



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

พฤติกรรม โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดวงกลม Bending and shear behavior of reinforced concrete beams with circular openings

อิทธิพงษ์ พันธุ์นิกุล¹ เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย¹ ธนภร ทวีวุฒิ^{1*} สหชัย แก่นอากาศ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

² บริษัท เคอีดี จำกัด อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

Ittiphong Phannikul¹ Griengsak Keawkulchai¹ Thnabhorn Thaveevouthti^{1*} Sahachai Kanarkard²

¹ Faculty of Engineering, Ubonratchathani University 34190

² KED Company Co.Ltd., Amphur Muang, Khonkaen 40000

* Corresponding author.

E-mail: thanabhorn.t@ubu.ac.th; Telephone: 085-9294271

วันที่รับบทความ 19 มิถุนายน 2568 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 6 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ 20 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

การออกแบบและศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด เป็นการศึกษาเพื่อสร้างเครื่องมือในการออกแบบเปรียบเทียบพฤติกรรมจริง ให้ทราบถึงกำลังที่ลดลงและลักษณะการวิบัติเมื่อมีการเจาะช่องเปิด โดยที่ขนาดไม่ใหญ่กว่าร้อยละ 40 ของความลึกคาน ในการวิจัยนี้ได้เลือกคาน 6 ตัวอย่างที่มีช่วงความยาว 3.00 เมตร ทดสอบรับน้ำหนัก ประกอบด้วยตัวอย่างที่ 1 คานตามมาตรฐาน ACI-318-11; ตัวอย่างที่ 2 คานตามมาตรฐาน ว.ส.ท.(2564); ตัวอย่างที่ 3 คานมีช่องเปิดรูปวงกลมเหนือแกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดล้วน; ตัวอย่างที่ 4 คานมีช่องเปิดรูปวงกลมใต้แกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดล้วน; ตัวอย่างที่ 5 คานมีช่องเปิดรูปวงกลมเหนือแกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือน และ ตัวอย่างที่ 6 คานมีช่องเปิดรูปวงกลมใต้แกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือน ซึ่งจากการวิจัยพบว่าคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กในตัวอย่างที่ 3 และ 4 สามารถรับน้ำหนักปลอดภัยถึงกำลังประลัย และมีลักษณะการแตกร้าวคล้ายกับคานตัวอย่างที่ 1 และ 2 ขณะที่คานตัวอย่างที่ 5 และ 6 ปลอดภัยถึงกำลังประลัยเช่นเดียวกัน แต่พบการแตกร้าวจากท้องคานทแยงเข้าสู่ศูนย์กลางของช่องเปิด

คำสำคัญ

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก หน่วยแรง ช่องเปิด การแตกร้าว การพังทลาย

Abstract

The main purpose of this research is to design and to study the effects of reinforced concrete beams with opening (no greater than 40 % of depth beam) to strength, and failure. Six sample beams with span length 3.00 meters were tested: 1) ACI-318-11 's beam; 2) E.I.T.(2564) 's Code beam; 3) beam with small circular opening upper neutral axis, in the case of pure bending; 4) beam with small circular opening under neutral axis beam in the case of pure bending; 5) beam with small circular opening upper neutral axis beam in the case of combined bending and shear; and 6) beam with small circular opening under neutral axis, in the case of combined bending and shear. The results showed that the samples 3 and 4 yielded safety load capacity which exceed ultimate design strength and the failure is similar to the samples 1 and 2. Similar results are obtained from sample 5 and 6. However, diagonal crack started from the bottom of the beams 4 and 6 toward the center of opening.

Keywords

reinforced concrete beam; strengthening; opening; diagonal crack; failure.

