององค์อาคาร การอัดแรงภายนอก การอัดแรงภายหลัง และการเสริมหรือเพิ่มโครงสร้างรองรับ

2.3.1 การเสริมกำลังด้วยการขยายหน้าตัด

การเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการพอกโครงสร้างด้วยคอนกรีตเป็นวิธีการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบดั้งเดิม ซึ่งคอนกรีตที่นำมาใช้เป็นส่วนเพิ่มเติมกับองค์อาคารเก่าอาจใช้ร่วมกับเหล็กเสริม เหล็กตะแกรง หรือลวดอัดแรงได้ แต่ต้องออกแบบหน้าตัดขององค์อาคารใหม่ให้มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและสติฟเนสเพิ่มขึ้น ซึ่งคอนกรีตที่เพิ่มถือเป็นส่วนของโครงสร้างที่ใช้ในการป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างเดิม หรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่อาจเกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงจากการขุดสี รวมไปถึงยังช่วยเพิ่มความต้านทานการทนไฟของโครงสร้างเดิม วิธีการขยายหน้าตัดหรือการพอกคอนกรีตสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้ได้กับองค์อาคารเสา คาน พื้น และกำแพง

2.3.2 การเสริมกำลังด้วยการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายนอก

พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer หรือ FRP) เป็นวัสดุเสริมกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งด้านกำลังและความคงทน นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบา ซึ่งทำให้เป็นที่นิยมใช้ในหลายอุตสาหกรรมและงานวิศวกรรม

สำหรับ FRP ที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกตามประเภทของเส้นใยได้ 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer หรือ GFRP): เป็นวัสดุที่ใช้เส้นใยแก้วในการเสริมกำลัง ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีในด้านความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อน
2. พอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber Reinforced Polymer หรือ AFRP): ใช้เส้นใยอะรามิดซึ่งมีความแข็งแรงสูงและทนต่อการเสื่อมสภาพทางเคมี ทำให้เป็นวัสดุที่มีความคงทนมาก
3. พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer หรือ CFRP): เป็นวัสดุที่ใช้เส้นใยคาร์บอน ทำให้มีความแข็งแรงมากที่สุดและน้ำหนักเบา

2.3.3 การเสริมกำลังด้วยระบบอัดแรงภายหลังภายนอก

ระบบอัดแรงภายหลังเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อชดเชยหน่วยแรงดึงและการแอ่นตัวที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก ซึ่งใช้เหล็กเสริมอัดแรงหรือลวดอัดแรงเพื่อทำหน้าที่แตกต่างกับเหล็กเสริมทั่วไป กล่าวคือ เหล็กเสริมอัดแรงจะมีหน่วยแรงอยู่ก่อนที่จะองค์อาคารจะรับน้ำหนักบรรทุก แต่เหล็กเสริมทั่วไปจะมีหน่วยแรงเมื่อองค์อาคารเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load)

การอัดแรงภายนอกภายหลัง (external post-tensioning) เป็นเทคนิคการเสริมกำลังโดยใช้วัสดุเสริมกำลัง เช่น เหล็กเสริมอัดแรง ลวดอัดแรง หรือวัสดุอื่นๆ เช่น โพลีเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งตามแนวแกนภายนอกขององค์อาคาร เช่น ขึงด้านล่างหรือด้านข้างของคาน โดยมีการใช้สมอปเปลี่ยนทิศทาง (deviator) ในการเปลี่ยนทิศทางขึงลวดอัดแรงเพื่อปรับโมเมนต์ดัดที่ไดจากการอัดแรงภายนอกให้ได้ตามที่ต้องการตามแนวแกนขององค์อาคาร

