



พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

BOND BEHAVIOR BETWEEN CONCRETE AND CFRP PLATES

ชนะชัย ทองโถม¹ และอัครวัชร เล่นวารี²

¹นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²รองศาสตราจารย์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ซึ่งประกอบด้วย กำลังยึดเหนี่ยว ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล และรูปแบบการวิบัติ โดยทำการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือนระนาบเดียว ตัวอย่างทดสอบ คือ คอนกรีตปริซึมมีขนาด $150 \times 150 \times 500$ มม. ที่ยึดกับแผ่น CFRP ด้วยวัสดุประสาน โดยใช้ความยาวยึดเหนี่ยวที่แตกต่างกัน (100, 200, 300 และ 400 มม.) จากการศึกษาพบว่า การวิบัติจากการหลุดล่อนเกิดขึ้นที่เนื้อคอนกรีต และสมการของ *Fib14* ให้ผลทำนายความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ นอกจากนั้น สมการของ *ACI440.2R* ทำนายค่าความเครียดของแผ่น CFRP ขณะเกิดการหลุดล่อนที่สูงกว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากทุกตัวอย่างทดสอบ และวิธีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไถลด้วยแบบจำลองของ *Popovic* และแบบจำลองเชิงเส้นคู่มีแนวโน้มให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและกำลังยึดเหนี่ยวที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าแนวทางของ *Dai* และคณะ (2005)

คำสำคัญ: กำลังยึดเหนี่ยว, ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ, ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล, พลังงานต้านทานการแตกหัก, แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย, คอนกรีต

ABSTRACT

*This paper presents the bond behavior between concrete and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates. The studied behavior includes the bond strength, effective bond length, bond stress-slip relationship, and failure mode. A single shear pushing test method was conducted. The concrete prisms ($150 \times 150 \times 500$ mm) were adhesively bonded with CFRP plates of different bond lengths (100, 200, 300, and 400 mm). The results showed that the debonding failure occurred at concrete substrate. The effective bond length could reasonably be predicted by *Fib14* equation. Also, the *ACI 440.2R* equation for debonding strain of FRP plates predict higher values than the test data. Based on the test data, different models for constructing the bond stress-slip relationships were assessed. The interfacial fracture energy values obtained from *Popovic* and bi-linear models were found to be similar and higher than ones obtained from *Dai et al. (2005)* method.*

KEYWORDS: bond strength, effective bond length, bond stress-slip, fracture energy, CFRP plates, concrete

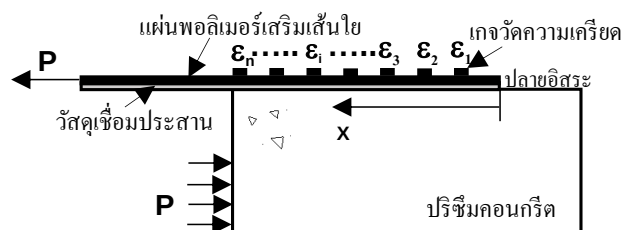
1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยในปัจจุบันมีความต้องการการเสริมกำลังโครงสร้างเพิ่มขึ้นจากสาเหตุต่างๆ การใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) เป็นทางเลือกหนึ่งในการเสริมกำลังเนื่องจากข้อดีของวัสดุคือ มีกำลังรับแรงดึงสูงและมีน้ำหนักเบาทำให้สะดวกในการติดตั้ง การเสริมกำลังด้วย FRP สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัด แรงเฉือนและแรงอัดของโครงสร้างคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม รูปแบบการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP คือการหลุดล่อน โดยเฉพาะการหลุดล่อนที่ช่วงภายใน (Intermediate crack-induced หรือ IC debonding) ระหว่างคอนกรีตและ FRP ซึ่งจำกัดประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยวัสดุนี้ ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่น FRP ด้วยการทดสอบรอยต่อในลักษณะต่างๆ [1, 2] โดยมีสมมติฐานว่าการหลุดล่อนที่ช่วงภายในของคานามีสถานะของหน่วยแรงที่ใกล้เคียงกับการทดสอบรอยต่อ จากการศึกษาพบว่า กำลังยึดเหนี่ยว (Bond strength) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การเตรียมผิวของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต คุณสมบัติของทั้ง FRP และวัสดุประสาน [3] โดยกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่น FRP จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะหรือความยาวยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นแต่จะไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อความยาวมีค่าเท่ากับความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective bond length, L_e)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ด้วยวิธีการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือนระนาบเดียว (Single shear test) โดยใช้ความยาวยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP ที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษากำลังยึดเหนี่ยว ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล รูปแบบการวิบัติ 2) เปรียบเทียบแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล (Bond stress-slip relationship) ต่างๆ ในอดีต 3) ศึกษาความเหมาะสมของสมการทำนายกำลังยึดเหนี่ยวและความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่เสนอโดย Fib14 (2001) [4] และ 4) ศึกษาความเหมาะสมของสมการทำนายค่าความเครียดที่เกิดการหลุดล่อนที่เสนอโดย ACI440.2R (2017) [5]

2. แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP

รูปที่ 1 แสดงการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือนระนาบเดียวและการติดตั้งเกจวัดความเครียด (strain gage) บนแผ่น FRP ที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 1 การทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือนระนาบเดียว

จากรูปที่ 1 กำหนดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง i และ $i+1$, $\bar{\tau}_{i,i+1}$ หาได้จากสมการที่ (1)

$$\bar{\tau}_{i,i+1} = E_f t_f \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{(x_{i+1} - x_i)} ; i = 1, \dots, n \quad (1)$$

เมื่อ E_f และ t_f คือ โมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของแผ่น FRP ตามลำดับ; ε_i และ ε_{i+1} คือ ค่าความเครียดที่วัดได้ที่ตำแหน่ง i และ $i+1$ ตามลำดับ; x_i และ x_{i+1} คือระยะวัดจากปลายอิสระของเกวียดความเครียดที่ตำแหน่ง i และ $i+1$ ตามลำดับ
ค่าการไถลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการอินทิเกรตค่าความเครียดเริ่มจากปลายอิสระของแผ่น FRP ดังสมการ (2)

$$\bar{s}_{i,i+1} = s(l_f) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) \cdot (x_{i+1} - x_i)] \quad (2)$$

เมื่อ $\bar{s}_{i,i+1}$ คือ ค่าการไถลเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง i และ $i+1$
 $s(l_f)$ คือ ค่าการไถลที่ปลายอิสระของแผ่น FRP

การสร้างแบบจำลองระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลของคอนกรีตและแผ่น FRP ในการศึกษาประกอบด้วย
วิธีที่ 1 การใช้แบบจำลองของ Popovic ดังสมการที่ (3)

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_{\max}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{\max}}\right)^n} \quad (3)$$

เมื่อ $\tau_{\max}$ คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด; $s_{\max}$ คือ การไถลที่ตำแหน่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด; และ n คือ ค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule)

วิธีที่ 2 การใช้แบบจำลองเชิงเส้นคู่ (Bilinear) ดังสมการที่ (4)

$$\tau = \begin{cases} \frac{\tau_{\max}}{s_{\max}} s & ; 0 \leq s \leq s_{\max} \\ \frac{\tau_{\max}}{s_f - s_{\max}} (s_f - s) & ; s_{\max} \leq s \leq s_f \\ 0 & ; s > s_f \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ s_f คือ การไถลที่ค่าของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเริ่มมีค่าเท่ากับศูนย์ และค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (Interfacial fracture energy, G_f) ได้จากสมการที่ (5)

$$G_f = \frac{1}{2} s_f \tau_{\max} \quad (5)$$

วิธีที่ 3 การใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นของ Dai และคณะ (2005) [3] เริ่มจากการสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (ε) และการไถลที่เกวียดความเครียดตำแหน่งใกล้เคียงกระทำมีความสัมพันธ์แบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential function) ดังสมการที่ (6)

$$\varepsilon = f(s) = A(1 - \exp(-Bs)) \quad (6)$$

เมื่อ A และ B (มม⁻¹) คือค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลได้ดังสมการที่ (7)

$$\tau = A^2 B E_f t_f \exp(-Bs)(1 - \exp(-Bs)) \quad (7)$$

และค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล ดังสมการที่ (8)

$$G_f = \int_0^\infty \tau ds = \frac{1}{2} A^2 E_f t_f \quad (8)$$

จากสมการที่ (7) ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ($\tau_{\max}$) และการไถลที่หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ($s_{\max}$) คำนวณได้จากสมการ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$\tau_{\max} = 0.5 B G_f \quad (9)$$

$$s_{\max} = \frac{\ln 2}{B} = \frac{0.693}{B} \quad (10)$$

จากทั้ง 3 วิธีข้างต้น เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล จะคำนวณค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่น FRP ได้จากสมการที่ (11) [6, 7]

$$P_{\max} = b_f \sqrt{2 E_f t_f G_f} \quad (11)$$

เมื่อ b_f คือความกว้างของแผ่น FRP

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 คุณสมบัติวัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้คอนกรีตผสมเสร็จเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.44 โดยกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน ($\varnothing 150 \times 300$ มม.) ที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 43 เมกะปาสกาล

