



การทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์

สุพิชญา อารีย์มิตร* สายันต์ ศิริมนตรี ศุภรหทัย โพนินามทอง และ ชนะชัย ทองโหม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: supitcharya.areem@dome.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 พฤษภาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 18 กันยายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 25 ตุลาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอการทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาเทียบกับผลจากงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีต อีกทั้งแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมและกำลังของคาน โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กำลังอัดคองกรีต กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และจำนวนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งพบว่า กำลังอัดคองกรีตมีผลค่อนข้างน้อยต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานที่สภาวะประลัย กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยอย่างมีนัยสำคัญ และจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คานคองกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพแล้วถูกซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัวและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีการแอ่นตัวลดลงและกำลังรับน้ำหนักที่สภาวะประลัยสูงขึ้น

คำสำคัญ: วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์; คานคองกรีตเสริมเหล็ก; การเสื่อมสภาพ; การเสริมกำลัง; แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Prediction of Flexural Behavior of Degraded Beam Repaired and Strengthened by CFRP Sheets Using Finite Element Method

Supitcharya Areemit^{*}, Sayan Sirimontree, Sutthahathai Potinamtong and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Rangsit Campus

^{*} Corresponding author, E-mail: supitcharya.areem@dome.tu.ac.th

Received: 25 May 2023; Revised: 18 September 2023; Accepted: 25 October 2023

Online Published: 25 December 2023

Abstract: The paper presents the prediction of the flexural behavior of deteriorated concrete beams reinforced with carbon fiber sheets by a finite element model. The program ANSYS was chosen for the analysis. The results from the finite element model in terms of the load-deflection relationship are compared to results tested by the previous researcher, it was found that analytical results consistent with test results. Therefore, the model can effectively predict the flexural behavior of deteriorated reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheets. The developed finite element model was used to analyze the effect of other variables on the beam flexural behavior, namely the compressive strength of concrete, tensile strength of reinforcing steel, and number of carbon fiber sheets. The results show that the effect of concrete compressive was not significant for maximum carrying load capacity for beams in all cases. The tensile strength of steel has a significant effect on the load-carrying capacity. As the number of CFRP layers has been increased, the deflection of the degraded reinforced concrete beam repaired and strengthened with CFRP sheet decreased and load load-carrying capacity of the beam significantly increased.

Keywords: Finite Element Method; Reinforced Concrete Beam; Degraded; Strengthen; Carbon Fiber Plate



1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ [1] เมื่อถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจทำให้โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ [2] การบรรทุกน้ำหนักเกินค่าที่ออกแบบ หรือสภาพอากาศที่รุนแรง ปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างและความปลอดภัยต่อการใช้งานหรืออาจเกิดการวิบัติของโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องได้รับการตรวจสอบ ซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังเพื่อให้โครงสร้างสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทั้งสภาวะใช้งานและสภาวะประลัย การเสริมกำลังโครงสร้างมีหลากหลายวิธี [3] การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นหนึ่งในวิธีการเสริมกำลังภายนอกที่สะดวกในการติดตั้งและมีประสิทธิภาพ [4]

การศึกษาพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยทั่วไปจะทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ เป็นวิธีการที่ทำให้เห็นถึงพฤติกรรมจริงทางกายภาพของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่การทดสอบมีข้อจำกัดทั้งในด้านแรงงานทรัพยากรและมีค่าใช้จ่ายสูง

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [5] ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดรูปร่างและรูปแบบน้ำหนักบรรทุกได้หลากหลาย อีกทั้งในปัจจุบันขีดความสามารถของ

