



การเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วย CFRP

SHEAR STRENGTHENING OF PRESTRESSED CONCRETE BEAM

WITH LARGE OPENING BY CFRP

พชร ช้วยบำรุง¹ และณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์²

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

²อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP ในคานคอนกรีต *pretension* ที่มีช่องเปิดวงกลมขนาดใหญ่ โดยทำการทดสอบคานขนาดกว้าง 0.18 เมตร ลึก 0.40 เมตร ช่วงความยาว 3.80 เมตร แบบ *center point loading* จำนวน 4 ชิ้น เป็นคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 3 ชิ้น ($d_o/h = 0.54$) จากผลการทดสอบพบว่าคานอัดแรงที่มีช่องเปิดวงกลมขนาดใหญ่จะพังภายใต้แรงเฉือนมีความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง 36.27% เมื่อเทียบกับคานควบคุม ผลของการเสริมกำลังภายนอกเพื่อรับแรงเฉือนด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดและในคานที่มีช่องเปิดที่ซ่อมหลังจากวิบัติภายใต้แรงเฉือนพบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 47.68% และ 48.22% ตามลำดับเมื่อเทียบกับคานที่มีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลัง และยังสามารถเปลี่ยนลักษณะการวิบัติเป็นแบบคัตได้ นอกจากนี้งานวิจัยยังได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.0 %

คำสำคัญ: คานคอนกรีตอัดแรง, คานมีช่องเปิด, ช่องเปิดขนาดใหญ่, การเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP

ABSTRACT

This research presents an experimental investigation of shear strengthening of pretension concrete beams with large circular openings by CFRP. A total of 4 prestressed concrete beams with and without openings were constructed and tested under center-point loading. Test specimen had a cross section of 0.18x0.40 m. and a span length of 3.80 m. Three beams with circular opening had a ratio of ($d_o/h = 0.54$). Experimental results showed that beam with circular opening failed by shear at the lower load capacity of 36.27% compared to the control beam. The externally shear strengthening using CFRP in prestressed concrete beams with large opening in normally strengthening beam and in shear failure-strengthening beam had effectively increased the load capacity of 47.68% and 48.22% compared to the unstrengthened beam respectively. The mode of failure of both strengthened

beams were switched from shear failure to flexural failure. Moreover this research proposes the equation for predicting shear strength in prestressed concrete beam with large opening having the accuracy not exceed than 3%

KEYWORDS: Prestressed concrete beam, beam with opening, large opening, shear strengthening by CFRP.

1. บทนำ

การก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตอัดแรงเป็นที่นิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องด้วยการใช้คอนกรีตและเหล็กเสริมที่มีกำลังสูงกว่า การควบคุมการก่อสร้างที่ดีกว่าและเวลาที่ใช้น้อยกว่าอย่างไรก็ดีในบางครั้งจำเป็นจะต้องเจาะทำช่องเปิดสำหรับท่อของงานระบบต่างๆ ในคาน ผนัง ตำแหน่งที่ไม่ได้มีการออกแบบไว้ก่อนดังรูปที่ 1(a) การเจาะช่องเปิดนั้นมิได้ทำให้ความสามารถการรับแรงเฉือนของคานลดลงจนอาจเป็นเหตุให้เกิดการวิบัติกับโครงสร้าง[1] และส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สิน ได้จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเสริมกำลังกับโครงสร้างเหล่านั้น

การเสริมกำลังภายนอกให้กับโครงสร้างมีหลายวิธี เช่น การเสริมกำลังด้วยการหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing) การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Plate) [2] และการเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP (Fiber Reinforced Polymer) [2-7] CFRP จัดเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่อยู่กลุ่มของวัสดุ FRP ที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างดังรูปที่ 1(b) ข้อดีของวัสดุ CFRP คือมีความสามารถในการรับแรงที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และไม่ทำให้รูปทรงทางสถาปัตยกรรมเปลี่ยนแปลง เป็นต้น

การศึกษาผลกระทบของช่องเปิดและการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรงยังอยู่ในวงจำกัด ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วย FRP ในคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่แต่ เป็นผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาซึ่งทำให้กำลังรับแรงเฉือนลดลง 51% [5] การเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจาก shear failure เป็น flexure failure[6] และ CFRP ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วน $h_o/h = 0.33 - 0.50$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.9-28.8% ตามลำดับ [7] ดังนั้นการศึกษากการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วย CFRP จะช่วยเพิ่มองค์ความรู้ใหม่ๆ และเป็นประโยชน์อย่างมาก งานวิจัยนี้จะช่วยให้ทราบถึง

