

การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก

นายวิมล สมสะอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-533-044-2

**STRENGTHENING OF PRE-CAST PRESTRESSED CONCRETE
SLABS WITH STEEL PLATES**

Mr. Wimon Somsa-ard

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2001

ISBN 974-533-044-2

วิมล สมสะอาด : การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก

(STRENGTHENING OF PRE-CAST PRESTRESSED CONCRETE SLABS WITH STEEL PLATES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 99 หน้า.

ISBN 974-533-044-2

เมื่ออาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นระบบพื้นในการก่อสร้าง พื้นดังกล่าวมีข้อดีเหนือแผ่นพื้นคอนกรีตหล่อในที่คือ ความง่ายและรวดเร็วในการก่อสร้างและความประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน มีอาคารดังกล่าวบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนแปลงการใช้งาน เช่น จากอาคารพาณิชย์เป็นโกดังเก็บสินค้า เป็นต้น ซึ่งโกดังเก็บสินค้าจะมีน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบสูงกว่าอาคารพาณิชย์ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมกำลังองค์อาคารของอาคารดังกล่าว จากการค้นคว้างานวิจัยพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมกำลังคานและเสาคอนกรีต ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาอย่างจริงจัง ดังนั้น จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยใช้แผ่นเหล็ก ทั้งทางวิเคราะห์และการทดสอบ เพื่อเสนอแนวทางในการออกแบบแผ่นพื้นดังกล่าว

ในการศึกษาเชิงวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยใช้แผ่นเหล็กถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของวัสดุและหลักการความสอดคล้องของความเครียด ในการศึกษาเชิงการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ช่วงความยาวพื้น พื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็ก และวิธีการยึดแผ่นเหล็ก ตัวอย่างทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ (1) พื้นที่ไม่มีการเสริมกำลัง (2) พื้นที่ถูกเสริมกำลังและวิบัติโดยการคัดที่ผิวรับแรงดึง (3) พื้นที่ถูกเสริมกำลังและวิบัติโดยแรงเฉือนขวาง (4) พื้นที่ถูกเสริมกำลังและวิบัติโดยการคัดที่ผิวรับแรงกดอัด จากการทดสอบโดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 4 จุด พบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีกำลังและความแกร่งสูงขึ้นจากพื้นที่ไม่มีการเสริมกำลังโดยมีค่าเพิ่มขึ้น 102.9% และ 108.6%, 94.5% และ 101.5%, 25.9% และ 31.7% ตามลำดับเรียงจากกลุ่มที่ (4) ถึงกลุ่มที่ (2) นอกจากนี้ยังพบว่าผลการวิเคราะห์ของพื้นที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ สุดท้ายแนวทางการออกแบบพื้นดังกล่าวได้ถูกเสนอโดยใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดสอบดังกล่าว

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

**WIMON SOMSA-ARD: STRENGTHENING OF PRE-CAST PRESTRESSED
CONCRETE SLABS WITH STEEL PLATES THESIS ADVISOR: SITTI CHAI
SEANGATITH, Ph.D. 99PP. ISBN 974 533 044 2**

STRENGTHENING/FLEXURAL STRENGTH/PRESTRESSED CONCRETE SLAB

The pre-cast prestressed concrete slab has been used extensively as floor slab in the buildings such as commercial building and office building for many years. It has many advantages over the cast-in-place concrete slab on ease and speed of construction, and economy. However, when the intended function of the building is changed such as from the commercial building to a warehouse, the design load of the building must be increased according to the building design code. In this case, the structural members such as floor slab, beam, and column of the building must be strengthening. According to the literature review, the research works on strengthening of the beam and column have been performed quite extensively. Thus, the objectives of this research work are to study the behaviors of the pre-cast prestressed concrete slab strengthened by using steel plate both analytically and experimentally and to propose the design method.

Analytically, a simplified analytical model for predicting the flexural behaviors of the pre-cast prestressed concrete slab strengthened by using steel plate had been developed based on the stress-strain relationship of the materials and the strain compatibility method. Experimentally, The specimen variables included span length, cross-sectional area of the steel plate, and steel plate attaching method. The pre-cast prestressed concrete slab specimens had been categorized into four groups: (1) the concrete slab without strengthening, (2) the strengthened concrete slab failed by flexure in tension surface, (3) the strengthened concrete slab failed by transverse shear, (4) the strengthened concrete slab failed by flexure in compression surface. It has been found from four-point loading test that the strength and the stiffness of the strengthened concrete slabs were increased from the ones of the concrete slab without strengthening by 102.9% and 108.6%, 94.5% and 101.5%, and 25.9% and 31.7%, respectively from group 4 to group 2. In addition, the experimental results were in good agreement with the analytical results in the range of less than 15%. Finally, the design method was proposed based on the experimental and analytical results.

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธีชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร. อำนาจ อภิชาติวัลลภ ดร. ทนงศักดิ์ พิศาลสิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล จิรวัชเรช อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีกริช หิรัญมาศ อาจารย์พิเศษสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ คุณจิระ วงศ์พรหม คุณสวัสดิ์ เกตุสระน้อย คุณวิชาญ วีรชัยสุนทร คุณไชยา ยอดโคกสูง คุณสมนึก คงกลาง คุณนรงค์ เขียวสูงเนิน คุณสงคราม ยาวะประภาส คุณวาที ทิพย์เลิศ และคุณจิรวัดณ์ ค่านทองกลาง เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำมาโดยตลอด
- คุณปรัชวิน รัตนคำ คุณสุวิจักขณ์ ศรีสุวรรณ คุณทศพล คำเนตร และคุณศักดิ์สิทธิ์ จันทะแจ่ม ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา
- คุณอลงกรณ์ ละม่อม และคุณนิพันธ์ นิรันดร์นุช เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษามาโดยตลอด
- ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วิมล สมสะอาด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....	4
2.2 ประเภทของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....	4
2.3 แผ่นเหล็ก.....	5
2.4 อีพอกซี.....	6
2.5 สลักเกลียว.....	7
2.6 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเค้นของคอนกรีต.....	9
2.7 กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป.....	12
2.8 หน่วยแรงเฉือนขวาง.....	14
2.9 ระยะการเอนตัว.....	19
2.10ภาพรวมของปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1	ข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการทดสอบในสนาม.....	22
3.2	แนวคิดที่ทำให้ต้องทำการออกแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	23
3.3	แผนการศึกษา.....	24
3.4	การทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด	24
3.5	การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง	26
3.6	ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ..	27
3.7	กำลังเฉือนสำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก.....	34
3.8	การเสริมกำลังเฉือนให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยสลักเกลียว	34
3.9	ระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก.....	35
3.10	สรุปขั้นตอนการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ..	37
3.11	ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก.....	43
3.11.1	ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ที่ออกแบบในห้วงวิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง.....	43
3.11.2	ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ที่ออกแบบในห้วงวิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด	51
3.12	การทดสอบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก	61
3.13	การเตรียมตัวอย่างระบบพื้นคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ	61
3.14	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	64
3.15	วิธีทดสอบ	66
4	ผลการศึกษา	68
4.1	ผลการทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด	68
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง	70
4.3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	71
4.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (1).....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)	73
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (3).....	74
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (4).....	75
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ความยาวช่วงต่างๆ	76
4.3.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (2)....	78
4.3.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (3)....	78
4.3.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (4)..	78
4.4 ระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	80
4.5 รูปแบบการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	83
4.5.1 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง.....	83
4.5.2 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยแรงเฉือนขวาง	83
4.5.3 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด ...	84
4.6 กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ และ $L/360$...	84
4.7 การติดตั้งแผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	87
4.8 สรุปผลการศึกษา	87
5 สรุปผลการวิจัย	90
5.1 สรุปแนวคิดในการออกแบบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	90
5.2 สรุปแนวคิดที่ได้จากการวิจัย	91
5.3 สรุปผลการทดสอบ	93
5.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย	94
รายการอ้างอิง	95
ประวัติผู้เขียน	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)	73
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (3).....	74
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (4).....	75
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ความยาวช่วงต่างๆ	76
4.3.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (2)....	78
4.3.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (3)....	78
4.3.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีตัวอย่างกลุ่มที่ (4)..	78
4.4 ระยะเวลาแอ่นตัวตามแนวเส้นของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	80
4.5 รูปแบบการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	83
4.5.1 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง.....	83
4.5.2 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยแรงเฉือนขวาง	83
4.5.3 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด ...	84
4.6 กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ระยะเวลาแอ่นตัว <i>L/240</i> และ <i>L/360</i> ...	84
4.7 การติดตั้งแผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	87
4.8 สรุปผลการศึกษา	87
5 สรุปผลการวิจัย	90
5.1 สรุปแนวคิดในการออกแบบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	90
5.2 สรุปแนวคิดที่ได้จากการวิจัย	91
5.3 สรุปผลการทดสอบ	93
5.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย	94
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้เขียน	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กตามมาตรฐานต่างๆ	5
2.2 หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับสลักเกลียวและสลักเกลียวกำลังสูง	8
3.1 ผลการใช้โปรแกรมออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง	59
3.2 ผลการใช้โปรแกรมออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด	60
3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	62
4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นเหล็ก.....	71
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ระยะการแอนตัว <i>L/240</i>	85
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ระยะการแอนตัว <i>L/260</i>	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แปลนพื้นของอาคารอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงการใช้อาคารไปจากเดิมที่ออกแบบไว้2
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย Hognestad, E. et al. (1955)9
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย Park, R., and Paulay, T. (1975)10
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย สุธรรม สุริยะมงคล และคณะ (2540)11
2.4	กำลังเฉือนตามวิธีของ Macgregor, J.G., and Hanson, J.M. (1969)12
2.5	กำลังเฉือนของคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่นำเสนอโดย Chajes, M. J. et al. (1995)13
2.6	หน่วยแรงต่างๆ ที่กระทำต่อส่วนย่อยพลาสติกเสริมเส้นใย14
3.1	เครื่องผสมคอนกรีต25
3.2	เครื่องทดสอบ universal testing machine ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UH-Series มีค่ากำลังทดสอบสูงสุด 200 ตัน25
3.3	การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดและวัฏระยะการหดตัว26
3.4	ตัวอย่างแผ่นเหล็กรูปกระดูก ตามมาตรฐาน ASTM A36-199627
3.5	หน้าตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก28
3.6	แผนภาพการกระจายความเครียด การกระจายหน่วยแรง และแรงกดอัดและแรงดึงที่กระทำต่อภาคตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก28
3.7	แผนผังการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก42
3.8	การเตรียมชิ้นส่วนพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นระบบพื้น63
3.9	พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่บ่มด้วยถ้วยกระสอบชุมน้ำ64
3.10	ตัวอย่างคอนกรีตทับหน้าที่บ่มโดยการแช่น้ำปูนขาวอิมตัว64
3.11	อุปกรณ์การกดที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องมือ compression frame machine65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	ดิจิทัลวัดความดันละเอียดยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model DGP/10,000 psi และเครื่องสูบลมไฮดรอลิก ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model No. PUJ1400E67
3.13	ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดละเอียด69
3.14	การติดตั้งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเข้ากับอุปกรณ์ถ่ายแรง69
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต70
4.2	คอนกรีตที่เกิดการวิบัติ เมื่อได้รับแรงกดอัด71
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกับสมการตามทฤษฎี71
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแผ่นเหล็ก72
4.5	แผ่นเหล็กที่เกิดการวิบัติ เมื่อได้รับแรงดึง73
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (1)74
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)75
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)76
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)77
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความยาวช่วง 3.00 ม.78
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความยาวช่วง 3.50 ม.79
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความยาวช่วง 4.00 ม.79
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)81
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)81

4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)	82
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ กลุ่มที่ (2)	83
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)	84
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)	84
4.19	พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง	85
4.20	พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยแรงเฉือนขวางที่ปลายของแผ่นเหล็ก	85
4.21	พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a_1, a_2, a_3	=	สัมประสิทธิ์ของสมการกำลัง
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งหมด
A_{pl}	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นเหล็ก
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของลวดอัดแรง
b	=	ความกว้างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
b_1, b_2, b_3	=	อัตราส่วนตัวแปรเฉพาะ
b_p	=	ความกว้างของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย
b_w	=	ความกว้างของเวอคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที
c	=	ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงแกนสะเทิน
c_2	=	ระยะที่วัดจากผิวด้านล่างสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของคอนกรีต
C_c	=	แรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต
d	=	ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด
d_1, d_2	=	ค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต
d_{pl}	=	ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของแผ่นเหล็ก
d_s	=	ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของลวดอัดแรง
D	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสลักเกลียวที่ใช้สำหรับเสริมกำลังเนื้อ
e	=	ระยะเยื้องศูนย์กลางจากจุดศูนย์กลางถ่วงของลวดอัดแรงถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของคอนกรีต
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_p	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกเสริมเส้นใย
E_{pl}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็ก
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง
f_b	=	กำลังรับแรงเฉือนที่ยอมให้ของสลักเกลียว
f_c	=	หน่วยแรงอัดของคอนกรีต
f'_c	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
$f_c(x)$	=	หน่วยแรงที่ผิวด้านล่างของคอนกรีต
f_{pl}	=	หน่วยแรงในแผ่นเหล็ก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

f_{ply}	=	หน่วยแรงครากในแผ่นเหล็ก
$f_p(x)$	=	หน่วยแรงในพลาสติกเสริมเส้นใย
f_r	=	โมดูลัสของการแตกหักของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
f_s	=	หน่วยแรงในลวดอัดแรง
f_{sy}	=	หน่วยแรงครากในลวดอัดแรง
G_a	=	โมดูลัสเฉือนของอีพอกซี
h	=	ความสูงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
I_{cr}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว
I_e	=	โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
I_g	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมด
I_{tr}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงพื้นที่เหล็กเป็นคอนกรีต
L	=	ความยาวประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
L_0	=	ระยะจากปลายสุดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยถึงจุดศูนย์กลางของจูดรองรับ
L_{pl}	=	ความยาวของแผ่นเหล็กที่ทำการเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
L_s	=	ระยะที่วัดจากปลายพลาสติกเสริมเส้นใยไปยังจุดที่แรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์
M	=	โมเมนต์ที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก
M_a	=	โมเมนต์คัตสูงสุดในช่วงความยาวประสิทธิผล
M_{cr}	=	โมเมนต์คัตแตกร้าว
M_u	=	โมเมนต์คัตบนหน้าตัด
P	=	แรงดึงในแผ่นเหล็ก
P_e	=	แรงอัดประสิทธิผลในลวดอัดแรง
P_t	=	น้ำหนักบรรทุกรวม
r	=	รัศมีจอยเรชันของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
S	=	แรงดึงในลวดอัดแรง
S_2	=	โมดูลัสพื้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
t_a	=	ความหนาของอีพอกซี
t_p	=	ความหนาของพลาสติกเสริมเส้นใย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

u	=	การกระจัดในชั้นของอีพอกซีในแนวระดับ
v	=	การกระจัดในชั้นของอีพอกซีในแนวตั้ง
v_c	=	หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต
V_b	=	แรงเฉือนที่สลักเกลียวจะต้องรับทั้งหมด
V_c	=	กำลังเฉือนระบุของคอนกรีต
V_{cs}	=	แรงเฉือนขวางที่ตำแหน่งปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใยหรือแผ่นเหล็ก
V_{ct}	=	แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีต
V_u	=	แรงเฉือนสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้ที่หน้าตัดที่พิจารณา
w	=	น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอ
x	=	ระยะที่วัดจากแกนสะเทินในทิศทางตามแนวแกนของพลาสติกเสริมเส้นใย
x_0	=	ตำแหน่งอ้างอิงกับปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใย
y	=	ระยะที่วัดจากแกนสะเทินในทิศทางตั้งฉากกับแกนของพลาสติกเสริมเส้นใย
\bar{y}	=	ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย
\bar{y}_c	=	ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดที่เป็นคอนกรีตถึงผิวล่างสุดของคอนกรีต
α	=	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต
Δ	=	ระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
ϵ_0	=	ความเครียดที่จุดหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด
ϵ_c	=	ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด
$\bar{\epsilon}_c$	=	ความเครียดที่จุดศูนย์กลางถ่วงของพื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต
ϵ_{cf}	=	ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด
ϵ_p	=	ความเครียดที่ผิวด้านล่างของอีพอกซี
ϵ_{pl}	=	ความเครียดในแผ่นเหล็ก
ϵ_{ply}	=	ความเครียดครากในแผ่นเหล็ก
ϵ_s	=	ความเครียดในลวดอัดแรง
ϵ_{sy}	=	ความเครียดครากในลวดอัดแรง
γ	=	พารามิเตอร์ปรับตำแหน่งของแรงกดอัดของคอนกรีต

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ρ	=	อัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที
$\tau(x)$	=	หน่วยแรงเฉือนขวางในพลาสติกเสริมเส้นใย
τ_{\max}	=	หน่วยแรงเฉือนขวางสูงสุดในพลาสติกเสริมเส้นใย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

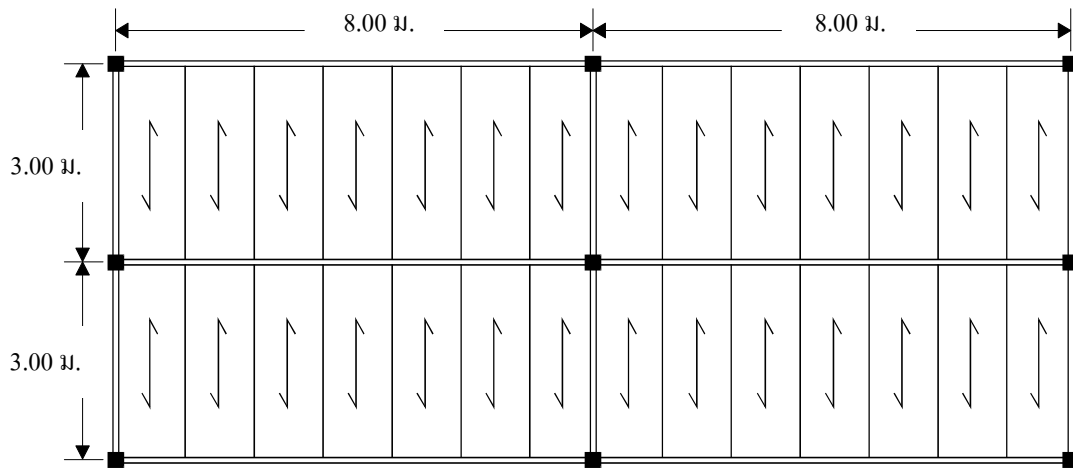
จากอดีตถึงปัจจุบัน พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปได้ใช้เป็นระบบพื้นในงานก่อสร้างอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นจำนวนมากและมีหลายประเภทตามรูปแบบการใช้สอยอาคาร เนื่องจากพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปสามารถก่อสร้างได้สะดวก รวดเร็ว และใช้แรงงานน้อย ทำให้ประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง แต่ในบางกรณี เมื่อมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนแปลงการใช้อาคารไปจากเดิมที่ออกแบบไว้ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอาคารที่อยู่อาศัยให้เป็นโกดังเก็บสินค้า ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออาคารมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งอาจนำไปสู่การวิบัติขององค์อาคารบางส่วนหรือโดยรวมได้ ดังนั้น เพื่อให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมกำลังองค์อาคารของอาคารดังกล่าวให้มีกำลังสูงขึ้น แทนที่จะทำการรื้ออาคารดังกล่าวและก่อสร้างใหม่ ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณของภาครัฐและเอกชน

งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีต (An, W., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., 1991, Bonacci, J. F., and Maalej, M., 2000) เสาคอนกรีต (Priestly, M. J. N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R., 1994, Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Jin, L., 1997, Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. D., Jirsa, J. O., and Kreger, M. E., 1999, Lehman, D. E., Gookin, S. E., Nacamuli, A. M., and Moehle, J. P., 2001) ฐานรากคอนกรีต (McLean, D. I., and Marsh, M. L., 1999) และ โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก (Ghobarah, A., Aziz, T. S., and Biddah, A., 1997) ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาอย่างจริงจัง ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเปรียบเทียบกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง เมื่ออยู่ภายใต้แรงคดและแรงเฉือน จึงเป็นงานวิจัยที่จะต้องได้รับการศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กและเปรียบเทียบกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง
- 1.2.2) เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วย

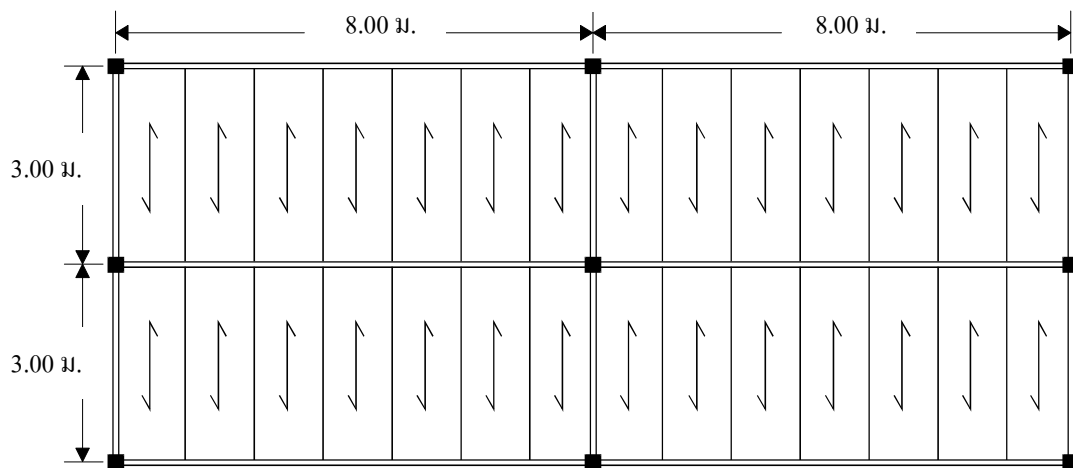
- แผ่นเหล็ก โดยใช้อีพอกซี (epoxy) และสลักเกลียว (bolt) เป็นตัวยึด
- 1.2.3) เพื่อเสนอแนวทางในการออกแบบ ซ่อมแซม และเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรง สำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก



อาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุก 300 กก./ม.²



โกดังเก็บสินค้าที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุก 500 กก./ม.²



รูปที่ 1.1 แผนพื้นของอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลง
การใช้อาคารไปจากเดิมที่ออกแบบไว้

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย

- 1.3.1) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ทั้งที่ไม่มีการเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งจะทำการทดสอบจนกระทั่งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเกิดการวิบัติ
- 1.3.2) การทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะใช้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด (four-point loading)
- 1.3.3) ตัวอย่างทดสอบจะถูกสร้างขึ้นใหม่ จากพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงานที่ได้มาตรฐานอุตสาหกรรมไทยในท้องถิ่น
- 1.3.4) การทดสอบจะกระทำต่อพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ โดยใช้ฮีปอกซีและสลักเกลียวเป็นตัวยึด ซึ่งในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มต่างๆ ตามรูปแบบการวิบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

- 1.4.1) ความเข้าใจที่มากขึ้นในพฤติกรรมกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ทั้งที่ไม่มีการเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ
- 1.4.2) วิธีการซ่อมแซมและการเสริมกำลังให้กับองค์อาคารของโครงสร้างที่
 - 1.4.2.1) มีการเปลี่ยนแปลงการใช้สอยพื้นที่ไปจากเดิมที่ได้ทำการออกแบบไว้
 - 1.4.2.2) ต้องการอนุรักษ์ไว้ เช่น โบราณสถาน เป็นต้น
 - 1.4.2.3) ต้องการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

โดยวิธีการดังกล่าว จะเป็นวิธีการซ่อมแซมและเสริมกำลังที่ทำให้สะดวก รวดเร็ว และง่ายในทางปฏิบัติ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

หลักการอัดแรงโครงสร้าง เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมบางอย่างขององค์อาคารได้เป็นที่ทราบกันเป็นเวลาหลายร้อยปี แต่การนำหลักการนี้มาประยุกต์กับงานคอนกรีตได้เริ่มต้นเมื่อร้อยปีที่แล้ว ในปี ค.ศ. 1886, P.H. Jackson วิศวกรแห่งเมืองซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา ได้จัดทะเบียนการก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการขันท่อนเหล็กเพื่อยึดพื้นคอนกรีตเข้าด้วยกัน และในประเทศไทยได้เริ่มมีการใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปใน พ.ศ. 2505 ในระยะหลังมีโรงงานผลิตพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป การก่อสร้างโดยใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นที่นิยมกันมาก เพราะประหยัดเวลาและค่าก่อสร้าง เพราะองค์อาคารมีน้ำหนักน้อย เมื่อเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้การก่อสร้างระบบอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อนสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากในเวลาสั้น (ต่อกุล กาญจนาลัย, 2539)

2.2 ประเภทของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ชยาทิพย์ วัฒนวิทย์กิจ (2539) ได้แบ่งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปออกเป็น 6 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- 2.2.1) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภททีเดี่ยว (single – T)
- 2.2.2) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภททีคู่ (double – T)
- 2.2.3) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทยูคว่ำ (U – slab)
- 2.2.4) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภททีหงาย (inverted – T)
- 2.2.5) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทเนื้อกลวง (hollow core)
- 2.2.6) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทเนื้อตัน (solid slab)

พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทเนื้อตัน มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นระบบพื้นคอนกรีตในงานก่อสร้างอาคารประเภทบ้านพักอาศัยและอาคารพาณิชย์ เพราะมีราคาถูกลงกว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทอื่นๆ (สุรเกตุ ยิ่งยืนยง, 1999) นอกจากนี้ยังสามารถก่อสร้างได้สะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลาในการก่อสร้างและใช้แรงงานน้อย ทำให้ประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง

2.3 แผ่นเหล็ก

สำหรับประเทศไทย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ มอก. ได้กำหนดเหล็กโครงสร้างไว้ 2 ชั้นคุณภาพคือ Fe24 และ Fe30 แผ่นเหล็กเป็นเหล็กโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อแรงดึงได้ดี มีคุณภาพดีสม่ำเสมอและมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงประมาณ 10 เท่าของคอนกรีต มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.15 ถึง 0.25 เปอร์เซ็นต์ เป็นเหล็กกล้านำมาผ่านกรรมวิธีการรีดร้อน (hot rolling) จนมีขนาดความหนาตามที่ต้องการ (ชยาทิศย์ วัฒนวิทย์กิจ, 2539) มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุในการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในประเทศไทย เพราะองค์อาคารไม่อยู่ในสภาพที่ต้องสัมผัสกับดินหรือถูกแดดฝนโดยตรง และยังสามารถทาสีกันสนิมเพื่อป้องกันสนิม

นอกจากมาตรฐานดังกล่าวแล้วยังมีการใช้มาตรฐานอเมริกันซึ่งประกอบด้วย ASTM AISC (American Institute of Steel Construction) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) และ AREA (American Railway Engineering Association) มาตรฐานของไทยที่ออกโดย ว.ส.ท. (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย) และ มอก.

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กตามมาตรฐานต่างๆ

ชั้นคุณภาพ	จุดคราก (กก./ซม. ²)		กำลังดึงสูงสุด (กก./ซม. ²)
	ความหนา (มม.)		
	16 หรือน้อยกว่า	มากกว่า 16	
ASTM A36, A572 Gr.42 JIS G3101 SS 400 JIS G3101 SM 400 A, B, C TIS SM 400	2500	2400	4000-5200
JIS G3106 SS 490	2900	2800	5000-6200
JIS G3106 SM 490 A, B, C TIS SM 490	3300	3200	5000-6200
ASTM A572 Gr. 50 JIS G3106 SM 490 YA, YB TIS SM 520	3700	3600	5300-6500
JIS G3106 SM 570	4600	4500	5800-7300

อย่างไรก็ตามเหล็กที่ใช้มากในประเทศไทยจะเป็นเหล็กที่ผลิตตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS (Japan Industrial Standard) และมีบางส่วนที่มาตรฐานอังกฤษ BS (British Standard) ตารางที่ 2.1 ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเหล็กตามมาตรฐานต่างๆ (มงคล จิรวัชรเดช, 2543)

MacDonald, M. D., and Calder, A. J. J. (1982) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นเหล็ก ตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีความยาวช่วง 3.50 ม. และ 4.90 ม. โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นเหล็กสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้ดีขึ้นได้ ไม่ว่าจะเป็นน้ำหนักบรรทุกประลัย การควบคุมการแตกร้าว และความแข็งแรง นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กยังมีผลต่อกำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่ต้องสัมผัสไม่ว่าจะเป็นดินหรือแฉะฝน รวมทั้งการสูญเสียกำลังของจุดยึดเชื่อมประสานของอีปอกซีระหว่างแผ่นเหล็กกับคอนกรีต ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงของคานคอนกรีตมีค่าลดลง

สะพานทางด่วนจำนวนกว่า 40 เปรอร์เซ็นต์ในสหรัฐอเมริกาที่จะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขหรือทำการก่อสร้างใหม่เพื่อรองรับปริมาณการจราจรที่มากขึ้น การสร้างใหม่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของงบประมาณ Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1991) จึงได้ทำการทดสอบการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic plates) หรือ GFRP โดยใช้อีปอกซีเป็นตัวยึด จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมใยแก้วนั้น สามารถเพิ่มกำลังรับแรงได้มากขึ้นเนื่องจากอีปอกซีช่วยลดขนาดของรอยแตกร้าวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กในทุกระดับของน้ำหนักบรรทุก ในการประยุกต์ใช้งานจริงนั้นจะต้องดูแล และเตรียมผิวของคอนกรีตและการเลือกใช้อีปอกซีเป็นตัวยึดด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเหนียวลดลง สำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic composite) หรือ FRP และพลาสติกบางชนิด มีประโยชน์มากในด้านการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุ แต่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจในชีวิตการใช้งานจริงเนื่องจากวัสดุดังกล่าวจะมีคุณสมบัติด้านความคืบ ความล้า การหดตัว และการสูญเสียกำลังในช่วงเวลานานๆ ที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นตามมาภายหลัง แผ่นเหล็กจึงเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้เป็นวัสดุในการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในประเทศไทย

2.4 อีปอกซี

อีปอกซีมีความต้านทานต่อแรงเฉือนได้ดี มีคุณภาพดีสม่ำเสมอ มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (high-modulus) มีกำลังสูง (high-strength) อีปอกซีที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ อีปอกซีชนิด H และอีปอกซีชนิด R โดยนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:1 ซึ่งสามารถผสม

ให้เข้ากันด้วยมือในภาชนะแล้วต้องนำมาใช้ทันที เพราะอีพ็อกซีสามารถแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องได้ในเวลาที่รวดเร็ว (Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., William, J., and Finch, W. J., 1995) ความหนาของอีพ็อกซีที่เหมาะสมประมาณ 1.5 มม. ถึง 2 มม. (Hamoush, S. A., and Ahmad, S. H., 1990) ก่อนทำการติดแผ่นเหล็กเข้ากับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะต้องทำความสะอาดพื้นผิวของคอนกรีตด้วยทรายพ่น (sandblast) แผ่นเหล็กจะต้องทำความสะอาดด้วยการขัดกระดาษทราย และควรทำการทดสอบหลังจากที่ทำการติดแผ่นเหล็กเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชม. เพื่อให้อีพ็อกซีที่ใช้เป็นตัวยึดแผ่นเหล็กเข้ากับองค์อาคารคอนกรีตมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งเป็นการป้องกันการวิบัติที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากอีพ็อกซี (Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu L. W., and Connelly, G. M., 1991)

2.5 สลักเกลียว

ชนิดของสลักเกลียวที่ใช้ในงานโครงสร้างโดยทั่วไปมีดังนี้

2.5.1) สลักเกลียวแบบไม่แต่งผิว (unfinished bolts) ซึ่งเป็นแบบธรรมดาชนิด ASTM A307 ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีลักษณะของหน่วยแรงกับความเครียด คล้ายเหล็ก A36 มาก มีขนาดตั้งแต่ 16 มม. ถึง 38 มม.

2.5.2) สลักเกลียว A307 โดยทั่วไปจะมีหัวสี่เหลี่ยมเพื่อลดต้นทุน แต่บางครั้งก็มีหัวเป็นรูปหกเหลี่ยมเนื่องจากมีความสวยงามกว่า ง่ายต่อการใช้ประแจขัน และต้องการช่องว่างน้อยกว่าในการขันเกลียว สลักเกลียวชนิดนี้มักจะถูกใช้ในงานโครงสร้างเบารับน้ำหนักคงที่ และสำหรับองค์อาคารรองเช่น แป้ คานย่อย ท่อนยึดทแยง โครงถักขนาดเล็ก

2.5.3) สลักเกลียวกำลังสูง (high-strength bolts) ทำจากเหล็กกล้าชุบแข็งมีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าสลักเกลียวแบบธรรมดาสองเท่าหรือมากกว่า จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ A325 และ A490 สลักเกลียวกำลังสูงถูกใช้ในโครงสร้างทุกชนิด จากอาคารขนาดเล็กจนถึงตึกระฟ้าและสะพานขนาดใหญ่ สลักเกลียวกำลังสูงสามารถถูกขันจนมีหน่วยแรงดึงสูงมากทำให้ส่วนที่ต่อกันอยู่ถูกยึดติดกันแน่นซึ่งจะทำให้น้ำหนักส่วนใหญ่ถูกถ่ายเทโดยแรงเสียดทาน กำลังที่ยอมให้ในการออกแบบของสลักเกลียวภายใต้แรงเฉือนเดียวจะเท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้คูณกับพื้นที่หน้าตัดของสลักเกลียว หน่วยแรงดึงและหน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้สำหรับสลักเกลียวและสลักเกลียวกำลังสูงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 (มงคล จิรวรรณเดช, 2543)

ตารางที่ 2.2 หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับสลักเกลียวและสลักเกลียวกำลังสูง

ชนิดของสลักเกลียว	หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (F _t) กก./ซม. ²	หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ (F _v) กก./ซม. ²	
		Friction-type	Bearing-type
A307	1400	-	700
A325 (เกลียวอยู่ในระนาบเฉือน)	3100	1200	1480
A325 (เกลียวไม่อยู่ในระนาบเฉือน)	3100	1200	2100
A490 (เกลียวอยู่ในระนาบเฉือน)	3800	1480	1970
A490 (เกลียวไม่อยู่ในระนาบเฉือน)	3800	1480	2800

Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., William, J., and Finch, W. J. (1995) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังเฉือนให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดัดด้วยคอมโพสิทไฟเบรค (composite fabrics) โดยการหุ้ม (wrap) ที่เอวคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คอมโพสิทไฟเบรคเป็นวัสดุที่สามารถดัดแปลงรูปร่างได้ง่ายตามที่ต้องการ รวมทั้งชนิดของคอมโพสิทไฟเบรคจะมีผลต่อกำลังและสติฟเนสของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดัดด้วยคอมโพสิทไฟเบรคนั้น สามารถเพิ่มกำลังรับแรงได้มากขึ้น แต่คานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น มีรูปร่างที่ต่างไปจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดัดด้วยคอมโพสิทไฟเบรค ทำให้ไม่สามารถเสริมกำลังเฉือนด้วยคอมโพสิทไฟเบรคให้กับคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในลักษณะเดียวกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดัดด้วยคอมโพสิทไฟเบรค ส่วนการเสริมกำลังเฉือนคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยสลักเกลียวนั้น สามารถยึดสลักเกลียวเข้าที่ปลายสุดของแผ่นเหล็กได้โดยตรง ดังนั้น สลักเกลียวจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เสริมกำลังเฉือนให้กับคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมากกว่าคอมโพสิทไฟเบรค

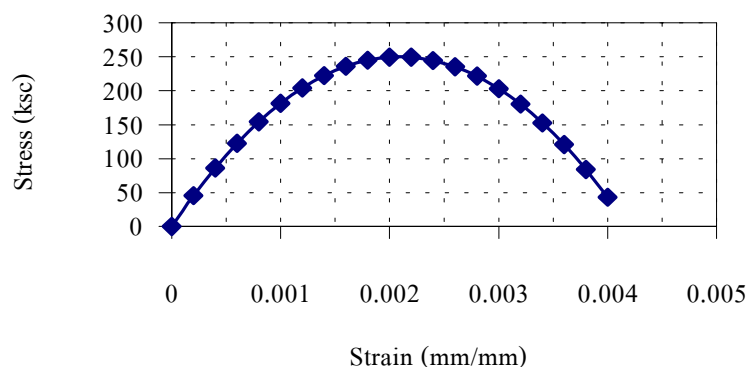
2.6 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต

Hognestad, E., Hanson, N. W., and McHenry, D. (1955) ได้ทำการทดสอบการกดอัดคอนกรีตตามแนวแกน เพื่อศึกษาการกระจายหน่วยแรงของคอนกรีตที่สภาวะกำลังรับแรงประลัยที่ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากผลการทดสอบพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตโดยเฉลี่ย พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถแสดงหน่วยแรงในเทอมของความเครียดได้ดังนี้

$$f_c = f'_c \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (2.2)$$

โดยที่ f_c คือ หน่วยแรงอัดของคอนกรีต
 f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
 E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
 ϵ_0 คือ ความเครียดที่จุดหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด
 ϵ_c คือ ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัด

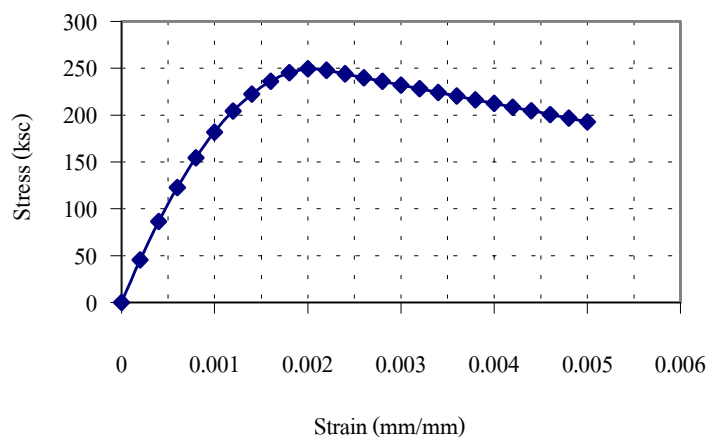


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต
 ที่นำเสนอ โดย Hognestad, E. et al. (1955)

จากผลการศึกษาแบบจำลองการกระจายของหน่วยแรงในคอนกรีตที่รับแรงกดอัดตามแนวแกนของ Park, R., and Paulay, T. (1975) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัดตามแนวแกนมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถแสดงหน่วยแรงในเทอมของความเครียดได้ดังนี้

$$f_c = f_c' \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_0 \quad (2.3)$$

$$f_c = f_c' \left[1 - \frac{0.15}{(0.004 - \epsilon_0)} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right] \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_0 \quad (2.4)$$

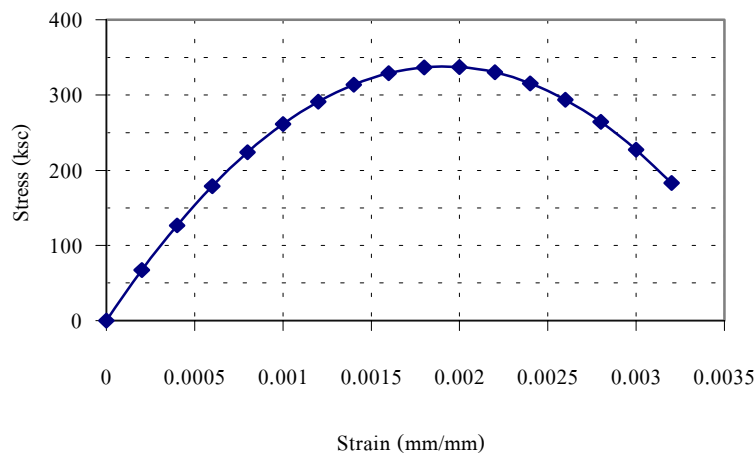


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต
ที่นำเสนอโดย Park, R., and Paulay, T. (1975)