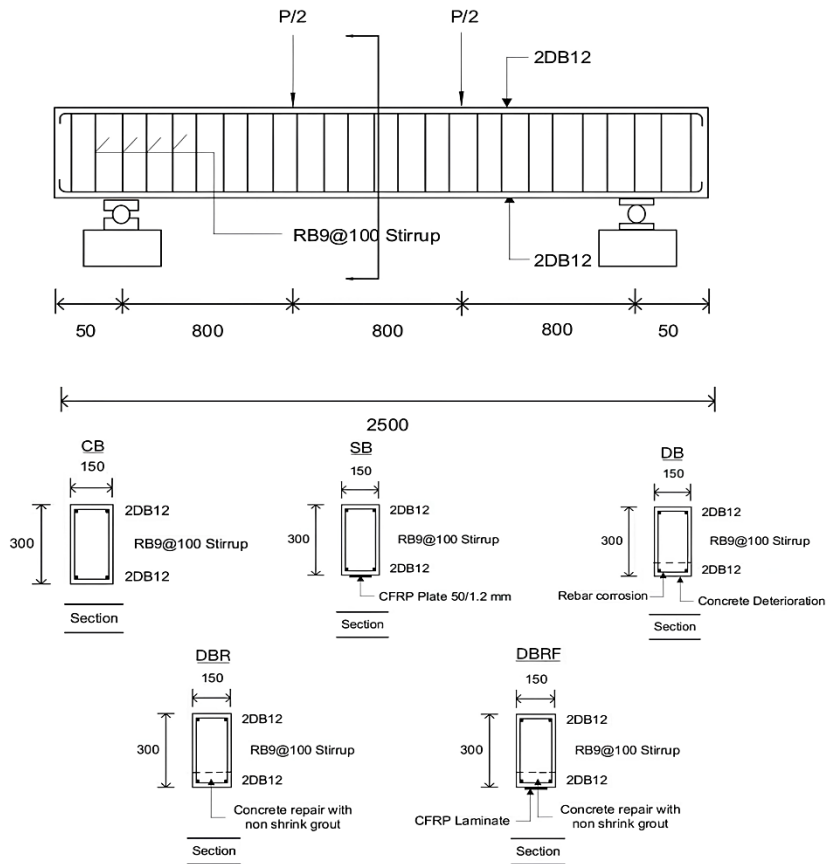
โปรแกรมและคอมพิวเตอร์เองก็ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ง่ายและสะดวกในการศึกษา ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อนำมาเทียบเคียงกับผลการทดสอบจะทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ สามารถวิเคราะห์ผลเนื่องจากตัวแปรอื่นที่หลากหลายได้ [6]

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาและประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตที่เสริมสภาพได้รับการซ่อมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Nonshrink-mortar) และเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยนำผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการจริง [7, 8] จากนั้นจะศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการตัดของคาน

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบเพื่อการอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ P.Panichsakulchai et. al. [7] และ I. Sanan et. al. [8] ซึ่งได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดความยาว 2,500 มิลลิเมตร ความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความลึก 300 มิลลิเมตร ใช้เหล็ก 2-DB12 ทั้งด้านบนและด้านล่างตลอดความยาวคาน 2,450 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กปลอกใช้เหล็กขนาด RB9 ระยะเรียง 100 มิลลิเมตร และมีระยะหุ้ม



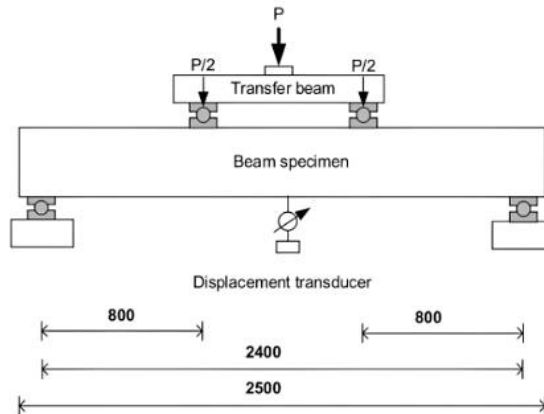
รูปที่ 1 ขนาดและหน้าตัดคานตัวอย่าง

เหล็กเสริม 25 มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือน และมีการจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณใต้ท้องคาน โดยการเว้นช่องว่างไม่ให้มีคอนกรีตหุ้ม มีความยาว 1,800 มิลลิเมตร ความลึก 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 เหล็กเสริมจึงไม่อยู่ในสภาพยึดเหนี่ยว (Bond) กับคอนกรีต จากนั้นจะทำการซ่อมแซมด้วยการฉาบปิดด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink Mortar) และมีการเสริมกำลังรับโมเมนต์ดัดด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