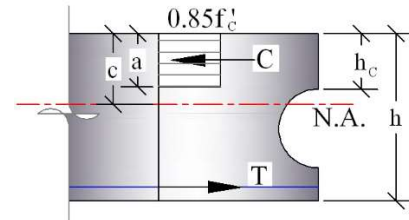
1. คำนำ

ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดเพื่อให้ระบบท่อต่างๆ วางผ่าน ส่วนใหญ่ออกแบบโดยละเอียดพิจารณาผลของช่องเปิดที่ทำให้ลดกำลังคาน แต่จะพิจารณาช่องเปิดที่เจาะทะลุผ่านคานมีขนาดเล็กหรือใหญ่ หากมีขนาดเล็กก็วางตำแหน่งช่องเปิดอยู่ต่ำกว่าแนวแกนสะเทินของคานเพื่อจะได้ไม่ต้องลดกำลังคาน (ตามสมมติฐานคอนกรีตไม่ช่วยรับแรงดึง) แต่หากวางเหนือแกนสะเทินผู้ออกแบบจะพยายามเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ หรือหากมีช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่ก็ให้ขยายหน้าตัดคานใหม่แทน ปัญหาส่วนใหญ่ผู้ออกแบบไม่เชื่อมั่นในพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของคาน เช่น การแอ่นตัว ความเค้นที่มากที่มุมขอบช่องเปิด (stress concentration) การวิจัยนี้จึงศึกษาการออกแบบคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กและออกแบบตัวอย่างคานที่มีช่องเปิดในกรณีรับโมเมนต์ล้วน และโมเมนต์ร่วมกับแรงเฉือน เปรียบเทียบกับคานที่ไม่มีช่องเปิด เพื่อศึกษาพฤติกรรมเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกของคาน

2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะช่องเปิดในคานมีหลายรูปแบบ Prentzas [6] ได้ศึกษาพบว่าส่วนใหญ่ช่องเปิดมีรูปแบบเป็น วงกลม สี่เหลี่ยม หลายเหลี่ยม และรูปร่างใดๆ แต่ส่วนใหญ่ที่พบมากที่สุดคือรูปร่างวงกลมเพราะใช้สำหรับงานระบบท่อส่งผ่านและรูปร่างสี่เหลี่ยมซึ่งใช้สำหรับงานระบบท่อเครื่องปรับอากาศ Mansur และ Hasnat [3] ได้แบ่งขนาดช่องเปิดจะแบ่งเป็น 2 ขนาดคือขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก โดยที่รูปร่างช่องเปิด มีรูปวงกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วน Somes และ Corley [7] อธิบายว่าช่องเปิดรูปวงกลมถ้ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 0.25 เท่าของความลึกคานจัดว่าเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ ส่วน Mansur และ Tan [5] อธิบายว่าหากช่องเปิดมีลักษณะเป็นไปตามทฤษฎีของคาน ก็จัดว่าเป็นช่องเปิดขนาดเล็ก โดยถ้าความลึกหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่า ร้อยละ 40 ของความลึกคานจะถือว่าเป็นช่องเปิดขนาดเล็ก สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบคานได้ แต่ในบริเวณมุมของช่องเปิดเพื่อป้องกันการเกิดความเค้นที่มากที่มุม (stress concentration) ให้เสริม

เหล็กกันร้าวป้องกันการแตกร้าวก่อนการวิบัติ ในการออกแบบโดยวิธีกำลังประลัย ทราบได้ว่าความลึกที่เป็นพื้นที่รับความเค้นอัดของคานเท่ากับระยะ a จากรูปที่ 1 ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (1)



รูปที่ 1 การกระจายความเค้นคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัย

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (1)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่เหล็กเสริมรับแรงดึง(cm²); f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม(ksc); f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ksc); b = ความกว้างของคาน ; (cm)

Mansur และ Tan [4] อธิบายว่าหากค่า h_c (จากรูปที่ 1) มากกว่าค่า a หรือเป็นไปตามสมการที่ (2) ก็ไม่จำเป็นต้องลดกำลังของคาน

$$h_c \geq \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2)$$

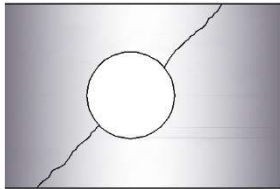
และสามารถหา M_n = กำลังระบุของโมเมนต์ (nominal strength) ได้ตามสมการที่ (3)

$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

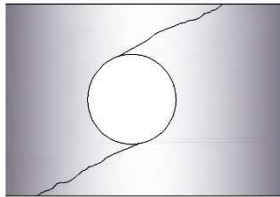
หาก $h_c < a$ จำเป็นต้องลดกำลังของคานโดยใช้ M_n ตามสมการที่ (4)

$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{h_c}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{h_c}{2} \right) \quad (4)$$

Mansur [3] อธิบายว่าคานาที่รับแรงเฉือนมีลักษณะการวิบัติ 2 แบบ คือ แบบที่ 1. วิบัติแบบคาน (Beam-type failure) มีรอยร้าวเข้าสู่ศูนย์กลางวงกลมตามรูปที่ 2 (ก) และแบบที่ 2. วิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure) มีรอยร้าวไม่เข้าสู่ศูนย์กลางวงกลมมีลักษณะเป็นแตกอิสระตามรูปที่ 2 (ข)