- 1) ผลกระทบของช่องเปิดวงกลมขนาดใหญ่ที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรง
- 2) กำลังรับแรงเฉือนและรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ด้วย CFRP
- 3) สมการทำนายกำลังรับแรงเฉือนในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่



(a) การเจาะช่องเปิดในคานคอนกรีต



(b) การเสริมกำลังด้วย FRP กับองค์อาคารต่างๆ

รูปที่ 1 การเจาะช่องเปิดและการเสริมกำลังด้วย FRP

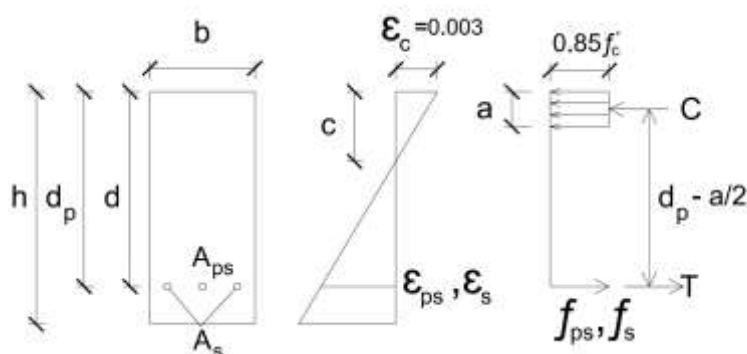
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของช่องเปิด

นิยามช่องเปิดจะพิจารณาจากพฤติกรรมของโครงสร้างเป็นหลักกล่าวคือหากช่องเปิดไม่ทำลายพฤติกรรมของคานหรือยังคงสามารถใช้พฤติกรรมแบบคานในการออกแบบได้จะนิยามช่องเปิดนั้นว่าช่องเปิดขนาดเล็ก (Small opening) แต่หากช่องเปิดส่งผลกระทบและเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคานจนไม่สามารถใช้ทฤษฎีคานในการออกแบบได้จะถือว่าช่องเปิดนั้นเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ (Large opening) [8] อย่างไรก็ตาม Mansur, M.A. (2006) [9] ได้แนะนำว่าหากช่องเปิดมีความลึกน้อยกว่า 40 % ของความลึกคาน ถือว่าช่องเปิดนั้นเป็นช่องเปิดขนาดเล็ก

2.2 กำลังรับโมเมนต์ตัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง

โมเมนต์ตัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง สามารถหาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C-T ที่สถานะประลัย ซึ่งที่สภาวะประลัยแรงอัดหลักในคอนกรีต C หาได้จากคอนกรีตเทียบเท่ารูปสี่เหลี่ยม และแรงดึง T หาได้จากผลรวมของแรงที่ได้จากเหล็กเสริมอัดแรงกับเหล็กเสริมไม่อัดแรง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน่วยการขีดหัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง

จากรูปที่ 2 โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง สามารถหาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ ดังสมการที่ 1

$$M_n = A_{ps}f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

โดยที่ A_{ps} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, d_p คือระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง, d คือระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมไม่อัดแรง, f_s คือ หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมธรรมดาขณะวิบัติ, f_{ps} คือหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ มาตรฐาน ACI318-14 [10] ได้แนะนำไว้ ดังสมการที่ 2

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2)$$

โดยที่ f_{pu} คือหน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง, r_p คือตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าเท่า 0.40 เมื่อ $0.85 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.90$ และมีค่าเท่ากับ 0.28 เมื่อ $f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$, ρ_p คืออัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง, ω คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึงมีเท่ากับ $\rho f_y/f'_c$ และ ω' คือดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดเท่ากับ $\rho' f_y/f'_c$

2.3 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง

ตามมาตรฐาน ACI318-14 [10] กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$V_n = V_c + V_s \quad (3)$$

โดยที่ V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุของหน้าตัด, V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต และ V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

2.3.1 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c)

พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงเฉือนมี 2 ลักษณะ คือการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมนกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (flexural shear cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (web shear cracking) รายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมนกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด: V_{ci}

มาตรฐาน ACI318-14 [10] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{ci} ดังสมการที่ 4

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_wd_p + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u} \quad (4)$$

โดยที่ b_w คือความกว้างตัวแกนคาน, V_d คือแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา, ΔV_u คือแรงเฉือนเพิ่มส่วน (factored shear) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา, ΔM_u คือโมเมนต์เพิ่มส่วน (factored moment) ที่มากที่สุดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา, ΔM_{cr} คือค่าโมเมนต์ที่เพิ่มเติมจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณาสามารถหาได้จากสมการที่ 5 [10]

$$\Delta M_{cr} = \frac{I}{y_t} (f_r + f_{pe} - f_d) \quad (5)$$

โดยที่ f_{pe} คือหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง และ f_d คือหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง

ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน : V_{cw}

มาตรฐาน ACI 318-14[10] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{cw} ดังสมการที่ 6

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_wd_p + V_p \quad (6)$$

โดยที่ f_{pc} คือหน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง และ V_p คือแรงประกอบย่อยในแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณา มีค่าเท่า $P \sin \alpha$

2.3.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (V_s)

กรณีกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก ต้องเสริมเหล็กกับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอก จากสมการที่ 3 เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 7

$$V_s = V_n - V_c \quad (7)$$

2.4 การเสริมกำลังภายนอกต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP

กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุของการเสริมกำลังด้วย FRP ตามมาตรฐาน ACI440.2R-08 [11] สามารถหาได้โดยการรวมกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากเหล็กเสริม และกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจาก FRP ดังแสดงในสมการที่ 8

$$V_n = (V_c + V_s + \phi_f V_f) \quad (8)$$

โดยที่ φ_f คือ ค่า Reduction Factor เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการพันเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP โดยมีค่าเท่ากับ 0.95 ถ้ารูปแบบการพันรอบคาน และเท่ากับ 0.85 ถ้ารูปแบบการพันแบบตัวยูหรือแบบ 2 ข้าง ดังรูปที่ 3

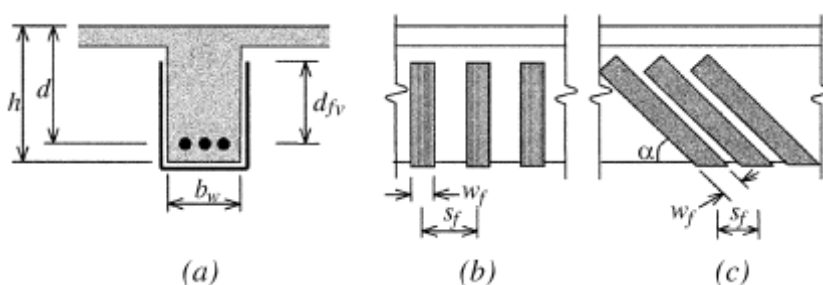


รูปที่ 3 รูปแบบการพันรอบคาน แบบตัวยูหรือแบบ 2 ข้าง [11]

ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจาก FRP, V_f ตามมาตรฐาน ACI440.2R-08 [11] สามารถหาได้จากสมการที่ 9

$$V_f = \frac{(A_{fv} \cdot f_{fe}) \cdot [(\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d_{fv}]}{s_f} \quad (9)$$

โดยที่ V_f คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของเส้นใย, A_{fv} คือพื้นที่หน้าตัดของ FRP รับแรงเฉือนเท่ากับ $(2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f)$, n_f คือ จำนวนชั้นของ FRP, t_f คือ ความหนาของ FRP, f_{fe} คือความเค้นดึงประสิทธิผลในเส้นใย, α คือมุมการติดตั้งแผ่น FRP เสริมกำลังรับแรงเฉือน, d_{fv} คือระยะจากผิวบนสุดของเส้นใยถึงระยะกึ่งกลางของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4

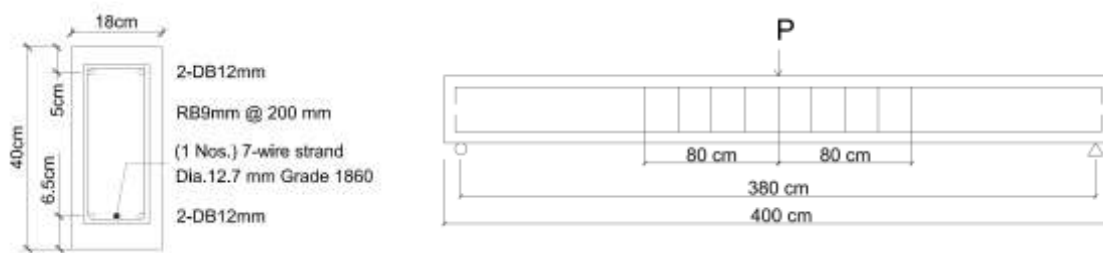


รูปที่ 4 รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้พิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP [11]

