

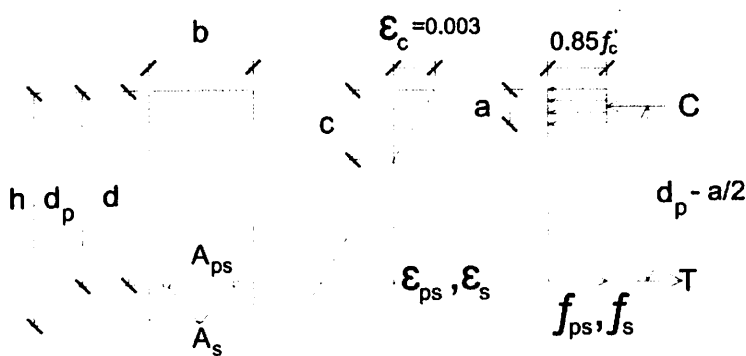
บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับงานวิจัยนี้ ส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีกำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง ทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Strut and Tie และทฤษฎีการเสริมกำลังภายนอกด้วย FRP ส่วนที่สองจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด งานวิจัยเกี่ยวกับคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย CFRP และงานวิจัยเกี่ยวกับ Strut and tie ในคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กำลังรับโมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง [1,17,21]

โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง สามารถหาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ C-T ที่สถานะประลัย ซึ่งที่สภาวะประลัยแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต C หาได้จากคอนกรีตเทียบเท่ารูปสี่เหลี่ยม และแรงดึง T หาได้จากผลรวมของแรงที่ได้จากเหล็กเสริมอัดแรงกับเหล็กเสริมไม่อัดแรง ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง

เนื่องจากแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต (C) จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง (T) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าความลึกของ Stress Block (a) ได้ดังสมการที่ 2.1

$$C = T$$

$$0.85f'_c ab = A_{ps}f_{ps} + A_s f_s$$

$$a = \frac{A_{ps}f_{ps} + A_s f_s}{0.85f'_c b} \quad (2.1)$$

จากภาพที่ 2.1 โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรงสามารถหาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$M_n = T \left(d_p - \frac{a}{2} \right) = C \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.2)$$

$$M_n = A_{ps}f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_s \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง
 d_p คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง
 f_{ps} คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2.4)$$

โดยที่ f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง
 r_p คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง
 มีค่าเท่ากับ 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 คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง $= A_{ps}/bd_p$
 ω คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง $= \rho f_y/f'_c$

ω' คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมชาติรับแรงอัด = $\rho' f_y / f'_c$

ρ คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมชาติรับแรงดึง = A_s / bd

ρ' คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมชาติรับแรงอัด = A_s' / bd

2.2 กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรง [1, 17,21]

พฤติกรรมในการรับกำลังภายใต้แรงเฉือน โดยปกติเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างแรงเฉือนกับโมเมนต์ดัด การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบกะทันหันซึ่งเป็นการวิบัติที่เปราะ ดังนั้นในการออกแบบของคานใด ๆ อกคานนั้นจะต้องไม่วิบัติโดยแรงเฉือน

การออกแบบหน้าตัดคานในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตอัดแรงจะคล้าย ๆ กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป กล่าวคือจะใช้เหล็กปลอกในการช่วยเสริมกำลังในการรับแรงเฉือนของหน้าตัดและปริมาณเหล็กปลอกต้องออกแบบให้เพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าการวิบัติเนื่องจากการเฉือนจะไม่เกิดขึ้น โดยให้คานนั้นวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดแทน เพราะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดสามารถทำนายได้ถูกต้องและแม่นยำและยังออกแบบให้เป็นการวิบัติที่เห็นขยได้

2.2.1 การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Cracking)

ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การแตกร้าวเนื่องผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (Flexural Shear Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (Web Shear Cracking)

ก) การแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่กระทำต่อคานที่มีค่ามากทั้งคู่ การแตกร้าวลักษณะนี้เริ่มจากการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ก่อน (Flexural Cracking) โดยการแตกร้าวจะเริ่มที่ผิวล่างสุดของคานและแตกร้าวอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนในช่วงแรก เมื่อผนวกกับผลของแรงเฉือน รอยแตกร้าวก็จะแตกสีกต่อไปในแนวทแยง ถ้าไม่ได้ออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้เพียงพอรอยแตกร้าวนี้จะแตกสีกเข้าไปในส่วนของคานที่รับแรงอัด (Compression Zone) พื้นที่หน้าตัดของคานที่รับแรงอัดบริเวณปลายบนของรอยแตกร้าวจึงลดลง ทำให้หน้าตัดคานบริเวณ

นั้นไม่สามารถรับแรงอัดในคอนกรีตอันเกิดมาจากผลของโมเมนต์ได้เพียงพอการวิบัติจึงเกิดขึ้น การวิบัติชนิดนี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากผลของแรงเฉือนและแรงอัด (Shear Compression Failure)