(ก) การวิบัติแบบคาน



(ข) การวิบัติแบบโครงข้อแข็ง

รูปที่ 2 การวิบัติจากแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต V_c ที่รับได้เมื่อมีช่องเปิดเท่ากับ

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b(d - d_0) \quad (5)$$

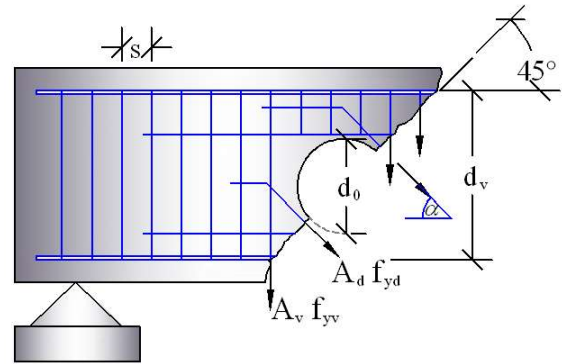
โดยที่ d_0 = ขนาดของช่องเปิด (cm)

ตามรูปที่ 3 กำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก V_s กรณีการวิบัติแบบคาน

$$V_s = V_{sv} + V_{sd} = \frac{A_v f_{yv}}{s} (d_v - d_0) + A_d f_{yd} \sin \alpha \quad (6)$$

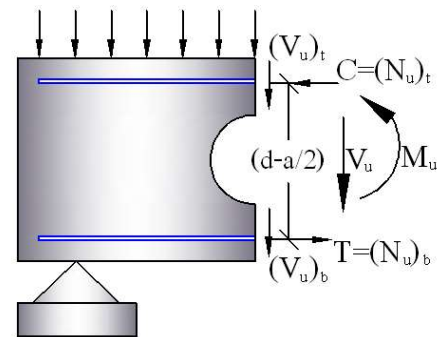
ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของคานตาม ACI เท่ากับ

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



รูปที่ 3 ลักษณะแรงเฉือนของเหล็กในคานที่มีช่องเปิดสำหรับกรณีการวิบัติแบบคาน

ส่วนกรณีการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง



รูปที่ 4 ลักษณะแรงเฉือนของเหล็กในคานที่มีช่องเปิดสำหรับกรณีการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง

จากรูปที่ 4 จะได้

$$(V_u)_t = V_u \left[\frac{A_t}{A_t + A_b} \right] \quad (8)$$

$$(V_u)_b = V_u - (V_u)_t \quad (9)$$

โดยที่ A_t = พื้นที่รับแรงเฉือนส่วนบน (cm²); A_b = พื้นที่รับแรงเฉือนส่วนล่าง (cm²)

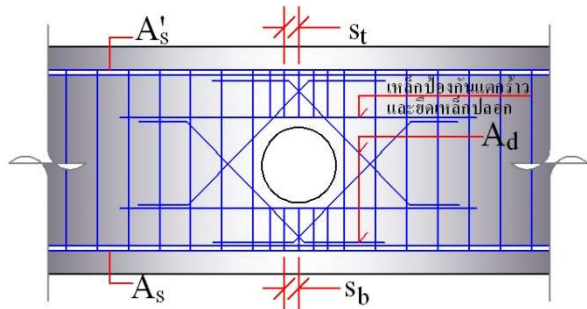
ดังนั้นเหล็กปลอกสำหรับรับแรงเฉือน โดยถือว่าคอนกรีตไม่ช่วยรับแรงเฉือน หาได้จาก

$$s_t = \frac{\phi A_v f_{yv} d_t}{(V_u)_t}; s_b = \frac{\phi A_v f_{yv} d_b}{(V_u)_b} \quad (10)$$

โดยที่ d_t = ระยะจากผิวบนคานถึงตำแหน่งขอบบนช่องเปิดด้วยระยะหุ้มคอนกรีต (cm) ; d_b = ระยะจากขอบล่างช่องเปิดถึงผิวล่างคานด้วยระยะหุ้มคอนกรีต (cm)
ส่วนเหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าวทั้งหมดเท่ากับ

$$A_d = \frac{V_u}{\phi f_{yd} \sin \alpha} \quad (11)$$

ลักษณะการเสริมเหล็กบริเวณช่องเปิดจะเป็นตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะการเสริมเหล็กบริเวณช่องเปิด

3. วัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบคานแบบมีช่องเปิดขนาดเล็กและนำมาทดสอบคานตัวอย่างจริง เพื่อศึกษาพฤติกรรมและเปรียบเทียบผลของคานที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิด ตำแหน่งที่หน้าตัดคานรับโมเมนต์ล้วนและรับโมเมนต์ร่วมกับแรงเฉือน

4. ขอบเขตงานวิจัย

4.1 งานวิจัยนี้เลือกพิจารณาช่องเปิดเฉพาะช่องเปิดที่ขนาดไม่ใหญ่กว่าร้อยละ 40 ของความลึกคาน

4.2 คานที่พิจารณาเลือกตัวอย่างคาน 6 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดแรงดัดและแรงเฉือนเท่านั้น ประกอบด้วย 1).คานตามมาตรฐาน ACI-318-11 (BC-ACI); 2).คานตามมาตรฐาน ว.ส.ท.(2564) หรือที่ปฏิบัติงานจริง (BC-PRA); 3).คานมีช่องเปิดรับโมเมนต์ล้วน ช่องเปิดอยู่เหนือแนวแกนสะเทิน (BC-OCT); 4).คานมีช่องเปิดรับโมเมนต์ล้วน ช่องเปิดอยู่ต่ำกว่าแนวแกนสะเทิน (BC-OCB); 5).คานมี

ช่องเปิดรับโมเมนต์ร่วมแรงเฉือน ช่องเปิดอยู่เหนือกว่าแนวแกนสะเทิน (BC-ODT); 6).คานมีช่องเปิดรับโมเมนต์ร่วมแรงเฉือน ช่องเปิดอยู่ต่ำกว่าแนวแกนสะเทิน (BC-ODB) ตามลำดับ

4.3 คานที่เลือกทดสอบเป็นคานกรณีที่ไม่จำเป็นต้องลดกำลังของคานเมื่อมีช่องเปิด

4.4 การทดสอบคานจริงจะเพิ่มน้ำหนักจนถึงโมเมนต์สูงสุดโดยไม่ได้ทดสอบจนถึงการแอ่นตัวสูงสุดเพื่อหาความเหนียวของคาน

5. วิธีการวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาและมาตรฐานการออกแบบตาม ACI-318-11 (Chapter 10, 11) และ ว.ส.ท.(2564) สรุปวิธีการออกแบบคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดคุณสมบัติวัสดุ หน้าตัด ขนาดและจำนวนเหล็กเสริมของคานที่ได้ออกแบบแล้วโดยไม่ได้พิจารณาช่องเปิด

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบค่า $d_o \leq 0.40d$ ถ้าไม่ใช่ต้องขยายหน้าตัด

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบ การลดกำลังของการรับแรงดัด

$h_c \geq a$ ไม่ต้องลดกำลังคาน ;

$h_c < a$ ต้องลดกำลังคาน ;

$$\text{โดยที่ค่า } a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (\text{Singly R/C});$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} \quad (\text{Doubly R/C})$$

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก จะใช้ f_s แทน f_y
ขั้นตอนที่ 4 กรณีลดกำลังคาน

Singly R/C;

$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{h_c}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{h_c}{2} \right)$$

Doubly R/C;

$$M_{n1} = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{h_c}{2} \right) = (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{h_c}{2} \right)$$

$$M_{n2} = A'_s f_s (d - d') ; \epsilon'_s < \epsilon_y$$

$$= A'_s f_y (d - d') ; \epsilon'_s \geq \epsilon_y$$

$$; M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบ $M_u \leq \phi M_n$; $\phi = 0.90$ ถ้าไม่ใช่ ให้เพิ่มเหล็กเสริมหรือขยายหน้าตัด

ขั้นตอนที่ 6 พิจารณาแรงเฉือน V_c ตาม (5)

พิจารณากรณีวิบัติแบบคาน หาค่า V_s ตาม (6); V_n ตาม (7)

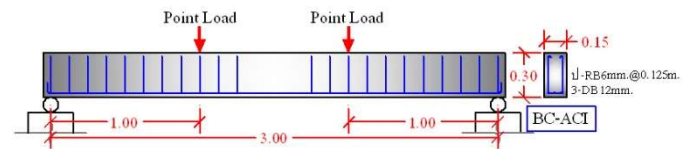
และ $V_u \leq \phi V_n$; $\phi = 0.85$ พิจารณากรณีวิบัติแบบโครงข้อแข็งตาม (8), (9), (10) และหา A_d ตาม (11)