3. การทดสอบ

3.1 รายละเอียดขั้นตอนทดสอบและรูปแบบการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้คานคอนกรีตอัดแรง (pretensioned) จำนวน 4 ชิ้นมีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมเท่ากันทุกชิ้นความกว้างคาน 18 เซนติเมตร ลึก 40 เซนติเมตร ช่วงความยาว 380 เซนติเมตร เหล็กเสริมตามยาวใช้เหล็กเสริมอัดแรง 7-wire strands เกรด 1860 (มอก.420-2540) ขนาด 12.7 มม. จำนวน 1 เส้น และเหล็กเสริมไม่อัดแรงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เกรด SD40 เสริมทั้งบนและล่างอย่างละ 2 เส้น เหล็กเสริมตามขวางใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. เกรด SR24 ระยะเรียง 20 ซม. ครบคลุมระยะ 160 ซม. ช่วงกึ่งกลางคานดังรูปที่ 5 สำหรับคานที่มีช่องเปิดจะมีช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.5 ซม. ($d_o/h = 0.54$) ตำแหน่งของช่องเปิดห่างจากฐานรองรับ 50 ซม.



รูปที่ 5 รายละเอียดชิ้นทดสอบ

ชิ้นทดสอบทั้งหมดของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิด 1 ชิ้น และคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดจำนวน 3 ชิ้น ส่วนการทดสอบจะมี 5 รูปแบบได้แก่ แบบที่ 1 ชิ้นทดสอบควบคุม CB (Control Beam) เป็นการทดสอบคานที่ไม่มีช่องเปิด แบบที่ 2 ชิ้นทดสอบ BO (Beam with Opening) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง แบบที่ 3 ชิ้นทดสอบ BO-1 (Beam with Opening - 1) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง แบบที่ 4 ชิ้นทดสอบ RBO-1 (Repair and Strengthening Beam with Opening) เป็นการทดสอบคาน BO-1 ซ้ำหลังจากที่ได้ทำการทดสอบจนคานวิบัติแล้วนำมาซ่อมรอยร้าวและเสริมกำลังด้วย CFRP และแบบที่ 5 ชิ้นทดสอบ SBO (Strengthening Beam with Opening) เป็นการทดสอบคานที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย CFRP การทดสอบทุกชิ้นเป็นการทดสอบแบบ center point loading โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทีละ 300 kg พร้อมบันทึกค่าการโก่งตัวของคานและค่า strain ในเหล็กเสริมอัดแรง เหล็กเสริมไม่อัดแรง CFRP และที่ผิวคอนกรีตจนกระทั่งคานวิบัติ รูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ของคาน RBO-1 และ SBO มีรายละเอียดที่เหมือนกัน และมีมุมเท่ากับ 28 องศา ดังรูปที่ 6

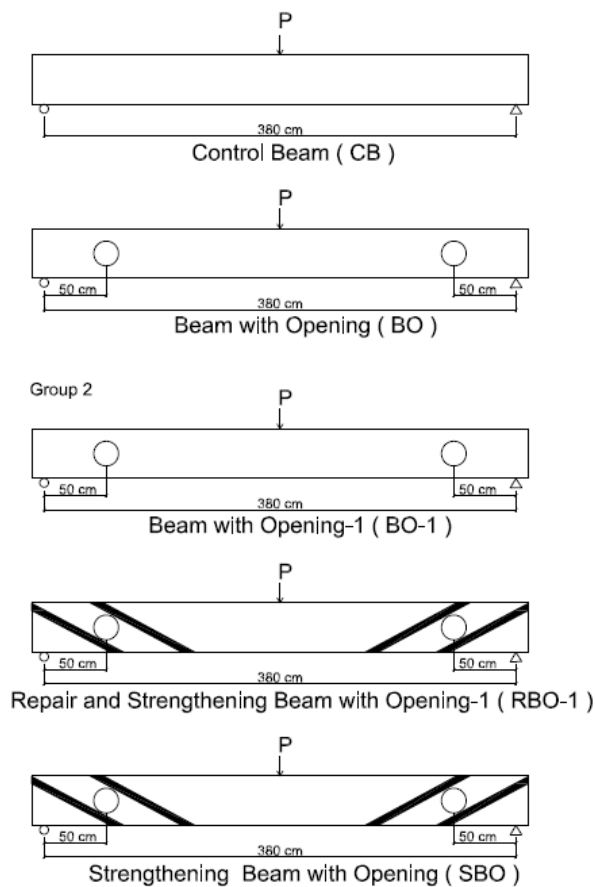
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จกำลังอัดที่ 28 วันออกแบบไว้เท่ากับ 320 ksc ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 2.5 ซม. ซึ่งในการทดสอบคาน CB และ BO มีค่า f'_c เท่ากับ 313 ksc ขณะที่คาน BO-1 , RBO-1 และ SBO มีค่า f'_c เท่ากับ 344 ksc, เหล็กเสริมอัดแรงจากการทดสอบคุณสมบัติมีกำลังครากเท่ากับ 17,931 ksc. และค่ากำลังประลัยเท่ากับ 19,552 ksc , เหล็กเสริมไม่อัดแรง DB12 มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 5,805 ksc และ RB9 มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 2,872 ksc และ CFRP ที่ใช้ในการเสริมกำลังสำหรับงานวิจัยนี้เป็น รุ่น SMARTFIBER - SHEET UT70-30 มีกำลังรับแรงดึง 35,000 ksc. โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 2,350,000 ksc. ความหนาต่อชั้นเท่ากับ 0.0167 ซม.