ข) การแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

การแตกร้าวชนิดนี้เป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในบริเวณที่แรงเฉือนมีค่าสูงมากและ โมเมนต์มีค่าน้อย การแตกร้าวชนิดนี้มักพบบริเวณใกล้ ๆ กับที่รองรับบริเวณปลายคานเนื่องจากแรงเฉือนมีค่ามาก และผลของแรงเฉือนนี้ก่อให้เกิดรอยแตกตามแนวทแยงในบริเวณตัวแกนคาน การแตกร้าวชนิดนี้พบมากในคานที่มีหน้าตัดรูปตัวทีและตัวไอ ซึ่งมีความกว้างของแกนน้อย

2.2.2 การออกแบบสำหรับการรับแรงเฉือน

ในการออกแบบหน้าตัดคานสำหรับแรงเฉือน จะต้องออกแบบให้กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ ϕV_n ไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ V_u ดังสมการที่ 2.5

กำลังรับแรงเฉือนที่ออกแบบ \geq กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.5)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของแรงเฉือนมีค่าเท่า 0.75

V_n คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (Nominal Shear Strength) ของหน้าตัด

ตามมาตรฐาน ACI [1] กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.6)$$

โดยที่ V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต

V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

2.2.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c)

คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ ซึ่งกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตนี้เป็นตัวกำหนดว่ามีความจำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนหรือไม่ ถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอกได้ปลอดภัยก็ไม่จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในทางตรงกันข้ามถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับแรงเฉือนภายนอก ก็จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงเฉือนมี 2 ลักษณะ คือ การแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด (Flexural Shear Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน (Web Shear Cracking) กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาจากค่าที่น้อยของ 2 ค่าต่อไปนี้ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด V_{ci} และ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน V_{cw}

ก) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด: V_{ci}

มาตรฐาน ACI [1] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{ci} ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_wd_p + V_d + \frac{\Delta V_u \Delta M_{cr}}{\Delta M_u} \quad (2.7)$$

โดยที่ V_{ci} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลรวมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์, กก.

f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก./ซม.²

b_w คือ ความกว้างของตัวแกนของคาน, ซม.

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะนี้ต้องน้อยกว่า $0.8h$ โดยที่ h คือความลึกของหน้าตัด, ซม.

V_d คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองของหน้าตัดที่พิจารณา, กก.

- ΔV_u คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.
- ΔM_u คือ โมเมนต์เพิ่มส่วน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.-ซม.
- ΔM_{cr} คือ ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มเติมจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากผลของโมเมนต์ที่หน้าตัดที่พิจารณา , กก.-ซม. โดยที่สามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

$$\Delta M_{cr} = \frac{I}{y_t} (f_r + f_{pe} - f_d) \quad (2.8)$$

- โดยที่ I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน, ซม.⁴
- y_t คือ ระยะที่วัดจากศูนย์กลางของหน้าตัดถึงผิวของคอนกรีตที่จะแตกร้าว, ซม.
- f_r คือ โมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture), กก./ซม.²
- f_{pe} คือ หน่วยแรงในผิวคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการอัดแรง, กก./ซม.²
- f_d คือ หน่วยแรงในผิวคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง, กก./ซม.²

ข) กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน : V_{cw}

มาตรฐาน ACI [1] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{cw} ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p \quad (2.9)$$

- โดยที่ V_{cw} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน, ซม.
- f_{pc} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดจากการอัดแรง, กก./ซม.²

- V_p คือ แรงประกอบย่อยแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $P \sin \alpha$ หรือ $P \alpha$, กก.
- d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง แต่ระยะต้องไม่น้อยกว่า 0.8h , ซม.

2.2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (V_s)

กรณีกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอก จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 เขียนใหม่ได้ว่า

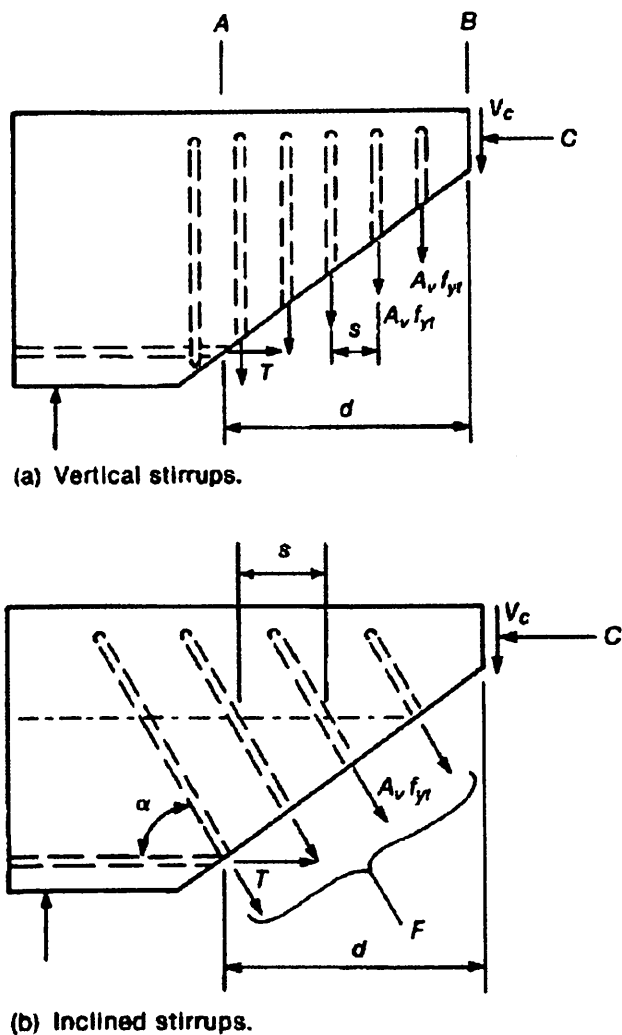
$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.10)$$