นอกจากนั้น สุธรรม สุริยะมงคล วรชนพงศ์ หุรัตนภิรมย์ และจรรยา รุ่งอมรัตน์ (2540) ได้ทำการวิเคราะห์หน้าตัดโครงสร้างผนังคอนกรีตรับแรงเฉือนแบบมีปีก ที่รับแรงร่วมกันระหว่างแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์คด โดยอาศัยสมมติฐานของการกระจายความเครียดแบบเชิงเส้น ซึ่งสร้างขึ้นจากความสมดุลของแรงและโมเมนต์ กับความสมดุลของหน่วยแรงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (equivalent rectangular stress block) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตเป็นแบบพาราโบลา มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถแสดงหน่วยแรงในเทอมของความเครียดได้ดังนี้

$$f_c = f_c' \left[3.03450 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cf}} - 2.38425 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cf}} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ ϵ_{cf} คือ ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003



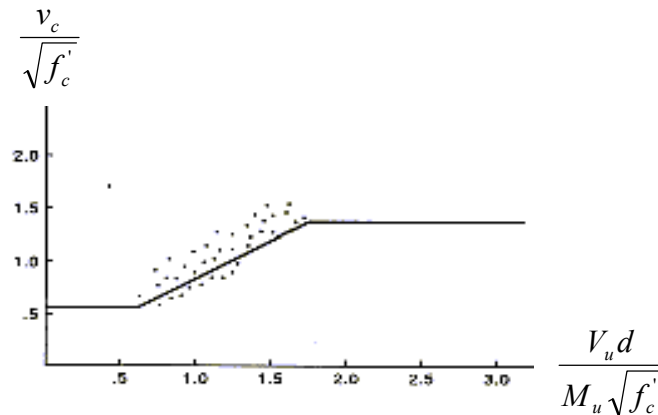
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต
ที่นำเสนอโดย สุธรรม สุริยะมงคล และคณะ (2540)

จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย Hognestad, E. et al. (1955) และที่นำเสนอโดย Park, R., and Paulay, T. (1975) นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย สุธรรม สุริยะมงคล และคณะ (2540) นั้นมีค่าที่ต่างออกไป เพราะว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้มานั้นเหมาะสมกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูง

การเลือกใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น จะทำการสอบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้าก่อน เพราะว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทับหน้านั้นจะมีค่าประมาณ 200 กก./ซม.² ซึ่งถือได้ว่าเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำ

2.7 กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ในกรณีที่แรงดึงประสิทธิผลในลวดอัดแรงมีค่าไม่น้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ของแรงดึงประลัย McGregor, J.G., and Hanson, J.M. (1969) ได้แนะนำสมการในการวิเคราะห์กำลังเฉือน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้



รูปที่ 2.4 กำลังเฉือนตามวิธีของ McGregor, J.G., and Hanson, J.M. (1969)

$$v_c = 0.16\sqrt{f'_c} + 49\frac{V_u d}{M_u} \quad (2.6)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนสูงสุดที่หน้าตัด
 M_u คือ โมเมนต์ดัดสูงสุดที่หน้าตัด
 d คือ ความลึกประสิทธิผลของหน้าตัด
 v_c คือ หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ของคอนกรีต

และ v_c มีค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c}$ และไม่มากกว่า $1.33\sqrt{f'_c}$

Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., William, J., and Finch, W. J. (1995) ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังเฉือนให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีด้วยคอมโพสิตไฟเบอร์กลาส ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีนั้นจะยึดบนพื้นฐานการวิบัติเนื่องจากความเครียดของคอนกรีต จากการทดสอบ 440 ครั้งจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีที่ใช้เป็นตัวอย่างควบคุมนั้น

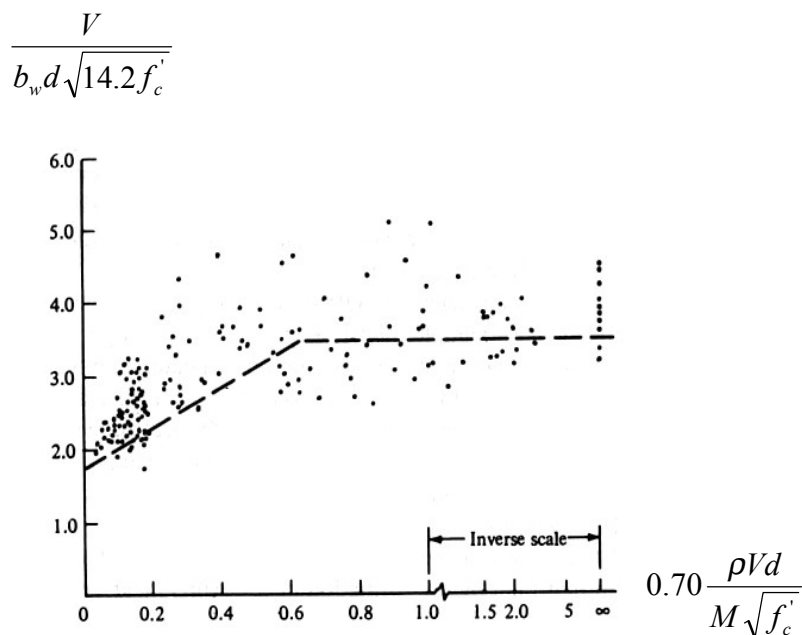
สามารถหาค่ากำลังเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีที่ไม่มีการเสริมกำลังเฉือนได้จากสมการดังนี้

$$V_c = \left(0.504\sqrt{f'_c} + 176\rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.93\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.7)$$

โดยที่ V_c คือ กำลังเฉือนระบุของคานคอนกรีต

ρ คือ อัตราส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที

b_w คือ ความกว้างของเอวคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวที



รูปที่ 2.5 กำลังเฉือนของคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่นำเสนอโดย Chajes, M. J. et al. (1995)

พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะมีอัตราส่วนลวดอัดแรงน้อยมาก ทำให้เทอมที่สองของสมการกำลังเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวทีมีค่าน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้กำลังเฉือนของคานกริตมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงมาก เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากข้อกำหนดการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น สมการที่นำเสนอโดย McGregor, J.G., and Hanson, J.M. (1969) จึงมีความเหมาะสมมากที่สุด ที่จะใช้ในการวิเคราะห์กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมากกว่าสมการที่นำเสนอโดย Chajes, M. J. et al. (1995) ทั้งนี้ก็เพราะว่าสมการดัง

กล่าว จะมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าลึงเนื้อนของคานคองกริตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงในอัตราส่วนที่สูง ซึ่งจะมีส่วนช่วยเสริมกำลังเนื้อนให้กับคานคองกริตเสริมเหล็กด้วย

2.8 หน่วยแรงเนื้อนขวาง

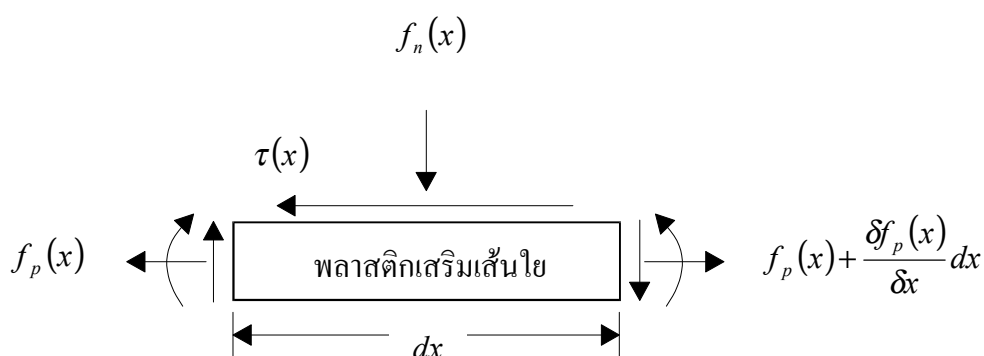
Malek, A. M., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1998) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานคองกริตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย โดยใช้ข้อปอกซีเป็นตัวยึดที่หน้าตัดรับแรงดึงของคานคองกริตเสริมเหล็ก ซึ่งพบว่าคานคองกริตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยนั้น จะเกิดการวิบัติเนื้อนเนื่องจากแรงเนื้อนขวางที่ปลายของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย หน่วยแรงเนื้อนขวางภายในระหว่างพลาสติกเสริมเส้นใยและข้อปอกซีสามารถคำนวณหาได้โดยพิจารณาสมการของส่วนย่อยของพลาสติกเสริมเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หน่วยแรงเนื้อนขวางสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\tau(x) = \frac{df_p(x)}{dx} t_p \quad (2.8)$$

โดยที่ $\tau(x)$ คือ หน่วยแรงเนื้อนขวางในพลาสติกเสริมเส้นใย

$f_p(x)$ คือ หน่วยแรงในพลาสติกเสริมเส้นใย

t_p คือ ความหนาของพลาสติกเสริมเส้นใย



รูปที่ 2.6 หน่วยแรงต่างๆ ที่กระทำต่อส่วนย่อยพลาสติกเสริมเส้นใย

สำหรับพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจะได้

$$\frac{df_p(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_p} \left(\frac{du}{dy} - \frac{dv}{dx} \right) \quad (2.9)$$

โดยที่ u และ v คือ การกระจัดในชั้นของอีพอกซีในแนวระดับและแนวตั้งตามลำดับ
 G_a คือ โมดูลัสเฉือนของอีพอกซี
 x และ y คือ ระยะที่วัดจากแกนสะเทินในทิศทางตามแนวแกนและตั้งฉากกับแกนของพลาสติกเสริมเส้นใยตามลำดับ

สมการเชิงอนุพันธ์ที่เทียบกับ x จะได้

$$\frac{d^2 f_p(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_p} \left(\frac{d^2 u}{dx dy} - \frac{d^2 v}{dx^2} \right) \quad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คัตและระยะการแอ่นตัว เนื่องมาจากการคัตคือ

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{E_c I_{tr}} \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2 u}{dx dy} = \frac{1}{t_a} (\varepsilon_p - \varepsilon_c) \quad (2.12)$$

โดยที่ I_{tr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ที่ทำการแปลงพื้นที่หน้าตัดเป็นคอนกรีต
 t_a คือ ความหนาของอีพอกซี
 ε_p และ ε_c คือ ความเครียดที่ผิวด้านล่างและด้านบนของอีพอกซี

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\frac{d^2 f_p(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_p} \left(\frac{\varepsilon_p}{t_a} - \frac{\varepsilon_c}{t_a} + \frac{M}{E_c I_{tr}} \right) \quad (2.13)$$

ขนาดของเทอมที่ 3 มีน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่นๆ จึงสามารถตัดทิ้งได้ จากสมการ (2.13) จึงเป็นสมการ (2.14) ดังนี้

$$\frac{d^2 f_p(x)}{dx^2} = \frac{G_a}{t_p t_a} (\varepsilon_p - \varepsilon_c) \quad (2.14)$$

โดยที่ $\varepsilon_p = \frac{f_p(x)}{E_p}$ และ

$$\varepsilon_c = \frac{f_c(x)}{E_c}$$

E_p คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกเสริมเส้นใย

$f_c(x)$ คือ หน่วยแรงที่ผิวด้านล่างของคอนกรีต

ซึ่งได้จากสมมติฐานที่ว่าพื้นที่หน้าตัดไม่เกิดการแตกร้าวและจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและพลาสติกเสริมเส้นใย

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของหน่วยแรงในพลาสติกเสริมเส้นใยสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{d^2 f_p(x)}{dx^2} - \frac{G_a f_p(x)}{t_p t_a E_p} = \frac{f_c(x) G_a}{t_a t_p E_c} \quad (2.15)$$

ผลเฉลยของสมการ (2.15) จะได้ดังนี้

$$f_p(x) = d_1 \sinh(\sqrt{Ax}) + d_2 \cosh(\sqrt{Ax}) + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (2.16)$$

โดยที่ $A = \frac{G_a}{t_a t_p E_p}$

$$b_1 = \frac{\bar{y} a_1 E_p}{I_r E_c}$$

$$b_2 = \frac{\bar{y}E_p}{I_p E_c} (2a_1 L_0 + a_2)$$

$$b_3 = E_p \left[\frac{\bar{y}}{I_p E_c} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_p}{G_a} \right]$$

โดยที่ \bar{y} คือ ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย
 d_1, d_2 คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต

จุดเริ่มต้นของ x จะเริ่มตรงจุดปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใย ซึ่งจุดเริ่มต้นของ x_0 สามารถกำหนดขึ้นมาเองได้ และโมเมนต์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$M(x_0) = a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3 \quad (2.17)$$

เพื่อความสะดวกยังสามารถสมมติจุดที่ห่างจากจุดปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใยเป็น L_0 ดังนั้น จะได้

$$x_0 = x + L_0$$

ดังนั้น จึงสามารถหาหน่วยแรงเฉือนได้ดังนี้

$$\tau(x) = t_p \left\{ d_1 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) + d_2 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1 x + b_2 \right\} \quad (2.18)$$

ซึ่งค่า d_1 และ d_2 จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบ เช่น ที่ตำแหน่งปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใย $x = 0$ จะได้

$$f_p(x) = 0 \quad \text{และ} \quad \tau(L_0) = 0 \quad \text{หรือ} \quad \left. \frac{df_p(x)}{dx} \right|_{L_s} = 0 \quad (2.19)$$

โดยที่ L_s คือ ระยะที่วัดจากปลายพลาสติกเสริมเส้นใยไปยังจุดที่แรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์
 L_0 คือ ระยะจากปลายสุดของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของจอร์รองรับ

ดังนั้น จะได้

$$d_1 = \frac{b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}L_s) - 2b_1L_s - b_2}{\sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}L_s)}$$

$$d_2 = -b_3$$

จะเห็นได้ว่า $\sinh(\sqrt{A}L_s)$ และ $\cosh(\sqrt{A}L_s)$ มีค่าเท่ากันและมีขนาดที่ใหญ่มาก เมื่อเทียบกับค่าของเทอมอื่นๆ ดังนั้น จะได้ว่า

$$d_1 = b_3$$

ดังนั้น จะได้หน่วยแรงเฉือนดังนี้

$$\tau(x) = t_p \{ b_3 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) - b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1x + b_2 \} \quad (2.20)$$

สำหรับหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใย $x = 0$

$$\tau_{\max} = t_p (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (2.21)$$

ดังนั้น จะได้แรงเฉือนในคอนกรีตที่ตำแหน่งปลายสุดของพลาสติกเสริมเส้นใยดังนี้

$$V_{cs} = b_p \bar{y}_c t_p (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (2.22)$$

โดยที่ b_p คือ ความกว้างของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย

2.9 ระยะเวลาแอ่นตัว

คุณสมบัติของคอนกรีตมีอิทธิพลสูงต่อพฤติกรรมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัตินี้เหล่านั้นได้แก่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติ

ภาพของคอนกรีต อายุของคอนกรีต ขนาดของหน่วยแรง และอัตราหรือช่วงเวลาของน้ำหนักบรรทุก (ศรีกรีช หิรัญมาศ, 2541) ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างของคอนกรีตทุกครั้ง เพื่อทดสอบหาลำดับอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งจะสามารถหาคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีตได้

ในการคำนวณหาระยะการแอ่นตัวของคานคอนกรีตอัดแรง จะต้องพิจารณาที่สภาวะการแตกร้าวของคานคอนกรีตอัดแรง ซึ่งนิยามโดย Nilson, A. H. (1987) ดังนี้

$$M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c_2} + e \right) \quad (2.23)$$

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g}$$

$$S_2 = \frac{I_g}{c_2}$$

โดยที่	M_{cr}	คือ โมเมนต์แตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
	f_r	คือ โมดูลัสของการแตกหักของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
	S_2	คือ โมดูลัสพื้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
	P_e	คือ แรงอัดประสิทธิผลในลวดอัดแรง
	r	คือ รัศมีจายเรชันของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
	I_g	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
	A_g	คือ พื้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งหมด
	c_2	คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านล่างสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของคอนกรีต
	e	คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางจากจุดศูนย์กลางถ่วงของลวดอัดแรงถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของคอนกรีต

พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เป็นองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดในลักษณะเช่นเดียวกับคานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์ดัดกล่าวทำให้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเกิดการแตกร้าว ดังนั้น กำลังต้านทานการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจึงสามารถหาได้สมการที่นำเสนอโดย Nilson, A. H. (1987)

เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการออกแบบของ ACI ที่กำหนดว่าจะต้องทำการตรวจสอบระยะเวลาการแอ่นตัวขององค์อาคารที่ทำการออกแบบซึ่งจะต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าที่ยอมให้ นอกจากนี้มาตรฐานยอมให้หน่วยแรงดึงของหน้าตัดขณะใช้งานเพิ่มจาก $-1.6\sqrt{f'_c}$ เป็น $-3.2\sqrt{f'_c}$ ถ้าระยะเวลาการแอ่นตัววิเคราะห์จากโมเมนต์ความเค้นยประสิทธิผล และใช้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์คัตและการแอ่นตัวแบบเชิงเส้นคู่ (bilinear) ค่าโมเมนต์ความเค้นยประสิทธิผลคำนวณจาก (ต่อกฎกาญจนาลัย, 2539)

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (2.24)$$

โดยที่ I_e คือ โมเมนต์ความเค้นยประสิทธิผล
 I_g คือ โมเมนต์ความเค้นยของหน้าตัดทั้งหมด
 I_{cr} คือ โมเมนต์ความเค้นยของหน้าตัดแตกแล้วเปลี่ยนรูป
 M_a คือ โมเมนต์คัตสูงสุดในช่วงความยาวประสิทธิผล
 M_{cr} คือ โมเมนต์คัตแตกที่ทำให้หน่วยแรงดึงที่ผิวเท่ากับ โมดูลัสแตกตัวของคอนกรีตเท่ากับ $2.0\sqrt{f'_c}$

2.10 ภาพรวมของปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปประเภทเนื้อตัน นิยมใช้เป็นระบบพื้นคอนกรีตในงานก่อสร้างอาคารประเภทบ้านพักอาศัยและอาคารพาณิชย์เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีอาคารบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนแปลงการใช้งาน เช่น จากบ้านพักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ให้เป็นโกดังเก็บสินค้า เป็นต้น ซึ่งโกดังเก็บสินค้าจะมีน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบสูงกว่าบ้านพักอาศัยและอาคารพาณิชย์ เพื่อให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมกำลังองค์อาคารของอาคารดังกล่าวให้สูงขึ้น การใช้แผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยใช้โอปอกซีเป็นตัวยึดจึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทย ทั้งนี้ก็เพราะว่าสภาพการใช้งานของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นไม่ต้องสัมผัสกับดินหรือถูกแดดฝน และยังสามารถทาสีกันสนิมได้ และหาซื้อได้ง่าย โอปอกซีที่เป็นตัวยึดแผ่นเหล็กเข้ากับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นมีกำลังที่สูงกว่ากำลังของคอนกรีต เพื่อป้องกันการวิบัติที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากโอปอกซี การใช้สติกเกลียวเพื่อเสริมกำลังเนื้อให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปสามารถยึดสติกเกลียวเข้าที่ปลายสุดของแผ่นเหล็กได้โดยตรง ไม่ต้องเสียเวลาในการ