ขั้นตอนที่ 7 สรุปการใช้เหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน

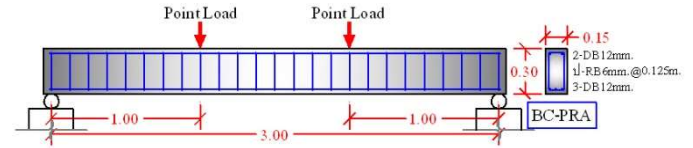
เหล็กปลอกแนวตั้ง ใช้เท่ากับ A_v ระยะห่าง s ซม.

บริเวณช่องเปิด เหล็กปลอกส่วนบนใช้เท่ากับ A_v ระยะห่าง s ซม.; เหล็กปลอกส่วนล่างใช้เท่ากับ A_v ระยะห่าง s_b ซม.; เหล็กทแยงใช้ค่ามากที่สุดของ A_d หรือ A_{df}

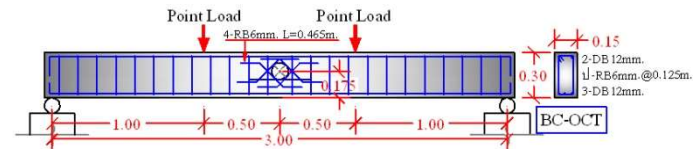
จากขั้นตอนการออกแบบจึงเลือกออกแบบคานที่รับโมเมนต์เพิ่มขึ้นจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองเท่ากับ 1.85 ตัน-ม. (โดยไม่ได้พิจารณาตัวคูณค่าความปลอดภัยของน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร) และหล่อคาน 6 ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัด 15 ซม. x 30 ซม. ช่วงความยาว 3.00 เมตร ช่องเปิดเท่ากับ 11.00 ซม. ตามรูปที่ 6-11 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ได้จากการทดสอบ เท่ากับ 142.65 ksc เหล็กเสริมใช้เหล็กข้ออ้อย ขนาด 12 มม. กำลังครากจากการทดสอบรับแรงดึงเท่ากับ 2,500 ksc และเหล็กปลอกแนวตั้งใช้เหล็กกลมผิวเรียบขนาด 6 มม. ระยะห่าง 12.5 ซม. กำลังครากจากการทดสอบรับแรงดึงเท่ากับ 2,277 ksc หล่อและบ่มด้วยกระสอบป่านชุ่มน้ำอายุ 28 วัน และนำมาค่น้ำหนักบรรทุกแบบกระทำเป็นจุด 2 จุด ด้วยแม่แรงซึ่งกำลังสูงสุดในการกดเท่ากับ 21 ตัน ใช้ Dial gauge (ความละเอียด ± 0.01 มม.) อ่านค่าการแอ่นตัว 3 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ 2 จุด และกึ่งกลางคาน เพิ่มน้ำหนักครั้งละ 509.68 กก. (5,000 นิวตัน) และบันทึกผลการแอ่นตัวหลังการกด 15 นาที เพิ่มน้ำหนักจนถึงน้ำหนักสูงสุดหรือจนการแอ่นตัวไม่สามารถวัดได้ต่อ



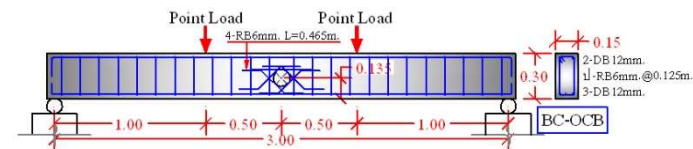
รูปที่ 6 คาน BC-ACI ไม่มีช่องเปิด(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)



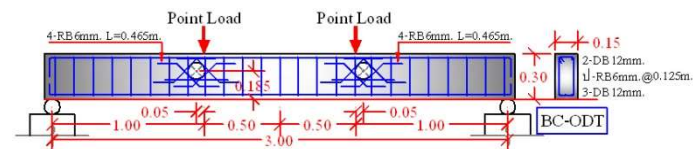
รูปที่ 7 คาน BC-PRA ไม่มีช่องเปิด(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)