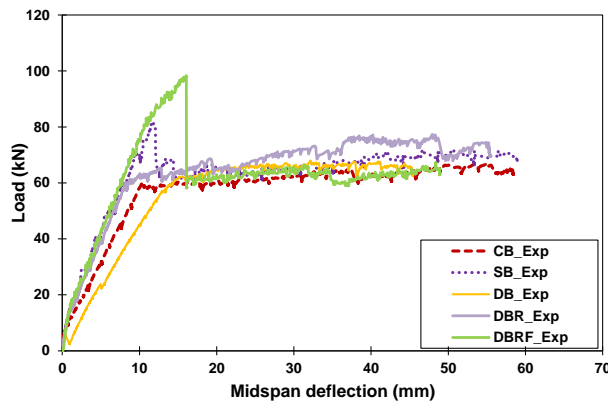
[9] บริเวณท้องคาน ซึ่งในการทดสอบประกอบไปด้วยคานทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก กำหนดให้เป็นคานควบคุม (CB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ (DB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพแล้วซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว [10] (DBR) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว และมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณท้องคาน (DBRF)

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร การทดสอบคานตัวอย่างนั้น จะทำการกดน้ำหนักบรรทุก 2 จุดลงบนคานตัวอย่าง มีช่วงความยาวของการทดสอบ (L) 2,400 มิลลิเมตร โดยระหว่างจุดกดน้ำหนักบรรทุกถึงจุดรองรับเท่ากับ 800 มิลลิเมตร (L/3) ดังแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบให้ น้ำหนักกระทำแก่คานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 5 กรณีจนเกิดการวิบัติแล้วถอนน้ำหนักบรรทุกออก [7] (Monotonic Loading) ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีการ ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่เหล็ก

เสริมด้านบนและล่างบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดคานและ เหล็กเสริมด้านล่างที่หน้าตัดคานที่ได้รับแรงกดกระทำ ทั้งสองข้าง มีการติดตั้ง Displacement Transducer เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน จากความสัมพันธ์ ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว [7] ดังรูปที่ 3 จะ เห็นว่า คานที่เสื่อมสภาพ (DB) จะมีความแข็งเชิงดัด (Flexural Stiffness) ที่พิจารณาจากความชันของเส้น ความสัมพันธ์ในช่วงอีลาสติก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (CB) ทั้งนี้เป็นผลจากคอนกรีต และเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่ยึดเหนี่ยวกัน (Unbond)



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือวัดกับคานทดสอบ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานทดสอบ [7]



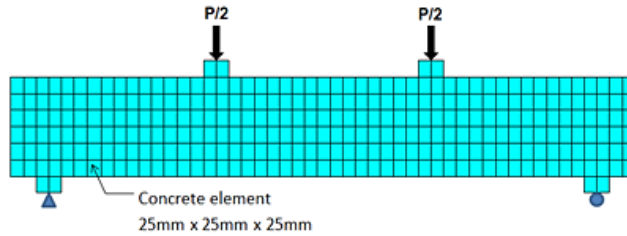
ในช่วงคานที่คอนกรีตเสื่อมสภาพ ส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยค่อนข้างไม่แตกต่างกันเนื่องจากที่ปลายคานที่เสื่อมสภาพยังคงมีสภาพยึดเหนี่ยวที่ปลายคานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (End Anchorage) เมื่อคานคอนกรีตที่เสื่อมสภาพได้รับการซ่อมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (DBR) จะส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงดัดของคานและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับคานอ้างอิง โดยมีค่าค่อนข้างมากกว่าคานอ้างอิง เนื่องด้วยผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์ไม่หดตัวสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจึงทำให้ความต้านทานการเสียรูปของวัสดุ (Stiffness) สูงกว่า แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อคานเสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) จะเห็นว่าทั้งความแข็งแรงเชิงดัดและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะประลัยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (Debonding of CFRP)

2.2 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ ได้ใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 [11] ซึ่งเอลิเมนต์และคุณสมบัติวัสดุสำหรับใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีการอธิบายไว้ในการศึกษาที่ผ่านมา [12-14] ในการจำลองจะใช้คุณสมบัติวัสดุอ้างอิงจากการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ ได้รับการซ่อมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในห้องปฏิบัติการของ P.Panichsakulchai et. al. [7] และ I.Sanan et. al.

