



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง พฤติกรรมบริเวณสมอยึดในคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกภายใต้แรงอัดแบบหลายแรง

Behavior of Anchorage Zone in Flanged Section PC Girder with Multiple
Prestressing Forces

نامผู้วิจัย นายสุรินทร์ ทรัพย์ศิริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงวุฒิ เสงพระราชณี, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมบริเวณสมอยึดในคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกภายใต้แรงอัดแบบหลายแรง

Behavior of Anchorage Zone in Flanged Section PC Girder with Multiple
Prestressing Forces

โดย

นายสุรินทร์ ทรัพย์ศิริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุรินทร์ ทรัพย์ศิริ 2557: พฤติกรรมบริเวณสมอยึดในคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีก
ภายใต้แรงอัดแบบหลายแรง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงวุฒิ เสงพระธานี, Ph.D. 153 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมบริเวณสมอยึดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกชนิดดิ่งตลอด
ที่หลังภายใต้แรงอัดหลายแรงแบบตรงศูนย์และแบบเอียงศูนย์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยมี
วัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานและ
ปีกคาน ตัวแปรที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ความสูงของคาน (h_w) ความหนาของเอวคาน (t_w)
ความหนาของปีกคาน (t_p) ความกว้างของปีกคาน (b_p) ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน (a) ระยะห่าง
ของหัวสมอ ($2s$) และระยะการเอียงศูนย์ (e) โดยผลการวิเคราะห์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้
จากการคำนวณด้วยวิธีการตามมาตรฐานของ AASHTO (2007) สูตรการคำนวณที่นำเสนอใน
งานวิจัยของ Hengprathane (2004) และการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Strut-and-Tie Model (STM)

ผลการศึกษาพบว่า ความกว้างของปีกคานมีอิทธิพลต่อขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของ
แรงปรี กรณีที่คานอยู่ภายใต้การอัดแรงแบบตรงศูนย์ พฤติกรรมของหน่วยแรงปรีภายในบริเวณ
หัวสมอขึ้นอยู่กับระยะห่างของแรงอัด ($2s$) โดยระยะห่างของหัวสมอที่กำหนดพฤติกรรมของ
หน่วยแรงปรี คือ $2s' = 0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{cz}/b_n)-1]$ หาก $2s < 2s'$ หน่วยแรงปรีภายใน
บริเวณเอวคานจะมีค่าสูงที่สุดเพียงบริเวณเดียว หาก $2s > 2s'$ หน่วยแรงปรีภายในบริเวณเอวคาน
จะมีค่าสูงที่สุดที่ได้แรงอัดแต่ละแรง

เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบต่างๆ พบว่า กรณีที่
 $2s < 2s'$ สูตรการคำนวณของ Hengprathane ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วย
วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มากที่สุด ส่วนกรณีที่ $2s > 2s'$ การสร้างแบบจำลอง STM ให้ผลการคำนวณที่
ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มากที่สุด ในกรณีที่คานอยู่ภายใต้การอัดแรง
แบบเอียงศูนย์ หน่วยแรงปรีภายในบริเวณเอวคานจะมีค่ามากขึ้นหากพื้นที่การกระจายของหน่วย
แรงกว้างขึ้น

Surin Srapsiri 2014: Behavior of Anchorage Zone in Flanged Section PC Girder with Multiple Prestressing Forces. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Songwut Hengprathanee, Ph.D. 153 pages.

This research investigates the behavior of anchorage zone in post-tensioned prestressed concrete girder with flanged section under the application of multiple prestressing forces with concentric and eccentric load configurations using finite element method. The focus of this research is to find the magnitude and the location of bursting force in the web and the flange of the girder. Parameters which are used in this research consist of the height of section (h_w), thickness of web (t_w), thickness of flange (t_f), width of flange (b_f), size of anchorage plate (a), distance between prestressing forces ($2s$), and eccentricity (e). The results from finite element analyses are compared to those from the AASHTO Standard Specifications (2007), the equations proposed by Hengprathanee (2004), and the application of Strut-and-Tie Model approach.

The results from this research show that the width of flange significantly affects the magnitude and the location of bursting force. For concentric load configuration, the behavior of bursting stress in anchorage zone depends on the distance between prestressing forces ($2s$). A distance which is used to specify the behavior of bursting stress can be presented as $2s' = 0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_f/b_w)-1]$. If $2s < 2s'$, bursting stress with highest value occurs in only one region. If $2s > 2s'$, bursting stress with highest value occur in more than one region near the applied forces.

The comparison of the finite element analysis results and other design methods presents that in the case of $2s < 2s'$, the equations proposed by Hengprathanee give the closest values to finite element results and in the case of $2s > 2s'$, the application of STM gives the closest values to finite element results. For eccentric load configuration, bursting stress within the web will contain a larger magnitude if the area under the anchor has a wider region.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงวุฒิ เสงี่ยมพระธานี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่คอยให้คำปรึกษา
แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี ตลอดจนให้คำแนะนำในการทำงานรวมถึงการใช้ชีวิตอย่างมีความสุขตลอดระยะเวลาของ
การเป็นนิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่อบรมสั่ง
สอนให้ความรู้ทางวิศวกรรมและปลูกฝังหลักการคิดในทางสร้างสรรค์ให้เกิดสิ่งดีๆ ต่างๆ มากมาย
ขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทสาขาวิศวกรรมโครงสร้างทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน
ในระหว่างการเรียนและการทำวิจัยนี้

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัวของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนช่วยเหลือและ
เป็นกำลังใจให้ฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดีตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ความดีหรือ
คุณประโยชน์อันหนึ่งอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขออุทิศแด่คุณแม่อำนาจ ทรัพย์ศิริ

สุรินทร์ ทรัพย์ศิริ

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	33
สรุปและข้อเสนอแนะ	138
สรุป	138
ข้อเสนอแนะ	140
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	141
ภาคผนวก	145
ภาคผนวก ก ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาในบริเวณสมอยึด	146
ภาคผนวก ข หน่วยแรงที่ด้านท้ายของแบบจำลอง	149
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ขนาดของแบบจำลองคานหน้าตัดปีก	26
2 สรุปค่าตัวแปรต่างๆ	28
3 การเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 ของแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอ แบบสมมาตร	42
4 การเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีก คานด้านบน 16 นิ้ว	74
5 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริทีเอวคาน เมื่อแรงอัด ทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว, ($2s < 2s'$)	104
6 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริทีปีกคาน เมื่อแรงอัด ทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว, ($2s < 2s'$)	105
7 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริทีเอวคาน เมื่อแรงอัด ทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว, ($2s > 2s'$)	109
8 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริทีปีกคาน เมื่อแรงอัด ทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว, ($2s > 2s'$)	110

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ	6
2 ตำแหน่งและการจัดเรียงเหล็กเสริมในบริเวณสมอยึด	7
3 ส่วนต่างๆ และการกระจายตัวของหน่วยแรงในบริเวณสมอยึด	8
4 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	10
5 การจัดเรียงเหล็กเสริมเพื่อต้านทานแรงปริ	10
6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริของ Guyon	12
7 หลักการสร้างปริซึมสมมาตรของ Guyon	12
8 แผนผังแรงลัพธ์ด้านท้ายของแบบจำลองและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	17
9 วิธีการคำนวณหาค่าตัวแปร $k_{n,2}$	17
10 การเชื่อมต่อระหว่างอิลิเมนต์ด้วยสปริงในแบบจำลอง	20
11 สภาวะการยึดรั้งของฐานรองรับของในแบบจำลอง	21
12 รูปแบบของการอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา	21
13 แบบจำลองที่ใช้ทำการทดสอบหาขนาดอิลิเมนต์ที่เหมาะสม	22
14 การทดสอบหาขนาดที่เหมาะสมของอิลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง	22
15 ทิศทางของแนวแรงอัดหลัก เมื่อบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงแบบแรงเดียว	23
16 ทิศทางของแนวแรงอัดหลัก เมื่อบริเวณสมอยึดมีแรงอัดกระทำแบบสองชุด	24
17 แบบจำลองของคานหน้าตัดปีก	25
18 ระยะห่างระหว่างแรงอัด (2s)	27
19 แรงปริและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริ	29
20 วิธีการคำนวณขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม	30
21 การสร้างแบบจำลอง STM	31
22 แผนผังการดำเนินการวิจัย	32
23 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงเพียงแรงเดียว แบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{\pi} = 6.4"$, $a/h_w = 0.25$	33
24 ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{\pi} = 6.4"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	35
26	ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.45$	36
27	ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.60$	37
28	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาอัตราส่วนความหนาของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.20$	38
29	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาความหนาของเอวคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.35$	39
30	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาระยะห่างระหว่างแรงอัดของคานหน้าตัดรูปตัวไอ แบบสมมาตร เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$	40
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน เมื่อบริเวณสมอียึดมีความกว้างของปีกคาน 25.6 นิ้ว	44
32	วิธีการคำนวณหาขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม (a') และหลักการสร้างปริซึม สมมาตร	45
33	วิธีการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanece เมื่อบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงสอง แรงแบบตรงศูนย์	46
34	วิธีการคำนวณหาค่าอัตราส่วนของแรงลัพท์ที่ปีกคาน ($k_{\Pi,2}$)	47
35	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาที่เอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	49
36	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาที่เอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$	49
37	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาที่เอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$	50
38	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$	51
40	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$	51
41	แสดงแบบจำลอง STM ของบริเวณสมอียึดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์	53
42	แสดงการเชื่อมต่อระหว่างแรงอัดภายในแบบจำลอง STM สำหรับแผ่นเหล็กแบก ทานด้านบน	54
43	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	55
44	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$	55
45	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	56
46	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$	56
47	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริกับระยะห่างระหว่างแรงอัด ของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$	58
48	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	59
49	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$	60
50	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$	60
51	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	62
52	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่ปีกคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ถูกคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$	63
54	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	65
55	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่เอวคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$	65
56	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ถูกคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	66
57	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ถูกคานกับความกว้างของ ปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$	66
58	ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $b_{f2} = 12.8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	68
59	ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $b_{f2} = 8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	69
60	ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $b_{f2} = 8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$	70
61	ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	71
62	ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.35$	72
63	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของคานหน้าตัดรูปตัวไอ แบบไม่สมมาตร เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $b_{f1} = 16"$, $b_{f2} = 8"$	73
64	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับอัตราส่วนความกว้างของปีก คาน เมื่อบริเวณสมอยึดมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว	75
65	วิธีการคำนวณหาขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวมและหลักการสร้างปริซึมสมมาตร กรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและรูปตัวที	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
66	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	77
67	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	78
68	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	78
69	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	80
70	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	80
71	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	81
72	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	82
73	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	83
74	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	83
75	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	84
76	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	84
77	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	85
78	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
79	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$	87
80	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัด ของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $b_{\pi} = 16"$, $b_{\pi} = 8"$	88
81	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	90
82	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	90
83	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	91
84	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	91
85	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	92
86	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	92
87	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	94
88	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	94
89	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$	95
90	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	95
91	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วน ความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{\pi} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$	96
93	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$	98
94	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$	99
95	คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร AASHTO/I-Beams Type IV เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว	100
96	วิธีการคำนวณหาปริซึมสมมาตร เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว	103
97	คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร AASHTO/I-Beams Type IV เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว	106
98	แสดงแรงภายในแบบจำลอง STM เมื่อบริเวณสมอยึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว	107
99	วิธีการคำนวณหาขนาดปริซึมสมมาตรย่อย เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว	108
100	รูปแบบของการเยื้องศูนย์ภายในบริเวณสมอยึด	111
101	ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	113
102	ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณปีกคานด้านบน เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	114
103	ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณปีกคานด้านล่าง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$	115
104	ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$	116
105	วิธีการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanee เมื่อบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์	117

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
106	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	120
107	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	120
108	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$	121
109	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$	121
110	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	123
111	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$	123
112	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$	124
113	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$	124
114	แสดงแบบจำลอง STM ของบริเวณสมอียัดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบเอียงศูนย์	126
115	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	127
116	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	127
117	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	128
118	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 56''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$	128

สารบัญภาพ (ต่อ)

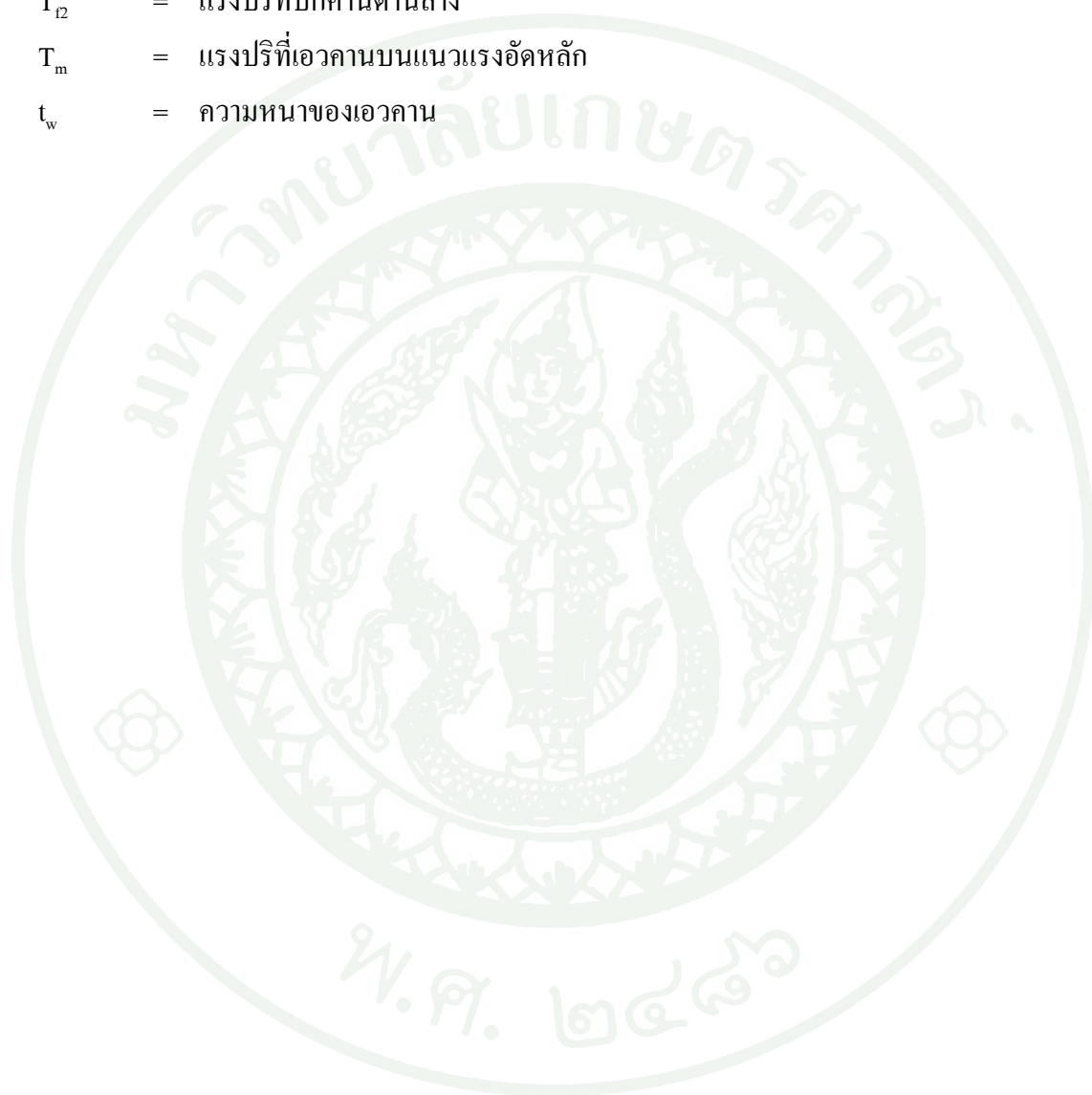
ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 9 นิ้ว	147
ก2 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 9 นิ้ว	147
ก3 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 24 นิ้ว	148
ก4 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 24 นิ้ว	148
ข1 แผนผังของหน่วยแรงที่ด้านท้ายของแบบจำลองคานหน้าตัดปีก	150

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$2s$	=	ระยะห่างระหว่างแรงอัด
$2s'$	=	ระยะห่างระหว่างแรงอัดที่เป็นจุดแยกตัวของแรงปริทีโอเวคาน
a	=	ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน
a'	=	ขนาดรวมของแผ่นเหล็กแบกทาน
b_{f1}	=	ความกว้างของปีกคานด้านบน
b_{f2}	=	ความกว้างของปีกคานด้านล่าง
D_1	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีโอเวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบน
D_2	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีโอเวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่าง
D_{burst}	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ
$D_{burst-flg}$	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีปีกคาน
$D_{burst-web}$	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีโอเวคาน
D_{f1}	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีปีกคานด้านบน
D_{f2}	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีปีกคานด้านล่าง
D_m	=	ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีโอเวคานบนแนวแรงอัดหลัก
e	=	ระยะการเยื้องศูนย์
h'	=	ความสูงของโครงสร้าง
h_w	=	ความสูงของโอเวคาน
h_1	=	ความสูงของปริซึมสมมาตรของแรงอัดด้านบนของแบบจำลอง
h_2	=	ความสูงของปริซึมสมมาตรของแรงอัดด้านล่างของแบบจำลอง
P	=	แรงอัด
STM	=	Strut-and-Tie Model
t_{f1}	=	ความหนาของปีกคานด้านบน
t_{f2}	=	ความหนาของปีกคานด้านล่าง
T_1	=	แรงปริทีโอเวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบน
T_2	=	แรงปริทีโอเวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่าง
T_{burst}	=	แรงปริ
$T_{burst-flg}$	=	แรงปริทีปีกคาน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_{\text{burst-web}}$	=	แรงปรีที่เอวคาน
T_{f1}	=	แรงปรีที่ปีกคานด้านบน
T_{f2}	=	แรงปรีที่ปีกคานด้านล่าง
T_m	=	แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก
t_w	=	ความหนาของเอวคาน



พฤติกรรมบริเวณสมอยึดในคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีก ภายใต้แรงอัดแบบหลายแรง

Behavior of Anchorage Zone in Flanged Section PC Girder with Multiple Prestressing Forces

คำนำ

ในปัจจุบันงานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดอัดแรงทีหลัง (Post-Tensioned Prestressed Concrete) ได้ถูกนำมาใช้งานในโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสะพานอย่างแพร่หลาย เช่น แผ่นพื้น (Deck) คานขนาดใหญ่ (Girder) ทั้งที่รูปร่างคานมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและคานหน้าตัดปีก (Flanged Section) ขั้นตอนการถ่ายแรงเข้าสู่โครงสร้าง ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในงานคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดอัดแรงทีหลัง หน่วยแรงอัดแบบจุด (Concentrated Prestressing Force) จะถูกถ่ายไปยังบริเวณสมอยึด (Anchorage Zone) ของโครงสร้างผ่านทางลวดอัดแรงกำลังสูง ก่อนที่หน่วยแรงจะกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง โดยแรงอัดแบบจุดนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขึ้นในคอนกรีตบริเวณที่ถัดจากแผ่นเหล็กแบกทาน (Bearing Plate) ซึ่งแรงอัดนี้ยังส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดของลวดเรียกว่า หน่วยแรงปริ (Bursting Stress) นอกจากนี้หน่วยแรงอัดบางส่วนยังผลทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่บริเวณผิวหน้าด้านรับแรงอัดเรียกว่า หน่วยแรงปริที่ผิว (Spalling Stress) เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้น้อย ทำให้คอนกรีตในบริเวณสมอยึดเกิดรอยร้าวขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบและจัดเรียงเหล็กเสริมเพื่อช่วยในการต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึด

วิธีการกำหนดขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริในบริเวณสมอยึดถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Guyon (1953) ที่ได้ศึกษาจากแบบจำลองคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้หลักการสมดุลของแรง และมีการพัฒนาวิธีการขึ้นอย่างกว้างขวางในลำดับต่อมา อาทิ การศึกษาของ Burdet (1990) ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวได้ปรากฏในรายงานโครงการวิจัยของ NCHRP Project 10-29 (1994) ปัจจุบันการออกแบบบริเวณสมอยึดได้ถูกบรรจุให้เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงของหน่วยงานต่างๆ เช่น มาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ได้แนะนำวิธีการออกแบบบริเวณสมอยึดโดยอ้างอิงจากผลการศึกษาของ NCHRP ตั้งแต่

ปี ค.ศ. 1996 จนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม วิธีการคำนวณที่แสดงไว้ในมาตรฐานนั้นยังมีขอบเขตที่จำกัดและยังไม่สามารถให้ข้อมูลกับผู้ออกแบบในบางกรณีเช่น การออกแบบบริเวณสมอียืดของคานหน้าตัดรูปตัวไอและคานหน้าตัดรูปตัวที จนกระทั่งปี ค.ศ. 2004 งานวิจัยของ Hengprathanee ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียืดของคานหน้าตัดปีก พร้อมกับได้เสนอวิธีการออกแบบเหล็กเสริมจากผลการศึกษาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของหน่วยแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียืดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งลวดอัดแรงที่หลังได้ครอบคลุมในทุกรูปแบบ เช่น บริเวณสมอียืดที่มีแรงอัดกระทำมากกว่าหนึ่งชุด ทำให้วิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียืดในปัจจุบันอาจยังไม่สามารถให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียืดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกแบบดิ่งลวดอัดแรงที่หลังภายใต้แรงอัดกระทำมากกว่าหนึ่งชุด โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการศึกษาวิธีการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานหน่วยแรงปรีให้ถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมบริเวณสมอยึดของคานหน้าตัดปีกที่มีการอัดแรงผ่านสมอยึดมากกว่าหนึ่งชุด ภายใต้รูปแบบของการอัดแรงแบบตรงศูนย์และแบบเยื้องศูนย์
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปีกคานต่อขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึดของคานหน้าตัดปีกที่มีการอัดแรงผ่านสมอยึดมากกว่าหนึ่งชุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีในบริเวณสมอยึดของคานหน้าตัดปีกที่เสนอโดย Hengprathanee และวิธีการออกแบบเหล็กเสริม เพื่อปรับปรุงการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น
3. เพื่อทำการประเมินวิธีการออกแบบเหล็กเสริมในบริเวณสมอยึดที่ถูกเสนอไว้ในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO กับกรณีของคานหน้าตัดปีก ซึ่งมีการอัดแรงผ่านสมอยึดมากกว่าหนึ่งชุด

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของการศึกษาคือ ทำการวิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอยึดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกแบบดิ่งลวดอัดแรงทีหลัง ซึ่งถูกอัดแรงผ่านสมอยึดมากกว่าหนึ่งชุดภายใต้รูปแบบของการอัดแรงแบบตรงศูนย์และแบบเยื้องศูนย์ ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์เชิงพาณิชย์ชื่อ ANSYS เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบเหล็กเสริมในบริเวณสมอยึดตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (2007) และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความสูงของคาน ความกว้างของปีกคาน ความหนาของเวอคาน ความหนาของปีกคาน ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน ระยะเยื้องศูนย์ของแรงอัด และระยะห่างระหว่างแรงอัด โดยขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานและแรงอัดแต่ละแรงจะมีขนาดเท่ากัน ผลการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ จะถูกนำมาศึกษาพิจารณาความสัมพันธ์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีก โดยอาศัยสมการที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO และสมการที่ได้จากงานวิจัยของ

Hengprathanee (2004) เพื่อปรับปรุงวิธีการออกแบบเหล็กเสริมสำหรับบริเวณสมอชิดของคาน
คอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกแบบดิ่งลดอัดแรงที่หลัง ที่มีการอัดแรงผ่านสมอชิดมากกว่าหนึ่งชุดให้
มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น



การตรวจเอกสาร

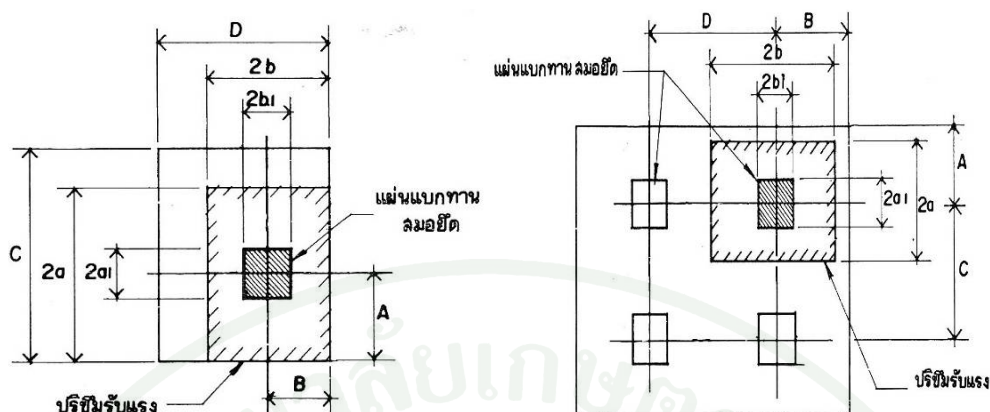
มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [ว.ส.ท.] (2537) โดยคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา ได้ให้คำนิยามของบริเวณสมอยึด (Anchorage Zone) ในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงไว้ว่า เป็นบริเวณส่วนของโครงสร้าง ซึ่งถ่ายแรงความเค้นสูงอันเกิดจากแรงอัดแบบจุด (Concentrated Prestressing Force) ให้กระจายออกไปสู่สถานะของหน่วยแรงที่แปรผันเชิงเส้น (Linear Stress Distribution) การถ่ายแรงอัดจากสมอยึดสู่คอนกรีต ส่วนใหญ่เกิดจากการแบกทานโดยตรงของแผ่นเหล็กสมอยึด (Steel Anchor Plate) หรืออุปกรณ์สมอยึดอย่างอื่นที่ฝังอยู่ในคอนกรีต บริเวณสมอยึดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดอัดแรงที่หลังจะมีหน่วยแรงดึงตามขวาง (Transverse Tensile Stress) เกิดขึ้น 2 ชนิด คือ

1. หน่วยแรงปริ (Bursting Stress) เป็นหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอันเนื่องมาจากผลลัพธ์ของหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงแบบจุด ซึ่งกระจายตัวออกจากแนวแรงอัดของลวด ก่อนที่หน่วยแรงจะกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้าง แรงดึงนี้จะมีทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดของลวด
2. หน่วยแรงปริที่ผิว (Spalling Stress) เป็นหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างสมอยึด ซึ่งวางห่างกัน โดยมีสาเหตุมาจากการสอดคล้องกันของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Compatibility of Displacement) หน่วยแรงดึงดังกล่าวเกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดของลวดและมีค่าสูงสุดที่ผิวคอนกรีตรอบสมอยึด หน่วยแรงดึงนี้มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแรงอัดแบบจุดกระทำเยื้องศูนย์กลางและอยู่ภายนอกเคิร์นของหน้าตัด (Kern) ของโครงสร้าง

ว.ส.ท.ได้แนะนำวิธีการออกแบบและจัดเรียงเหล็กเสริมเพื่อต้านทานแรงปริในบริเวณสมอยึดไว้ดังนี้

จากภาพที่ 1 เมื่อพิจารณาปริซึมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงอัด P_m ของสมอยึดเดี่ยวหรือกลุ่มของสมอยึด ขนาดของแรงปริ (P_{bt}) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1

$$P_{bt} = 0.33(1 - r)P_m \quad (1)$$

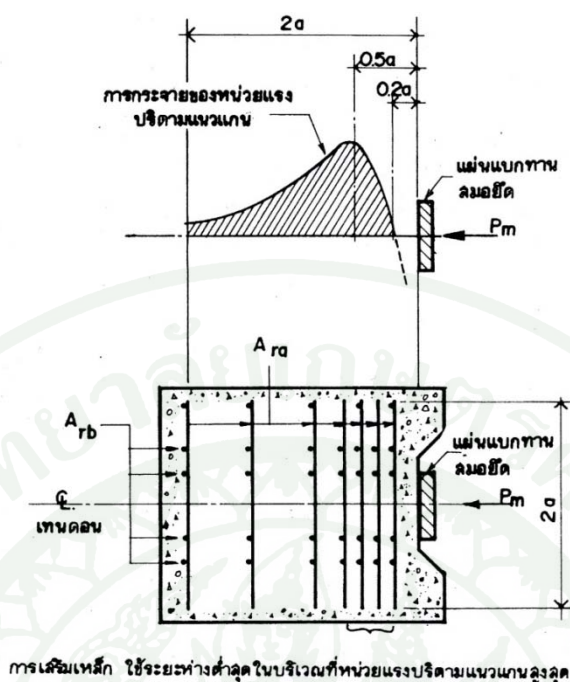


ภาพที่ 1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

ที่มา: คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา (2537)

โดย r มีค่าเท่ากับ $2a_i/2a$ หรือ $2b_i/2b$ สัญลักษณ์ $2a_i$ และ $2b_i$ คือขนาดของสมอยึด กรณีที่สมอยึดเป็นรูปร่างกลมให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.89 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด $2a$ และ $2b$ คือขนาดของปริม

การคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีในบริเวณสมอยึดที่มีผิวคอนกรีตหุ้มน้อยกว่า 5 ซม. หน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมให้ใช้ค่าเท่ากับ $2000/\phi$ โดย ϕ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม แต่ต้องมีค่าไม่เกิน 1250 ksc เพื่อควบคุมการแตกร้าว และเหล็กเสริมที่อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตให้ใช้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ไม่เกิน $0.80f_y$ ซึ่ง f_y คือหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม โดยเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีนี้ให้จัดเรียงในระยะจาก $0.2a$ ถึง $2a$ วัดจากผิวในของแผ่นเหล็กแบกทาน (Anchor Plate) ดังภาพที่ 2 ในกรณีที่สมอยึดจัดเรียงเป็นกลุ่ม เหล็กเสริมของปริมซึ่งอยู่ติดกันต้องจัดให้เกี่ยวโยงถึงกันและจะต้องมีเหล็กเสริมรัดรอบทั้งกลุ่ม สำหรับเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่ผิว หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมให้ใช้ค่าเท่ากับ $2000/\phi$ ksc แต่ไม่เกิน 1250 ksc เหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่ผิวนี้ให้จัดเรียงใกล้ผิวด้านในของสมอยึดให้มากที่สุด



ภาพที่ 2 ตำแหน่งและการจัดเรียงเหล็กเสริมในบริเวณสมอชิด

ที่มา: คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา (2537)

American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] (2007) ได้แบ่งบริเวณสมอชิดออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

บริเวณตัวหัวสมอชิด (Local Zone) เป็นบริเวณของคอนกรีตที่อยู่ใต้แผ่นเหล็กแบกทานลึกเข้าไปด้านในตามความยาวของโครงสร้าง มีระยะไม่เกินความยาวของชุดอุปกรณ์หัวสมอชิด ดังภาพที่ 3ก หน่วยแรงในบริเวณนี้เป็นหน่วยแรงแบกทานที่เกิดจากการส่งแรงผ่านอุปกรณ์หัวสมอชิด ก่อนที่หน่วยแรงนั้นจะกระจายไปยังบริเวณอื่นๆ ในบริเวณสมอชิด โดยทั่วไปพฤติกรรมของส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์และวิธีการอัดแรง

บริเวณทั่วไปรอบหัวสมอชิด (General Zone) เป็นส่วนของคอนกรีตที่ห่อหุ้มบริเวณตัวหัวสมอชิดไปจนถึงส่วนท้ายของสมอชิด มีระยะไม่เกิน 1 ถึง 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 3ข ซึ่งในส่วนนี้จะมีการกระจายตัวของหน่วยแรงจากแรงอัดแบบจุดจนกลายเป็น

หน่วยแรงอัดที่กระจายเต็มหน้าตัดของโครงสร้าง และมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของบริเวณทั่วไปรอบหัวสมอยึด



ก.

ข.

ภาพที่ 3 ส่วนต่างๆ และการกระจายตัวของหน่วยแรงในบริเวณสมอยึด

ที่มา: AASHTO (2007)

มาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ได้เสนอวิธีการออกแบบบริเวณสมอยึดไว้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีใดก็ได้ ดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองจากหลักการสมดุลของแรง โดยมีพฤติกรรมของแบบจำลองซึ่งอยู่ในช่วงพลาสติก โดยทั่วไปอ้างอิงถึงวิธีการสร้างแบบจำลอง Strut-and-Tie Model (STM)
2. การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงเชิงเส้น โดยพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุอยู่ในช่วงอีลาสติก ใช้สมการสมดุลของแรงและสภาวะสอดคล้องกันของหน่วยการยืดหดตัว (Strain Compatibility) โดยทั่วไปอ้างอิงถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
3. วิธีการประมาณค่าของหน่วยแรงอื่นๆ สำหรับวิเคราะห์และออกแบบจากผลการศึกษาที่ผ่านมา อาทิ การศึกษาของ Guyon (1953) หรือ Burdet (1990)

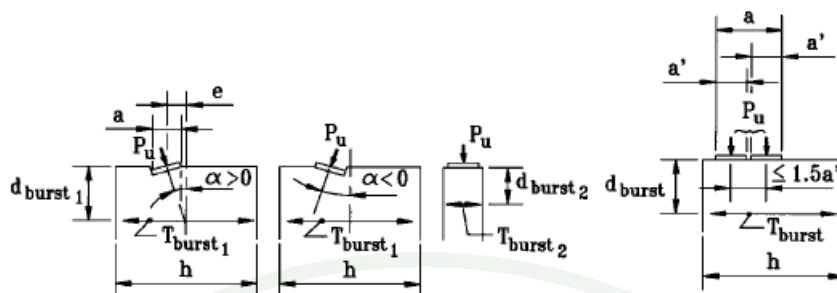
ภายในบริเวณทั่วไปรอบหัวสมอยึดจะมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นในคอนกรีต ซึ่งเกิดจากแรงกระทำแบบจุดจากอุปกรณ์อัดแรง โดย AASHTO ได้แบ่งประเภทของหน่วยแรงดึงไว้ตามตำแหน่งที่เกิดขึ้นของหน่วยแรงนั้น ได้แก่

แรงปริ (Bursting Force) คือแรงดึงที่เกิดขึ้นในบริเวณถัดจากชุดอุปกรณ์หัวสมอยึดลึกลงไปตามความยาวของโครงสร้างมีระยะประมาณ 1 ถึง 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้าง มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัดของลวด เป็นผลลัพธ์มาจากหน่วยแรงที่เกิดจากแรงอัดแบบจุดซึ่งกระจายตัวออกจากแนวแรงอัดของลวด การคำนวณค่าของแรงปริสามารถกระทำได้โดยรวมผลของหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นตลอดแนวแรงอัดของลวดภายในบริเวณสมอยึด นอกจากนี้ในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ยังได้แนะนำสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ ซึ่งได้จากผลการศึกษาของ Burdet (1990) ไว้ดังนี้

$$T_{burst} = 0.25\Sigma P_u (1 - a/h) + 0.5|\Sigma(P_u \sin\alpha)| \quad (2)$$

$$D_{burst} = 0.5(h - 2e) + 5e \sin\alpha \quad (3)$$

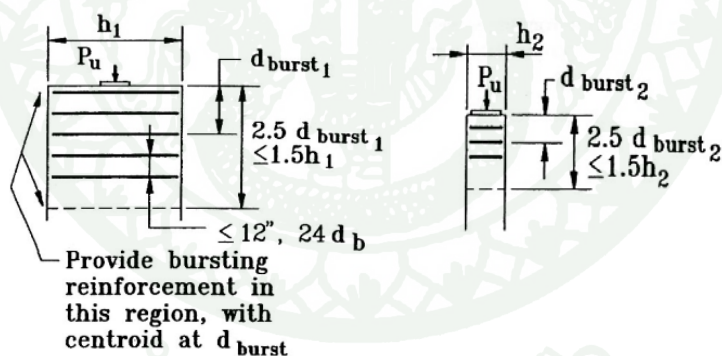
โดย	T_{burst}	=	แรงปริ (kip)
	P_u	=	แรงอัดแบบจุด (kip)
	D_{burst}	=	ระยะจากผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กแบกทานกับคอนกรีตไปถึงจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ (in)
	a	=	ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน (in)
	e	=	ระยะเชิงศูนย์กลางของแรงอัด (in)
	h	=	ความสูงของโครงสร้าง (in)
	α	=	มุมเอียงของแรงอัดมีค่าเป็นบวกเมื่อแรงอัดกระทำในทิศพุ่งเข้าหาศูนย์กลางของหน้าตัด และมีค่าเป็นลบเมื่อแรงอัดกระทำในทิศพุ่งออกนอกศูนย์กลางของหน้าตัด ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ที่มา: AASHTO (2007)

การเหล็กเสริมด้านทานแรงปริจะกระจายเต็มหน้าตัดของโครงสร้างมีระยะเท่ากับค่าน้อยที่สุดระหว่าง $2.5D_{burst}$ และ 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้าง ($1.5h$) และให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ที่ตำแหน่ง D_{burst} โดยที่ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมจะต้องไม่เกิน 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม หรือ 30 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5



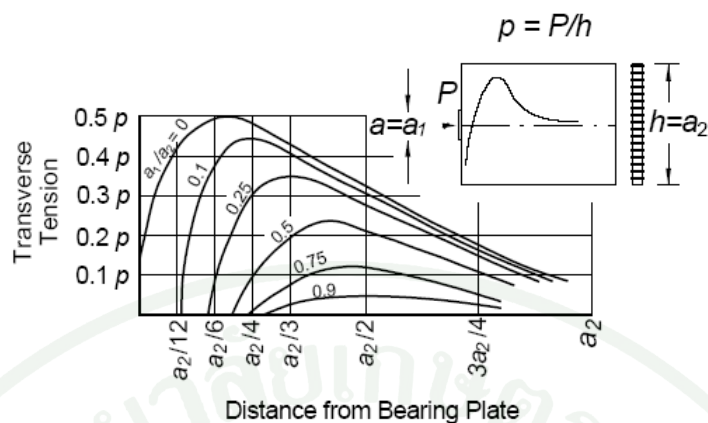
ภาพที่ 5 การจัดเรียงเหล็กเสริมเพื่อต้านทานแรงปริ

ที่มา: AASHTO (2007)

แรงปริทีผิว (Spalling Force) คือแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าด้านที่รับแรงอัด มีทิศทางขนานกับผิวของหน้าตัดของโครงสร้าง กรณีที่มีแรงอัดกระทำเยื้องศูนย์กลางจะเกิดแรงดึงขึ้นที่ขอบของหน้าตัด (Longitudinal Edge Tension Force) มีทิศทางขนานกับผิวตามแนวนอนของโครงสร้าง ขนาดของแรงปริทีผิวสำหรับใช้ในการออกแบบเหล็กเสริมจะใช้ค่าประมาณร้อยละ 2 ของผลรวมของแรงอัดที่กระทำบนโครงสร้าง หากบริเวณสมอียึดมีแรงอัดกระทำมากกว่าหนึ่งชุด ระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานที่อยู่ติดกันจะต้องไม่เกิน 0.4 เท่าของความสูงของโครงสร้าง การเสริมเหล็กด้านทานแรงปริทีผิวต้องกระจายเหล็กเสริมให้ต่อเนื่องตลอดหน้าตัดของโครงสร้าง

American Concrete Institute [ACI] (2008) ได้ปรับปรุงวิธีการออกแบบบริเวณสมอียึดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง โดยอ้างอิงจากผลการศึกษาในรายงานโครงการวิจัยของ NCHRP Project 10-29 (1990) และมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (1996) ดังนั้นข้อกำหนดต่างๆที่ปรากฏในมาตรฐานของ ACI จึงเหมือนกับมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ปี ค.ศ. 1996

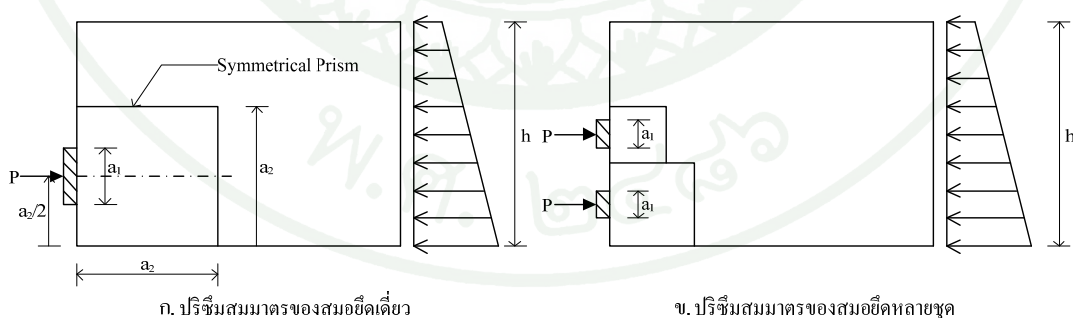
Guyon (1953) ได้เสนอวิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริในบริเวณสมอียึด โดยได้ทำการศึกษาจากแบบจำลองคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีแรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์กลางและแบบเยื้องศูนย์กลาง ในแบบจำลองบริเวณสมอียึดที่มีแรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์กลางได้พัฒนาจากแบบจำลองโครงข้อหมุนของ Mörsch (1924) พร้อมกับได้เสนอวิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียึดกับอัตราส่วนระหว่างขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานต่อความสูงของโครงสร้าง (a_1/a_2) โดย a_1 คือขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน และ a_2 คือความสูงของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีของ Guyon

ที่มา: NCHRP (1994)

กรณีที่มีบริเวณสมอียึดมีแรงอัดกระทำแบบเยื้องศูนย์กลาง ขนาดของ a_2 คือความสูงของปรีซึมสมมาตรในภาพที่ 7ก โดยความสูงของปรีซึมจะมีขนาดเท่ากับสองเท่าของระยะจากศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานไปจนถึงขอบโครงสร้างด้านใกล้ที่สุด นอกจากนี้ หลักการสร้างปรีซึมสมมาตรดังกล่าว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับบริเวณสมอียึดที่มีแรงอัดกระทำแบบหลายชุดดังแสดงในภาพที่ 7ข ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความน่าเชื่อถือและได้รับการยอมรับ จึงถูกนำไปอ้างอิงในงานวิจัยอย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 7 หลักการสร้างปรีซึมสมมาตรของ Guyon

NCHRP Project 10 – 29 (1994) เป็นโครงการวิจัยเพื่อมุ่งศึกษาพฤติกรรมบริเวณสมอียัดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงแบบดึงลวดอัดแรงทีหลัง เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบเหล็กเสริมในบริเวณสมอียัด โดยทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัยเท็กซัสที่เมืองออสติน การศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสำหรับการออกแบบในเบื้องต้น โดย Burdet (1990) ได้สร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียัด ซึ่งเป็นงานวิจัยคู่ขนานกับการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอียัดของ Sanders (1990) นอกจากนี้ Roberts (1990) ยังได้ศึกษาเฉพาะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณตัวหัวสมอียัดเป็นหลัก ส่วนที่สองเป็นการศึกษาบริเวณสมอียัดที่มีรูปร่างและรูปแบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ประกอบด้วย งานวิจัยของ Falconer (1990) ซึ่งได้ศึกษาบริเวณสมอียัดของแผ่นพื้นที่มีแรงอัดกระทำแบบหลายชุด และ Wollmann (1992) ได้ศึกษาบริเวณสมอียัดที่พิจารณาอิทธิพลจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ ผลการศึกษาของโครงการวิจัยนี้ได้ถูกนำไปอ้างอิงในมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงของหน่วยงานต่างๆ เช่น AASHTO (1996) อย่างไรก็ตาม รายละเอียดในรายงานของโครงการวิจัยนี้ ยังไม่มีความชัดเจนสำหรับการออกแบบบริเวณสมอียัดของคานาหน้าตัดปีกและบริเวณสมอียัดที่มีการอัดแรงผ่านสมอียัดมากกว่าหนึ่งชุด

Roberts (1990) ได้ศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงในส่วนของคอนกรีตบริเวณใต้แผ่นเหล็กแบกทานด้วยการทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอียัดจำนวน 28 ตัวอย่าง ที่มีความแตกต่างกันตามตัวแปรที่กำหนดขึ้นคือ ระยะขอบของโครงสร้าง กำลังของคอนกรีตและการจัดเรียงเหล็กเสริมรูปแบบต่างๆ การศึกษานี้ได้มาซึ่งวิธีการออกแบบพื้นฐานของบริเวณตัวหัวสมอียัด

Sanders (1990) ได้ทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอียัดจำนวน 36 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงในบริเวณสมอียัดของคานาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและคานาหน้าตัดรูปตัวที ที่มีแรงอัดกระทำแบบแรงเดียวและแบบหลายชุด โดยตัวอย่างทดสอบดังกล่าวได้ออกแบบให้ครอบคลุมสำหรับรูปแบบของการอัดแรงพื้นฐานของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงทั่วไป ประกอบด้วย การอัดแรงแบบตรงศูนย์ แบบเยื้องศูนย์ และแบบที่ลวดอัดแรงมีความโค้ง (Curve Tendon) นอกจากนี้ยังได้แบ่งกลุ่มตัวอย่างบริเวณสมอียัดออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวอย่างบริเวณสมอียัดที่มีและไม่มีเสริมเหล็กด้านทานแรงปรี สำหรับตัวอย่างบริเวณสมอียัดที่มีแรงอัดกระทำแบบหลายชุด Sanders ได้เลือกศึกษาเฉพาะตัวอย่างบริเวณสมอียัดที่มีแรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์และแบบเยื้องศูนย์ โดยกลุ่มตัวอย่างทดสอบ M-Series เป็นบริเวณสมอียัดของคานาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกลุ่มตัวอย่างทดสอบ F-Series เป็นบริเวณสมอียัดของคานาหน้าตัดรูปตัวที

Burdet (1990) ได้ศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและคานหน้าตัดรูปตัวที โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อิเลเมนต์ ในเบื้องต้น Burdet ได้ศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบของการสร้างแบบจำลอง 2 มิติกับ 3 มิติ ในลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า หน่วยแรงปริมาตรที่เกิดขึ้นในแบบจำลองทั้งสองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้น Burdet จึงเลือกใช้แบบจำลอง 2 มิติในการวิเคราะห์ อีกทั้งยังได้ศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลองที่สร้างขึ้น เช่น ขนาดของอิเลเมนต์ ความสูงของแบบจำลอง ตลอดจนอิทธิพลของการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่อของอิเลเมนต์ของคานกรัดกับแผ่นเหล็กแบกทาน การศึกษาดังกล่าวได้แบ่งรูปแบบของการอัดแรงออกเป็น 3 รูปแบบคือ การอัดแรงแบบตรงศูนย์ แบบเอียงศูนย์ แบบเอียงเอียงศูนย์ และแบบแรงอัดกระทำมากกว่าหนึ่งชุด

บริเวณสมอชิดที่มีแรงอัดกระทำมากกว่าหนึ่งชุด Burdet ได้เลือกศึกษาเฉพาะกรณีที่บริเวณสมอชิดมีการอัดแรงเพียงสองชุดเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วย กรณีที่จุดศูนย์ถ่วงของแรงสองแรงอยู่ตรงศูนย์และเอียงศูนย์ของแบบจำลอง สำหรับแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวที Burdet ได้เลือกศึกษาแบบจำลองบริเวณสมอชิดที่มีจุดศูนย์ถ่วงของแรงสองแรงอยู่ตรงศูนย์ ผลจากการศึกษาดังกล่าว Burdet ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริมาตรที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิดดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 ซึ่งได้ถูกบรรจุไว้ในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ในปี ค.ศ. 1996

Wollmann (1992) ได้ทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิด โดยพิจารณาอิทธิพลจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งคล้ายกันกับตัวอย่างทดสอบ B3 ของ Sanders โดยการทดสอบตัวอย่างคานของการศึกษานี้ได้กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ตรงกึ่งกลางคาน และใช้น้ำหนักบรรทุกกระทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัดรวมที่กระทำต่อโครงสร้าง

Hengprthanee (2004) ได้ศึกษาพฤติกรรมบริเวณสมอชิดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกภายใต้แรงอัดกระทำเพียงแรงเดียว โดยการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ทั้งที่โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นและไร้เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analyses) มีรูปแบบการอัดแรงทั้งหมด 4 รูปแบบคือ การอัดแรงแบบตรงศูนย์ แบบเอียงศูนย์ แบบเอียงตรงศูนย์ และแบบเอียงเอียงศูนย์ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองถูกนำมาเพื่อใช้ในการหาขนาดและตำแหน่ง

จุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิด และนำผลลัพธ์ที่ได้มาหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของสมอชิด ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานของฐานรองรับ ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด มุมเอียงของแรงอัด ขนาดและตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ ความหนาของเอวคาน ความกว้างของปีกคาน และความหนาของปีกคาน

ผลจากการศึกษาดังกล่าว Hengprathane ได้แนะนำสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีก โดยพัฒนาจากแบบจำลอง STM และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ พบว่า ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ได้จากการคำนวณตามสมการมีค่าใกล้เคียงกันกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคาน

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1u} + R_2) \left(\frac{4y_u + 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a} \right) \left(1 - \frac{a}{4y_u + 4\rho} \right) + 0.6 \Sigma (P_u \sin \alpha) \quad (4)$$

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1l} + R_3) \left(\frac{4y_l - 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a} \right) \left(1 - \frac{a}{4y_l - 4\rho} \right) + 0.6 \Sigma (P_u \sin \alpha) \quad (5)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - e) + \frac{a}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{fl}/h_w)) + \frac{h_w}{4} \sin \alpha \quad (6)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (c + \frac{t_{f2}}{2} + e) + \frac{a}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{l2}/h_w)) + \frac{h_w}{4} \sin \alpha \quad (7)$$

กำหนดให้ h_w แทนความสูงส่วนของเอวคาน, h' คือ ความสูงทั้งหมดของคานหน้าตัดปีก, t_w คือ ความหนาของเอวคาน, t_{fl} และ t_{l2} คือ ความหนาของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่างตามลำดับ, c คือ ระยะจากศูนย์กลางความหนาของปีกคานด้านล่างถึงจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน, b_{fl} และ b_{l2} คือ ความกว้างของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่าง ตามลำดับ, a คือ ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทาน, e คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัดมีค่าเป็นบวกเมื่ออยู่เหนือจุดศูนย์กลางของหน้าตัด

คาน และมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ใต้จุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน, α คือ มุมเอียงของแรงอัดมีค่าเป็นบวกเสมอ และ P_u คือแรงอัดที่กระทำต่อโครงสร้าง

$T_{burst-web}$ คือ แรงปริที่เอวคาน โดยพิจารณาเลือกใช้ค่ามากที่สุดระหว่างผลการคำนวณจากสมการที่ 4 และ 5 เพื่อใช้สำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปริ สัญลักษณ์ $D_{burst-web}$ เป็นระยะจากผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กแบกทานไปถึงจุดศูนย์กลางของแรงปริที่เอวคาน ซึ่งเลือกใช้ค่าน้อยที่สุดจากผลการคำนวณในสมการที่ 6 และ 7, R_{1u} และ R_{1l} คือ แรงลัพท์ที่เอวคานด้านบนและด้านล่างจากแนวศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทาน ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากแผนผังของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่บริเวณเอวคาน โดยพิจารณาจากตำแหน่งของแรงอัดที่กระทำต่อโครงสร้างถึงผิวด้านนอกสุดของปีกคานดังแสดงในภาพที่ 8, R_2 และ R_3 คือแรงลัพท์ที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากแผนผังของหน่วยแรงที่ปีกคาน, y_u และ y_l คือระยะจากศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานถึงจุดศูนย์กลางของแรงลัพท์รวมที่ส่วนบนและส่วนล่างของบริเวณสมอยึด โดยวัดจากศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานดังภาพที่ 8x และ ρ มีค่าเท่ากับ $(R_{1u} + R_2 - 0.5P_u)/(a/2P_u)$