ค่า V_s สามารถคำนวณได้ดังนี้

ก) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กปลอกวางตั้งฉากกับแนววงค้ำอาคาร ดังภาพที่ 2.2(a) สามารถหาค่า V_s ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} \quad (2.11)$$

- โดยที่ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, ซม.²
- f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, กก./ซม.²
- s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, ซม.
- d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.



ภาพที่ 2.2 การเสริมเหล็กปลอกเพื่อต้านทานแรงเฉือนในคาน (James G. MacGregor,2009)

ข) กรณีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กปลอกวางเอียงกับแนวแกนขององค์อาคาร ดังภาพที่ 2.2(b) สามารถหาค่า V_s ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.12

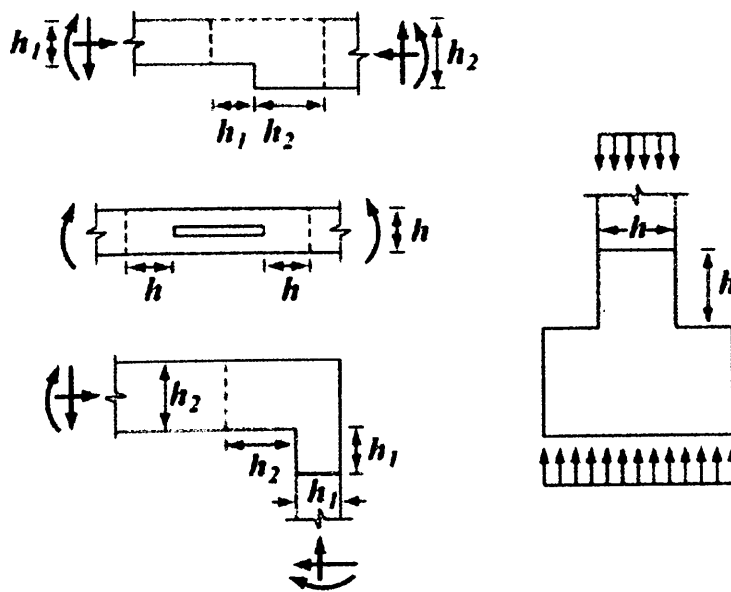
$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2.12)$$

โดยที่ α คือ มุมระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกับแนวแกนของคาน

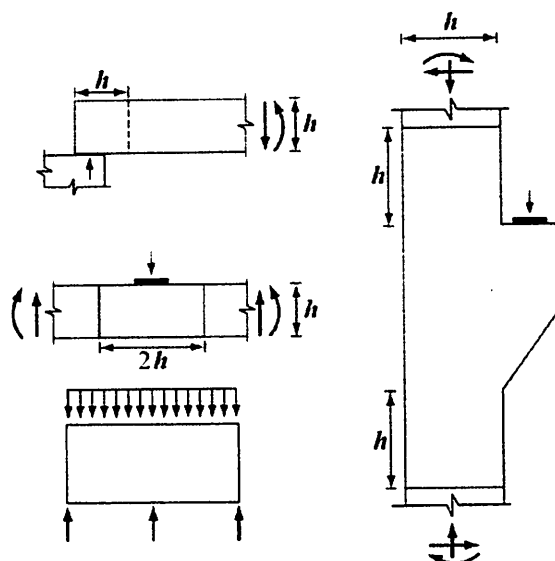
2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Strut and Tie [1, 16]

การวิเคราะห์ด้วย Strut and Tie Model สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรง เป็นวิธีที่อาศัยการจำลองโครงถัก (Truss) เพื่อแสดงทิศทางการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง หรือเรียกว่าเสมือนมีโครงถักขึ้นหนึ่งอยู่ภายในโครงสร้าง โดยปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการนั้นได้จากแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงถัก เป็นวิธีที่เห็นการไหลของแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงเหมาะกับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนและโครงสร้างทั่วไป

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนิยมตั้งอยู่บนสมมติฐานของทฤษฎีคาน (Beam Theory) โดยกำหนดให้ความเครียดแปรผันเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของหน้าตัดซึ่งเป็นผลให้ระนาบก่อนและหลังรับแรงคดยังคงเป็นระนาบ (Plane Section Remain Plane) ซึ่งสมมติฐานนี้รู้จักในนาม เบนอ์นูลลี (Bernoulli's Principle) อย่างไรก็ตามทฤษฎีคานไม่สามารถใช้กับบริเวณที่ขาดความต่อเนื่อง หรือเรียกว่า D-Region ซึ่งเป็นบริเวณที่การแปรผันของความเครียดไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของน้ำหนักบรรทุกหรือรูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