[8] โดยใช้สมบัติทางกลของคอนกรีต ซีเมนต์ไม่หดตัว เหล็กเสริมและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตั้งตารางที่ 1 และใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 65 กับคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะ 3 มิติ เป็นทรงกล่อง มี 8 จุดต่อ (Node) และแต่ละจุดต่อนั้นมี 3 ตัวแปรอิสระ (Degree of Freedom) อีกทั้งใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 185 กับฐานรองรับและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับ Solid 65 ยกเว้นลักษณะการบดอัด (Crushing) และใช้เอลิเมนต์ชนิด Link 180 กับเหล็กเสริม ซึ่งมีความสามารถในการรับความเค้นดึงและความเค้นอัด [11] และใช้เอลิเมนต์ชนิด COMBIN14 ในการยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างเหล็กเสริมรับแรงดึงและคอนกรีตในแบบจำลอง โดยมีค่ากำลังอัดคอนกรีต เท่ากับ 24 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กปลอกเท่ากับ 240 MPa และค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 420 MPa

จากความสมมาตรของเงื่อนไขขอบเขตในการกำหนดค่าการยึดรั้งของ Node [15-16] โดยใช้ความสมมาตรของระนาบตามความยาวคาน คือ ระนาบ XY และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับทั้งสองของคาน โดยกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับด้านซ้ายเป็นแบบ Hinge Support คือจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง แนวราบและแนวด้านข้างของคาน ส่วนเงื่อนไขขอบเขตที่ฐานรองรับด้านขวาเป็นแบบ Roller Support คือมีการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของคานแต่จะไม่มีการเคลื่อนตัวตามแนวตั้งและแนวด้านข้างของคาน ส่วนจุดที่ให้น้ำหนักบรรทุกก็จะใช้เงื่อนไขขอบเขตเหมือนกัน โดยจะให้น้ำหนักบรรทุกกระจายลงบน Node ในทิศทางแกน Y ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองคานทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของคอนกรีตซีเมนต์ไม่หดรัดตัว เหล็กเสริมและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

| วัสดุ | โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa) | อัตราส่วนปัวซอง |
|--------------------|-----------------------|-----------------|
| คอนกรีต | 23.1 | 0.3 |
| ซีเมนต์ไม่หดรัดตัว | 40.3 | 0.3 |
| เหล็กเสริม | 200 | 0.3 |
| แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ | 170 | 0.2 |

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวจากผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานตัวอย่างทั้งหมดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจะแสดงได้ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 (ก) ถึง 5 (จ) จะเห็นว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบจริง [7, 8] โดยผลการวิเคราะห์คาน CB DB และ DBR ซึ่งเป็นคานที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP พบว่าความแข็งแรงตัดในช่วงอิลาสติกมีแนวโน้มมากกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย น้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากของเหล็กเสริมมากกว่าน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากของคานทดสอบเท่ากับร้อยละ 0.2 สำหรับคานควบคุม (CB) และน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

เท่ากับร้อยละ 6.7 และร้อยละ 6.8 สำหรับคานที่เสื่อมสภาพ (DB) และคานที่เสื่อมสภาพแล้วได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดรัดตัว (DBR) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัย แบบจำลองให้ผลใกล้เคียงกับผลทดสอบโดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองน้อยกว่าผลทดสอบร้อยละ 9.4, 5.1 และ 21.4 สำหรับ CB DB และ DBR ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของคานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นจะพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในช่วงเริ่มต้นจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดขณะเกิดการปริและหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมและพฤติกรรมการวิบัติโดยการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคานทดสอบที่มักจะหลุดออกก่อนถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะประลัยที่ได้จากการวิเคราะห์ [17-19] โดยสมมุติให้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้ยึดติดไปกับคอนกรีต (Perfect Bond) จนถึงน้ำหนักสูงสุด เมื่อเกิดการวิบัติคอนกรีตเกิดการอัดจนแตก ทำให้มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการวิเคราะห์สูงกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ งานวิจัยนี้จะพิจารณาการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยการตรวจสอบ



ตารางที่ 2 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองและการทดสอบ

| ชื่อคาน | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN) | | การแอ่นตัว ณ จุดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (mm) | | การแอ่นตัวสูงสุด (mm) | | ความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ร้อยละ) |
|---------|--------------------------|-------------|--|-------------|-----------------------|-------------|--|
| | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | จากการทดสอบ | จากแบบจำลอง | |
| | CB | 67.2 | 60.9 | 55.7 | 20.0 | 58.4 | |
| SB | 81.3 | 89.8 | 12.2 | 12.5 | 12.2 | 12.5 | 10.5 |
| DB | 68.0 | 64.5 | 32.2 | 15.9 | 48.3 | 39.7 | 5.1 |
| DBR | 77.3 | 60.7 | 47.9 | 23.1 | 69.8 | 62.8 | 21.4 |
| DBRF | 98.3 | 88.7 | 15.9 | 12.6 | 15.9 | 12.6 | 9.8 |