2.3.4 การเสริมกำลังด้วยการเพิ่มจุดรองรับ

การเพิ่มองค์อาคารใหม่เข้าไปในระบบโครงสร้างเดิม โดยการเพิ่มจุดรองรับให้กับองค์อาคารเดิมจะช่วยลดผลของน้ำหนักบรรทุกและลดหน่วยแรงภายในขององค์อาคารเดิมได้ วิธีนี้ถือเป็นการเสริมกำลังโครงสร้างเช่นเดียวกัน โดยองค์อาคารใหม่อาจอยู่ในรูปแบบของคานเสาหรือระบบโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหลายองค์อาคาร ในบางกรณีการเพิ่มองค์อาคารใหม่สามารถเปลี่ยนเส้นทางการถ่ายแรงของโครงสร้างเดิมได้ เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีความเสียหายรุนแรงและไม่คุ้มค่าที่จะซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง การเพิ่มองค์อาคารใหม่ช่วยลดหน่วยแรงภายใน เช่น แรงเฉือนและแรงดัด รวมถึงเพิ่มกำลังและสติฟเนสของโครงสร้างเดิม เพิ่มกำลังต้านทานแรงดันข้างซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มองค์อาคารหรือจุดรองรับจะขึ้นอยู่กับกรอบการออกแบบ การให้รายละเอียด การเลือกวัสดุ และวิธีการติดตั้ง

3 เปรียบเทียบวิธีวิจัย

3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1.1 การเตรียมคานตัวอย่างเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. กำหนดสิ่งที่ยากทราบจากการทดสอบ คือ ความสามารถในการรับกำลังของ Rehab Bar เมื่อใช้ซ่อมแซมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของคานที่วิบัติด้วยแรงเฉือนและกำหนดจำนวนคานที่จะใช้ทดสอบ คือ 4 คาน โดยคานตัวแรกเป็นคานควบคุมที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ส่วนคานตัวที่ 2 จะเป็นคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เหลืออีก 2 คาน จะใช้ระยะความกว้างของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนซ่อมแซมที่แตกต่างกันไปเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจากผลของระยะความกว้างในการซ่อมแซม

2. วิเคราะห์ขนาดและรูปแบบการวิบัติของคานที่ต้องการให้เกิดขึ้น เพื่อออกแบบขนาดคาน ขนาดเหล็กเสริมบนและล่างรับแรงดัด และขนาดเหล็กปลอกสำหรับรับแรงเฉือนให้เหมาะสมกับรูปแบบการวิบัติด้วยแรงเฉือน จากการวิเคราะห์จะได้ขนาดคานเท่ากับ 200 x 400 มม. เหล็กเสริมบนและล่าง คือ เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เหล็กปลอก คือ เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และความยาวคานเท่ากับ 0.8 ม. สามารถวิบัติด้วยแรงเฉือนเมื่อทดสอบแบบ 3 point test

3. หาระยะที่เหมาะสมในการเจาะเสียบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ใช้ในการซ่อมแซมคาน ในการทดลองจะทำการเจาะเสียบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งระหว่างเหล็กเสริมบนและล่างทั้งด้านบนและด้านในของเหล็กเสริมบนและล่าง

4. คำนวณหาความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ทำการเจาะเสียบ (Rehab Bar) เมื่อใช้น้ำยาเจาะเสียบเหล็กเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ

5. ถอดปริมาณงานไม้แบบ เหล็กเสริมและคอนกรีตที่ใช้สำหรับการหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการทดสอบทั้ง 4 คาน

6. ทำการเทคอนกรีตและบ่มคอนกรีตให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการ แล้วจึงนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. ทำการเก็บตัวอย่างก้อนคอนกรีต เพื่อนำทดสอบกำลังคอนกรีตหลังจากบ่มคอนกรีตได้ 7 วัน และวันที่จะทำการทดสอบคาน