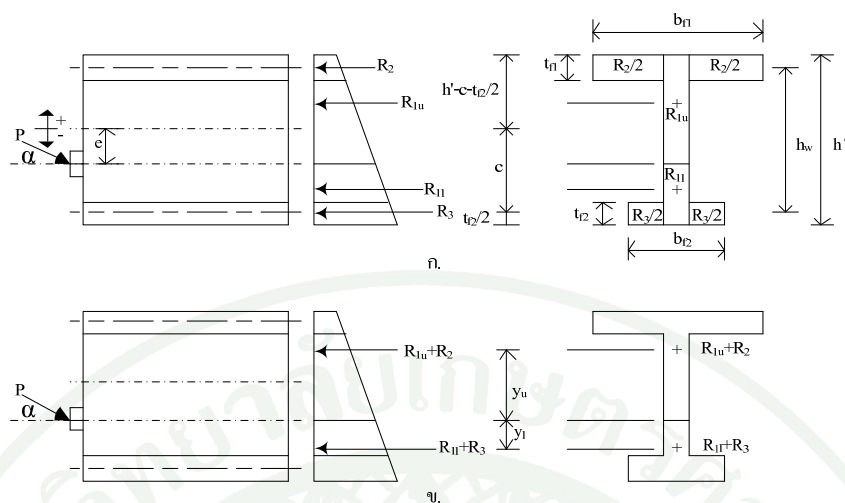
2. ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่ปีกคาน

$$T_{burst-flg1,2} = 0.15k_{fl,2}^3 \sum P_u, k_{fl,2} \leq 1.0 \quad (8)$$

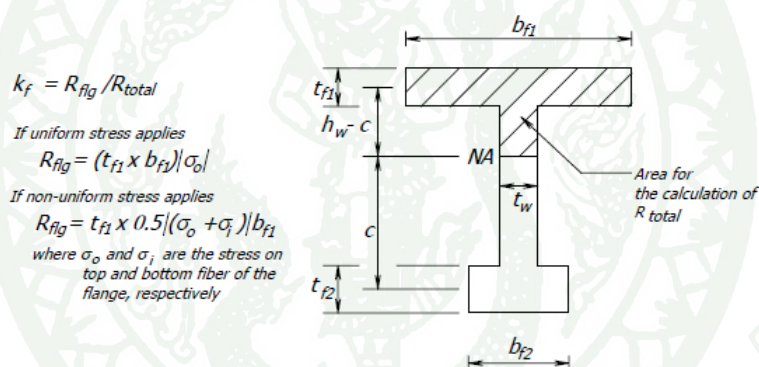
$$D_{burst-flg1} = \frac{h_w - c - e}{4} + \frac{3t_{fl}}{8} + \frac{R_2}{T_{burst-flg1}} \left(\frac{b_{fl} + t_w}{8} \right) \quad (9)$$

$$D_{burst-flg2} = \frac{c + e}{4} + \frac{3t_{fl2}}{8} + \frac{R_3}{T_{burst-flg2}} \left(\frac{b_{fl2} + t_w}{8} \right) \quad (10)$$

$T_{burst-flg1}$ และ $T_{burst-flg2}$ คือแรงปริที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ $D_{burst-flg1}$ และ $D_{burst-flg2}$ คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่ปีกคานด้านบนและด้านล่างเทียบจากปลายคานตามลำดับ สัญลักษณ์ $k_{fl,2}$ คืออัตราส่วนของแรงลัพท์ที่ปีกคานมีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 แผนผังแรงลัพท์ด้านท้ายของแบบจำลองและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ



ภาพที่ 9 วิธีการคำนวณหาค่าตัวแปร $k_{n,2}$

ที่มา: Hengprathanee (2004)

นอกจากนี้ Hengprathanee ยังได้เสนอวิธีการจัดเรียงเหล็กเสริมให้ครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรี โดยให้กระจายเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีออกไปเป็นระยะเท่ากับ 2 เท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีและให้จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมดังกล่าวอยู่ใกล้เคียงกับจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการทั้งในส่วนของเอวคานและส่วนของปีกคาน

เขมวิษณุ (2553) ได้ศึกษาพฤติกรรมบริเวณสมอียดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบดึงลวดอัดแรงทีหลัง ภายใต้แรงอัดกระทำแบบสองชุดทั้งที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ โดยมีรูปแบบการอัดแรงทั้งหมด 4 รูปแบบ ประกอบด้วย การอัดแรงแบบตรงศูนย์ แบบเอียงศูนย์ แบบเอียงตรงศูนย์ และแบบเอียงเอียงศูนย์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของสมอียด ขนาดและตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานของฐานรองรับ ระยะเอียงศูนย์ของแรงอัด มุมเอียงของแรงอัด และระยะห่างระหว่างอัด พร้อมกับเปรียบเทียบผลการศึกษากับวิธีการออกแบบของ AASHTO (1996) และวิธีการออกแบบที่นำเสนอโดย Hengprathanee โดยพิจารณารวมเอาผลของแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับไว้ในสมการด้วย

ผลจากการศึกษาของเขมวิษณุพบว่า บริเวณสมอียดของคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีแรงอัดกระทำสองชุดโดยปราศจากผลของแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กรณี โดยใช้ระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสองเป็นเกณฑ์ได้แก่ กรณีที่แรงอัดอยู่ห่างกันไม่เกิน 1.5 เท่าของขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน (1.5a) หน่วยแรงปริจากแรงอัดทั้งสองจะรวมกันเป็นบริเวณเดียว ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับบริเวณสมอียดที่มีการอัดแรงแบบแรงเดียว กรณีที่แรงอัดอยู่ห่างกันมากกว่า 1.5a แต่ไม่เกิน 0.50 เท่าของความสูงของหน้าตัด (0.50h) หน่วยแรงปริถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดแต่ละแรง และหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของแรงอัดทั้งสองร่วมกัน และกรณีที่แรงอัดอยู่ห่างกันมากกว่า 0.50 h แรงปริจะเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดแต่ละแรงอย่างชัดเจน โดยหน่วยแรงปริซึ่งเกิดขึ้นจากอิทธิพลร่วมของแรงอัดทั้งสองจะมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เขมวิษณุได้เสนอแนวทางในการพิจารณาออกแบบเหล็กเสริมรับแรงปริในบริเวณสมอียดในกรณีของแรงอัดสองชุดสำหรับคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ (PC)
2. โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์เชิงพาณิชย์ชื่อ ANSYS
3. โปรแกรมอื่นๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลตลอดจนจัดทำรายงานการศึกษา เช่น Microsoft Office

วิธีการ

1. การศึกษาเบื้องต้น

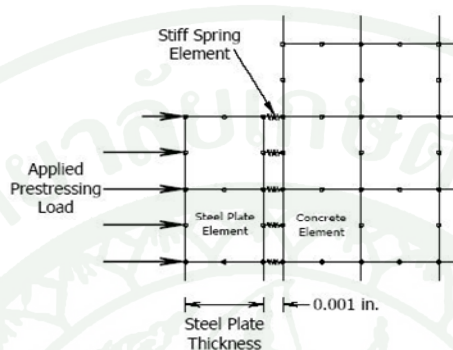
การศึกษาเบื้องต้นจะประกอบไปด้วยการศึกษารายละเอียดทั่วไปที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์และตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาโดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การเตรียมแบบจำลอง

1.1.1 การเลือกแบบจำลอง

รายละเอียดทั่วไปของแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยจะอาศัยขนาดของแบบจำลองที่ใกล้เคียงกันกับแบบจำลองคานาหน้าตัดปีกของ Hengprathanee คอนกรีตและเหล็กเสริมถูกพิจารณาให้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous Material) โดยอีลิเมนต์ของคอนกรีตและแผ่นเหล็กแบกทานในแบบจำลองถูกแทนที่ด้วยอีลิเมนต์ขนาดเล็กแบบแผ่นบาง (Shell Element) การเชื่อมต่อกันระหว่างคอนกรีตกับแผ่นเหล็กแบกทานใช้อีลิเมนต์แบบสปริงขนาด 0.001 นิ้ว เชื่อมระหว่างจุดต่อ (Node) ของอีลิเมนต์ เพื่อลดความผิดพลาดของการถ่ายแรงจากพฤติกรรมแบบพัชของ (Poisson's Effect) ของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 10

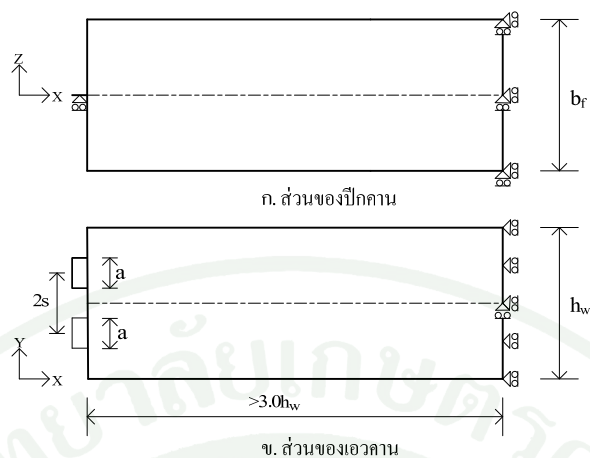
เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Hengprathanee การศึกษานี้เลือกใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) เท่ากับ 4.3×10^6 psi และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν_c) เท่ากับ 0.16 แผ่นเหล็กแบกทานมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) เท่ากับ 2.5×10^7 psi และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν_s) เท่ากับ 0.24 อลิเมนต์แบบสปริง มีค่าความแข็งของสปริง (k) เท่ากับ 1.0×10^{10} psi



ภาพที่ 10 การเชื่อมต่อระหว่างอิลิเมนต์ด้วยสปริงในแบบจำลอง

ที่มา: Hengprathanee (2004)

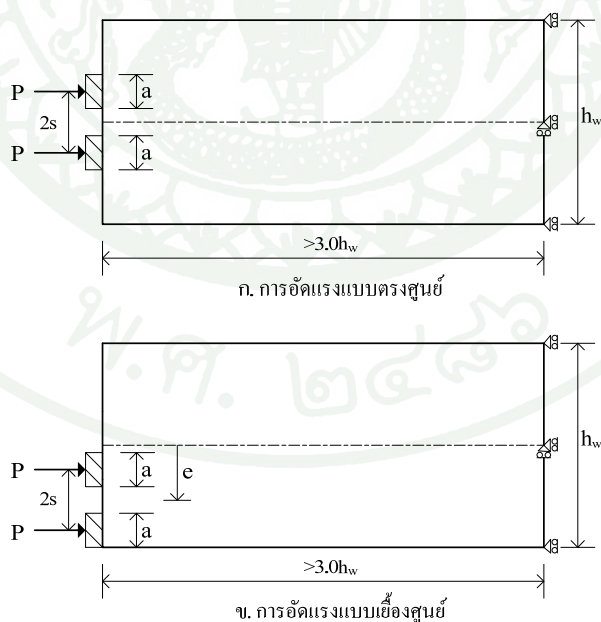
แบบจำลองคานหน้าตัดปีกมีสถานะการยึดรั้งของฐานรองรับที่ด้านท้ายของแบบจำลองทั้งหมด 3 ทิศทาง คือ ทิศทางแนวราบ แนวตั้ง และแนวด้านข้าง ฐานรองรับของแบบจำลองจะกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้แบบจำลองมีพฤติกรรมการยึดหดตัวคล้ายโครงสร้างจริงมากที่สุด เนื่องจากสถานะการยึดรั้งของฐานรองรับจะมีผลต่อขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึด ดังแสดงในภาพที่ 11 ฐานรองรับแนวราบ (แกน X) ถูกกำหนดให้อยู่ด้านท้ายของแบบจำลองในฝั่งตรงข้ามกับด้านที่มีแรงกระทำ ซึ่งจะใช้ฐานรองรับแบบเลื่อนตัวได้ (Roller Support) ทั้งบริเวณเอวคานและปีกคาน ฐานรองรับแนวด้านข้าง (แกน Z) ใช้ฐานรองรับแบบเลื่อนตัวได้ที่บริเวณปีกคาน สำหรับฐานรองรับในแนวตั้ง (แกน Y) ซึ่งอยู่ด้านท้ายของแบบจำลอง แรงปฏิกิริยาจากฐานรองรับในแนวตั้งนี้อาจส่งผลกระทบต่อค่าหน่วยแรงปรี หากแบบจำลองมีความยาวน้อยเกินไป จากการทดสอบความยาวของแบบจำลองควรมีค่าน้อยประมาณ 3 เท่าของความสูงของเอวคาน ($3h_w$) ถึงจะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งนี้ได้



ภาพที่ 11 สภาวะการยึดรั้งของฐานรองรับของในแบบจำลอง

1.1.2 รูปแบบของการอัดแรงในบริเวณสมอยึดที่ใช้ในการศึกษา

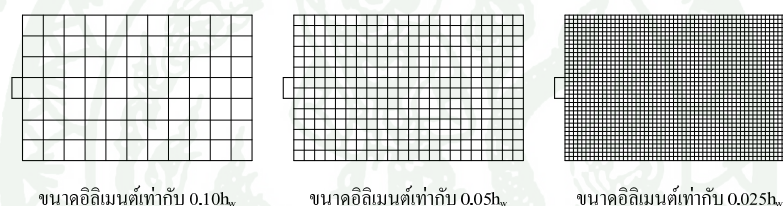
รูปแบบของการอัดแรงผ่านสมอยึดที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยแรงอัดจำนวนสองชุด โดยจัดให้มีการกระทำแบบตรงศูนย์และแบบเอียงศูนย์ ดังแสดงในภาพที่ 12



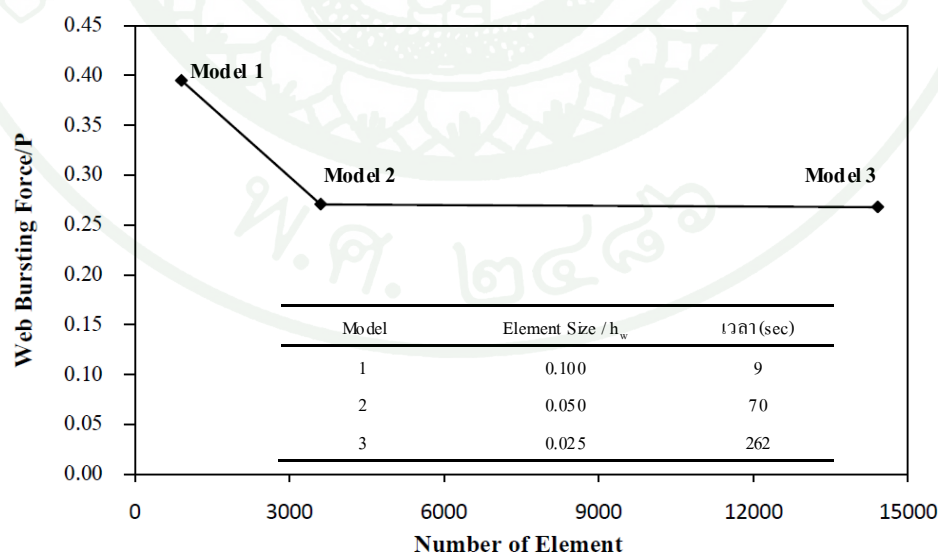
ภาพที่ 12 รูปแบบของการอัดแรงที่ใช้ในการศึกษา

1.1.3 การทดสอบหาขนาดของอีลิเมนต์ที่เหมาะสม (Convergence Test)

ในเบื้องต้น เลือกใช้แบบจำลองบริเวณสมอียึดของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร มีความสูงส่วนของเอวคาน (h_w) เท่ากับ 16 นิ้ว ความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว ความหนาของเอวคาน 1.5 นิ้ว และความหนาของปีกคาน 1.2 นิ้ว โดยกำหนดรูปร่างของแบบจำลองเหมือนกันทั้งหมดแต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของอีลิเมนต์ แบบจำลองที่ใช้ทดสอบจะกำหนดค่า a/h_w เท่ากับ 0.10 ขนาดของอีลิเมนต์ที่ใช้ทดสอบได้แก่ $0.10h_w$, $0.05h_w$ และ $0.025h_w$ แบบจำลองถูกทดสอบภายใต้แรงอัดกระทำแบบตรงศูนย์ ภาพที่ 13 แสดงแบบจำลองที่มีขนาดของอีลิเมนต์แตกต่างกัน และภาพที่ 14 แสดงผลการทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบสรุปได้ว่า แบบจำลองที่มีขนาดอีลิเมนต์เท่ากับ $0.05h_w$ ให้ค่าแรงปรีที่ใกล้เคียงกันกับอีลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กกว่า ($0.025h_w$) แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่ามาก โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเพียง 0.74% เท่านั้น

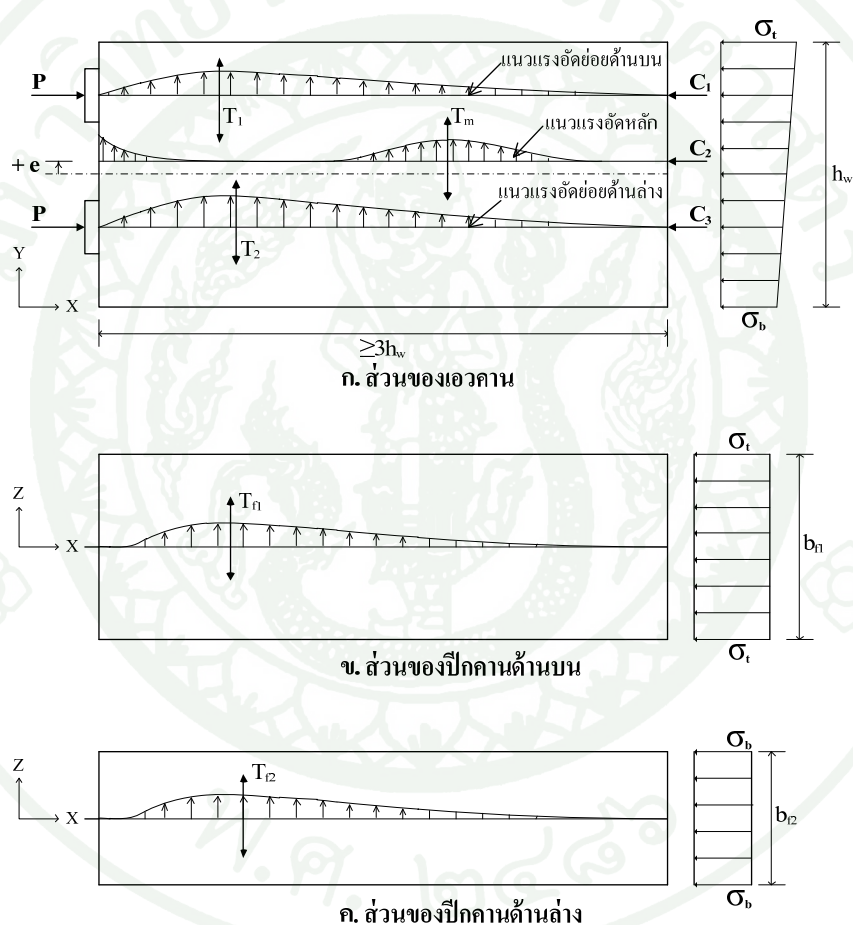


ภาพที่ 13 แบบจำลองที่ใช้ทำการทดสอบหาขนาดอีลิเมนต์ที่เหมาะสม



ภาพที่ 14 การทดสอบหาขนาดที่เหมาะสมของอีลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ในแบบจำลองบริเวณสมอชิดของคานหน้าตัดปีกที่มีการอัดแรงแบบสองชุดนั้น เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันพอสมควร แรงปรีที่ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอชิดจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกันกับบริเวณสมอชิดที่มีการอัดแรงแบบชุดเดียวดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งภายในบริเวณสมอชิดมีแรงปรีที่เอวคานเกิดขึ้น 3 บริเวณ ได้แก่ แรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดในแต่ละแรง (T_1 และ T_2) เรียกว่า แนวแรงอัดย่อย และแรงปรีที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของแรงทั้งสองร่วมกัน (T_m) เรียกว่า แนวแรงอัดหลัก ในส่วนของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปีกคานจะมีทิศตั้งฉากกับแนวศูนย์กลางของปีกคาน (T_{Π} และ T_{I2})

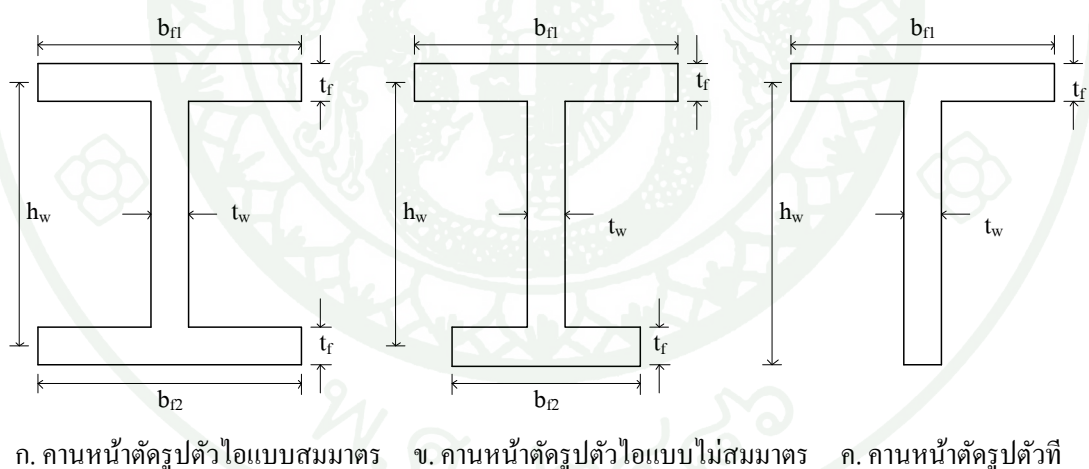


ภาพที่ 16 ทิศทางของแนวแรงอัดหลัก เมื่อบริเวณสมอชิดมีแรงอัดกระทำแบบสองชุด

1.2 ตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

1.2.1 แบบจำลองคานหน้าตัดปีก

แบบจำลองคานหน้าตัดปีกในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ขนาดของแบบจำลอง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hengprathanee ที่ได้ปรับเปลี่ยนขนาดของแบบจำลองให้สอดคล้องกันกับ ตัวอย่างทดสอบของ Sanders โดยกำหนดให้แบบจำลองคานหน้าตัดปีกมีความสูงส่วนของเอวคาน (h_w) เท่ากับ 16 นิ้ว ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของแบบจำลองคานหน้าตัดปีกได้แสดงไว้ในภาพที่ 17 และ ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ b_{fl} และ b_{l2} แทนความกว้างของปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ แบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร กำหนดให้ความกว้างของปีกคานด้านบนมีขนาด คงที่ ความกว้างของปีกคานด้านล่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน (b_{l2}/b_{fl}) สำหรับแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร ความกว้างของปีกคานด้านล่างจะ เท่ากันกับความกว้างของปีกคานด้านบนหรือ b_{l2}/b_{fl} เท่ากับ 1.0 และแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวที จะกำหนดให้ความกว้างของปีกคานคือ ความกว้างของปีกคานด้านบน (b_{fl})



ภาพที่ 17 แบบจำลองของคานหน้าตัดปีก

ตารางที่ 1 ขนาดของแบบจำลองคานหน้าตัดปีก

t_w (in)	t_f/t_w	b_{fl} (in)	b_{f2}/b_{fl}
1.5	0.8	6.4	0.00
3.0	1.1	12.8	0.25
5.0	1.4	16.0	0.30
		25.6	0.50
		35.2	0.75
		46.4	0.80
		56.0	1.00

1.2.2 อัตราส่วนของขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน (Anchorage Ratio, a/h_w)

จากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมา ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานได้ถูกพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบบริเวณสมอชิด เช่นเดียวกันกับในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ที่ได้กำหนดให้ขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งในการคำนวณหาขนาดของแรงปัดังแสดงในสมการที่ 2 ซึ่งขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานกำหนดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่างขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานต่อความสูงของเอวคานหรืออัตราส่วนของขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน (Anchorage Ratio, a/h_w) ค่าของ a/h_w ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, และ 0.30 โดยขนาดของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองชุดจะมีขนาดเท่ากัน

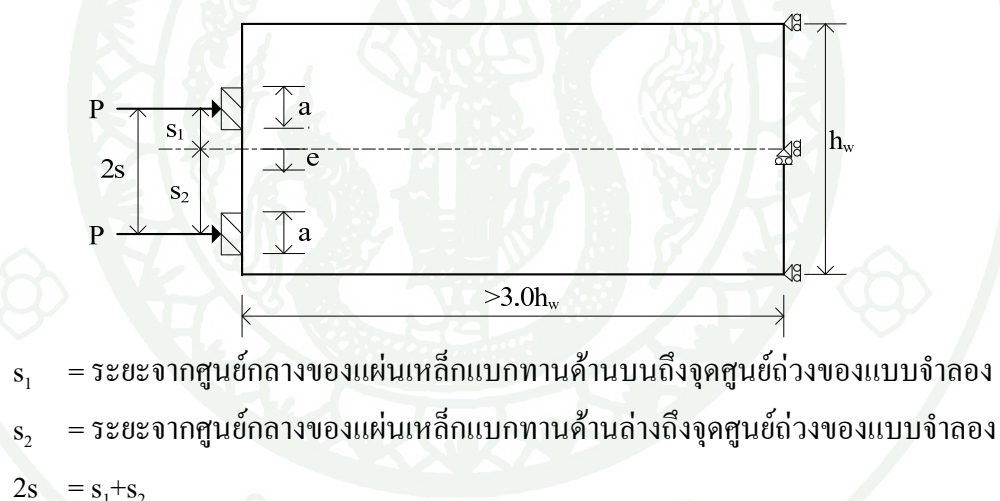
1.2.3 อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด (Eccentricity Ratio, e/h_w)

ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งสำหรับการออกแบบบริเวณสมอชิดในมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปัดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 สามารถคำนวณได้โดยประยุกต์ใช้หลักการสร้างปริซึมสมมาตรตามข้อเสนอของ Guyon อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงอัด (Eccentricity Ratio, e/h_w) จะกำหนดให้มีค่าเป็นบวกหากการเยื้องศูนย์กลางขึ้นด้านบนของแนวศูนย์กลางของหน้าตัดคาน และมีค่าเป็นลบหากการเยื้องศูนย์กลางด้านล่างของแนวศูนย์กลางของหน้าตัดคาน โดยค่า e/h_w ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย +0.30, +0.20, +0.10, 0.00, - 0.10, - 0.20 และ - 0.30

1.2.4 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแรงอัด ($2s/h_w$)

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการศึกษาพฤติกรรมของขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริในบริเวณสมอียด ภายใต้การอัดแรงแบบสองชุด ดังนั้นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นอีกตัวหนึ่งคือ ระยะห่างระหว่างแรงอัดสองชุดที่กระทำต่อแบบจำลอง โดยวัดจากศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานด้านบนถึงศูนย์กลางของแผ่นเหล็กแบกทานด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 18

ระยะห่างระหว่างแรงอัดกำหนดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดต่อความสูงของเอวคาน ($2s/h_w$) เพื่อให้สามารถบอกถึงความเปลี่ยนแปลงของแรงปริที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียด เมื่อระยะห่างระหว่างแรงอัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า $2s/h_w$ ประกอบด้วย 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90 และ 0.95 โดยถือว่าเป็นระยะที่ใกล้และไกลที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับการสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 18 ระยะห่างระหว่างแรงอัด ($2s$)

1.3 สรุปค่าของตัวแปรต่างๆ

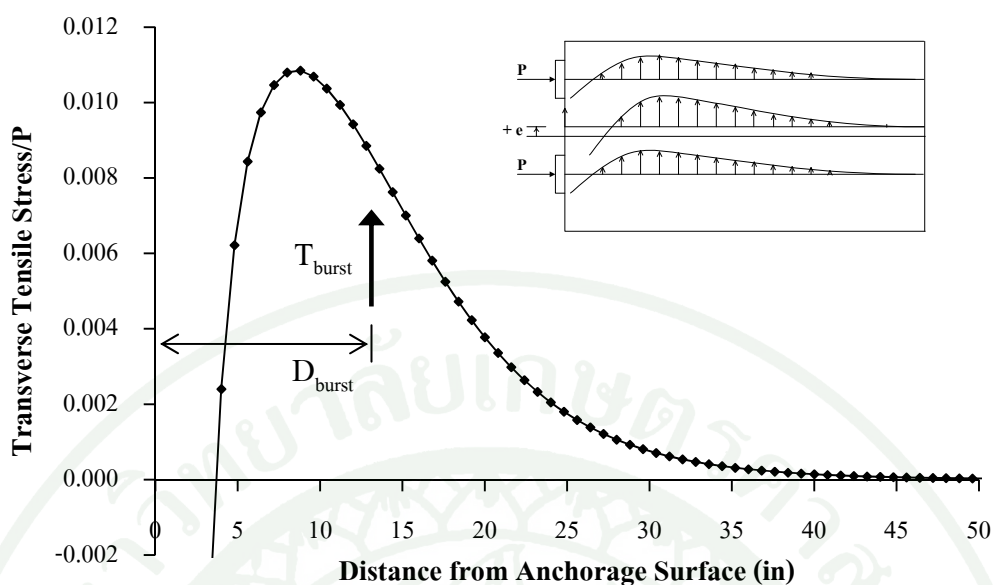
ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปค่าตัวแปรต่างๆ

t_w (in)	t_r/t_w	b_{π} (in)	$b_{\pi'}/b_{\pi}$	a/h_w	e/h_w	$2s/h_w$
1.5	0.8	6.4	0.00	0.05	+0.30	0.05
3.0	1.1	12.8	0.25	0.10	+0.20	0.10
5.0	1.4	16.0	0.30	0.15	+0.10	0.20
		25.6	0.50	0.20	0.00	0.30
		35.2	0.75	0.25	-0.10	0.40
		46.4	0.80	0.30	-0.20	0.50
		56.0	1.00		-0.30	0.60
						0.70
						0.80
						0.90
						0.95

2. การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริสามารถกระทำได้ โดยการนำค่าหน่วยแรงดึง (Transverse Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับแนวแรงอัดในแต่ละแรงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหน่วยแรงกับระยะทางตามแนวแรงอัด ขนาดของแรงปริ (Bursting Force, T_{burst}) คือผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟในส่วนของหน่วยแรงดึง ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงอัด ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ (Local Bursting Force, D_{burst}) คือระยะจากปลายคานด้านรับแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ใต้กราฟในส่วนของหน่วยแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แรงปริและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ

3. การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริกับตัวแปรต่างๆ

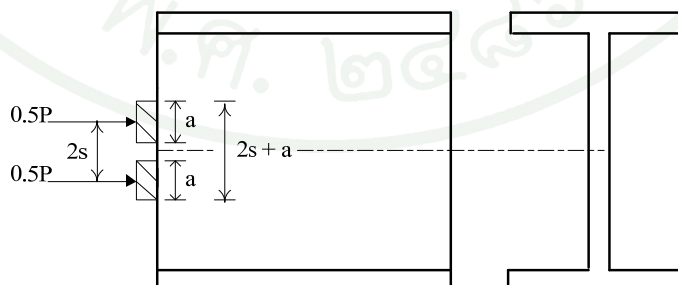
ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่ได้จากผลการวิเคราะห์ถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ตามตารางที่ 2 ในเบื้องต้น ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานและปีกคานจะนำมาสร้างความสัมพันธ์กับขนาดของแบบจำลอง ประกอบด้วย ความหนาของเอวคาน ความหนาของปีกคาน และความกว้างของปีกคาน เพื่อศึกษาอิทธิพลจากขนาดของแบบจำลองที่มีต่อขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริในบริเวณสมอยึด ภายใต้แรงอัดกระทำแบบสองชุด ขั้นตอนต่อไปคือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานและปีกคานกับระยะห่างระหว่างแรงอัด โดยมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงของขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริในบริเวณสมอยึดภายใต้รูปแบบการอัดแรงแบบตรงศูนย์และแบบเอียงศูนย์

4. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการอื่นๆ

การเปรียบเทียบผลของการวิจัยกับวิธีการออกแบบเหล็กเสริมเพื่อด้านทานแรงปริแบบอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่เกิดขึ้น ในบริเวณสมอชิดคานหน้าตัดปีกที่มีการอัดแรงแบบสองชุด สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กับขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอชิดที่มีการอัดแรงแบบตรงศูนย์กลางและแบบเยื้องศูนย์กลาง ความสัมพันธ์นี้นำไปสู่การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีการออกแบบตามมาตรฐานของ AASHTO (สมการที่ 2 และ 3) วิธีการออกแบบที่เสนอโดย Hengprathanee (สมการที่ 4 ถึง 10) และการสร้างแบบจำลอง STM ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี โดยใช้พฤติกรรมของหน่วยแรงปริที่เอวคานเป็นเกณฑ์ ได้แก่

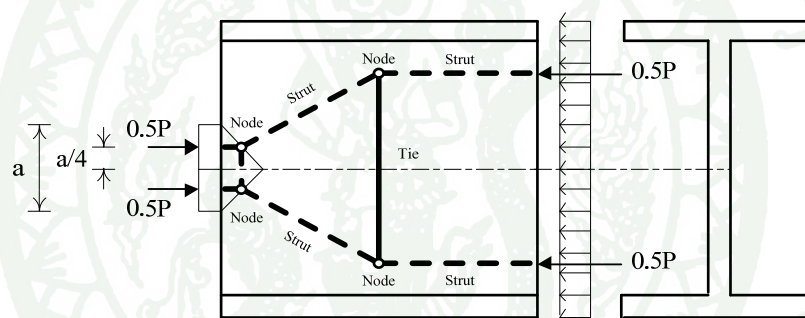
4.1 เมื่อหน่วยแรงปริที่เอวคานรวมเป็นบริเวณเดียว ผลจากการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริจากวิธีการออกแบบตามมาตรฐานของ AASHTO (สมการที่ 2 และ 3) และวิธีการออกแบบของ Hengprathanee (สมการที่ 4 ถึง 10) โดยพิจารณาให้บริเวณสมอชิดมีแรงอัดกระทำแบบแรงเดียว ซึ่งมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานที่ใช้ในสมการเท่ากับระยะตั้งแต่ขอบด้านบนของแผ่นเหล็กแบกทานด้านบนถึงขอบด้านล่างของแผ่นเหล็กแบกทานด้านล่างหรือ $2s + a$ ดังแสดงในภาพที่ 20 ในส่วนของขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ปีกคานจะเปรียบเทียบเฉพาะกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการออกแบบของ Hengprathanee เท่านั้น



ภาพที่ 20 วิธีการคำนวณขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม

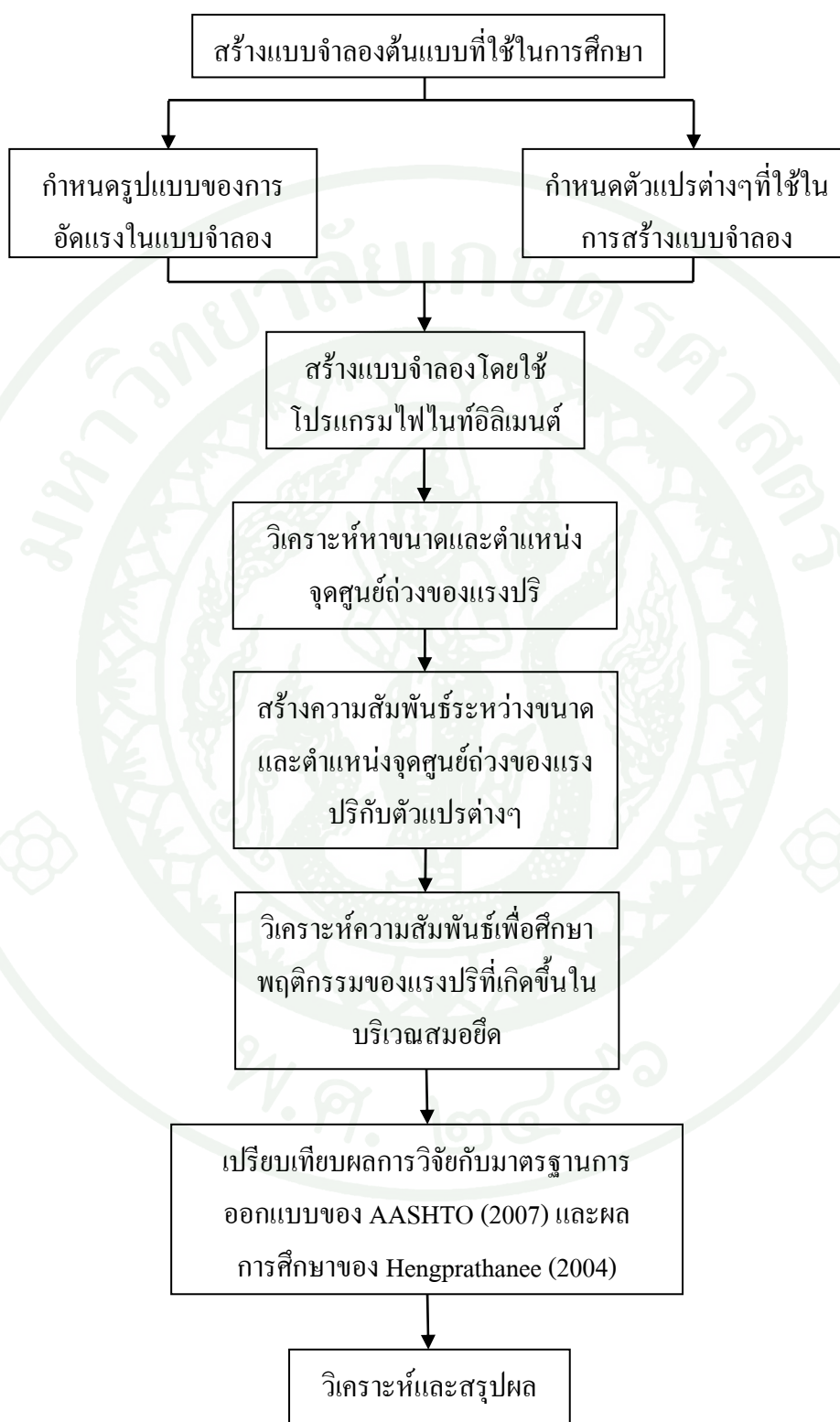
4.2 เมื่อหน่วยแรงปริทีเอวคานแยกออกเป็น 2 บริเวณ การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริจากสมการที่ 2 และ 3 ของ AASHTO สามารถกระทำได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการสร้างปริซึมสมมาตรตามข้อเสนอของ Guyon ตลอดจนการสร้างแบบจำลอง STM เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยชิ้นนี้

การสร้างแบบจำลอง STM คือวิธีการสร้างแบบจำลองโครงข้อหมุน (Truss) โดยอาศัยลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงภายในบริเวณสมอียด ซึ่งสมมุติให้การกระจายของหน่วยแรงอัดรองรับโดยคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนรับแรงอัด (Strut) ในส่วนของหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจะถูกรองรับด้วยเหล็กเสริม (Tie) โดยจะเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนที่รองรับแรงอัดที่จุดต่อ (Node) ซึ่งการวิเคราะห์แบบจำลอง STM จะใช้การวิเคราะห์แบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติก (Linear Elastic) และหลักการสมดุลของแรงภายในของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การสร้างแบบจำลอง STM

แผนผังการดำเนินงานวิจัย แสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แผนผังการดำเนินการวิจัย

ผลและวิจารณ์

1. บริเวณสมอียัดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์

1.1 คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร

1.1.1 ระดับของหน่วยแรงปริ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปริในบริเวณสมอียัดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ โดยมีระยะห่างระหว่างแรงอัดที่แตกต่างกันของแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรที่มีความสูงส่วนของเอวคาน (h_w) 16 นิ้ว ความหนาของเอวคาน (t_w) 1.5 นิ้ว และมีความหนาของปีกคาน (t_f) 2.1 นิ้ว

ภาพที่ 23 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 6.4 นิ้ว เมื่อบริเวณสมอียัดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์ และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน (a) เท่ากับ $0.25h_w$ ซึ่งหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะสมมาตรกันตลอดแนวศูนย์กลางของเอวคาน



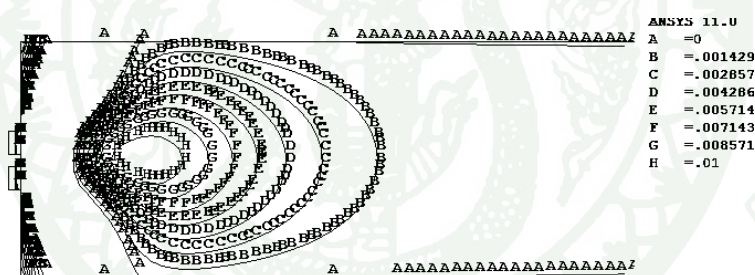
ภาพที่ 23 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงเพียงแรงเดียว

แบบตรงศูนย์ เมื่อ $b_f = 6.4"$, $a/h_w = 0.25$

ภาพที่ 24 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 6.4 นิ้ว โดยมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน $0.10h_w$ และมีระยะห่างระหว่างแรงอัด (2s) เท่ากับ $0.15h_w$ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดสองแรงอยู่ใกล้กัน การกระจายของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้น

ภายในบริเวณเอวคานในภาพที่ 24ก มีลักษณะคล้ายกันกับบริเวณสมอียด์ที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์ (ภาพที่ 23) ในส่วนของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานในภาพที่ 24ข ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงอัดจากเอวคานถ่ายเข้าสู่ปีกคานมีลักษณะที่แตกต่างจากบริเวณเอวคาน โดยหน่วยแรงปริที่ปีกคานนี้มีลักษณะสมมาตรกันตลอดแนวศูนย์กลางของปีกคาน อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานจะมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน

ภาพที่ 25 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว โดยมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานและระยะห่างระหว่างแรงอัดเช่นเดียวกับภาพที่ 24 พบว่า หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะมีลักษณะคล้ายกันกับภาพที่ 24ก ในขณะที่หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานจะมีการกระจายของหน่วยแรงมากกว่าแบบจำลองชุดที่แล้ว อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานเกิดจากหน่วยแรงอัดจากเอวคานถ่ายเข้าสู่ปีกคาน ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกนำเสนอเฉพาะแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ เท่านั้น ในลำดับต่อไป



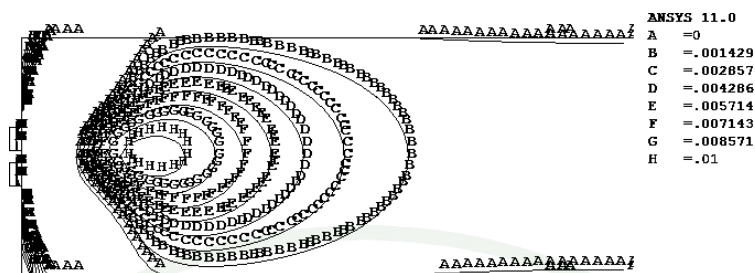
ก. บริเวณเอวคาน



ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 24 ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 6.4"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$



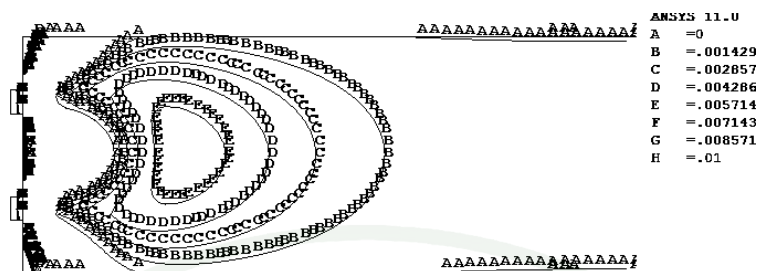
ก. บริเวณเอวคาน



ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 25 ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$

เมื่อระยะห่างระหว่างแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายของหน่วยแรงปริในแบบจำลองแตกต่างไปจากกรณีที่แรงอัดสองแรงอยู่ใกล้กัน ดังแสดงในภาพที่ 26 ระดับของหน่วยแรงปริภายในแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างแรงอัดเท่ากับ $0.45h_w$ อิทธิพลจากแรงอัดบนสมอียดที่อยู่ห่างกัน ส่งผลให้หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานเริ่มแยกออกจากกัน และมีหน่วยแรงดึงอันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงอัดทั้งสองเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลัก ซึ่งหน่วยแรงดึงที่ปรากฏขึ้นที่บริเวณตรงกลางระหว่างแรงอัดทั้งสองนี้เรียกว่า หน่วยแรงปริที่ผิว (Spalling Stress)



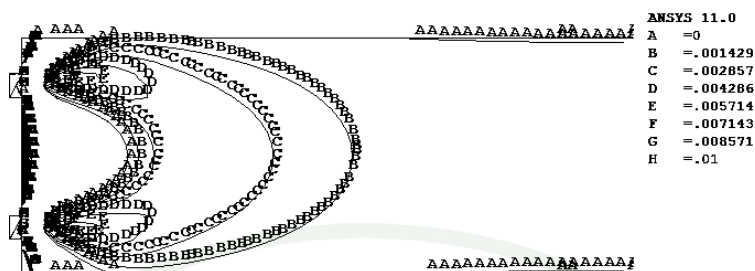
ก. บริเวณเอวคาน



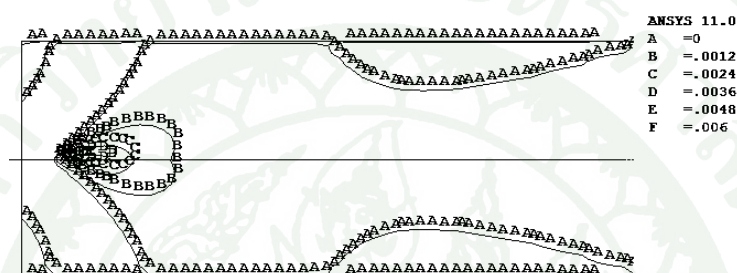
ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 26 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.45$

ภาพที่ 27 แสดงระดับของหน่วยแรงปริมาตรในแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างแรงอัดห่างกันมากนี้ คือ $2s$ เท่ากับ $0.60h_w$ หน่วยแรงปริมาตรที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากแรงอัดบนสมอียดแต่ละตัวจะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยหน่วยแรงปริมาตรสูงสุดจะเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง และหน่วยแรงปริมาตรที่เกิดขึ้นจากแรงอัดทั้งสองร่วมกันมีค่าน้อยมาก การกระจายของหน่วยแรงปริมาตรในบริเวณเอวคานยังอยู่ในลักษณะสมมาตรตลอดแนว ศูนย์กลางของเอวคาน ในส่วนของหน่วยแรงปริมาตรที่เกิดขึ้นบนปีกคานในภาพที่ 27ข มีลักษณะคล้ายกันกับแบบจำลองชุดที่แล้ว



ก. บริเวณเอวคาน



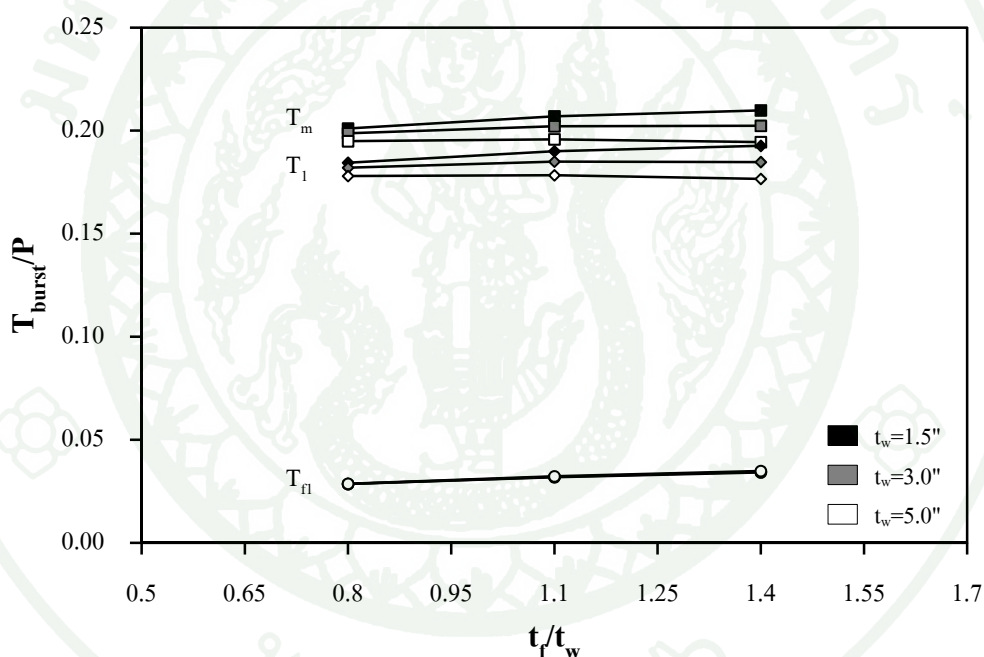
ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 27 ระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.60$

1.1.2 แรงปรี

ในเบื้องต้นจะนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอ
ยึดที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว กับความหนาของเอวคานและความหนาของปีกคานจากตาราง
ที่ 1 โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ $0.20h_w$ จากภาพที่ 16
สัญลักษณ์ T_1 และ T_2 คือ แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ T_m
คือ แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก T_{fl} และ T_{l2} คือ แรงปรีที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง
ตามลำดับ เนื่องจากแบบจำลองมีลักษณะสมมาตรกัน ดังนั้น แรงปรีที่เอวคาน ($T_{burst-web}$) จึงเลือก
นำเสนอเฉพาะค่าของ T_1 และ T_m ในส่วนของแรงปรีที่ปีกคาน ($T_{burst-flg}$) นั้น เลื่อนนำเสนอเฉพาะค่า
ของ T_{fl} เท่านั้น

ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับความหนาของปีกคาน ซึ่งความหนาของปีกคานกำหนดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปีกคานต่อความหนาของเอวคานหรือเรียกว่า อัตราส่วนความหนาของปีกคาน (t_f/t_w) พบว่า ความหนาของปีกคานและความหนาของเอวคานมีอิทธิพลต่อขนาดของแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียึด โดยแบบจำลองที่มีความหนาของเอวคาน 1.5 นิ้ว และความหนาของปีกคาน 2.1 นิ้ว หรือ t_f/t_w เท่ากับ 1.4 ให้ค่าแรงปฏิกิริยาของเอวคานและแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานสูงที่สุด ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกใช้ความหนาของเอวคานและความหนาของปีกคานดังกล่าว สำหรับสร้างแบบจำลองบริเวณสมอียึดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน ความกว้างของปีกคาน และระยะห่างระหว่างแรงอัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