ความเครียดใน CFRP โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะหมายถึงน้ำหนักที่ทำให้ความเครียดในแผ่น CFRP เท่ากับความเครียดที่ทำให้เกิดการหลุดร่อนของ CFRP ซึ่งมาตรฐาน ACI 440.2R-17 [20] กำหนดสมการสำหรับคำนวณค่าความเครียดขณะเกิดการสูญเสียการยึดเหนี่ยวของ CFRP (Debonding Strain) ดังสมการที่ 1

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (1)$$

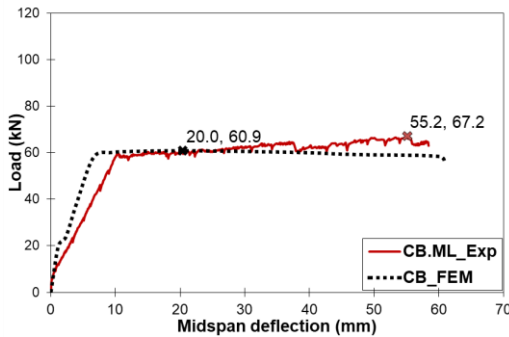
เมื่อ ϵ_{fd} คือ Debonding Strain ของ CFRP, f_c' คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน, n คือ จำนวนชั้นของคาร์บอนไฟเบอร์, E_f คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคาร์บอนไฟเบอร์ และ t_f คือ ความหนาของคาร์บอนไฟเบอร์

โดยจากการคำนวณตามสมการที่ (1) พบว่าความเครียดใน CFRP สูงสุดขณะเกิดการหลุดร่อน

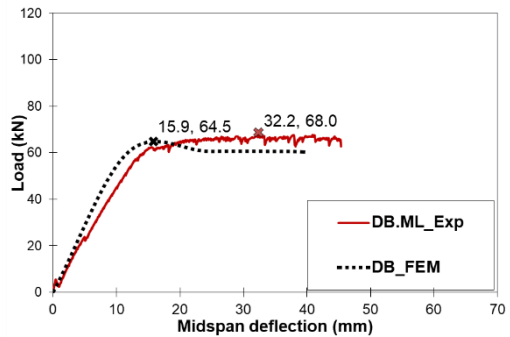
เท่ากับ 0.0045 ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมาทำนายผลการทดสอบจากแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) และ 5 (จ) จะได้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เกิดการหลุดร่อนของคาร์บอนไฟเบอร์ของคานที่เสริมกำลัง (SB) เท่ากับ 89.8 kN จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 81.3 kN โดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกของที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับร้อยละ 10.5 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมแล้วเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) จะมีค่าน้ำหนักบรรทุก สูงสุดขณะเกิดการหลุดร่อนของ FRP ที่ได้จากแบบจำลองเท่ากับ 88.7 kN และจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 98.3 kN โดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกจากแบบจำลองต่ำกว่าน้ำหนักบรรทุกของที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับร้อยละ 9.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



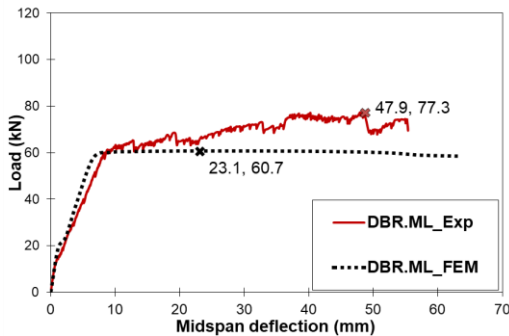
บทความวิจัย



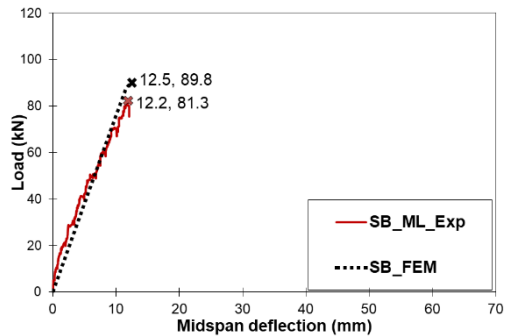
(ก) คานควบคุม (CB)



