

การประมาณกำลังรับแรงเฉือนทะลุของคอนกรีตเสริมวัสดุเสริมแรงด้วยวัสดุไฟเบอร์กลาสโดยวิธีการเรียนรู้ด้วยเครื่อง

ESTIMATING PUNCHING SHEAR OF FIBERGLASS CONCRETE BY MACHINE LEARNING

ธันวาคม ฐาติวารณกุล¹ ธนัท กมลศิริ² เสฏฐวุฒิ รัตนอุดม³ และ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

ในบทความฉบับนี้แสดงถึงการประมาณกำลังรับแรงเฉือนทะลุของคอนกรีตเสริมแรงด้วยวัสดุไฟเบอร์กลาสโดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องด้วยโมเดลต่างๆเพื่อตรวจสอบว่าโมเดลชนิดใดมีความเหมาะสมกับข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบนั้นนำมาจากข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทะลุจากห้องทดลอง แล้วนำแบบจำลองที่ดีที่สุดไปเปรียบเทียบกับข้อมูลกำลังการรับแรงเฉือนที่ได้จากคู่มือการออกแบบของประเทศต่าง ๆ แล้วจึงพิจารณาว่าคู่มือการออกแบบใดสามารถออกแบบได้อย่างแม่นยำ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบจริงได้โดยสามารถประเมินกำลังรับแรงเฉือนคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำและไม่ต้องการการคำนวณทุกกรณีที่เป็นไปได้

คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือนทะลุ, วิธีการถอดของกระบวนการเกาส์เซียน, ต้นไม้การตัดสินใจ, คอนกรีตเสริมแรงโดยใช้วัสดุพลาสติกไฟเบอร์

Abstract

This article indicates the estimating punching shear strength of reinforced concrete with fiberglass reinforced polymer using a machine learning modeling method with different models to determine which model is suitable for the data. The data used for testing is taken the results of the shear strength test from the laboratory. Then compare the best model with the shear strength data obtained from design manuals of different countries to determine which design manual can be accurately designed. It can be applied to real design where the predicted shear strength can be accurately estimated without the need for all possible calculations.

Keywords: Punching Shear, Machine learning, Gaussian Process Regression, Random Forest Regressor, Fiber Reinforced Polymer Concrete

1. คำนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าในเรื่องเกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนทะลุของคอนกรีตที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุไฟเบอร์กลาสนั้นยังมีไม่มากเพียงพอ จึงมักนำไปสู่การเกิดปัญหาต่าง ๆ มากมายที่เกิดจากความผิดพลาดในการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนทะลุมากไปกว่านั้นการวิบัติเนื่องจากกำลังรับแรงเฉือนทะลุนั้นเป็นการวิบัติที่ไม่มีการแจ้งเตือนให้ทราบล่วงหน้า ดังนั้นหากโครงสร้างนั้นไม่ได้รับการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนทะลุที่ปลอดภัยมากเพียงพอ จึงอาจเกิดอันตรายหรือความสูญเสียอย่างมหาศาล ในขณะที่เดียวกัน ถ้าการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนทะลุนั้นมีความปลอดภัยมากจนเกินความจำเป็น ก็จะส่งผลต่อต้นทุนของการก่อสร้างที่มีราคาที่สูงขึ้นรวมไปถึงจะเกิดการสิ้นเปลืองต่าง ๆ มากมาย ทั้งในด้านของการสิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์ วัสดุต่าง ๆ และระยะเวลาในการก่อสร้างที่มากเกินความจำเป็น

1.2 วัตถุประสงค์

ทางคณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าวจึงต้องการที่จะศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการออกแบบทางด้านกำลังรับแรงเฉือนทะลุของแต่ละประเทศ ตลอดจนปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนทะลุเพื่อที่จะสามารถออกแบบโครงสร้างให้มีกำลังรับแรงเฉือนทะลุใกล้เคียงความจริงที่สุดโดยอ้างอิงวิธีการออกแบบจากคู่มือการออกแบบของแต่ละประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถควบคุมการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนทะลุให้มีความปลอดภัยมากเพียงพอในขณะที่เดียวกันก็จะช่วยให้การออกแบบดังกล่าวไม่เกิดความสิ้นเปลืองมากจนเกินความจำเป็น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

บทความฉบับนี้ทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้โมเดลรูปแบบต่างๆกัน โดยตัวอย่างในบทความนี้ใช้คอนกรีตเสริมแรงโดยใช้วัสดุพลาสติกไฟเบอร์กลาสเป็นตัวอย่างในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนทะลุ และคู่มือการออกแบบที่ใช้ในบทความนี้ประกอบไปด้วย