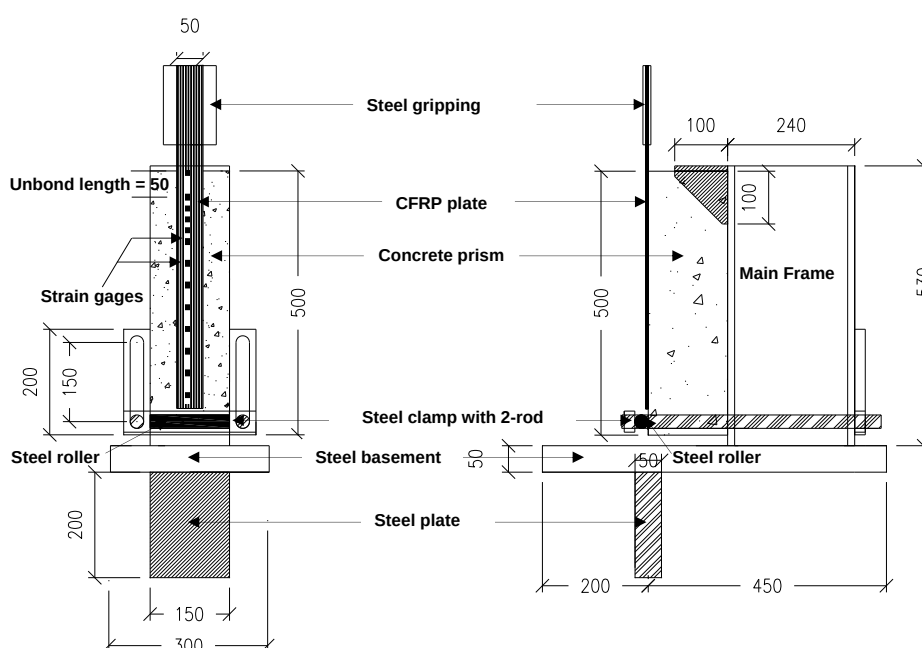
แผ่น CFRP ที่ใช้ในการทดสอบคือ Sika® Carbodur® ชนิด S512 ที่มีความกว้าง 50 มม. และความหนา 1.2 มม. มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น กำลังรับแรงดึง และความเครียดที่จุดแตกหักจากการทดสอบรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 180777 เมกะปาสคาล 3303 เมกะปาสคาลและ 1.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และวัสดุประสานที่ใช้คือ Sikadur®-30

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและ CFRP จากตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยคอนกรีตปริซึมมีขนาด 150×150×500 มม. ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาคือความยาวของความยาวยึดเหนี่ยว CFRP (bond length, L_b) ประกอบด้วย 100 มม. (1 ตัวอย่าง) 200 มม. (1 ตัวอย่าง) 300 มม. (1 ตัวอย่าง) และ 400 มม. (3 ตัวอย่าง) ทุกตัวอย่างมีระยะไม่ยึดเหนี่ยว (unbond) ที่ปลายใกล้แรงกระทำเท่ากับ 50 มม. การติดตั้งแผ่น CFRP กระทำภายหลังการบ่มคอนกรีตปริซึม (28 วัน) โดยก่อนการติดตั้งได้ทำการเจียผิวคอนกรีตและทำความสะอาดผิวโดยกำจัดฝุ่นบริเวณที่จะติดตั้ง เมื่อติดตั้งแผ่น CFRP แล้วทำการบ่มวัสดุประสานที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 14 วัน จากนั้นทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดบนแผ่น CFRP ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยระยะห่างของเกจวัดความเครียด มีค่า 20 มม. ที่ตำแหน่งใกล้แรงกระทำ

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงการทดสอบตัวอย่างรอยต่อระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP ในแนวดิ่ง การติดตั้งตัวอย่างทดสอบจะควบคุมศูนย์กลางของแรงกระทำในแนวดิ่งของแผ่น CFRP ให้ตรงกับฐานรองรับเพื่อหลีกเลี่ยงโมเมนต์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในระหว่างทำการทดสอบ การทดสอบจะควบคุมระยะการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเท่ากับ 1 มม.ต่อวินาที และบันทึกข้อมูลแรงดึงและค่าของความเครียดตามแนวแผ่น CFRP จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