เตรียมอุปกรณ์มากเท่ากับการใช้คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถทำการติดตั้งได้สะดวกเร็ว
ยิ่งขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย Hognestad, E. et
al. (1955) และที่นำเสนอโดย Park, R., and Paulay, T. (1975) มีความเหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มี
กำลังอัดประลัยต่ำเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า แต่อย่างไรก็ตามก่อนการเลือกใช้
แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรง
ของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น จะต้องทำการสอบเทียบความสัม
พันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า กำลังเฉือนของพื้น
คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปสามารถหาได้จากสมการที่นำเสนอโดย McGregor, J.G., and Hanson,
J.M. (1969) เนื่องจากกำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ได้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง
มากที่สุด หน่วยแรงเฉือนขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นจะ
อ้างอิงการคำนวณจากสมการที่นำเสนอโดย Malek, A. M. et al. (1998) เพราะว่าหน่วยแรงเฉือน
ขวางที่เกิดขึ้นกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น มีลักษณะเช่นเดียวกับ
กับหน่วยแรงเฉือนขวางที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้หน่วยแรงเฉือนขวางที่คำนวณ
ได้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง ส่วนการคำนวณหาระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จ
รูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นจะต้องพิจารณาสถานะต่างๆ ที่พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปกำลัง
รับน้ำหนักบรรทุกทุกว่าอยู่ที่ระดับใด นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาที่สภาวะการแตกร้าวของพื้นคอนกรีต
อัดแรงสำเร็จรูปด้วย และกำลังต้านทานการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปสามารถหาได้
จากสมการที่นำเสนอโดย Nilson, A. H. (1987) เพราะว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง
ด้วยแผ่นเหล็กนั้น เป็นองค์อาคารคอนกรีตอัดแรงที่ทำหน้าที่รับโมเมนต์ดัดในลักษณะเช่นเดียวกับ
คานคอนกรีตอัดแรง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เมื่ออาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นระบบพื้นในการก่อสร้างมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนแปลงการใช้อาคารไปจากเดิมที่ออกแบบไว้ เช่น ต้องการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโกดังเก็บสินค้า ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่ออาคารสูงขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การวิบัติขององค์อาคารบางส่วนหรือโดยรวมได้ เพื่อให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไป จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมกำลังองค์อาคารของอาคารดังกล่าวให้มีกำลังสูงขึ้น รวมทั้งงานซ่อมแซมอาคารที่ต้องการยืดอายุการใช้งานหรืออนุรักษ์ไว้เช่น โบราณสถาน เป็นต้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาอย่างจริงจัง ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และเปรียบเทียบกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง เมื่ออยู่ภายใต้การกระทำของแรงดัดและแรงเฉือน จึงเป็นงานวิจัยที่จะต้องได้รับการศึกษา จากสถานการณ์ดังกล่าวจะพบว่ามีข้อจำกัดต่างๆ มากมายที่ทำให้ไม่สามารถออกแบบการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กบนอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงการใช้อาคารไปจากเดิมที่ออกแบบไว้ที่เป็นสถานการณ์จริง

3.1 ข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการทดสอบในสนาม

- 3.1.1) อุปกรณ์การกด อาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ไม่สามารถทำการติดตั้งเครื่องกดแบบไฮดรอลิกได้โดยง่าย เพราะเครื่องกดแบบไฮดรอลิกต้องติดตั้งกับจุดรองรับที่แข็งแรงมาก เพื่อให้การถ่ายแรงจากเครื่องกดแบบไฮดรอลิกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์
- 3.1.2) ฐานรองรับ อาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์จะมีคานทำหน้าที่เป็นฐานรองรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยตรง เมื่อทำการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปคานเดิมซึ่งมีกำลังจำกัดจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ รวมทั้งเสาและฐานรากของอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์จะเกิดการวิบัติได้

- 3.1.3) การควบคุมคุณภาพของตัวอย่างทดสอบ เช่น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทับหน้า เพราะว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตทับหน้าจะมีค่าที่แตกต่างกันตามอายุของอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ทำให้ไม่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ เมื่อต้องการจำนวนตัวอย่างทดสอบหลายๆ ที่อยู่ในกรณีเดียวกัน เพื่อที่จะได้ทำการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนไปได้
- 3.1.4) มาตรฐานควบคุมคุณภาพ ในการออกแบบการทดสอบวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะต้องกระทำภายใต้มาตรฐานที่เป็นสากลหรือกฎหมายที่ใช้ควบคุมการผลิตและมาตรฐานในการออกแบบควบคุมไปได้ด้วย

3.2 แนวคิดที่ทำให้ต้องทำการออกแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

- 3.2.1) เครื่องกดแบบไฮดรอลิก ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มีเครื่องมือกด compression frame machine ที่สามารถติดตั้งเครื่องกดแบบไฮดรอลิกที่มีกำลังทดสอบสูงสุด 25 ตันได้
- 3.2.2) ฐานรองรับ ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มีฐานรองรับโครงสร้างเหล็กที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 25 ตัน ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานรองรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขณะทำการทดสอบได้ทุกกรณีศึกษา นอกจากนั้นยังติดตั้งอยู่บนฐานรากที่มั่นคงแข็งแรง
- 3.2.3) การควบคุมคุณภาพของตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดให้อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันและมีคุณสมบัติตามที่ต้องการตามที่ได้ออกแบบไว้ทั้งหมด จึงจะต้องทำการผลิตตัวอย่างทดสอบให้มีกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทับหน้าที่เท่ากันอย่างสม่ำเสมอ
- 3.2.4) มาตรฐานควบคุมคุณภาพ เพื่อให้การออกแบบตัวอย่างทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตของกระทรวงอุตสาหกรรม จึงต้องทำการออกแบบและควบคุมคุณภาพของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 577-2531) ทั้งนี้ เพราะว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กก็เป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง

จากแนวคิดที่ทำให้ต้องทำการออกแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงได้ทำการออกแบบในห้องปฏิบัติการเพื่อดำเนินการวิจัยการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็กนั้น ขั้นแรกต้องศึกษาพฤติกรรมทางกล (mechanical behavior) และคุณสมบัติทางกล

(mechanical properties) ของวัสดุที่นำมาใช้ก่อนคือ การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า (topping) ภายใต้การกระทำของแรงกดอัด (compressive force) ซึ่งคอนกรีตทับหน้าจะทำหน้าที่รับแรงกดอัดภายในทั้งหมดที่เกิดขึ้น เพื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตทับหน้า ที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองที่จะเลือกใช้ในการวิเคราะห์กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป รวมถึงการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ภายใต้การกระทำของแรงดึง (tension force) หลังจากที่ได้คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุต่างๆ แล้วจึงได้ทำการออกแบบตัวอย่างทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และวางแผนเตรียมตัวอย่างทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3 แผนการศึกษา

ในงานวิจัยนี้การทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- 3.3.1) การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า ภายใต้การกระทำของแรงกดอัด
- 3.3.2) การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ภายใต้การกระทำของแรงดึง
- 3.3.3) ออกแบบตัวอย่างทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก พร้อมทั้งเสนอทฤษฎีที่ใช้อธิบายผลการทดสอบ
- 3.3.4) การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

3.4 การทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด

ในขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบคอนกรีต ที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า ภายใต้การกระทำของแรงกดอัดนั้น เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของสถาบันคอนกรีตอเมริกา (ACI 613-1996 และ ACI 39-1996) ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 3.4.1) กำหนดหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีต
- 3.4.2) ผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่ได้ในข้อ 3.2.1) โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

- 3.4.3) หล่อคอนกรีตเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. เป็นจำนวน 30 ตัวอย่าง
- 3.4.4) ทำการถอดแบบหลังการหล่อคอนกรีต 24 ชม. แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวไปบ่มในถุงพลาสติกที่อ้อมตัวด้วยไอน้ำ โดยทำการฉีดไอน้ำทุกวันจนกระทั่งคอนกรีตมีอายุ 28 วัน
- 3.4.5) นำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบแรงกดอัดด้วยเครื่อง universal testing machine หรือ UTM ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UH-Series มีค่ากำลังทดสอบสูงสุด 200 ตัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยติดตั้งแท่งคอนกรีต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 แล้วทำการทดสอบกำลังอัด และวัดระยะการหดตัว ที่ระดับแรงกระทำต่างๆ เพื่อทำการคำนวณหา หน่วยแรง ความเครียด และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.2 เครื่อง UTM ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UH-Series มีค่ากำลังทดสอบสูงสุด 200 ตัน



รูปที่ 3.3 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดและวัดระยะการหดตัว

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง

เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทำการทดสอบภายใต้การกระทำของแรงดึง ซึ่งประกอบด้วย

- 3.5.1) พิกัดปฏิกิริยา, σ_{pl} (proportional limit)
- 3.5.2) หน่วยแรงคราก, σ_y (yielding stress)
- 3.5.3) โมดูลัสยืดหยุ่น, E (modulus of elasticity)
- 3.5.4) รูปแบบการวิบัติ (mode of failure)

ในการทดสอบนั้น จะทำการเตรียมตัวอย่างแผ่นเหล็กเป็นรูปกระดูกตามมาตรฐาน ASTM A36-1996 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โดยที่แผ่นเหล็กมีความหนา 2.5 และ 5 มม. รวมทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- 3.5.4.1) วัดความกว้าง ความหนา และกำหนดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้เวอร์เนียแคลิเปอร์ (vernier caliper)
- 3.5.4.2) นำตัวอย่างแผ่นเหล็กไปทดสอบแรงดึงกับเครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UH-Series มีค่ากำลังทดสอบสูงสุด 200 ตัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2
- 3.5.4.3) ปรับค่าแรงดึงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM ไปที่ศูนย์
- 3.5.4.4) ทำการทดสอบกำลังดึง และวัดระยะการยืดตัวที่ระดับแรงกระทำต่างๆ โดยทำการเพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ ทำการบันทึกแรงดึง และวัดระยะการยืดตัวของแผ่นเหล็ก เพื่อทำการคำนวณหาหน่วยแรง ความเครียด เพื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับ

ความเครียดของแผ่นเหล็ก ซึ่งจะทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

3.5.4.5) นำตัวอย่างทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ สังเกตตำแหน่งและรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้น

3.5.4.6) นำตัวอย่างทดสอบที่วิบัติแล้วมาต่อกันให้สนิท แล้ววัดความยาวของตัวอย่างทดสอบเมื่อเกิดการวิบัติ

3.5.4.7) ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ในขั้นต้นต่อไป



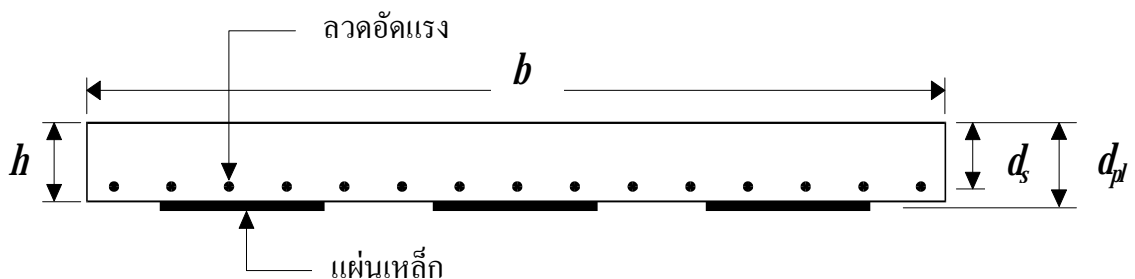
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผ่นเหล็กรูปกระดูก ตามมาตรฐาน ASTM A36-1996

3.6 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

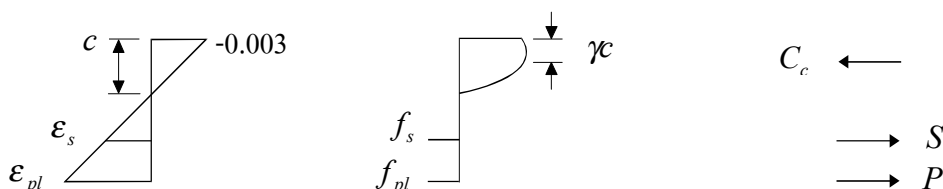
สมมุติฐานของทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก มีดังนี้

- 3.6.1) ระยะเวลาของหน้าตัดก่อนและหลังที่มีการดัดยังคงอยู่ในระยะเดียวกัน
- 3.6.2) ที่สภาวะกำลังใช้งานสูงสุด หน่วยแรงและความเครียดไม่เป็นสัดส่วนต่อกัน
- 3.6.3) ความเครียดในคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน และความเครียดในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กมีค่าเท่ากับหน่วยความเครียดของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกัน (strain compatibility)
- 3.6.4) คอนกรีตไม่รับแรงดึง
- 3.6.5) ความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ สภาวะกำลังใช้งานสูงสุด ที่ผิวด้านบนสุดที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003 ตามมาตรฐานการออกแบบ
- 3.6.6) หน่วยแรงในลวดอัดแรงมีค่ามากที่สุดเท่ากับหน่วยแรงครากในลวดอัดแรง
- 3.6.7) หน่วยแรงในแผ่นเหล็กมีค่ามากที่สุดเท่ากับหน่วยแรงครากในแผ่นเหล็ก

จากรูปหน้าตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปรับน้ำหนักบรรทุกรวมจะเกิดโมเมนต์คดในลักษณะที่ด้านบนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะถูกแรงกดอัด และด้านล่างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะถูกแรงดึง ดังนั้น การกระจายความเครียดของคอนกรีต ลวดอัดแรง และแผ่นเหล็ก จะเป็นไปตามรูปที่ 3.6(ก) ส่วนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลวดอัดแรง และแผ่นเหล็ก สามารถคำนวณหาได้จากทอมของความสัมพันธ์สูงสุดของคอนกรีต ณ สภาวะกำลังใช้งานสูงสุด ที่ผิวด้านบนสุดที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003 หรือแผ่นเหล็กถึงจุดความเครียดคราก โดยสมมุติให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวที่ผิวด้านล่างจนถึงแนวแกนสะเทิน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) และแรงภายในที่กระทำต่อภาคตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.6(ค) ซึ่งนิยามโดย An, W. et al. (1991) ถึงแม้ว่าความเครียดที่จุดวิบัติจะมีค่าแปรเปลี่ยนจาก -0.003 ในคอนกรีตกำลังสูงไปจนถึง -0.005 ในคอนกรีตกำลังต่ำ มาตรฐานการออกแบบกำหนดให้ใช้ค่าความเครียดสูงสุดเป็น -0.003 สำหรับคอนกรีตทุกชนิด



รูปที่ 3.5 หน้าตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก



(ก) การกระจายความเครียด (ข) การกระจายหน่วยแรง (ค) แรงกดอัดและแรงดึง
รูปที่ 3.6 แผนภาพการกระจายความเครียด การกระจายหน่วยแรง และแรงกดอัดและแรงดึงที่กระทำต่อภาคตัดขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

จากความสัมพันธ์ของรูปสามเหลี่ยมคล้ายสามารถคำนวณหาความเครียดที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กได้ดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) \quad (3.2)$$

โดยที่ ε_s คือ ความเครียดในลวดอัดแรง
 c คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงแกนสะเทิน
 d_s คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางของลวดอัดแรง
 ε_{pl} คือ ความเครียดในแผ่นเหล็ก
 d_{pl} คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก

หน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กจะขึ้นอยู่กับความเครียดในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กตามลำดับ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก จะได้ดังนี้

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \quad (3.3)$$

$$f_s = f_{sy} \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_s > \varepsilon_{sy} \quad (3.4)$$

$$f_{pl} = E_{pl} \varepsilon_{pl} \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_{pl} \leq \varepsilon_{ply} \quad (3.5)$$

$$f_{pl} = f_{ply} \quad \text{เมื่อ } \varepsilon_{pl} > \varepsilon_{ply} \quad (3.6)$$

โดยที่ f_s คือ หน่วยแรงในลวดอัดแรง
 E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง
 f_{pl} คือ หน่วยแรงในแผ่นเหล็ก
 E_{pl} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็ก

- ϵ_{sy} คือ ความเครียดครากในลวดอัดแรง
 ϵ_{ply} คือ ความเครียดครากในแผ่นเหล็ก
 f_{sy} คือ หน่วยแรงครากในลวดอัดแรง
 f_{ply} คือ หน่วยแรงครากในแผ่นเหล็ก

แรงดึงในลวดอัดแรง และแรงดึงในแผ่นเหล็ก สามารถคำนวณหาได้จากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\text{โดยที่ } S = f_s A_s \quad (3.7)$$

$$P = f_{pl} A_{pl} \quad (3.8)$$

- โดยที่ S คือ แรงดึงในลวดอัดแรง
 P คือ แรงดึงในแผ่นเหล็ก
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของลวดอัดแรง
 A_{pl} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นเหล็ก

การกระจายหน่วยแรงในคอนกรีตที่รับแรงกดอัด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงกดอัดตามแนวแกน ดังนี้

$$f_c = f_c' \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_0 \quad (3.9)$$

$$f_c = f_c' \left[1 - \frac{0.15}{(0.004 - \epsilon_0)} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right] \quad \text{เมื่อ } \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq 0.003 \quad (3.10)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f_c'}{E_c} \quad (3.11)$$

สำหรับความเครียดสุดท้ายของคอนกรีต และแรงกดอัดในคอนกรีต สามารถแสดงในเทอมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต ซึ่งให้นิยามโดย Park, R., and Paulay, T. (1975) ดังนี้

$$C_c = \alpha f'_c b c \quad (3.12)$$

โดยที่ C_c คือ แรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีต
 α คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต
 b คือ ความกว้างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้เปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด ในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีตนั้น จะสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดเทียบเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด

$$A = \int_0^{\epsilon_{cf}} f'_c d\epsilon_c = \alpha f'_c \epsilon_{cf} \quad (3.13)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต
 ϵ_{cf} คือ ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่สภาวะการใช้งานสูงสุด

จากสมการ (3.13) เป็นค่าที่ได้จากการประมาณการของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต ซึ่งหาได้เป็นช่วงๆ ดังนี้

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_{cf}} f'_c d\epsilon_c}{f'_c \epsilon_{cf}} \quad (3.14)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cf}} - \left[\frac{0.075\varepsilon_{cf} - 0.15\varepsilon_{cf}}{(0.004 - \varepsilon_0)} \right] - \left[\frac{0.075\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{cf}(0.004 - \varepsilon_0)} \right] \quad (3.15)$$

ตำแหน่งของแรงกดอัดของคอนกรีตวัดจากด้านบนสุดของผิวคอนกรีตสามารถแสดงได้ในเทอมของพารามิเตอร์ศูนย์ถ่วงและระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตจนถึงเส้นแนวแรงกดอัดของคอนกรีต จะได้ดังนี้

$$d_c = \gamma c \quad (3.16)$$

โดยที่ d_c คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงเส้นแนวแรงกดอัดของคอนกรีต
 γ คือ พารามิเตอร์ปรับตำแหน่งของแรงกดอัดของคอนกรีต

โมเมนต์ของพื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตรอบจุดกำเนิด จะได้ดังนี้

$$Q = \int_0^{\varepsilon_{cf}} f_c \varepsilon_c d\varepsilon_c = \bar{\varepsilon}_c A \quad (3.17)$$

$$\bar{\varepsilon}_c = (1 - \gamma)\varepsilon_{cf} \quad (3.18)$$

$$Q = \bar{\varepsilon}_c A = (1 - \gamma)\varepsilon_{cf} \int_0^{\varepsilon_{cf}} f_c d\varepsilon_c \quad (3.19)$$

โดยที่ Q คือ โมเมนต์ของพื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตรอบจุดกำเนิด
 $\bar{\varepsilon}_c$ คือ ความเครียดที่จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ใต้เส้นความโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต

พารามิเตอร์ปรับตำแหน่งของแรงกดอัดของคอนกรีตหาได้จากสมการ (3.17) และสมการ (3.19)

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_{cf}} \varepsilon_c f_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_{cf} \int_0^{\varepsilon_{cf}} f_c d\varepsilon_c} \quad (3.20)$$