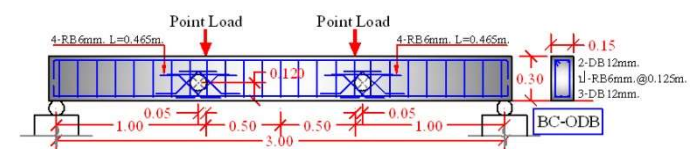
รูปที่ 8 คาน BC-OCT มีช่องเปิด สูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 17.50 ซม.(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)



รูปที่ 9 คาน BC-OCB มีช่องเปิด สูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิด เท่ากับ 13.50 ซม.(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)



รูปที่ 10 คาน BC-ODT มีช่องเปิด สูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 18.50 ซม.(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)



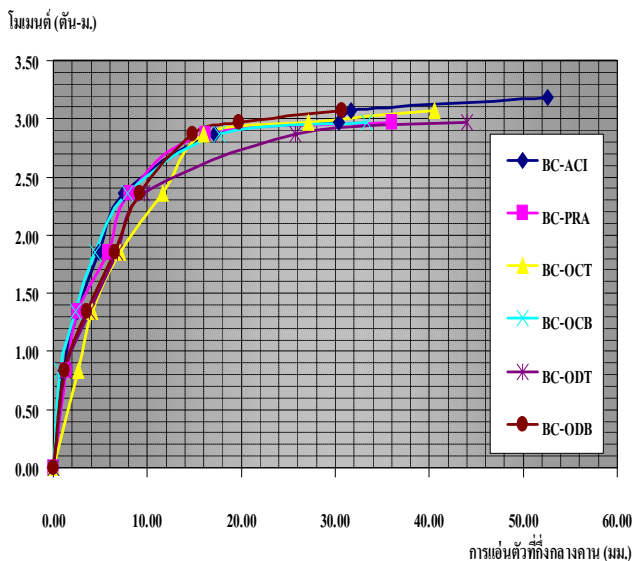
รูปที่ 11 คาน BC-ODB มีช่องเปิด สูงจากผิวล่างคานถึงศูนย์กลางช่องเปิด เท่ากับ 12.00 ซม.(เหล็กปลอก@ 12.5 ซม.)

6. ผลการวิจัยและวิเคราะห์

ผลการทดสอบเมื่อนำผลของแรงกระทำเป็นจุดคำนวณค่าเป็นโมเมนต์ แล้วนำมาแสดงผลการทดสอบพร้อมกับการแอ่นตัวจะได้ตามตารางที่ 1 และนำไปเขียนความสัมพันธ์จะได้ตามรูปที่ 12

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์โมเมนต์และการแอ่นตัวจากการทดสอบ

โมเมนต์ (ตัน-ม.)	การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (มม.)					
	BC- ACI	BC- PRA	BC- OCT	BC- OCB	BC- ODT	BC- CDB
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.83	1.13	1.41	2.71	0.65	1.30	1.20
1.34	2.54	2.56	4.12	2.37	3.88	3.56
1.85	4.81	5.85	7.10	4.40	6.81	6.47
2.36	7.46	8.14	11.66	7.92	9.68	9.18
2.87	17.16	16.21	15.95	17.65	25.72	14.84
2.97	30.39	36.05	27.12	33.39	44.00	19.75
3.08	31.66	-	40.57	-	-	30.70
3.18	52.60	-	-	-	-	-



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการแอ่นตัว

จากการวิเคราะห์คาน พบว่ามีกำลังระบุของโมเมนต์ (nominal strength) $M_n = 2.03$ ตัน-ม. แต่หากพิจารณาหกลค่าโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง $M_g = 0.12$ ตัน-ม. จะทำให้กำลังระบุของโมเมนต์ สูงสุดสำหรับการทดสอบ $M_{n(test)} = 1.91$ ตัน - ม.

ส่วนกรณีแรงเฉือน ของคานไม่มีช่องเปิด พบว่า $V_n = 5.21$ ตัน และ ของคานมีช่องเปิด $V_n = 4.16$ ตัน ซึ่งไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กเพื่อรับแรงเฉือนเพิ่มสำหรับกรณีรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามการทดสอบ แต่ยังมีเสริมเหล็กทแยง RB6 มม. เพื่อกันร้าว ซึ่งเมื่อรับแรงเฉือนถึง 2.36 ตัน (เมื่อโมเมนต์ถึงค่าสูงสุดที่คานรับได้) พบลักษณะการแตกร้าวทแยงแบบการวิบัติแบบคาน ในคาน BC-OCT และ BC-ODT ซึ่งมีลักษณะไม่เหมือนกับคาน BC-ACI, BC-PRA, BC-OCT และ BC-OCB แสดงการแตกร้าวตามรูปที่ 13