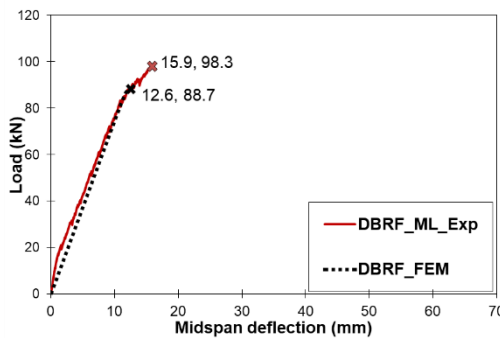
(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซม (DBR)



(ง) คานเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB)



(จ) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจากผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เปรียบเทียบกับการทดสอบ

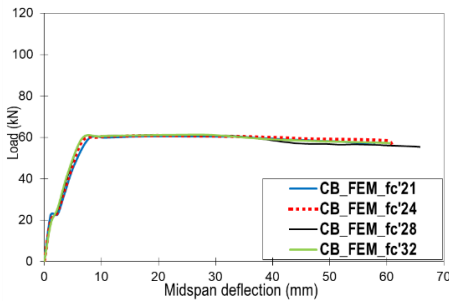


3.2 ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการดัดของคาน จากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

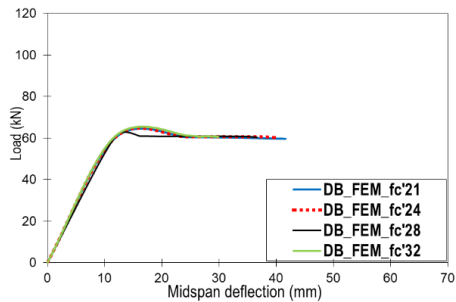
3.2.1 กำลังอัดคอนกรีต

ผลกระทบจากการแปรเปลี่ยนกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลอง แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

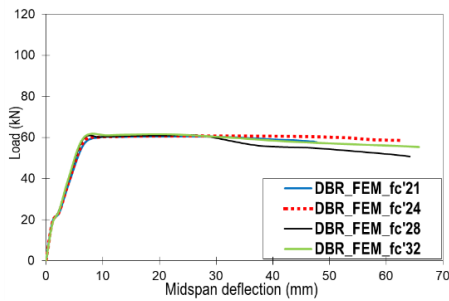
ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ดังรูปที่ 6 (ก) ถึง 6 (จ) กำลังอัดคอนกรีตที่แปรเปลี่ยนเท่ากับ 21 MPa, 24 MPa, 28 MPa และ 32 MPa จะเห็นได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีผลน้อยมากต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานรับได้



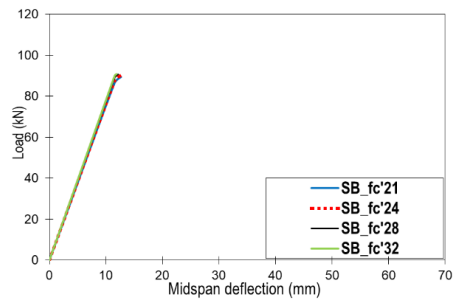
(ก) คานควมคุม (CB)



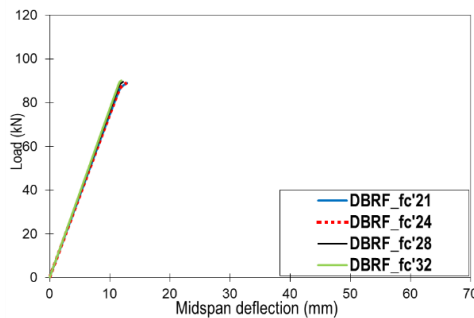
(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซม (DBR)



(ง) คานเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (SB)



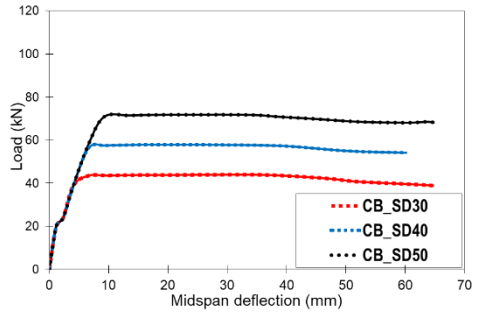
(จ) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานจากการแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