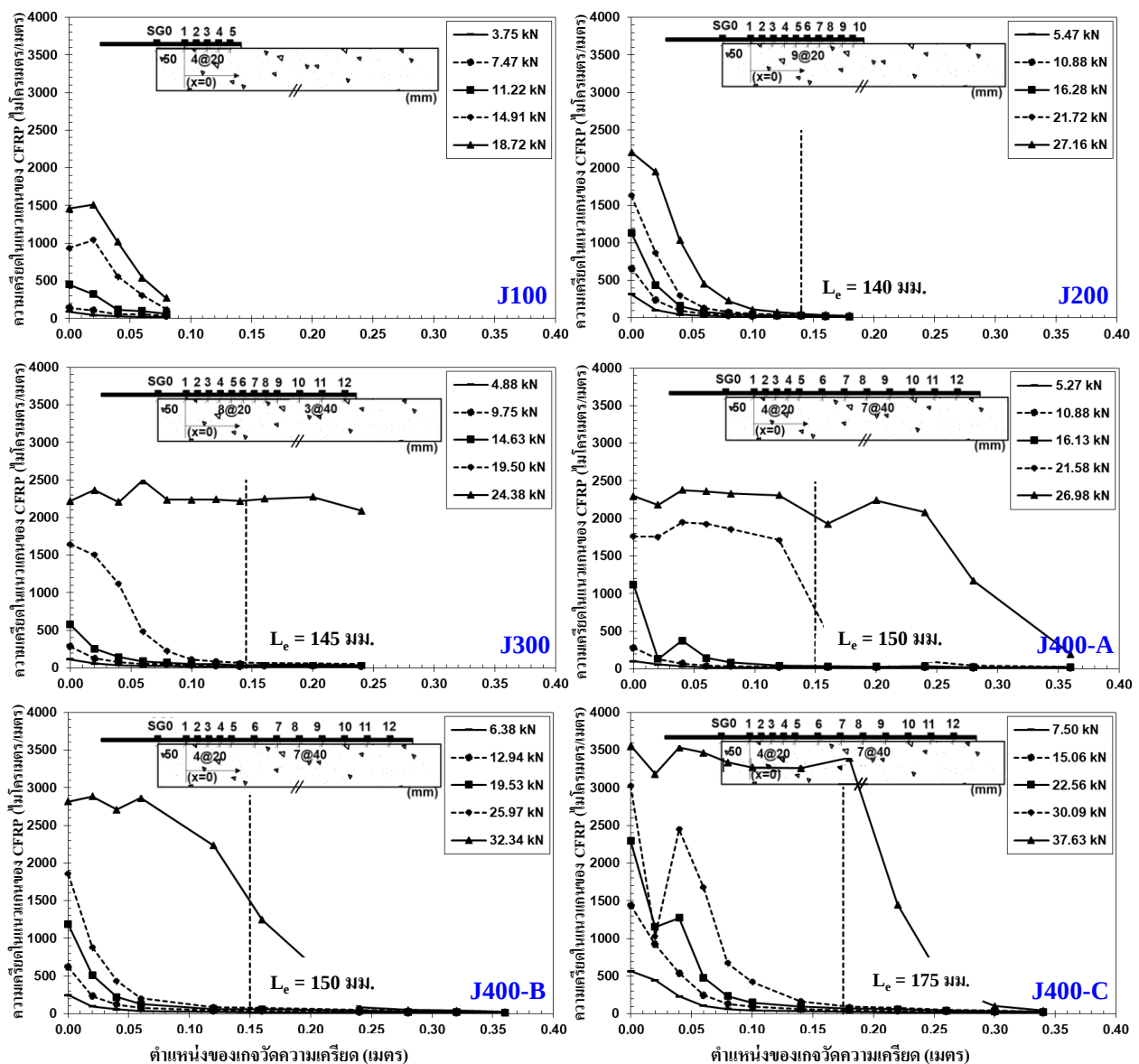


รูปที่ 2 การทดสอบตัวอย่างรอยต่อระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

4. ผลการทดสอบ

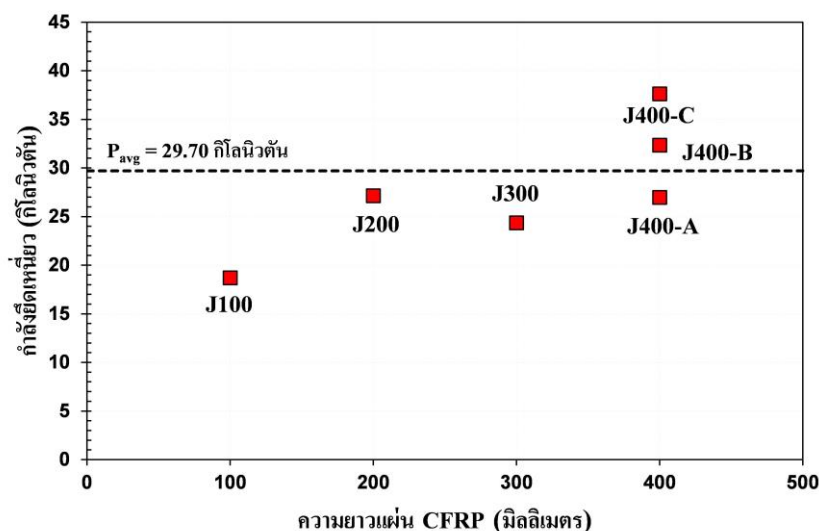
4.1 ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของความเค้นตามแนวแผ่น CFRP ที่แรงกระทำ 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของกำลังยึดเหนี่ยวของทุกตัวอย่างทดสอบ จากรูปพบว่า ความเค้นในแผ่นจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้แรงกระทำและมีค่าลดลงที่ตำแหน่งห่างออกไปสู่ปลายอิสระของแผ่น ค่าความเค้นในแผ่นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงกระทำมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งเมื่อแรงกระทำมีค่าใกล้กับกำลังยึดเหนี่ยว การกระจายของความเค้นตามแนวแผ่น CFRP จะไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ทั้งนี้ จากการกระจายความเค้นตามแนวแผ่น CFRP จะสามารถหาค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลได้ โดยความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลคือ ระยะที่ความเค้นมีค่าเป็นศูนย์ [8] ซึ่งจะได้ว่า ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 140 ถึง 175 มม. (ค่าเฉลี่ยค่าเท่ากับ 152 มม.)