ACI-440.1R-15 และ CSA S806-12 โดยข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทะเล จำนวน 189 ข้อมูล ประกอบด้วยตัวแปร 8 ตัวแปร โดยแต่ละตัวแปรมีค่าอยู่ในช่วงดังนี้ (1) ขนาดความกว้างของแผ่นพื้นด้านล่างที่ 1 อยู่ในช่วง 300 ถึง 3000 มิลลิเมตร, (2) ขนาดความกว้างของแผ่นพื้นด้านล่างที่ 2 อยู่ในช่วง 300 ถึง 4000 มิลลิเมตร, (3) ขนาดความกว้างของพื้นที่รับแรงด้านที่ 1 อยู่ในช่วง 25 ถึง 635 มิลลิเมตร, (4) ขนาดความกว้างของพื้นที่รับแรงด้านที่ 2 อยู่ในช่วง 25 ถึง 300 มิลลิเมตร, (5) ความหนาของแผ่นพื้นอยู่ในช่วง 45 ถึง 284 มิลลิเมตร, (6) กำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีตในช่วง 22 ถึง 179 เมกะปาสกาล, (7) สัดส่วนการเสริมแรงด้วย FRP อยู่ในช่วงร้อยละ 0.18 ถึง 3.26, (8) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP อยู่ในช่วง 28 ถึง 230 กิกะปาสกาล

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กำลังรับแรงเฉือนทะเล

แรงเฉือนทะเลเป็นการวิบัติประเภทหนึ่งที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นในแผ่นพื้นคอนกรีตหรือฐานรากเมื่อมีแรงกดที่เป็นพื้นที่โดยเมื่อแรงกดนั้นส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนที่มีขนาดมากเกินกว่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่จะต้านทานได้ แผ่นคอนกรีตก็จะเกิดการวิบัติ ณ บริเวณตำแหน่งที่มีการสัมผัสกับแรงโดยการวิบัติที่จะเกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะคือเกิดรูปแบบของรูเจาะรอบหัวเสาในแผ่นคอนกรีตหรือฐานราก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในรูปแบบทันทีทันใด กล่าวคือจะเป็นการวิบัติที่ไม่มีสัญญาณเตือนใด ๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความรุนแรงถึงขั้นโศกนาฏกรรมได้ โดยตัวอย่างโศกนาฏกรรมที่เกิดจากการวิบัติจากกำลังรับแรงเฉือนทะเล เช่น อุบัติเหตุที่สนามบินชาร์ล เดอ โกล เมื่อปี 2004 โดยแผ่นพื้นที่อยู่ใกล้กับเสาได้เกิดการพังทลาย และจากการสืบสวนพบว่าสาเหตุการพังทลายเกิดจากการวิบัติจากแรงเฉือนทะเล เนื่องจากแรงกดบนพื้นมีมากกว่าที่ความเค้นเฉือนของพื้นจะสามารถรองรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะเล



รูปที่ 2.2 อุบัติเหตุที่สนามบินชาร์ล เดอ โกล เมื่อปี 2004

ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างมากในการป้องกันการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนทะเล โดยการป้องกันการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนทะเลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใส่เหล็กเสริมหรือเสริมด้วยไฟเบอร์เพื่อเพิ่มกำลังในการรับแรงเฉือนทะเล ซึ่งจะช่วยในด้านการกระจายน้ำหนักของแรงและช่วยลดความเค้น โดยจะเสริมบริเวณที่โครงสร้างต้องการรับแรงเฉือนทะเลสูง เช่น บริเวณใกล้หัวเสา, การควบคุมความหนาของพื้นให้มีความหนาที่เหมาะสมเพื่อจะช่วยลดความเค้นเฉือนและช่วยเพิ่มกำลังให้โครงสร้างมีกำลังมากเพียงพอที่จะสามารถรับแรงเฉือนทะเลได้ แต่ในบางกรณีก็ไม่สามารถที่จะเพิ่มความหนาของพื้นได้ เนื่องจากจะส่งผลให้ความสูงระหว่างชั้นลดลง จึงอาจมีการพิจารณาเพิ่มหมวกเสา (Column capital) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะช่วยในด้านการกระจายน้ำหนักจากพื้นมาสู่หัวเสา ทำให้ช่วยป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนทะเล นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในเรื่องของการเพิ่มความสวยงามให้แก่อาคาร, การใช้แผ่นหัวเสา (Drop panel) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มความหนาของพื้นนั้นจะช่วยทำให้เกิดการกระจายน้ำหนักไปยังพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ช่วยป้องกันการวิบัติที่เกิดจากแรงเฉือนทะเลได้

แต่ในบางกรณีนั้น การเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะเลก็ไม่ได้เกิดจากแรงจากน้ำหนักโครงสร้างที่มากเกินไปเสมอไป ปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อกำลังการรับแรงเฉือนทะเล เช่น การก่อสร้างที่ไม่เหมาะสม, การบอกรายละเอียด (Detailing) ที่ไม่ถูกต้อง, ข้อบกพร่องของวัสดุ ดังนั้น การใช้เทคนิคทางการก่อสร้างที่เหมาะสม และการออกแบบรายละเอียดการก่อสร้างที่ถูกต้อง มีความสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะเล



รูปที่ 2.3 การเพิ่มหมวกเสา



รูปที่ 2.4 การเพิ่มแผ่นหัวเสา

2.2 คอนกรีตเสริมแรงโดยใช้วัสดุพลาสติกไฟเบอร์

คำว่า FRP นั้นย่อมาจาก Fiber Reinforced Polymer คือ พลาสติกที่ทำขึ้นโดยการเสริมกำลังด้วยวัสดุใยแก้ว ซึ่งเป็นวัสดุผสมชนิดหนึ่งที่ทำจากเส้นใย เช่น คาร์บอน แก้ว หรืออะรามิต ซึ่งฝังอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดย FRP มีคุณสมบัติเด่นทางด้าน อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง ความต้านทานการกัดกร่อนและความทนทาน ทำให้เป็นวัสดุที่เริ่มมีการศึกษาสำหรับใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งคอนกรีตเสริมกำลังด้วย FRP เริ่มมีการนำไปใช้ในการใช้งานต่าง ๆ เมื่อไม่นานมานี้ โดยจะใช้งานในโครงสร้างต่าง ๆ เช่น พื้นสะพาน ส่วนหน้าของอาคาร และการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

การใช้คอนกรีตเสริมกำลังด้วย FRP ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม เช่น ความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เส้นใยโพลิเมอร์ที่ใช้ในคอนกรีตเสริมกำลังด้วย FRP นั้นมีความแข็งแรงมาก, ความต้านทานแรงดึงสูง, ความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ซึ่งสนิมเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ, มีน้ำหนักเบากว่าซึ่งส่งผลช่วยในการลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างทำให้ช่วยลดน้ำหนักบนฐานรากได้ อย่างไรก็ตามการใช้คอนกรีตเสริมกำลังด้วย FRP ยังมีความท้าทายบางประการ เนื่องจาก ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นการใช้วัสดุเหล่านี้จึงต้องการเทคนิคการออกแบบและการก่อสร้างเฉพาะทาง, ต้นทุนวัสดุที่สูงขึ้นมากกว่าการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิมเนื่องจากต้องมีการใช้อุปกรณ์และกระบวนการที่พิเศษ, FRP มีพฤติกรรมที่ค่อนข้างเปราะ ทำให้สามารถแตกอย่างกะทันหันโดยไม่มีการเตือนโดยการยืดของชิ้นส่วนโครงสร้าง, FRP ไวต่อความร้อน จะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูง



รูปที่ 2.5 การใช้คอนกรีตเสริม FRP

2.3 คู่มือการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนทะเล

2.3.1 ACI-440.1R-15

ความสามารถในการรับแรงเฉือนทะเลสูงสุดจากคอนกรีต (V_c) สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริม FRP ซึ่งอธิบายถึงการถ่ายโอนแรงเฉือนในแผ่นพื้นคอนกรีตแบบสองทางคำนวณได้จากสมการ (1)

$$V_c = \frac{4}{5} \phi_c \sqrt{f'_c} b_o k d \quad (1)$$

โดย ϕ_c คือสัมประสิทธิ์ลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.75 แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้สัมประสิทธิ์เท่ากับ 1 เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการ

เปรียบเทียบของแต่ละ code, f'_c คือ กำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต (MPa) b_o คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤต ซึ่งจะวัดออกจากหน้าเสาเป็นระยะ $d/2$ โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิภาพ (mm)

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2)$$

ค่า k สามารถคำนวณได้จากสมการ (2) โดยที่ ρ_f คือ สัดส่วนการเสริม FRP และ n_f คือ สัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP ต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

2.3.2 CSA S806-12

ความสามารถในการรับแรงเฉือนทะเลสูงสุดจากคอนกรีต (V_c) คำนวณได้จากค่าที่น้อยที่สุดของสมการ (3), (4), (5)

$$V_c = 0.056 \lambda \phi_c (E_f \rho_f f'_c)^{1/3} b_o d \quad (3)$$

$$V_c = 0.028 \lambda \phi_c \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) (E_f \rho_f f'_c)^{1/3} b_o d \quad (4)$$

$$V_c = 0.147 \lambda \phi_c \left(0.19 + \frac{\alpha_s d}{b_o}\right) (E_f \rho_f f'_c)^{1/3} b_o d \quad (5)$$

โดยที่ λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของคอนกรีต โดยคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตชนิดความหนาแน่นต่ำมีค่าเท่ากับ 1.00, 0.75 ตามลำดับ, ϕ_c คือสัมประสิทธิ์ลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.65, E_f คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP, f'_c คือ กำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต (MPa), b_o คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤต ซึ่งจะวัดออกจากหน้าเสาเป็นระยะ $d/2$ โดยที่ d คือ ความลึกประสิทธิภาพ (mm), β_c คือ สัดส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของเสา, α_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเสา โดยที่เสาใน เสาขอบ เสาริมจะมีค่าเท่ากับ 4, 3 และ 2 ตามลำดับ

2.4 การเรียนรู้ด้วยเครื่อง (Machine Learning)