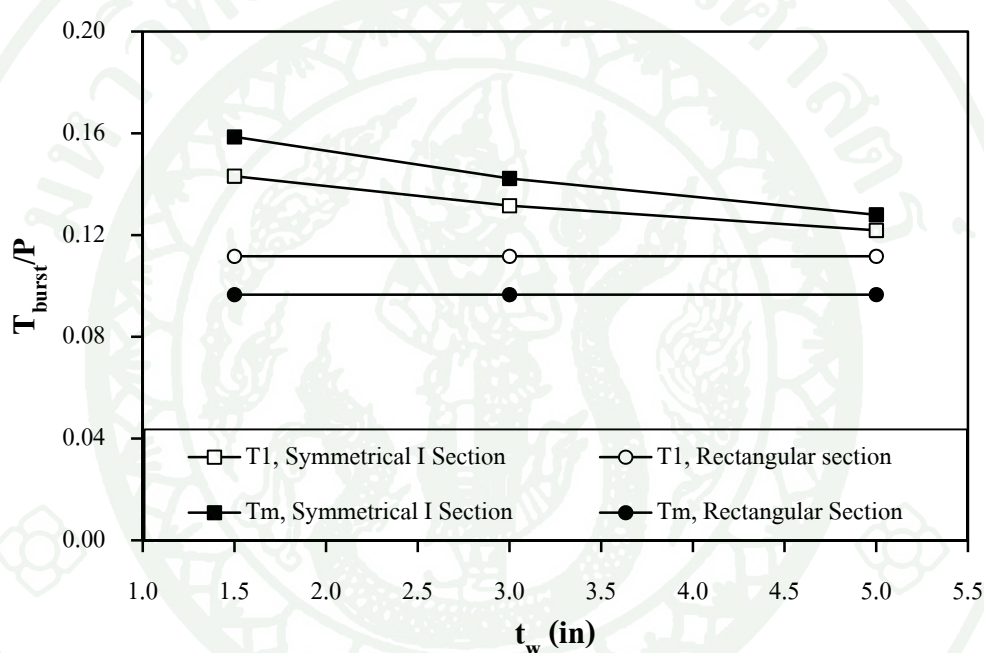


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับอัตราส่วนความหนาของปีกคาน

เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.20$

ภาพที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับความหนาของเอวคานของแบบจำลองคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ $0.35h_w$ และมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 โดยแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรมีความหนาของปีกคานและความกว้างของปีกคานเท่ากับ 2.1 และ 16 นิ้ว ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กำหนดให้มีความสูงเท่ากันกับความสูงของ

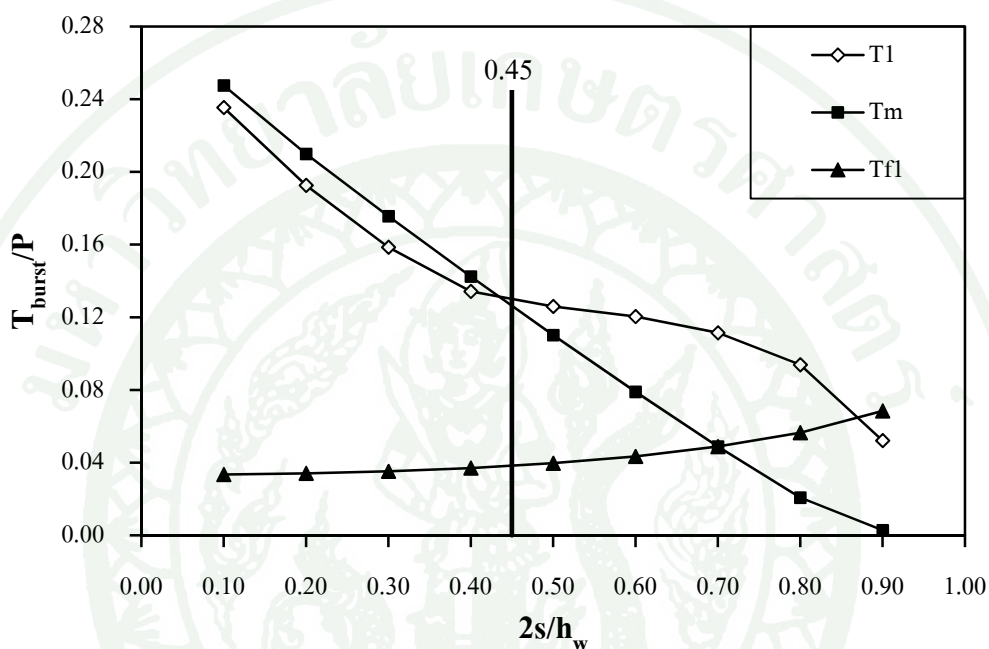
คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร เห็นได้ว่า แรงปรีที่เอวคานที่ได้จากแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรมีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลัก และมีค่าสูงกว่ากรณีของคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นผลเนื่องมาจากคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรมีปริมาตรของคอนกรีตมากกว่าคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งสอดคล้องกันกับการศึกษากรณีที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวของ Hengprathane ในขณะที่ยังคงแรงปรีที่เอวคานที่ได้จากแบบจำลองคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง ซึ่งกล่าวได้ว่า อิทธิพลของปีกคานมีผลต่อพฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียึด



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับความหนาของเอวคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.35$

ภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ จากภาพเห็นได้ว่า แรงปรีที่เอวคาน (T_1 , T_m) มีค่าลดลง เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น จากลักษณะการกระจายของหน่วยแรง (ภาพที่ 25 ถึง 27) สามารถแบ่งพฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานได้ 2 แบบด้วยกันคือ ในช่วงแรก เป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.45h_w$ แรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัดแต่ละแรงหรือแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อย ($T_m > T_1$) พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานในช่วงนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับบริเวณสมอียึดที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์

ดังแสดงในภาพที่ 25ก ช่วงที่สอง เป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.45h_w$ แรงปรีที่ เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าน้อยกว่าแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัด ย่อยแต่ละแรง ($T_m < T_l$) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหน่วยแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานแยกออก จากกันอย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 27ก



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบ สมมาตร เมื่อ $b_{fl} = 16$ ", $a/h_w = 0.10$

จากภาพที่ 30 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.45h_w$ แรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีก คาน (T_{fl}) มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหน่วยแรงอัดจากเอวคานที่ถ่ายเข้าสู่ ปีกคานนั้นเกิดจากแรงอัดทั้งสองร่วมกัน และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.45h_w$ แรงปรีที่ เกิดขึ้นบนปีกคานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสมอยึดแต่ละตัวจะขยับเข้าไปใกล้กับปีกคานมากขึ้น โดยหน่วยแรงอัดจากเอวคานที่ถ่ายเข้าสู่ปีกคานเกิดจากแรงอัดบนสมอยึดแต่ละตัวเป็นหลัก และ แรงปรีที่ปีกคานนี้จะมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานเมื่อสมอยึดวางชิดกับขอบของแบบจำลองหรือ $2s/h_w$ เท่ากับ 0.90 ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างแรงอัดไกลที่สุดของแบบจำลองนี้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ใกล้กันและหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานรวมกันเป็นบริเวณเดียว แรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักมีค่าสูงกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง ในทำนองเดียวกัน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันและหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานแยกออกจากกันอย่างชัดเจน แรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักมีค่าน้อยกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง ดังนั้น ค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 จะถูกใช้เป็นเกณฑ์เพื่อแบ่งพฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน โดยกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของผลต่างที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์คือ ระยะห่างระหว่างแรงอัดไกลที่สุด ซึ่งทำให้แรงปริที่เอวคานเกิดจากอิทธิพลของแรงอัดทั้งสองร่วมกันและมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลัก

ตารางที่ 3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของผลต่างระหว่างขนาดของ T_m กับ T_1 ซึ่งมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานและความกว้างของปีกคานที่แตกต่างกัน จากการศึกษาเพื่อหาค่า $2s/h_w$ ที่เป็นจุดแบ่งระหว่างการแยกตัวของแรงปริ โดยพิจารณาจากค่า T_m และ T_1 ที่มีค่าใกล้เคียงกันพบว่า ค่า $2s/h_w$ ที่ใช้เป็นจุดแบ่งระหว่างการแยกตัวของแรงปริมีค่าสูงขึ้น เมื่อแผ่นเหล็กแบกทานมีขนาดใหญ่ขึ้น ในส่วนของความกว้างของปีกคานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า $2s/h_w$ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยและมีค่าคงที่เมื่อความกว้างของปีกคานมากกว่า 25.6 นิ้ว หรือ b_{fl}/h_w เท่ากับ 1.6 นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าความกว้างของปีกคานไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานมากกว่า 25.6 นิ้ว หรือ b_{fl}/h_w เท่ากับ 1.6 นั่นเอง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 ของแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอ
แบบสมมาตร

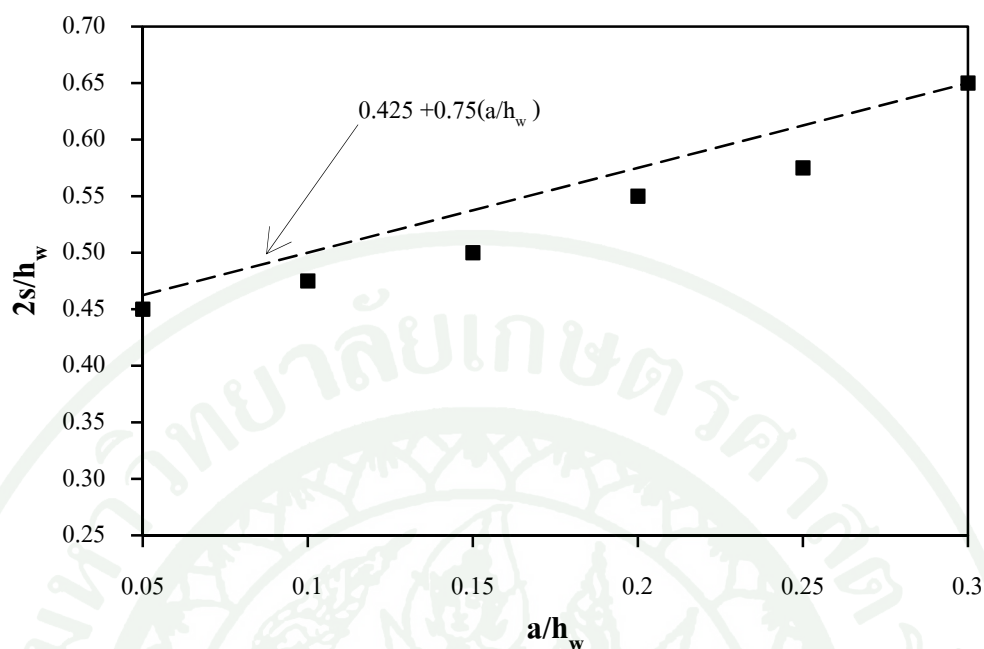
a/h_w	b_f	b_f/h_w	T_1/P	T_m/P	%Diff.	$2s/h_w$
	(in)		[1]	[2]	[1] & [2]	
0.05	6.4	0.4	0.1332	0.1342	0.78	0.375
0.05	16.0	1.0	0.1361	0.1353	-0.57	0.425
0.05	25.6	1.6	0.1345	0.1320	-1.89	0.450
0.05	35.2	2.2	0.1351	0.1336	-1.15	0.450
0.05	56.0	3.5	0.1356	0.1348	-0.59	0.450
0.10	6.4	0.4	0.1253	0.1240	-1.01	0.400
0.10	16.0	1.0	0.1240	0.1261	1.67	0.450
0.10	25.6	1.6	0.1248	0.1226	-1.75	0.475
0.10	30.4	1.9	0.1253	0.1236	-1.31	0.475
0.10	35.2	2.2	0.1255	0.1242	-0.99	0.475
0.10	46.4	2.9	0.1257	0.1250	-0.58	0.475
0.10	56.0	3.5	0.1258	0.1253	-0.40	0.475
0.15	6.4	0.4	0.1136	0.1146	0.80	0.425
0.15	16.0	1.0	0.1159	0.1171	0.99	0.475
0.15	25.6	1.6	0.1154	0.1135	-1.68	0.500
0.15	35.2	2.2	0.1161	0.1152	-0.82	0.500
0.15	56.0	3.5	0.1167	0.1165	-0.21	0.500
0.20	6.4	0.4	0.1036	0.1052	1.53	0.450
0.20	16.0	1.0	0.1076	0.1081	0.41	0.500
0.20	25.6	1.6	0.1002	0.0979	-2.35	0.550
0.20	30.4	1.9	0.1007	0.0989	-1.75	0.550
0.20	35.2	2.2	0.1010	0.0997	-1.32	0.550
0.20	46.4	2.9	0.1014	0.1006	-0.77	0.550
0.20	56.0	3.5	0.1015	0.1010	-0.53	0.550

ตารางที่ 3 (ต่อ)

a/h_w	b_{fl}	b_{fl}/h_w	T_l/P	T_m/P	%Diff.	$2s/h_w$
	(in)		[1]	[2]	[1] & [2]	
0.25	6.4	0.4	0.0950	0.0965	1.53	0.475
0.25	16.0	1.0	0.0924	0.0920	-0.48	0.550
0.25	25.6	1.6	0.0905	0.0900	-0.63	0.575
0.25	35.2	2.2	0.0912	0.0917	0.59	0.575
0.25	56.0	3.5	0.0915	0.0929	1.45	0.575
0.30	6.4	0.4	0.0859	0.0875	1.90	0.500
0.30	16.0	1.0	0.0824	0.0845	2.51	0.575
0.30	25.6	1.6	0.0700	0.0667	-4.69	0.650
0.30	35.2	2.2	0.0706	0.0687	-2.71	0.650
0.30	56.0	3.5	0.0718	0.0704	-1.96	0.650

หมายเหตุ $h_w = 16"$, $t_w = 1.5"$, $t_r/t_w = 1.4$, $t_r = 2.1"$

ภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับขนาดแผ่นเหล็กแบกทานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 25.6 นิ้ว ซึ่งเป็นความกว้างของปีกคานมากที่สุดที่อิทธิพลจากความกว้างของปีกคานส่งผลต่อค่า $2s/h_w$ ที่ใช้เป็นจุดแบ่งการแยกตัวของแรงปริ เมื่อขนาดแผ่นเหล็กแบกทานมีค่าต่างๆ สมการที่ 11 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความสูงส่วนของเอวคานและขนาดแผ่นเหล็กแบกทานได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน และสำหรับใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบบริเวณสมอชิดที่มีการอัดแรงสองแรง กล่าวคือ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11 หรือ $2s \leq 2s'$ ให้พิจารณาแรงปริที่เอวคานจากแรงอัดทั้งสองร่วมกัน และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11, ($2s > 2s'$) ให้พิจารณาแรงปริที่เอวคานจากแรงอัดแต่ละแรง

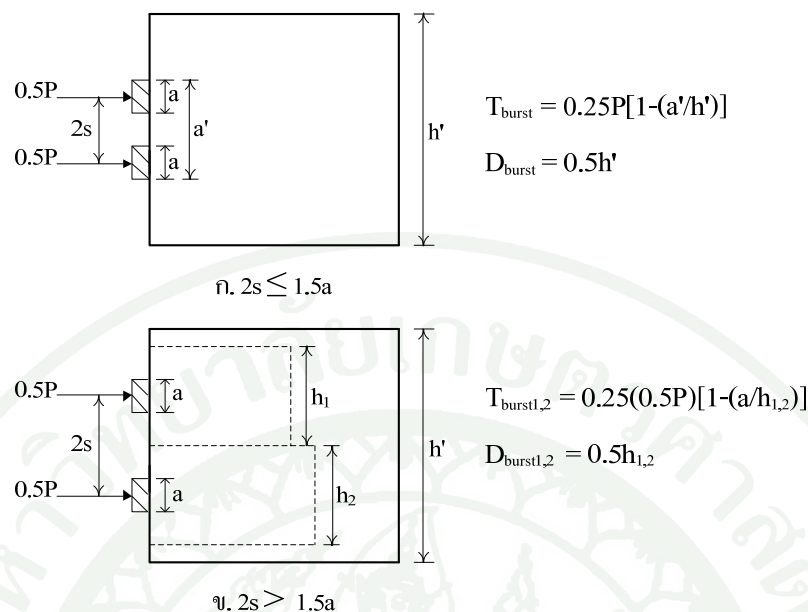


ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน
เมื่อบริเวณสมอียึดมีความกว้างของปีกคาน 25.6 นิ้ว

$$2s'/h_w = 0.425 + 0.75(a/h_w) \quad (11)$$

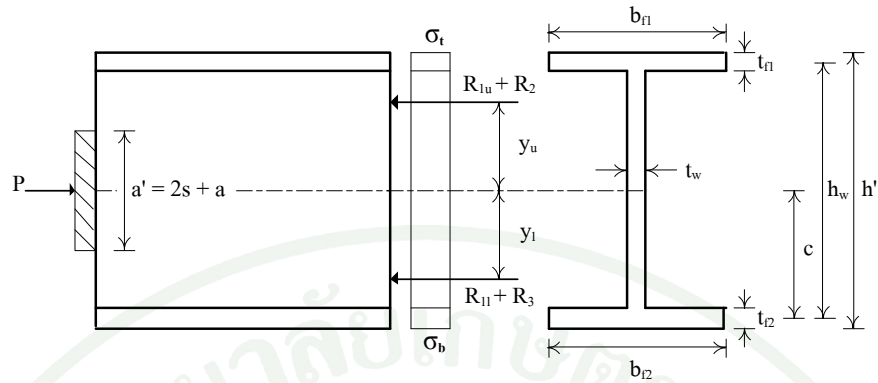
1.1.3 การเปรียบเทียบแรงปฏิกิริยาผลการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathanee และการสร้างแบบจำลอง STM

ข้อกำหนดในมาตรฐานของ AASHTO ได้ระบุไว้ว่า เมื่อบริเวณสมอียึดอัดแรงสองแรงหรือมากกว่า และมีระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสองไม่เกิน 1.5 เท่าของขนาดแผ่นเหล็กแบกทาน (1.5a) การคำนวณหาขนาดของแรงปฏิกิริยากระทำได้โดยแทนค่าตัวแปร a ในสมการที่ 2 ด้วยขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม (a') ซึ่งมีระยะเท่ากับระยะจากขอบด้านบนของสมอียึดด้านบนถึงขอบด้านล่างของสมอียึดด้านล่างดังแสดงในภาพที่ 32ก และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า 1.5a การคำนวณหาขนาดของแรงปฏิกิริยาสมการที่ 2 สามารถกระทำได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการสร้างปริซึมสมมาตรดังแสดงในภาพที่ 32ข



ภาพที่ 32 วิธีการคำนวณหาขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม (a') และหลักการสร้างปริซึมสมมาตร

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริจากการประยุกต์ใช้สมการที่ 4 ถึง 10 ของ Hengprathanee เมื่อบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงสองแรงนั้น สามารถกระทำได้โดยถือว่า บริเวณสมอียึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียว และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม (a') ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยค่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคาน ($D_{burst-web}$) เลือกจากค่าน้อยที่สุดระหว่างผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ 14 และ 15 เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาขนาดของแรงปริที่เอวคาน ($T_{burst-web}$) จากสมการที่ 12 และ 13 โดยที่ R_{lu} และ R_{ll} คือแรงลัพท์ที่ด้านท้ายของแบบจำลองในส่วนของเอวคาน ตามลำดับ R_2 และ R_3 คือแรงลัพท์ในส่วนของปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ และ ρ มีค่าเท่ากับ $(R_{lu} - R_2 - 0.5P) (a'/2P)$



ภาพที่ 33 วิธีการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathane เมื่อบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1u} + R_2) \left(\frac{4y_u + 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right) \left(1 - \frac{a'}{4y_u + 4\rho} \right) \quad (12)$$

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1l} + R_3) \left(\frac{4y_l - 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right) \left(1 - \frac{a'}{4y_l - 4\rho} \right) \quad (13)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (h' - c - \frac{t_{f2}}{2}) + \frac{a'}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{f1}/h_w)) \quad (14)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (c + \frac{t_{f2}}{2}) + \frac{a'}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{f2}/h_w)) \quad (15)$$

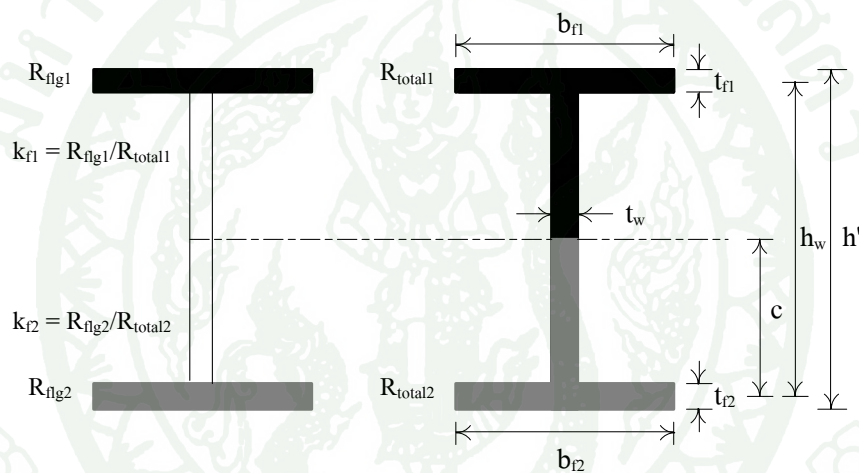
ขนาดของแรงปริที่ปีกคานด้านบน ($T_{\text{burst-flg1}}$) และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่ปีกคานด้านบน ($D_{\text{burst-flg1}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 17 ตามลำดับ สำหรับค่า k_{f1} คืออัตราส่วนของแรงลัพท์ที่ปีกคานด้านบนมีค่าเท่ากับ R_{f1}/R_{total1} ในทำนองเดียวกัน ขนาดของแรงปริที่ปีกคานด้านล่าง ($T_{\text{burst-flg2}}$) และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่ปีกคานด้านล่าง ($D_{\text{burst-flg2}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18 และ 19 ตามลำดับ ในส่วนของค่า k_{f2} ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาพที่ 34

$$T_{\text{burst-flg1}} = 0.15k_{f1}^3 P, k_{f1} \leq 1.0 \quad (16)$$

$$D_{\text{burst-flg1}} = \frac{h_w - c}{4} + \frac{3t_{f1}}{8} + \frac{R_2}{T_{\text{burst-flg1}}} \left(\frac{b_{f1} + t_w}{8} \right) \quad (17)$$

$$T_{\text{burst-flg2}} = 0.15k_{f2}^3 P, k_{f2} \leq 1.0 \quad (18)$$

$$D_{\text{burst-flg2}} = \frac{c}{4} + \frac{3t_{f2}}{8} + \frac{R_3}{T_{\text{burst-flg2}}} \left(\frac{b_{f2} + t_w}{8} \right) \quad (19)$$

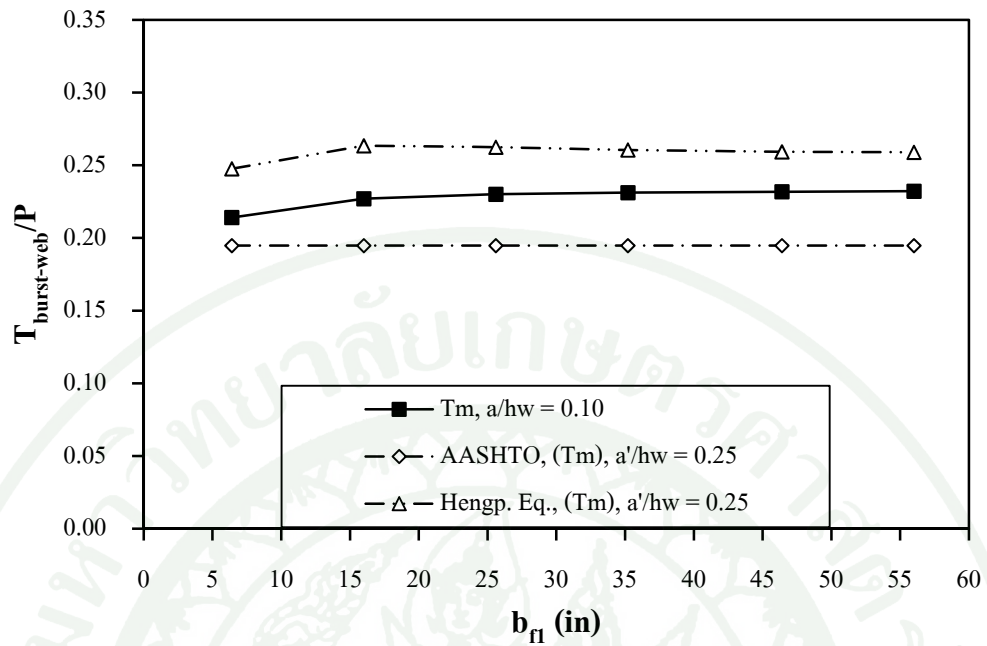


ภาพที่ 34 วิธีการคำนวณหาอัตราส่วนของแรงลัพท์ที่ปีกคาน ($k_{f1,2}$)

ภาพที่ 35 ถึง 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริกับควมกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$, $0.20h_w$ และ $0.30h_w$ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11, ($2s \leq 2s'$) แรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะเลือกนำเสนอเฉพาะแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO และผลการคำนวณจากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanee โดยถือว่าบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์ และใช้ขนาดรวมของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองในสมการ

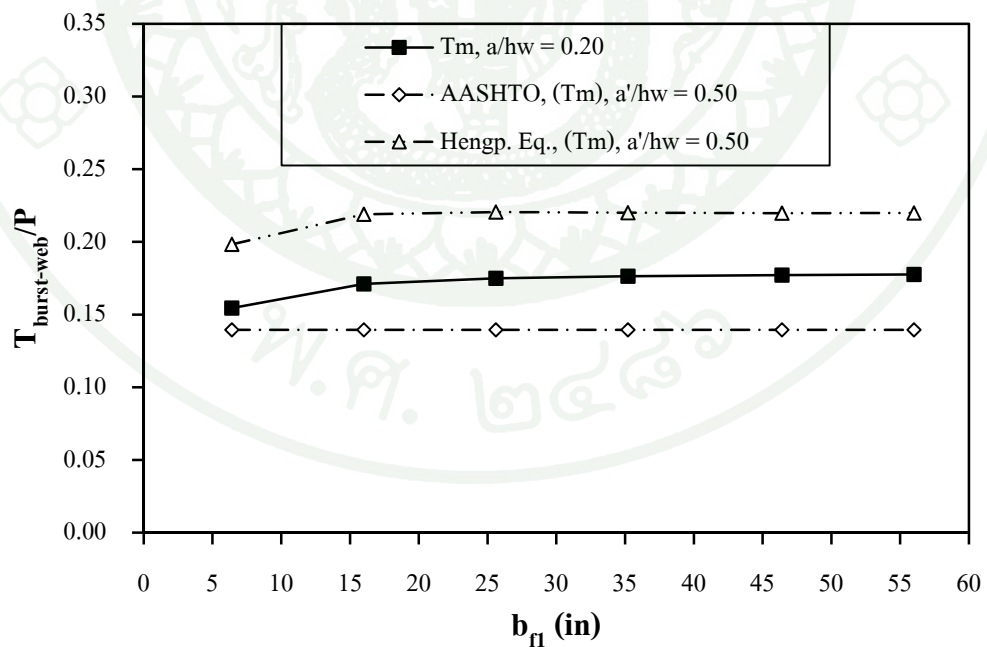
ภาพที่ 35 ถึง 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับความกว้างของปีกคานพบว่า แรงปรีที่เอวคานที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อความกว้างของปีกคานมากขึ้น โดยผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ในขณะที่ผลการคำนวณจากสมการของ Hengprathanee ให้ค่าที่สูงกว่าและมีแนวโน้มสอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม แรงปรีที่เอวคานที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าลดลงเมื่อแบบจำลองมีแผ่นเหล็กแบกทานขนาดใหญ่ขึ้น

ภาพที่ 38 ถึง 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เนื่องจากวิธีการคำนวณหาขนาดของแรงปรีจากสมการที่ 2 ของ AASHTO นั้น ได้จากการศึกษาบริเวณสมอยึดคานหน้าตึกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวไม่ได้ระบุถึงวิธีการคำนวณหาขนาดของแรงปรีที่ปีกคาน ดังนั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะเปรียบเทียบเฉพาะกับผลการคำนวณจากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanee เท่านั้น จากความสัมพันธ์เห็นได้ว่า พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคานมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของแรงปรีที่เอวคาน กล่าวคือ แรงปรีที่ปีกคานมีค่าสูงขึ้นเมื่อความกว้างของปีกคานมากขึ้น และแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการจะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าแรงปรีที่ปีกคานที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อแผ่นเหล็กแบกทานมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือขนาดแผ่นเหล็กแบกทานไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคาน



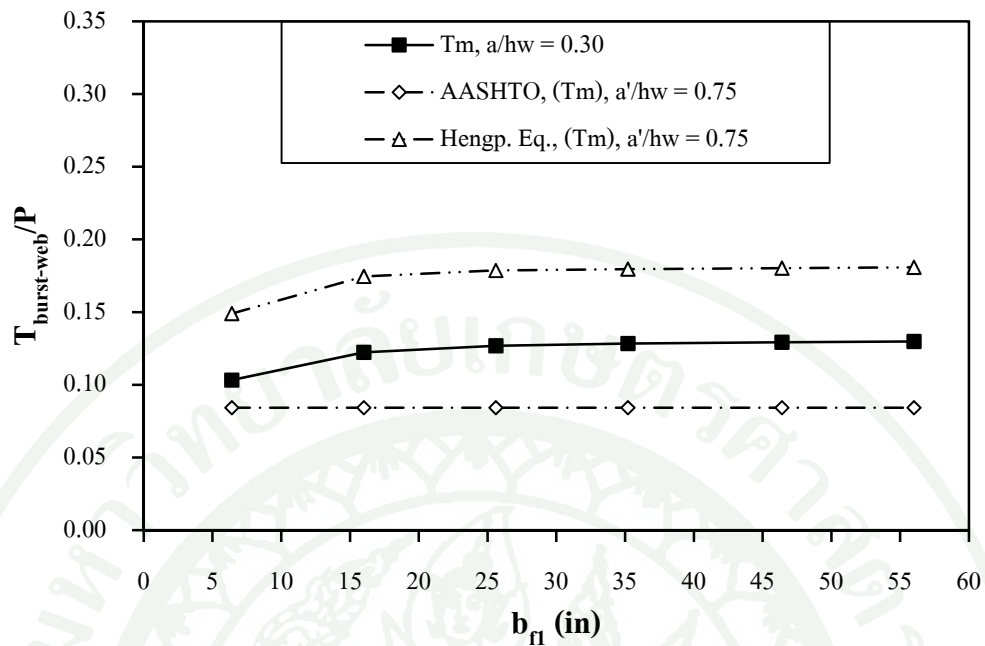
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



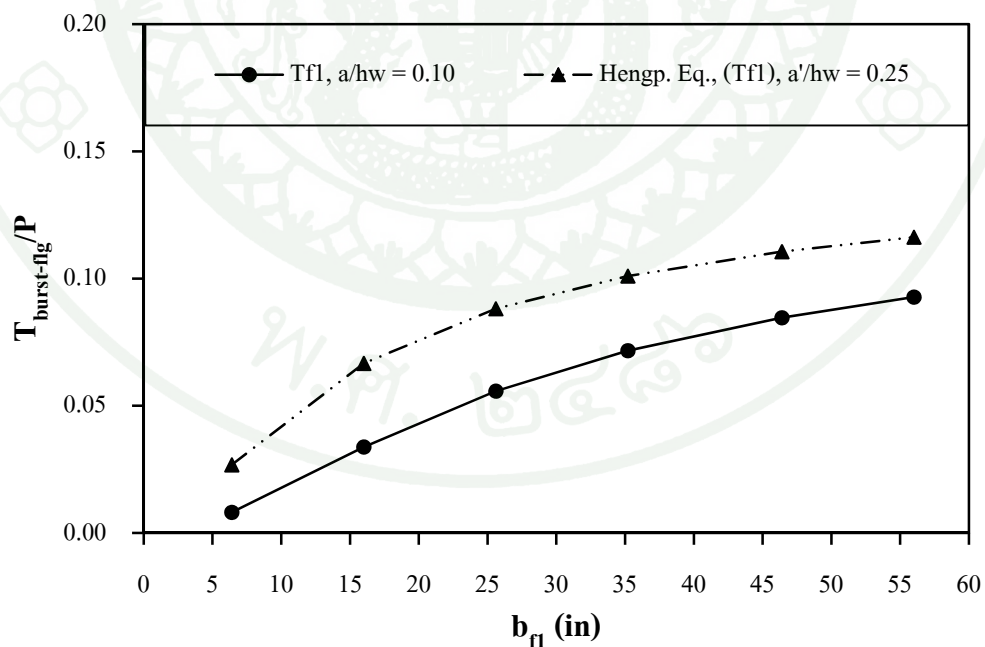
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$



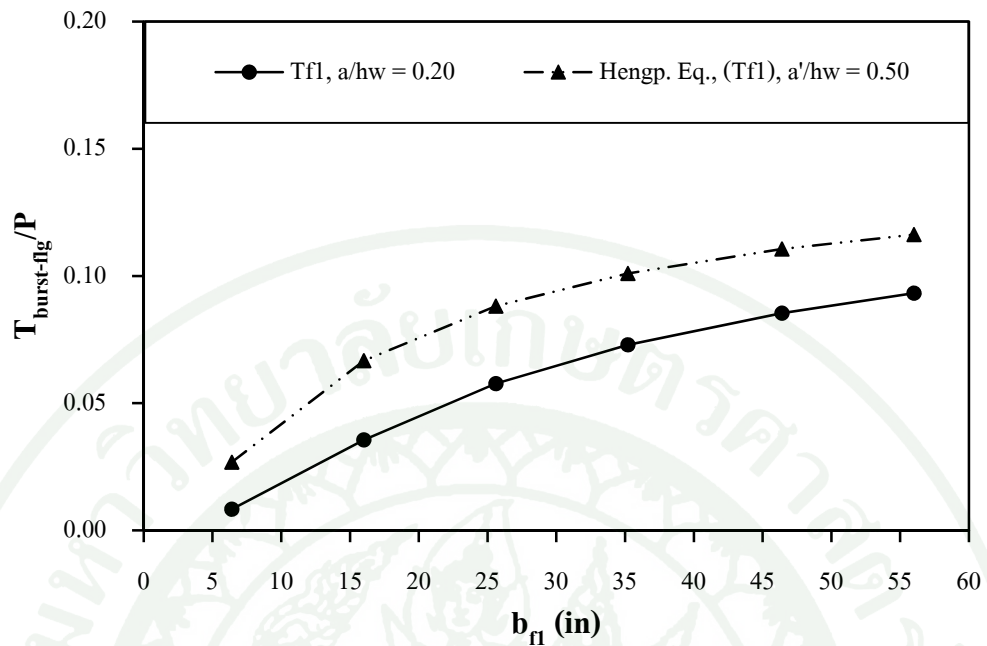
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$



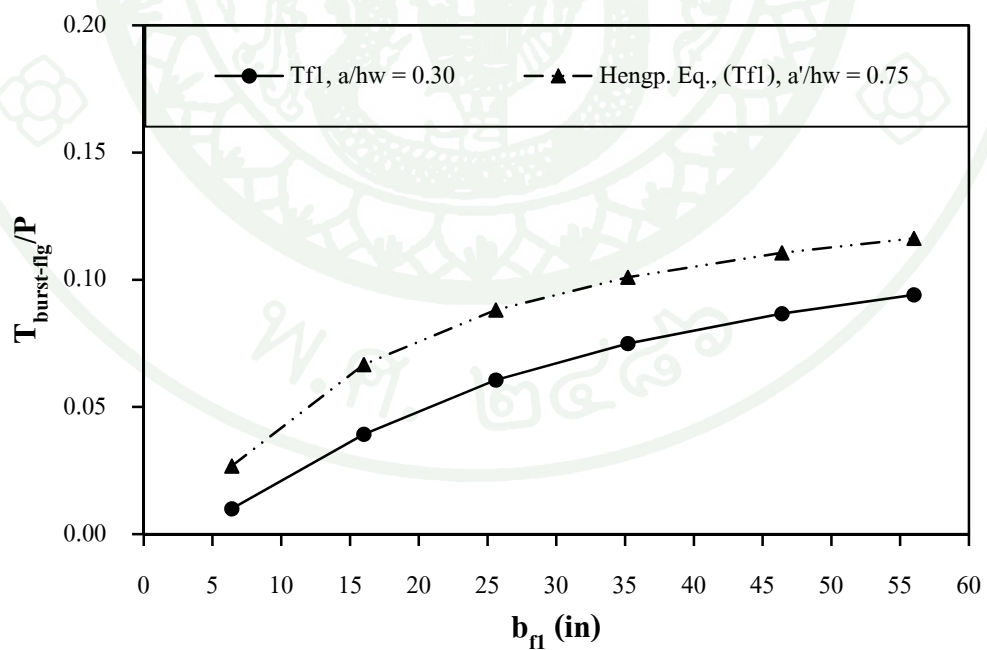
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีปีกคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$



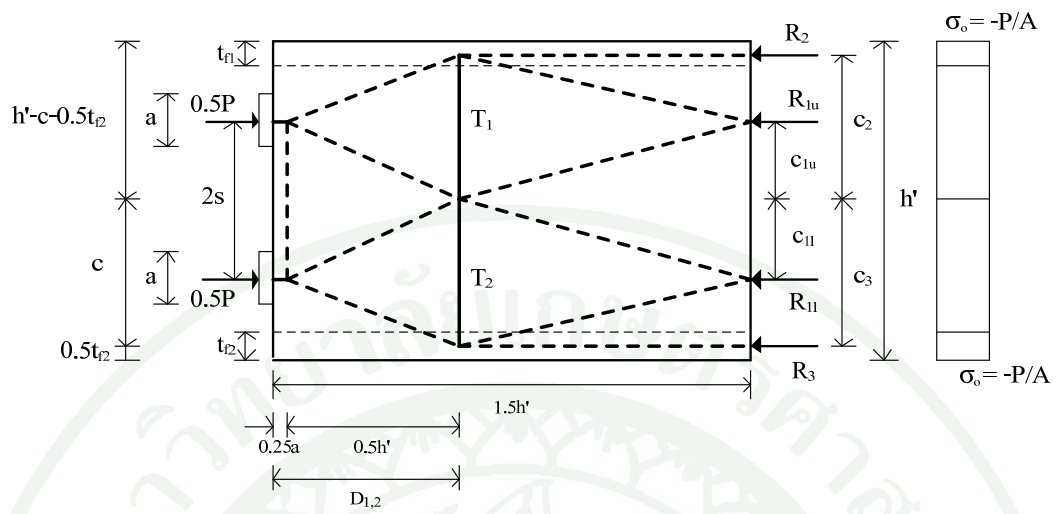
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$

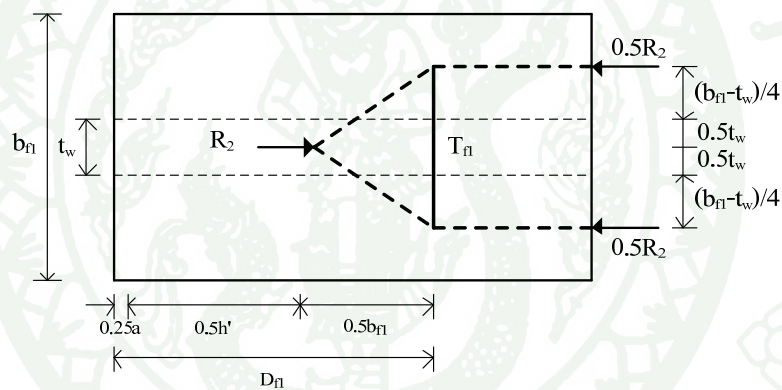
เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11, ($2s > 2s'$) ในกรณีนี้จะนำเสนอเฉพาะแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอียึดกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปรีซึมสมมาตรย่อยดังแสดงในภาพที่ 32ข และผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการสร้างแบบจำลอง STM

มาตรฐานของ AASHTO ได้กำหนดให้วิธีการสร้างแบบจำลอง STM เป็นอีกวิธีสำหรับการประมาณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียึด โดยสมมุติให้การกระจายของหน่วยแรงอัดที่รับโดยคอนกรีตเป็นชิ้นส่วนรับแรงอัด (Strut) และหน่วยแรงดึงจะถูกแทนที่ด้วยชิ้นส่วนรับแรงดึง (Tie) โดยจะเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนรับแรงอัดที่จุดต่อ (Node) ซึ่งตำแหน่งของชิ้นส่วนรับแรงดึงในแบบจำลอง STM ถูกจัดวางตามข้อกำหนดในมาตรฐานของ AASHTO ซึ่งได้เสนอให้จัดวางชิ้นส่วนรับแรงดึงให้อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีให้มากที่สุดซึ่งมีระยะประมาณ 0.50 เท่าของความสูงของโครงสร้างที่พิจารณา (0.50h)

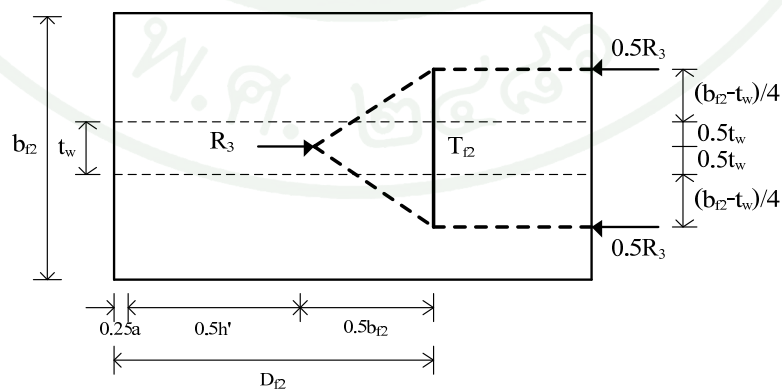
ภาพที่ 41 แสดงแบบจำลอง STM ของบริเวณสมอียึดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ ขนาดของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง (T_1, T_2) จะถูกแทนที่ด้วยชิ้นส่วนรับแรงดึงอยู่ในตำแหน่งเดียวกับแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน โดยตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานคือ ระยะจากผิวของคอนกรีตด้านหลังของแผ่นเหล็กแบกทานถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนรับแรงดึงดังภาพที่ 41ก แรงปรีที่ปีกคานด้านบนและด้านล่างคือ แรงดึงในชิ้นส่วนรับแรงดึงของแบบจำลอง STM ที่บริเวณปีกคานในภาพที่ 41ข และ 41ค ตามลำดับ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานคือ ระยะจากปลายคานด้านรับแรงอัดถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนรับแรงดึงที่บริเวณปีกคาน สำหรับบริเวณตัวหัวสมอียึด (Local Zone) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างแรงอัดภายในแบบจำลองกับแรงอัดจากสมอียึดที่กระทำต่อโครงสร้างได้แสดงไว้ในภาพที่



ก) บริเวณเอวคาน

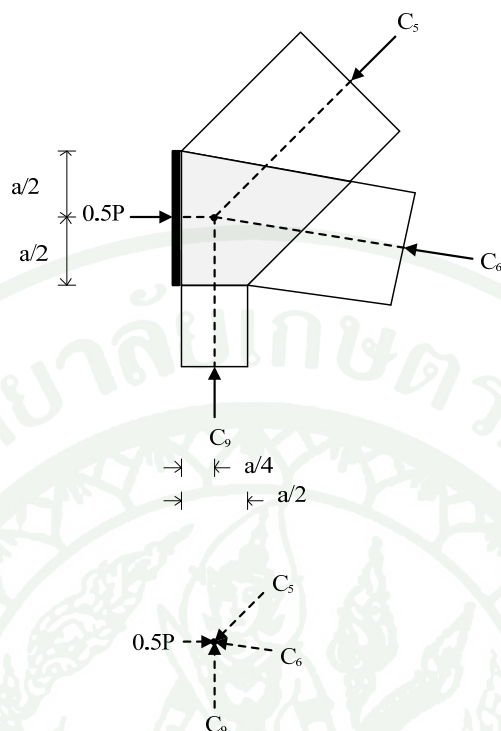


ข) บริเวณปีกคานด้านบน



ค) บริเวณปีกคานด้านล่าง

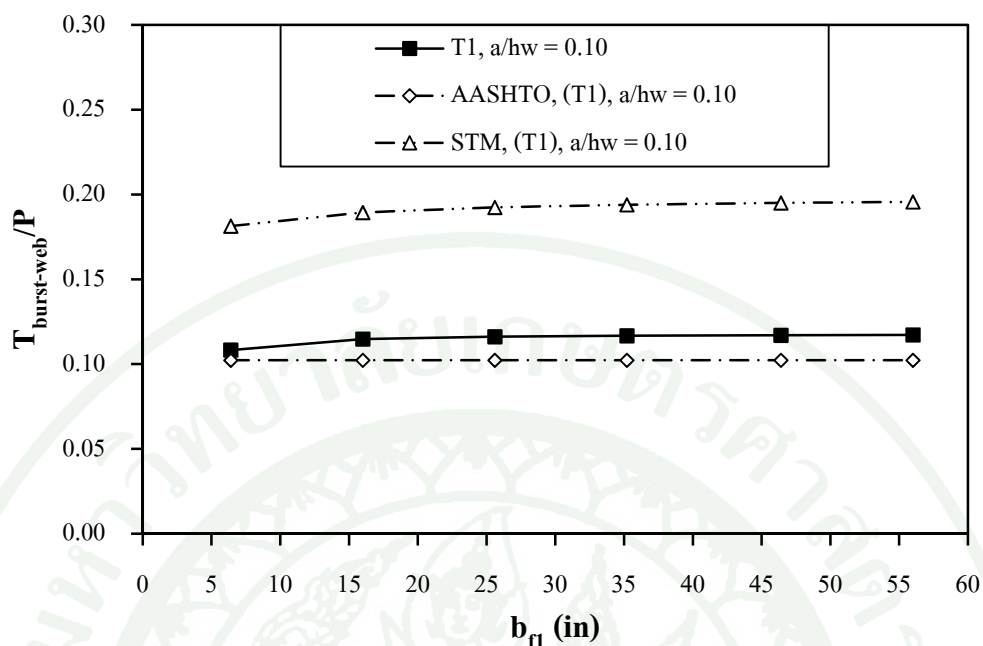
ภาพที่ 41 แสดงแบบจำลอง STM ของบริเวณสมอยึดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์



ภาพที่ 42 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างแรงอัดภายในแบบจำลอง STM สำหรับแผ่นเหล็กแบกทาน
ด้านบน

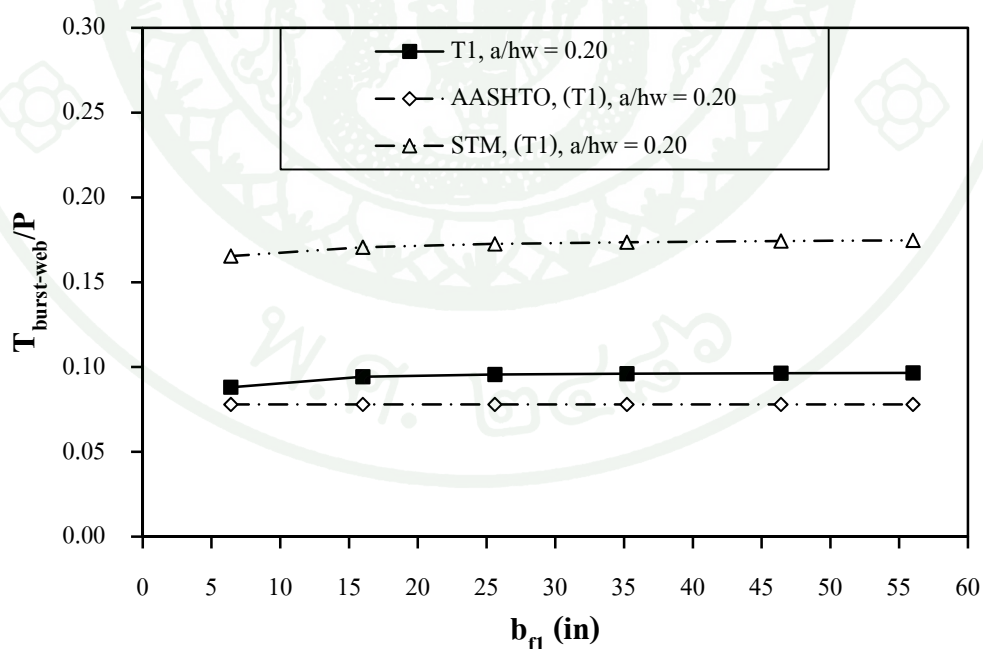
ภาพที่ 43 และ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 ตามลำดับ จะเห็นว่า แรงปริทีเอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM จะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์

ภาพที่ 45 และ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน ซึ่งในกรณีนี้แรงปริทีเอวคานที่ได้จากผลการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบเฉพาะกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM เท่านั้น จะเห็นว่า แรงปริทีเอวคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีของแรงปริทีเอวคาน (ภาพที่ 43 และ 44)



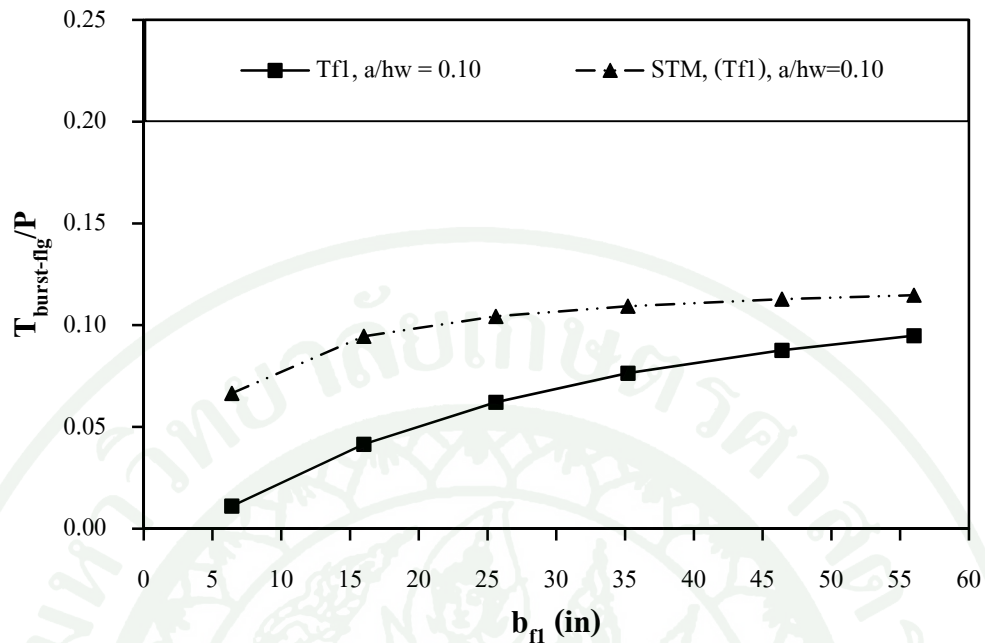
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