รูปที่ 13 รอยแตกร้าวจากแรงเฉือนเป็นลักษณะการวิบัติแบบคานสำหรับคาน BC-OCT และ BC-ODT

สำหรับการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบ กับ ผลการคำนวณตามทฤษฎีอิลาสติก โดยเลือกใช้ ค่า M_n (test) = 1.85 ตัน-ม. แสดงเปรียบเทียบ เป็นค่าร้อยละความเคลื่อนที่กัน ระหว่าง ผลการทดสอบจริง กับ การคำนวณตามทฤษฎีแสดงดังตารางที่ 2

ผลการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของตารางที่ 2 พบว่า กรณี คาน BC-ACI และ คาน BC-PRA ซึ่งเป็นคานที่ไม่มีช่องเปิดมีค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบจริงมากกว่าทฤษฎีค่อนข้างมาก ส่วน กรณี คาน BC-OCT คาน BC-OCB คาน BC-ODT และ คาน BC-ODB ซึ่งเป็นคานแบบมีช่องเปิด มีค่าการแอ่นตัวจากการทดสอบจริงใกล้เคียงกับทฤษฎี

ตารางที่ 2 ค่าการคาดคะเนการแอ่นตัว เมื่อพิจารณา $M_n (test) = 1.85$ ตัน-ม. ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามทฤษฎีอัสติค

ชนิดคาน		การแอ่นตัวที่ กึ่งกลางคาน (ม.ม.)	ร้อยละที่ คลาดเคลื่อน จากทฤษฎี
BC-ACI	ทดสอบ	4.81	49.57
	ทฤษฎี	3.22	
BC-PRA	ทดสอบ	5.85	42.03
	ทฤษฎี	4.12	
BC-OCT	ทดสอบ	7.10	18.65
	ทฤษฎี	5.98	
BC-OCB	ทดสอบ	4.40	-23.22
	ทฤษฎี	5.73	
BC-ODT	ทดสอบ	6.81	11.47
	ทฤษฎี	6.11	
BC-ODB	ทดสอบ	6.47	14.93
	ทฤษฎี	5.63	

หมายเหตุ การคำนวณใช้ $E_c = 180,588.83$ ksc;
 สมมติ $E_s = 2.04 \times 10^6$ ksc และ ค่า I ที่ใช้ของคานทุกตัวเป็น $I_{effective}$
 ซึ่งพิจารณาหน้าตัดแปลงก่อนแตกร้าว และหลังแตกร้าวแล้ว และกรณีมี
 ช่องเปิดใช้ค่า I ที่พิจารณาหักพื้นที่ช่องเปิดออกแล้วโดยไม่ได้ใช้ค่า I
 เฉลี่ยของหน้าตัดทั้งหมดตลอดคาน

7. อภิปรายผลการวิจัย

สำหรับการคาดคะเนการแอ่นตัวพบว่าคาน BC-OCT, BC-ODT และ BC-ODB จะมีการแอ่นตัวที่มากกว่าคาน BC-ACI และ BC-PRA แสดงว่าหากคาดคะเนการแอ่นตัวแบบหน้าตัด
 ไม่มีช่องเปิดกับหน้าตัดที่มีช่องเปิดจะไม่มีความปลอดภัย แต่
 สำหรับคาน BC-OCB ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคานที่ผู้ออกแบบส่วน
 ใหญ่นิยมใช้งาน จะเห็นว่าการพิจารณาการแอ่นตัวโดยไม่สนใจ
 ว่ามีช่องเปิดสามารถคาดคะเนได้โดยปลอดภัย (เมื่อเทียบกับการ
 ทดสอบการแอ่นตัวของคาน BC-ACI และ BC-PRA) การ
 พิจารณาการแอ่นตัวคำนวณโดยหน้าตัดแปลงของหน้าตัดที่
 แท้จริงในช่วงหน้าตัดไม่แตกร้าวและหน้าตัดแตกร้าวพบว่า
 การแอ่นตัวของคานให้ค่าที่ไม่คลาดเคลื่อนมากกรณีคานมีช่องเปิด
 ส่วนกรณีไม่มีช่องเปิดค่าคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ซึ่งอาจจะเป็น
 เพราะเหล็กเสริมคอนกรีตที่นำมาใช้ค่อนข้างไม่ได้
 มาตรฐานตามขนาดระบุที่ผลิต ซึ่งผู้วิจัยพบว่าเหล็กเสริมขนาด
 เล็กกว่าระบุ กำลังครากต่ำกว่าระบุ และไม่ได้ทดสอบเพื่อหา
 ค่า E_s จึงอาจจะทำให้ค่าการแอ่นตัวตามทฤษฎีกรณีไม่มีช่อง
 เปิดน้อยกว่าค่าจากการทดสอบ