ในการประมาณค่าผลลัพธ์ของสมการ (3.20) ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ปรับตำแหน่งของแรงกดอัดของคอนกรีตได้

$$\gamma = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\varepsilon_{cf}^2}{2} - \frac{\varepsilon_0^2}{12} + \frac{(0.075\varepsilon_0\varepsilon_{cf}^2 - 0.050\varepsilon_{cf}^3 - 0.025\varepsilon_0^3)}{(0.004 - \varepsilon_0)} \right)}{\varepsilon_{cf} \left(\varepsilon_{cf} - \frac{\varepsilon_0}{3} - \frac{(0.075\varepsilon_{cf}^2 - 0.150\varepsilon_0\varepsilon_{cf} + 0.075\varepsilon_0^2)}{(0.004 - \varepsilon_0)} \right)} \right] \quad (3.21)$$

จากการพิจารณาความสมดุลของแรงในแนวแกนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก พบว่าแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะต้องมีค่าเท่ากับแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก ดังที่แสดงในสมการ (3.22) ต่อไปนี้

$$C_c = S + P \quad (3.22)$$

นอกจากนั้นแล้ว โมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดดังกล่าวจะสามารถหาได้โดยใช้สมการความสอดคล้องของความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 13 (ก) ได้ดังต่อไปนี้

$$M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s) \quad (3.23)$$

โดยที่ M คือ โมเมนต์ที่กระทำบนหน้าตัดพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 d_s คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางของลวดอัดแรง
 d_{pl} คือ ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงจุดศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก

ระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงแกนสะเทิน สามารถหาได้จากสมการ (3.22) และสมการ (3.23)

3.7 กำลังเฉือนสำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเพื่อให้รับแรงเฉือนนั้น พบว่ากำลังเฉือนของคอนกรีตของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งนิยามโดย Nilson, A. T. (1987), McGregore, J.G., and Hanson, J.M. (1969) ดังนี้

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_s}{M_u} \right) b d_s \quad \text{เมื่อ } \frac{V_u d_s}{M_u} \leq 1.00 \quad (3.24)$$

โดยที่ V_c จะต้องใช้ค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c} b d_s$
 V_c มีค่าไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c} b d_s$

3.8 การเสริมกำลังเฉือนให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยสลักเกลียว

จากการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยแรงเฉือนขวางพบว่า การแตกร้าวเกิดขึ้นที่ปลายของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังและเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนขวาง ดังนั้น เพื่อป้องกันการวิบัติในลักษณะดังกล่าว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบเพื่อทำการเสริมกำลังเฉือนให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยสลักเกลียว ที่ตำแหน่งปลายสุดของแผ่นเหล็ก แรงเฉือนที่ตำแหน่งปลายสุดของแผ่นเหล็กที่เกิดจากแรงเฉือนขวาง ซึ่งนิยามโดย Malek, A. M. et al. (1998) ดังนี้

$$V_{cs} = b_{pl} \bar{y}_c t_{pl} (b_1 \sqrt{A} + b_2) \quad (3.25)$$

$$\text{โดยที่ } b_1 = \frac{E_{pl} \bar{y}_c P_t L_0}{I_w E_c}$$

$$b_2 = \frac{E_{pl} \bar{y}_c P_t}{I_w E_c}$$

$$A = \frac{G_a}{t_a t_{pl} E_{pl}}$$

แรงเหวี่ยงรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและแผ่นเหล็กจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ct}^2 = V_u^2 + V_{cs}^2 \quad (3.26)$$

โดยที่ V_{ct} คือ แรงเหวี่ยงรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

แรงเหวี่ยงรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ให้คอนกรีตรับแรงเหวี่ยงส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะต้องทำการออกแบบเพื่อหาขนาดของสลักเกลียวจะได้

$$V_b^2 = V_{cs}^2 + (V_u - 0.5V_c)^2 \quad (3.27)$$

โดยที่ V_b คือ แรงเหวี่ยงที่สลักเกลียวจะต้องรับทั้งหมด

ดังนั้น ขนาดของสลักเกลียวจะสามารถหาได้จากสมการ (3.28)

$$D = 1.20 \sqrt{\frac{V_b}{0.75 f_b \pi}} \quad (3.28)$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสลักเกลียวที่ใช้สำหรับเสริมกำลังเฉือน

f_b คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ข้อมให้ของสลักเกลียว โดยมีส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.20

3.9 ระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

การคำนวณหาระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กในงานวิจัยนี้ ได้สมมติให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะมีค่าไม่คงที่ โดยระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางความยาวประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\Delta = \frac{23P_t L^3}{1296E_c I} \quad \text{เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด} \quad (3.29)$$

$$\Delta = \frac{5wL^4}{384E_c I} \quad \text{เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ} \quad (3.30)$$

โดยที่ $I = I_g$ เมื่อ โมเมนต์น้อยกว่า โมเมนต์แตกร้าของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 $I = I_e$ เมื่อ โมเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ โมเมนต์แตกร้าของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 Δ คือ ระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 w คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำกระจายสม่ำเสมอ

ในการคำนวณหาระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางความยาวประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะต้องพิจารณาที่สภาวะการแตกร้าของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งนิยามโดย Nilson, A. H. (1987) ดังนี้

$$M = M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c_2} + e \right) \quad (3.31)$$

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g} \quad (3.32)$$

$$S_2 = \frac{I_g}{c_2} \quad (3.33)$$

การพิจารณาพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กโดยสมมุติให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าที่ผิวด้านล่างจนถึงแนวแกนสะเทิน เนื่องจากคอนกรีตรับแรงดึงได้น้อยมาก จึงถือว่าลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กทำหน้าที่รับแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Leet, K. M., 1997) ดังนั้น พื้นที่ของคอนกรีตที่ใช้ในการคำนวณคือ ส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินขึ้นไปเท่านั้น และจะสามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัดแตกร้าของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กได้ดังนี้

$$I_{cr} = \frac{1}{3} bc^3 + nA_{pl} (d_{pl} - c)^2 + nA_s (d_s - c)^2 \quad (3.34)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.35)$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.36)$$

- โดยที่ I_{cr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
 n คือ อัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีต
 I_e คือ โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลสำหรับคำนวณหาระยะการแอ่นตัว
 M_a คือ โมเมนต์สูงสุดที่กระทำกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

3.10 สรุปขั้นตอนการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ขั้นตอนในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นสามารถแสดงแผนผังของขั้นตอนต่างๆ ในการออกแบบได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7

ข้อมูลสำหรับการออกแบบได้แก่ คุณสมบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปซึ่งประกอบด้วย f'_c , d_s , A_s , f_{sy} , b , h , e , L , P_t , f_{ply} โดยมีขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้

- 3.10.1) จากสมมติฐานของความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ สภาวะกำลังใช้งานสูงสุด ที่ผิวด้านบนสุดที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003 จะได้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต, α จากสมการ (3.15) และพารามิเตอร์ปรับตำแหน่งแรงกดอัดของคอนกรีต, γ จากสมการ (3.21) ดังนี้

$$\alpha = 1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_{cf}} - \left[\frac{0.075\epsilon_{cf} - 0.15\epsilon_{cf}}{(0.004 - \epsilon_0)} \right] - \left[\frac{0.075\epsilon_0^2}{\epsilon_{cf}(0.004 - \epsilon_0)} \right]$$

$$\gamma = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\epsilon_{cf}^2}{2} - \frac{\epsilon_0^2}{12} + \frac{(0.075\epsilon_0\epsilon_{cf}^2 - 0.050\epsilon_{cf}^3 - 0.025\epsilon_0^3)}{(0.004 - \epsilon_0)} \right)}{\epsilon_{cf} \left(\epsilon_{cf} - \frac{\epsilon_0}{3} - \frac{(0.075\epsilon_{cf}^2 - 0.150\epsilon_0\epsilon_{cf} + 0.075\epsilon_0^2)}{(0.004 - \epsilon_0)} \right)} \right]$$

$$\text{โดยที่ } \epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}$$

3.10.2) จากสมการความสมดุลของแรงในแนวแกน ดังแสดงในสมการ (3.22) และสมการโมเมนต์ภายใน ดังแสดงในสมการ (3.23) ที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ดังนี้

$$C_c = S + P$$

$$M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$$

$$\text{โดยที่ } C_c = \alpha f'_c b c$$

$$S = f_{sy} A_s$$

$$P = f_{ply} A_{pl}$$

คำนวณหาระยะที่วัดจากผิวด้านบนบนสุดของคอนกรีตถึงแกนสะเทินและพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นเหล็กที่ต้องการเสริมกำลัง

ถ้า $A_{pl} \leq 0$ ไม่ต้องทำการเสริมกำลังให้กับพื้น

ถ้า $A_{pl} > 0$ ต้องทำการเสริมกำลังให้กับพื้นด้วยแผ่นเหล็กไม่น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กที่คำนวณได้

3.10.3) ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก ดังนี้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right)$$

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$$

$$f_s = f_{sy} \quad \text{เมื่อ } \epsilon_s > \epsilon_{sy}$$

$$f_{pl} = E_{pl} \epsilon_{pl} \quad \text{เมื่อ } \epsilon_{pl} \leq \epsilon_{ply}$$

$$f_{pl} = f_{ply} \quad \text{เมื่อ } \epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$$

ถ้าหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กไม่ถึงหน่วยแรงครากให้ทำการคำนวณหาระยะที่วัดจากผิวด้านบนสุดของคอนกรีตถึงแกนสะเทินใหม่อีกครั้ง โดยใช้ค่าหน่วยแรงที่ได้จากการตรวจสอบครั้งหลังสุด

- 3.10.4) ตรวจสอบกำลังเฉือนพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยที่กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังนั้นมีดังนี้

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_s}{M_u} \right) b d_s \quad \text{เมื่อ } \frac{V_u d_s}{M_u} \leq 1.00$$

โดยที่ V_c จะต้องใช้ค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c} b d_s$
แต่ไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c} b d_s$

แรงเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีดังนี้

$$V_{cs} = b_{pl} \bar{y}_c t_{pl} (b_1 \sqrt{A} + b_2)$$

โดยที่ $b_1 = \frac{E_{pl} \bar{y}_c P_1 L_0}{I_u E_c}$

$$b_2 = \frac{E_{pl} \bar{y} P_t}{I_r E_c}$$

$$A = \frac{G_a}{t_a t_{pl} E_{pl}}$$

แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและแผ่นเหล็กจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ct} = \sqrt{V_u^2 + V_{cs}^2}$$

แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือให้คอนกรีตรับแรงเฉือนส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะต้องให้สลักเกลียวรับ โดยจะต้องทำการออกแบบเพื่อหาขนาดของสลักเกลียว ซึ่งจะได้ว่า

$$V_b = \sqrt{(V_u - 0.5V_{cs})^2 + V_{cs}^2}$$

ดังนั้น ขนาดของสลักเกลียวจะสามารถหาได้จาก

$$D = 1.20 \sqrt{\frac{V_b}{0.75 f_b \pi}}$$

- 3.10.5) ระยะเวลาแอนตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบในเรื่องเกี่ยวกับการควบคุมการแอนตัว มีข้อกำหนดแค่ในเรื่องของการแอนตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกรวมสถิต ดังนั้น ในการคำนวณหาระยะการแอนตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กในงานวิจัยนี้จะมีข้อกำหนดเฉพาะในเรื่องของน้ำหนักบรรทุกรวมเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางความยาวประสิทธิภาพของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กได้ ดังนี้

$$\Delta = \frac{23 P_t L^3}{1296 E_c I}$$

โดยที่ $I = I_g$ เมื่อโมเมนต์น้อยกว่าโมเมนต์แตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรง
สำเร็จรูป

$I = I_e$ เมื่อโมเมนต์ไม่น้อยกว่าโมเมนต์แตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรง
สำเร็จรูป

ที่สภาวะการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วย
แผ่นเหล็กสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M = M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c_2} + e \right)$$

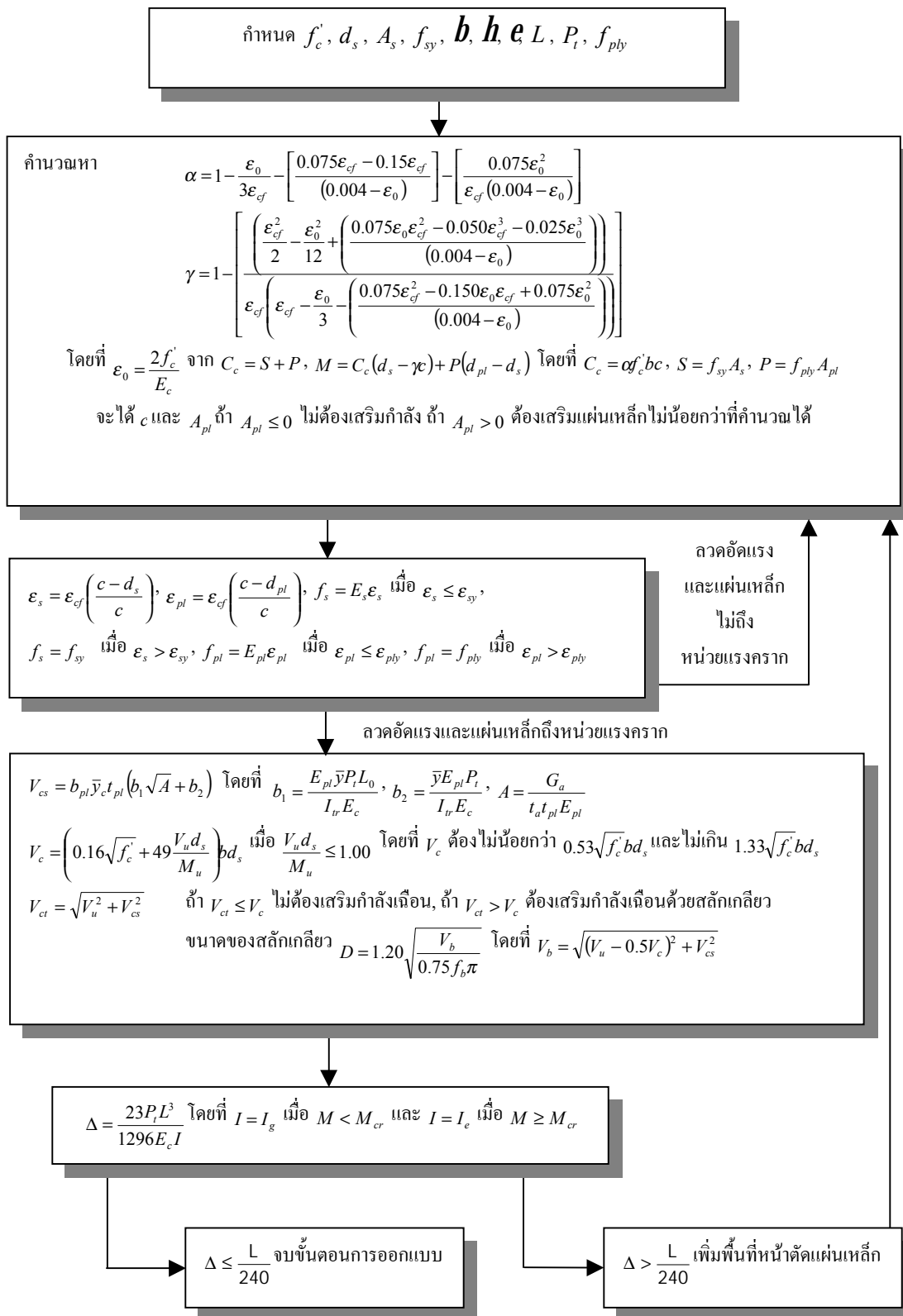
โดยที่ $r^2 = \frac{I_g}{A_g}$

$$S_2 = \frac{I_g}{c_2}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b c^3 + n A_{pl} (d_{pl} - c)^2 + n A_s (d_s - c)^2$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$



รูปที่ 3.7 แผนผังการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

3.11 ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

3.11.1 ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง

ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกรวมสถิต 6,000 กก. โดยพื้นมีความยาวช่วง 4.00 ม. หนา 10 ซม. $f'_c = 250$ กก./ซม.² $d_s = 8$ ซม. $A_s = 1.885$ ซม.² $e = 3$ ซม. $b = 105$ ซม. $f_{sy} = 17500$ กก./ซม.² $f_{ply} = 3600$ กก./ซม.² ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

- 3.11.1.1) กำหนดหา α และ γ จากสมมติฐานของความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ สภาวะกำลังใช้งานสูงสุด ที่ผิวด้านบนสุดที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003 จาก

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} = 15100\sqrt{250} = 238752 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} = \frac{(2)(250)}{(238752)} = 0.00209$$

$$\alpha = 0.757$$

$$\gamma = 0.4058$$

- 3.11.1.2) จากสมการความสมดุลของแรงในแนวแกนและสมการโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กดังนี้

$$C_c = S + P$$

$$M = C_c(d_s - \gamma e) + P(d_{pl} - d_s)$$

$$\text{โดยที่ } C_c = \alpha f'_c b c = (0.757)(250)(105)c = 19871c \text{ กก.}$$

$$S = f_{sy} A_s = (17500)(1.885) = 32988 \text{ กก.}$$

$$P = f_{ply} A_{pl} = 3600 A_{pl} \text{ กก.}$$

$$M = \frac{P_t L}{6} = \frac{(6000)(400)}{(6)} = 400000 \text{ กก.-ชม.}$$

จากสมการทั้งสองสามารถแก้สมการหาค่า c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 2.61 ซม. และ 5.24 ซม.² ตามลำดับ ดังนั้นต้องทำการเสริมกำลังให้กับพื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็กเท่ากับ 5.24 ซม.²

3.11.1.3) ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก ดังนี้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.61 - 8}{2.61} \right) = 0.006195$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.006195)(2040000) = 12638 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$S = A_s f_s = (1.885)(12638) = 23822 \text{ กก.}$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.61 - 10.125}{2.61} \right) = 0.00864$$

$\epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$ หน่วยแรงในแผ่นเหล็กถึงหน่วยแรงคราก

$$f_{pl} = f_{ply} = 3600 \text{ กก./ชม.}^2$$

จาก $C_c = S + P$

จะได้ $19871c = 23822 + 3600A_{pl}$

จาก $M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$ จะได้

$$400000 = 158968c - 8064c^2 + 42226c - 50622$$

แก้สมการจะได้ c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 2.49 ซม. และ 7.13 ซม.²

ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กอีกครั้งจะได้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.49 - 8}{2.49} \right) = 0.00664$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.00664)(2040000) = 13543 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$S = A_s f_s = (1.885)(13543) = 25528 \text{ กก.}$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.49 - 10.125}{2.49} \right) = 0.0092$$

$\epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$ หน่วยแรงในแผ่นเหล็กถึงหน่วยแรงคราก

$$f_{pl} = f_{ply} = 3600 \text{ กก./ซม.}^2$$

จาก $C_c = S + P$

จะได้ $19871c = 25528 + 3600A_{pl}$

จาก $M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$ จะได้

$$400000 = 158968c - 8064c^2 + 42226c - 54247$$

แก้สมการจะได้ c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 2.51 ซม. และ 6.77 ซม.²

ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กอีกครั้งจะได้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.51 - 8}{2.51} \right) = 0.00656$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.00656)(2040000) = 13382 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$S = A_s f_s = (1.885)(13382) = 25226 \text{ กก.}$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.51 - 10.125}{2.51} \right) = 0.0091$$

$\epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$ หน่วยแรงในแผ่นเหล็กถึงหน่วยแรงคราก

$$f_{pl} = f_{ply} = 3600 \text{ กก./ซม.}^2$$

จาก $C_c = S + P$

$$\text{จะได้ } 19871c = 25226 + 3600A_{pl}$$

จาก $M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$ จะได้

$$400000 = 158968c - 8064c^2 + 42226c - 53605$$

แก้สมการจะได้ c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 2.51 ซม. และ 6.85 ซม.²

ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กอีกครั้งจะได้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{2.51 - 8}{2.51} \right) = 0.00656$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.00656)(2040000) = 13382 \text{ กก./ซม.}^2$$

จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงในลวดอัดแรงครั้งหลังสุดมีค่าใกล้เคียงกับครั้งที่ผ่านมามากที่สุด จึงสามารถเลือกใช้แผ่นเหล็กขนาด (0.25)(10)(3) ซม. $A_{pl} = 7.50 \text{ ซม.}^2$

3.11.1.4) ตรวจสอบกำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังมีดังนี้

$$\frac{V_u d_s}{M_u} = \frac{\left(\frac{P_t}{2} \right) d_s}{\left(\frac{P_t L}{6} \right)} = \frac{\left(\frac{6000}{2} \right) (8)}{\left(\frac{(6000)(400)}{(6)} \right)} = 0.06 \leq 1.00$$

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_s}{M_u} \right) b d_s$$

$$V_c = (0.16 \sqrt{250} + 49(0.06))(105)(8) = 4595 \text{ กก.}$$

โดยที่ V_c จะต้องใช้ค่าไม่น้อยกว่า $0.53 \sqrt{f'_c} b d_s$

$$V_c = 0.53\sqrt{250}(105)(8) = 7039 \text{ กก.}$$

$$V_c \text{ มีค่าไม่เกิน } 1.33\sqrt{f'_c}bd_s$$

$$V_c = 1.33\sqrt{250}(105)(8) = 17664 \text{ กก.}$$

ดังนั้น ใช้ $V_c = 7039$ กก.

แรงเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่บริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็กสามารถหาได้ดังนี้

$$b_1 = \frac{E_{pl}\bar{y}P_tL_0}{I_w E_c} = \frac{(2040000)(4.67)(6000)(25)}{(10955)(238752)} \text{ กก./ชม.}^2$$

$$b_1 = 546 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$b_2 = \frac{\bar{y}E_{pl}P_t}{I_w E_c} = \frac{(2040000)(4.67)(6000)}{(10955)(238752)} = 21.85 \text{ กก./ชม.}^3$$

$$A = \frac{G_a}{t_a t_{pl} E_{pl}} = \frac{(2970)}{(0.15)(0.25)(2040000)} = 0.0388 \text{ /ชม.}^2$$

แทนค่าในสมการ $V_{cs} = b_{pl}\bar{y}_c t_{pl} (b_1\sqrt{A} + b_2)$ จะได้

$$V_{cs} = (30)(5)(0.25)(546\sqrt{0.0388} + 21.8) = 4853 \text{ กก.}$$

เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นเหล็กและแรงกระทำภายนอกมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้น แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ct} = \sqrt{V_u^2 + V_{cs}^2}$$

$$V_{ct} = \sqrt{3500^2 + 4853^2} = 5705 < V_c (= 7039) \text{ กก.}$$

แสดงว่าเกิดการวิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง จึงไม่ต้องเสริมกำลังเอ็นด้วยสลักเกลียวให้กับพื้นดังกล่าว

3.11.1.5) ตรวจสอบระยะการเอนตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นสามารถคำนวณหาระยะการเอนตัวที่จุดกึ่งกลางความยาวประสิทธิภาพของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกรวมได้ดังนี้

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g} = \frac{(10955)}{(105)(10)} = 10.43 \text{ ซม.}^2$$

$$S_2 = \frac{I_g}{c_2} = \frac{(10955)}{(0.5)(10)} = 2191 \text{ ซม.}^3$$

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 2\sqrt{250} = 31.62 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c_2} + e \right)$$

$$M_{cr} = (31.62)(2191) + (28038) \left(\frac{(10.43)}{(0.5)(10)} + 3 \right)$$

$$M_{cr} = 211904 < M (= 400000) \text{ กก.-ซม.}$$

ดังนั้น $I = I_e$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{(2040000)}{(238752)} = 8.54$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + nA_{pl}(d_{pl} - c)^2 + nA_s(d_s - c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}(105)(2.51)^3 + (8.54)(7.50)(10.125 - 2.51)^2$$

$$+ (8.54)(1.885)(8 - 2.51)^2$$

$$I_{cr} = 4755 \text{ ซม.}^4$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$$

$$I_e = \left(\frac{211904}{400000}\right)^3 (10955) + \left[1 - \left(\frac{211904}{400000}\right)^3\right] (4755)$$

$$I_e = 5677 \leq I_g (= 10955) \text{ ซม.}^4$$

จะได้ $\Delta = \frac{23P_t L^3}{1296 E_c I} = \frac{(23)(6000)(400)^3}{(1296)(238752)(5677)} = 5.03 \text{ ซม.}$

$$\Delta > \frac{L}{240} (= 1.67) \text{ ซม.}$$

จากผลการคำนวณพบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะเกิดการวิบัติขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไป กำหนด เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจะต้องทำการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กเป็น 42.00 ซม.² หลังจากตรวจสอบระยะการแอ่นตัวพบว่ามีความน้อยกว่าระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขั้นตอนในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นมีขั้นตอนมากมาย ดังนั้น เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งานจริงในทางปฏิบัติจึงได้มีการเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบ

และได้ทำการแสดงผลการใช้โปรแกรมในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.11.2 ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด

ตัวอย่างการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกรวม 11000 กก. โดยพื้นมีความยาวช่วง 4.00 ม. หนา 10 ซม. $f'_c = 250$ กก./ซม.² $d_s = 8$ ซม. $A_s = 1.885$ ซม.² $e = 3$ ซม. $b = 105$ ซม. $f_{sy} = 17500$ กก./ซม.² $f_{py} = 3600$ กก./ซม.² ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

3.11.2.1) กำหนดหา α และ γ จากสมมติฐานของความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ สถานะกำลังใช้งานสูงสุด ที่ผิวด้านบนสุดที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ -0.003 จาก

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} = 15100\sqrt{250} = 238752 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} = \frac{(2)(250)}{(238752)} = 0.00209$$

$$\alpha = 0.757$$

$$\gamma = 0.4058$$

3.11.1.2) จากสมการความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกนและสมการโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กดังนี้

$$C_c = S + P$$

$$M = C_c (d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$$

โดยที่ $C_c = \alpha f'_c b c = (0.757)(250)(105)c = 19871c$ กก.

$$S = f_{sy} A_s = (17500)(1.885) = 32988 \text{ กก.}$$

$$P = f_{ply} A_{pl} = 3600 A_{pl} \text{ กก.}$$

$$M = \frac{P_t L}{6} = \frac{(11000)(400)}{(6)} = 733333 \text{ กก.-ชม.}$$

จากสมการทั้งสองสามารถแก้สมการหาค่า c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 4.93 ซม. และ 18.02 ซม.² ตามลำดับ ดังนั้นต้องทำการเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็กเท่ากับ 18.02 ซม.²

3.11.1.3) ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็ก ดังนี้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{4.93 - 8}{4.93} \right) = 0.00187$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (2040000)(0.00187) = 3815 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$S = A_s f_s = (1.885)(3815) = 7191 \text{ กก.}$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{4.93 - 10.125}{4.93} \right) = 0.00177$$

$\epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$ หน่วยแรงในแผ่นเหล็กถึงหน่วยแรงคราก

$$f_{pl} = f_{ply} = 3600 \text{ กก./ชม.}^2$$

จาก $C_c = S + P$

จะได้ $19871c = 7190.898 + 3600A_{pl}$

จาก $M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s)$ จะได้

$$733333 = 158968c - 8064c^2 + 44710c - 16180$$

แก้สมการจะได้ c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 4.47 ซม. และ 22.68 ซม.²

ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กอีกครั้งจะได้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{4.47 - 8}{4.47} \right) = 0.00237$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.00237)(2040000) = 4839 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$S = A_s f_s = (1.885)(4839) = 9114 \text{ กก.}$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_{pl}}{c} \right) = (-0.003) \left(\frac{4.47 - 10.125}{4.47} \right) = 0.00388$$

$\epsilon_{pl} > \epsilon_{ply}$ หน่วยแรงในแผ่นเหล็กถึงหน่วยแรงคราก

$$f_{pl} = f_{ply} = 3600 \text{ กก./ชม.}^2$$

จาก $C_c = S + P$

$$\text{จะได้ } 19871c = 9114 + 3600A_{pl}$$

$$\text{จาก } M = C_c(d_s - \gamma c) + P(d_{pl} - d_s) \quad \text{จะได้}$$

$$466667 = 158968c - 8064c^2 + 44710c - 20506$$

แก้สมการจะได้ c และ A_{pl} ได้เท่ากับ 4.50 ซม. และ 22.33 ซม.²

ตรวจสอบหน่วยแรงในลวดอัดแรงและแผ่นเหล็กอีกครั้งจะได้

$$\epsilon_s = \epsilon_{cf} \left(\frac{c - d_s}{c} \right) = -0.003 \left(\frac{4.50 - 8}{4.50} \right) = 0.00233$$

$\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ หน่วยแรงในลวดอัดแรงไม่ถึงหน่วยแรงคราก

$$f_s = E_s \epsilon_s = (0.00233)(2040000) = 4753 \text{ กก./ซม.}^2$$

จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงในลวดอัดแรงครั้งหลังสุดมีค่าใกล้เคียงกับครั้งที่ผ่านมามากที่สุด จึงสามารถเลือกใช้แผ่นเหล็กขนาด (0.50)(15)(3) ซม. $A_{pl} = 22.50$ ซม.²

3.11.1.4) ตรวจสอบกำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังมีดังนี้

$$\frac{V_u d_s}{M_u} = \frac{\left(\frac{P_l}{2} \right) d_s}{\left(\frac{P_l L}{6} \right)} = \frac{\left(\frac{11000}{2} \right) (8)}{\left(\frac{(11000)(400)}{(6)} \right)} = 0.06 \leq 1.00$$

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_s}{M_u} \right) b d_s$$

$$V_c = (0.16\sqrt{250} + (49)(0.06))(105)(8) = 4595 \text{ กก.}$$

โดยที่ V_c จะต้องใช้ค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c} b d_s$

$$V_c = 0.53\sqrt{250}(105)(8) = 7039 \text{ กก.}$$

V_c มีค่าไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c} b d_s$

$$V_c = 1.33\sqrt{250}(105)(8) = 17664 \text{ กก.}$$

ดังนั้น ใช้ $V_c = 7039 \text{ กก.}$

แรงเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่บริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็กสามารถหาได้ดังนี้

$$b_1 = \frac{E_{pl} \bar{y} P_t L_0}{I_r E_c} = \frac{(2040000)(4.16)(11000)(25)}{(16861)(238752)} \text{ กก./ซม.}^2$$

$$b_1 = 579.73 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$b_2 = \frac{\bar{y} E_{pl} P_t}{I_r E_c}$$

$$b_2 = \frac{(2040000)(4.16)(11000)}{(16861)(238752)} = 23.19 \text{ กก./ซม.}^3$$

$$A = \frac{G_a}{t_a t_{pl} E_{pl}} = \frac{(2970)}{(0.20)(0.50)(2040000)} = 0.0146 \text{ /ซม.}^2$$

แทนค่าในสมการ $V_{cs} = b_{pl} \bar{y}_c t_{pl} (b_1 \sqrt{A} + b_2)$ จะได้

$$V_{cs} = (45)(5)(0.50)(579.73\sqrt{0.0146} + 23.19)$$

$$V_{cs} = 10477 \text{ กก.}$$

เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากแผ่นเหล็กและแรงกระทำภายนอกมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้น แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{ct} = \sqrt{V_u^2 + V_{cs}^2}$$

$$V_{ct} = \sqrt{5500^2 + 10477^2} = 11833 \text{ กก.}$$

$$V_{ct} > V_c (= 7039) \text{ กก.}$$

แสดงว่าเกิดการวิบัติเนื่องจากการเฉือน จึงต้องเสริมกำลังเฉือนด้วยสลักเกลียวให้กับพื้นดังกล่าว แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือให้คอนกรีตรับแรงเฉือนส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะต้องให้สลักเกลียวรับ โดยจะต้องทำการออกแบบเพื่อหาขนาดของสลักเกลียวจะได้ว่า

$$V_b = \sqrt{(V_u - 0.5V_c)^2 + V_{cs}^2}$$

$$V_b = \sqrt{(5500 - (0.5)(7039))^2 + (10477)^2} = 10663 \text{ กก.}$$

ดังนั้น ขนาดของสลักเกลียวจะได้

$$D = 1.20 \sqrt{\frac{V_b}{0.75 f_b \pi}} = 1.20 \sqrt{\frac{(10663)}{(0.75)(1970)\pi}} = 1.82 \text{ ซม.}$$

สลักเกลียว A490 เกลียวอยู่ในระนาบเอียง $f_b = 1970$ กก./ชม.²
เลือกใช้สลักเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.00 ซม.

3.11.2.5) ตรวจสอบระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นสามารถคำนวณหาระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางความยาวประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกรวมได้ดังนี้

$$r^2 = \frac{I_g}{A_g} = \frac{(16861)}{(105)(10)} = 16.06 \text{ ซม.}^2$$

$$S_2 = \frac{I_g}{c_2} = \frac{(16861)}{(0.5)(10)} = 3372 \text{ ซม.}^3$$

$$f_r = 2\sqrt{f'_c} = 2\sqrt{250} = 31.62 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c_2} + e \right)$$

$$M_{cr} = (31.62)(3372) + (28038) \left(\frac{(16.06)^2}{(0.5)(10)} + 3 \right)$$

$$M_{cr} = 280794 < M (= 733333) \text{ กก.-ชม.}$$

ดังนั้น $I = I_e$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{(2040000)}{(238752)} = 8.54$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + nA_{pl}(d_{pl} - c)^2 + nA_s(d_s - c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}(105)(4.50)^3 + (8.54)(22.50)(10.125 - 4.50)^2$$

$$+ (8.54)(1.885)(8 - 4.50)^2$$

$$I_{cr} = 9742 \text{ ซม.}^4$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr}$$

$$I_e = \left(\frac{280794}{733333}\right)^3 (16861) + \left[1 - \left(\frac{280794}{733333}\right)^3\right] (9742)$$

$$I_e = 10142 \leq I_g (= 16861) \text{ ซม.}^4$$

$$\text{จะได้ } \Delta = \frac{23P_t L^3}{1296 E_c I} = \frac{(23)(11000)(400)^3}{(1296)(238752)(10142)} = 5.16 \text{ ซม.}$$

$$\Delta > \frac{L}{240} (= 1.67) \text{ ซม.}$$

จากผลการคำนวณจะพบว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะเกิดการวิบัติขึ้นเนื่องจากการแอ่นตัวมากเกินไปเกินข้อกำหนด เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดจะต้องทำการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กเป็น 130.00 ตร.ซม. หลังจากตรวจสอบระยะเวลาการแอ่นตัวพบว่า มีค่าน้อยกว่าระยะเวลาการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ และได้ทำการแสดงผลการใช้โปรแกรมในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้เกิดโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการใช้โปรแกรมออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติโดยการดัดที่ผิวรับแรงดึง

f_c, ksc	d_s, cm	d_{pl}, cm	E_s, ksc	A_s, cm^2	E_{pl}, ksc	b, cm	h, cm
250	8	10.125	2,040,000	1.885	2,040,000	105	10

f_{sy}, ksc	17500	13,386	No yield	e, cm	L, cm	P_t, kg	E_c, ksc
f_{ply}, ksc	3600	18,567	yield	3	400	6000	238,752

N	$M_{cr}, \text{kg-cm}$	I_e, cm^4	$P(e), \text{kg}$	$M_u, \text{kg-cm}$	V_u, kg	A_{pl}, cm^2	\bar{y}, cm
8.54	211,904	5,677	28,038	400,000	3,000	7.50	4.67

I_g, cm^4	S2	f_r	r^2	ϵ_0	V_{uds}/M_u	1	c, cm
10,955	2,191	31.62	10.43	0.00209	0.06	0.06	2.51

V_{c1}	min	max	V_c, kg	α	γ	0.000004	I_{cr}, cm^4
4,595	7,039	17,664	7,039	0.757	0.406	0.000007	4,755

ϵ_{sy}	ϵ_{ply}	L_0, cm	G_a, ksc	$b(pl), \text{cm}$	t_a, cm	t_{pl}, cm	f_b, ksc
0.00858	0.00185	25	2970	30	0.15	0.25	1970

B1	b2	A	V_{cs}, kg	V_{ct}, kg	V_b	D, cm	I, cm^4
546.0	21.8	0.0388	4,853	5,705	0.00	0.00	5,677

Δ, cm	Δ, max	try A_{pl} again	\bar{y}, cm	I_g, cm^4	I_{cr}, cm^4	I_e, cm^4	Δ, cm
5.03	1.67	42.00	3.68	17,221	21,849	17,221	1.66

ตารางที่ 3.2 ผลการใช้โปรแกรมออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติโดยการดัดที่ผิวรับแรงกดอัด

f_c , ksc	d_s ,cm	d_{pl} ,cm	E_s , ksc	A_s ,cm ²	E_{pl} , ksc	b ,cm	h ,cm
250	8	10.25	2,040,000	1.885	2,040,000	105	10

f_{sy} , ksc				e ,cm	L ,cm	P_t ,kg	E_c ,ksc
	17,500	4,749	No yield				
f_{ply} , ksc	3,600	7,806	yield	3	400	11,000	238,752

N	M_{cr} ,kg-cm	I_e ,cm ⁴	$P(e)$, kg	M_u , kg-cm	V_u , kg	A_{pl} ,cm ²	\bar{y} ,cm
8.54	280,794	10,142	28,038	733,333	5,500	22.50	4.16

I_g ,cm ⁴	S_2	f_r	r^2	ϵ_0	V_{uds}/M_u	l	c ,cm
16,861	3,372	31.62	16.06	0.00209	0.06	0.06	4.50

V_{c1}	Min	max	V_c ,kg	α	γ	0.000004	I_{cr} ,cm ⁴
4,595	7,039	17,664	7,039	0.757	0.406	0.000007	9,742

ϵ_{sy}	ϵ_{ply}	L_0 ,cm	G_a ,ksc	$b(pl)$,cm	t_a ,cm	t_{pl} ,cm	f_b ,ksc
0.00858	0.00185	25	2970	45	0.20	0.50	1970

B_1	b_2	A	V_{cs} ,kg	V_{ct} ,kg	V_b	D ,cm	I ,cm ⁴
579.7	23.2	0.0146	10,477	11,833	10,663	1.82	10,142

Δ ,cm	Δ ,max	try A_{pl} again	\bar{y} ,cm	I_g ,cm ⁴	I_{cr} ,cm ⁴	I_e ,cm ⁴	Δ ,cm
5.16	1.67	130.00	2.30	31,165	40,064	31,165	1.67

3.12 การทดสอบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก

3.12.1 ตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบนี้เราจะทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มี การเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ เพื่อศึกษากำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้น และรูปแบบการวิบัติในลักษณะต่างๆ หลังจากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป โดยตัวอย่างทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 4 กลุ่ม ดังนี้

- (1) พื้นที่ไม่มีการเสริมกำลังเป็นพื้นควบคุม
- (2) พื้นที่ออกแบบให้วิบัติโดยการค้ำที่ผิวรับแรงดึง
- (3) พื้นที่ออกแบบให้วิบัติโดยแรงเฉือนขวาง
- (4) พื้นที่ออกแบบให้วิบัติโดยการค้ำที่ผิวรับแรงกดอัด

โดยที่แต่ละกลุ่มของตัวอย่างทดสอบ จะทำการทดสอบที่ความยาวประสิทธิภาพเท่ากับ 3.00 ม. 3.50 ม. และ 4.00 ม. และในแต่ละช่วงความยาวประสิทธิภาพจะทำการทดสอบ 2 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