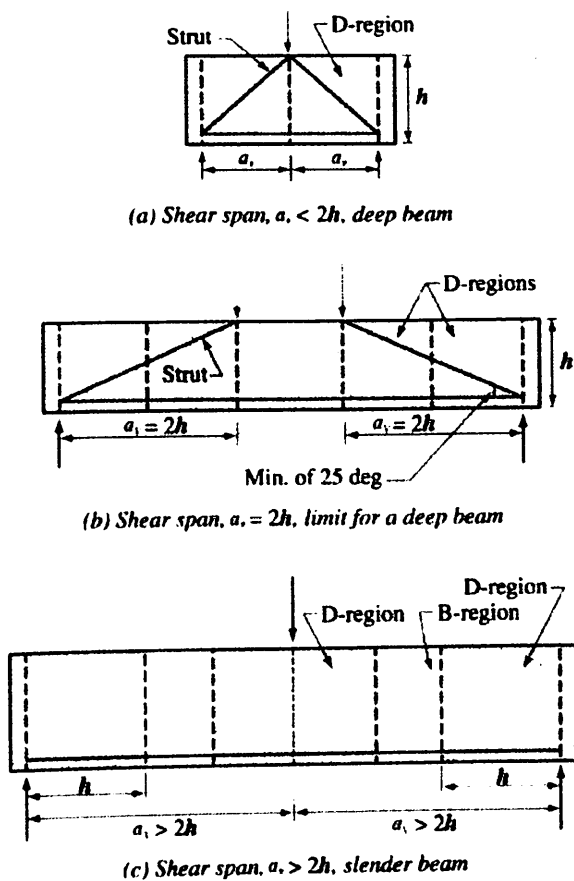


ก) รูปทรงเรขาคณิตไม่ต่อเนื่องกัน



ข) แรงที่กระทำและรูปทรงเรขาคณิตที่ไม่ต่อเนื่องกัน

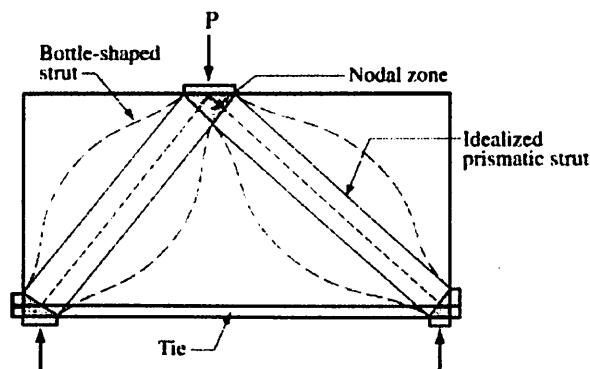
ภาพที่ 2.3 D – Region and Discontinuities.[1]



ภาพที่ 2.4 Description of Deep Beam and Slender Beams.

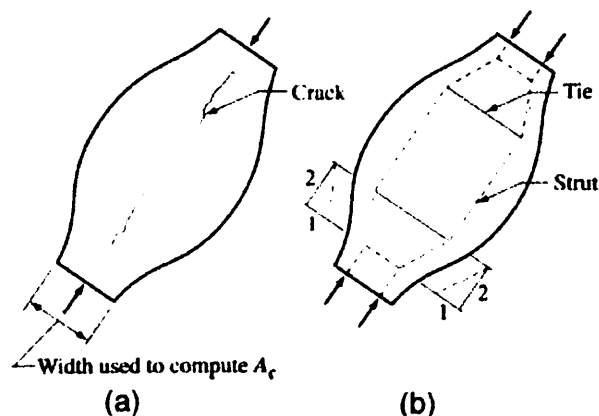
องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and Tie

องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and Tie (STM) ประกอบด้วย (1) ท่อนแรงอัด (Strut) (2) ท่อนแรงดึง (Tie) และ (3) บริเวณจุดต่อ (Nodal Zone) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and Tie Model

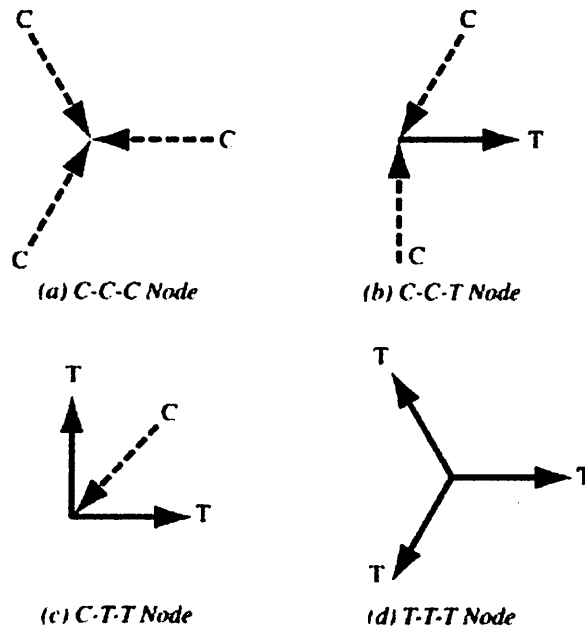
1) ท่อนแรงอัด (Strut) แสดงถึง ท่อนรับแรงอัดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายแรงกระทำแบบจุดจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง กล่าวคือ ที่ปลายทั้งสองด้านของท่อนอัดจะเป็นน้ำหนักที่กระทำแบบจุด โดยที่แนวของแรงอัดจะสามารถแผ่ออกทางด้านข้างได้อย่างอิสระที่บริเวณตรงกลางของท่อนอัด โดยเฉพาะองค์อาคารที่ไม่ได้ถูกจำกัดทางด้านขนาดและรูปร่าง ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Bottle-Shaped Strut: (a) Cracking of a Bottle-Shaped Strut and (b) Strut and Tie Model of a Bottle Shaped