ส่วนกรณีโครงสร้างที่ต้องต้านทานแผ่นดินไหวหรือรับ
 น้ำหนักกระแทกซึ่งอาจจะมีน้ำหนักบรรทุกเกินค่าออกแบบ
 มากๆ เกินค่าตัวคูณความปลอดภัย และต้องการโครงสร้างที่มี
 ความเหนียวเพื่อไม่ให้พังเสียหายอย่างทันที การไม่มีเหล็กเสริม
 ป้องกันแรงเฉือนที่บริเวณช่องเปิดอาจจะทำให้เป็นตัววิกฤติ
 ก่อนได้

8. สรุปผลการวิจัย

การออกแบบคานแบบที่มีช่องเปิด จากการทดสอบพบว่า
 คานที่ออกแบบโดยไม่จำเป็นต้องลดกำลัง ผลการทดสอบ
 สามารถรับน้ำหนักได้เกินค่ากำลังระบุของโมเมนต์โดย
 ปลอดภัยและยังมีความเหนียวเพียงพอ เมื่อรับน้ำหนักเกินช่วง
 สูงสุดได้ แต่ปัญหาที่พบคือผลกรณรับโมเมนต์ร่วมกับแรงเฉือน
 พบว่าเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงเข้าสู่ศูนย์กลางช่องเปิด ช่วง
 ค่าเกินโมเมนต์ที่คานรับได้ประมาณ 1.25 เท่าของ M_n

ผลการทดสอบซึ่งเลือกใช้ช่องเปิดวงกลมเท่ากับ $0.40d$
 พบว่าการพิจารณาออกแบบรับแรงดัดสามารถใช้ทฤษฎีของ
 คานวิเคราะห์ได้ ตาม Mansur และ Tan [5] ซึ่งสามารถ
 ขยายช่องเปิดได้มากกว่า Somes และ Corley [7] ส่วนการ
 ออกแบบรับแรงเฉือนผู้ออกแบบควรเสริมเหล็กกันร้าวให้
 เพียงพอเพื่อให้คานมีความเหนียวเหมือนกรณีที่ไม่มีช่องเปิด

9. ข้อเสนอแนะ

การทราบพฤติกรรมของโมเมนต์ และแรงเฉือนที่เกิดขึ้น
 ของคานที่มีช่องเปิด สำหรับกรณีจำเป็นต้องนำท่อของงาน
 ระบบอาคาร เดินแนวท่อผ่านในระดับคานเพื่อให้ได้ระยะความ
 สูงภายในอาคารต่อชั้นตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามหาก
 จำเป็นต้องทำคานที่มีช่องเปิดใหญ่กว่าร้อยละ 40 ของความลึก
 คาน ควรทำคำนวณและศึกษาพฤติกรรมเพิ่มเติมเพื่อความปลอดภัย
 ในการใช้งานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fling RS. *Practical Design of Reinforced Concrete*. United States of America: John Wiley & Sons Inc; 1987.

- [2] Mansur MA. Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear. *Cement and Concrete Composites*. 1998;20(6):477–486.
- [3] Mansur MA, Hasnat A. Concrete beams with small openings under torsion. *Journal of the Structural Division, ASCE*. 1979;106(11):2433–2447.
- [4] Mansur MA, Tan KH. *Concrete Beams with Openings, Analysis and Design*. United States of America: CRC Press LLC; 1999.
- [5] Mansur MA, Tan KH. Strength of R/C beams with large openings under combined torsion, bending and shear. In: *Proceedings of the International Conference on Highrise Buildings*; 1989 Mar 25–27; Nanjing, China. Nanjing: China; 1989. p. 380–385.
- [6] Prentzas EG. *Behaviour and Reinforcement of Concrete Beams with Large Rectangular Apertures* [PhD thesis]. University of Sheffield; 1968.
- [7] Somes NF, Corley WG. Circular openings in webs of continuous beams. *American Concrete Institute. Shear in Reinforced Concrete*. 1974;Special Publication (SP-42):359–398.