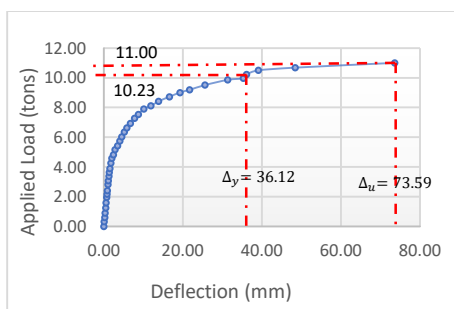
4. ผลการทดสอบ

4.1 คาน CB

จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่สถานะจุดครากมีค่าเท่ากับ 10.23 ตัน เกิดค่าการโก่งตัวที่จุดครากเท่ากับ 36.12 มม. และคานรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 11 ตัน และเกิดการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 73.59 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 7(a) ค่าความเหนียวที่เทียบจากอัตราส่วน Δ_u/Δ_y มีค่าเท่ากับ 2.04 และรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Flexural Failure ดังรูปที่ 7(b)



รูปที่ 6 รูปแบบการทดสอบ



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการโก่งตัว

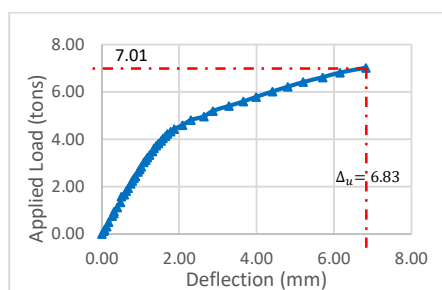


(b) การวิบัติโดยแรงคัตในคาน CB

รูปที่ 7 ขั้นตอนทดสอบ CB

4.2 คาน BO

จากการทดสอบ พบว่าคานรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 7.01 ตัน และเกิดการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 6.83 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 8(a) ส่วนรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Shear Failure และรอยร้าวเอียงทำมุม 33 องศา ดังรูปที่ 8 (b)



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัว

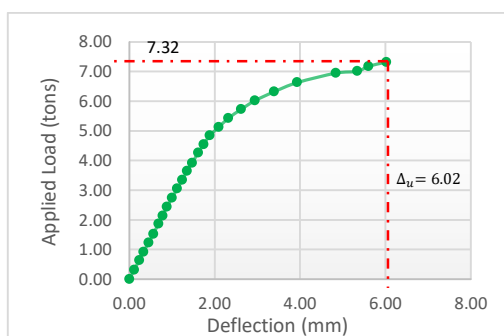


(b) การวิบัติโดยแรงเฉือนในคาน BO

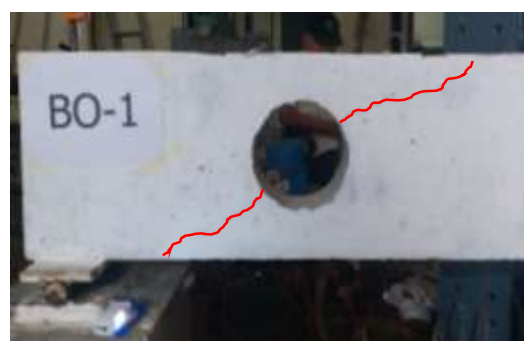
รูปที่ 8 ชิ้นทดสอบ BO

4.3 คาน BO-1

จากการทดสอบพบว่าคานรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 7.32 ตัน และเกิดการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 6.02 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 9(a) ส่วนรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Shear Failure และรอยร้าวเอียงทำมุม 35 องศา ดังรูปที่ 9 (b)