2) ท่อนแรงดึง (Tie) หมายถึง ชิ้นส่วนที่รับแรงดึงของโครงข้อหมุน ได้แก่ เหล็กเสริม หรือ ลวดอัดแรง ซึ่งจะวางในตำแหน่งเดียวกับท่อนแรงดึง จะไม่พิจารณาคอนกรีตการรับแรงดึง แต่คอนกรีตที่อยู่รอบท่อนแรงดึงจะช่วยเพิ่มสติฟเนสให้กับท่อนดึงและช่วยลดการเสีรูปร่างของโครงสร้าง

3) จุดต่อ (Node หรือ Nodal Zone) หมายถึงจุดบรรจบกันของท่อนรับแรงต่างๆ ทำหน้าที่ถ่ายแรงแหว่างชิ้นส่วนเพื่อสร้างสมดุลให้เกิดขึ้น ตามทฤษฎีแล้วจุดต่อจะสมดุลเมื่อมีแรงที่กระทำที่จุดต่ออย่างน้อย 3 แรงขึ้นไป ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ประเภทของจุดต่อ

เงื่อนไขในการออกแบบ STM

กำลังของท่อนอัด ท่อนดึง และจุดต่อ ต้องผ่านเงื่อนไขดังนี้

$$F_u \leq \phi F_n \quad (2.13)$$

โดยที่ F_n คือ กำลังของท่อนแรงอัด ท่อนแรงดึง และจุดต่อ

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังเท่ากับ 0.75 (ทั้งท่อนแรงอัด ท่อนแรงดึง และจุดต่อ)

F_u คือ แรงที่เกิดขึ้นในท่อนอัด ท่อนดึง และจุดต่อที่สภาวะประลัย

1) กำลังของท่อนแรงอัด , F_{ns}

กำลังของท่อนแรงอัดเป็นผลคูณระหว่างพื้นที่ของท่อนแรงอัดที่น้อยกว่าระหว่างปลายทั้งสองด้านของท่อนแรงอัดกับกำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของท่อนแรงอัด ดังสมการที่ 2.14

$$F_{ns} = f_{ce}A_{cs} \quad (2.14)$$

โดยที่ A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนอัดที่น้อยกว่าระหว่างหน้าตัดที่ปลายทั้งสองด้านของท่อนอัด

f_{ce} คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิผล $= 0.85\beta_s f'_c$

เมื่อ β_s คือ ค่าตัวคูณลดกำลังของท่อนแรงอัดซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและการเสริมเหล็กในท่อนแรงอัด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวคูณลดกำลังของท่อนแรงอัด β_s [1]

ท่อนแรงอัด , $f_{cu} = 0.85\beta_s f'_c$	β_s	
ทรงเหลี่ยม (Prismatic Strut)	1.00	
ทรงขวด (Bottle Shaped Struts)	มีการเสริมเหล็กพิเศษ	0.75
	ไม่มีการเสริมเหล็ก	0.60λ
ท่อนแรงอัดที่อยู่ในชั้นส่วนที่รับแรงดึง หรืออยู่ในชั้นส่วนของปีกที่รับแรงดึง	0.40	
กรณีอื่น	0.60	

λ^* เป็นตัวคูณปรับแก้เท่ากับ 1.00 สำหรับคอนกรีตปกติ 0.85 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทรายมวลเบาในการผสม 0.75 สำหรับคอนกรีตมวลเบาทุกประเภท

สำหรับกรณีที่ท่อนอัดมีลักษณะทรงขวด (Bottle Shaped) มาตรฐาน ACI [1] กำหนดให้เสริมเหล็กพิเศษเพื่อป้องกันการแตกร้าวในท่อนอัด โดยปริมาณเหล็กเสริมหาได้จากสมการที่ 2.15

$$\sum \frac{A_{vi}}{b_s i} \sin \gamma_i \geq 0.003 \quad (2.15)$$

2) กำลังของท่อนแรงดึง , F_{nt}

กำลังท่อนแรงดึง คำนวณได้จากกำลังของเหล็กเสริมและลวดอัดแรง (ถ้ามี) ดังสมการที่ 2.16

$$F_{nt} = A_{st}f_y + A_{ps}(f_{pe} + \Delta f_p) \quad (2.16)$$

- โดยที่ A_{st} คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมไม่อัดแรง, ซม²
 A_{ps} คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม²
 f_y คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริมไม่อัดแรง
 f_{pe} คือ หน่วยแรงประสิทธิผลของลวดอัดแรง
 Δf_p คือ หน่วยแรงในลวดอัดแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกประลัย

โดยในสมการข้างต้น ($f_{pe} + \Delta f_p$) จะต้องมีค่าไม่มากกว่ากำลังที่จุดครากของลวดอัดแรง (f_{py}) และสำหรับกรณีที่เป็น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เทอมนีจะมีค่าเท่าศูนย์

3) กำลังของจุดต่อ, F_{nn}

กำลังของจุดต่อคำนวณจากสมการที่ 2.17

$$F_{nn} = f_{cu} A_n \quad (2.17)$$

- โดยที่ f_{cu} คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของจุดต่อ $= 0.85 \beta_n f'_c$
 A_n คือ พื้นที่ของจุดต่อในทิศทางที่ตั้งฉากกับท่อนแรงอัดหรือท่อนแรงดึงที่มาบรรจบ
เมื่อ β_n คือ ค่าตัวคูณลดกำลังของจุดต่อซึ่งเกิดจากความไม่สอดคล้องกันของหน่วยแรงในท่อนอัดและท่อนแรงดึงที่มาบรรจบกันที่จุดต่อซึ่งมีค่าตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวคูณลดกำลังของจุดต่อ β_n [1]

ชนิดของจุดต่อ	สัญลักษณ์	β_n
รับแรงอัดอย่างเดียว ไม่มีชิ้นส่วนรับแรงดึงมากระทำ	C-C-C	1.0
รับแรงอัดและรับแรงดึง 1 แนว	C-C-T	0.8
รับแรงอัดและรับแรงดึง 2 แนว หรือมากกว่า	C-T-T	0.6

2.4 การเสริมกำลังภายนอกเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP [2]

กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุของการเสริมกำลังด้วย FRP สามารถหาได้โดยการรวมกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากเหล็กเสริมและ กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจาก FRP ดังแสดงในสมการที่ 2.18

$$V_n = (V_c + V_s + \Psi_f V_f) \quad (2.18)$$

โดยที่ Ψ_f คือ ค่า Reduction Factor เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบการพันเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP โดยมีค่าเท่ากับ 0.95 ถ้ารูปแบบการพันรอบคาน และเท่ากับ 0.85 ถ้ารูปแบบการพันแบบตัวยู หรือแบบ 2 ข้าง ดังภาพที่ 2.8

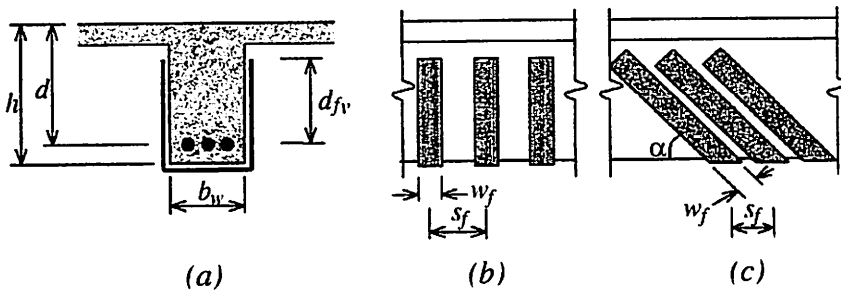


ภาพที่ 2.8 รูปแบบการพันเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP [2]

ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจาก FRP , V_f สามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

$$V_f = \frac{(A_{fv} \cdot f_{fe}) \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d_{fv}}{s_f} \quad (2.19)$$

โดยที่	V_f	คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของ FRP
	A_{fv}	คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่น FRP เพื่อรับแรงเฉือน $A_{fv} = 2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f$
	f_{fe}	คือ ความเค้นดึงประสิทธิผลใน FRP $= E_f \cdot \epsilon_{fe}$
	α	คือ มุมการติดตั้งของแผ่น FRP เสริมกำลังรับแรงเฉือน (องศา)
	d_{fv}	คือ ระยะจากผิวบนสุดของ FRP ถึงระยะกึ่งกลางของเหล็กเสริม
	s_f	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่น FRP ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 รายละเอียดและสัญลักษณ์ที่ใช้พิจารณากำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP [2]

ความเครียดประสิทธิผล ϵ_{fe} ที่ใช้ออกแบบการเสริมกำลังตามมาตรฐาน ACI 440.2R-08 [2] ได้แบ่งการใช้ค่าความเครียดของ FRP ออกเป็น 2 ประเภทตามรูปแบบการติดตั้งสำหรับเสริมกำลังรับแรงเฉือน ดังภาพที่ 2.8

1) พันรอบคาน (Completely Wrapped Members) ใช้ความเครียดประสิทธิผลเท่ากับ

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq (0.75 \cdot \epsilon_{fu}) \quad (2.20)$$

2) พันแบบรูปตัว U หรือ พัน 2 ด้าน (Bonded U-Wrapped or Bonded Face Plies) ใช้ความเครียดประสิทธิผลเท่ากับ

$$\epsilon_{fe} = (K_v \cdot \epsilon_{fu}) \leq 0.004 \quad (2.21)$$

โดยที่ K_v คือ สัมประสิทธิ์ลดค่าของการยึดเหนี่ยวสามารถหาได้จากสมการที่ 2.22

$$K_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11,900 \cdot \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (\text{SI units}) \quad (2.22)$$