2.4.1 นิยาม

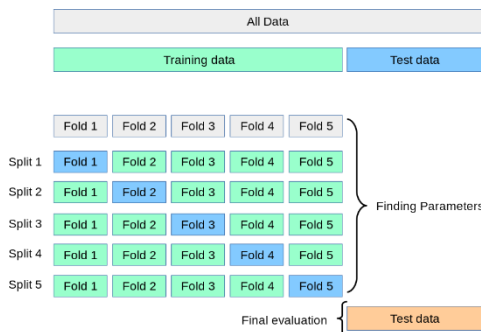
การเรียนรู้ด้วยเครื่อง เป็นการเรียนรู้ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) โดยจัดเป็นกระบวนการเรียนรู้ด้วยตัวเองจากอัลกอริทึมแบบต่าง ๆ สามารถนำไปใช้งานได้หลายประเภท เช่น การแบ่งแยกประเภท (Classification), การถดถอย (Regression) และการจัดกลุ่ม (Clustering) โดยการเรียนรู้ด้วยเครื่องจะมีส่วนประกอบ 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การเรียนรู้และการอนุมาน โดยเครื่องจะทำการเรียนรู้จากข้อมูลสำหรับการฝึกและใช้อัลกอริทึมต่าง ๆ มาอนุมานหาความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยจะเรียกขั้นตอนนี้ว่าการ Train Model ในการเรียนรู้ด้วยเครื่องนั้นจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ๆ ได้แก่ การเรียนรู้โดยมีผู้สอน (Supervised Learning) และการเรียนรู้โดยไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)

2.4.2 การเรียนรู้โดยมีผู้สอน (Supervised Learning)

หมายถึงการเรียนรู้ด้วยเครื่องที่มีการป้อนข้อมูลสำหรับการฝึกที่ประกอบด้วยข้อมูลพารามิเตอร์และข้อมูลผลลัพธ์ของพารามิเตอร์นั้น ๆ แล้วเครื่องจะทำการเรียนรู้เพื่อสร้างแบบจำลอง (Predictive Model) ขึ้นมา จากนั้นจะมีการป้อนข้อมูลสำหรับการทดสอบหรือที่เรียกว่าการ Test Model เข้าไป จากนั้นแบบจำลองจะทำนายผลลัพธ์ที่ต้องการออกมา โดยการเรียนรู้รูปแบบนี้จะมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ การแบ่งแยกประเภท (Classification) และการถดถอย (Regression)

2.4.3 Cross Validation

เป็นขั้นตอนในการแบ่งข้อมูลเพื่อนำไปฝึกและประเมินความแม่นยำของแบบจำลองก่อนที่จะนำไปทดสอบกับข้อมูลชุดทดสอบโดยไม่จำเป็นต้องแยกข้อมูล Validation set ออกมาอย่างถาวร โดยใช้วิธีการ k-Fold Cross Validation ซึ่งมีการแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกออกเป็นจำนวน k กลุ่ม และจะมีการฝึกแบบจำลองจำนวน k รอบ ในแต่ละรอบของการฝึกข้อมูลจำนวน k-1 กลุ่มจะถูกนำมาใช้ในการฝึกและนำข้อมูลกลุ่มสุดท้ายที่เหลือมาใช้เป็น Validation set เพื่อประเมินความแม่นยำเบื้องต้น จะได้ผลลัพธ์การประเมินความแม่นยำเป็นค่าเฉลี่ยของการประเมินในทุก ๆ รอบของ k-Fold วิธีการนี้ทำให้สามารถใช้ข้อมูลที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีข้อได้เปรียบสำหรับการสร้างแบบจำลองที่ยังมีข้อมูลจำนวนน้อยหรือยังมีการศึกษาที่ไม่มากพอ



รูปที่ 2.6 การแบ่งข้อมูลวิธีการ k-Fold Cross validation

2.4.4 Gaussian Process (GP)

ในทางสถิติมีความคิดว่าข้อมูลทุกอย่างจะมีการกระจายอย่างธรรมชาติเป็นไปตามการแจกแจงปกติ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ (6) ในโมเดลชนิดนี้จึงนำการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (Multivariate Normal Distribution) มาวิเคราะห์ด้วยหลักความน่าจะเป็น ซึ่งจะมีการใช้เคอร์เนล ในการวัดค่าความเกี่ยวข้องกันของแต่ละพารามิเตอร์เพื่อใช้ในเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Matrix) ดังสมการ (7) แต่สมการที่ได้แสดงตัวอย่างให้ดูนั้นเป็นเพียงเคอร์เนลประเภทหนึ่งจากเคอร์เนลทั้งหมดที่สามารถเลือกใช้ได้ในกระบวนการเกาส์เซียน ทำให้กระบวนการเกาส์เซียน มีความหลากหลาย และสามารถเลือกใช้เคอร์เนลต่าง ๆ ให้เหมาะกับการทำนายข้อมูลประเภทแต่ละประเภทได้