รูปที่ 3 การกระจายความเค้นบนแผ่น CFRP ของตัวอย่างทดสอบ

นอกจากนั้น ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวและความยาวของแผ่น CFRP ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพบว่า ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเริ่มมีค่าคงที่ที่ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 มม. ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่น CFRP



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวและความยาวแผ่น CFRP

Fib14 (2001) [4] ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพและกำลังยึดเหนี่ยวดังสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (12)$$

$$P_{\max} = \begin{cases} \alpha c_1 k_c k_b b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} & ; L_f \geq L_e \\ \frac{L_f}{L_e} \left(2 - \frac{L_f}{L_e}\right) (\alpha c_1 k_c k_b b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}}) & ; L_f < L_e \end{cases} \quad (13)$$

เมื่อ f_{ctm} คือ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (ในงานวิจัยนี้สมมติเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงอัดคอนกรีต); α คือ ตัวคูณปรับลด ($\alpha = 0.9$ เมื่อพิจารณาผลกระทบของรอยร้าวเนื่องจากกำลังการยึดเหนี่ยว, $\alpha = 1.0$ สำหรับคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนภายในและภายนอกเพียงพอ และรวมทั้งสิ้น); c_1 และ c_2 คือ ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ (Calibration) กับผลทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.64 และ 2 ตามลำดับ; k_c คือ ตัวประกอบการปรับแก้ของคอนกรีต (ในกรณีทั่วไป $k_c = 1.0$; $k_c = 0.67$ สำหรับผิวคอนกรีตที่มีกรวดอัดตัว); k_b คือ ตัวคูณประกอบปรับแก้รูปร่าง ดังสมการที่ (14) โดยในงานวิจัยนี้สมมติใช้ค่า α และ k_c เท่ากับ 0.9 และ 0.67 ตามลำดับ

$$k_b = 1.06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_c}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1.0 \quad (14)$$

จากสมการที่ 12 คำนวณค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพได้เท่ากับ 161 มม. ซึ่งสูงกว่าผลการทดสอบ 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างที่มีความยาวเกินกว่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย P_{avg} เท่ากับ 29.70 กิโลนิวตัน จากสมการที่ 13 คำนวณค่ากำลังยึดเหนี่ยวได้เท่ากับ 25.41 กิโลนิวตัน ซึ่งต่ำกว่าผลการทดสอบโดยเฉลี่ย 14 เปอร์เซ็นต์

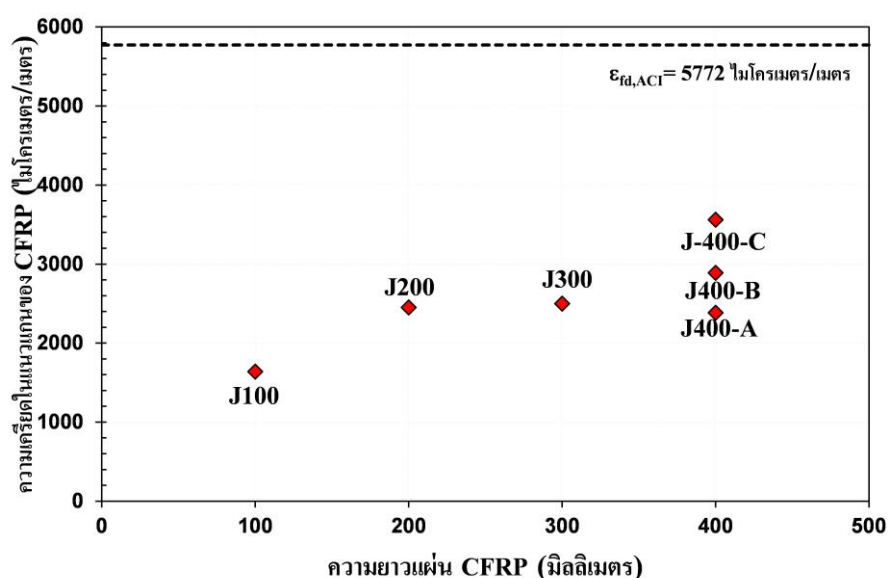
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดของ CFRP และความยาวแผ่น CFRP ซึ่งความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาว CFRP เพิ่มขึ้น และเริ่มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความยาวมีค่าตั้งแต่ 200 มม. ขึ้นไป ซึ่งแสดงแนวโน้มคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวและความยาวของแผ่น CFRP (รูปที่ 4)