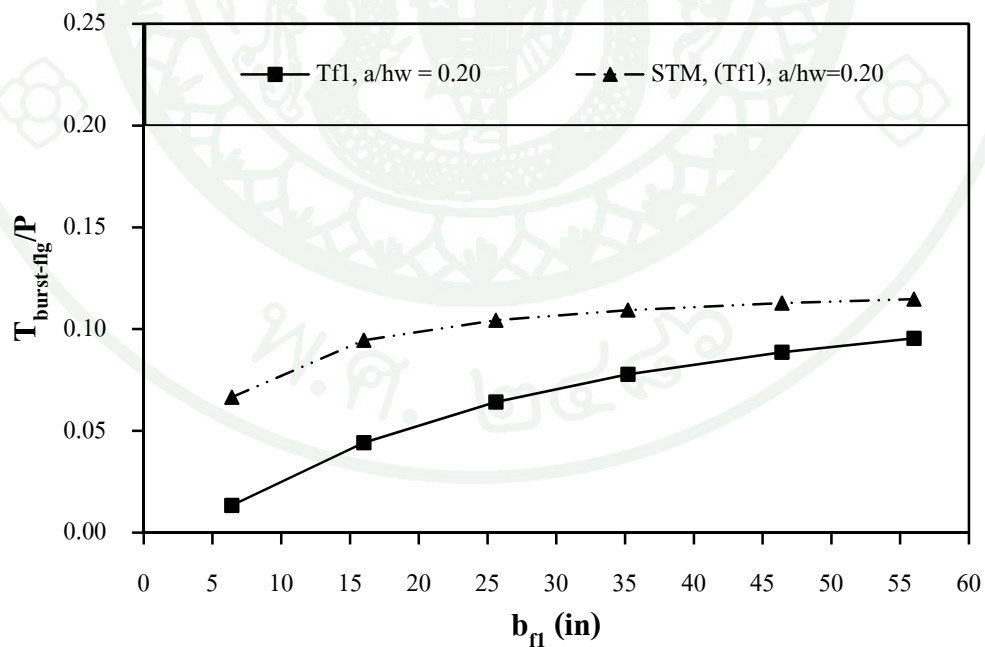
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



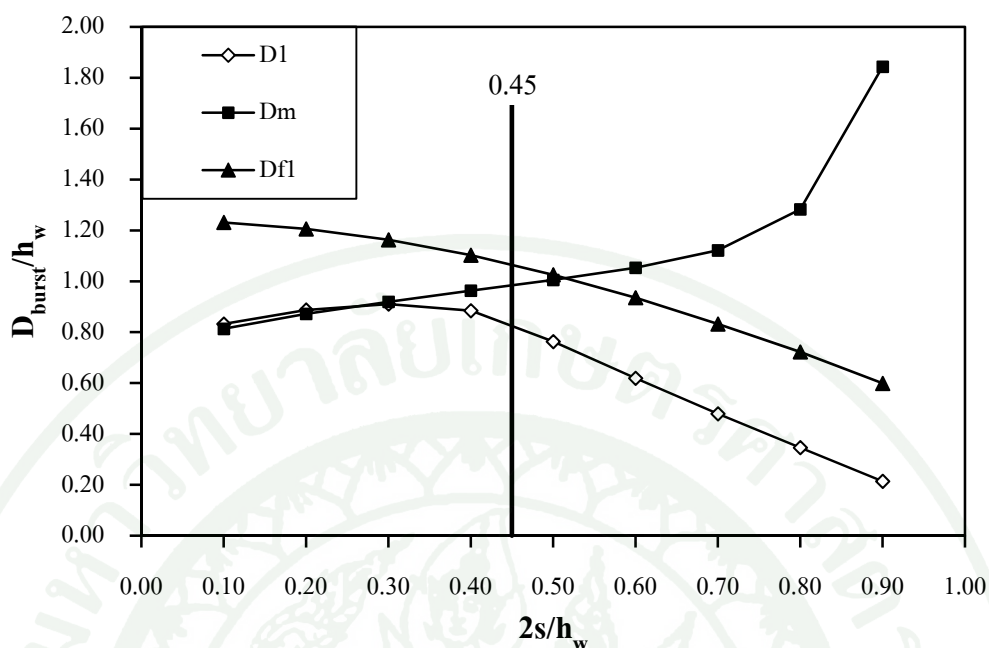
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$

1.1.4 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรี

เช่นเดียวกับกรณีของแรงปรี สัญลักษณ์ D_1 และ D_2 คือ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ D_m คือ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก D_{f1} และ D_{f2} คือ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ โดยตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของปรีที่เอวคาน ($D_{burst-web}$) และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน ($D_{burst-flg}$) จะเลือกนำเสนอเฉพาะค่า D_1 , D_m และ D_{f1} เท่านั้น

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1.1.2 บริเวณสมอียึดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์นั้น สามารถแบ่งพฤติกรรมการเกิดของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานได้เป็น 2 แบบ ในทำนองเดียวกัน ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีต้องมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกันกับแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานเช่นกัน ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของแบบจำลองเช่นเดียวกันกับภาพที่ 30 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรก เป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.45h_w$ เมื่อระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสองมีค่ามากขึ้นตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ช่วงที่สอง เป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.45h_w$ ซึ่งระยะห่างระหว่างแรงอัดที่มีค่าสูงขึ้นนั้น ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันกับลักษณะของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยมีค่าลดลงและมีหน่วยแรงปรีเกิดขึ้นที่บริเวณถัดจากแผ่นเหล็กแบกทานของสมอียึดแต่ละตัวดังแสดงในภาพที่ 27ก ในส่วนของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานนั้นมีค่าลดลงเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น เนื่องจากหน่วยแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคานจะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กับขอบของปลายคานด้านรับแรงอัด เมื่อสมอียึดขยับเข้าไปใกล้กับปีกคานมากขึ้น

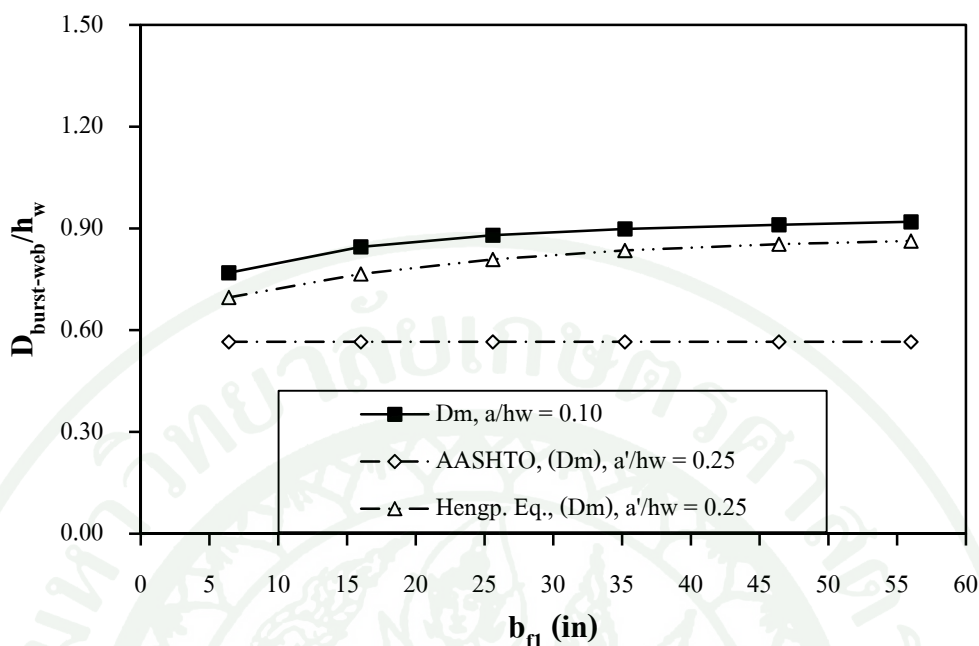


ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาระหว่างระหว่างแรงอัดของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$

1.1.5 การเปรียบเทียบตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาจากการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathanee และการสร้างแบบจำลอง STM

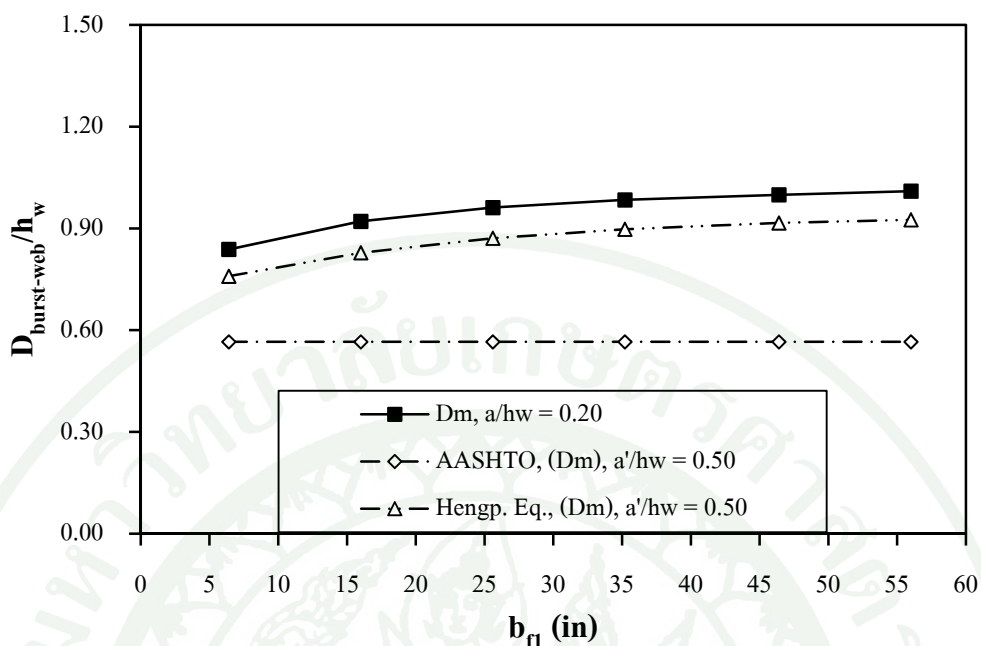
ภาพที่ 48 ถึง 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยากับความกว้างของปีกคานของแบบจำลองเช่นเดียวกับกรณีของแรงปฏิกิริยาในภาพที่ 35 ถึง 40 ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11, $(2s \leq 2s')$

ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยากับความกว้างของปีกคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 พบว่า ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานมีลักษณะคล้ายกันกับกรณีของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานในภาพที่ 35 กล่าวคือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานมีค่าสูงขึ้นเมื่อความกว้างของปีกคานมากขึ้น และมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathanee จะให้ค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มคล้ายกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

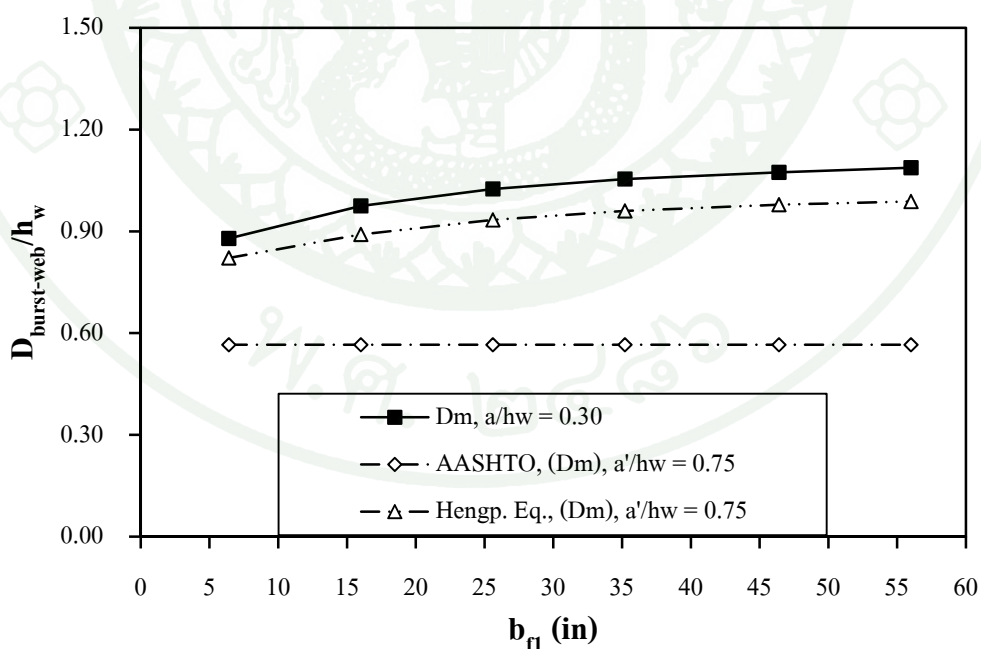


ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$

ภาพที่ 49 และ 50 เป็นกรณีของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานของแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และ 0.30 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 (ภาพที่ 48) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานมีค่าสูงขึ้น เมื่อแผ่นเหล็กแบกทานมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่า ขนาดแผ่นเหล็กแบกทานมีอิทธิพลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคาน



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$

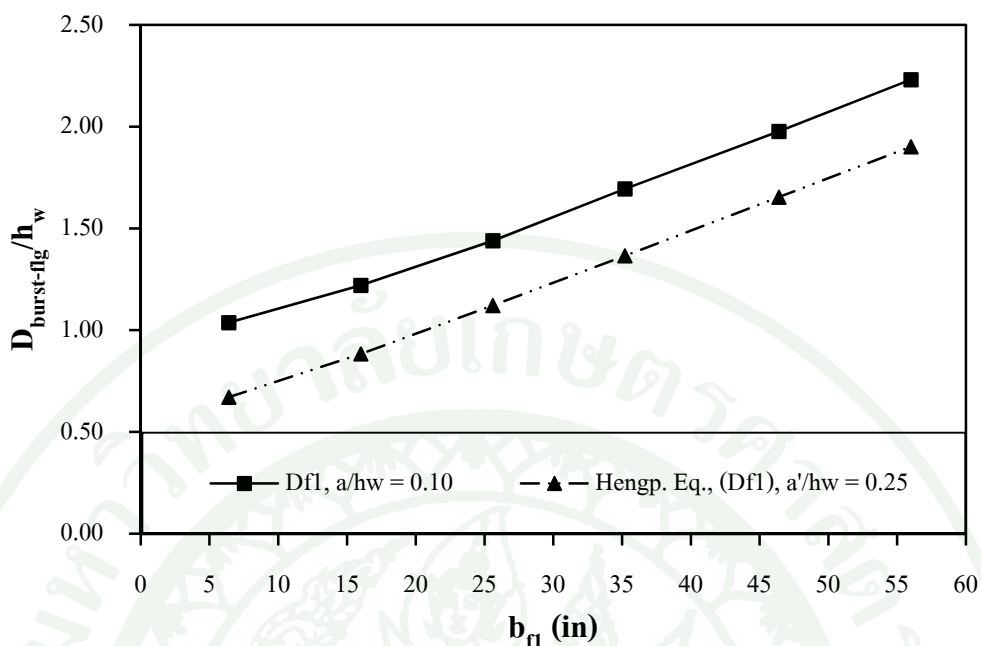


ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$

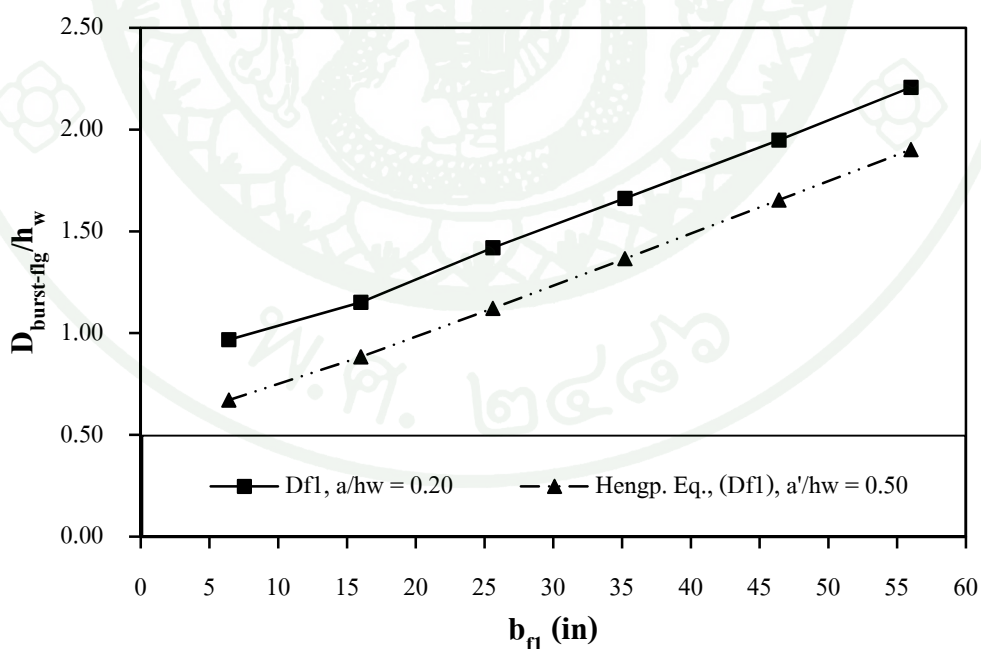
ภาพที่ 51 ถึง 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.30 พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานมีค่าสูงขึ้นเมื่อความกว้างของปีกคานมากขึ้น และมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathanee

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากกรณีที่บริเวณสมอยึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน ไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กรณีของบริเวณสมอยึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรมาก เนื่องจากสมการดังกล่าวได้จากการศึกษาบริเวณสมอยึดคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งการจัดเหล็กเสริมด้านทานแรงปรี โดยการกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับค่าน้อยที่สุดระหว่าง 2.5 เท่าของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรี ($2.5D_{burst}$) และ 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้างที่พิจารณา (1.5h) โดยให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดของ AASHTO นั้น อาจทำให้เหล็กเสริมไม่ครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรีขึ้นในส่วนของเอวคานได้ นอกจากนี้ข้อกำหนดในมาตรฐานดังกล่าวยังไม่ได้ระบุถึงวิธีการออกแบบเสริมเหล็กด้านทานแรงปรีในส่วนของปีกคาน

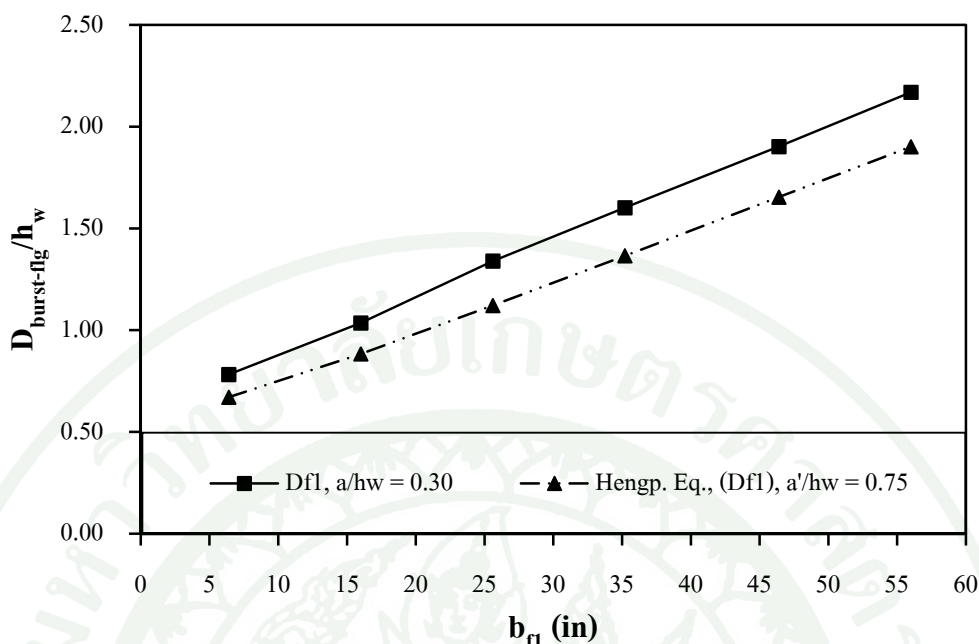
การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีจากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanee ที่ได้จากการศึกษาบริเวณสมอยึดคานหน้าตัดปีกที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียว นั้น ถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึด ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ นอกจากนี้ Hengprathanee ยังได้เสนอวิธีการจัดเหล็กเสริมให้ครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรี โดยการกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้ หากพิจารณาจากภาพที่ 19 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงปรีในทิศตั้งฉากกับแนวแรงอัดหลักกับระยะทางตามแนวแรงอัดหลัก ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีก็คือจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จะอยู่เลยออกไปจากจุดที่มีหน่วยแรงปรีสูงที่สุด ดังนั้น การเสริมเหล็กให้มีการกระจายออกไปที่ระยะสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรี และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคาน การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ก็จะมีความสะดวกและสามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณสมอยึดเนื่องจากแรงปรีที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s'/h_w = 0.575$



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อ $a/h_w = 0.30$, $2s/h_w = 0.45$, $2s'/h_w = 0.65$

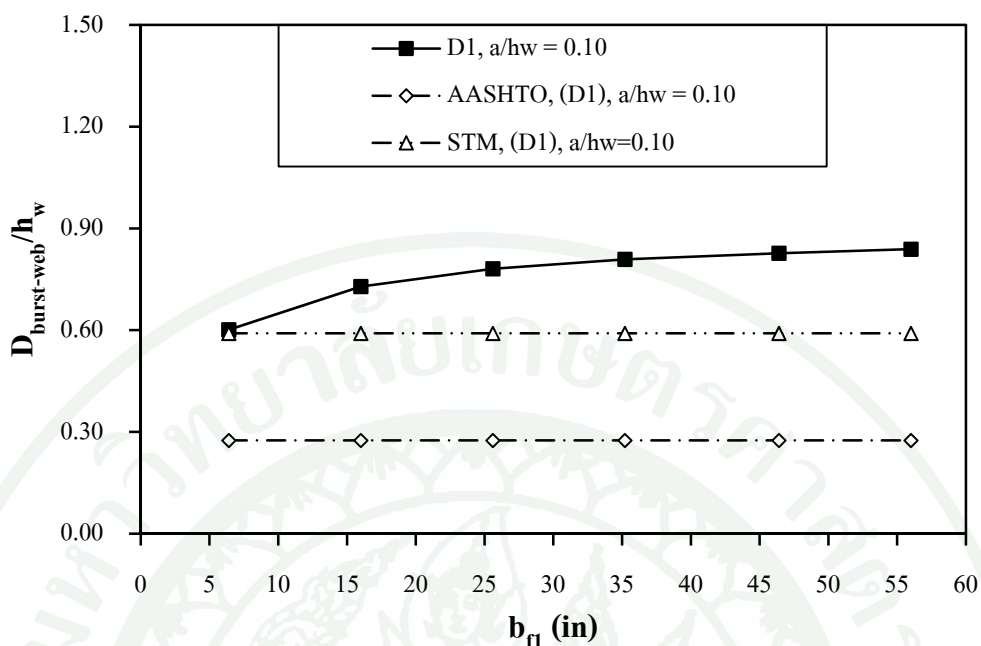
ภาพที่ 54 ถึง 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคานของแบบจำลองเช่นเดียวกับกรณีของแรงปริในภาพที่ 43 ถึง 46 ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11, ($2s > 2s'$)

ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.55 พบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าสูงขึ้น เมื่อความกว้างของปักคานมากขึ้น และมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO สำหรับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปักคาน 6.4 นิ้ว และให้ค่าที่น้อยกว่าเมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปักคานมากขึ้น

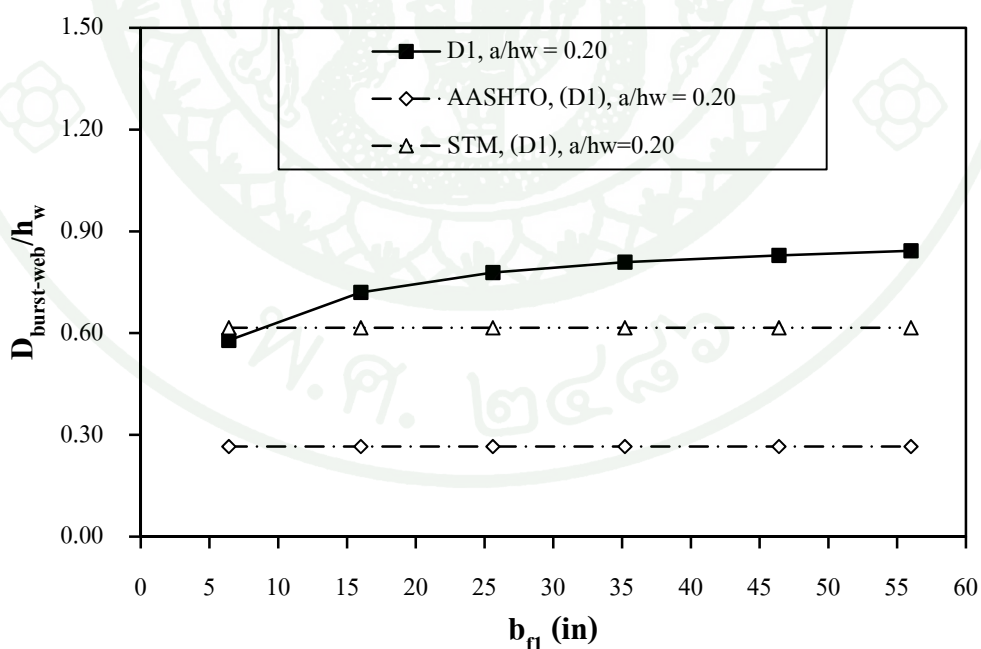
ภาพที่ 55 เป็นกรณีของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานของแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.60 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 ในภาพที่ 54

ภาพที่ 56 และ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 ตามลำดับ พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่าง

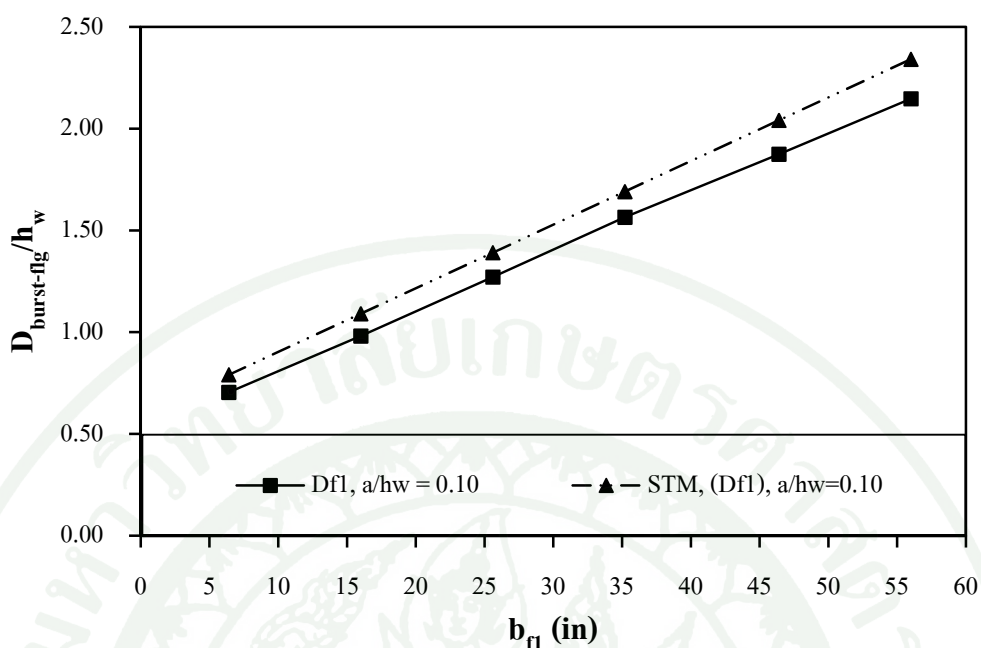
จากกรณีที่บริเวณสมอียึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 11 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอียึดกระทำแบบตรงศูนย์กลางต่อปริซึมสมมาตรย่อมนั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีของบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรเช่นกัน การประมาณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 41 จึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียึด โดยแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM จะให้ค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น หากมีการกระจายเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรี และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคาน การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้จะทำให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรี และสามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณสมอียึดเนื่องจากแรงปรีที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน



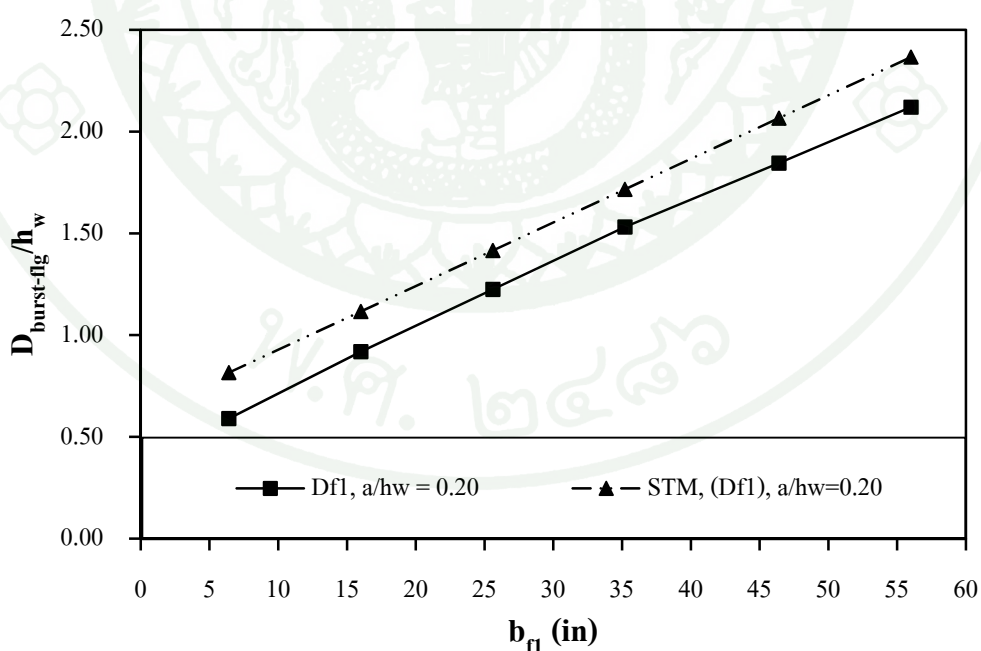
ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคานกับความกว้างของปีกคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



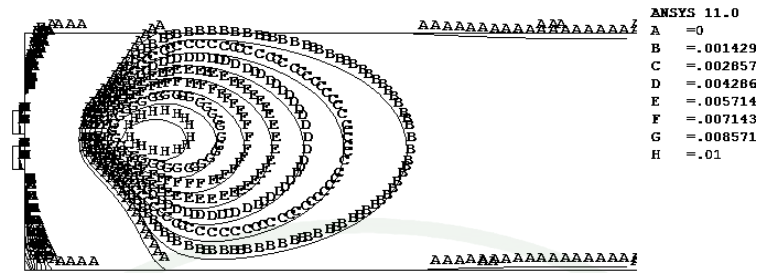
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับความกว้างของปักคาน เมื่อ $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.60$, $2s'/h_w = 0.575$

1.2 คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที

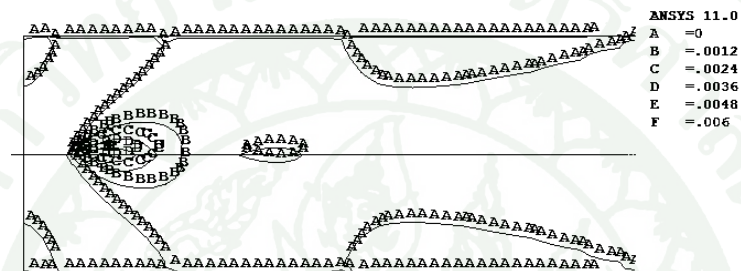
1.2.1 ระดับของหน่วยแรงปริ

ภาพที่ 58 แสดงระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณสมอียัดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว และมีความกว้างของปีกคานด้านล่าง 12.8 นิ้ว หรือ $b_{\text{t}}/b_{\text{b}}$ เท่ากับ 0.80 ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ใกล้กันคือ $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 และมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 โดยแรงอัดทั้งสองมีจุดศูนย์กลางตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะที่แตกต่างไปจากบริเวณสมอียัดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร เนื่องจากแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานไม่เท่ากัน จุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานจึงอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบนซึ่งมีความกว้างของปีกคานมากที่สุด โดยหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะรวมกันเป็นบริเวณเดียวมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์ สำหรับหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบนในภาพที่ 58ข จะมีความเข้มของหน่วยแรงมากกว่าหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านล่าง (ภาพที่ 58ค) เนื่องจากสมอียัดทั้งสองอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบน จึงทำให้หน่วยแรงอัดจากเอวคานถูกถ่ายเข้าสู่ปีกคานด้านบนมากกว่าปีกคานด้านล่าง

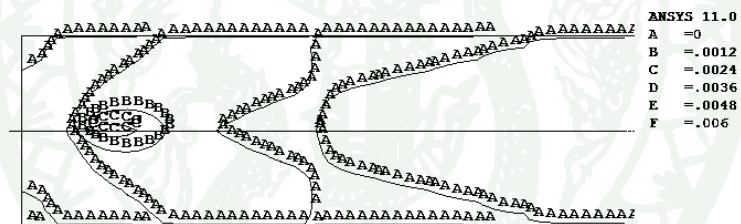
ภาพที่ 59 แสดงระดับของหน่วยแรงภายในแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว และมีความกว้างของปีกคานด้านล่าง 8 นิ้ว ($b_{\text{t}}/b_{\text{b}} = 0.50$) ซึ่งมีจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบนมากกว่าแบบจำลองชุดที่แล้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พบว่า หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะรวมกันเป็นบริเวณเดียวอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบนและมีทิศเบนเข้าหาแนวศูนย์กลางของเอวคาน ในส่วนของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบนในภาพที่ 59ข จะขยายกว้างออกจากแนวศูนย์กลางของปีกคานมากกว่าภาพที่ 58ข และหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านล่าง (ภาพที่ 59ค) จะมีความเข้มของหน่วยแรงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบน



ก. บริเวณเอวคาน



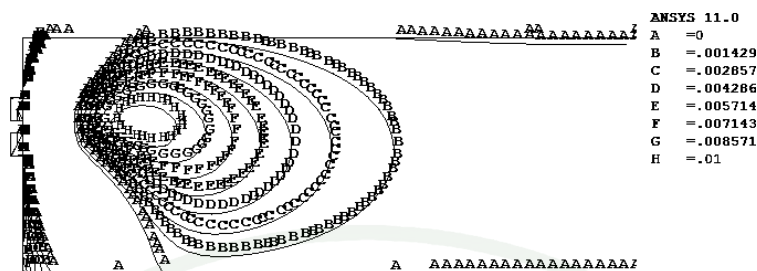
ข. บริเวณปีกคานด้านบน



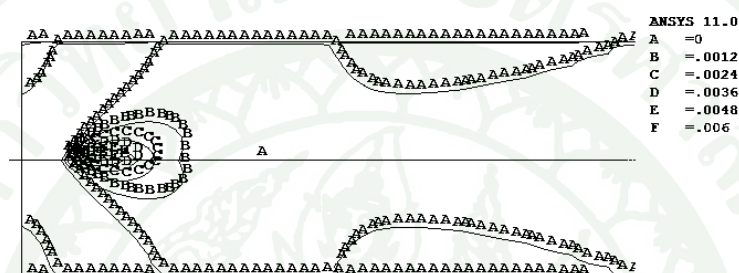
ค. บริเวณปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 58 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์

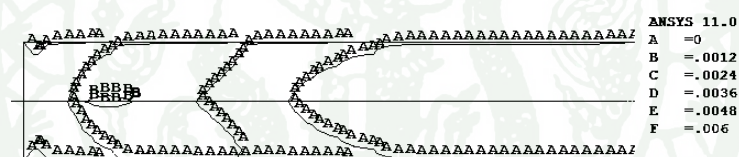
เมื่อ $b_{t1} = 16"$, $b_{t2} = 12.8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$



ก. บริเวณเอวคาน



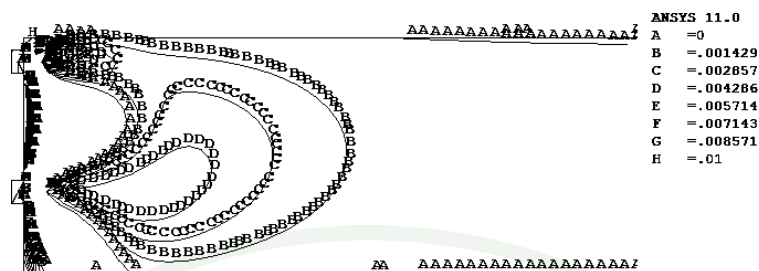
ข. บริเวณปีกคานด้านบน



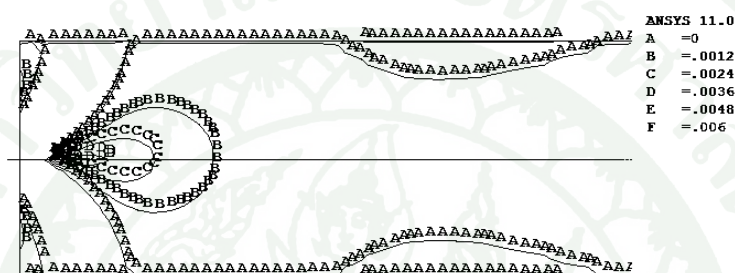
ค. บริเวณปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 59 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
 เมื่อ $b_1 = 16"$, $b_2 = 8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$

ภาพที่ 60 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียัดของแบบจำลองเช่นเดียวกับภาพที่ 59 เมื่อระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสองเท่ากับ $0.55h_w$ หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานแยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยหน่วยแรงปริที่เกิดจากแรงอัดบนสมอียัดด้านบนจะเกิดขึ้นที่บริเวณถัดจากแผ่นเหล็กแบกทานด้านบน ในขณะที่หน่วยแรงปริที่เกิดจากแรงอัดบนสมอียัดด้านล่างจะกระจายเต็มพื้นที่ส่วนของเอวคาน สำหรับหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบนในภาพที่ 60ข จะมีค่าสูงและขยายกว้างออกจากแนวศูนย์กลางของปีกคานมากกว่าหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านล่าง (ภาพที่ 60ค)



ก. บริเวณเอวคาน



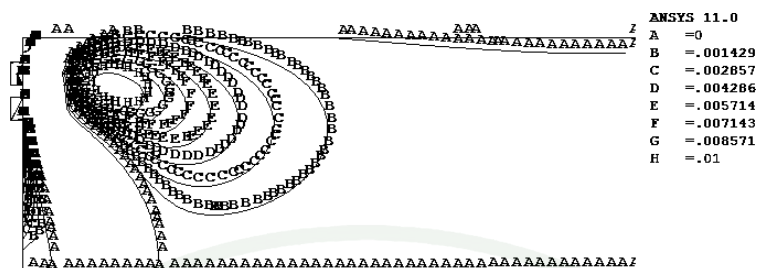
ข. บริเวณปีกคานด้านบน



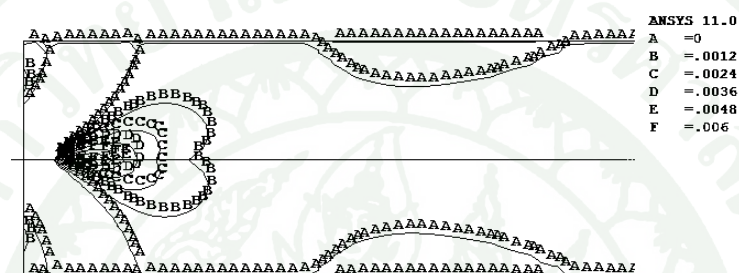
ค. บริเวณปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 60 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{t1} = 16"$, $b_{t2} = 8"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$

ภาพที่ 61 และ 62 แสดงระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณสมอียัดคานหน้าตัดรูปตัวทีที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ ซึ่งมีจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบนมากกว่าแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร จากภาพที่ 61 เป็นกรณีที่แบบจำลองมีแรงอัดทั้งสองอยู่ใกล้กันคือ $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะรวมกันเป็นบริเวณเดียวอยู่ใกล้กับปีกคานและมีลักษณะคล้ายกับกรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร



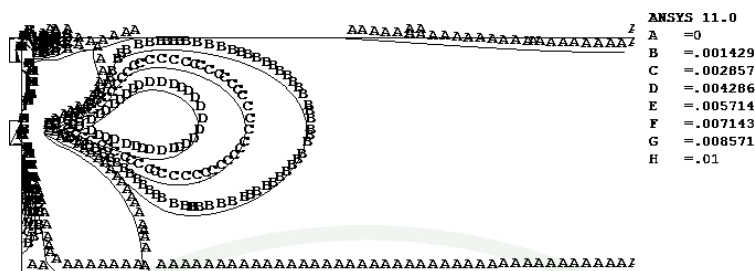
ก. บริเวณเอวคาน



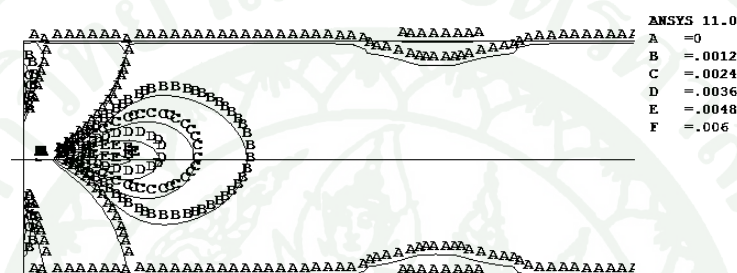
ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 61 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$

ภาพที่ 62 แสดงระดับของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองคานหน้าตัดรูปตัวที เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ $0.35h_w$ หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ขนาดและความเข้มของหน่วยแรงปริที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดจากแรงอัดบนสมอียดตัวล่างซึ่งมีพื้นที่กระจายของหน่วยแรงกว้างที่สุด โดยหน่วยแรงปริที่เกิดจากแรงอัดบนสมอียดตัวล่างมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบเอียงศูนย์ และหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานจะขยายกว้างออกจากแนวศูนย์กลางของปีกคานมากกว่าแบบจำลองชุดที่แล้ว จากภาพที่ 58 ถึง 62 แสดงให้เห็นว่า ความกว้างของปีกคานมีอิทธิพลต่อหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองอย่างเห็นได้ชัด



ก. บริเวณเอวคาน



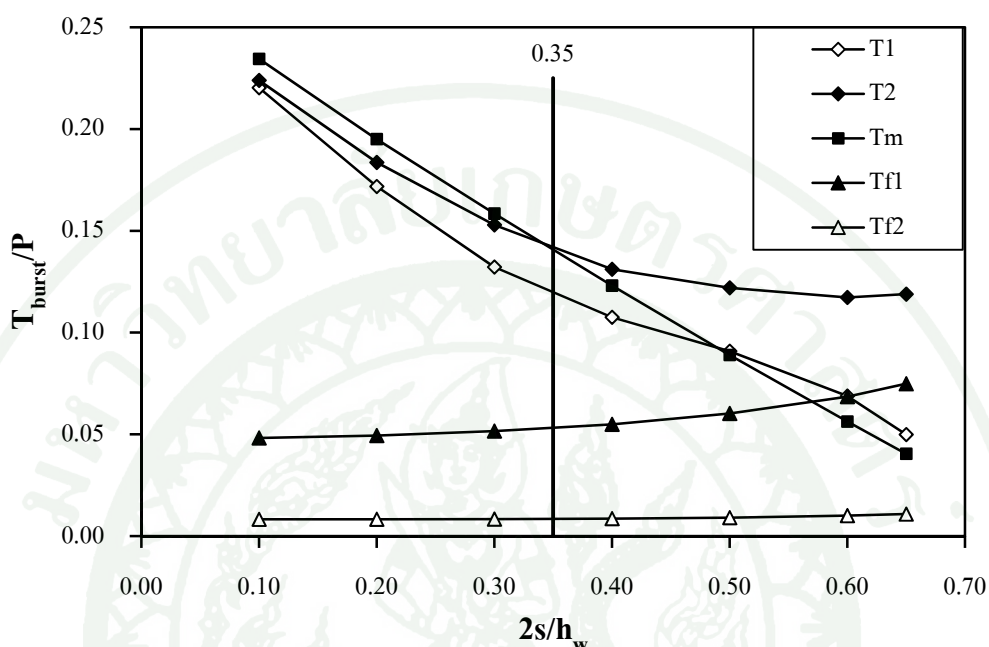
ข. บริเวณปีกคานด้านบน

ภาพที่ 62 ระดับของหน่วยแรงในแบบจำลอง เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.35$

1.2.2 แรงปรี

ภาพที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของบริเวณสมอยึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร ที่มีความกว้างของปีกคานด้านบนเท่ากับคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร (ภาพที่ 30) คือ 16 นิ้ว และมีความกว้างของปีกคานด้านล่าง 8 นิ้ว หรือ b_{tl}/b_{fl} เท่ากับ 0.50 พบว่า เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.35h_w$ แรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักซึ่งสอดคล้องกันกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปรีในภาพที่ 59ก และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.35h_w$ แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างจะมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนและบนแนวแรงอัดหลัก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสมอยึดตัวล่างมีพื้นที่กระจายของหน่วยแรงมากกว่าสมอยึดตัวบนดังแสดงในภาพที่ 60ก นอกจากนี้ แรงปรีที่ปีกคานด้านบนจะมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่ปีกคานด้านล่าง และมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น เนื่องจากสมอยึดทั้งสองอยู่ใกล้กับปีก

คานาด้านบน ในขณะที่แรงปรีที่ปีกคานาด้านล่างมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น



ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับระยะห่างระหว่างแรงอัดของคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $b_{t1} = 16"$, $b_{t2} = 8"$

จากภาพที่ 63 จะเห็นได้ว่า พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานาของคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรมีลักษณะที่แตกต่างไปจากกรณีของคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตรในภาพที่ 30 โดยอิทธิพลจากความกว้างของปีกคานามีผลต่อค่า $2s/h_w$ ซึ่งเป็นระยะห่างของหัวสมอขณะที่แรงปรีเริ่มมีการแยกตัว

ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานาด้านบน 16 นิ้ว โดยมีความกว้างของปีกคานาด้านล่างเปลี่ยนแปลงไป ค่าของ b_{t2}/b_{t1} เท่ากับ 1.0 แทนคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร และ b_{t2}/b_{t1} มีค่าเท่ากับศูนย์คือคานาหน้าตัดรูปตัวไอ เมื่อแบบจำลองมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ และ $0.20h_w$ พบว่าแบบจำลองที่มีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ ค่า $2s/h_w$ ที่แบ่งระยะการแยกตัวของแรงปรีที่เอวคานามีค่าสูงที่สุดเกิดจากคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร และมีค่าลดลงเมื่อ b_{t2}/b_{t1} มีค่าน้อยลงหรือคานาหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร ซึ่งค่า $2s/h_w$ นี้จะมีค่าน้อยที่สุดเกิดจากคานา

หน้าตัดรูปตัวที สำหรับแบบจำลองที่มีแผ่นเหล็กแบกทานขนาดใหญ่คือ $0.20h_w$ ค่า $2s/h_w$ ที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$

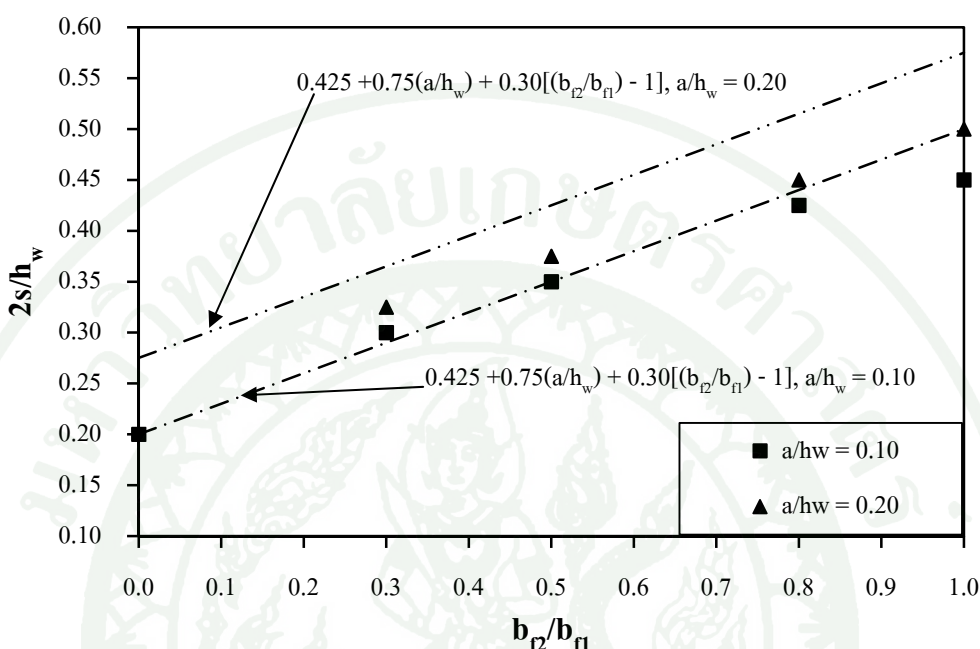
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าผลต่างระหว่าง T_m กับ T_1 ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว

a/h_w	b_{f1}	b_{f2}	b_{f2}/b_{f1}	T_1/P	T_2/P	T_m/P	%Diff.	%Diff.	$2s/h_w$
	(in)	(in)		[1]	[2]	[3]	[1] & [3]	[2] & [3]	FEA
0.10	16	16	1.00	0.1240	0.1240	0.1261	1.67	1.67	0.450
0.10	16	12.8	0.80	0.1221	0.1314	0.1302	6.27	-0.87	0.425
0.10	16	8	0.50	0.1222	0.1419	0.1414	13.54	-0.37	0.350
0.10	16	4.8	0.30	0.1166	0.1435	0.1441	19.06	0.43	0.300
0.10	16	0	0.00	0.1080	0.1432	0.1438	24.89	0.42	0.200
0.20	16	16	1.00	0.1076	0.1076	0.1081	0.41	0.41	0.500
0.20	16	12.8	0.80	0.1039	0.1184	0.1201	13.48	1.43	0.450
0.20	16	8	0.50	0.1002	0.1300	0.1294	22.56	-0.40	0.375
0.20	16	4.8	0.30	0.0956	0.1320	0.1306	26.83	-1.01	0.325

หมายเหตุ $h_w = 16"$, $t_w = 1.5"$, $t_f/t_w = 1.4$, $t_f = 2.1"$

ภาพที่ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานจากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่า $2s/h_w$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ b_{f2}/b_{f1} มีค่ามากขึ้นทั้งในกรณีที่มีแบบจำลองมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ และ $0.20h_w$ เนื่องจากสมการที่ 11 เป็นสมการที่ได้จากการศึกษาบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร ซึ่งหากนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มเทอมของ $0.30[(b_{f2}/b_{f1}) - 1]$ ซึ่งเป็นอิทธิพลจากความกว้างของปีกคานดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 20 โดยค่าระยะห่างระหว่างแรงอัด ($2s$) ที่คำนวณได้จากสมการจะถูกใช้เป็นหลักเกณฑ์สำหรับการออกแบบบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที เมื่อบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์ การศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น