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

$$k(x_i, x_j) = e^{-\frac{d(x_i, x_j)^2}{2l^2}} \quad (7)$$

2.4.5 Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

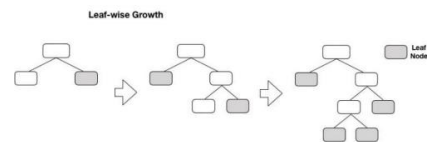
เป็นอัลกอริทึมในการเรียนรู้ด้วยเครื่องที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจาก Gradient Boosting ที่มีพื้นฐานมาจากการสร้างแบบจำลองจากการเรียนรู้แบบมีลำดับ โดยมีการฝึกด้วยค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองตัวก่อนหน้าซ้ำ ๆ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองสุดท้าย ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของแบบจำลองย่อยทั้งหมดเพื่อนำมาใช้ในการทำนาย

โดย Extreme Gradient Boosting ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึม Gradient Boosting ในด้านการลดการ Overfit กับข้อมูลสำหรับการฝึก และยังมีการพัฒนาในด้านอื่น ๆ เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ไม่มีสมบูรณ์ (Missing Value) และการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่อง ทำให้สามารถทำการเรียนรู้ได้ในเวลาที่น้อยลง

2.4.6 Light Gradient Boosting (LightGBM)

เป็นเฟรมเวิร์กที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึม Gradient Boosting เช่นเดียวกับ XGBoost โดย LightGBM ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในด้านความเร็วในการเรียนรู้ ประสิทธิภาพในการเรียนรู้ การใช้ปริมาณ memory ที่น้อยลง และสามารถใช้กับข้อมูลที่มีความซับซ้อนหรือมีปริมาณมากได้ดี

LightGBM ถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิค leaf-wise หมายความว่า จะมีการสร้างต้นไม้ตัดสินใจที่ลดความผิดพลาดได้มากกว่า ทำให้มีความแม่นยำมากกว่าในขณะที่มีความไวในการเรียนรู้มากกว่า แต่ก็อาจจะทำให้เกิดความพอดีบน Training set มากเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 2.9 ต้นไม้ตัดสินใจที่ไม่สมดุลซึ่งจะมีความเฉพาะเจาะจงกับข้อมูลบางประเภทเป็นพิเศษ

2.4.7 Linear Regression (Linear)

Linear Regression หรือเรียกอีกอย่างว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ซึ่งจัดเป็นอัลกอริทึมชนิดหนึ่งของการเรียนรู้ด้วยเครื่อง โดยจัดเป็นประเภท Supervised Learning หรือก็คือการเรียนรู้แบบมีผู้สอน โดยเป็นประเภทที่จำเป็นต้องมีข้อมูลตัวอย่างที่ใช้สำหรับให้อัลกอริทึมทำการเรียนรู้ก่อนการใช้งาน หลังจากนั้นอัลกอริทึมจึงจะสามารถหาคำตอบได้เอง ซึ่ง Linear Regression นั้นสามารถใช้ได้ทั้งการทำ Regression ซึ่งเป็นการคาดคะเนตัวแปรตามจากการนำเอาตัวแปรต้นตัวใหม่ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามของข้อมูลเดิม และ การ Classification ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาโดยใช้การแบ่งการจัดกลุ่ม

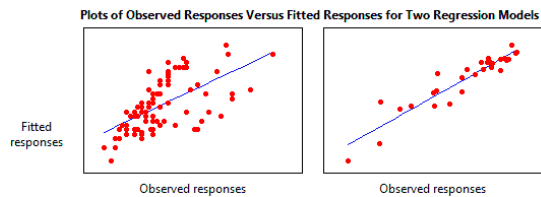
โดยจุดประสงค์ของการทำ Linear Regression นั้น คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือเรียกอีกชื่อว่าตัวแปรต้นตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปและตัวแปรตาม เพื่อใช้ในการประมาณผลลัพธ์ในอนาคต โดยสมการของการหาความสัมพันธ์แสดงดังสมการ (8)

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (8)$$

โดยที่ y คือ ตัวแปรตามหรือก็คือผลลัพธ์ที่สนใจ b_0 คือจุดตัดกราฟ b_1, b_2, \dots, b_n คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ส่งผลต่อตัวแปรต้นแต่ละตัว

2.4.8 การให้คะแนนแบบจำลอง (Model Scoring)

ในบทความนี้ได้เลือกใช้ค่า R-squared (R^2) หรือ the coefficient of determination เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบจำลองที่ได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะแสดงสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตาม (y) ที่อธิบายโดยตัวแปรอิสระ (x) ซึ่งค่า R-squared นั้นมีค่าตั้งแต่ 0.00-1.00 โดยถ้าค่า R-squared มีค่า 0.00 หมายความว่าแบบจำลองนั้นไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนใด ๆ ในตัวแปรตามได้เลย กล่าวคือ ตัวแปรอิสระไม่สามารถอธิบายความผันแปรใด ๆ ในตัวแปรตามได้ ในทางกลับกันถ้าค่า R-squared มีค่า 1.00 หมายความว่าแบบจำลองนั้นสามารถอธิบายความแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรตามได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในแบบจำลอง



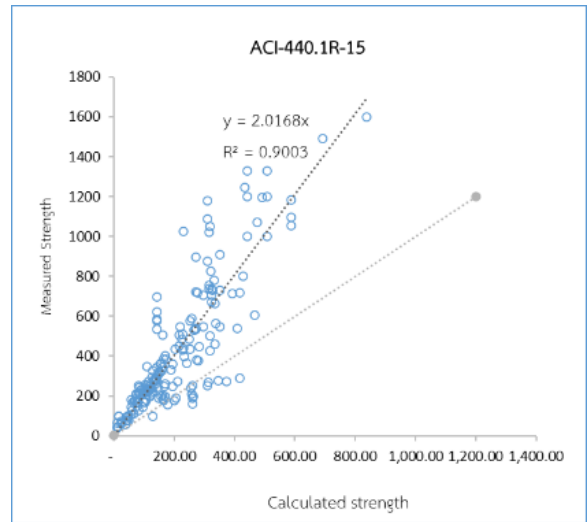
รูปที่ 2.7 ข้อมูลที่มีค่า R^2 ต่ำ (ซ้าย) และ R^2 สูง (ขวา)

3. ผลการวิจัย

3.1 การเปรียบเทียบข้อมูลที่วัดจากการทดลองกับข้อมูลที่คำนวณได้จากคู่มือการออกแบบประเทศต่างๆ

3.1.1 ACI-440.1R-15

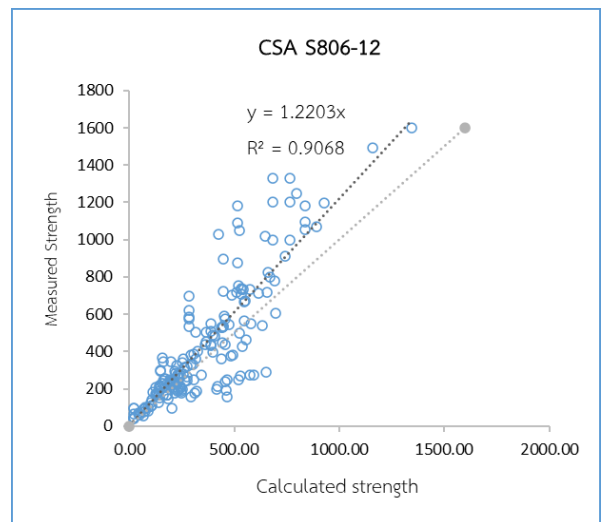
เมื่อทำการคำนวณจากคู่มือการออกแบบของ ACI-440.1R-15 ที่เป็นคู่มือการออกแบบคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุไฟเบอร์กลาส พบว่าข้อมูลที่คำนวณจากคู่มือการออกแบบได้สูงกว่าค่าจริงอยู่ในช่วงที่มีกำลังน้อยกว่า 450 kN และมีข้อมูลอยู่ทั้งหมด 15 ตัวที่คิดเป็น 7.93% ของข้อมูลทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังมีค่าสูงขึ้นคู่มือจะมีระยะห่างจากค่าจริงมากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 3.1 กำลังที่วัดได้เทียบกับคู่มือการออกแบบ ACI-440.1R-15

3.1.2 CSA S806-12

ทำการคำนวณเหมือนกับข้างต้น พบว่าคู่มือการออกแบบของ CSA S806-12 ในช่วงที่คำนวณจากคู่มือการออกแบบได้กำลังสูงกว่าค่าจริงอยู่ในช่วงกำลังน้อยกว่า 700 kN จะมีข้อมูลอยู่ทั้งหมด 48 ตัวที่คู่มือการออกแบบคำนวณได้กำลังน้อยกว่าค่าที่มาจากการทดลองจริงคิดเป็น 25.40% ของข้อมูลทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กำลังที่วัดได้เทียบกับคู่มือการออกแบบ CSA S806-12

3.2 โมเดลต่างๆที่นำมาเรียนรู้ชุดข้อมูล

3.2.1 Input variables

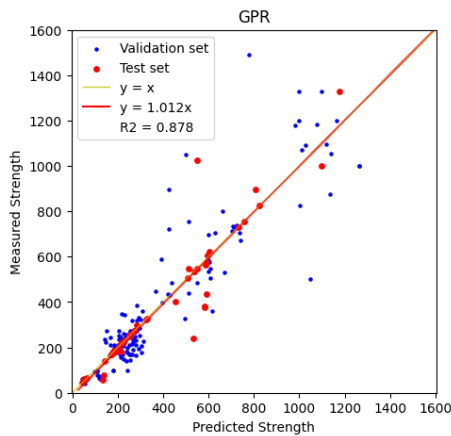
- S1_mm = ขนาดความกว้างของแผ่นพื้นด้านที่ 1
- S2_mm = ขนาดความกว้างของแผ่นพื้นด้านที่ 2
- c1_mm = ขนาดความกว้างของพื้นที่รับแรงด้านที่ 1
- c2_mm = ขนาดความกว้างของพื้นที่รับแรงด้านที่ 2
- d_mm = ความหนาของแผ่นพื้น