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัว

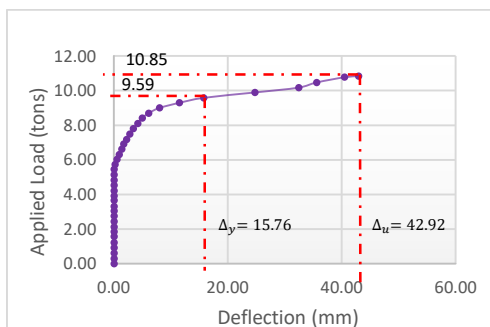


(b) การวิบัติโดยแรงเฉือนในคาน BO-1

รูปที่ 9 ชิ้นทดสอบ BO-1

4.4 คาน RBO-1

จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่สถานะจุดครากมีค่าเท่ากับ 9.59 ตัน เกิดค่าการโก่งที่จุดครากเท่ากับ 15.76 มม. และคานรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 10.85 ตัน และเกิดการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 42.92 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 10(a) ค่าความเหนียวที่เทียบจากอัตราส่วน Δ_u/Δ_y มีค่าเท่ากับ 2.72 และรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Flexural Failure ดังรูปที่ 10(b)



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัว

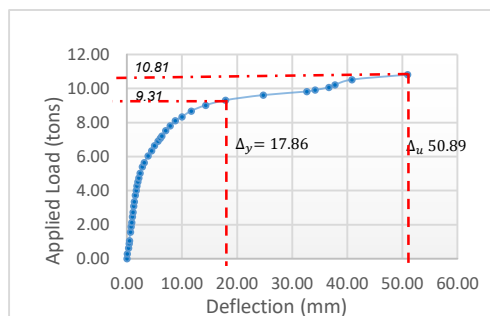


(b) การวิบัติโดยแรงคดในคาน RBO-1

รูปที่ 10 ชิ้นทดสอบ RBO-1

4.5 คาน SBO

จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่สถานะจุดครากมีค่าเท่ากับ 9.31 ตัน เกิดค่าการโก่งที่จุดครากเท่ากับ 17.86 มม. และคานรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 10.81 ตัน และเกิดการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ 50.89 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 11(a) ค่าความเหนียวที่เทียบจากอัตราส่วน Δ_u/Δ_y มีค่าเท่ากับ 2.85 และรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Flexural Failure ดังรูปที่ 11(b)



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัว



(b) การวิบัติโดยแรงคดในคาน SBO

รูปที่ 11 ชิ้นทดสอบ SBO

5. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกับค่าน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากสมการของ ACI กับสมการที่ประยุกต์จาก ACI และรูปแบบการวิบัติของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบกับค่าที่จากทฤษฎี และรูปแบบการวิบัติของชิ้นทดสอบ

Specimen	Load capacity (Experiment) (Tons)	Load capacity (*predict) (Tons)	Load capacity (**predict) (Tons)	Failure mode
CB	11	10.14	-	Flexure failure
BO	7.01	8.85	6.82	Shear failure
BO-1	7.32	9.46	7.29	Shear failure
RBO-1	10.85	10.23	-	Flexure failure
SBO	10.81	10.23	-	Flexure failure

หมายเหตุ : * predict คือค่าการรับน้ำหนักบรรทุกที่น้อยกว่าที่ได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดวิบัติภายใต้แรงคดหรือแรงเฉือนโดยใช้สมการ ACI , **predict คือค่าที่ได้จากการทำนายกำลังรับแรงเฉือนโดยการประยุกต์ใช้สมการ ACI , ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการวิเคราะห์จากทั้งสองกรณีของคาน BO และคาน BO-1 แสดงการคำนวณดังตารางที่ 5.2

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าผลกระทบของช่องเปิดขนาดใหญ่ในคานคอนกรีตอัดแรงทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานลดลงจาก 11 ตัน (CB) เหลือ 7.01 ตัน (BO) คิดเป็น 36.27% นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าทางทฤษฎี ACI ที่ใช้ทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (BO) มีค่าเท่ากับ 8.85 ตัน (คิดจากสมการที่ 6 โดยใช้ความลึกของคานรับแรงเฉือนเท่ากับ $d_p - d_o$) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 7.01 ตัน มีค่าคลาดเคลื่อนไป 26.25% ในขณะที่คาน (BO-1) ค่าทางทฤษฎี ACI ที่ใช้ทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 9.46 ตัน เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบ 7.32 ตัน มีค่าคลาดเคลื่อนมากถึง 29.23% ดังนั้นจึงได้เสนอการทำนายกำลังรับแรงเฉือนของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่โดยการประยุกต์ใช้สมการ ACI มีหลักการคิดจากลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากการวิบัติในคานที่มีช่องเปิดพบว่าจะเกิดรอยร้าวที่ขอบล่างของช่องเปิดก่อนและนำไปสู่การวิบัติทั้งขอบล่างและขอบบนตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ตำแหน่งช่องเปิดอยู่ที่กึ่งกลางความลึกคานทำให้พื้นที่คอนกรีตส่วนบนและส่วนล่างที่เหลืออยู่มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงขอเสนอปรับความลึกของพื้นที่รับแรงเฉือนเปลี่ยนจาก d_p ในสมการที่ 6 เป็น $(h - d_o)/2$ ดังสมการข้างล่างซึ่งจะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกขณะวิบัติเท่ากับ 6.82 ตันและ 7.29 ตันในคาน BO และ BO-1 ตามลำดับซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.0 %

$$V_{cw} = \left(0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}\right)b_w\left(\frac{h-d_o}{2}\right) + V_p \quad (10)$$