3.13 การเตรียมตัวอย่างระบบพื้นคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.13.1) เตรียมชิ้นส่วนพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวอย่างประกอบเป็นระบบพื้น โดยใช้แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจำนวน 3 แผ่นเรียงกัน
- 3.13.2) สำหรับตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น จะต้องทำความสะอาดผิว โดยทำการขัดผิวเหล็ก และพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยกระดาษทรายให้เรียบร้อยก่อนทำการยึดด้วยอ็อปอกซี
- 3.13.3) วิธีประกอบติดตั้งตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป จะทำการปรับระดับหลังคานาให้เรียบร้อยก่อนจะวางชิ้นส่วนคอนกรีตตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
- 3.13.4) ติ้ไม้แบบรอบทุกด้านของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ก่อนที่จะทำการเทคอนกรีตทับหน้า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 โดยจัดให้ไม้แบบมีความสูงเท่ากับความสูงของคอนกรีตทับหน้า

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

กลุ่มพื้นคอนกรีต อัดแรงสำเร็จรูป	ขนาดแผ่นเหล็ก ที่เสริมกำลัง (ยาว)(กว้าง)(หนา)(จำนวน)	ช่วงความยาว ประสิทธิผล (ม.)	รูปแบบการวิบัติ ที่ได้จากการคำนวณ
S1, S2	ไม่มี	3	เกิดการวิบัติ โดยการตัด ที่ผิวรับแรงดึง
S3, S4	ไม่มี	3.5	
S5, S6	ไม่มี	4	
S7, S8	(240)(10)(0.25)(3) ซม.	3	เกิดการวิบัติ โดยการตัด ที่ผิวรับแรงดึง
S9, S10	(300)(10)(0.25)(3) ซม.	3.5	
S11, S12	(350)(10)(0.25)(3) ซม.	4	
S13, S14	(240)(15)(0.5)(3) ซม.	3	เกิดการวิบัติ โดยแรงเฉือนขวาง
S15, S16	(300)(15)(0.5)(3) ซม.	3.5	
S17, S18	(350)(15)(0.5)(3) ซม.	4	
S19, S20	(240)(15)(0.5)(3) ซม.*	3	เกิดการวิบัติ โดยการตัด ที่ผิวรับแรงกดอัด
S21, S22	(300)(15)(0.5)(3) ซม.*	3.5	
S23, S24	(350)(15)(0.5)(3) ซม.*	4	

หมายเหตุ เครื่องหมาย * หมายถึง พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังเนื่องด้วยสลักเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. โดยทำการยึดที่จุดปลายสุดของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลัง



รูปที่ 3.8 การเตรียมชิ้นส่วนพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นระบบพื้น

- 3.13.5) ทำความสะอาดพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปไม่ให้มีเศษวัสดุแปลกปลอม เช่น ผงซีเมนต์ เป็นต้น
- 3.13.6) ผสมคอนกรีต โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต
- 3.13.7) เทคอนกรีตทับหน้าหนา 5 ซม. โดยเทอย่างต่อเนื่องกันตลอดทั้งพื้นที่
- 3.13.8) ทำการเก็บตัวอย่างของคอนกรีตทับหน้า เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัย เป็นรูปทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ยาว 30 ซม. ทุกครั้งที่ทำการเทคอนกรีตทับหน้า โดยเดิมคอนกรีตลงแบบหล่อเป็นจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน ใช้เหล็กกระทุ้งแต่ละชั้น 25 ครั้ง โดยให้กระจายทั่วพื้นที่ผิวอย่างสม่ำเสมอ
- 3.13.9) ทำการถอดแบบหลังจากเทคอนกรีตทับหน้า 24 ชม. ทั้งระบบพื้น และตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อ
- 3.13.10) ในการบ่มระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้น จะใช้กระสอบชุ่มน้ำคลุมตลอดเป็นเวลา 28 วัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.9
- 3.13.11) ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อเพื่อทดสอบกำลังอัดประลัยนั้น จะทำการบ่มโดยการแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 แล้วทำการทดสอบหาลำลังอัดประลัย
- 3.13.12) ทำการทดสอบหาลำดับรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปต่อไป



รูปที่ 3.9 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่บ่มด้วยกระสอบชุมน้ำ



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตทับหน้าที่บ่มโดยการแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัว

3.14 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.14.1) อุปกรณ์การกด โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด โดยใช้เครื่องกดแบบไฮดรอลิก (hydraulic) มีค่ากำลังทดสอบสูงสุดเท่ากับ 25 ตัน ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องมือกด compression frame machine ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์การกดที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องมือกด compression frame machine

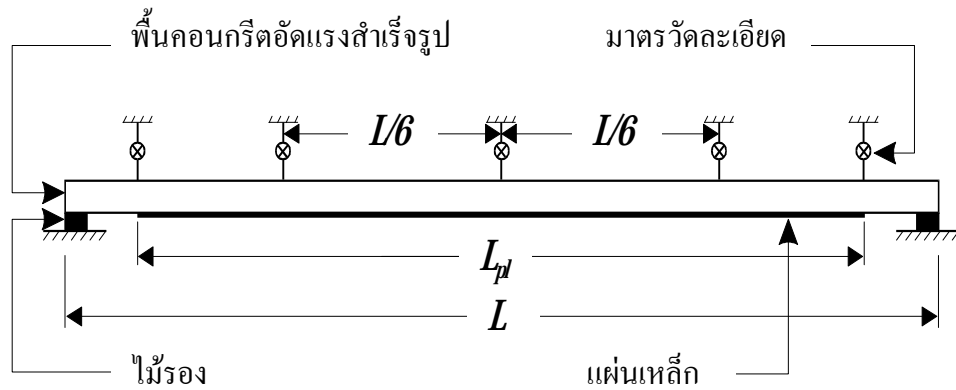
- 3.14.2) ดิจิตอลวัดความดันละเอียด (digital pressure gauge) ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model DGP/10000 psi ซึ่งติดตั้งร่วมกับเครื่องสูบลไฮดรอลิก (hydraulic pump) ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model No. PUJ1400E ซึ่งสามารถเพิ่มแรงกดได้อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.12
- 3.14.3) มาตรวัดละเอียด (dial gauge) ซึ่งเป็นมาตรวัดระยะการแอ่นตัวที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.01 มม.
- 3.14.4) ฐานรองรับ มีความมั่นคงแข็งแรง และอยู่ห่างกันเท่ากับความยาวประสิทธิผลของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่จะทำการทดสอบ



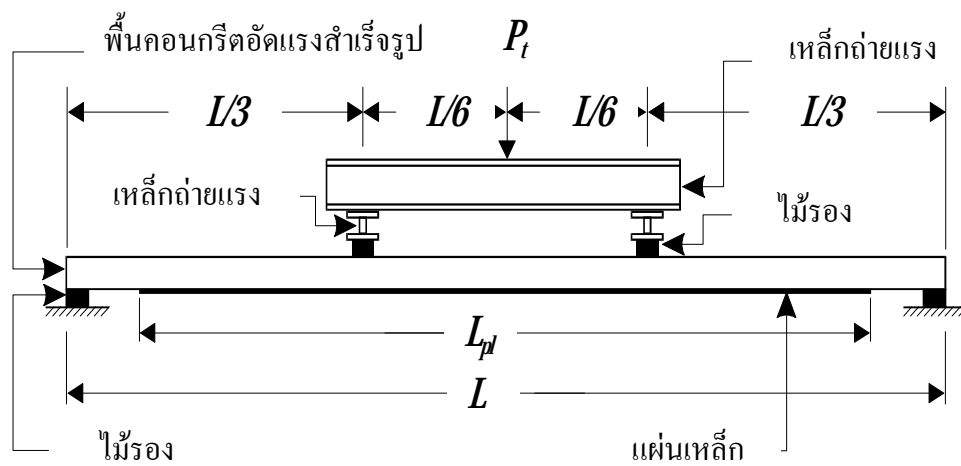
รูปที่ 3.12 ดิจิตอลวัดความดันละเอียดยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model DGP/10,000 psi และเครื่องสูบลไฮดรอลิก ยี่ห้อ ENERPAC รุ่น Model No. PUJ1400E

3.15 วิธีทดสอบ

- 3.15.1) ในการทดสอบหากำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้น จะวางตัวอย่างที่จะทำการทดสอบบนฐานรองรับ ซึ่งเป็นฐานรองรับที่เตรียมไว้ โดยให้ได้ระยะห่างระหว่างฐานรองรับเท่ากับความยาวช่วงตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.3
- 3.15.2) ติดตั้งมาตรวัดละเอียด ที่ระยะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เพื่อวัดค่าการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป
- 3.15.3) ตั้งกล้องที่โอดิไลท์ (theodolite) เพื่ออ่านระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจากมาตรวัดละเอียด
- 3.15.4) ทำการตั้งศูนย์ระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มาตรวัดละเอียด
- 3.15.5) แบ่งความยาวของพื้นที่ที่จะทำการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน คือ ที่ระยะ $L/3$ และ $2L/3$ วางไม้แผ่นในแนวขวางกับความยาวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ตำแหน่งดังกล่าว หลังจากนั้นวางเหล็กรูปตัวไอบนไม้แผ่น เพื่อถ่ายแรงให้เป็นเส้นตรง
- 3.15.6) ทำการวางเหล็กรูปตัวไออีกตัวตรงจุดกึ่งกลางของเหล็กรูปตัวไอทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.14
- 3.15.7) ทำการตั้งศูนย์ไฮดรอลิกส์ถ่ายแรง
- 3.15.8) ดำเนินการทดสอบ โดยเพิ่มแรงอย่างช้าๆ โดยใช้เครื่องสูบลูกสูบไฮดรอลิกและบันทึกระยะการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป (ความดันที่อ่านได้จากดิจิตอลวัดความดันละเอียด สามารถแปลงเป็นแรงกระทำได้โดยใช้สมการที่แนบไว้ในภาคผนวก)
- 3.15.9) ทำการทดสอบ จนกระทั่งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเกิดการแอ่นตัวที่ระยะ 5 ซม. ซึ่งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเกิดการวิบัติแล้ว จึงหยุดการให้แรง ซึ่งจะสังเกตได้จากระยะการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำหนักบรรทุกรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- 3.15.10) เมื่อทำการปล่อยแรงหมดแล้วจึงทำการเปลี่ยนตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งที่ติดตั้งมาตรวัดละเอียด



รูปที่ 3.14 การติดตั้งพื้นที่คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเข้ากับอุปกรณ์ถ่ายแรง

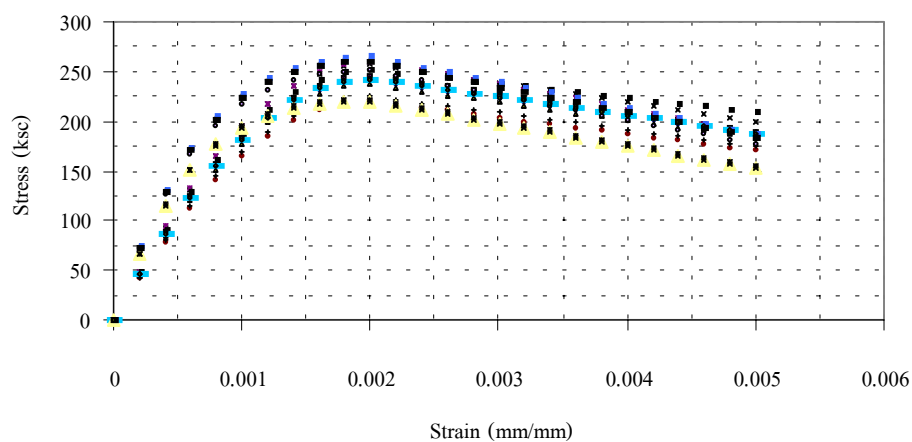
บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดสอบหาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีต เพื่อทำการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า การทดสอบหาพฤติกรรมทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป และการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ และผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

4.1 ผลการทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด

จากการทดสอบหาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จำนวน 18 ตัวอย่าง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตโดยเฉลี่ย มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากกราฟดังกล่าวสามารถแบ่งพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของคอนกรีตออกได้เป็นสองช่วงดังนี้คือ ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จนกระทั่งค่าความเครียดของคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.002 ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกราฟ หลังจากนั้นคอนกรีตจะมีอัตราการลดลงของหน่วยแรงอย่างรวดเร็ว เมื่อคอนกรีตมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น



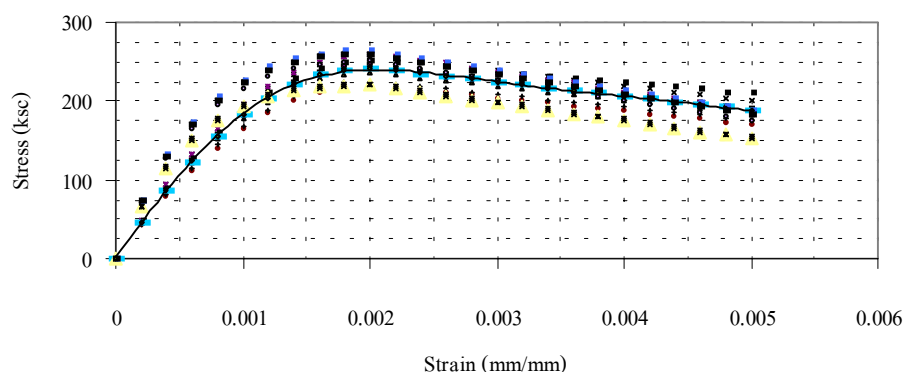
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต

นอกจากนั้นยังพบว่า คอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกัน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ารอยแตกร้าวของคอนกรีตทำมุมประมาณ 60 องศากับแนวระดับ



รูปที่ 4.2 คอนกรีตที่เกิดการวิบัติ เมื่อได้รับแรงกดอัด

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตตามทฤษฎี พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับสมการตามทฤษฎี ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตตามทฤษฎีสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าล้างของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กได้

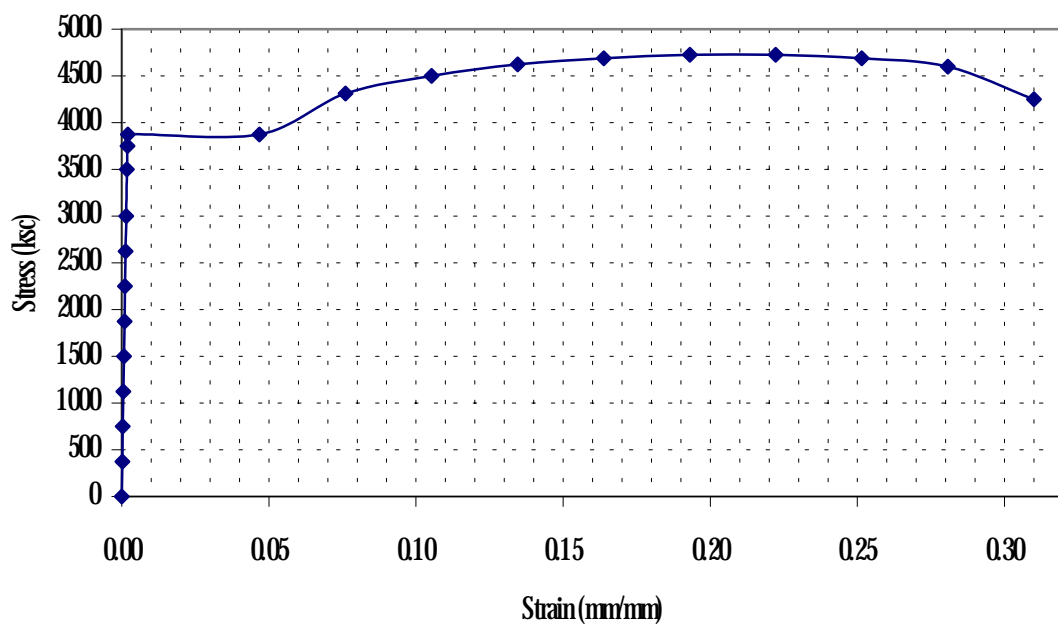


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกับสมการตามทฤษฎี

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง

จากการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้การกระทำของแรงดึง เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป จำนวน 6 ตัวอย่าง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแผ่นเหล็กโดยเฉลี่ย มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4 และสามารถสรุปผลจากการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้การกระทำของแรงดึง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจะพบว่า พิกัดปฏิภาคมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,750 กก./ชม.² หน่วยแรงครากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,877 กก./ชม.² โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,042,000 กก./ชม.² จากทั้งแผ่นเหล็กที่มีความหนา 2.5 มม. และ 5 มม.

นอกจากนั้นยังพบว่า แผ่นเหล็กทั้งหมดที่ทำการทดสอบเกิดคอคอดขึ้นตรงบริเวณกึ่งกลางความยาวระหว่างหัวจับก่อนเกิดการวิบัติ และแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นรอยฉีกขาดเอียงเป็นมุมประมาณ 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแผ่นเหล็ก

ความหนาชิ้นงาน (มม.)	ชิ้นงานที่	พิสัยปฏิกิริยา (กก./ซม. ²)	หน่วยแรงคราก (กก./ซม. ²)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)
	1	3,752	3,875	2,040,816
2.5	2	3,744	3,759	1,979,592
	3	3,755	4,030	2,122,449
	1	3,749	4,011	2,112,245
5	2	3,756	3,947	2,078,571
	3	3,746	3,643	1,918,367
ค่าเฉลี่ย		3,750	3,877	2,042,007



รูปที่ 4.5 แผ่นเหล็กที่เกิดการวิบัติ เมื่อได้รับแรงดึง

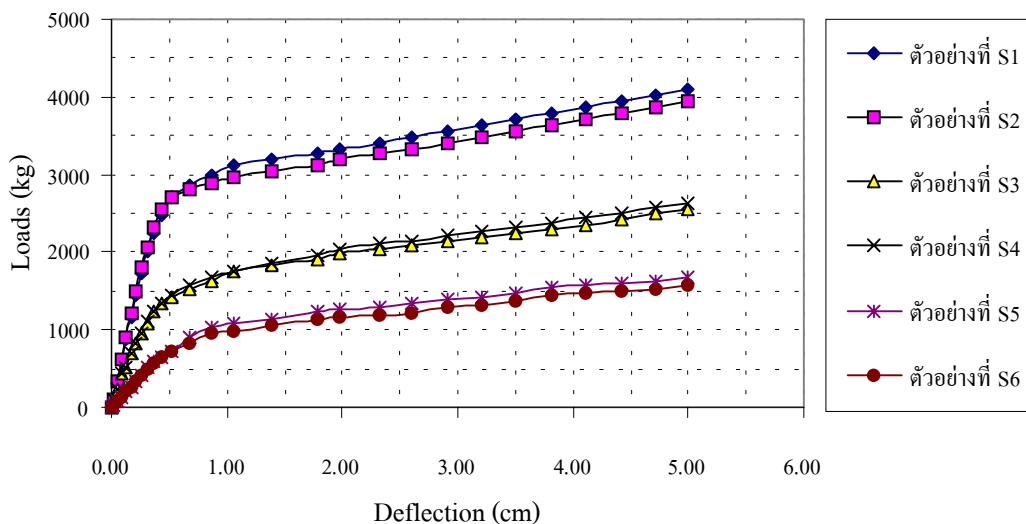
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

ในการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กในงานวิจัยนี้ ได้นิยามให้ “กำลังใช้งานสูงสุด” เป็นกำลังรับแรงสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกรวมได้ โดยที่มีระยะการแอ่นตัวเท่ากับ $L/80$ ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่ระยะการแอ่นตัวดังกล่าวนี้มีค่าประมาณ 3 เท่าของระยะการแอ่นตัวที่ใช้งานจริง

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (1)

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัว มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากกราฟดังกล่าว สามารถแบ่งพฤติกรรม

กรรมของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกพื้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ประมาณ 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังใช้งานสูงสุด หลังจากนั้นพื้นจะเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้น เมื่อผิวด้านล่างของคอนกรีตมีหน่วยแรงถึงโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) ของคอนกรีต และการแตกร้าวจะค่อยๆ เกิดการขยายตัวและการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยที่น้ำหนักบรรทุกรวมเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีพฤติกรรมแบบเหนียว จนกระทั่งพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปถึงจุดกำลังใช้งานสูงสุด