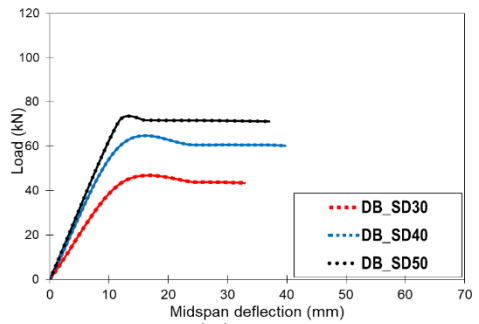


3.2.2 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

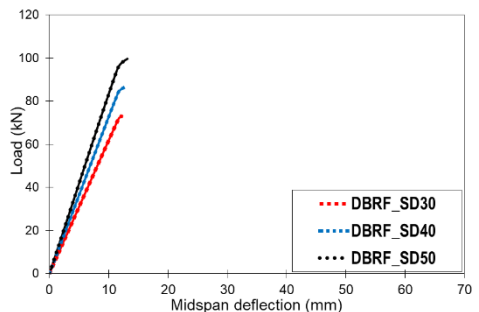
ผลกระทบของกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ได้จากแบบจำลองเมื่อแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมที่ 300 MPa (SD30), 400 MPa (SD40) และ 500 MPa (SD50) ซึ่งเป็นมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตสำหรับเหล็กข้ออ้อย (มอก 24-2559) [21] โดยจากรูปที่ 7 (ก) ถึง 7 (ค) และตารางที่ 3 พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (CB) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพ (DB) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมอย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คาน CB และ DB รับได้จะเท่ากันเมื่อใช้เหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงเท่ากัน แต่การแอนตัวสูงสุดแตกต่างกันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีตของคาน DB ทำให้เหล็กเสริมกับคอนกรีตอยู่ในสภาพไม่ยึดเหนี่ยวกัน (Unbond) ความแข็งแรงดัดจึงลดลง ทำให้การแอนตัวของคานในช่วงฮิสตริกมากขึ้นและการแอนตัวสูงสุดที่สภาวะประลัยลดลงเมื่อเทียบกับคานควบคุม และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink mortar) หลังจากการเสื่อมสภาพและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF) สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงดึงที่จุดครากที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การแอนตัวในช่วงฮิสตริกลดลงเนื่องจากความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น



(ก) คานควบคุม (CB)



(ข) คานที่เสื่อมสภาพ (DB)



(ค) คานที่เสื่อมสภาพและได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (DBRF)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอนตัวที่กึ่งกลางคานจากการแปรเปลี่ยนกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

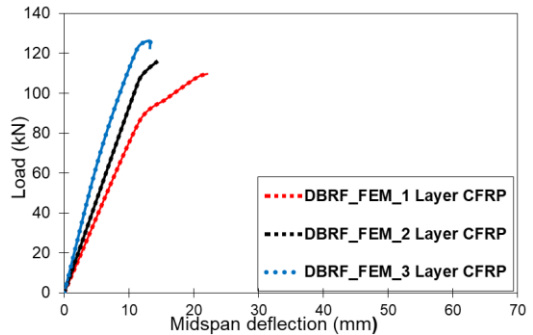


ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลกระทบจากกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมต่อน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวสูงสุด

| ชื่อคาน | กำลังรับแรงดึง (MPa) | น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN) | การแอ่นตัวสูงสุด (mm) |
|---------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| CB | 300 | 43.8 | 64.7 |
| | 400 | 57.8 | 60.2 |
| | 500 | 71.8 | 64.8 |
| DB | 300 | 43.8 | 32.8 |
| | 400 | 57.8 | 43.8 |
| | 500 | 71.7 | 36.9 |
| DBRF | 300 | 73.2 | 12.3 |
| | 400 | 86.2 | 12.5 |
| | 500 | 99.6 | 13.1 |

3.2.3 จำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

การศึกษาผลกระทบจากจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีต่อพฤติกรรมการดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพได้รับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink Mortar) และมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณท้องคานจะกำหนดให้กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมเท่ากับ 420 MPa ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ความยาว 1,800 มิลลิเมตร ในการสร้างแบบจำลอง จำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แบ่งเป็น 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานที่ได้จากการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเมื่อคาร์บอนไฟเบอร์เกิดการหลุดร่อนเท่ากับ 109.7 kN, 115.6 kN และ 126.3 kN การแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 22.0 mm, 14.2 mm และ 13.1 mm เมื่อจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเมื่อแปรเปลี่ยนจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