F_c _MPa = กำลังรับแรงอัดระบุของคอนกรีต
 E_f _GPa = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ FRP
 pf _% = สัดส่วนการเสริมแรงด้วย FRP

3.2.2 Data Processing procedure

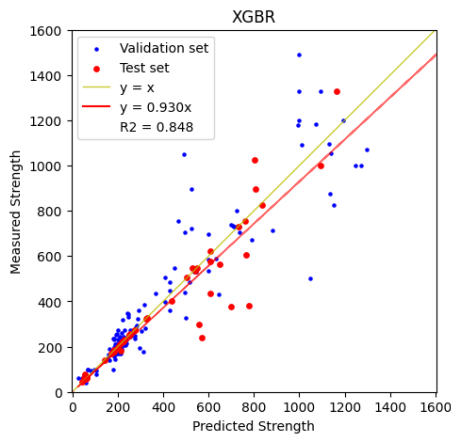
เมื่อได้ข้อมูลมาแล้วจะทำการแบ่งข้อมูลเป็นสองส่วนได้แก่ Training set และ Test set ด้วยอัตราส่วน 75 : 25 ตามลำดับ จากนั้นจะนำเอาข้อมูล Training set มา Train และทำการ Cross-validation ด้วย kFold แล้วจึงนำโมเดลที่ได้จากการ Train รอบสุดท้ายมาทำนายค่ากำลังรับแรงเฉือนทะเลด้วย Input variables ของข้อมูลชุด Test set และทำการพล็อตค่ากำลังรับแรงเฉือนทะเลของจริง (Measured Strength) ในแนวแกน y เทียบกับกำลังรับแรงเฉือนทะเลที่ได้จากการทำนายด้วยโมเดล (Predicted Strength) ในแนวแกน x พร้อมทั้งทำการคำนวณค่า R2 เพื่อวัดความเกี่ยวเนื่องกันของค่าที่ทำนายได้กับค่าจริงของโมเดลต่าง ๆ โดยจะแสดงให้เห็นตามโมเดลต่อไปนี้

3.2.3 Gaussian Process (GPR)



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบระหว่างกำลังที่วัดได้เทียบและแบบจำลอง GP

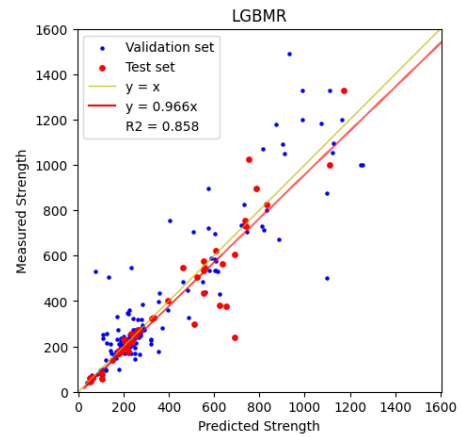
3.2.4 Extreme Gradient Boosting (XGBR)



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบระหว่างกำลังที่วัดได้เทียบและแบบจำลอง

XGBoost

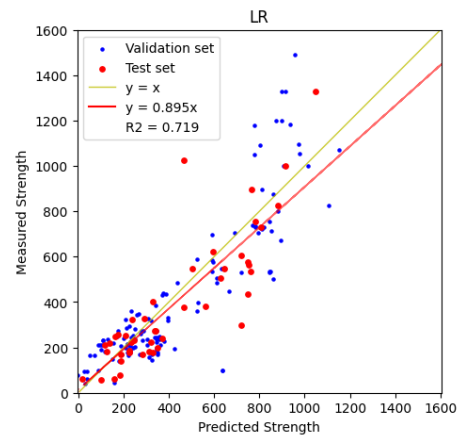
3.2.5 Light Gradient Boosting (LGBMR)



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบระหว่างกำลังที่วัดได้เทียบและแบบจำลอง

LGBMR

3.2.6 Linear Regression (LR)



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบระหว่างกำลังที่วัดได้เทียบและแบบจำลอง Linear

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากคู่มือการออกแบบ

จากการคำนวณโดยใช้คู่มือการออกแบบ ACI-440.1R-15 และ CSA S806-12 พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้คู่มือ CSA S806-12 มีความใกล้เคียงข้อมูลการทดสอบจริงมากกว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้คู่มือ ACI-440.1R-15 เนื่องจากกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้คู่มือ CSA S806-12 มีค่าความชันของเส้นแนวโน้มใกล้เคียง 1 มากกว่า กราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้คู่มือ ACI-440.1R-15 ข้อมูลค่ากำลังที่ได้จากการคำนวณโดยใช้คู่มือ CSA S806-12 จะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ค่ากำลังสูงกว่าค่ากำลังที่มาจากการทดลองจริงมากถึง 25.40% ทำให้อาจเกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้งานคู่มือในช่วงที่มีกำลังต่ำกว่า 700 kN จึงอาจพิจารณาปรับการให้คู่มือโดย ACI-440.1R-15 ควรปรับให้ช่วงที่กำลังสูงกว่า 450 kN นั้นออกแบบได้ใกล้เคียงค่าจริงมากยิ่งขึ้น และ CSA S806-12 ควรปรับการคิดในช่วงที่มีกำลังต่ำกว่า 700 kN ให้กำลังต่ำกว่าค่าจริงที่ได้จากการทดลอง