ตารางที่ 5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกโดยใช้สมการ ACI และสมการที่ประยุกต์จาก ACI ของคาน BO , BO-1

คานกว้าง (b_w) 18 cm. ลึก (h) 40 cm. ช่วงความยาว (L) 380 cm., ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิด (d_o) 21.5 cm., พื้นที่หน้าตัด (A) 720 cm ² , ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง (d_p) 33.5 cm.		
Specimen	สมการ ACI	ประยุกต์ใช้ ACI
BO	กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากผลรวมของแรงเฉือนและโมเมนต์คัต ; V_{ci} จากสมการที่ 4	
	$f'_c = 313 \text{ ksc}$, $b_w = 18 \text{ cm}$, $d_p = 33.5 \text{ cm}$, $d_o = 21.5 \text{ cm}$. $V_d = w_d(0.5L-x) = 241.92 \text{ kg}$, $V/M = 2.0 \text{ m}^{-1}$ $P_c = 9,730.83 \text{ kg}$ (จากผลการทดสอบ), $f_r = 2\sqrt{f'_c} = 35.38 \text{ ksc}$, $f_{pe} = P_c/A + P_{ec}/I = 40.88 \text{ ksc}$, $f_d = M_g/I = 3.15 \text{ ksc}$ $\Delta M_{cr} = \frac{1}{y_t}(f_r + f_{pe} - f_d) = 3,509.60 \text{ kg.m}$ $V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_w(d_p - d_o) + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u}$ $= 0.16\sqrt{313} \cdot 18 \cdot (33.5 - 21.5) + 241.92 + (2.0 \cdot 3,509.60)$ $= 7,872.54 \text{ kg}$	$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_w \frac{(h - d_o)}{2} + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u}$ $= 0.16\sqrt{313} \cdot 18 \cdot (40 - 21.5)/2 + 241.92 + (2.0 \cdot 3,509.60)$ $= 7,732.43 \text{ kg}$
	กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน ; V_{cw} จากสมการที่ 6	
	$f_{pc} = P_c/A = 13.52 \text{ ksc}$, $V_p = 0 \text{ kg}$ $V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w(d_p - d_o) + V_p$ $= [0.93\sqrt{313} + (0.3 \cdot 13.52)] \cdot 18 \cdot (33.5 - 21.5) + 0$ $= 4,429.70 \text{ kg (Control)}$	$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w \frac{(h - d_o)}{2} + V_p$ $= [0.93\sqrt{313} + (0.3 \cdot 13.52)] \cdot 18 \cdot (40 - 21.5)/2 + 0$ $= 3,414.56 \text{ kg (Control)}$
	$P_n = 8,859.40 \text{ kg}$	$P_n = 6,829.12 \text{ kg}$
BO-1	กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากผลรวมของแรงเฉือนและ โมเมนต์คัต ; V_{ci} จากสมการที่ 4	
	$f'_c = 344 \text{ ksc}$, $b_w = 18 \text{ cm}$, $d_p = 33.5 \text{ cm}$, $d_o = 21.5 \text{ cm}$. $V_d = w_d(0.5L-x) = 241.92 \text{ kg}$, $V/M = 2.0 \text{ m}^{-1}$ $P_c = 11,189.77 \text{ kg}$ (จากผลการทดสอบ), $f_r = 2\sqrt{f'_c} = 37.09$ ksc , $f_{pe} = P_c/A + P_{ec}/I = 47.01 \text{ ksc}$, $f_d = M_g/I = 3.15 \text{ ksc}$ $\Delta M_{cr} = \frac{1}{y_t}(f_r + f_{pe} - f_d) = 3,885.94 \text{ kg.m}$ $V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_w(d_p - d_o) + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u}$ $= 0.16\sqrt{344} \cdot 18 \cdot (33.5 - 21.5) + 241.92 + (2.0 \cdot 3,885.94)$ $= 8,654.79 \text{ kg}$	$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_w \frac{(h - d_o)}{2} + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u}$ $= 0.16\sqrt{344} \cdot 18 \cdot (40 - 21.5)/2 + 241.92 + (2.0 \cdot 3,885.94)$ $= 8,507.89 \text{ kg}$
	กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน ; V_{cw} จากสมการที่ 6	
	$f_{pc} = P_c/A = 15.54 \text{ ksc}$, $V_p = 0 \text{ kg}$ $V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w(d_p - d_o) + V_p$ $= [0.93\sqrt{344} + (0.3 \cdot 15.54)] \cdot 18 \cdot (33.5 - 21.5) + 0$ $= 4,732.85 \text{ kg (Control)}$	$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w \frac{(h - d_o)}{2} + V_p$ $= [0.93\sqrt{344} + (0.3 \cdot 15.54)] \cdot 18 \cdot (40 - 21.5)/2 + 0$ $= 3,648.24 \text{ kg (Control)}$
	$P_n = 9,465.70 \text{ kg}$	$P_n = 7,296.48 \text{ kg}$