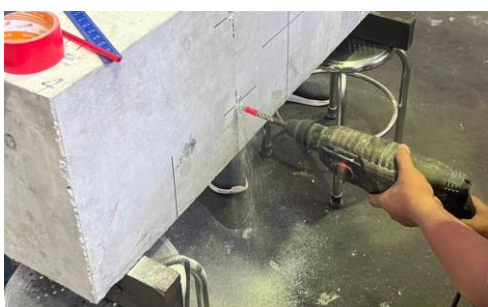
รูปที่ 1 การเก็บตัวอย่างก้อนคอนกรีต

2. นำเหล็กเสริมรับแรงเฉือน คือ เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ไปทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่า Stress-Strain และ Yielding Strength ของเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2 การทดสอบเหล็ก

3. นำคาน 2 ตัวที่จำลองความเสียหายจากสนิมมาทำการซ่อมแซมด้วยการเจาะเสียบเหล็ก (Rehab Bar) โดยทำการเจาะรูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มม. ลึก 70 มม. ซึ่งจะเจาะเสียบเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เข้าไปเป็นระยะเท่ากับ 60 มม. ส่วนอีก 10 มม. ที่เหลือใช้เป็นพื้นที่สำหรับนํายาอีพอกซี แล้วทำความสะอาดรูเจาะ



รูปที่ 3 การเจาะคาน

4. ฉีดนํายาเจาะเสียบเหล็กเข้าไปในรูเจาะแล้วจึงเสียบ Rehab Bar ที่เตรียมไว้เข้าไปทั้ง 2 ด้านของคาน



รูปที่ 4 การติดตั้ง Rehab Bar

5. รอ นํายาเจาะเสียบเหล็กแห้งประมาณ 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำคานไปเข้าเครื่องทดสอบ โดยก่อนทดสอบจะต้องติดตั้ง Strain Gauge ที่ Rehab Bar ทุกเส้นและ LVDT ให้เรียบร้อยพร้อมทั้งตรวจสอบว่า Strain Gauge และ LVDT สามารถใช้งานได้

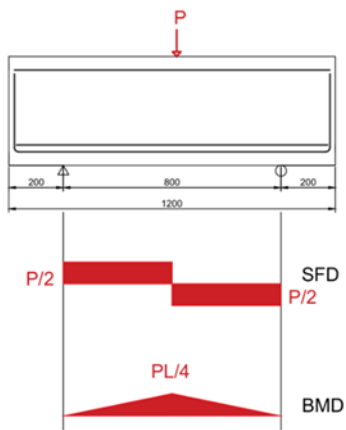
6. บันทึกผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบ Strain Gauge และ LVDT เพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 5 การทดสอบคาน

ตารางที่ 1 ข้อมูลและวิธีการทดสอบคาน

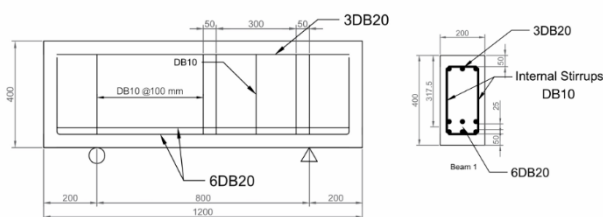
ตัวอย่าง	รูปแบบการวิบัติ	วิธีทดสอบ	ความกว้าง Rehab Bar (ซม.)	จำนวน Rehab Bar (ชิ้น)
คานควบคุม	แรงเฉือน	3 point	-	-
คาน 1	แรงเฉือน	3 point	-	-
คาน 2	แรงเฉือน	3 point	33	2
คาน 3	แรงเฉือน	3 point	21	2



รูปที่ 6 แผนภาพ SFD และ BMD

3.2 รายการคำนวณการออกแบบคาน

3.2.1 วิเคราะห์คาน



รูปที่ 7 รายละเอียดคาน

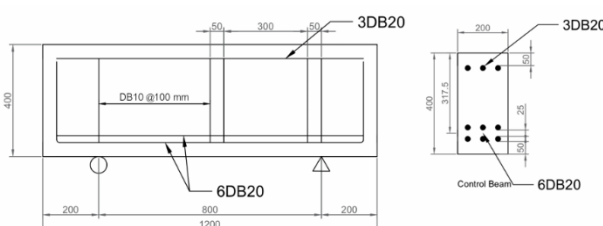
$$M_n = c_s(d - d') + c_c(d - a/2) \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) จะสามารถหาความสามารถในการรับแรงดัดของคานได้เท่ากับ 196.8 kN-m