2 แบบคือ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20



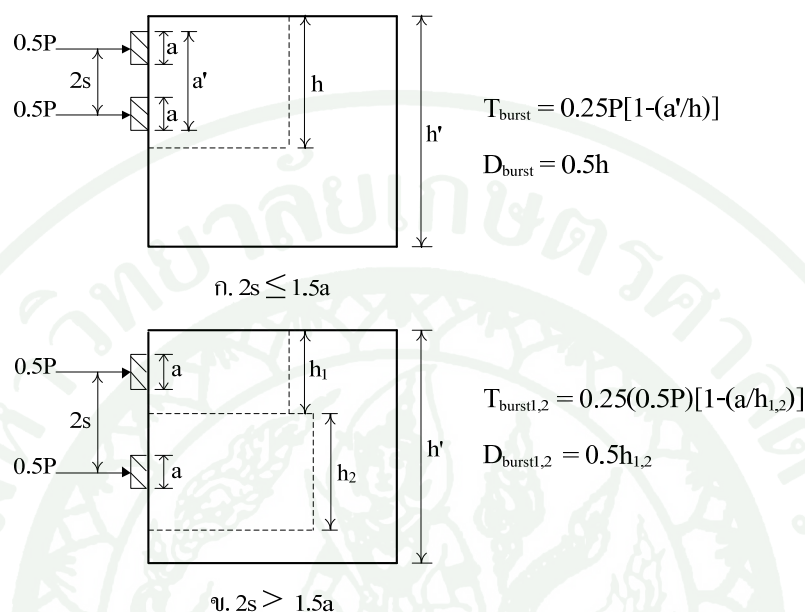
ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานเมื่อบริเวณสมอียึดมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว

$$2s'/h_w = 0.425 + 0.75(a/h_w) + 0.30[(b_2/b_n) - 1] \quad (20)$$

1.2.3 การเปรียบเทียบแรงปฏิกิริยาผลการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathanee และการสร้างแบบจำลอง STM

เนื่องจากคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวทีมีจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานไม่ตรงกับแนวศูนย์กลางของเอวคานเหมือนกับกรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร ดังนั้น การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาสมการของ AASHTO เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $1.5a$ สามารถกระทำได้โดยถือว่า บริเวณสมอียึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวกระทำแบบตรงศูนย์กลางต่อปริซึมสมมาตร และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวมดังแสดงในภาพที่ 65ก เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า

1.5a การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริมาตรกระทำได้ โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมออีกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตรย่อยดังแสดงในภาพที่ 65



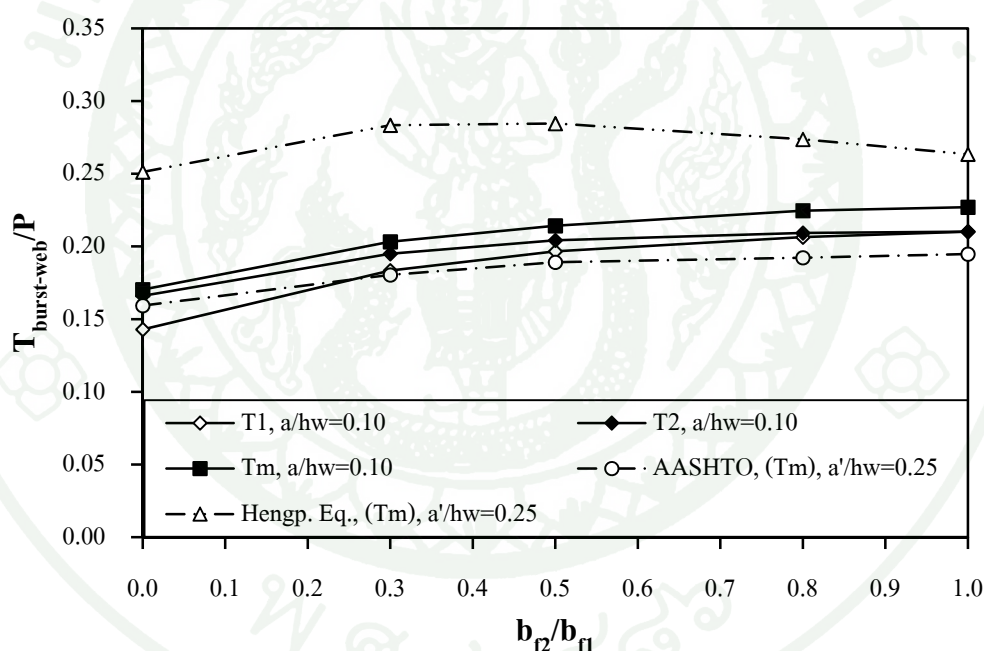
ภาพที่ 65 วิธีการคำนวณหาขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวมและหลักการสร้างปริซึมสมมาตร กรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและรูปตัวที

ภาพที่ 66 ถึง 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบนประกอบด้วย 16, 35.2 และ 56 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20, ($2s \leq 2s'$)

ภาพที่ 66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พบว่า เมื่อ b_{t2}/b_{t1} มีค่าเท่ากับศูนย์หรือคานหน้าตัดรูปตัวที แรงปริที่เอวคานมีค่าน้อยที่สุดซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานหรือจุดศูนย์ถ่วงของแรงอัดรวมอยู่ใกล้กับปีกคานมาก หน่วยแรงอัดจากเอวคานบางส่วนจึงถูกถ่ายเข้าสู่ปีกคาน และเมื่อ b_{t2}/b_{t1} มีค่ามากขึ้นหรือคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร แรงปริที่เอวคานมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความกว้างของปีกคานด้านล่างที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานขยับเข้าไปใกล้กับแนวศูนย์กลางของเอวคาน ทำให้แรงอัดบนสมออีกระทั้งสองมีพื้นที่กระจายของหน่วยแรงมากกว่าคาน

หน้าตัดรูปตัวที ซึ่งสอดคล้องกันกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปริในภาพที่ 58ก และ 59ก โดยแรงปริที่เอวคานจะมีค่าสูงที่สุดและแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงมีขนาดเท่ากัน เมื่อ b_{f2}/b_f มีค่าเท่ากับ 1.0 หรือคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร

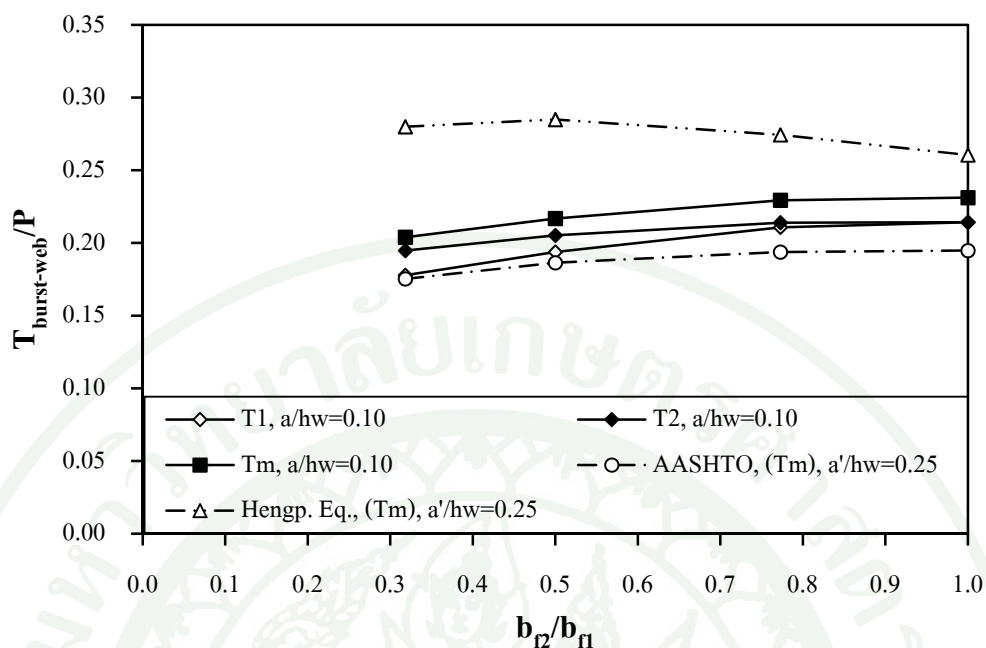
จากภาพที่ 66 ยังแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO และผลการคำนวณที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathane พบว่า แรงปริที่เอวคานที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีค่าสูงที่สุด ส่วนแรงปริที่เอวคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathane ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์



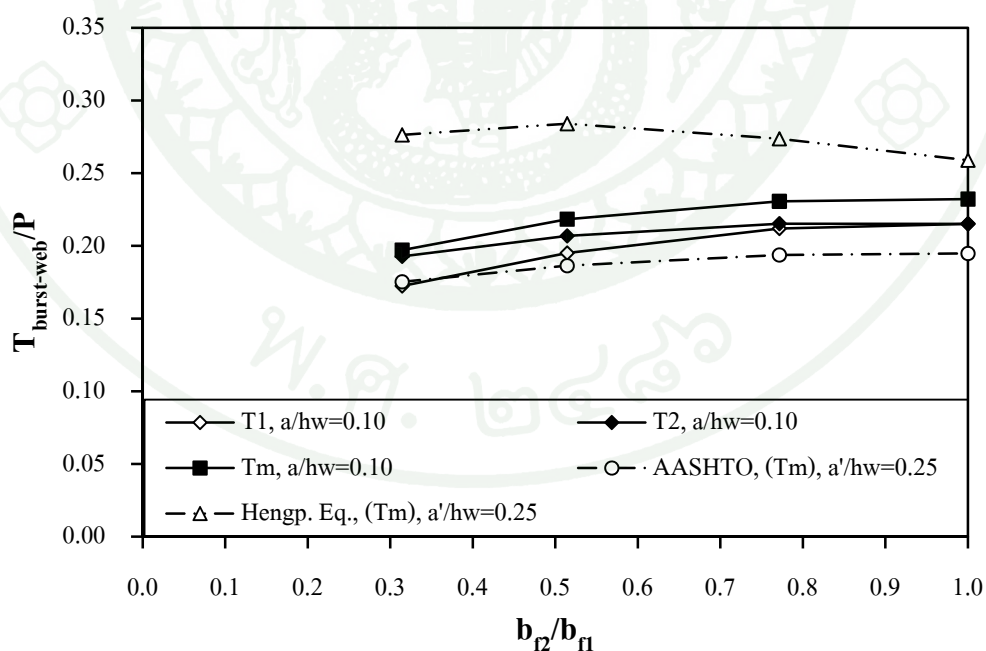
ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 67 และ 68 เป็นกรณีของแรงปริที่เอวคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 35.2 และ 56 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว (ภาพที่ 66)



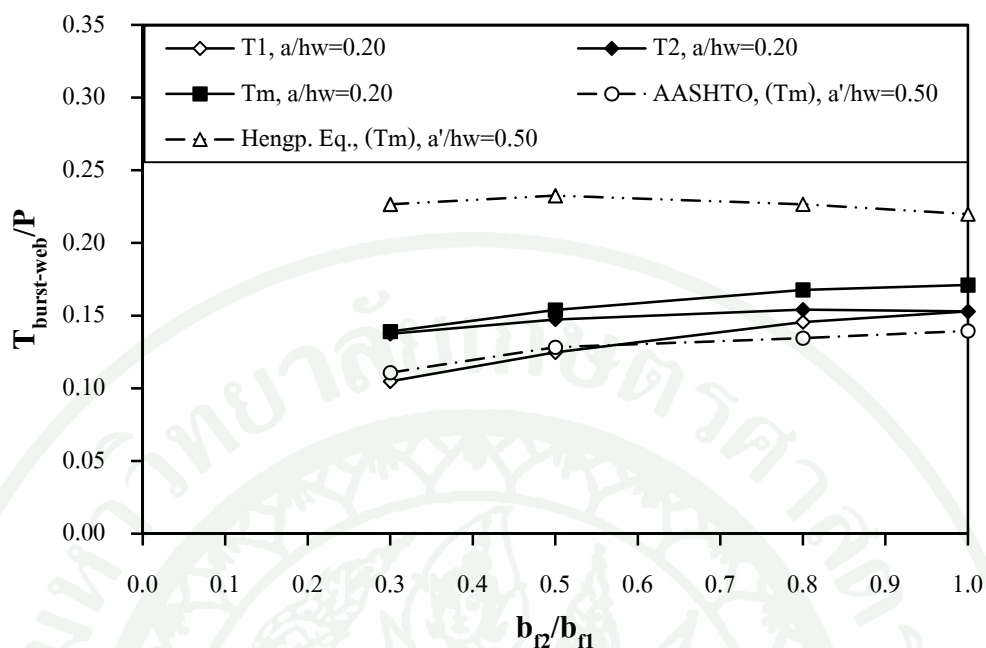
ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอดคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน
เมื่อ $b_{fl} = 35.2$ ", $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



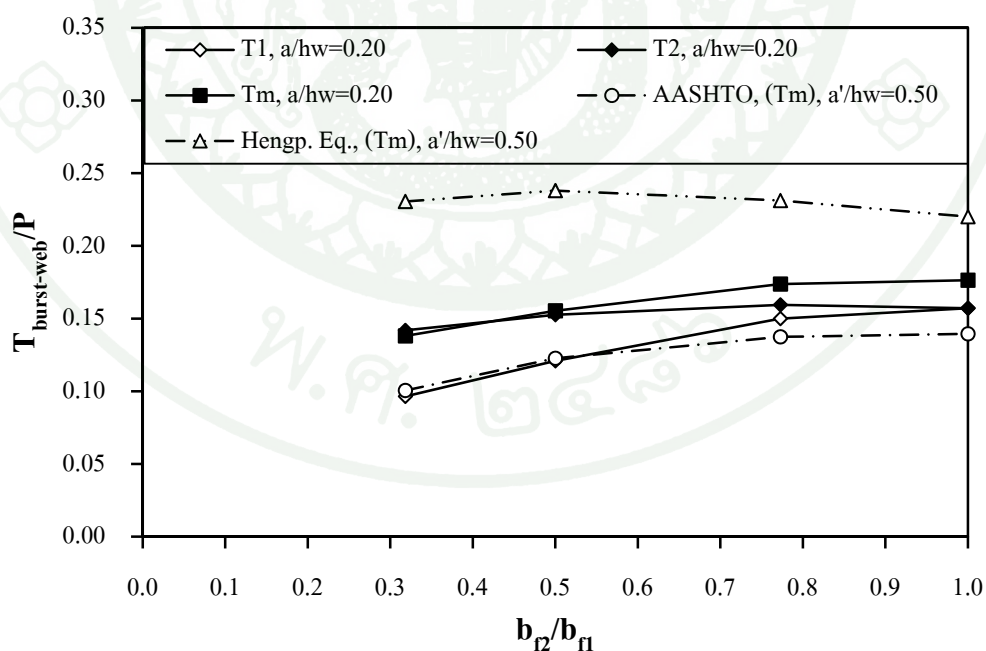
ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอดคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน
เมื่อ $b_{fl} = 56$ ", $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.30 พบว่า พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 (ภาพที่ 66)

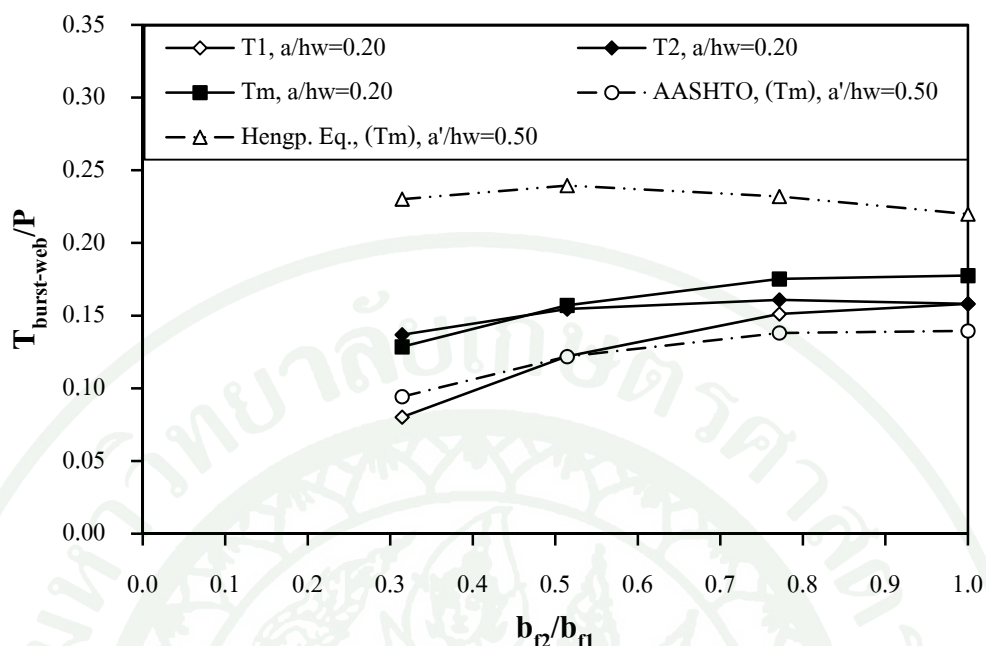
ภาพที่ 70 และ 71 เป็นกรณีของแรงปรีที่เอวคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 35.2 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.30 พบว่า เมื่อ b_{t2}/b_{t1} มีค่าน้อยกว่า 0.50 แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบนมาก จะมีจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานอยู่ใกล้กับปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีแผ่นเหล็กแบกทานขนาดใหญ่ แรงอัดบนสมอียึดบางส่วนจึงถูกถ่ายเข้าสู่ปีกคานโดยตรง ส่งผลให้หน่วยแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานแยกออกจากกันอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าแรงปรีที่เอวคานที่มีค่าสูงสุดที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathane ให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทั้งในกรณีที่แรงปรีที่เอวคานมีค่าสูงสุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักหรือบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง



ภาพที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน
เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน
เมื่อ $b_{f1} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีเอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

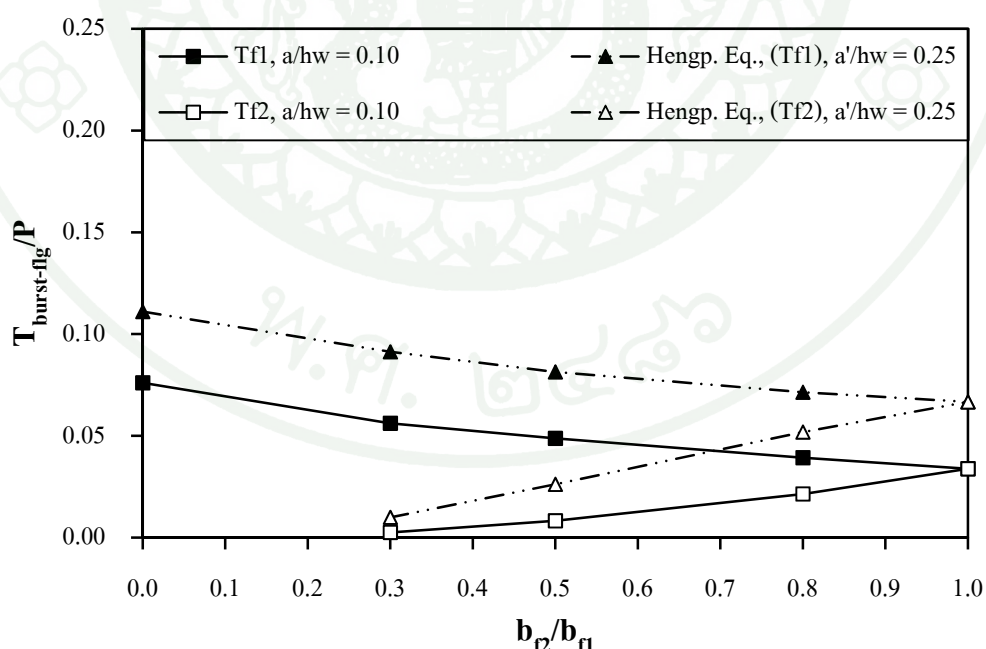
เมื่อ $b_{f1} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 แรงปริทีปีกคานด้านบนมีค่าสูงที่สุดเกิดจากคานหน้าตัดรูปตัวที ($b_{f2}/b_{f1} = 0.0$) และมีค่าลดลงเมื่อ b_{f2}/b_{f1} มีค่ามากขึ้นหรือคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร เนื่องจากจุดศูนย์ถ่วงของแรงอัดรวมขยับออกจากปีกคานด้านบน อิทธิพลจากแรงอัดบนสมอยึดทั้งสองจึงส่งผลต่อแรงปริทีที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบนน้อยลง ในทำนองเดียวกัน แรงปริทีปีกคานด้านล่างมีค่าสูงขึ้นเมื่อ b_{f2}/b_{f1} มีค่ามากขึ้น และแรงปริทีปีกคานจะมีขนาดเท่ากันเมื่อ b_{f2}/b_{f1} เท่ากับ 1.0 หรือคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร ผลการคำนวณที่ได้จากการของ Hengprathane ให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 73 เป็นกรณีของแรงปรีที่ปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 35.2 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พบว่า แรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathane ให้อา่สูงกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว (ภาพที่ 72)

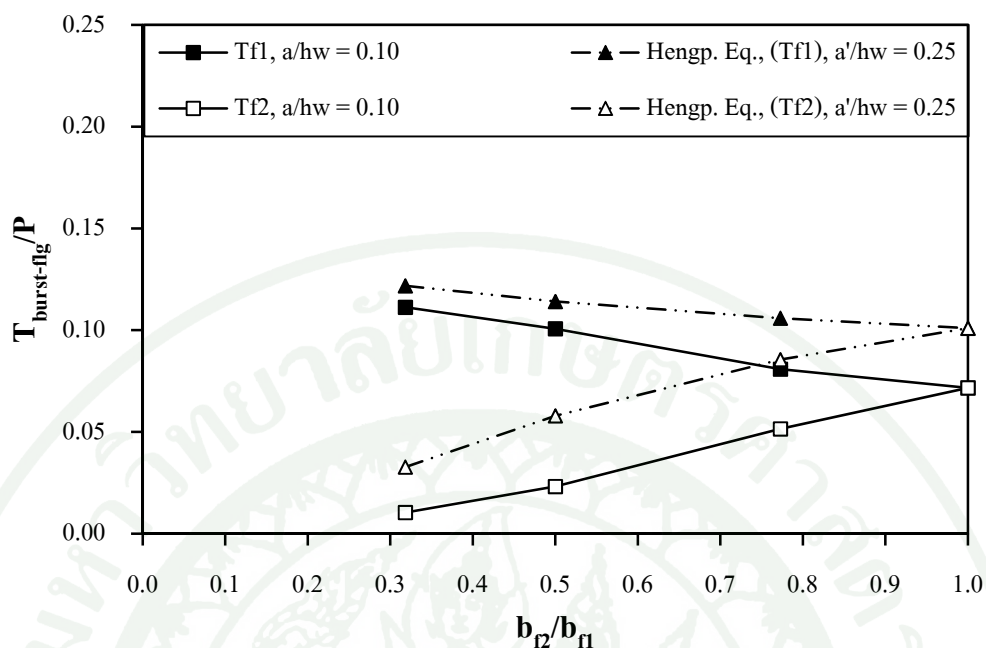
ภาพที่ 74 เป็นกรณีของแรงปรีที่ปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 56 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 แรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathane ส่วนใหญ่ให้อา่สูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ยกเว้นแบบจำลองที่มีค่า b_2/b_1 มีค่าน้อยกว่า 0.50 ซึ่งแรงปรีที่ปีกคานด้านบนที่คำนวณได้จากสมการให้อา่ต่ำกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประมาณร้อยละ 9

ภาพที่ 75 ถึง 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.30 พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10



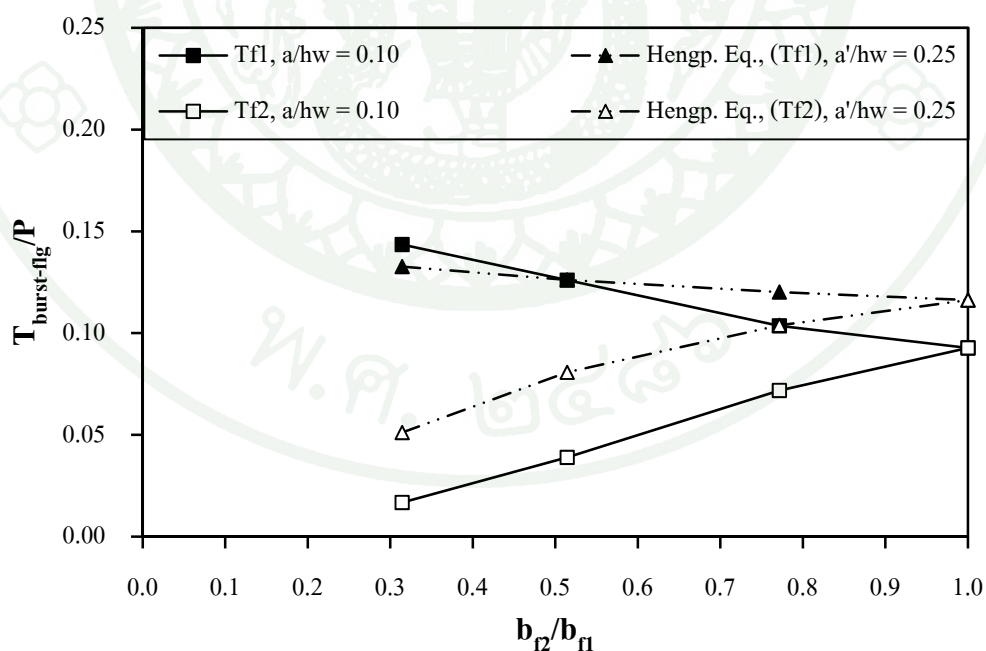
ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $b_1 = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



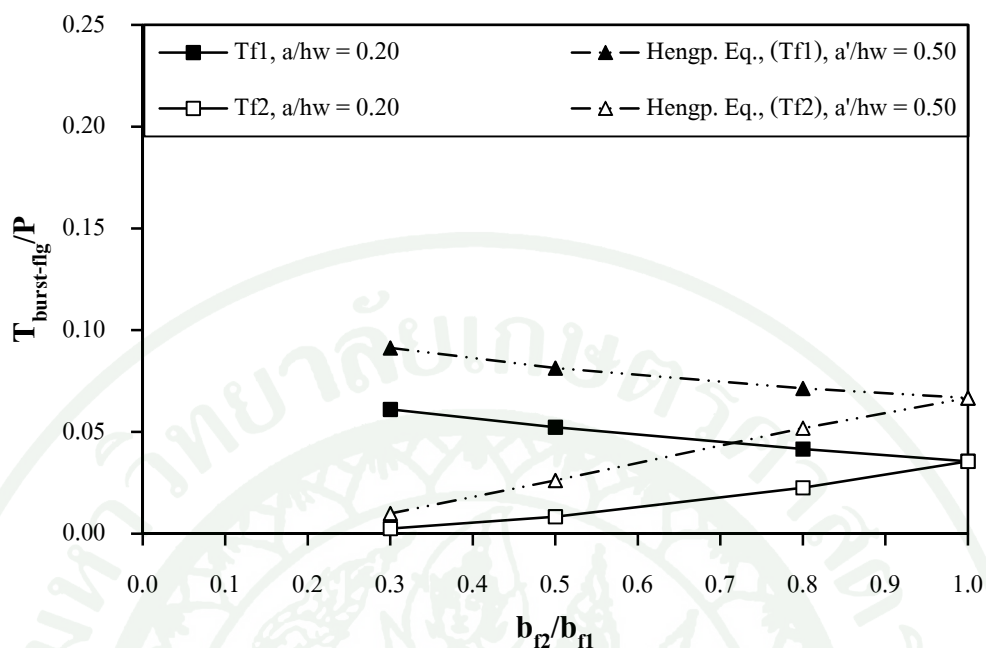
ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน

เมื่อ $b_{11} = 35.2''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



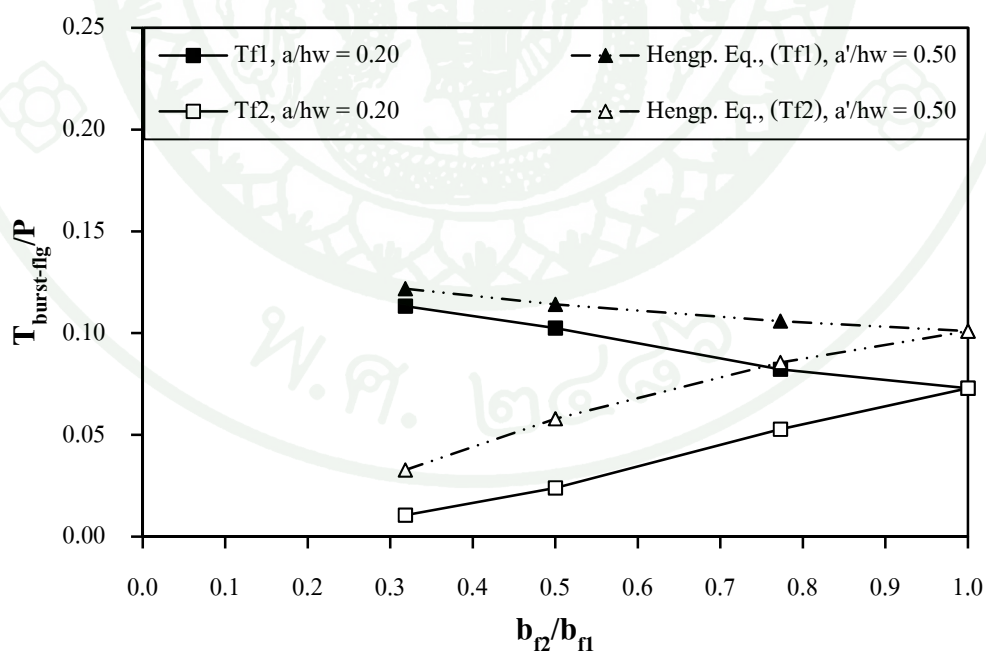
ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน

เมื่อ $b_{11} = 56''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



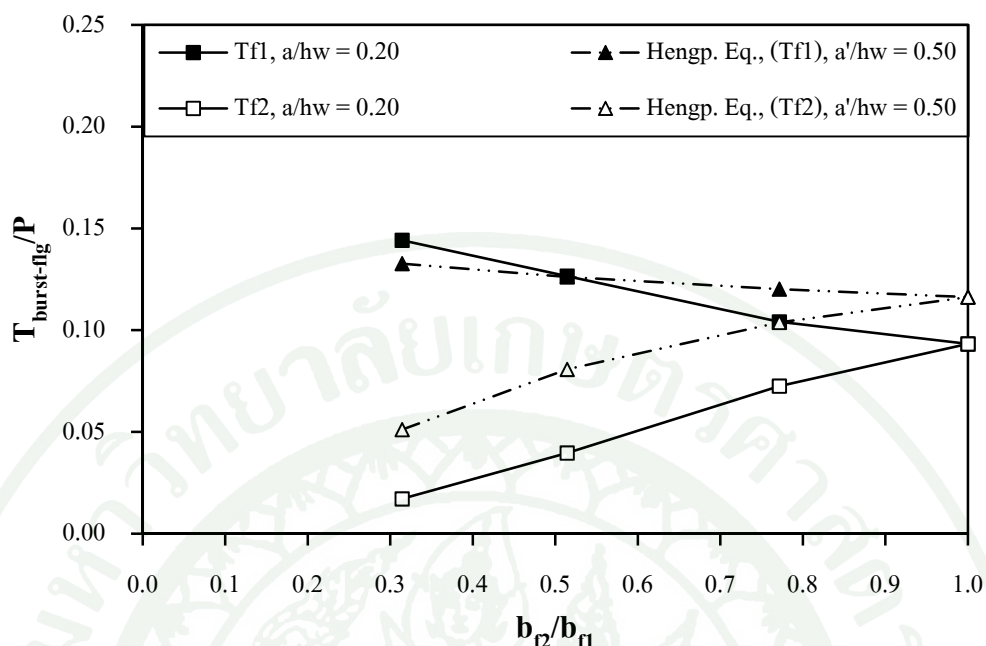
ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน

เมื่อ $b_{11} = 16''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน

เมื่อ $b_{11} = 35.2''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



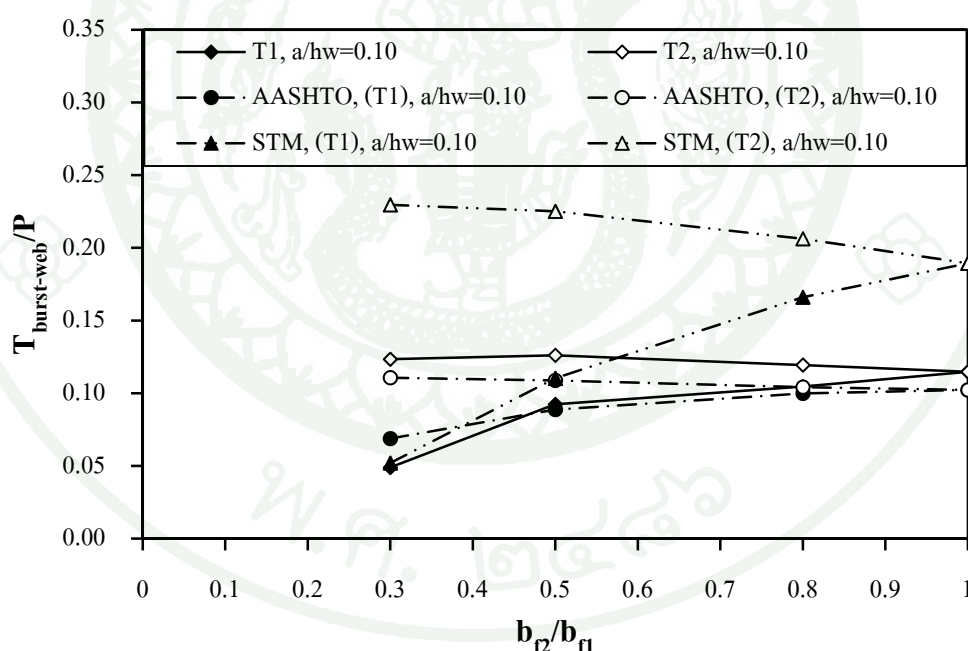
ภาพที่ 77 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $b_{11} = 56''$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 78 และ 79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีขนาด a/h_w เท่ากับ 0.10 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 คือ $2s/h_w$ เท่ากับ 0.55 ในกรณีนี้จะนำเสนอเฉพาะแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว โดยเลือกใช้ค่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอียึดกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตรย่อยดังแสดงในภาพที่ 65x และผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 41

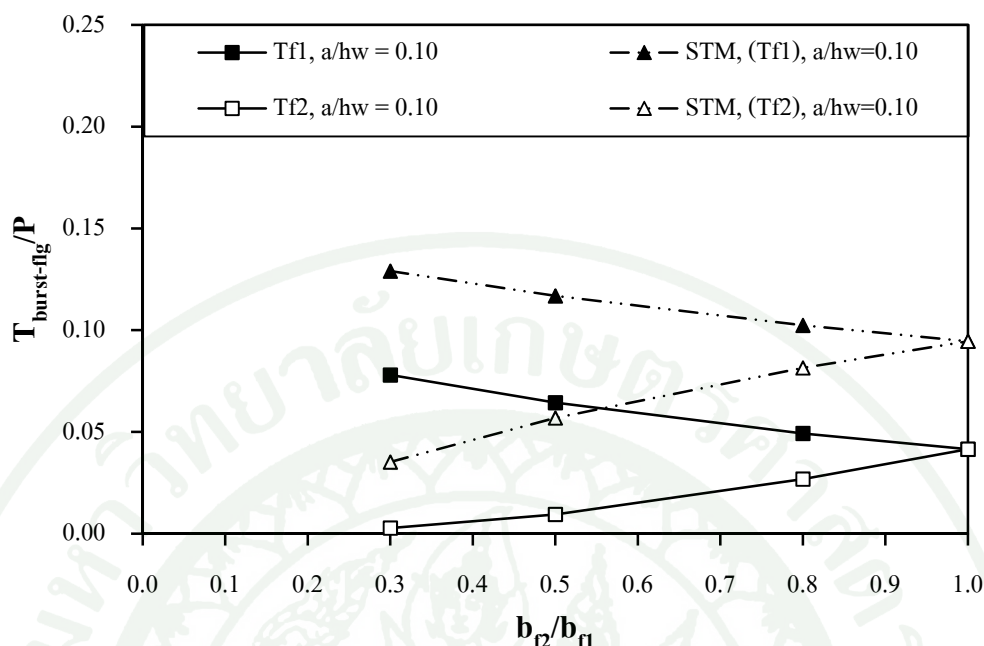
ภาพที่ 78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานพบว่า แรงปรีที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่าง เนื่องจากสมอยึดตัวล่างมีพื้นที่กระจายหน่วยแรงกว้างกว่าสมอยึดด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปรีในภาพที่ 60 และแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ในขณะที่แรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ สำหรับแรงปรีที่เอวคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนและแนวแรงอัดย่อยด้านล่าง

ภาพที่ 79 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานพบว่า แรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าที่สูงกว่าและครอบคลุมผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่าง



ภาพที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$



ภาพที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริทีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน

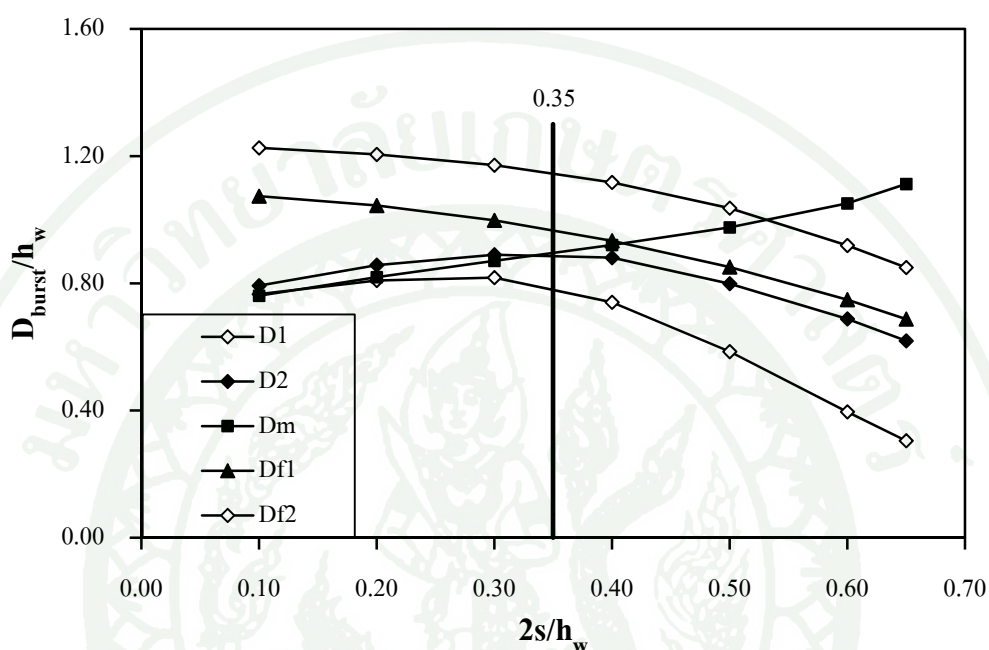
เมื่อ $b_{\Pi} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$

1.2.4 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริ

ภาพที่ 80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริกับ

ระยะห่างระหว่างแรงอัดของแบบจำลองที่มีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ โดยตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เกิดขึ้นจะต้องสอดคล้องกันกับกรณีของแรงปริในภาพที่ 63 จากภาพเห็นได้ว่า เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.35h_w$ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักมีค่าใกล้เคียงกันกับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.35h_w$ แรงปริที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักจะเกิดอยู่ไกลจากขอบด้านหน้าของแบบจำลองมากกว่าแรงปริที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรง ซึ่งตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดหลักจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น ในขณะที่แรงปริที่เอวคานที่เกิดขึ้นบนแนวแรงอัดย่อยจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแรงอัดมีค่าสูงขึ้นซึ่งตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานจะมีค่าลดลงด้วย โดยตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างจะมีค่าสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปริในภาพที่ 60 นอกจากนี้ ตำแหน่ง

จุดศูนย์กลางของปริติปักคานมีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากขึ้น และตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริติปักคานด้านบนมีค่าสูงกว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริติปักคานด้านล่าง



ภาพที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริติปักคานระยะห่างระหว่างแรงอัดของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร เมื่อ $a/h_w = 0.10$, $b_{f1} = 16"$, $b_{f2} = 8"$

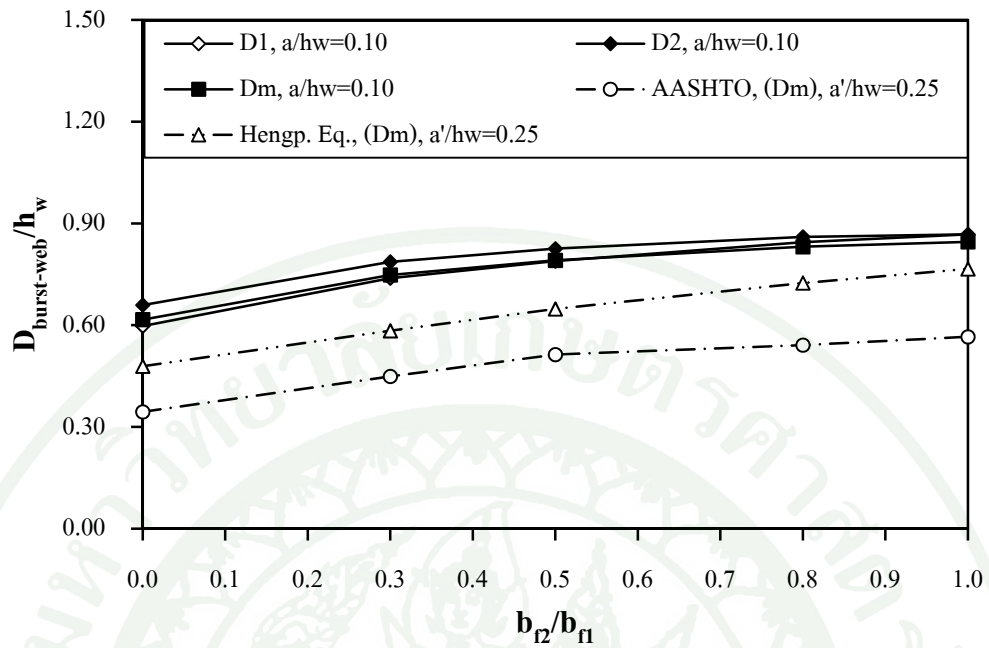
1.2.5 การเปรียบเทียบตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริติปักคานจากผลการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathane และ การสร้างแบบจำลอง STM

ภาพที่ 81 ถึง 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริติปักคานอัตราส่วนความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบนประกอบด้วย 16, 35.2 และ 56 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20, ($2s \leq 2s'$)

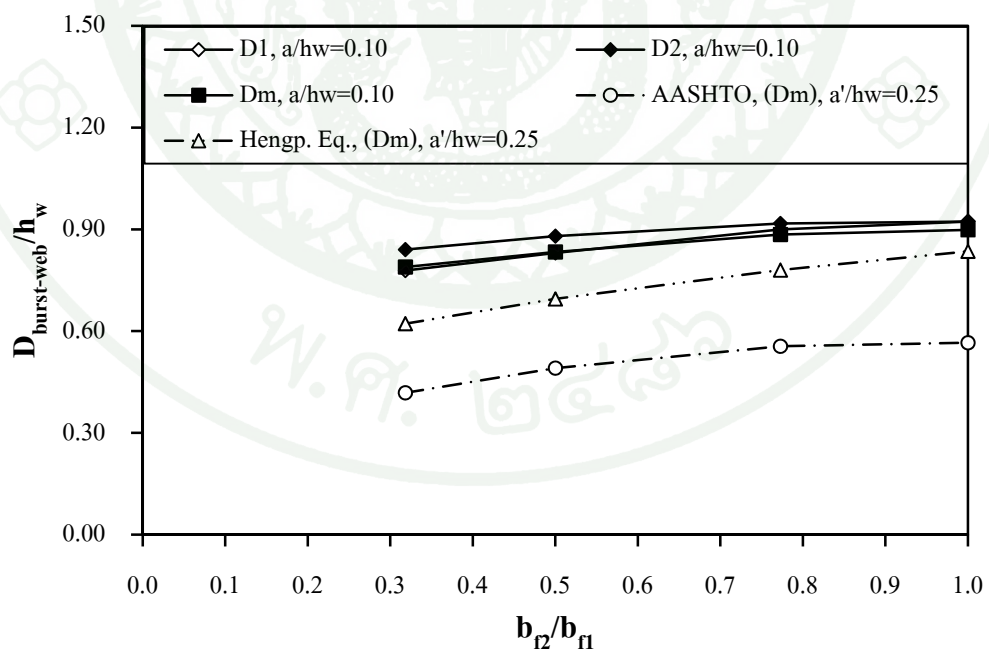
ภาพที่ 81 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานมีค่าน้อยที่สุดเกิดจากคานหน้าตัดรูปตัวทีหรือ b_{t2}/b_{t1} มีค่าเท่ากับศูนย์ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อ b_{t2}/b_{t1} มีค่ามากขึ้นหรือคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร โดยตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดจากคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร ($b_{t2}/b_{t1} = 1.0$) นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathaneer ให้ค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์มากที่สุด

ภาพที่ 82 และ 83 เป็นกรณีของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 35.2 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว (ภาพที่ 81)

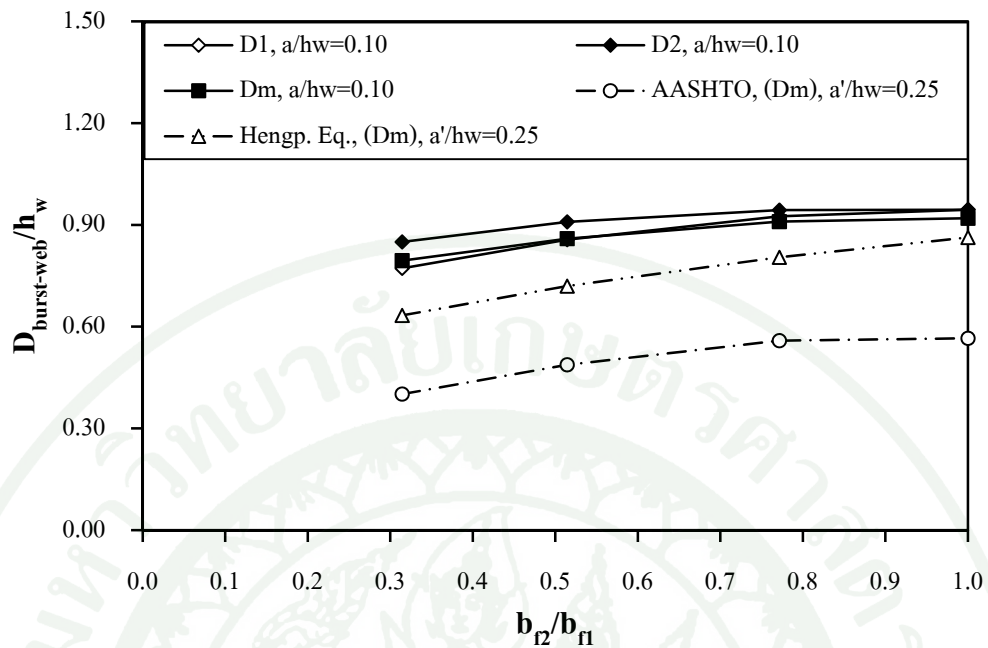
ภาพที่ 84 ถึง 86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.30 พบว่า ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 (ภาพที่ 81 ถึง 83)



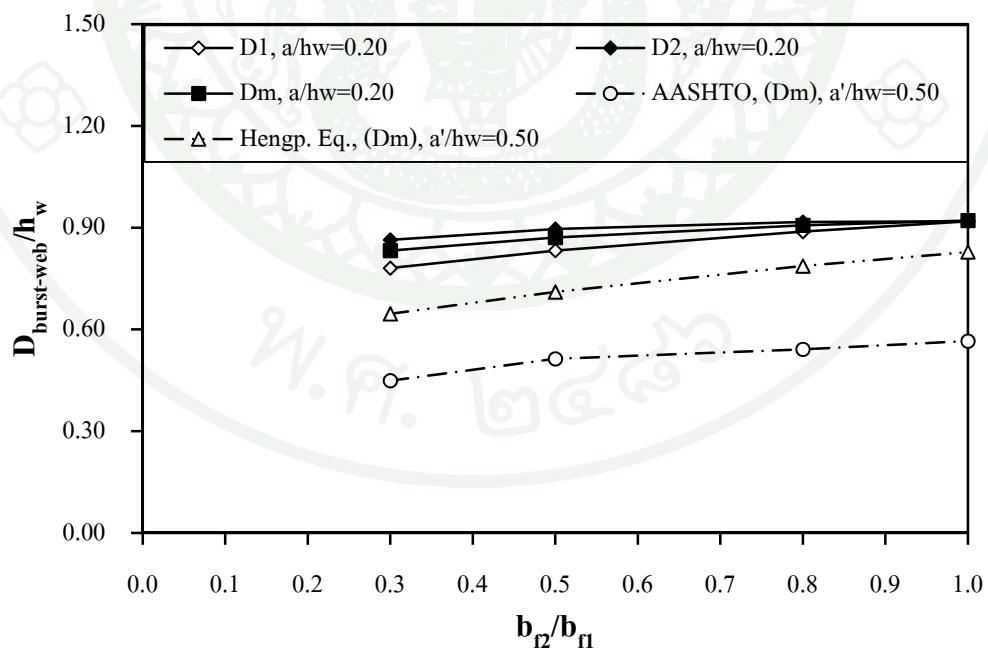
ภาพที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{f1} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



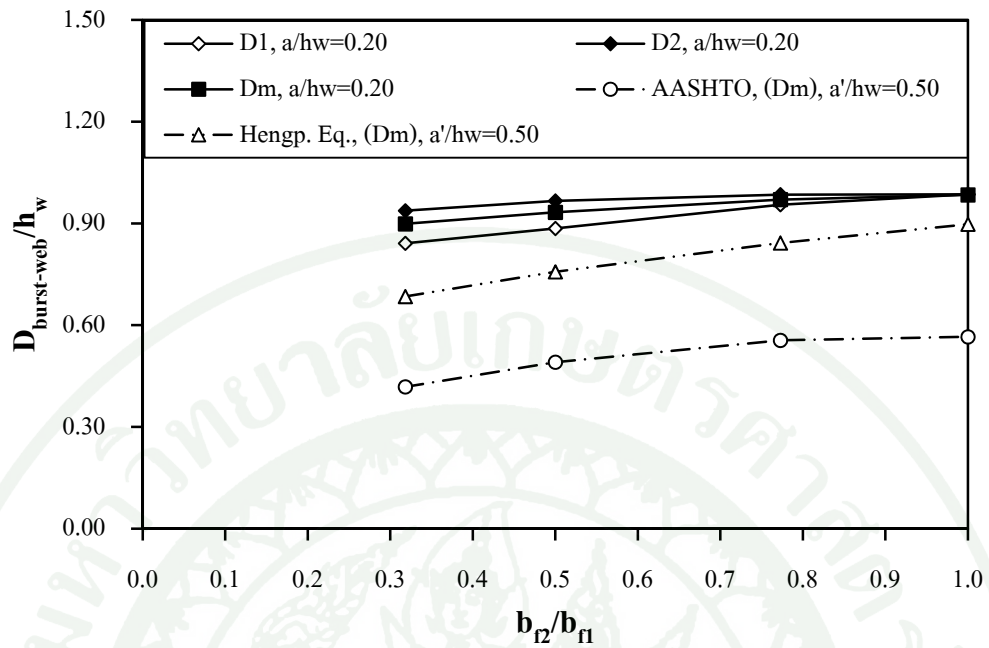
ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{f1} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