จะเห็นได้ว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 5.3 และร้อยละ 15.1 เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 2 และ 3 ชั้นเทียบกับจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น ส่วนการแอ่นตัวสูงสุดจะเห็นว่าการลดลงร้อยละ 55.4 และร้อยละ 67.9 เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 2 และ 3 ชั้นเทียบกับจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 1 ชั้น แสดงให้เห็นว่ากำลังรับน้ำหนักเมื่อเกิดการหลุดร่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่มขึ้นแต่การแอ่นตัวสูงสุดจะลดลงแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่ลดลง

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพที่ได้รับการซ่อมแซมและเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว และ กำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานซึ่งแสดงได้โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สภาวะ



ประลัย ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีตเป็นอย่างดีมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปศึกษาผลกระทบจากตัวแปรอื่น

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบโดยใช้แบบจำลองที่ได้รับการเทียบเคียงกับผลทดสอบของงานวิจัยในอดีตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อการรับน้ำหนักสูงสุดของคาน การเพิ่มกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้เสริมกำลังมีผลต่อการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน โดยน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ร้อยละ 15.1 เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 3 แผ่น เมื่อเทียบกับการเสริม 1 แผ่น การแ่นตัวสูงสุดลดลงเมื่อจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพิ่มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Joyklad and S. Suparp, Reinforced Concrete: Origin to Siam, Thailand Engineering Journal, 2014, 67(1), 17-24. (in Thai)
- [2] CPAC Concrete Academy, Concrete technology: Damage of concrete, The Concrete Product and Aggregate, Bangkok, Thailand, 2000, 143-151. (in Thai)
- [3] Department of Public Works and Town & Country Planning, Guide to building structural repair, Thammasat Printing house, Pathumthani, Thailand, 2019. (in Thai)
- [4] T. Khongsakditrakul, External reinforcement of reinforced concrete structures with fiber-reinforced materials, Civil Engineering Magazine, 2003, 14-18. (in Thai)
- [5] R.D. Cook, D.S. Malkus and M.E. Plesha, Concepts and application of finite element analysis, 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc., WI, USA, 1988.
- [6] A. Phuhudsuan, Reinforced concrete structures of finite element analysis, Thesis, Burapha University, Thailand, 2012. (in Thai)
- [7] P. Panichsakulchai and T. Nujareon, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP strip plates, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2020.
- [8] I. Sanan and K. Prakobsup, Behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer under repeated loading, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2021. (in Thai)
- [9] Laminat, TDS.EU-EN.V2, S&P Clever Reinforcement Company AG, Seewen, Switzerland, 2020.
- [10] SIKA, SikaGrout-212 GP, Product Data Sheet, Version 03.01, Sika (Thailand) Ltd., Chonburi, Thailand, 2020.
- [11] Ansys, Finite element computer software for nonlinear structural analysis, Version 15.0., Ansys Inc., PA, USA, 2013.



- [12] L.V.H. Bui, C. Thongchom, S. Sirimonree, P.T. Nguyen, T.-T. Nguyen, S. Keawsawasvong, P. Nuaklong and P. Jongvivatsakul, Experimental, numerical, and analytical study of concrete beams reinforced with steel stirrups and embedded with functional plates, *Structures*, 2022, 39, 293-309.
- [13] K. Chueachom, Application of finite element method in analysis of flexural behavior of full scale prestressed concrete girder strengthened by external post-tension, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2014. (in Thai)
- [14] Ansys. Finite element computer software for nonlinear structural analysis, version 18.2, Ansys Inc., PA, USA, 2017.
- [15] A. Cheng, and D.T. Cheng, Heritage and early history of the boundary element method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2005, 29(3), 268-302.
- [16] H.H. West, Fundamental of structural analysis, John Wiley & Sons Inc., NY, USA, 1993.
- [17] A.H. Al-Saidy, A.S. Al-Harthy, K.S. Al-Jabri, M. Abdul-Halim and N.M. Al-Shidi, Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets, *Composite Structure*, 92(8), 2010, 1931-1938.
- [18] A. Lenwari, C. Thongchom and R.S. Aboutaha, Cyclic flexural performance of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer plates, *ACI Structural Journal*, 2020, 117(6), 133-146.
- [19] A. Sakbana and M. Mashreib, Finite element analysis of CFRP-reinforced concrete beams, *Revista Ingenieria de Construccion, English Version*, 2020, 35(2), 148-169.
- [20] ACI Committee 440, Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2017, pp 24.
- [21] TIS 24-2559, Reinforced Concrete: Deformed Bars, 2016. (in Thai)