เมื่อ k_1 คือ ตัวคูณลดกำลังของคอนกรีตสำหรับการคำนวณรับแรงเฉือนของ FRP หาได้จากสมการที่ 2.23

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.23)$$

k_2 คือตัวคูณลดกำลังของรูปแบบการติดตั้ง FRP รับแรงเฉือนหาได้จากสมการที่ 2.24

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{สำหรับการพันแบบรูปตัว U} \\ \frac{d_{fv} - (2 \cdot L_e)}{d_{fv}} & \text{สำหรับการพัน 2 ด้าน} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\text{ความยาวของการยึดเหนี่ยว, } L_e = \frac{23,300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0.58}} \quad (2.25)$$

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้แก่ ผลการศึกษาช่องเปิดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรง การเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด และการศึกษาวิธี Strut and Tie ของคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 ผลการศึกษาช่องเปิดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรง

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของช่องเปิดในคานคอนกรีตได้มีการศึกษาโดย Yang K.H. et al. (2006) ได้ศึกษาผลกระทบของช่องเปิดในคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมในคานคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังอัดสูงคำนึงถึงผลของกำลังอัดคอนกรีต, อัตราส่วน $\frac{a}{h}$ และ ขนาดของช่องเปิด พบว่าขนาดของช่องเปิดจะมีผลต่อการโก่งตัวของคานอย่างมากหลังเกิดรอยร้าวแนวทแยงในคาน ช่องเปิดในคานมีผลทำให้ Ultimate Shear Strength ลดลงอย่างมาก, Sheikh, S.A.A. (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงคดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด โดยรูปทรงของช่องเปิดที่ศึกษาได้แก่ ช่องเปิดรูปทรงกลม, ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส, ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และพิจารณาผลของขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดที่แตกต่างกัน พบว่าตำแหน่งช่องเปิดที่มีผลกระทบมากที่สุดคือบริเวณ Shear Zone ช่องเปิดรูปทรงกลมมีผลต่อการลดลงของค่า Ultimate Load น้อยที่สุด คานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ณ ตำแหน่ง Flexural Zone มีผลทำให้ Ultimate Load ลดลง 1.5 % และ 10% ตามลำดับ ส่วนช่องเปิดขนาดเล็กและขนาดใหญ่อยู่บริเวณ Shear Zone ทำให้ Ultimate Load ลดลงเท่ากับ 2.5 % และ 64 % ตามลำดับ, Mustafa, B.D. et al. (2015) ศึกษาการเสริมกำลังด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($h/H = 0.333$) และช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($h/H = 0.333 - 0.5$) ตำแหน่งช่องเปิดอยู่ที่กลางคาน พบว่าช่องเปิดมีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานลดลง 5.5% และ 5.5-33.1% ตามลำดับ, S.C.Chin et al. (2015) ศึกษาการเสริมกำลังเพื่อด้านทานแรงเฉือน โดยใช้ CFRP ในคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิดทรงกลมขนาดใหญ่ ณ ตำแหน่ง Shear Zone มี

ค่าอัตราส่วน $\frac{a}{h}$ เท่ากับ 0.83 มีอัตราส่วน Opening Diameter to Depth Ratio ($\frac{d}{h}$) เท่ากับ 0.45 ซึ่งเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ ผลที่ได้คือคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่บริเวณ Shear Zone และไม่เสริมกำลังจะมีลักษณะรอยร้าวแบบ Frame Type Failure และมีกำลังลดลง 51% เมื่อเทียบกับคานควบคุม, Haider, A. et al. (2016) ศึกษาการเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($h/H = 0.333$) และช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($h/H = 0.333 - 0.5$) พบว่าช่องเปิดมีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานลดลง 31.9% และ 41.1-63.2% ตามลำดับ

ผลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับช่องเปิดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงทำให้ทราบว่าตำแหน่งของช่องเปิด ณ ตำแหน่ง Shear Zone และขนาดของช่องเปิดที่ใหญ่มีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานลดลงอย่างมาก และรูปแบบการวิบัติก็เปลี่ยนไปจากเดิมกลายเป็น Shear Failure

2.5.2 การเสริมกำลังด้วย CFRP ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด

ผลงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วย CFRP ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดมีการศึกษาโดย Abdalla H.A. et al. (2003) ศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดด้วย Composite Sheet ช่องเปิดอยู่ตำแหน่ง Shear Zone พบว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP กับคานที่มีช่องเปิดช่วยเพิ่มค่า Ultimate Capacity ของคานอย่างมาก ถ้าช่องเปิดมีขนาดเล็ก CFRP ก็จะช่วยเพิ่มให้กำลังกลับมาดังเดิม ส่วนช่องเปิดขนาดใหญ่จะช่วยเพิ่มค่า Ultimate Capacity ประมาณ 42 - 74% เมื่อเทียบกับคานควบคุม, Maaddawy, T.E. (2009) ได้ศึกษาการเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วย FRP Composite ในคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด โดยพิจารณาผลของขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดรูปทรงที่ต่างกัน ผลที่ได้คือ คานมีช่องเปิดและเสริมกำลังด้วย CFRP จะช่วยเพิ่มค่า Shear Strength อยู่ในช่วงระหว่าง 66% - 71% เมื่อเทียบกับคานควบคุม และเกิดการวิบัติแบบ Diagonal Shear Crack ที่คอร์ดบนและคอร์ดล่างของช่องเปิดในคานทุกตัวที่มีการเสริมกำลัง, Kareem, A.H.A (2014) ศึกษาการเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วยวัสดุ FRP ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดทรงสี่เหลี่ยม ณ ตำแหน่ง Shear Zone โดยศึกษาขนาดช่องเปิดที่ต่างกัน ส่วนรูปแบบการเสริมกำลังของ FRP มีทั้งแบบ Sheet, Strips, U-Shape Strips และ U-Shape Strips with Bundles ผลที่ได้คือ คานที่มีช่องเปิด ณ ตำแหน่ง Shear Zone จะมีผลทำให้ Capacity ลดลงอย่างมาก การเพิ่มขนาดช่องเปิดทำให้ค่า Capacity ของคานลดลงอย่างมาก คานตัวอย่างทุกตัวจะเกิดการวิบัติแบบ Shear Failure ซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมกับ Diagonal Shear Crack ที่บริเวณรอบช่องเปิดและจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ FRP ที่ใช้เสริมกำลังในคานมีช่องเปิดจะช่วยเพิ่มค่า Shear Strength ประมาณ 25% - 90%

ขึ้นอยู่กับลักษณะของการเสริมกำลัง, S.C.Chin et al. (2015) ศึกษาการเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงเฉือนโดยใช้ CFRP ในคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมช่องเปิดทรงกลมขนาดใหญ่ ณ ตำแหน่ง Shear Zone พบว่าการเสริมกำลังด้วย CFRP ช่วยเพิ่มกำลังให้กับคานเท่ากับ 56% เมื่อเทียบกับคานควบคุม และลักษณะการวิบัติจะเป็นแบบ Beam Type Failure, Mustafa B et al. (2015) ศึกษาการเสริมกำลังด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรง(Pretension) ที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($h/H = 0.333$) และช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($h/H = 0.333 - 0.5$) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน พบว่าผลของการเสริมกำลังช่วยให้กำลังของคานเพิ่มขึ้น 10.9- 28.8% เมื่อเทียบกับคานที่มีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลัง, Haider, A. et al. (2016) ศึกษาการเสริมกำลังเพื่อต้านทานแรงเฉือนด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($h/H = 0.333$) และช่องเปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($h/H = 0.333 - 0.5$) พบว่าผลของการเสริมกำลังช่วยให้กำลังของคานเพิ่มขึ้น 63.5-97.3 % เมื่อเทียบกับคานที่มีช่องเปิดที่ไม่เสริมกำลัง

จากผลงานวิจัยที่ศึกษาถึงการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดพบว่า CFRP เป็นวัสดุเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มกำลังให้กับคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของการเสริมกำลัง

2.5.3 วิธี Strut and Tie ในคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด

วิธี Strut and Tie เป็นวิธีที่เหมาะสมวิธีหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับ Strut and Tie ได้แก่ Wu, T. et al. (2009) ได้ศึกษาการจำลองโมเดลด้วยวิธี Strut and Tie ตามมาตรฐาน ACI 318 -02 ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อเนื่องที่มีช่องเปิดแล้วนำผลที่ได้จากทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลทดสอบ ตัวอย่างคานคอนกรีตที่ใช้มีทั้งหมด 2 ตัวอย่าง ทำการจำลองโมเดลเพื่อหาแรงภายในและรายละเอียดการเสริมเหล็กในคานโดยใช้ Strut and Tie จากนั้นจึงทำการทดสอบพบว่า Ultimate Load ที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่มากกว่าที่ได้จากการทฤษฎี Strut and Tie อยู่ประมาณ 40 % แสดงให้เห็นว่าวิธี Strut and Tie มีความปลอดภัย และ Strut and Tie Model ครอบคลุมลักษณะรอยร้าวและรูปแบบการวิบัติอย่างมาก

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับ Strut and tie ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดในคานนั้น Strut and Tie สามารถวิเคราะห์แนวแรงภายในที่เกิดขึ้นในคาน ประเมินรูปแบบของรอยร้าวที่เกิดขึ้น และ ลักษณะการวิบัติของคานได้

ดังนั้นจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดสรุปได้ว่า ช่องเปิดขนาดใหญ่มีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักและความแข็งแรงลดลงอย่างมาก โดยตำแหน่งช่องเปิดที่มีผลกับกำลังของคานมากที่สุดคือบริเวณ Shear Zone และการเสริมกำลังด้วย CFRP นั้นสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดี ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของการเสริมกำลังว่าเป็นแบบใด และการใช้ Strut and Tie เพื่อจำลองลักษณะการถ่ายแรงภายในของคานจะนำมาซึ่งรูปแบบของการเสริมกำลังด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดทรงกลมขนาดใหญ่ได้ดี