ACI440.2R (2017) [5] ได้เสนอสมการเพื่อจำกัดความเครียดของ FRP ที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายใน (Debonding strain, $\varepsilon_{fd,ACI}$) ดังสมการที่ (15)

$$\varepsilon_{fd,ACI} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n_f E_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (15)$$

เมื่อ n_f และ ε_{fu} คือ จำนวนแผ่น FRP และความเครียดที่จุดแตกหักของแผ่น FRP ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบค่า $\varepsilon_{fd,ACI}$ ที่ทำนายจากสมการที่ (15) กับผลการทดสอบ พบว่า มีค่าสูงกว่าผลการทดสอบในทุกตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวแกนสูงสุดของ CFRP และความยาวแผ่น CFRP

4.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลจากวิธีต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลของทุกตัวอย่างทดสอบ สังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลเป็นรูปพาราโบลาคว่ำ โดยมีการกระจายของข้อมูลค่อนข้างสูงเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น การกระจายตัวของมวลรวมตามแนวผิวของคอนกรีต ความเสียหายเริ่มต้นของคอนกรีต การเสียรูปที่เกิดจากการคัดเฉพาะแห่งของแผ่น CFRP หรือ การเกิดการรวมลักษณะการวิบัติของคอนกรีตเฉพาะแห่ง [3] ในการเปรียบเทียบแบบจำลองจะพิจารณาเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่มีความยาว CFRP มากกว่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเท่านั้น นั่นคือ ความยาวของแผ่น CFRP มีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 มม.

ผลของการใช้แบบจำลอง Popovic (วิธีที่ 1) และแบบจำลองเชิงเส้นคู่ (วิธีที่ 2) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลจากข้อมูลการทดสอบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.617 ถึง 0.910 (ค่าเฉลี่ย 0.752) และ 0.648 ถึง 0.907 (ค่าเฉลี่ย 0.762) สำหรับวิธีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายค่อนข้างมาก สำหรับวิธีที่ 1 พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ค่าการไถลที่หน่วยแรงเฉือนสูงสุด และค่า n มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.34 เมกะปาสคาล, 0.07 มม. และ 4.3 ตามลำดับ สำหรับวิธีที่ 2 พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ค่าการไถลที่หน่วยแรงเฉือนสูงสุด และค่า n มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.80 เมกะปาสคาล, 0.06 มม. และ 0.21 มม. ตามลำดับ

สำหรับการใช้แนวทางของ Dai และคณะ(2005) [3] (วิธีที่ 3) โดยการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างความเครียดของ CFRP และการไถลที่ตำแหน่งใกล้แรงกระทำตามสมการที่ (6) มีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.960 ถึง 0.996 (ค่าเฉลี่ย 0.982) ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด และค่าการไถลที่หน่วยแรงเฉือนสูงสุด มีค่าเฉลี่ย 5.09 เมกะปาสคาล และ 0.05 มม. ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลจากแบบจำลองกับข้อมูลทุกตำแหน่ง ค่า R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.315 ถึง 0.705 (ค่าเฉลี่ย 0.507)

สรุปได้ว่า ค่า R^2 ในวิธีที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก และความสัมพันธ์ของระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลของทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 6 ส่วนวิธีที่ 3 มีค่า R^2 ต่ำกว่าสองวิธีข้างต้น

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสที่คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล โดยค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสของวิธีที่ 1 วิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 มีค่าเฉลี่ย 0.927 นิวตันต่อมม., 0.841 นิวตันต่อมม. และ 0.756 นิวตันต่อมม. ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงสุดในวิธีที่ 1 และมีค่าต่ำสุดในวิธีที่ 3

สำหรับค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่คำนวณจากค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสของทั้ง 3 วิธี โดยใช้สมการที่ (11) พบว่าอัตราส่วนของกำลังยึดเหนี่ยวที่ทำนายต่อผลการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.90 ถึง 1.21 (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.03 ± 0.12), 0.86 ถึง 1.18 (0.98 ± 0.13) และ 0.78 ถึง 1.05 (0.94 ± 0.10) ตามลำดับ โดยวิธีที่ 3 ให้มีแนวโน้มในการทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ปลอดภัยมากกว่าสองวิธีแรก

ตารางที่ 1 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส และกำลังยึดเหนี่ยวจาก 3 วิธี