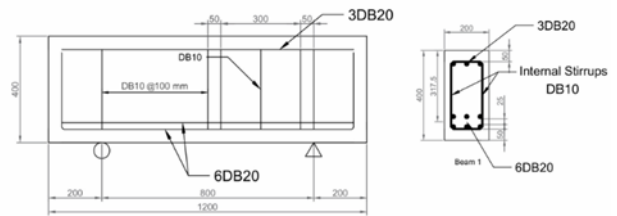
$$V_c = \left(0.16\lambda \sqrt{f'_c} + \frac{1}{M} \rho_w V_u d \right) b_w d \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) จะสามารถหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานได้เท่ากับ 214.76 แสดงว่าคานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดแบบจุดที่กึ่งกลางคานได้เท่ากับ 429.52 kN ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดัดเท่ากับ 85.9 kN-m

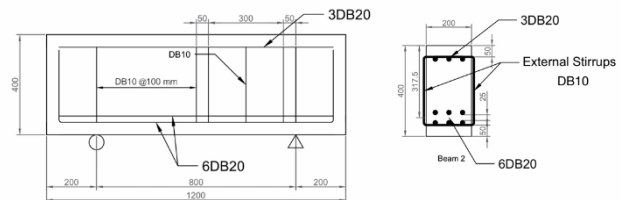
ดังนั้น คานควรจะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน



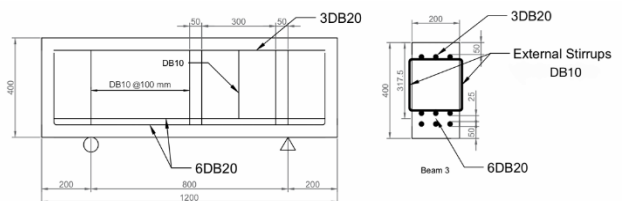
รูปที่ 8 รายละเอียดคานควบคุม



รูปที่ 9 รายละเอียดคาน 1



รูปที่ 10 รายละเอียดคาน 2



รูปที่ 11 รายละเอียดคาน 3

4 ผลการศึกษา

4.1 คุณสมบัติวัสดุ

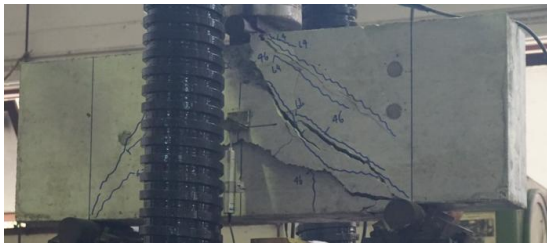
4.1.1 กำลังอัดคอนกรีต

จากรายการคำนวณการออกแบบคาน จะมีการใช้คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัดอย่างต่ำ 24.0 กก./ตร.ซม. ณ วันที่เริ่มทดสอบคาน (17 วัน หลังจากบ่มคอนกรีต) จากตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อการทดสอบหนึ่งครั้งเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยที่ได้ ณ วันที่ทดสอบเท่ากับ 305.7 กก./ตร.ซม.

4.1.2 เหล็กข้ออ้อย

จากรายการคำนวณการออกแบบคาน จะมีการใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เกรด SD40 สำหรับเป็นเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซึ่งในการทดสอบจะได้ค่ากำลังจุดครากและจุดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 5,322.1 และ 6,200.7 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