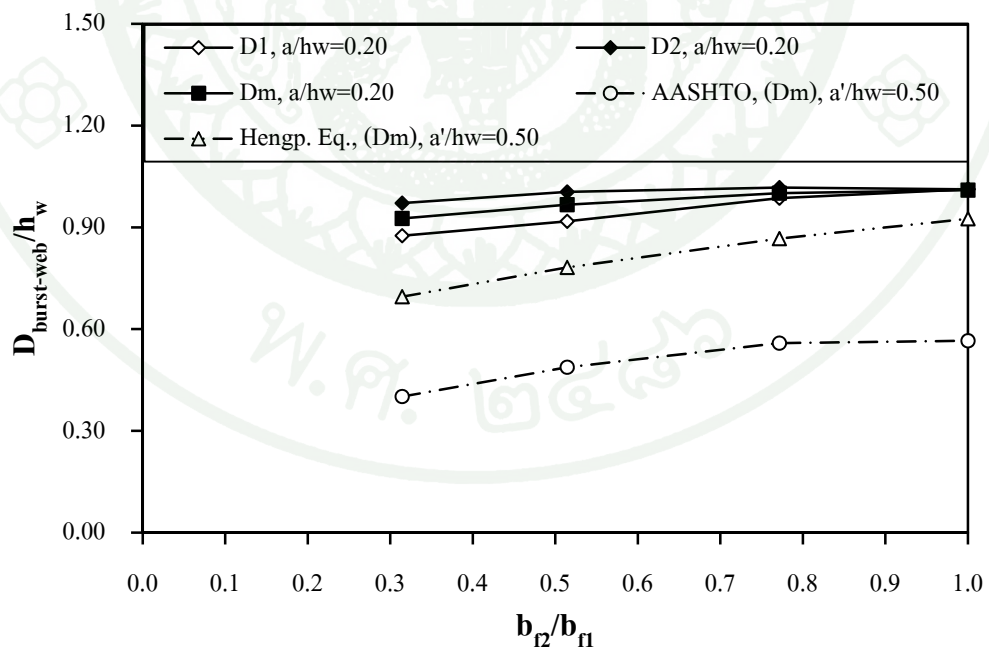
ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีโอเวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีโอเวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอนคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



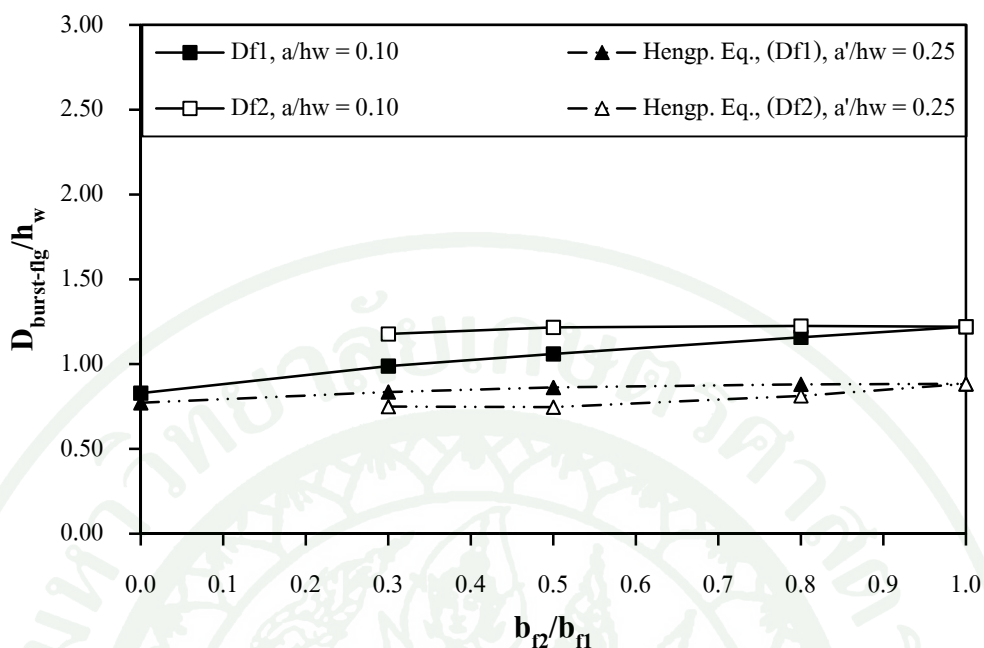
ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอนคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 87 ถึง 89 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานมีค่าสูงขึ้นเมื่อ b_{f2}/b_{f1} มีค่ามากขึ้น โดยผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathanee ส่วนใหญ่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ยกเว้นแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 56 นิ้ว ซึ่งค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านบนที่คำนวณได้จากสมการให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์

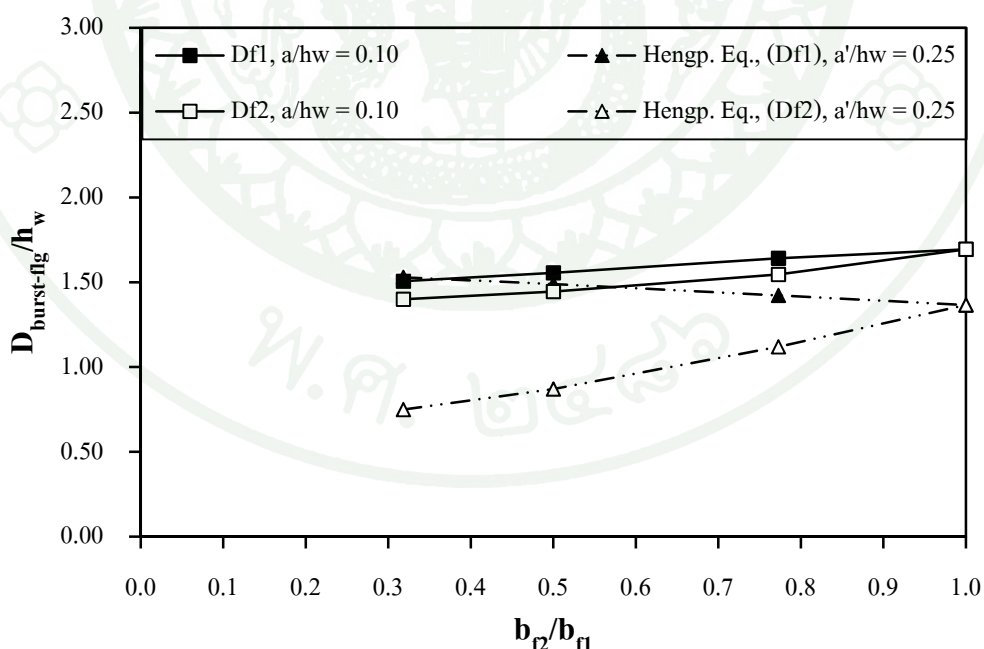
ภาพที่ 90 ถึง 92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.30 พบว่า ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 (ภาพที่ 87 ถึง 89)

จากกรณีศึกษาบริเวณสมอียึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีจากสมการของ AASHTO โดยถือว่าบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวกระทำแบบตรงศูนย์กลางต่อปริซึมสมมาตรดังแสดงในภาพที่ 65ก นั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวทีมาก

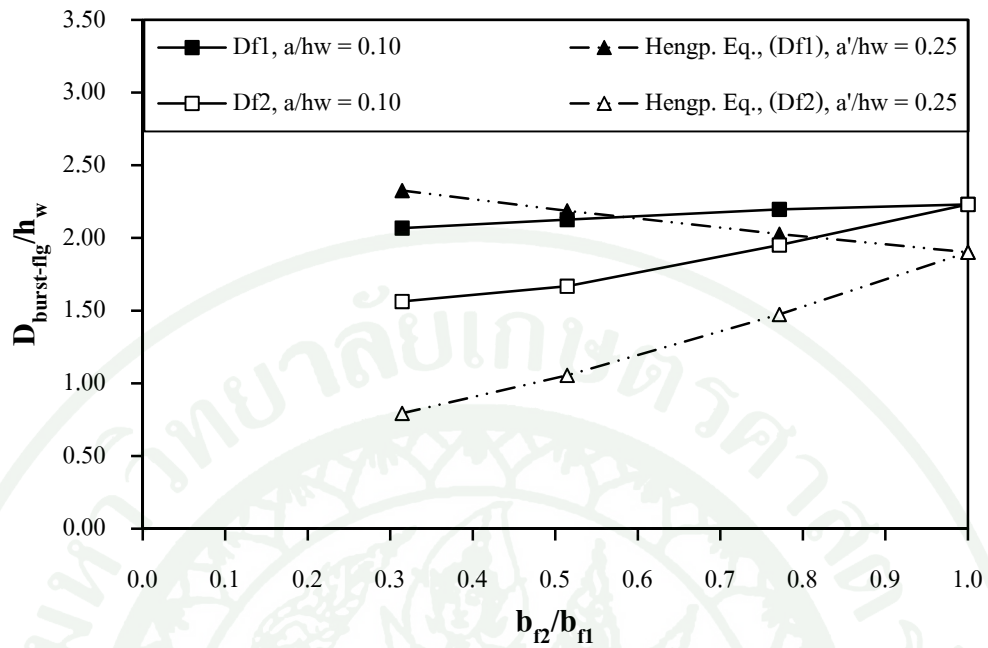
การประยุกต์ใช้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดปีกคานของ Hengprathanee นั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที นอกจากนี้ Hengprathanee ยังได้เสนอให้จัดเหล็กเสริมกระจายออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรี และให้จุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคาน เพื่อให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดของปรี การเสริมด้วยวิธีนี้ก็จะสามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณสมอียึดเนื่องจากแรงปรีที่เกิดขึ้นได้



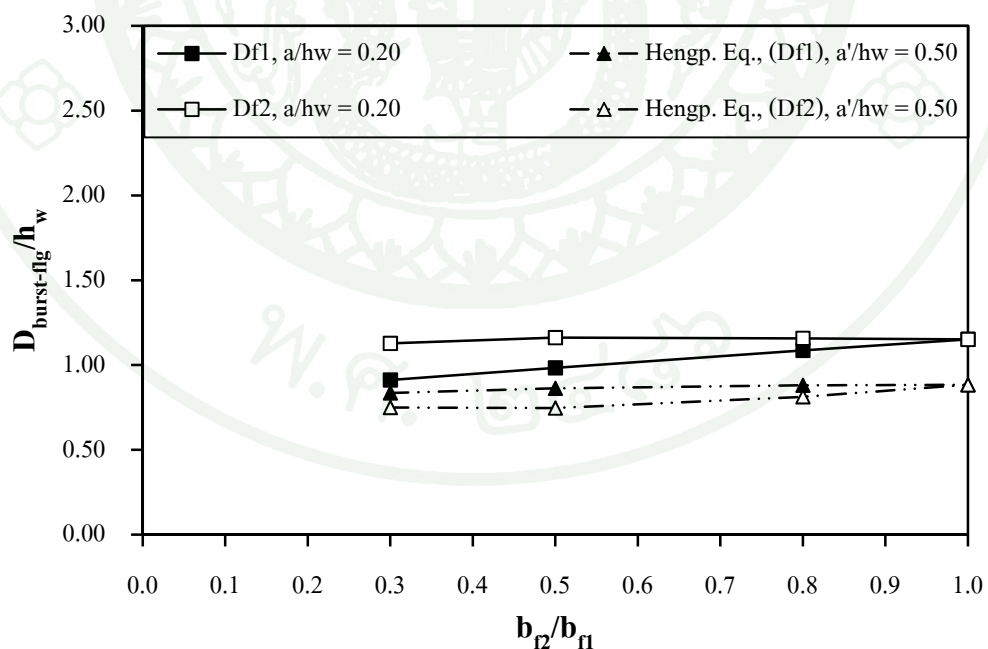
ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน เมื่อ $b_{11} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



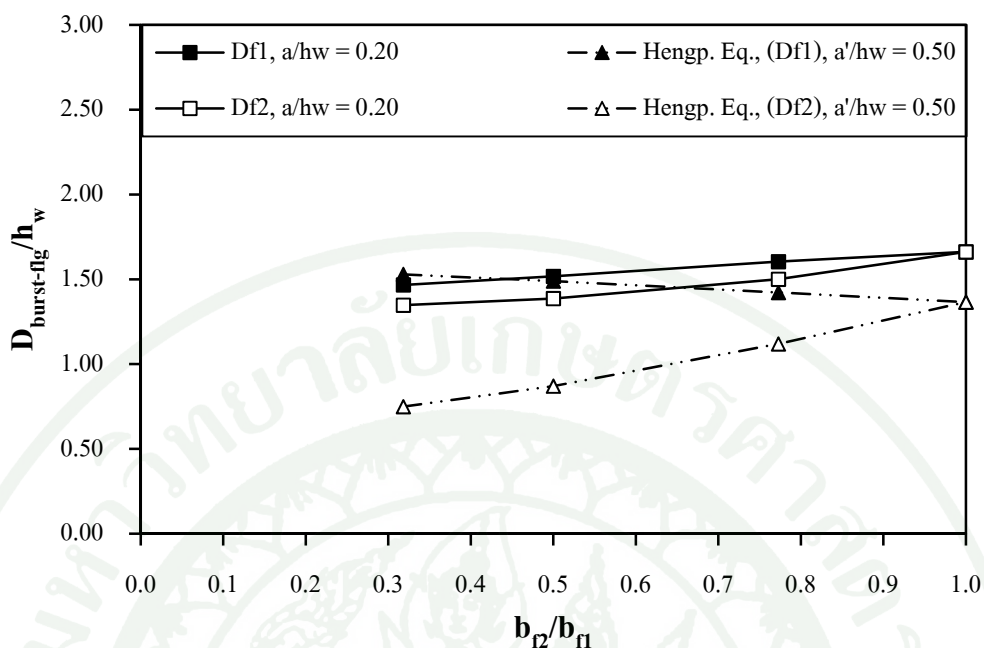
ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน เมื่อ $b_{11} = 35.2"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



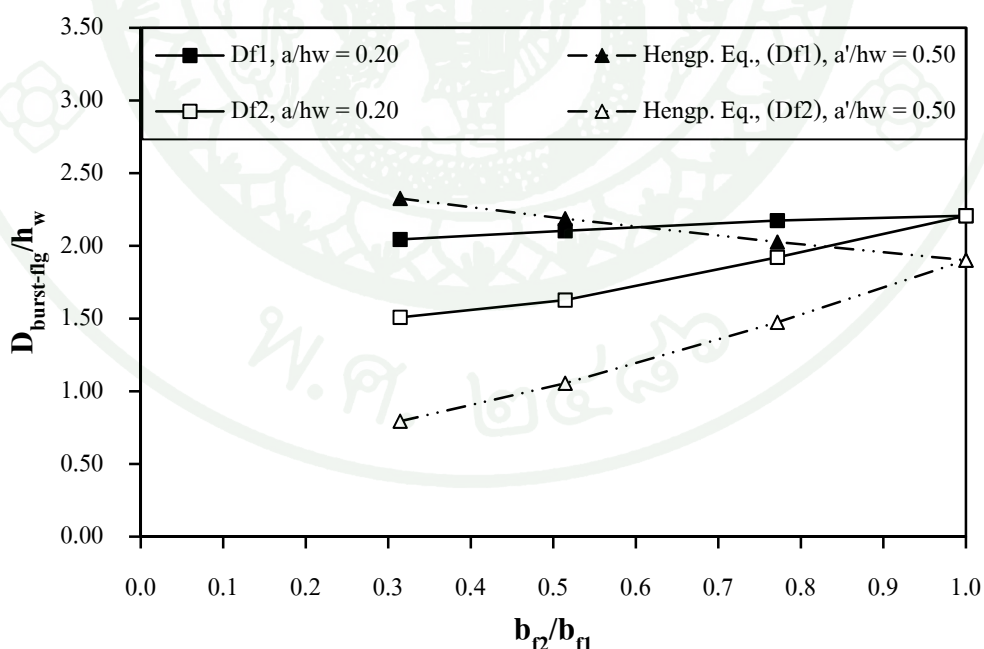
ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีปักคานกับอัตราส่วนความกว้างของปักคาน เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 91 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{11} = 35.2"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$



ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_{11} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.30$, $2s \leq 2s'$

ภาพที่ 93 และ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคานด้านบน 16 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 คือ $2s/h_w$ เท่ากับ 0.55

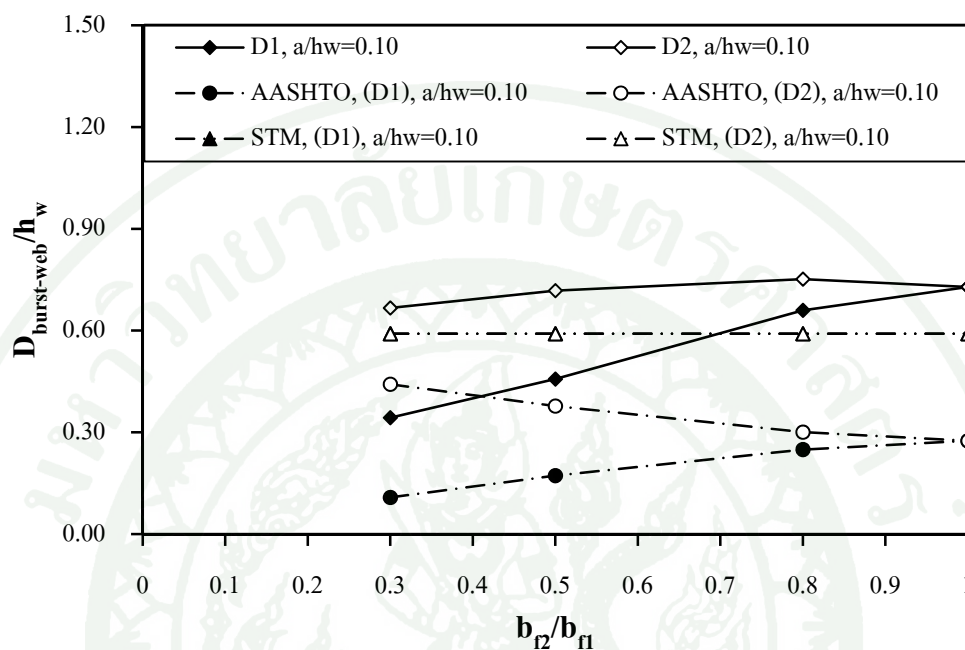
ภาพที่ 93 เป็นกรณีของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานพบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างมีค่าสูงที่สุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อ b_{12}/b_n มีค่ามากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกรณีของแรงปรีที่เอวคานในภาพที่ 78 ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ส่วนใหญ่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านล่างซึ่งเป็นแนวแรงอัดที่มีค่าแรงปรีที่เอวคานสูงที่สุด

ภาพที่ 94 เป็นกรณีของตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานพบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของปีกคานด้านบนและปีกคานด้านล่าง

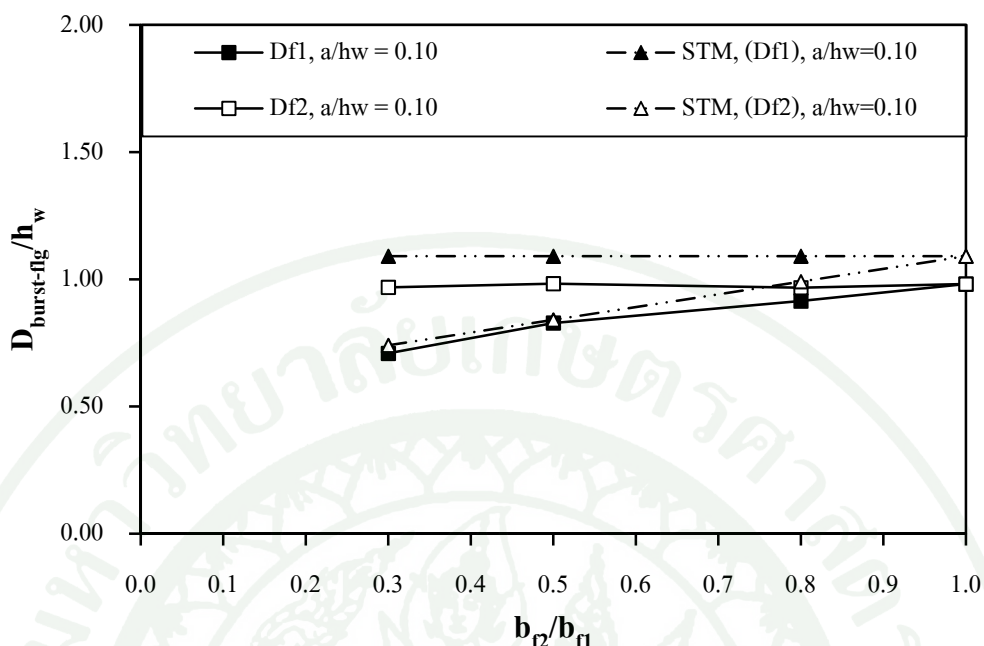
จากกรณีที่บริเวณสมอียึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีจากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอียึดกระทำแบบตรงศูนย์กลางต่อปริซึมสมมาตรย่อยนั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กรณีของคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที

การประมาณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 41 ถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอียึดคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตรและคานหน้าตัดรูปตัวที ซึ่งแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลองจะให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น หากมีการกระจายเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีออกไปที่ระยะสองเท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรี และให้จุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปรีทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคาน การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ก็จะทำให้เหล็กเสริมครอบคลุม

บริเวณที่เกิดแรงปรี และสามารถต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณสมอชิดอันเนื่องมาจากแรงปรีที่เกิดขึ้นได้



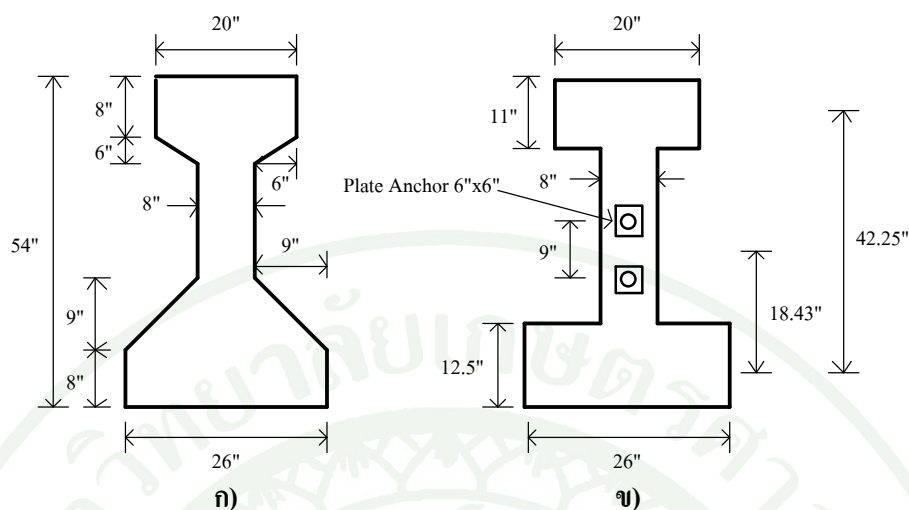
ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_1 = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$



ภาพที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับอัตราส่วนความกว้างของปีกคาน เมื่อ $b_1 = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s > 2s'$

1.2.6 ตัวอย่างการออกแบบบริเวณสมอียด์ที่มีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียด์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสอง ($2s'$) ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอตัวอย่างการออกแบบบริเวณสมอียด์จากคานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร AASHTO/I-Beams Type IV มีพื้นที่ของหน้าตัดคาน (A) เท่ากับ 789 ตร.นิ้ว (in^2) ซึ่งเป็นขนาดหน้าตัดคานมาตรฐานของ PCI Bridge Design Manual (1997) โดยได้ปรับเปลี่ยนขนาดของหน้าตัดคานเพื่อให้สอดคล้องต่อการออกแบบโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 95 บริเวณสมอียด์มีการอัดแรงสองแรงและมีแรงอัดกระทำที่แต่ละหัวสมอเท่ากับ 0.5P กิโลปอนด์ (kips) หรือมีแรงอัดรวมกระทำตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานเท่ากับ P kips การศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20



ภาพที่ 95 คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร AASHTO/I-Beams Type IV เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว

วิธีการคำนวณหาระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสอง ($2s'$) จากสมการที่ 20 นั้น กำหนดให้ b_{fl} คือความกว้างของปีกคานด้านยาว และ b_{tw} แทนความกว้างของปีกคานด้านสั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 2s' &= 0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{tw}/b_{fl}) - 1] \\
 &= (0.425)(42.25) + (0.75)(6) + (0.30)(42.25)[(20/26) - 1] = 19.5"
 \end{aligned}$$

- 1) เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20

จากภาพที่ 95 บริเวณสมอียึดมีแรงอัดทั้งสองแรงอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว ซึ่งมีระยะน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO และผลการคำนวณที่ได้จากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathane โดยถือว่าบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบตรงศูนย์กลาง และมีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับขนาดแผ่นเหล็กแบกทานรวม (a') คือ $9 + 6 = 15$ นิ้ว โดยที่ $\sigma_o = -P/A = -P/789$ กิโลปอนด์/ตร.นิ้ว (ksi) สำหรับค่าตัวแปร R_{lu} , R_{ll} , R_2 , R_3 , y_{lu} , y_{ll} และ ρ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{1u} = |\sigma_o|(h' - c - 0.5t_{l2})(t_w) = (P/789)(54 - 18.43 - 6.25)(8) = 0.2973P \text{ kips}$$

$$R_{1l} = |\sigma_o|(c + 0.5t_{l2})(t_w) = (P/789)(18.43 + 6.25)(8) = 0.2502P \text{ kips}$$

$$R_2 = |\sigma_o|(b_{fl} - t_w)(t_{fl}) = (P/789)(20 - 8)(11) = 0.1673P \text{ kips}$$

$$R_3 = |\sigma_o|(b_{l2} - t_w)(t_{l2}) = (P/789)(26 - 8)(12.5) = 0.2852P \text{ kips}$$

$$\rho = (R_{1u} + R_2 - 0.5P)[a'/(2P)] = (0.2973P + 0.1673P - 0.5P)[15/(2P)] = -0.266$$

$$y_u = [0.5R_{1u}(h' - c - 0.5t_{l2}) + R_2(h_w - c)]/(R_{1u} + R_2) = 17.96"$$

$$y_l = [0.5R_{1l}(c + 0.5t_{l2}) + R_3(c)]/(R_{1l} + R_3) = 15.58"$$

$$\begin{aligned} D_{\text{burst-web}} &= (h' - c - 0.5t_{l2}) + (a'/4) + (h_w/4)[1 - \exp(-0.8b_{fl}/h_w)] \\ &= (54 - 18.43 - 6.25) + (15/4) + (42.25/4)[1 - \exp((-0.8 \times 20)/42.25)] \\ &= 36.40" \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\text{burst-web}} &= (c + 0.5t_{l2}) + (a'/4) + (h_w/4)[1 - \exp(-0.8b_{l2}/h_w)] \\ &= (18.43 + 6.25) + (15/4) + (42.25/4)[1 - \exp((-0.8 \times 26)/42.25)] = 32.54" \end{aligned}$$

ค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริทีเอวคาน (D_m) สำหรับใช้คำนวณหาขนาดของแรงปริทีเอวคานเลือกจากค่าน้อยที่สุดที่ได้จากผลการคำนวณ คือ 32.54 นิ้ว

$$\begin{aligned}
 T_{\text{burst-web}} &= (R_{1u} + R_2) \left[\frac{4y_u + 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right] \left[1 - \frac{a'}{4y_u + 4\rho} \right] \\
 &= (0.4646P) \left[\frac{(4)(17.96) + (4)(-0.266)}{(4)(32.54) - 15} \right] \left[1 - \frac{15}{(4)(17.96) + (4)(-0.266)} \right] \\
 &= 0.2250P \text{ kips}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{burst-web}} &= (R_{1l} + R_3) \left[\frac{4y_l - 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right] \left[1 - \frac{a'}{4y_l - 4\rho} \right] \\
 &= (0.5354P) \left[\frac{(4)(15.58) - (4)(-0.266)}{(4)(32.54) - 15} \right] \left[1 - \frac{15}{(4)(15.58) - (4)(-0.266)} \right] \\
 &= 0.2250P \text{ kips}
 \end{aligned}$$

ขนาดของแรงปริที่ปีกคานด้านบน (T_{Γ}) และตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ปีกคานด้านบน (D_{Γ}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 k_{\Gamma} &= R_{\Gamma l} / R_{\text{total}} = [|\sigma_o| (b_{\Gamma} t_{\Gamma})] / (R_{1u} + R_2), k_{\Gamma} \leq 1.0 \\
 &= [(P/789)(20)(11)] / (0.2973P + 0.1673P) = 0.60 \leq 1.0
 \end{aligned}$$

$$T_{\text{burst-flg1}} = 0.15k_{\Gamma}^3 P = (0.15)(0.60)^3 (P) = 0.0324P \text{ kips}$$

$$\begin{aligned}
 D_{\text{burst-flg1}} &= (h_w - c)/4 + (3t_{\Gamma})/8 + (R_2/T_{\Gamma})(b_{\Gamma} + t_w)/8 \\
 &= (42.25 - 18.43)/4 + (3 \times 11)/8 + (0.1673P/0.0324P)(20 + 8)/8 = 28.14"
 \end{aligned}$$

ขนาดของแรงปริที่ปีกคานด้านล่าง ($T_{\Gamma 2}$) และตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของแรงปริที่ปีกคานด้านล่าง ($D_{\Gamma 2}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$k_{t2} = [|\sigma_o|(b_{t2}t_{t2})]/(R_{11} + R_3) = [(P/789)(26)(12.5)]/(0.2502P + 0.2852P)$$

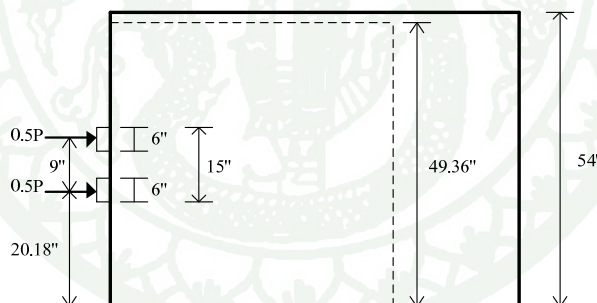
$$= 0.769 \leq 1.0$$

$$T_{burst-flg2} = (0.15)(0.769)^3(P) = 0.0683P \text{ kips}$$

$$D_{burst-flg2} = (c/4) + (3t_{t2})/8 + (R_3/T_{t2})(b_{t2}+t_w)/8$$

$$= (18.43/4) + (3 \times 12.5)/8 + (0.2852P/0.0683P)(26 + 8)/8 = 27.04"$$

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีจากสมการของ AASHTO จะพิจารณาคล้ายกับบริเวณสมอขี้นี้มีการอัดแรงเพียงแรงเดียวกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปรีซึมสมมาตรดังแสดงในภาพที่ 96 และใช้ขนาดรวมของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองในสมการ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 96 วิธีการคำนวณหาปรีซึมสมมาตร เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว

$$T_{burst} = 0.25P[1 - (a'/h)] = 0.25P[1 - (15/49.36)] = 0.1740P \text{ kips}$$

$$D_{burst} = 0.5h = (0.5)(49.36) = 24.68"$$

ตารางที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริในส่วนของเอวคาน โดยเลือกนำเสนอเฉพาะค่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลักซึ่งมีค่าสูงที่สุด จะเห็นได้ว่า แรงปริที่เอวคานที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมาก ส่วนค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่เอวคานที่คำนวณได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประมาณร้อยละ 31 การจัดเหล็กเสริมตามข้อกำหนดของ AASHTO ที่เสนอให้กระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับค่าน้อยที่สุดระหว่าง $2.5D_{burst}$ (61.70 นิ้ว) และ 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้างที่พิจารณา ($1.5h = 74.04$ นิ้ว) โดยให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่คำนวณได้จากสมการนั้น จากภาพผนวกที่ ก1 จะเห็นได้ว่า การกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับ 61.70 นิ้ว เหล็กเสริมนี้จะครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปริในบริเวณเอวคาน อย่างไรก็ตาม การเสริมเหล็กวิธีดังกล่าวมีความยุ่งยากในการทำงาน ยิ่งไปกว่านั้น เป็นไปได้ยากที่จะจัดเหล็กเสริมให้มีจุดศูนย์กลางอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่คำนวณได้จากสมการ

สำหรับแรงปริที่เอวคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathane ให้อ่านสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประมาณร้อยละ 23 ส่วนค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่คำนวณได้จากสมการให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ หากพิจารณาจากภาพผนวกที่ ก1 การจัดเหล็กเสริมตามคำแนะนำของ Hengprathane ที่ได้เสนอให้กระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับ $2D_{burst}$ หรือ 65.08 นิ้ว โดยให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่คำนวณได้จากสมการนั้น การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ก็จะมีความสะดวกในการทำงาน และครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปริในบริเวณเอวคานได้เช่นกัน

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปริที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว, ($2s < 2s'$)

Web	FEA	AASHTO	%Diff.	Hengp. Eq.	%Diff.
	[1]	[2]	[1] & [2]	[3]	[1] & [3]
T_m	0.1825P	0.1740P	-4.66	0.2250P	23.29
D_m	35.70"	24.68"	-30.87	32.54"	-8.85

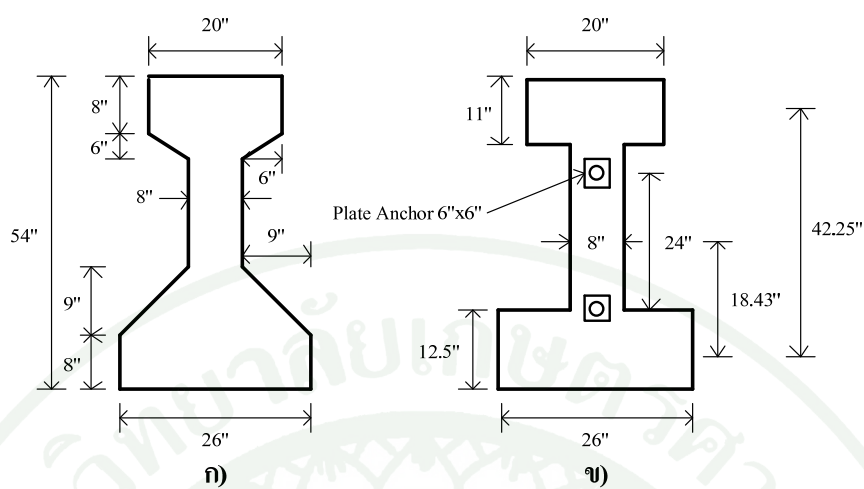
ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีในส่วนของปีกคาน โดยแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathanee ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม จากภาพผนวกที่ ก2 การกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคาน และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้ตามคำแนะนำของ Hengprathanee การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ก็จะทำให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปรีที่ปีกคาน และสามารถป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณปีกคานเนื่องจากแรงปรีที่เกิดขึ้นได้

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 9 นิ้ว, ($2s < 2s'$)

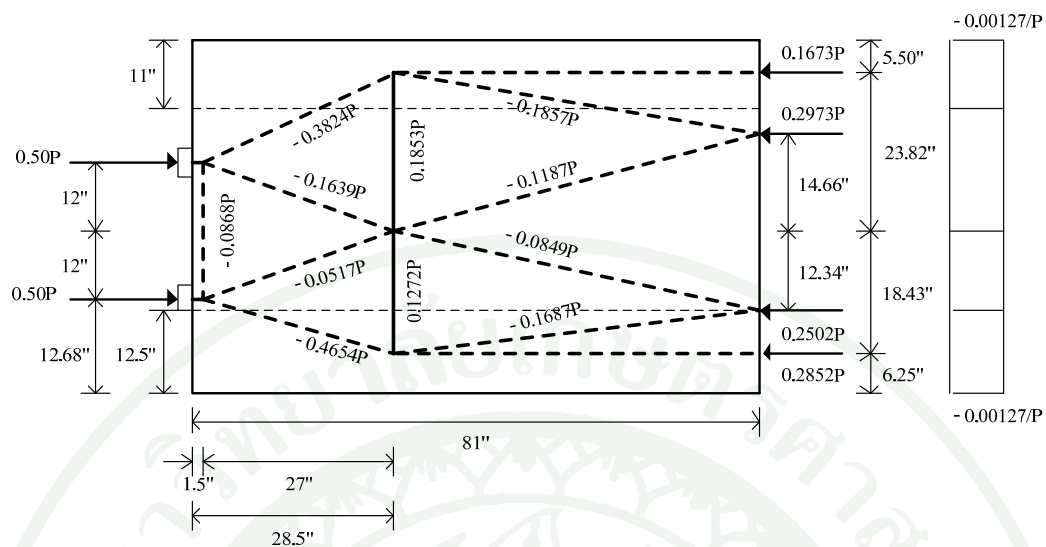
Flange	FEA	Hengp. Eq.	%Diff.
	[1]	[2]	[1] & [2]
Top Flange (T_{f1})	0.0122P	0.0324P	165.57
Bottom Flange (T_{f2})	0.0273P	0.0683P	150.18
Top Flange (D_{f1})	46.78"	28.14"	-39.85
Bottom Flange (D_{f2})	40.53"	27.04"	-33.28

2) เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20

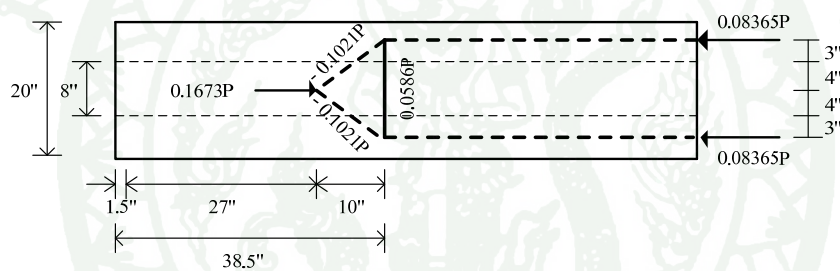
ภาพที่ 97 เป็นกรณีที่มีบริเวณสมอียัดที่มีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว ซึ่งมีระยะมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 โดยขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในกรณีนี้จะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 98 และผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ดังแสดงในภาพที่ 99



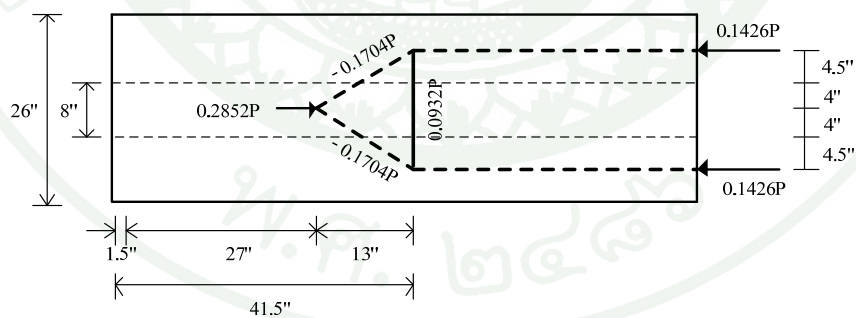
ภาพที่ 97 คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบไม่สมมาตร AASHTO/I-Beams Type IV เมื่อแรงอัดทั้งสอง
อยู่ห่างกัน 24 นิ้ว



ก) บริเวณเอวคาน



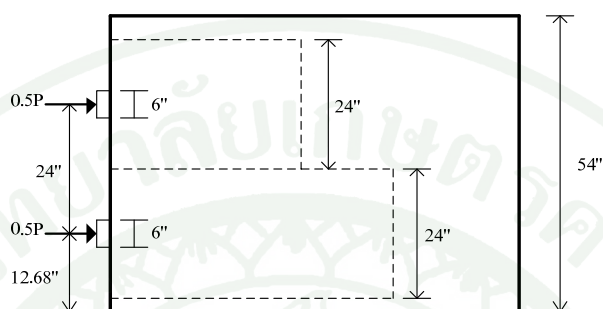
ข) บริเวณปีกคานด้านบน



ค) บริเวณปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 98 แสดงแรงภายในแบบจำลอง STM เมื่อบริเวณสมอขีคมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีจากสมการของ AASHTO จะพิจารณาให้แรงอัดบนสมออีคกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปรีซึมสมมาตรย่อแสดงในภาพที่ 99 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 99 วิธีการคำนวณหาขนาดปรีซึมสมมาตรย่อ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว

$$T_{burst1} = 0.25P[1 - (a/h_1)] = 0.25P[1 - (6/24)] = 0.0938P \text{ kips}$$

$$D_{burst1} = 0.5h_1 = (0.5)(24) = 12"$$

$$T_{burst2} = 0.25P[1 - (a/h_2)] = 0.25P[1 - (6/24)] = 0.0938P \text{ kips}$$

$$D_{burst2} = 0.5h_2 = (0.5)(24) = 12"$$

ตารางที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีในส่วนของเอวคาน โดยนำเสนอเฉพาะแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก ซึ่งในการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีภายในบริเวณเอวคานควรเลือกใช้ค่าแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยที่มีค่าสูงสุด

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยด้านบนที่คำนวณได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ ซึ่งในกรณีนี้การกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับค่าน้อยที่สุดระหว่าง $2.5D_1$ (30 นิ้ว) และ 1.5 เท่าของความสูงของโครงสร้างที่พิจารณา ($1.5h_1 = 36$ นิ้ว) โดยให้

จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานของ AASHTO นั้น หากพิจารณาจากภาพผนวกที่ ก3 จะเห็นได้ว่าการกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับ 30 นิ้ว เหล็กเสริมนี้อาจไม่ครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปรีในบริเวณเอวคาน

สำหรับขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การจัดเสริมเหล็กด้านทานแรงปรีควรกระจายเหล็กเสริมให้เต็มความกว้างส่วนของเอวคานมีระยะเท่ากับ $2D_v$ หรือ 57 นิ้ว และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานบนแนวแรงอัดยอ้านบน เพื่อให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปรีในบริเวณเอวคาน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว, ($2s > 2s'$)

Web	FEA	AASHTO	%Diff.	STM	%Diff.
	[1]	[2]	[1] & [2]	[3]	[1] & [3]
T_1	0.1074P	0.0938P	-12.71	0.1853P	72.53
T_2	0.0870P	0.0938P	7.76	0.1272P	46.21
D_1	29.63"	12.00"	-59.50	28.50"	3.81
D_2	26.10"	12.00"	-54.02	28.50"	9.20

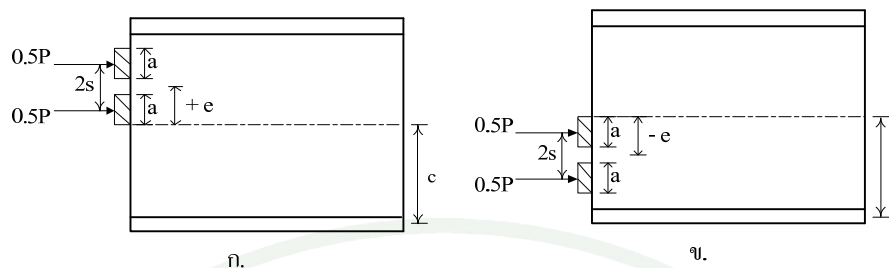
ตารางที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีในส่วนของปีกคาน พบว่า ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การจัดเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีในส่วนนี้ควรกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคาน และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM เพื่อให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดหน่วยแรงปรีที่ปีกคาน

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน 24 นิ้ว, ($2s > 2s'$)

Flange	FEA	STM	%Diff.
	[1]	[2]	[1] & [2]
Top Flange (T_{f1})	0.0164P	0.0586P	257.32
Bottom Flange (T_{f2})	0.0412P	0.0932P	126.21
Top Flange (D_{f1})	33.38"	38.50"	15.34
Bottom Flange (D_{f2})	26.75"	41.50"	55.14

2. บริเวณสมอยืดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์

จากการศึกษากรณีทีบริเวณสมอยืดมีการอัดแรงสองแรงแบบตรงศูนย์กลางมาแล้วนั้น ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยืด ดังนั้น ในบทนี้จึงเลือกศึกษาเฉพาะพฤติกรรมของบริเวณสมอยืดที่มีการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์ จากแบบจำลองที่มีความหนาของเวกคาน 5 นิ้ว และความหนาของปีกคาน 5.5 นิ้ว หรือ t_f/t_w เท่ากับ 1.1 ในส่วนของขนาดแผ่นเหล็กแบกทานจะเลือกใช้เพียงสองค่าเท่านั้นคือ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 ซึ่งเป็นขนาดแผ่นเหล็กแบกทานที่นิยมในการใช้งานจริงสำหรับการออกแบบคานคอนกรีตอัดแรงที่มีการอัดแรงสองแรงหรือมากกว่า โดยแผ่นเหล็กแบกทานขนาดอื่นๆเป็นขนาดที่เล็กและใหญ่เกินไปในการใช้งาน จากภาพที่ 100 สัญลักษณ์ e/h_w คือค่าระยะการเยื้องศูนย์ ซึ่งมีระยะจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานถึงจุดศูนย์ถ่วงของแรงอัดรวม กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงอัดรวมกระทำที่ด้านบนของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน และมีค่าเป็นลบเมื่อแรงอัดรวมกระทำที่ด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน การศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 และเมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20



ภาพที่ 100 รูปแบบของการเอียงศูนย์ภายในบริเวณสมอฮีด

2.1 คานหน้าตัดรูปตัวไอแบบสมมาตร

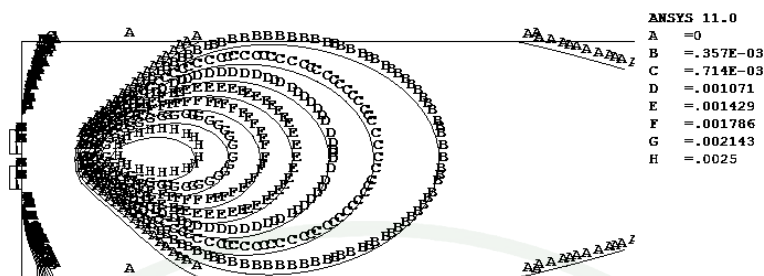
2.1.1 ระดับของหน่วยแรงปริ

ภาพที่ 101 ถึง 103 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 เนื่องจากแบบจำลองมีลักษณะสมมาตรกัน ทำให้จุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานอยู่ตรงกับแนวศูนย์กลางของเอวคาน ด้วยเหตุนี้ ขนาดและการกระจายของหน่วยแรงปริซึ่งเกิดจากแรงอัดรวมกระทำที่ด้านบนและด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานจะมีลักษณะเหมือนกัน แต่มีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้น จึงเลือกนำเสนอเฉพาะแบบจำลองที่มีแรงอัดรวมกระทำที่ด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานเท่านั้น

ภาพที่ 101 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคาน โดยมีค่าระยะการเอียงศูนย์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกันกับจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน (ภาพที่ 101ก) หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานจะสมมาตรกันตลอดแนวศูนย์กลางของเอวคาน และเมื่อแรงอัดรวมกระทำที่ด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน (ภาพที่ 101ข ถึง 101ง) หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหลังของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับแนวศูนย์กลางของเอวคาน แต่หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นจะรวมเป็นบริเวณเดียวอยู่ด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน และหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานนี้จะขยับออกจากแนวศูนย์กลางของเอวคาน เมื่อแรงอัดรวมอยู่ห่างจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานมากขึ้นหรือระยะการเอียงศูนย์มีค่ามากขึ้น

ภาพที่ 102 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบน ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงอัดจากเอวคานถ่ายเข้าสู่ปีกคาน หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นจะสมมาตรกันตลอดแนวศูนย์กลางของปีกคาน โดยมีขนาดและความเข้มของหน่วยแรงปริสูงที่สุดเมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกันกับจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดคาน (ภาพที่ 102ก) ซึ่งขนาดและความเข้มของหน่วยแรงปรินี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อระยะการเอียงศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น

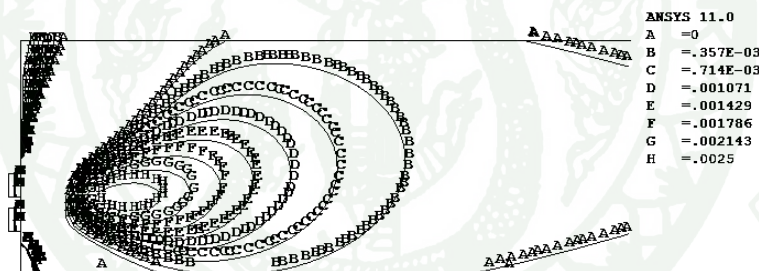
ภาพที่ 103 แสดงระดับของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านล่าง การกระจายของหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านล่างจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกันกับหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นบนปีกคานด้านบน กล่าวคือ ขนาดและความเข้มของหน่วยแรงปริมีค่าน้อยที่สุด เมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกันกับจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดคาน ซึ่งหน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงและขยายกว้างออกจากแนวศูนย์กลางของปีกคานเมื่อระยะการเอียงศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น



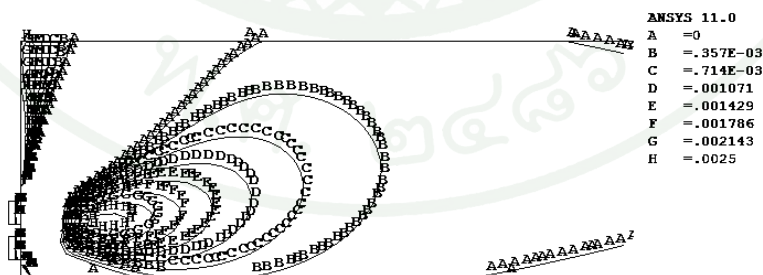
ก. $e/h_w = 0.00$



ข. $e/h_w = -0.10$

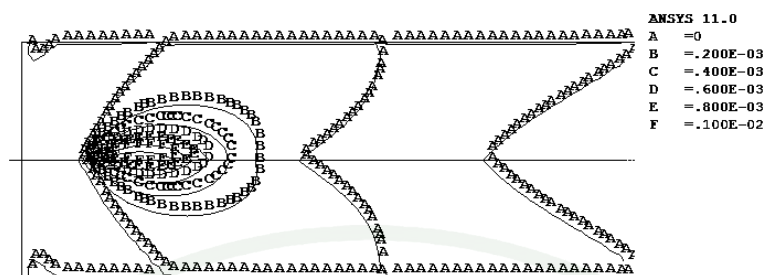


ค. $e/h_w = -0.20$

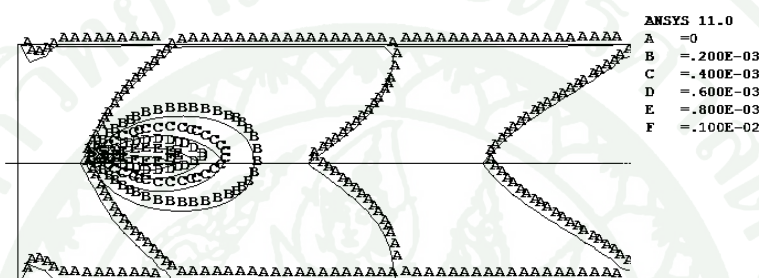


ง. $e/h_w = -0.30$

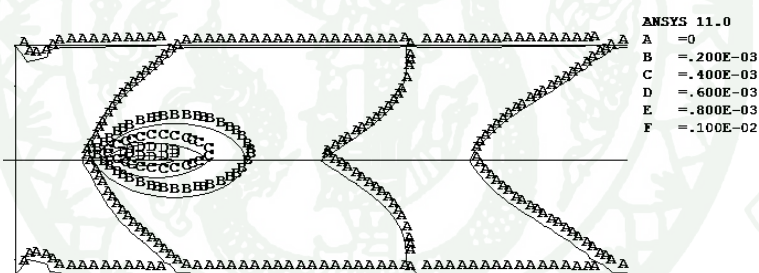
ภาพที่ 101 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์กลาง
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$