4.2 เปรียบเทียบผลจากการใช้แบบจำลองต่าง ๆ

ตารางที่ 1 เปรียบค่า R2 จากการใช้แบบจำลองต่าง ๆ

Models	R2 (Training set)	R2 (Test set)
GPR	0.831	0.878
XGBR	0.855	0.848
LGBMR	0.820	0.858
LR	0.768	0.719

จากตารางที่ 1 พบว่า แบบจำลองที่ให้ค่า R² ของข้อมูล Test set สูงที่สุดเป็น 3 อันดับแรก ได้แก่ GPR มีค่า R² คือ 0.878, LGBMR มีค่า R² คือ 0.858 และ XGBR มีค่า R² คือ 0.848 เนื่องจาก GPR นั้นสามารถเรียนรู้ข้อมูลได้ดีแม้จะมีจำนวนข้อมูลที่น้อยกว่าแบบจำลองชนิดอื่น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่กรุณาให้ความรู้คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจในการทำงานตั้งแต่แรกเริ่มตลอดจนถึงการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เสมอมาและขอขอบพระคุณบุคลากรอื่นที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวก นายอานัติ สุชา และนางสาวรัฐญา เจริญยิ่ง ที่คอยช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ต่าง ๆ และให้คำแนะนำในการปรับแก้งานวิจัย ทั้งในและนอกเวลาราชการตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Deifalla (2022). Punching shear strength and deformation for FRP-reinforced concrete slabs without shear reinforcements
- [2] Imad Shakir Abbood, Sief aldeen Odaa, Kamalaldin F. Hasan and Mohammed A. Jasim (2021). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review
- [3] E. Oller, R. Kotynia and A. Mari (2017). Assessment of the Existing Formulations to Evaluate Shear-Punching Strength in RC Slabs with FRP Bars Without Transverse Reinforcement
- [4] S.H. Ahmad, P. Zia, T. Yu, Y. Xie, Punching shear tests of slabs reinforced with 3-dimensional carbon fiber fabric, *Concr. Int.* 16 (6) (1993) 36–41.
- [5] N. Banthia, M. Al-Asaly, S. Ma, Behavior of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced plastic grid, in: *J. Mater. Civ. Eng.*, 7, 1995, pp. 252–257.
- [6] Bank L., Xi Z., (1995). Punching shear behavior of pultruded FRP grating reinforced concrete slabs, in: *Proceedings of the Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 360–367
- [7] H.J. Louka, (1999). Punching behavior of a hybrid reinforced concrete bridge deck. Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Department of Civil & Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 1999.
- [8] K. Bouguerra, E.A. Ahmed, S. El-Gamal, B. Benmokrane, (2011). Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars, *Constr. Build. Mater.* 25 3956–3965.
- [9] A.H. Rahman, (2000). C.Y. Kingsley, K. Kobayashi, Service and ultimate load behavior of bridge deck reinforced with carbon FRP grid, *J. Compos. Constr.*
- [10] T. Hassan, A. Abdelrahman, G. Tadros, S. Rizkalla, (2000). Fibre reinforced polymer reinforcing bars for bridge decks, *Can. J. Civ. Eng.* 27
- [11] A. Zaghoul, Punching Shear Strength of Interior and Edge Column Slab Connections in CFRP Reinforced Flat Plate Structures Transferring Shear and Moment (Ph.D. thesis), Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, 2007.
- [12] A.W. El-Ghandour, K. Pilakoutas, P. Waldron, Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs: experimental study, *J. Compos. Constr.* 7 (2003) (2003) 258–265.
- [13] C.E. Ospina, S.D.B. Alexander, J.J.R. Cheng, Punching of two-way slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids, *Acids Struct. J.* 100 (2003) (2003) 589–598.
- [14] A. Hussein, I. Rashid, B. Benmokrane, Two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars, in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, CSCE, Calgary, Alberta, Canada, July 2004.
- [15] D.A. Jacobson, L.C. Bank, M.G. Oliva, J.S. Russel, (2005). Punching Shear Capacity of Double Layer FRP Grid Reinforced Slabs, *ACI, Specs. Publication*, 2005, SP. 230–49, 857–876
- [16] S. El-Gamal, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, Behavior of concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars under concentrated loads, *Acids Struct. J.* 102 (2005) (2005) 727–735.
- [17] Haithm Alshari, Alper Odabas and Abdulrazak Yahya Saleh (2021) Comparison of Gradient Boosting Decision Tree Algorithms for CPU Performance