4.2 ผลการทดสอบคาน



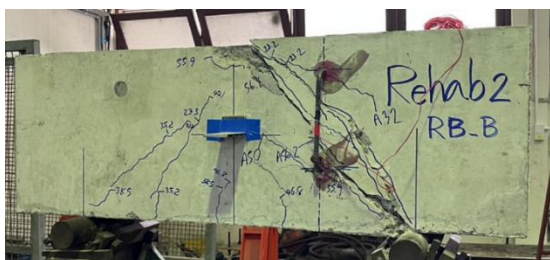
รูปที่ 12 การวิบัติของคานควบคุม



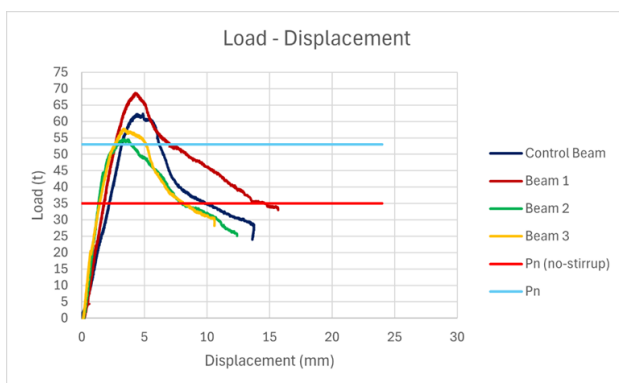
รูปที่ 13 การวิบัติของคาน 1



รูปที่ 14 การวิบัติของคาน 2



รูปที่ 15 การวิบัติของคาน 3



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (t) กับ Deflection (mm) ของคานทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ตัน)	การแอ่นตัวเฉลี่ยสูงสุด (มม.)	รูปแบบการวิบัติ
คานควบคุม	65.35	4.84	แรงเฉือน
คาน 1	68.68	3.83	แรงเฉือน
คาน 2	54.52	3.72	แรงเฉือน
คาน 3	57.76	3.29	แรงเฉือน

จากรูปที่ 16 และตารางที่ 2 พบว่าคานควบคุมและคาน 1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้ทั้งหมดเท่ากับ 65.35 ตัน และ 68.68 ตัน ตามลำดับ ก่อนเกิดการวิบัติแสดงว่าจากการที่คาน 1 มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเป็นครึ่งหนึ่งของคานควบคุม จะทำให้คาน 1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5% แต่จากรายการคำนวณคานควบคุมและคาน 1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เท่ากับ 35.33 และ 53.02 ตัน ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกครึ่งหนึ่งแล้วจะทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 50% แสดงว่ารูปแบบการวิบัติของคานอาจจะไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในตอนเริ่มต้นเนื่องจากตัวอย่างคานทั้ง 4 ตัวอย่าง ที่ได้ออกแบบไว้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ แต่จากผลการทดลองและการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมพบว่าคานทั้ง 4 ตัวอย่าง เป็นคานเหล็กซึ่งจะมีการกระจายตัวของความเครียดไม่แปรผันเป็นเส้นตรงเหมือนคานปกติ จึงส่งผลให้การที่ลดระยะเหล็กปลอกครึ่งหนึ่งนั้นไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานได้ และพบว่าคาน 2 และคาน 3 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งหมดเท่ากับ 54.52 ตัน และ 57.76 ตัน ตามลำดับ ก่อนเกิดการวิบัติแสดงว่าตำแหน่งการเสริมเหล็กปลอกภายนอกเพื่อซ่อมแซมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุก แต่จากผลการทดลองและการศึกษาของคานควบคุมและคาน 1 พบว่าคานทั้ง 4 ตัวอย่าง เป็นคานเหล็กทำให้เหล็กปลอกภายนอกสำหรับรับแรงเฉือนมีพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ไม่เหมือนคานปกติ และจากการที่คานควบคุมและคาน 1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งหมดเท่ากับ 65.35 ตัน และ 68.68 ตัน ตามลำดับ แสดงว่าการเสริมเหล็กปลอกภายนอกเพื่อซ่อมแซมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานลดลง เนื่องจากการเสริมเหล็กปลอกภายนอกนั้นไม่สามารถโอเวอร์คอนกรีตได้ เหมือนกับการเสริมเหล็กปลอกภายในทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานลดลง ซึ่งเมื่อเทียบกับคานควบคุม คาน 2 และคาน 3 ที่มีการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนภายนอกจะทำให้คานรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานลดลงเท่ากับ 17% และ 12% ตามลำดับ และพบว่าคานที่มีเหล็กปลอกสำหรับรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น (ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกลดลง) ทำให้คานมีค่าการแอ่นตัวลดลง นั่นคือคานมีค่าความเหนียว (Ductility) ลดลง เนื่องจากคานเป็นคานเหล็กทำให้คานมีโอกาสที่จะวิบัติด้วยรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแนวทแยงเนื่องจากแรงอัดในแนวทแยงที่มีค่ามากกว่าความต้านทานแรงอัดในแนวทแยงของคอนกรีตก่อนการที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดครากและจุดวิบัติ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยสูงสุดของคาน

2 และคาน 3 มีค่าน้อยกว่าคานควบคุม และคาน 1 เนื่องจากคาน 2 และคาน 3 มีการเสริมเหล็กปลอกภายนอกสำหรับรับแรงเฉือน ซึ่งเหล็กปลอกภายนอกจะไม่สามารถโอบรัดคอนกรีตได้ ส่งผลให้คาน 2 และคาน 3 มีค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยน้อยกว่าคานควบคุมและคาน 1

5 สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังชิ้นส่วนโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นทั้งทางด้านศักยภาพในการรับแรงและด้านระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซม จากการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากรายการคำนวณที่อ้างอิงจาก ACI318M-08 และจากผลการทำการทดลอง พบว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงเนื่องข้อผิดพลาดในขั้นตอนการออกแบบขนาดคานเนื่องจากการทดลองนี้ได้จัดทำขึ้นตามสมมติฐานในเรื่องการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ แต่พบว่าคานตัวอย่างทั้ง 4 คานที่ได้ออกแบบมานั้นเป็นคานลิกซึ่งมีพฤติกรรมการรับแรงดัดแรงเฉือน และแรงอัดที่แตกต่างจากคานทั่วไป ทำให้คานทั้ง 4 คานนั้นไม่เกิดกรวิบัติที่เป็นไปตามสมมติฐาน ซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองของคานควบคุมและคาน 1 ที่พบว่าการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (Spacing) ลงครึ่งหนึ่งนั้นไม่ได้ส่งผลทำให้คานนั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการคำนวณตาม ACI318M-08 จะทำให้คาน 1 สามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นมากถึง 50% แต่จากการทดลองพบว่าสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นเพียง 5% เท่านั้น นั้นแสดงว่าการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกไม่ได้ช่วยทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นมากนัก ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าคอนกรีตจะเป็นส่วนหลักในการรับแรงเฉือนของคานลิก และจากการที่คาน 2 และคาน 3 มีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังโครงสร้างคานด้วยวิธีการเจาะเสียบเหล็กปลอกภายนอกเพื่อเสริมกำลังการรับแรงเฉือนให้กับคานนั้นพบว่าเมื่อเทียบกับคาน 1 ที่มีการเสริมเหล็กปลอกภายใน การเสริมเหล็กปลอกภายนอกจะทำให้คานมีน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลง เพราะว่าเหล็กปลอกภายนอกจะไม่สามารถโอบรัดคอนกรีตได้เหมือนกับเหล็กปลอกภายในซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตอย่างแน่นอน และด้วยที่ว่าคานลิกนั้นคอนกรีตจะเป็นส่วนหลักในการรับแรงเฉือน ทำให้เมื่อคอนกรีตไม่ถูกโอบรัดแล้วจะส่งผลให้คานมีน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัย จะพบปัญหาและวิธีการพัฒนางานวิจัย ดังนี้

1. ในการเตรียมคานทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อนของการทำงานได้จากการที่ค่าระยะต่าง ๆ ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ เช่น ระยะหุ้มคอนกรีต ระยะงอและดัดเหล็ก เป็นต้น ซึ่งถ้าสามารถควบคุมให้การทำงานเป็นไปตามแบบแผนทุกอย่างจะทำให้ผลทดสอบที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. เนื่องจากคานที่ได้ออกแบบไปนั้นเป็นคานลิก และการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงอัด และแรงเฉือนของคานลิกนั้นจะแตกต่างจากคานปกติ เนื่องจากการกระจายตัวของความเครียด

ในคานลิกจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรงเหมือนคานทั่วไป ทำให้พฤติกรรมการรับแรงของคานไม่ตรงกับสมมติฐาน ซึ่งถ้าคานทดสอบไม่ได้เป็นคานลิกจะทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดสอบและการวิเคราะห์คำนวณได้มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากกว่านี้

3. การศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดได้อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น การเพิ่มความยาวคานเพื่อทำให้คานลิกเปลี่ยนเป็นคานปกติ หรือการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกให้น้อยลง (เพิ่มจำนวนเหล็กรับแรงเฉือน) และทำให้วัสดุเสริมกำลังสามารถโอบรัดคอนกรีตได้ เพื่อศึกษาว่าวิธีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยวิธีการเจาะเสียบเหล็กปลอกภายนอกในโครงสร้างคานจะทำให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นหรือไม่เมื่อเทียบกับการศึกษาในครั้งนี้ เป็นต้น หรือจะเป็นการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังว่าจะมีความแตกต่างจากการใช้เหล็กในการเสริมกำลังอย่างไร จากที่ได้กล่าวไปยังต้น ดังนั้นการศึกษานี้มีความคุ้มค่าที่จะนำไปต่อยอดเพื่อใช้ในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมโยธาต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการศึกษาการเสริมเหล็กปลอกภายนอกสำหรับรับแรงเฉือนนี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.วัฒน์ชัย สมิทธาการ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางจนโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ซึ่งต้องขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำโครงการนี้ ซึ่งอาจไม่ได้กล่าวถึงและไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ณ ที่นี้ ต้องขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI Committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-08). American Concrete Institute, Mich: Farmington Hills.
- [2] ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19). American Concrete Institute. doi: 10.14359/51716937
- [3] Abdullah Sikar Al-Issawi. (2018). Shear strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams using Near Surface Mounted Steel Rebars. University of Babylon. doi: 10.13140/RG.2.2.10126.28484
- [4] Yousif Lafta. (2016). Specification of Deep Beams Affect the Shear Strength Capacity. Civil and Environmental Research, 8(2), 56-68.
- [5] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). คู่มือการซ่อมแซมโครงสร้างอาคาร. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] เฉลิมเกียรติ วงศ์นิขทวี. (2563, 16 สิงหาคม). คอนกรีตที่มีการโอบรัด (Confined Concrete) [Status update]. Facebook.

<https://web.facebook.com/chalermkiat.wongvanichtawe>

- [8] ปราชญ์ อมรภิญโญ และจารึก ถิระวงษ์. (2560). พฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็ก : การทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. วารสารวิศวกรรมสาร มก., 30(102), 73-82.
- [9] มงคล จิรวีระเดช. (2561, 14 ตุลาคม). เทคนิคการออกแบบคานลึกลับ [รูปภาพ]. Facebook.
<https://web.facebook.com/TumCivil>
- [10] มงคล จิรวีระเดช. (2560, 19 กรกฎาคม). ตัวอย่างการออกแบบคานลึกลับช่วงเดียวด้วยวิธี Strut-and-Tie [รูปภาพ]. Facebook.
<https://web.facebook.com/TumCivil>
- [11] สนิทนาฏ แก้วประสิทธิ์, สายันต์ ศิริมนตรี, และชนะชัย ทองโถม. (2567). พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตย์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 20(1), 157-170.
- [12] สมศักดิ์ คำปลิว. (2560, 12 เมษายน). การออกแบบคานลึกลับ [รูปภาพ]. Facebook.
<https://web.facebook.com/TumCivil>