สำหรับคาน SBO และ RBO-1 ที่เสริมกำลังภายนอกเพื่อรับแรงเฉือนด้วย CFRP ช่วยทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจาก 7.32 ตัน เป็น 10.81 ตันและ 10.85 ตัน คิดเป็น 47.68% และ 48.22% ตามลำดับ ทั้งคู่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติเป็นแบบคัตได้เหมือนคานควบคุม (CB) และมีค่าความเหนียวสูงมากถึง 2.85 และ 2.72 ตามลำดับ

6. สรุปผลการทดสอบ

1. คานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดวงกลมขนาดใหญ่ ($d_o/h = 0.54$) มีผลกระทบทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานนั้นลดลง 36.27 % เทียบกับคานควบคุมที่ไม่มีช่องเปิด และรูปแบบการวิบัติของคานเป็นแบบ Shear failure

2. สามารถเสริมกำลังรับแรงเฉือนภายนอกด้วย CFRP ให้กับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งในคานที่ยังไม่วิบัติหรือวิบัติแล้วภายใต้แรงเฉือนให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้เท่ากับ 47.68 และ 48.22 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคานที่มีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง อีกทั้งสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจาก shear failure เป็น flexure failure และมีค่าความเหนียวที่ไม่น้อยกว่าคานควบคุม

3. นำเสนอสมการที่ประยุกต์ใช้จาก ACI เพื่อทำนายความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานที่มีช่องเปิดโดยปรับความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนเป็น $(h - d_o)/2$ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.0 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณดร.ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาต่างๆ ขอขอบคุณ Smart and Bright Co.,Ltd. ที่ให้การสนับสนุนผลิตภัณฑ์ CFRP รวมทั้งบุคลากรในการติดตั้ง, SNP Post Tension Co., Ltd. ที่ให้การสนับสนุนลวดอัดแรง และ Asian Institute of Technology ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือทดสอบรวมทั้งบุคลากรงานทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mansur, M. A. and Tan, K. H. *Concrete Beams with Opening Analysis and Design*. New York: CRC Press, 1999
- [2] Ahmed, A. et al. Repair effectiveness of damaged RC beams with web opening using CFRP and steel plates. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2016, Vol.10, No.2, pp. 163-183.
- [3] Ahmed, H. A. K. Shear strengthening of reinforced concrete beams with rectangular web openings by FRP composites. *Advances in Concrete Construction*, 2014, Vol.2, No.4, pp.281-300.
- [4] Pawin, W. et al. Reinforcement of old beams with large openings at the coring and reinforced with CFRP plate in trusses. In: *21st National Convention on Civil Engineering*, Songkla, 28-30 June 2016.
- [5] Siew, C. C. et al. Experimental study on shear strengthening of RC deep beams with large openings using CFRP. In: *15th International Conference on Architecture, Structure and Civil Engineering (ICASCE)*, Antalya (Turkey), 7-8 September 2015, pp.1-7.
- [6] Pimanmas, A. Strengthening R/C Beams with Opening by Externally Installed FRP Rods: Behavior and Analysis. *Composite Structures*, 2010, Vol.92, No.8, pp.1957-1976.
- [7] Mustafa B. D. and Haider H. A. A. K. Flexural Strength of Prestressed Concrete Beams with Opening and Strengthened with CFRP Sheets. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2015, Volume 4, Issue 06, June 2015. Available from: www.ijstr.org

- [8] Pimanmas, A. *Reinforced concrete design with strut and tie model*. Bangkok: CECT, 2015
- [9] Mansur, M.A. Design of reinforced concrete beams with Web Openings. In: *6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*, Kuala Lumpur, 5-6 September 2006.
- [10] American Concrete Institute. ACI 318-14: 2014. *Building code requirements for structural concrete and Commentary*. Michigan: ACI: 2014
- [11] American Concrete Institute. ACI 440.2R-08: 2008. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structure*. Michigan: ACI: 2008