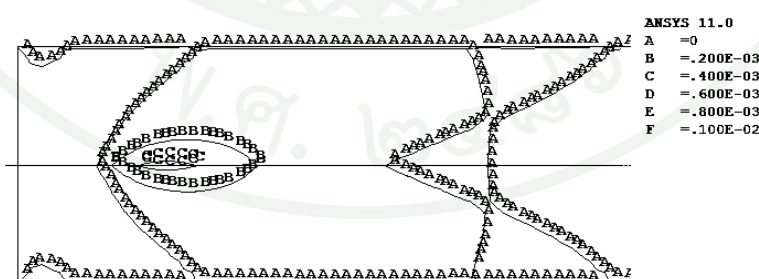
ก. $e/h_w = 0.00$



ข. $e/h_w = -0.10$

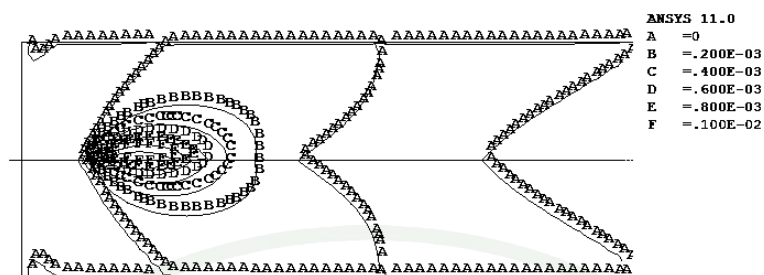


ค. $e/h_w = -0.20$

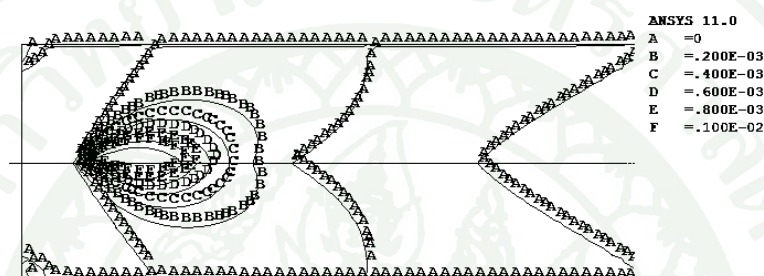


ง. $e/h_w = -0.30$

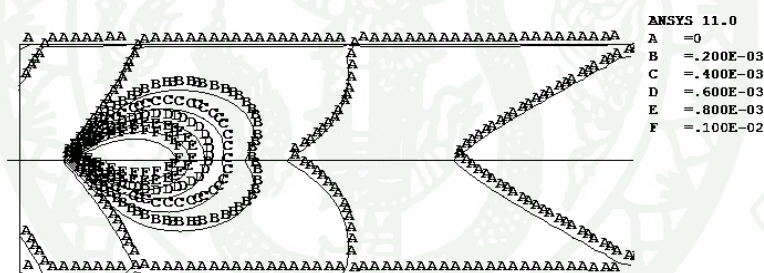
ภาพที่ 102 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณปีกคานด้านบน เนื่องจากการอัดแรงสองแรง
 แบบเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Gamma} = 16''$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$



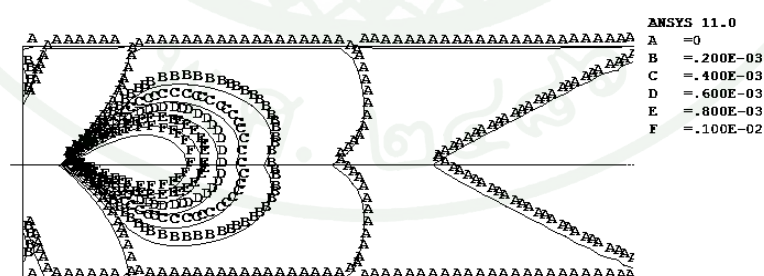
ก. $e/h_w = 0.00$



ข. $e/h_w = -0.10$



ค. $e/h_w = -0.20$



ง. $e/h_w = -0.30$

ภาพที่ 103 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณปีกคานด้านล่าง เนื่องจากการอัดแรงสองแรง
แบบเอียงศูนย์ เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$

ภาพที่ 104 แสดงระดับของหน่วยแรงปริในแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.55 พบว่า หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานของแบบจำลองที่มีการอัดแรงแบบตรงศูนย์ (ภาพที่ 104ก) จะแยกออกจากกันอย่างชัดเจนและสมมาตรกันตลอดแนวศูนย์กลางของเอวคาน ในขณะที่หน่วยแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานของแบบจำลองที่มีการอัดแรงเอียงศูนย์เท่ากับ $-0.10h_w$ (ภาพที่ 104ข) มีขนาดและความเข้มของหน่วยแรงปริสูงที่สุดเกิดจากแรงอัดบนสมอียึดตัวบน ซึ่งมีพื้นที่กระจายของหน่วยแรงกว้างที่สุดหรือมีระยะจากขอบของแผ่นเหล็กแบกทานถึงขอบของแบบจำลองมากที่สุด ซึ่งกล่าวได้ว่า ค่าระยะการเอียงศูนย์เป็นอีกตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียึด



ก. $e/h_w = 0.00$

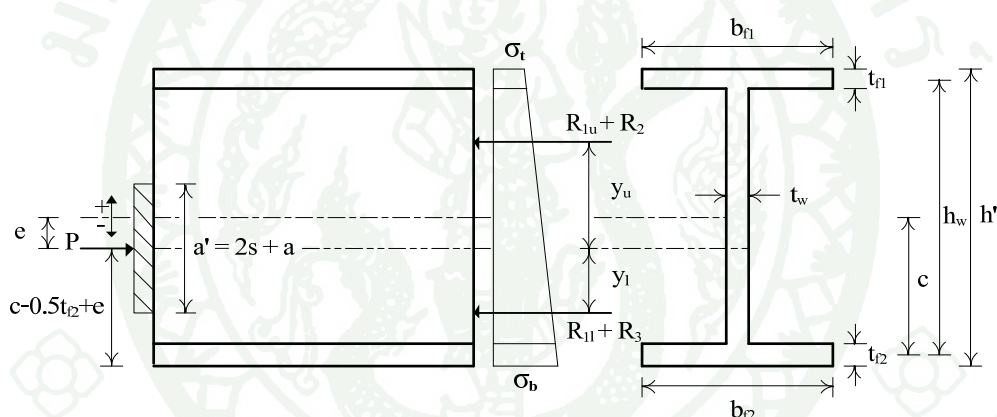


ข. $e/h_w = -0.10$

ภาพที่ 104 ระดับของหน่วยแรงภายในบริเวณเอวคาน เนื่องจากการอัดแรงสองแรงแบบเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{\Pi} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$

2.1.2 การเปรียบเทียบแรงปฏิกิริยาผลการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathane และ การสร้างแบบจำลอง STM

การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathane เมื่อบริเวณสมอชิดมีการอัดแรงสองแรงแบบเอียงศูนย์ และมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 สามารถกระทำได้โดยถือว่าบริเวณสมอชิดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบเอียงศูนย์ และใช้ขนาดรวมของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองในสมการดังแสดงในภาพที่ 105 โดยที่ระยะการเอียงศูนย์มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงอัดรวมกระทำที่ด้านบนของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน และมีค่าเป็นลบเมื่อแรงอัดรวมกระทำที่ด้านล่างของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน



ภาพที่ 105 วิธีการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathane เมื่อบริเวณสมอชิดมีการอัดแรงสองแรงแบบเอียงศูนย์

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของปริทีโอเวคานเลือกจากค่าน้อยที่สุดระหว่างผลการคำนวณจากสมการที่ 21 และ 22 สำหรับใช้คำนวณหาขนาดของแรงปริทีโอเวคานจากสมการที่ 12 และ 13

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1u} + R_2) \left(\frac{4y_u + 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right) \left(1 - \frac{a'}{4y_u + 4\rho} \right) \quad (12)$$

$$T_{\text{burst-web}} = (R_{1l} + R_3) \left(\frac{4y_l - 4\rho}{4D_{\text{burst-web}} - a'} \right) \left(1 - \frac{a'}{4y_l - 4\rho} \right) \quad (13)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - e) + \frac{a'}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{f1}/h_w)) \quad (21)$$

$$D_{\text{burst-web}} = (c + \frac{t_{f2}}{2} + e) + \frac{a'}{4} + \frac{h_w}{4} (1 - \exp(-0.8b_{f2}/h_w)) \quad (22)$$

ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านบนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 23 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านล่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18 และ 24 ตามลำดับ ในส่วนของค่า k_{f1} และ k_{f2} ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาพที่ 34

$$T_{\text{burst-flg1}} = 0.15k_{f1}^3 P, k_{f1} \leq 1.0 \quad (16)$$

$$D_{\text{burst-flg1}} = \frac{h_w - c - e}{4} + \frac{3t_{f1}}{8} + \frac{R_2}{T_{\text{burst-flg1}}} \left(\frac{b_{f1} + t_w}{8} \right) \quad (23)$$

$$T_{\text{burst-flg2}} = 0.15k_{f2}^3 P, k_{f2} \leq 1.0 \quad (18)$$

$$D_{\text{burst-flg2}} = \frac{c + e}{4} + \frac{3t_{f2}}{8} + \frac{R_3}{T_{\text{burst-flg2}}} \left(\frac{b_{f2} + t_w}{8} \right) \quad (24)$$

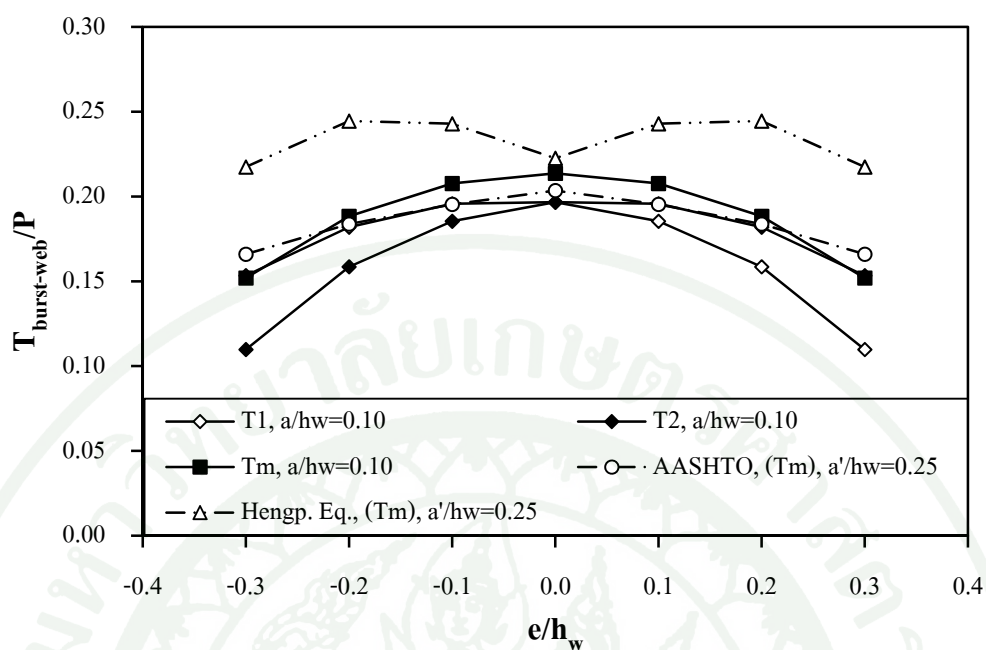
ภาพที่ 106 ถึง 113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีกับค่าระยะการเอียงศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20, $(2s \leq 2s')$ ซึ่งในกรณีนี้การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ของแรงปรีจากสมการของ AASHTO สามารถกระทำได้ โดยถือว่าบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตรดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 65ก

ภาพที่ 106 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์กลางของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 แรงปรีที่เอวคานที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกันกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน และมีค่าลดลงเมื่อแรงอัดรวมขยับออกจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกันกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปรีในภาพที่ 101 โดยแรงปรีที่เอวคานมีค่าน้อยสุดเมื่อแรงอัดรวมอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานมากที่สุดหรือมีระยะห่างจากขอบของแบบจำลองน้อยที่สุด และแรงปรีที่เอวคานจะมีค่าเท่ากันเมื่อระยะจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานถึงจุดศูนย์กลางของแรงอัดรวมมีค่าเท่ากันไม่ว่าแรงอัดรวมจะกระทำที่ด้านบนหรือด้านล่างของจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน

จากภาพที่ 106 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ส่วนใหญ่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathane ให้ค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อแรงอัดรวมกระทำในตำแหน่งตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคาน และมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อระยะการเอียงศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น

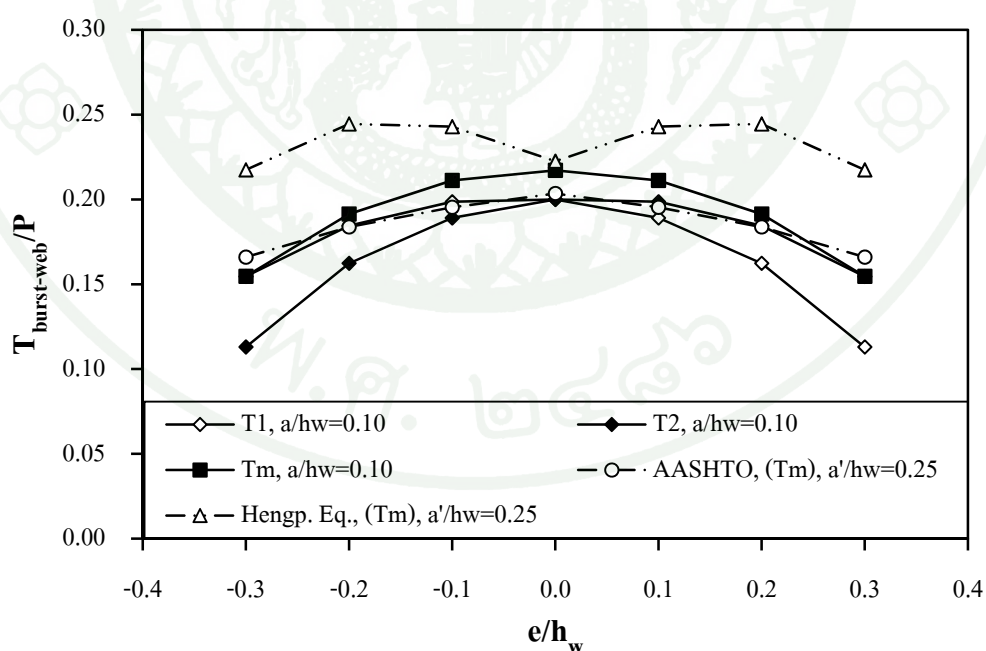
ภาพที่ 107 เป็นกรณีของแรงปรีที่เอวคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 56 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว (ภาพที่ 106)

ภาพที่ 108 และ 109 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์กลางของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.25 พบว่า แรงปรีที่เอวคานที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีแผ่นเหล็กเบกทานขนาดเล็กกว่า (ภาพที่ 106 และ 107) และผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์เช่นกัน สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathane ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10



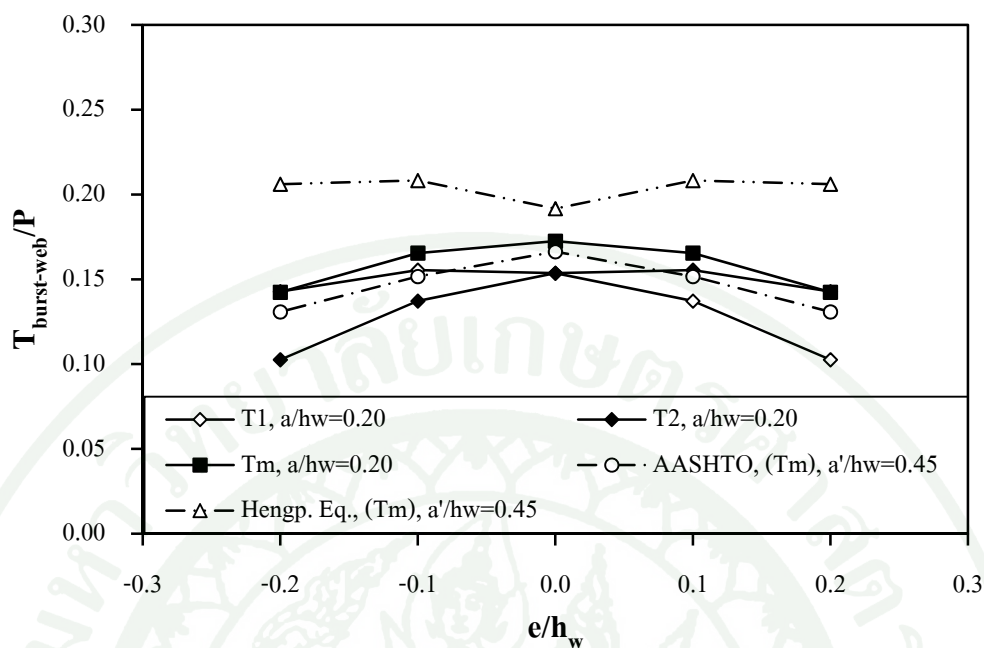
ภาพที่ 106 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



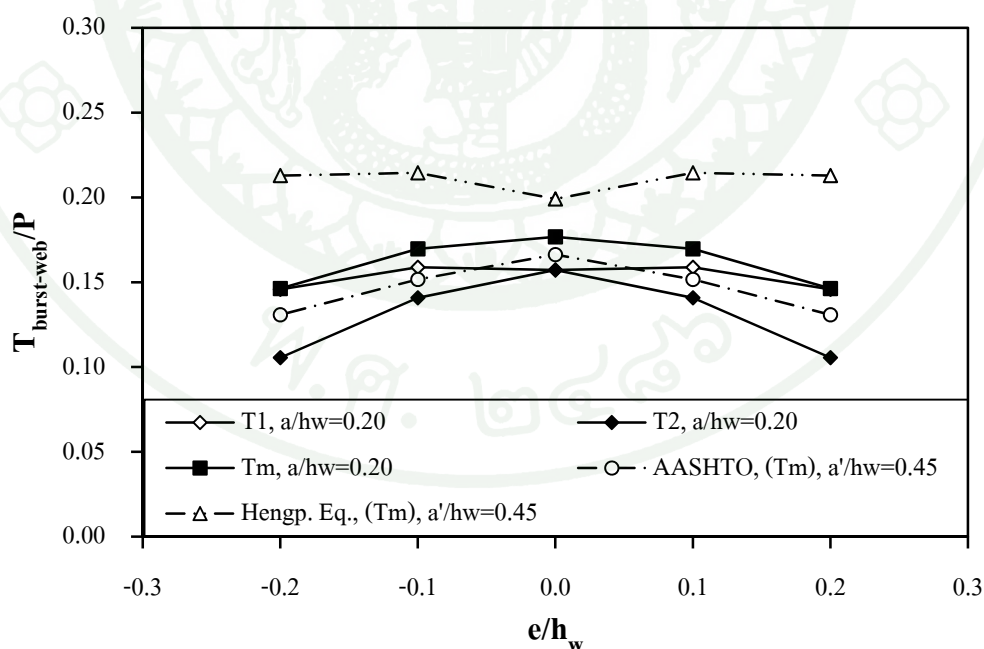
ภาพที่ 107 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 108 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_f = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$



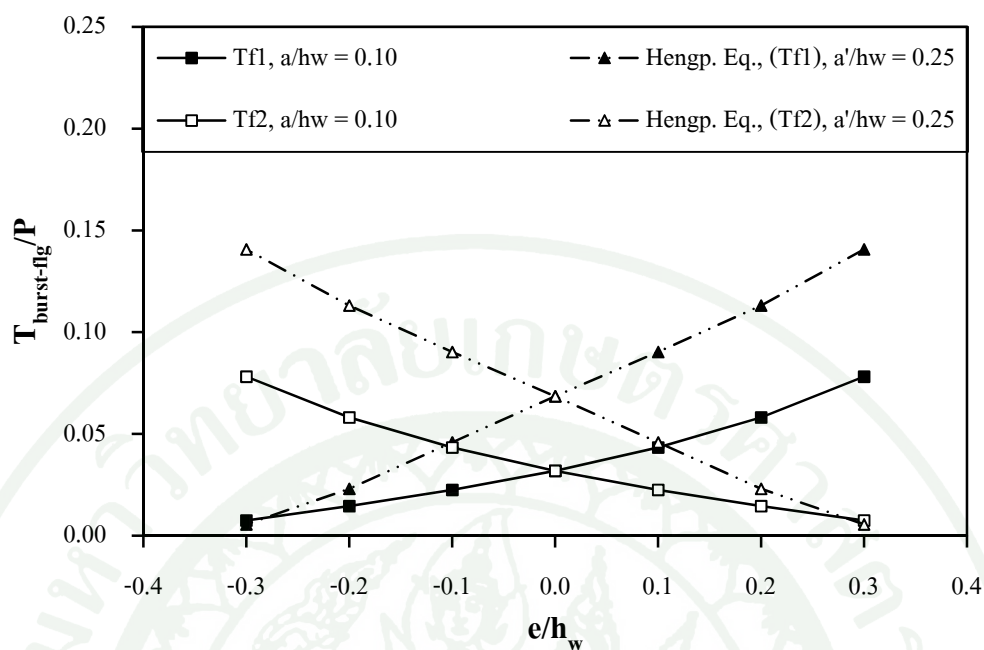
ภาพที่ 109 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_f = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$

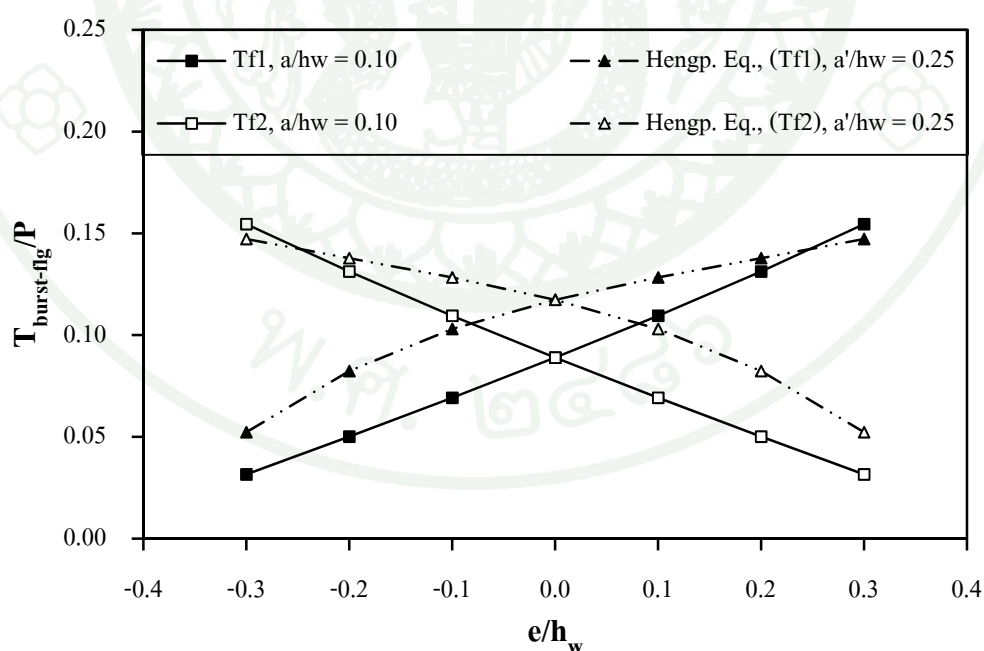
ภาพที่ 110 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเชื่อมต่อศูนย์กลางของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พบว่า พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคานจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแรงอัดรวม กล่าวคือ แรงปรีที่ปีกคานด้านบนมีค่าสูงที่สุดเมื่อแรงอัดรวมอยู่ใกล้กับปีกคานด้านบนคือ e/h_w เท่ากับ 0.30 และมีค่าน้อยลงเมื่อแรงอัดรวมขยับออกห่างจากปีกคานด้านบนมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน แรงปรีที่ปีกคานด้านล่างจะมีพฤติกรรมที่ตรงข้ามกันกับแรงปรีที่ปีกคานด้านบน แรงปรีที่ปีกคานจะมีขนาดเท่ากันเมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกับจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดคาน และผลการคำนวณที่ได้จากการของ Hengprathane ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทุกแบบจำลอง

ภาพที่ 111 เป็นกรณีของแรงปรีที่ปีกคานของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 56 นิ้ว เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 ผลการคำนวณที่ได้จากการของ Hengprathane ส่วนใหญ่ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ยกเว้นแบบจำลองที่มีค่า e/h_w เท่ากับ ± 0.30 ผลการคำนวณที่ได้จากการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์

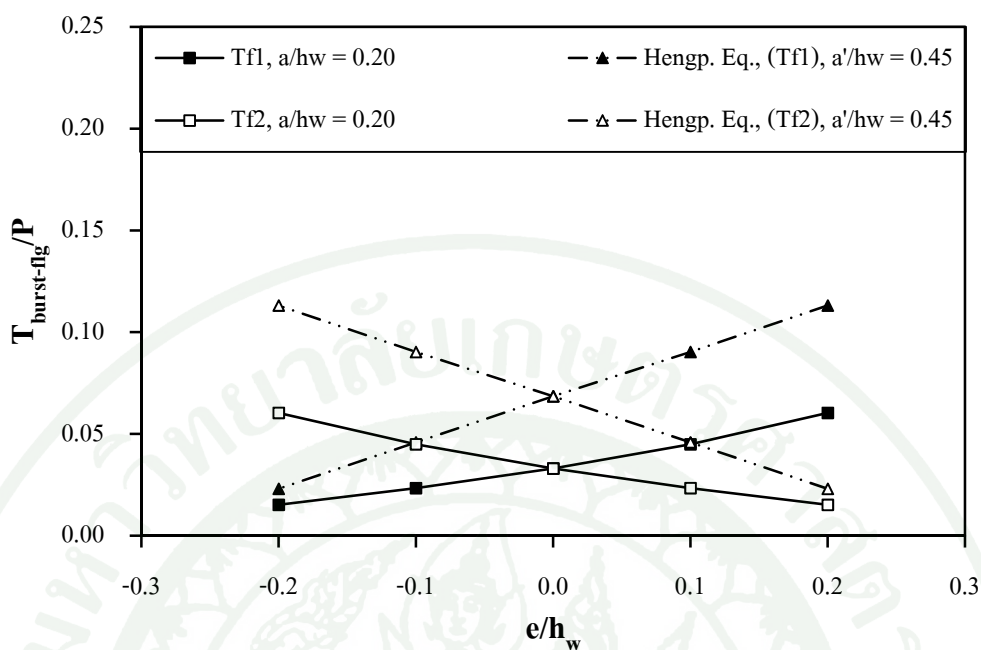
ภาพที่ 112 และ 113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเชื่อมต่อศูนย์กลางของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.25 พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นบนปีกคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10



ภาพที่ 110 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$

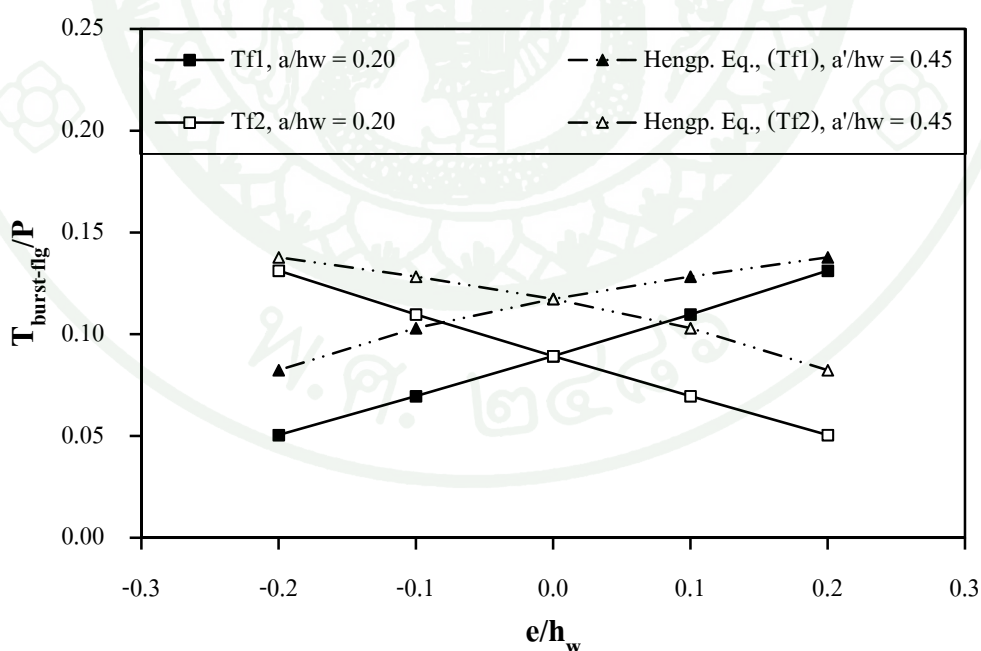


ภาพที่ 111 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 112 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$



ภาพที่ 113 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

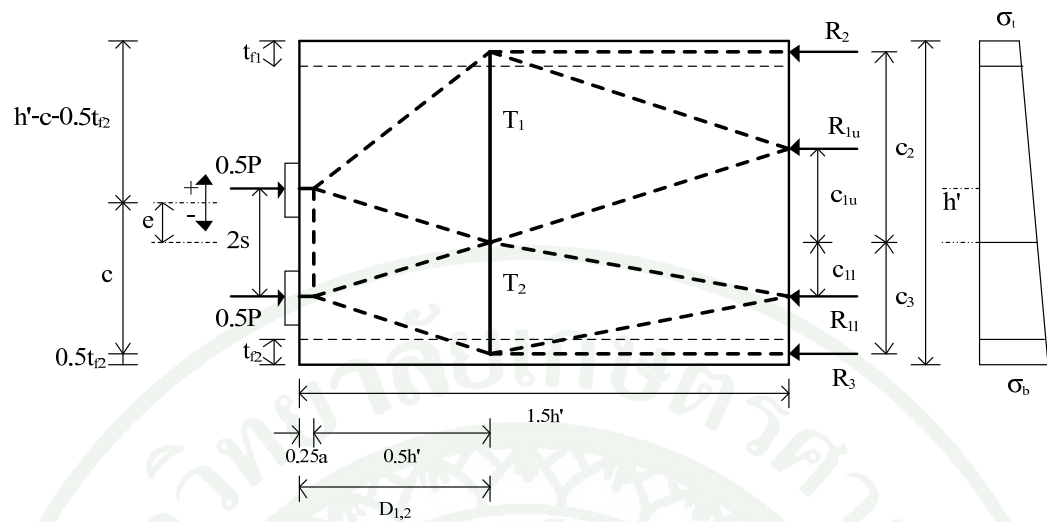
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$

เมื่อบริเวณสมอียึดมีการอัดแรงสองแรงแบบเยื้องศูนย์และมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20, ($2s > 2s'$) ในส่วนนี้จะนำเสนอเฉพาะแบบจำลองที่มีขนาดแผ่นเหล็กแบกทานเท่ากับ $0.10h_w$ และมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ $0.55h_w$ เท่านั้น โดยเลือกใช้ค่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดย่อยแต่ละแรงซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงปริที่เอวคานบนแนวแรงอัดหลัก เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอียึดกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตรย่อยดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 65ข และผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 114

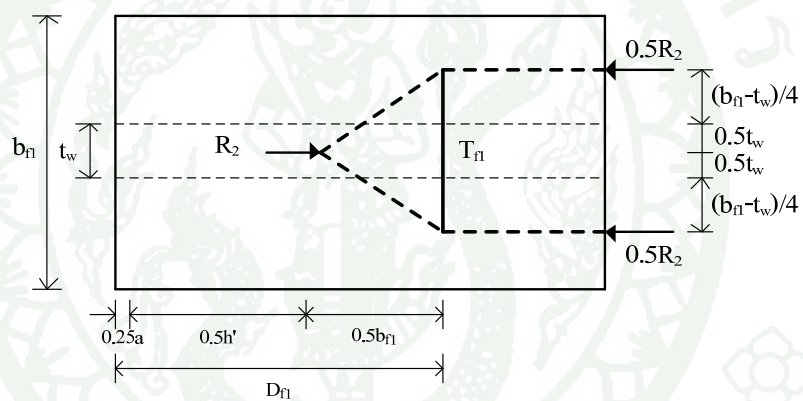
ภาพที่ 115 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว พบว่า แรงปริที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดจากแรงอัดบนสมอียึดที่มีพื้นที่กระจายของหน่วยแรงกว้างที่สุดหรือมีระยะจากขอบของแผ่นเหล็กแบกทานถึงขอบของแบบจำลองมากที่สุด และมีขนาดเท่ากันเมื่อแรงอัดรวมกระทำอยู่ในตำแหน่งตรงกับจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของหน่วยแรงปริในภาพที่ 104 ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ส่วนใหญ่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์

ภาพที่ 116 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 56 นิ้ว พฤติกรรมของแรงปริที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 นิ้ว (ภาพที่ 115)

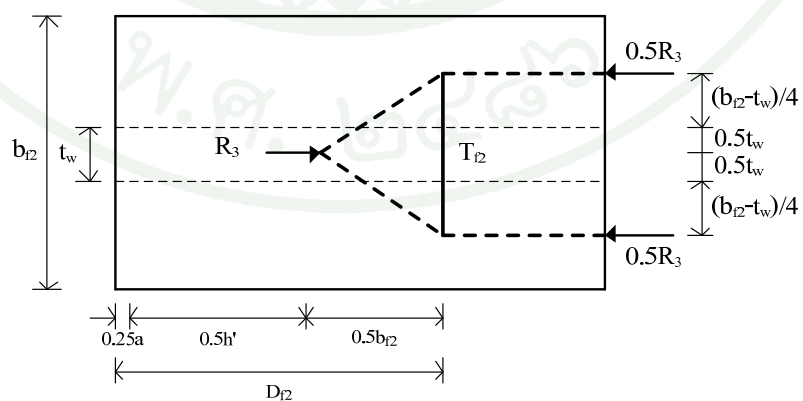
ภาพที่ 117 และ 118 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปริที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ พบว่า แรงปริที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีของแรงปริที่เอวคาน



ก) บริเวณเอวคาน

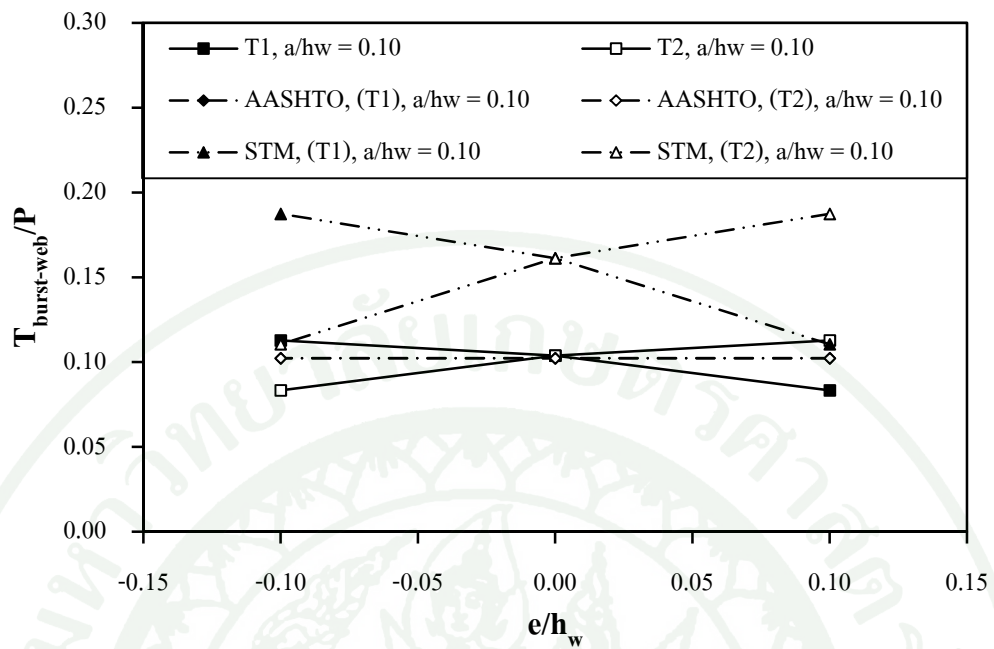


ข) บริเวณปีกคานด้านบน



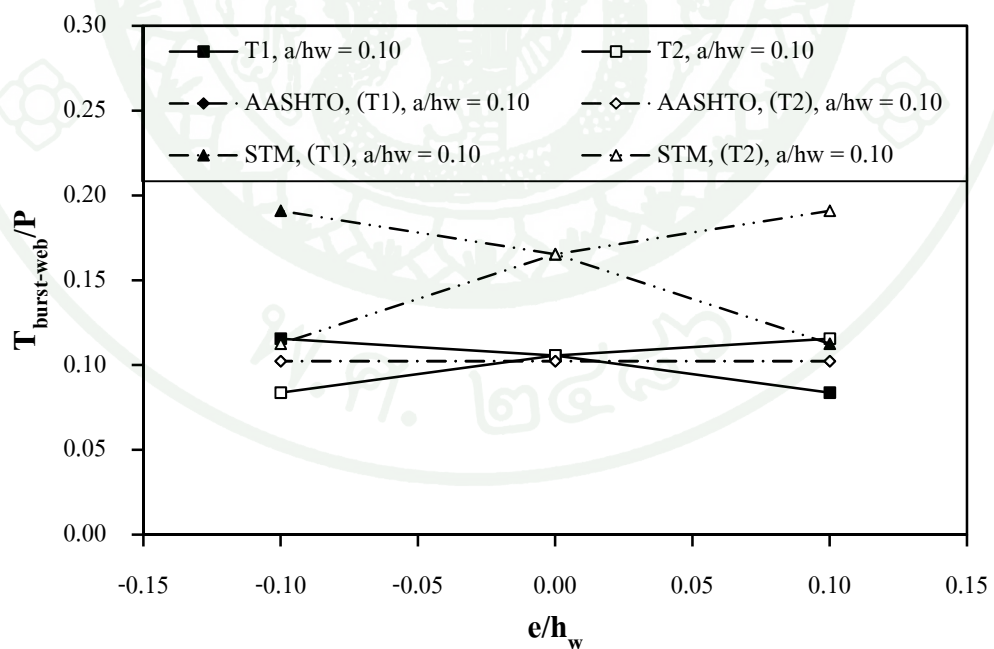
ค) บริเวณปีกคานด้านล่าง

ภาพที่ 114 แสดงแบบจำลอง STM ของบริเวณสมอียคที่มีการอัดแรงสองแรงแบบเอียงศูนย์



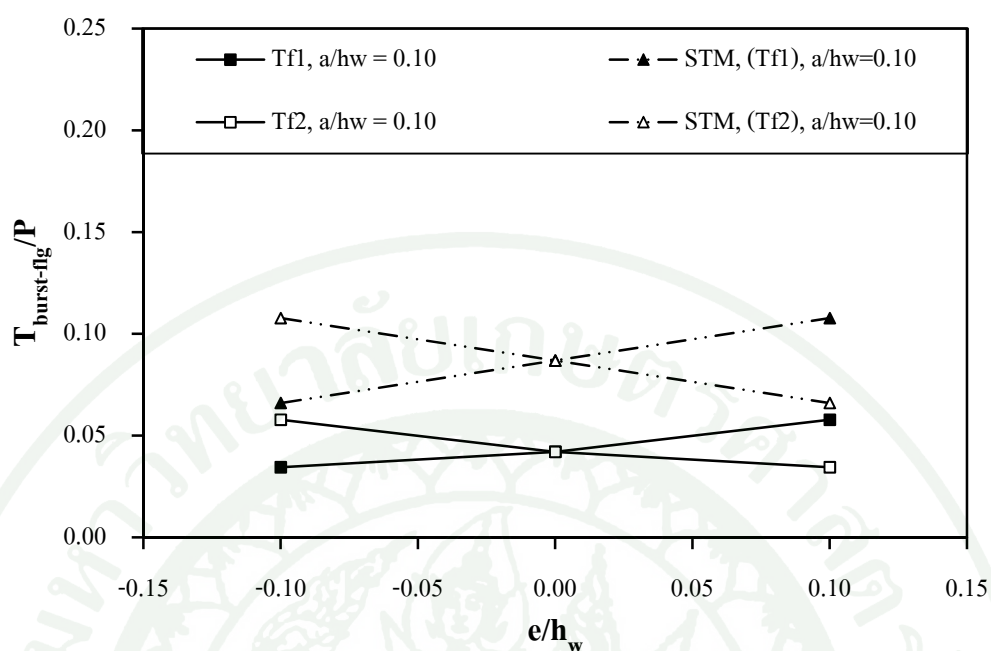
ภาพที่ 115 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$

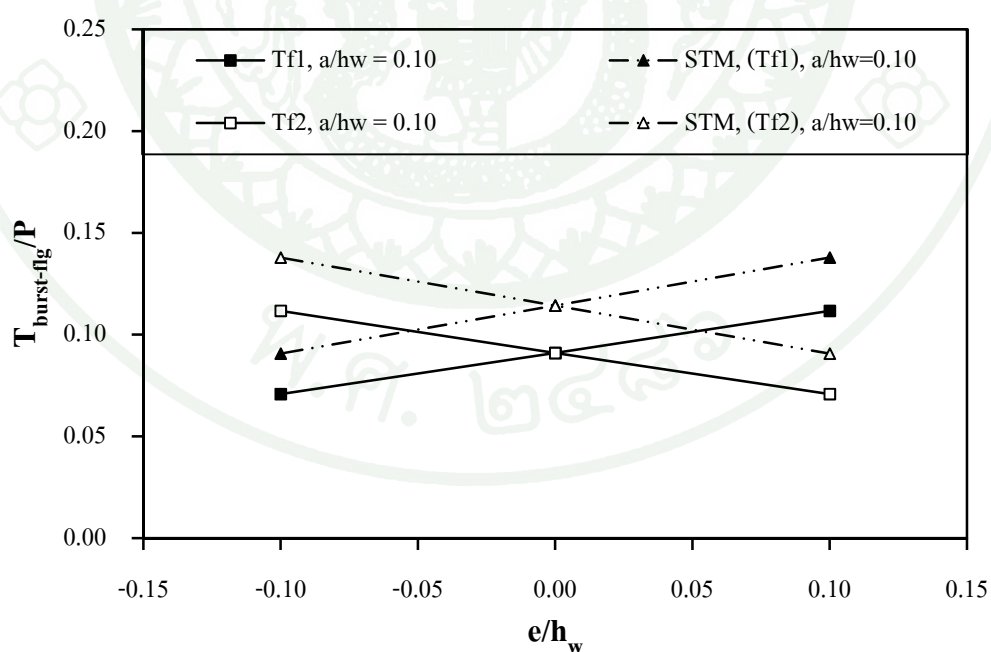


ภาพที่ 116 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์

เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 117 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$

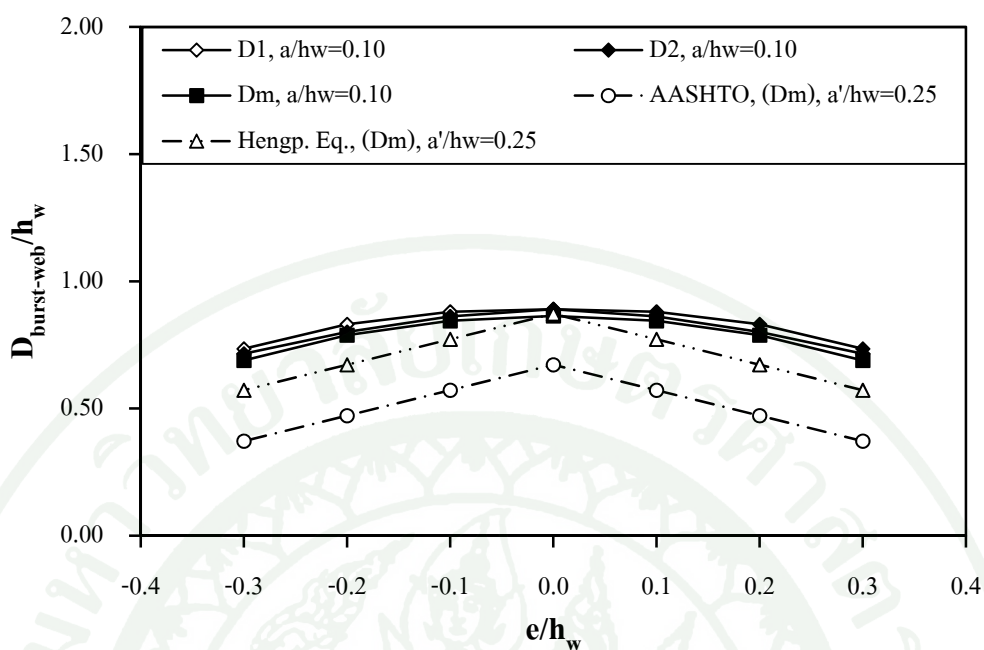


ภาพที่ 118 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงปรีที่ปักคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$

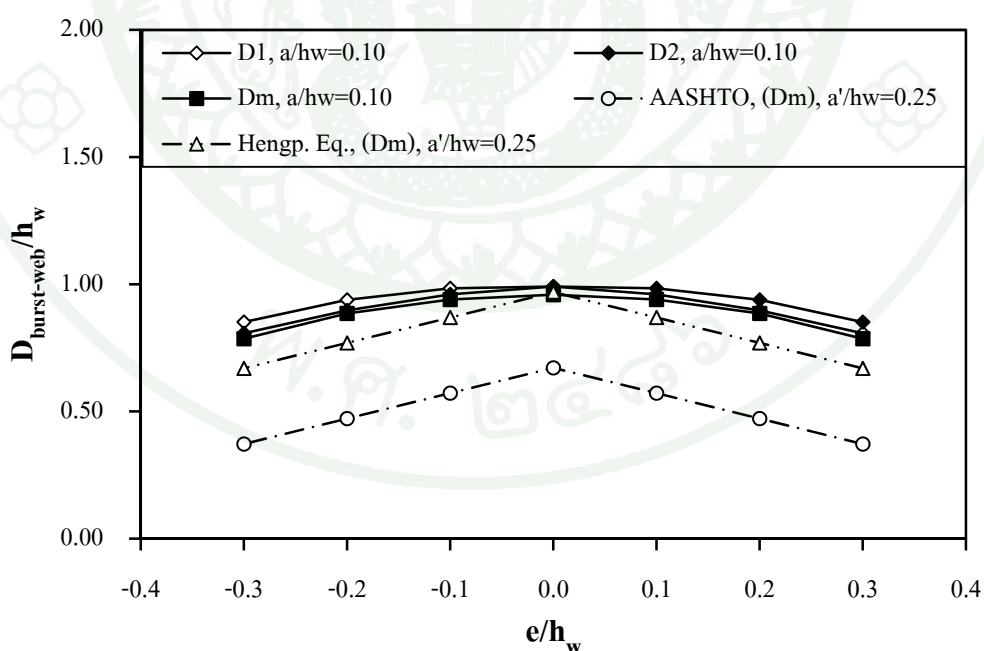
2.1.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาผลการวิเคราะห์กับผลการคำนวณจากสมการของ AASHTO, Hengprathanee และการสร้างแบบจำลอง STM

ภาพที่ 119 และ 120 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกับจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน และมีค่าลดลงเมื่อแรงอัดรวมขยับออกห่างจากจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคานมากขึ้น โดยผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาก ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathanee ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์มากที่สุด

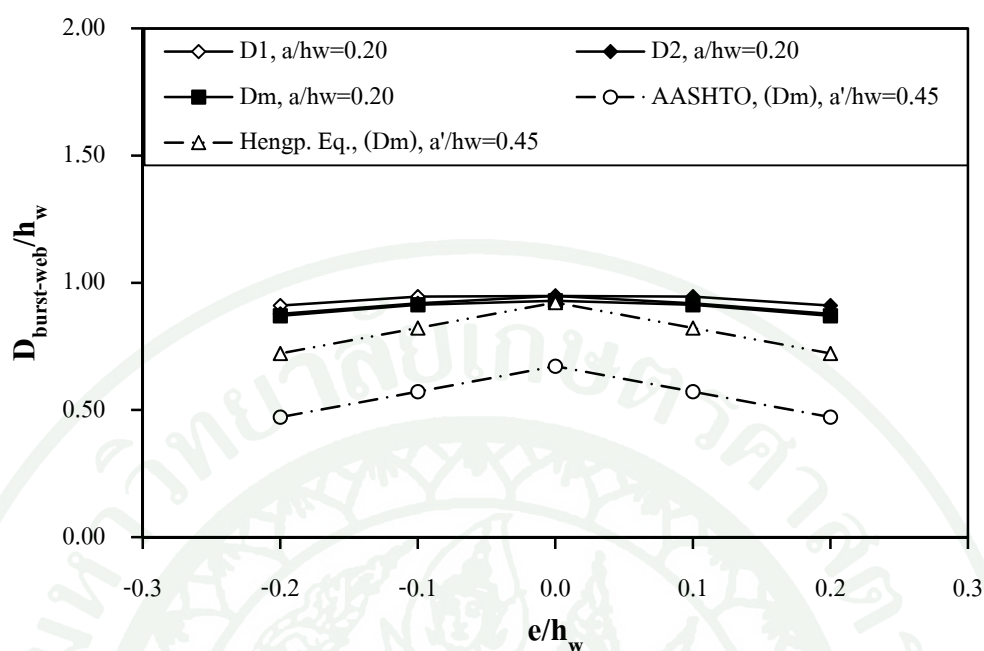
ภาพที่ 121 และ 122 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.25 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในบริเวณเอวคานมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 (ภาพที่ 119 และ 120)