ตัวอย่าง	$P_{max,exp}$ (กิโลนิวตัน)	วิธีที่ 1			วิธีที่ 2			วิธีที่ 3		
		R^{2*}	G_f (นิวตัน/ มม.)	P_{max} (กิโลนิว ตัน)	R^{2*}	G_f (นิวตัน/ มม.)	P_{max} (กิโลนิว ตัน)	R^{2*}	G_f (นิวตัน/ มม.)	P_{max} (กิโลนิว ตัน)
J100	18.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J200	27.16	0.910	0.552	24.47	0.907	0.507	23.45	0.705	0.745	28.42
J300	24.38	0.694	0.513	23.59	0.698	0.475	22.70	0.502	0.465	22.45
J400-A	26.98	0.617	0.677	27.10	0.648	0.532	24.02	0.427	0.411	21.12
J400-B	32.34	0.754	1.416	39.19	0.769	1.334	38.04	0.315	0.840	30.19
J400-C	37.63	0.786	1.478	40.04	0.786	1.358	38.38	0.584	1.321	37.85
ค่าเฉลี่ย		0.752	0.927		0.762	0.841		0.507	0.756	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.109	0.479		0.098	0.461		0.149	0.364	

*หมายเหตุ: คำนวณค่า R^2 จากข้อมูลการทดสอบจากทุกตำแหน่งตรวจวัด

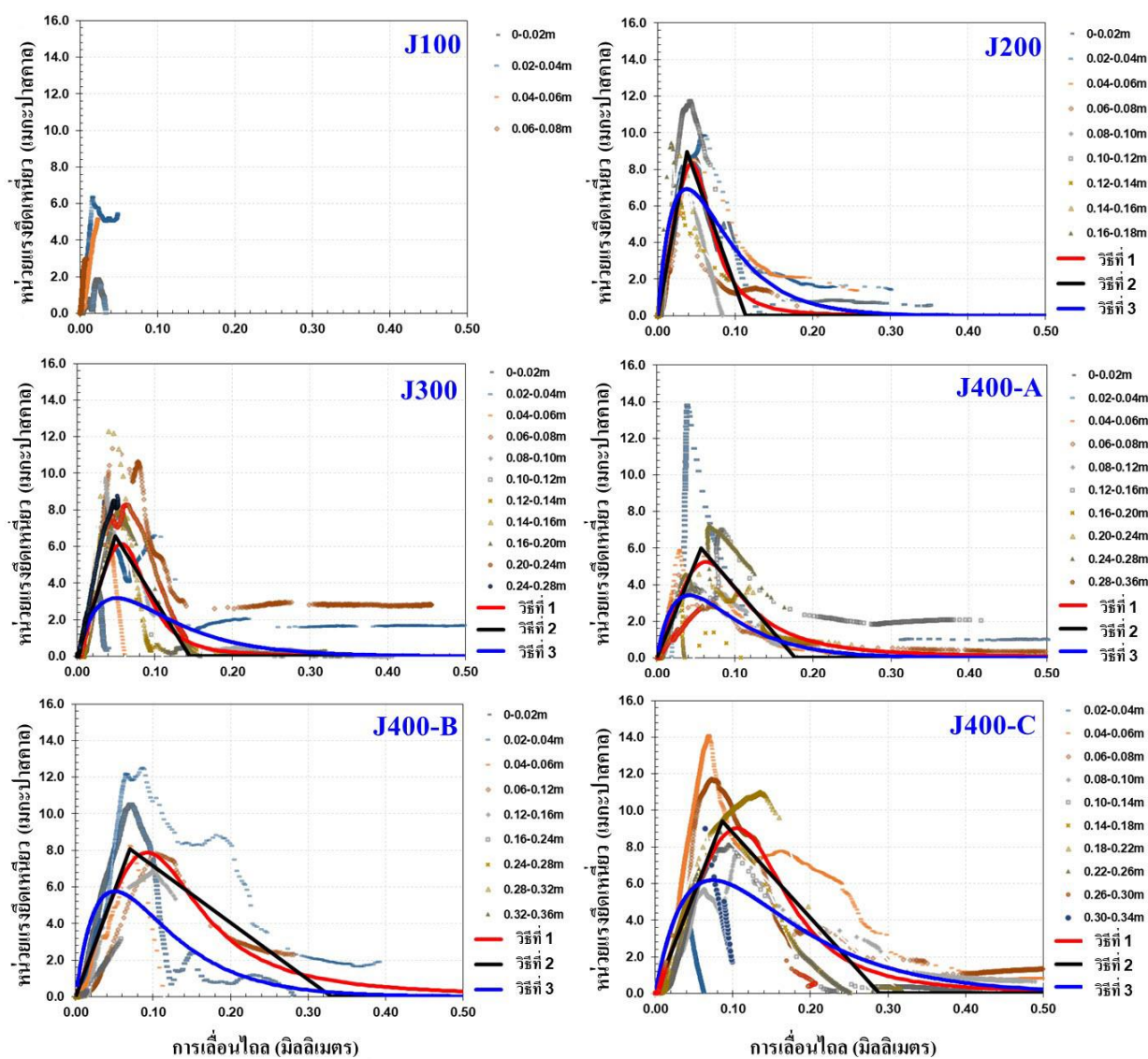
4.3 รูปแบบการวิบัติ

รูปที่ 7 แสดงการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดที่เกิดจากการหลุดล่อนที่ผิวคอนกรีตภายใต้วัสดุประสาน โดยการหลุดล่อนเกิดที่บริเวณแผ่น CFRP ใกล้ตำแหน่งแรงกระทำ และการหลุดล่อนจะขยายไปสู่ปลายอิสระอย่างรวดเร็วเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งแผ่น CFRP หลุดออกทั้งหมด โดยสังเกตได้ว่าความหนาของชั้นคอนกรีตที่หลุดล่อนออกจะค่อนข้างสม่ำเสมอ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP ที่มีความยาวยึดเหนี่ยวตั้งแต่ 100 ถึง 400 มม. ด้วยการทดสอบรอยต่อรับแรงเฉือนระยะนาบเดียว และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลอง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพระหว่างคอนกรีตและแผ่น CFRP สามารถหาได้จากการกระจายของความเครียดตามแนวแผ่น CFRP ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเหนี่ยวและความยาวของแผ่น CFRP หรือความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสูงสุดของแผ่น CFRP และความยาวของแผ่น CFRP โดยพบว่า ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 152 มม. ซึ่งสอดคล้องกับผลทำนายโดยใช้สมการของ Fib14
2. สมการของ Fib14 ทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ต่ำกว่าผลทดสอบโดยเฉลี่ย 14 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความยาวยึดเหนี่ยวสูงกว่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ
3. สมการของ ACI440.2R ทำนายค่าความเครียดของแผ่น CFRP ขณะเกิดการหลุดล่อนที่สูงกว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากทุกตัวอย่างทดสอบ
4. วิธีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการไหลด้วยแบบจำลองของ Popovic และแบบจำลองเชิงเส้นคู่มีแนวโน้มให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและกำลังยึดเหนี่ยวที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าแนวทางของ Dai และคณะ (2005) [3]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถล



รูปที่ 7 รูปแบบวิถีโดยการหลุดล่อนที่ผิวคอนกรีต (J400-A)

สัญลักษณ์

b_f	= ความกว้างของแผ่น FRP
c_1	= ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ 0.64
c_2	= ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ 2
f'_c	= ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต
f_{ctm}	= ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต
E_f	= โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น FRP
G_f	= พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส
k_b	= ตัวประกอบปรับแก้รูปร่าง
k_c	= ตัวประกอบการบดอัดของคอนกรีต
L_e	= ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ
L_f	= ความยาวยึดเหนี่ยวของแผ่น FRP
n_f	= จำนวนของแผ่น FRP
P_{max}	= กำลังยึดเหนี่ยว
s	= ค่าการไถล
s_f	= การไถลเมื่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับศูนย์
s_{max}	= การไถลเมื่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงสุด
$s(l_f)$	= ค่าการไถลที่ปลายอิสระของแผ่น FRP
$\bar{s}_{i,i+1}$	= ค่าการไถลเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง i และ $i+1$
t_f	= ความหนาของแผ่น FRP
x_i	= ระยะของแกนวัดความเครียดที่ตำแหน่ง i วัดจากปลายอิสระของแผ่น FRP
x_{i+1}	= ระยะของแกนวัดความเครียดที่ตำแหน่ง $i+1$ วัดจากปลายอิสระของแผ่น FRP
$\varepsilon_{fd,ACI}$	= ความเครียดของแผ่น FRP ที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนที่ช่วงภายใน
ε_{fu}	= ความเครียดที่จุดแตกหักของ FRP
ε_i	= ค่าความเครียดที่ตำแหน่ง i
ε_{i+1}	= ค่าความเครียดที่ตำแหน่ง $i+1$
τ	= ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยว
τ_{max}	= หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด
$\bar{\tau}_{i,i+1}$	= หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง i และ $i+1$
α	= ตัวคูณปรับลด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD/0135/2556ทุนพัฒนานักวิจัยของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RSA6080019 และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณบริษัท ชีวภัณฑ์ (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท ตรีโพรฟิต สดักเจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุและทำการติดตั้งแผ่น CFRP ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L. *FRP-strengthened RC. Structures*. John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Yao, J., Teng, J. G., and Chen, J. F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 36(2), pp. 99-113.
- [3] Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y. Development of the Nonlinear Bond Stress–Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet–Concrete Interfaces with a Simple Method. *Journal of composites for construction*, 2005, 9(1), pp. 52-64.
- [4] Fib bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. *Technical Report*, 2001.
- [5] ACI440.2R. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. *ACI Committee 440*, 2017.
- [6] Täljsten, B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1997, 17(4), pp. 319-327.
- [7] Yuan, H., Wu, Z., and Yoshizawa, H. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite plates. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE*, 2001, 18(1), pp. 27-39.
- [8] Bizindavyi, L. and Neale, K. W. Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete. *Journal of composites for construction*, 1999, 3(4), pp. 153-60.