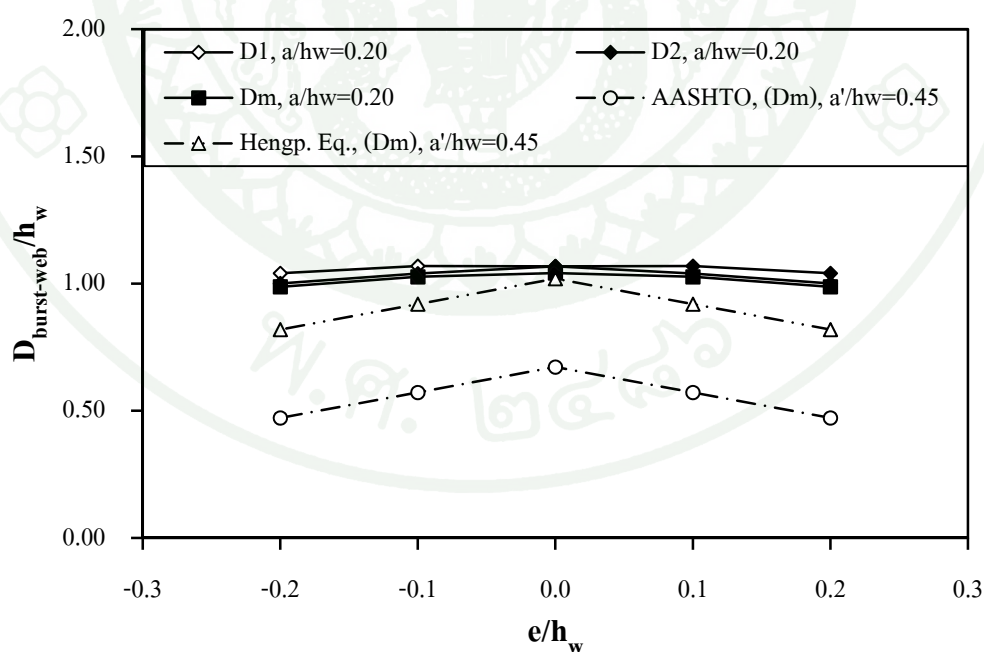
ภาพที่ 119 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_f = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 120 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_f = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 121 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$



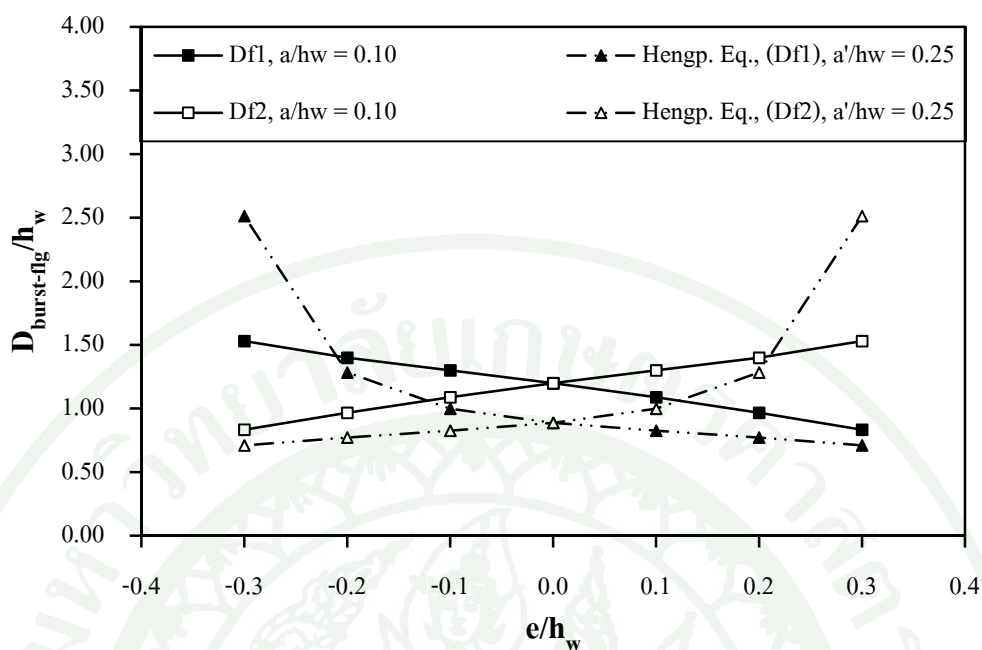
ภาพที่ 122 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$

ภาพที่ 123 และ 124 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ของแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.15 พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแรงอัดรวม กล่าวคือ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านบนมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานด้านล่างมีค่าลดลง เมื่อแรงอัดรวมขยับออกห่างจากปีกคานด้านบนมากขึ้น และจะมีขนาดเท่ากันเมื่อแรงอัดรวมอยู่ในตำแหน่งตรงกับจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดคาน ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ Hengprathanee ส่วนใหญ่ให้ค่าที่น้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์

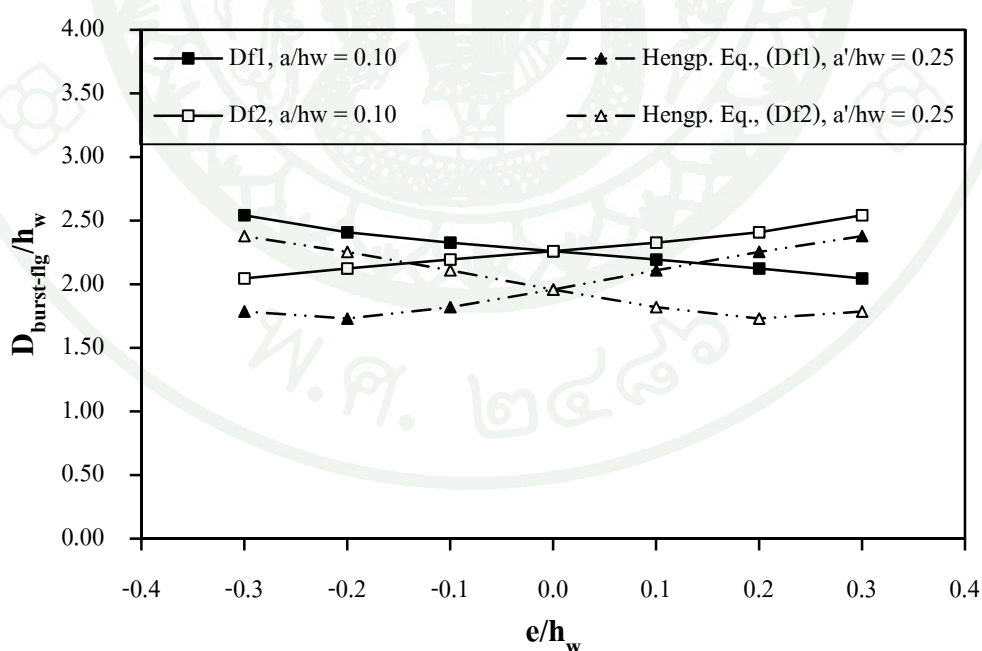
ภาพที่ 125 และ 126 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ของแบบจำลองที่มีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ เมื่อขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.20 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.25 พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากสมการของ Hengprathanee ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทุกแบบจำลอง

จากกรณีที่บริเวณสมอยึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกัน ไม่เกินค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีจากสมการของ AASHTO โดยถือว่าบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตร และใช้ขนาดรวมของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสองในสมการนั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาก ซึ่งคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ได้จากผลการวิเคราะห์อย่างเห็นได้ชัด

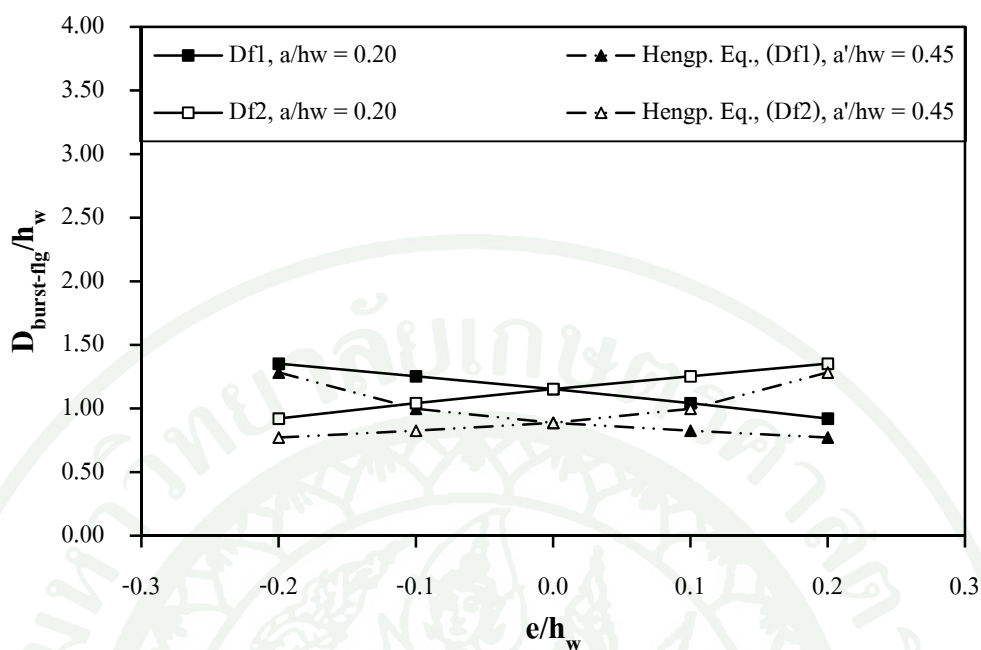
การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีจากการประยุกต์ใช้สมการของ Hengprathanee โดยถือว่าบริเวณสมอยึดมีการอัดแรงเพียงแรงเดียวแบบเอียงศูนย์นั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึด อย่างไรก็ตาม การจัดเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีควรกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรี และให้จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์ของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการตามคำแนะนำของ Hengprathanee เพื่อให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรีทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคาน



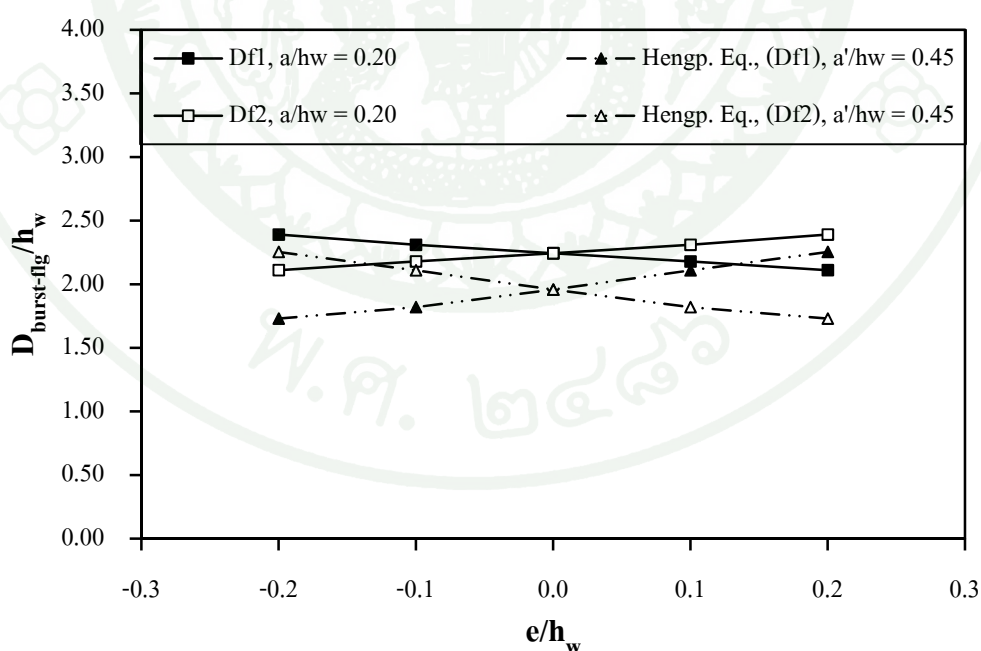
ภาพที่ 123 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 124 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.15$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 125 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$



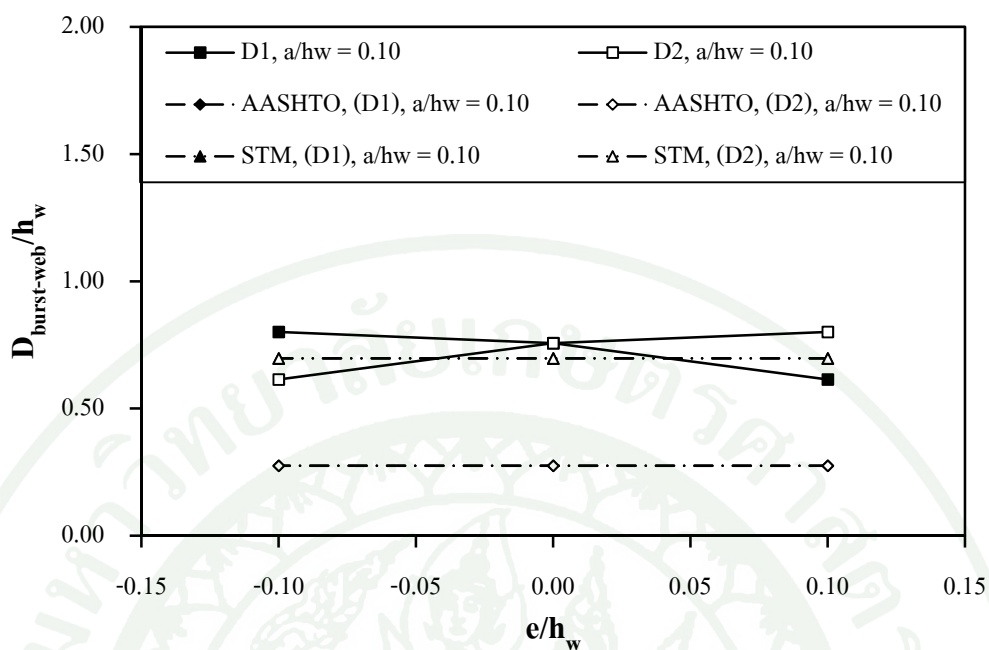
ภาพที่ 126 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปฏิกิริยาที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.20$, $2s/h_w = 0.25$, $2s'/h_w = 0.575$

ภาพที่ 127 และ 128 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ เมื่อแบบจำลองมีความกว้างของปีกคาน 16 และ 56 นิ้ว ตามลำดับ โดยมีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และมีค่า $2s/h_w$ เท่ากับ 0.55 ซึ่งเป็นกรณีที่แรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกันกับกรณีของแรงปรีที่เอวคาน (ภาพที่ 115 และ 116) โดยตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่เอวคานมีค่าสูงที่สุดเกิดขึ้นบนแนวแรงอัดที่มีค่าแรงปรีที่เอวคานสูงที่สุด หรือมีระยะจากขอบของแผ่นเหล็กแบกทานถึงขอบของแบบจำลองมากที่สุด นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของ AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์มากที่สุด

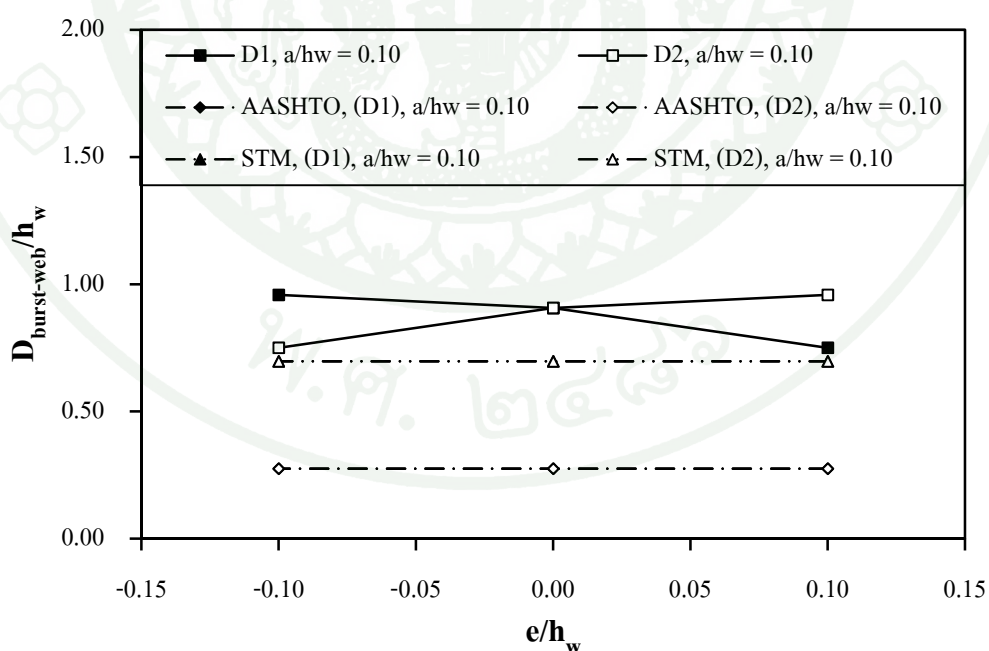
ภาพที่ 129 และ 130 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเยื้องศูนย์ของแบบจำลองเช่นกันกับภาพที่ 127 และ 128 ตามลำดับ พบว่า ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM ให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทุกแบบจำลอง

จากกรณีที่บริเวณสมอยึดมีแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่าค่าระยะที่คำนวณได้จากสมการที่ 20 การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีจากสมการของ AASHTO โดยพิจารณาให้แรงอัดบนสมอยึดกระทำแบบตรงศูนย์ต่อปริซึมสมมาตรย่อนั้น ผลการคำนวณที่ได้จากสมการให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาก

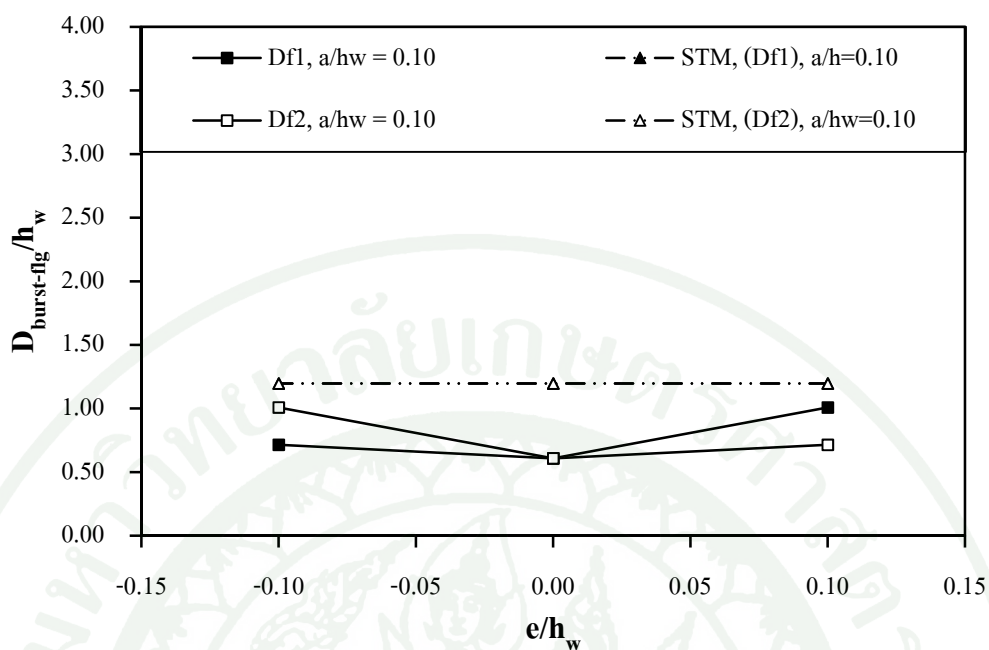
การประมาณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง STM ดังแสดงในภาพที่ 114 ถือเป็นอีกทางเลือกสำหรับการออกแบบเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีที่เกิดขึ้นในบริเวณสมอยึด ซึ่งแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลองให้ค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ส่วนค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ให้ค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น หากมีการกระจายเหล็กเสริมด้านทานแรงปรีออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรี และให้จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง STM การเสริมเหล็กด้วยวิธีนี้ก็จะทำให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรี และป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากแรงปรีที่เกิดขึ้นทั้งในส่วนของเอวคานและปีกคานได้เช่นกัน



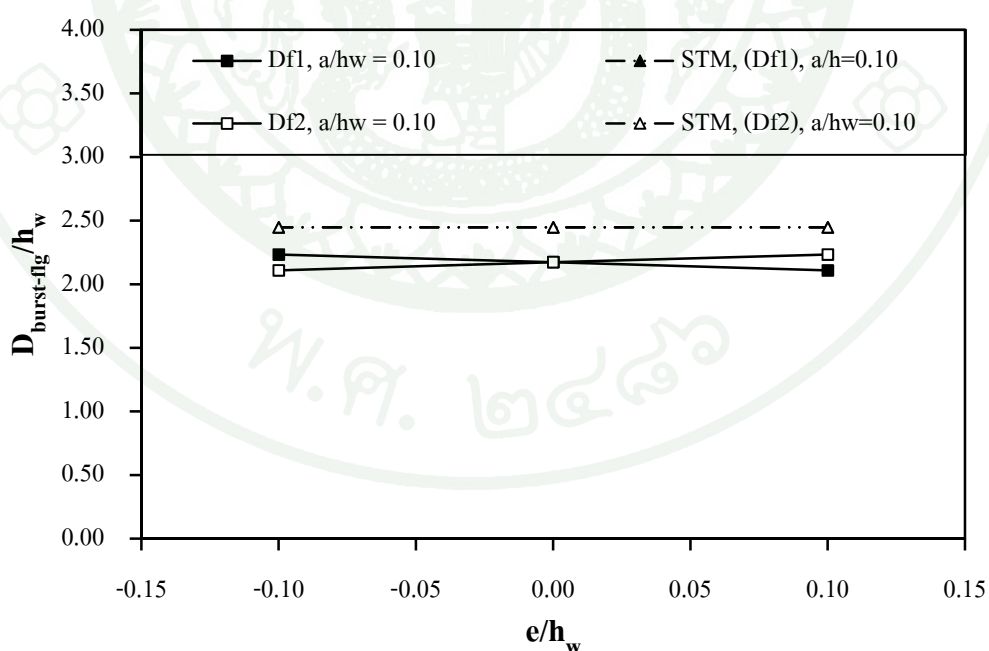
ภาพที่ 127 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีเอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_f = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 128 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปริทีเอวคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์ เมื่อ $b_f = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 129 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 16"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$



ภาพที่ 130 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงปรีที่ปีกคานกับค่าระยะการเอียงศูนย์
เมื่อ $b_{fl} = 56"$, $a/h_w = 0.10$, $2s/h_w = 0.55$, $2s'/h_w = 0.50$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียัดคานหน้าตัดปีกภายใต้การอัดแรงแบบหลายแรงจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแรงอัดทั้งสอง ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ 1) เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{f2}/b_{f1}) - 1]$ หน่วยแรงปรีที่เอดคานเกิดขึ้นจากอิทธิพลของแรงอัดทั้งสองโดยมีจุดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณเดียว และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กระจายของหน่วยแรงจากสมอียัดทั้งสอง 2) เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{f2}/b_{f1}) - 1]$ หน่วยแรงปรีที่เอดคานเกิดขึ้นโดยมีจุดสูงสุดแยกเป็นสองบริเวณตามตำแหน่งของแรงอัด โดยความกว้างของปีกคานมีอิทธิพลต่อขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีซึ่งสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. คานหน้าตัดปีกภายใต้การอัดแรงแบบตรงศูนย์

1.1 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันไม่เกิน $0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{f2}/b_{f1}) - 1]$ แรงปรีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากสมการของ Hengprathanee เมื่อแทนที่ขนาดแผ่นเหล็กแบกทานด้วยความกว้างของแผ่นเหล็กแบกทานทั้งสอง ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณของสมการจาก AASHTO ให้ค่าที่น้อยกว่าแรงปรีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาก

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ได้จากการคำนวณของสมการจาก AASHTO ให้ค่าที่น้อยกว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เช่นเดียวกับกรณีของแรงปรี ส่วนตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ได้จากสมการของ Hengprathanee ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มากที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่ให้ค่าที่น้อยกว่าผลการวิเคราะห์ แต่การจัดเหล็กเสริมโดยการกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรี และให้จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่คำนวณได้จากสมการทั้งในบริเวณเอดคานและบริเวณปีกคานตามคำแนะนำของ Hengprathanee ก็จะทำให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรีได้เช่นกัน

1.2 เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันมากกว่า $0.425h_w + 0.75a + 0.30h_w[(b_{t2}/b_{t1}) - 1]$ แรงปรีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง STM ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณของสมการจาก AASHTO ให้ค่าน้อยกว่าแรงปรีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เช่นกัน

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ได้จากการคำนวณของสมการจาก AASHTO ให้ค่าที่น้อยกว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาก ส่วนผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง STM ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุด แต่เพื่อให้เหล็กเสริมครอบคลุมบริเวณที่เกิดแรงปรีควรกระจายเหล็กเสริมออกไปเป็นระยะเท่ากับสองเท่าของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรี โดยให้จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ได้จากแบบจำลอง STM ทั้งในบริเวณเอวคานและบริเวณปีกคาน

2. คานหน้าตัดปีกภายใต้การอัดแรงแบบเยื้องศูนย์

เนื่องจากการศึกษานี้เลือกแบบจำลองที่มีขนาดของ a/h_w เท่ากับ 0.10 และ 0.20 มาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีการอัดแรงแบบเยื้องศูนย์นี้เท่านั้น ผลการศึกษาจึงยังไม่ครอบคลุมในทุกกรณี พฤติกรรมของแรงปรีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณสมอียัดจะขึ้นอยู่กับระยะการเยื้องศูนย์ ซึ่งเมื่อหน่วยแรงปรีที่เอวคานเกิดขึ้นจากอิทธิพลของแรงอัดทั้งสอง หน่วยแรงปรีที่เอวคานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กระจายของหน่วยแรงจากสมอียัดทั้งสองหรือระยะการเยื้องศูนย์ และเมื่อหน่วยแรงปรีที่เอวคานเกิดขึ้นจากแรงอัดแต่ละแรงอยู่ห่างกัน หน่วยแรงปรีสูงสุดจะเกิดขึ้นภายใต้แรงอัดชุดที่มีพื้นที่การกระจายของหน่วยแรงที่มากกว่า

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาพฤติกรรมของบริเวณสมอียัดคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกภายใต้การอัดแรงสองแรง เห็นได้ว่า สมการของ AASHTO ซึ่งได้จากผลการศึกษาบริเวณสมอียัดคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ผลการคำนวณแตกต่างกับผลที่ได้จากการศึกษาในปัจจุบัน ในส่วนของผลที่ได้จากสมการของ Hengprathane และแบบจำลอง STM จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการศึกษานี้มากกว่า ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตมีดังนี้

1. ทำการศึกษากฎที่บริเวณสมอียัดคานหน้าตัดปีกมีการอัดแรงสองแบบเยื้องศูนย์เพิ่มเติม เพื่อศึกษาอิทธิพลจากระยะการเยื้องศูนย์ต่อค่าระยะห่างระหว่างแรงอัดที่เป็นจุดแบ่งการแยกตัวของแรงปรีที่เอวคาน และปรับปรุงวิธีการออกแบบเหล็กเสริมให้ครอบคลุมผลการศึกษาในส่วนของรูปแบบการอัดแรงแบบเยื้องศูนย์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนรูปแบบการอัดแรงแบบอื่นๆ อาทิ การอัดแรงแบบเอียง การอัดแรงแบบโค้ง และอิทธิพลจากแรงปฏิกิริยาของฐานรองรับ
2. ควรมีการทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ตลอดจนการตรวจสอบสมการที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีด้วยวิธีต่างๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2537. **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง.**

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

เขมวิษณุ วรรณศิริ. 2553. พฤติกรรมบริเวณสมอยึดในคานคอนกรีตอัดแรงภายใต้แรงอัดแบบหลายแรงและแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทรงวุฒิ เสงพระธานี. 2550. การศึกษาพฤติกรรมของบริเวณสมอยึดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์. วิศวกรรมสาร มก. 60: 26-33.

สุรินทร์ ทรัพย์ศิริ และ ทรงวุฒิ เสงพระธานี. 2552. พฤติกรรมบริเวณสมอยึดของคานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดปีกภายใต้แรงอัดแบบหลายแรง, น. 2105-2110. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1998.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 2nd ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C., U.S.A.

_____. 2002. **AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges.** American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C., U.S.A.

_____. 2007. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.** 4th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C., U.S.A.

American Concrete Institute. 2008. **Building Code Requirements for Structural Concrete.**

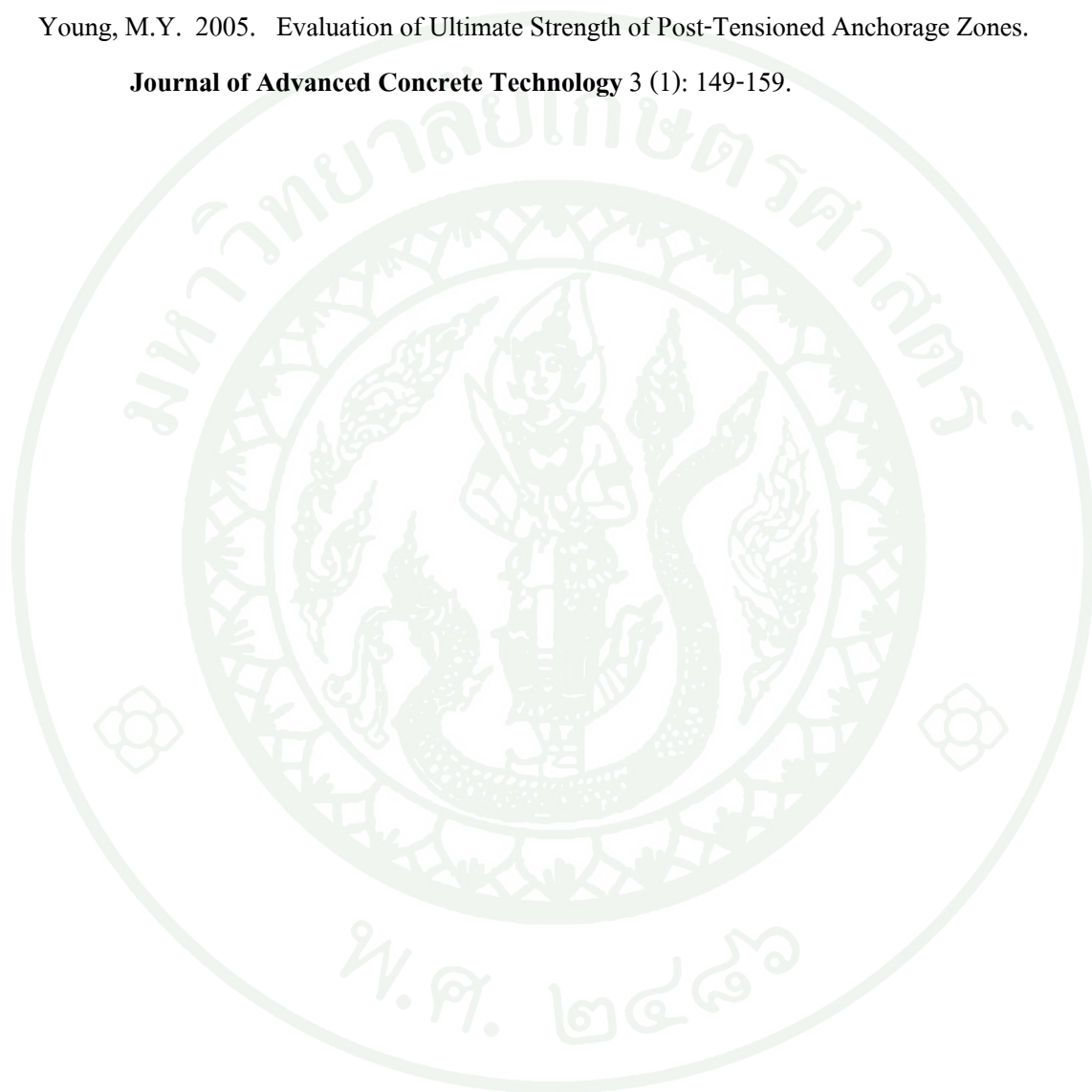
(ACI 318-08) and Commentary. Farmington Hills, Michigan, U.S.A.

- Breen, J.E., O. Burdet, C. Roberts, D. Sanders and G. Wollmann. 1994. **Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girders**. NCHRP Report 356, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Burdet, O.A. 1990. **Analysis and Design of Post-Tensioned Anchorage Zones Concrete Bridges**. Dissertation, University of Texas at Austin, Texas.
- Collins, M.P. and D. Mitchell. 1990. **Prestressed Concrete Structures**. Prentice Hall, New Jersey.
- Falconer, B.A. 1990. **Post-Tensioning Anchorage Zones in Bridge Decks**. M.S. Thesis, University of Texas at Austin, Texas.
- Gupta, P.K. and R.N. Khapre. 2008. A Study on Development of Stresses in Anchorage Zone using Parallel Processing. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)** 9 (1): 47-59.
- Guyon, Y. 1953. **Prestressed Concrete**. Parsons, London.
- Haroon, S., N. Yazdani and K. Tawfiq. 2006. Posttensioned Anchorage Zone Enhancement with Fiber-Reinforced Concrete. **ASCE Journal of Bridge Engineering** 11 (5): 566-572.
- Hengprathanee, S. 2004. **Linear and Nonlinear Finite Element Analyses of Anchorage Zones in Post-Tensioned Concrete Structures**. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Karl-Heinz, R. 2002. **Example for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie-Models**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

- Raju, N.K. 2008. **Prestressed Concrete**. 4th ed. Tata McGraw-Hill Ltd., New Delhi.
- Rajagopalan, N. 2002. **Prestressed Concrete**. Alpha Science International Ltd., Pangbourne, England.
- Rombach, G.A. 2011. **Finite-Element Design of Concrete Structures Practical Problems and Their Solutions**. 2nd ed. ICE Publishing.
- Robert, C.L. 1990. **Behavior and Design of the Local Anchorage Zone in Post-Tensioned Concrete**. M.S. Thesis, University of Texas at Austin, Texas.
- Sanders, D.H. 1990. **Design and Behavior of Anchorage Zones in Post-Tensioned Concrete Members**. Dissertation, University of Texas at Austin, Texas.
- Schlaich, J., K. Schafer and M. Jennewein. 1987. Toward a Consistent Design of Reinforced and Prestressed Concrete Structures. **PCI Journal** 32 (3):74-151.
- VSL International Ltd. 1996. **Detailing for Post-Tensioning**. Bern, Switzerland.
- Wollmann, G.P. 1992. **Anchorage Zones in Post-Tensioned Concrete Structures**. Dissertation, University of Texas at Austin, Texas.
- Wollmann, G.P. and C.L. Robert-Wollmann. 2000. **Chapter VIII Anchorage Zone Design**. Post-Tensioning Manual 6th ed. Post-Tensioning Institute.
- _____, J.E. Breen and M.E. Kreger. 2000. Anchorage of External Tendons in Association of Diaphragms. **ASCE Journal of Bridge Engineering** 5 (3): 208-215.

Won-Ho, K., Y. Young-Min, O. Seung-Hyun and L. Sang-Woo. 2006. A Mechanical Model of the End Anchorage Zone of Prestressed Concrete Members. **International Journal of Concrete Structures and Materials** 18 (1): 35-41.

Young, M.Y. 2005. Evaluation of Ultimate Strength of Post-Tensioned Anchorage Zones. **Journal of Advanced Concrete Technology** 3 (1): 149-159.

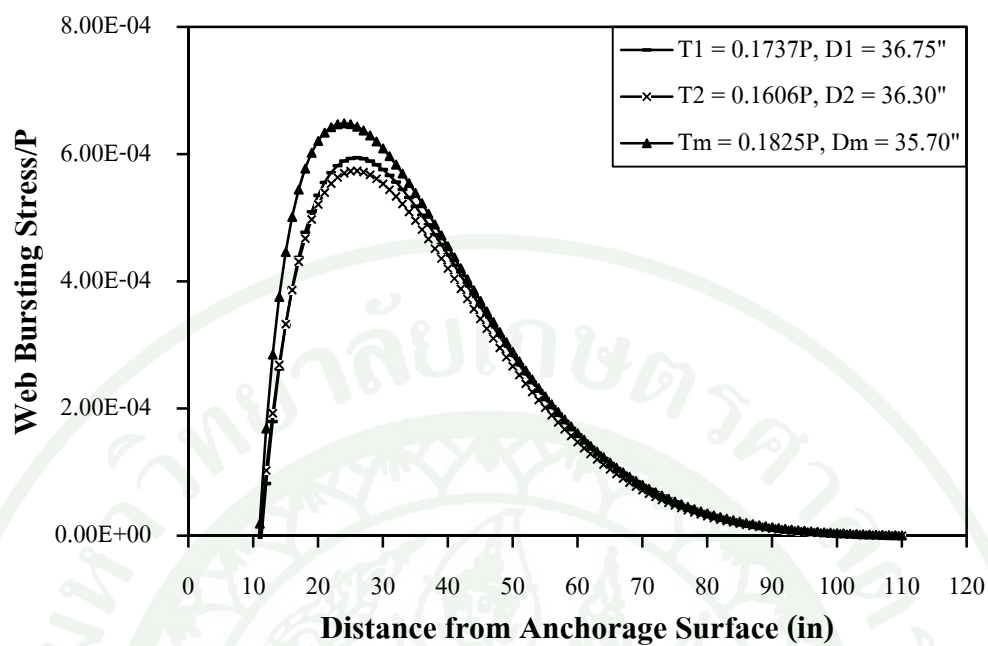




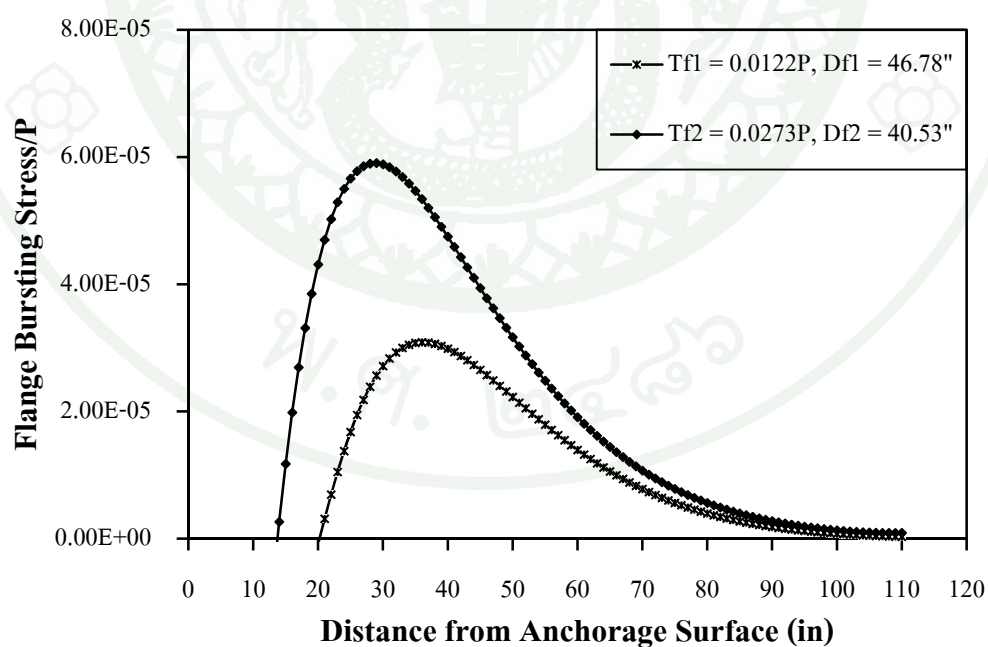


ภาคผนวก ก

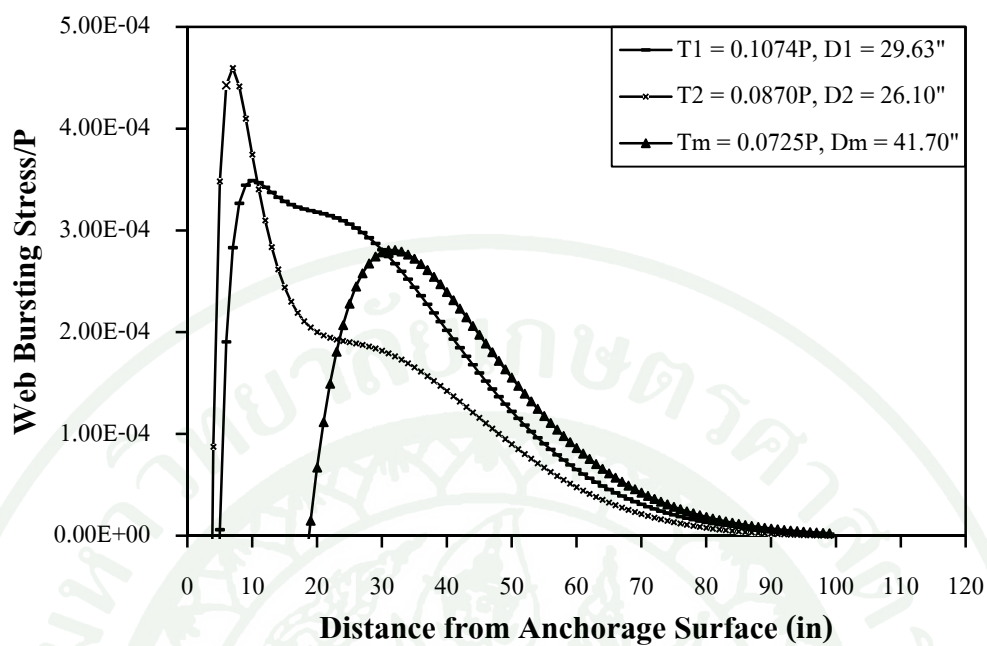
ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปฏิกายในบริเวณสมอขีด



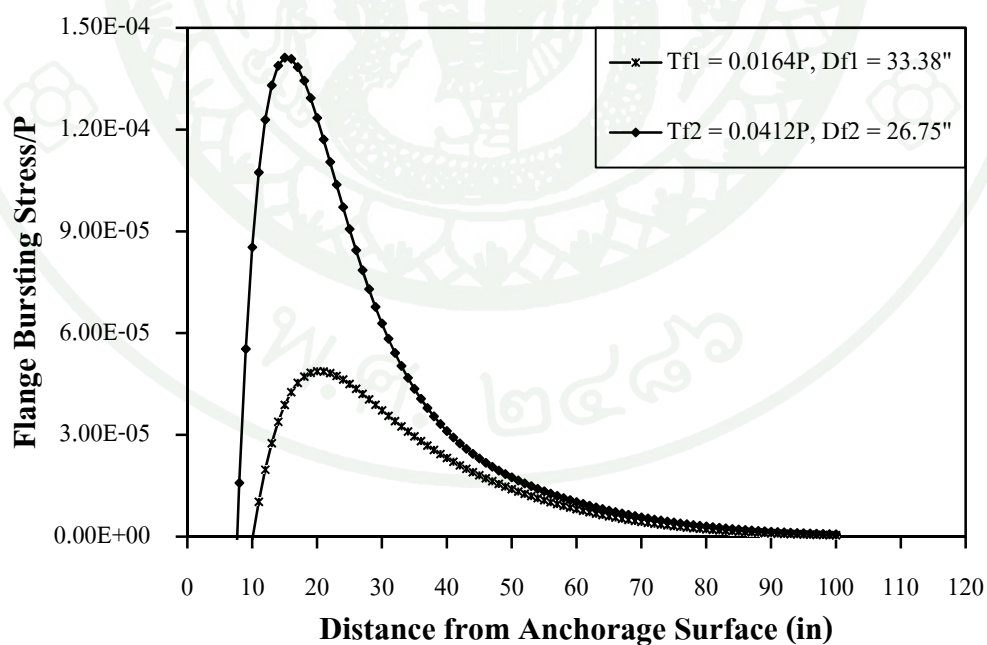
ภาพผนวกที่ ก1 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 9 นิ้ว



ภาพผนวกที่ ก2 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 9 นิ้ว



ภาพผนวกที่ ก3 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่เอวคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 24 นิ้ว



ภาพผนวกที่ ก4 ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรงปรีที่ปีกคาน เมื่อแรงอัดทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับ 24 นิ้ว



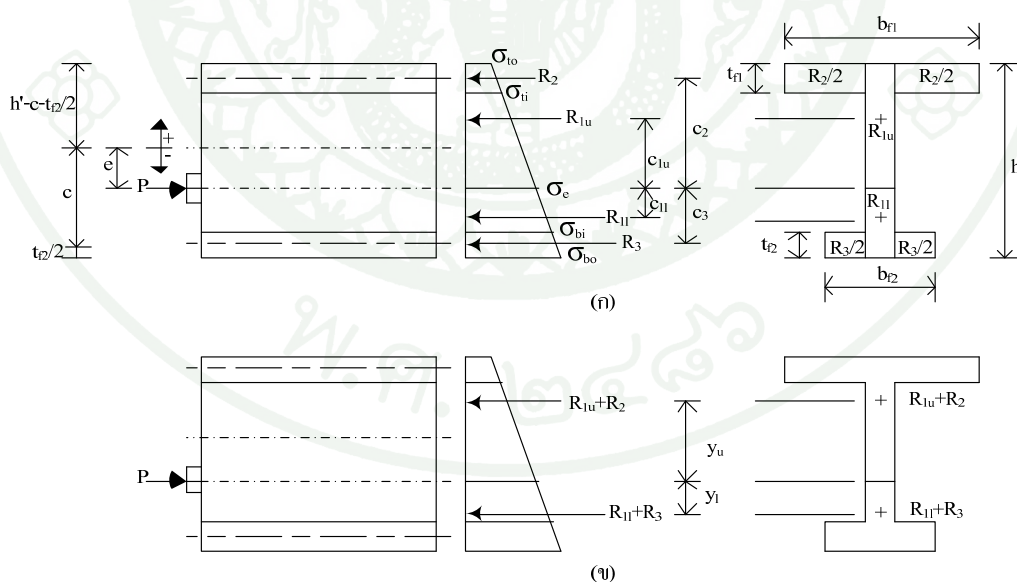
ขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์ของหน่วยแรงที่ด้านท้ายของแบบจำลอง

จากภาพผนวกที่ ข1 พื้นที่ของหน้าตัดคาน (A_f) และค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (Moment of Inertia, I_f) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข1 และ ข2 ตามลำดับ

$$A_f = t_w h' + (b_{f1} - t_w) t_{f1} + (b_{f2} - t_w) t_{f2} \quad (\text{ข.1})$$

$$I_f = \frac{t_w h'^3}{12} + t_w h' \left(c + \frac{t_{f2}}{2} - \frac{h'}{2} \right)^2 + \left(\frac{b_{f1} - t_w}{12} \right) t_{f1}^3 + (b_{f1} - t_w) t_{f1} (h_w - c)^2 \\ + \left(\frac{b_{f2} - t_w}{12} \right) t_{f2}^3 + (b_{f2} - t_w) t_{f2} c^2 \quad (\text{ข.2})$$

แรงลัพธ์ของแบบจำลองคานหน้าตัดปีกสามารถคำนวณได้จากแผนผังของหน่วยแรงที่ด้านท้ายของแบบจำลอง เมื่อแรงอัดกระทำแบบเอียงศูนย์กลางภาพผนวกที่ ข1 ซึ่งระยะการเอียงศูนย์กลาง (e) มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงอัดกระทำเหนือจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดคาน และมีค่าเป็นลบเมื่อแรงกระทำด้านล่างของจุดศูนย์กลางถ่วงของหน้าตัดคาน



ภาพผนวกที่ ข1 แผนผังของหน่วยแรงที่ด้านท้ายของแบบจำลองคานหน้าตัดปีก

σ_u และ σ_{to} คือ หน่วยแรงที่ผิวด้านในและด้านนอกของปีกคานด้านบน ตามลำดับ σ_e คือ หน่วยแรงที่แนวศูนย์กลางของสมอยึด σ_{bi} และ σ_{bo} คือหน่วยแรงที่ผิวด้านในและด้านนอกของปีกคานด้านล่าง ตามลำดับ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ ข3 ถึง ข7

$$\sigma_{to} = P_u \left(\frac{-1}{A_f} - \frac{e}{I_f} \left(h' - c - \frac{t_{f2}}{2} \right) \right) \quad (\text{ข.3})$$

$$\sigma_{ti} = P_u \left(\frac{-1}{A_f} - \frac{e}{I_f} \left(h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - t_{fi} \right) \right) \quad (\text{ข.4})$$

$$\sigma_e = P_u \left(\frac{-1}{A_f} - \frac{e^2}{I_f} \right) \quad (\text{ข.5})$$

$$\sigma_{ti} = P_u \left(\frac{-1}{A_f} + \frac{e}{I_f} \left(c - \frac{t_{f2}}{2} \right) \right) \quad (\text{ข.6})$$

$$\sigma_{to} = P_u \left(\frac{-1}{A_f} + \frac{e}{I_f} \left(c + \frac{t_{f2}}{2} \right) \right) \quad (\text{ข.7})$$

R_{lu} และ R_{li} คือ แรงลัพท์ที่เอวคานที่ด้านบนและด้านล่างจากแนวศูนย์กลางของสมอยึด ตามลำดับ ในส่วนของ R_2 และ R_3 คือ แรงลัพท์ที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข8 ถึง ข11

$$R_{lu} = \frac{1}{2} |(\sigma_{to} + \sigma_e)| \left(h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - e \right) t_w \quad (\text{ข.8})$$

$$R_{li} = \frac{1}{2} |(\sigma_e + \sigma_{bo})| \left(c + \frac{t_{f2}}{2} + e \right) t_w \quad (\text{ข.9})$$

$$R_2 = \frac{1}{2} |(\sigma_{to} + \sigma_{ti})| (b_{fi} - t_w) t_{fi} \quad (\text{ข.10})$$

$$R_3 = \frac{1}{2} |(\sigma_{bi} + \sigma_{bo})| (b_{f2} - t_w) t_{f2} \quad (\text{ข.11})$$

C_{lu} และ C_{ll} คือ ระยะจากแนวศูนย์กลางของสมอียึดถึงตำแหน่งของแรงลัพธ์ของเอวคาน ด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ ในส่วนของ C_2 และ C_3 คือ ระยะจากแนวศูนย์กลางของสมอียึดถึงตำแหน่งของแรงลัพธ์ที่ปีกคานด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข12 ถึง ข15

$$c_{lu} = \left(\frac{\sigma_e + 2\sigma_{to}}{3\sigma_e + 3\sigma_{to}} \right) \left(h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - e \right) \quad (\text{ข.12})$$

$$c_{ll} = \left(1 - \frac{2\sigma_e + \sigma_{bo}}{3\sigma_e + 3\sigma_{bo}} \right) \left(c + \frac{t_{f2}}{2} + e \right) \quad (\text{ข.13})$$

$$c_2 = \left(\frac{\sigma_{ti} + 2\sigma_{to}}{3\sigma_{ti} + 3\sigma_{to}} \right) t_{f1} + \left(h' - c - \frac{t_{f2}}{2} - t_{f1} - e \right) \quad (\text{ข.14})$$

$$c_3 = \left(1 - \frac{2\sigma_{bi} + \sigma_{bo}}{3\sigma_{bi} + 3\sigma_{bo}} \right) t_{f2} + \left(c - \frac{t_{f2}}{2} + e \right) \quad (\text{ข.15})$$

y_u และ y_l คือระยะจากแนวศูนย์กลางของสมอียึดถึงตำแหน่งของแรงลัพธ์รวมด้านบนและด้านล่าง ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข16 และ ข17

$$y_u = \frac{R_{lu}c_{lu} + R_2c_2}{R_{lu} + R_2} \quad (\text{ข.16})$$

$$y_l = \frac{R_{ll}c_{ll} + R_3c_3}{R_{ll} + R_3} \quad (\text{ข.17})$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายสุรินทร์ ทรัพย์ศิริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 1 มกราคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดอุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-