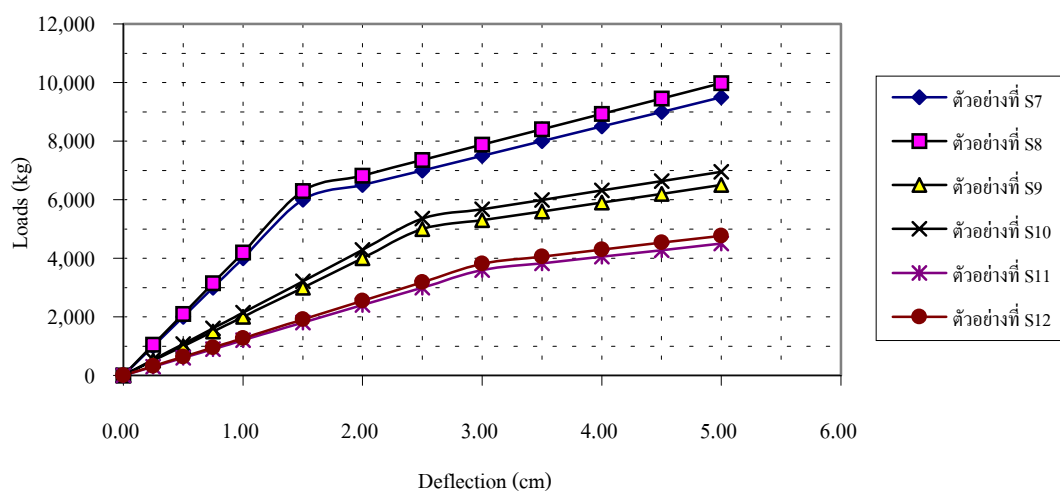


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (1)

นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ตัวอย่างที่ S1 และ S2 มีค่าสตีเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 286,556 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 2,550 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 3,700 กก. ตัวอย่างที่ S3 และ S4 มีค่าสตีเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 165,259 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 1300 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 2,500 กก. และตัวอย่างที่ S5 และ S6 มีค่าสตีเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 97,571 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 950 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1,600 กก. ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสตีเฟนสในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นและกำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อความยาวประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (2) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากกราฟดังกล่าวสามารถแบ่งพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กออกได้เป็นสองช่วง ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับกรณีของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) กล่าวคือ ช่วงแรกพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นประมาณ 70 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ของกำลังใช้งานสูงสุด หลังจากนั้นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้น เมื่อผิวล่างของคอนกรีตมีหน่วยแรงถึงโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต และการแตกร้าวจะค่อยๆ เกิดการขยายตัว และการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามการแตกร้าว โดยที่น้ำหนักบรรทุกรวมเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์จนถึงกำลังใช้งานสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีพฤติกรรมแบบเหนียว เช่นเดียวกับตัวอย่างกลุ่มที่ (1) แต่มีกำลังใช้งานสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างกลุ่มที่ (1)



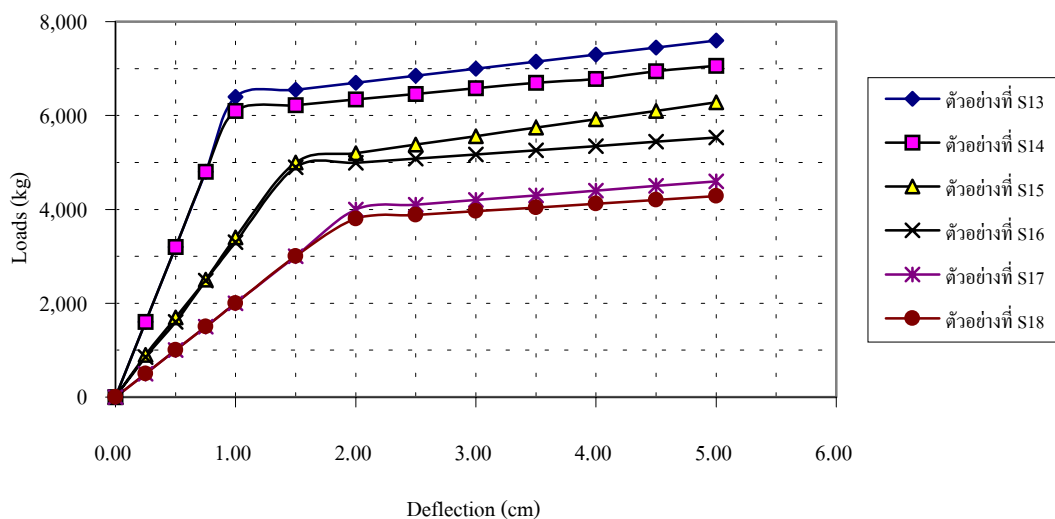
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)

นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ตัวอย่างที่ S7 และ S8 มีค่าสติเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 410,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 6,150 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 8,500 กก. ตัวอย่างที่ S9 และ S10 มีค่าสติเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 207,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 5,200 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 6,200 กก. และตัวอย่างที่ S11 และ S12 มีค่าสติเฟนสเฉลี่ยเท่ากับ 123,600 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 3,800 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4,700 กก. ซึ่งจะสังเกตเห็น

ได้ว่าสตีเฟนในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นและกำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อความยาวประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (3) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากกราฟดังกล่าวสามารถแบ่งพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กออกได้เป็นสองช่วงดังนี้คือ ช่วงแรกพื้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นประมาณ 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ของกำลังใช้งานสูงสุด และช่วงที่สองพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นอย่างฉับพลันซึ่งเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นโดยแรงเฉือนขวาง และพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะมีความแกร่งลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2) แต่มีกำลังใช้งานสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2)



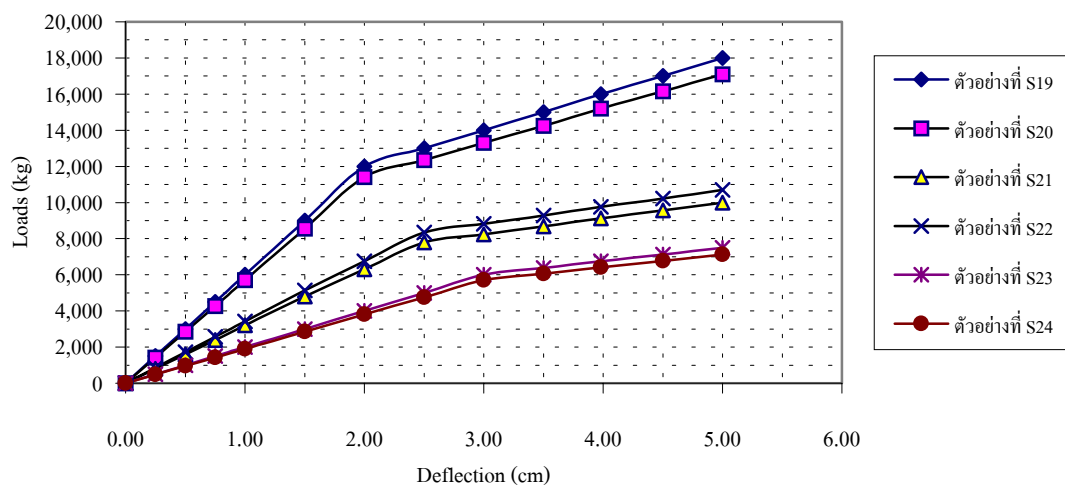
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)

นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ตัวอย่างที่ S13 และ S14 มีค่าสตีเฟนเฉลี่ยเท่ากับ 585,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 6,250 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 6,500 กก. ตัวอย่างที่ S15 และ S16 มีค่าสตีเฟนเฉลี่ยเท่ากับ 331,200 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 5,000 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 5,800 กก. และตัวอย่างที่ S17 และ S18 มีค่าสตีเฟนเฉลี่ยเท่ากับ 195,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ย

เท่ากับ 3,900 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 4,450 กก. ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสตีเฟนใน ช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น และกำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อ ความยาวประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (4) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากกราฟดังกล่าวสามารถแบ่งพฤติกรรมของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กออกได้เป็นสองช่วง เช่นเดียวกับกรณีของของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) กล่าวคือ ช่วงแรกพื้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังใช้งานสูงสุด หลังจากนั้นคอนกรีตด้านที่รับแรงกดอัดจะเกิดการกดแตก (crushing) โดยเป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด จากนั้นความแกร่งของพื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว



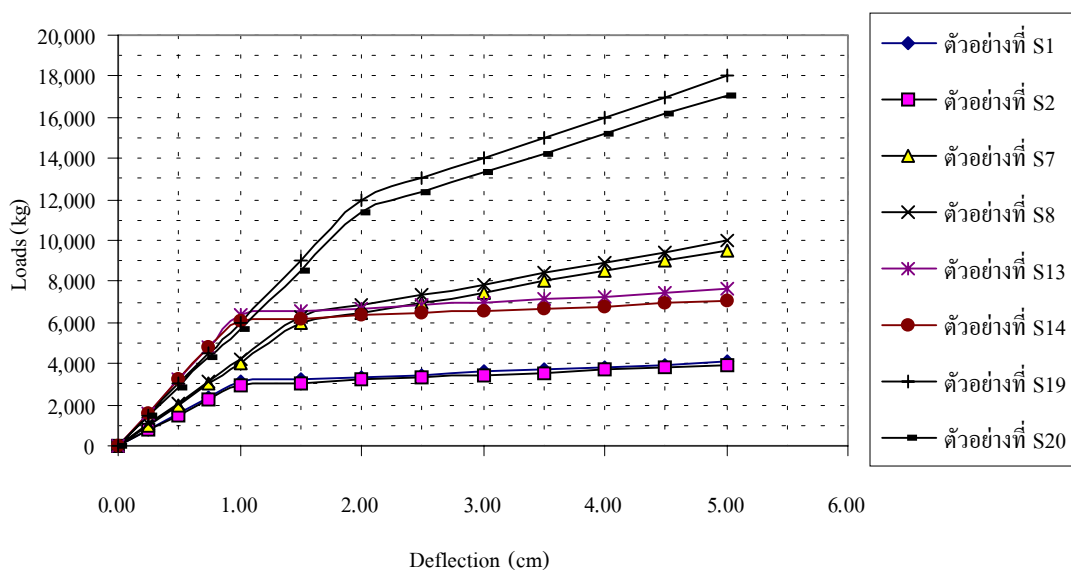
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)

นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ตัวอย่างกลุ่มที่ (4) มีความเหนียวลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2) แต่มีกำลังใช้งานสูงสุดสูงกว่า และพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ตัวอย่างที่ S19 และ S20 มีค่าสตีเฟนเฉลี่ยเท่ากับ 625,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 11,500 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 15,800 กก. ตัวอย่างที่ S21 และ S22 มีค่าสตีเฟนเฉลี่ยเท่ากับ 335,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ย

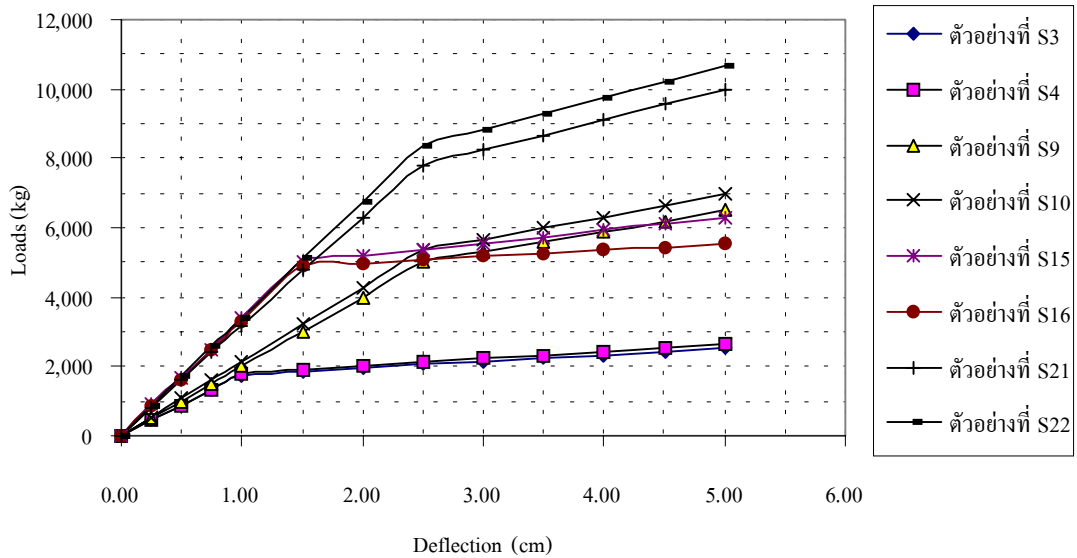
เท่ากับ 8,000 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 10,700 กก. และตัวอย่างที่ S23 และ S24 มีค่าสถิติเฉลี่ยเท่ากับ 200,000 กก./ม. มีกำลังในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 5,700 กก. มีกำลังใช้งานสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 7,200 กก. ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสถิติในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นและกำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กจะมีค่าลดลง เมื่อความยาวประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความยาวช่วงต่างๆ

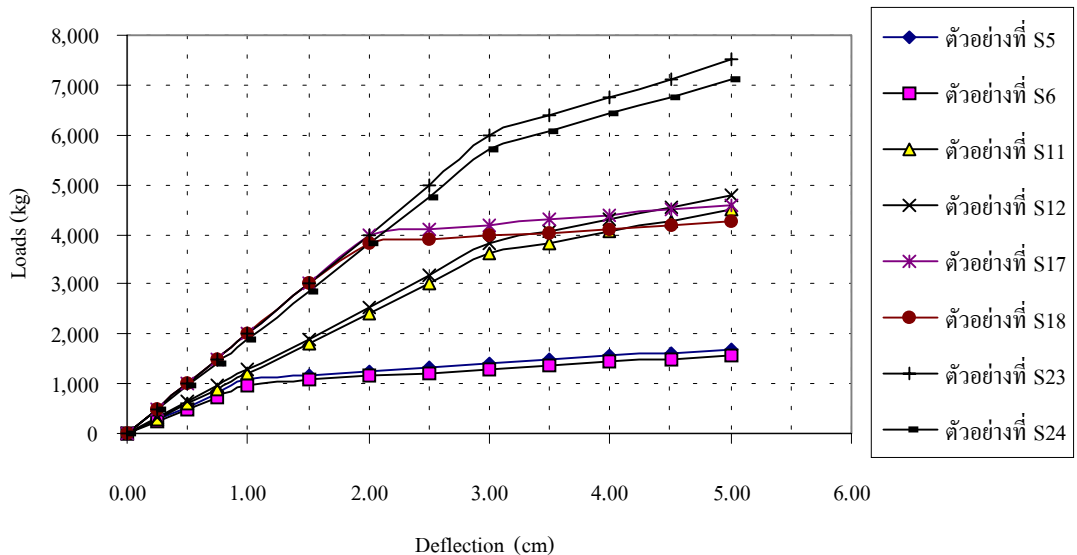
จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความยาวช่วงต่างๆ พบว่ากำลังและสถิติของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กขนาดต่างๆ จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลัง ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ที่ความยาวช่วง 3.00 ม. 3.50 ม. และ 4.00 ม. ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความยาวช่วง 3.00 ม.



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มี
ความยาวช่วง 3.50 ม.



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มี
ความยาวช่วง 4.00 ม.

4.3.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)

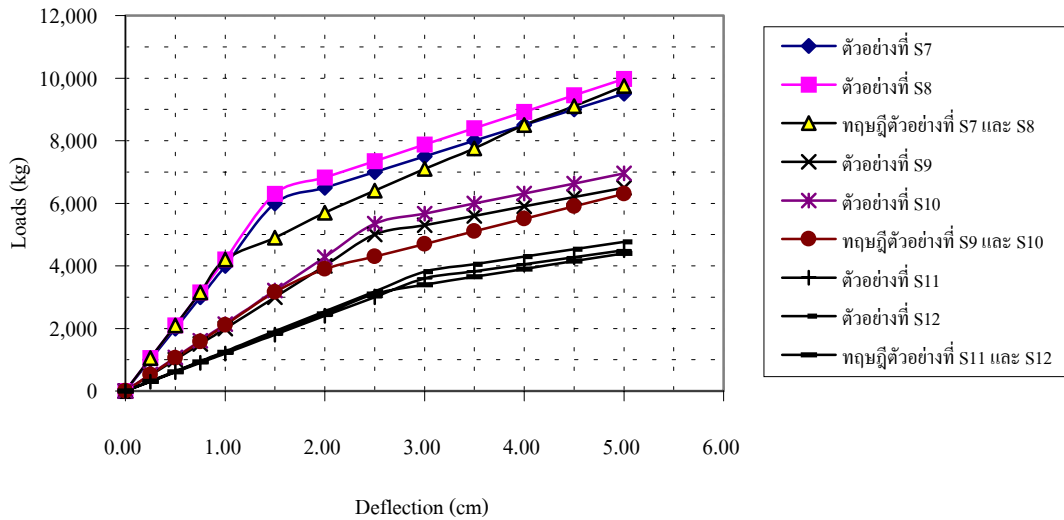
จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (2) พบว่าผลการทดสอบให้กำลังสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยใช้ฉีโปกซีเป็นตัวยึดนั้น ทำให้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีโมเมนต์แตกร้าที่สูงกว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มส่วนปลอดภัยให้กับองค์อาคารของโครงสร้างได้มากขึ้นและเป็นที่ยอมรับได้ในการใช้งานจริง

4.3.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)

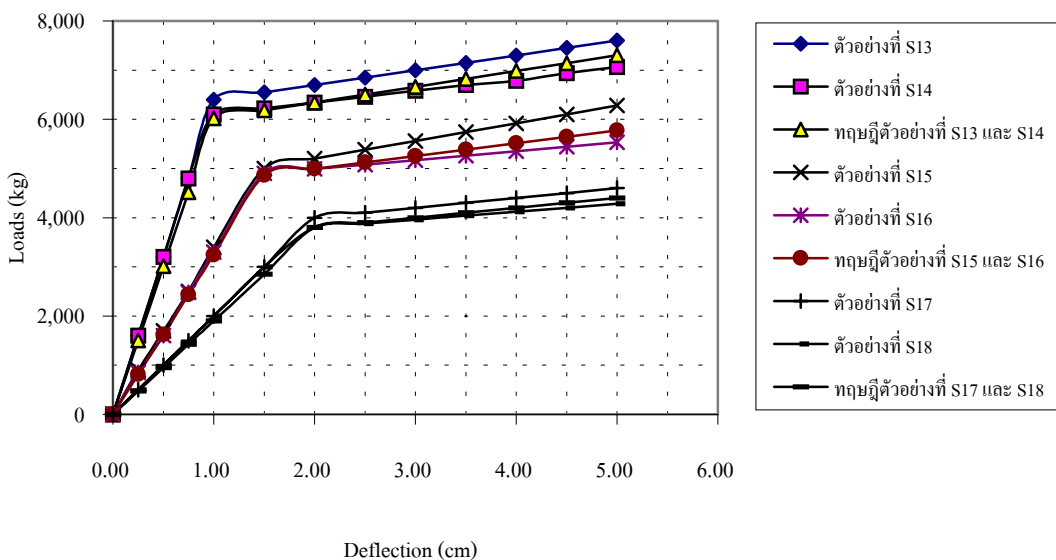
จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (4) พบว่าผลการทดสอบให้กำลังสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยใช้ฉีโปกซีเป็นตัวยึดนั้น ทำให้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีโมเมนต์แตกร้าที่สูงกว่ากรณีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มส่วนปลอดภัยให้กับองค์อาคารของโครงสร้างได้มากขึ้นและเป็นที่ยอมรับได้ในการใช้งานจริง แต่รูปแบบการแตกร้าของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในกรณีนี้จะเกิดขึ้นทันทีทันใด ซึ่งไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวิบัติให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเกิดกรณีของการเสริมกำลังเนื้อในให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กในกรณีนี้ขึ้น

4.3.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)

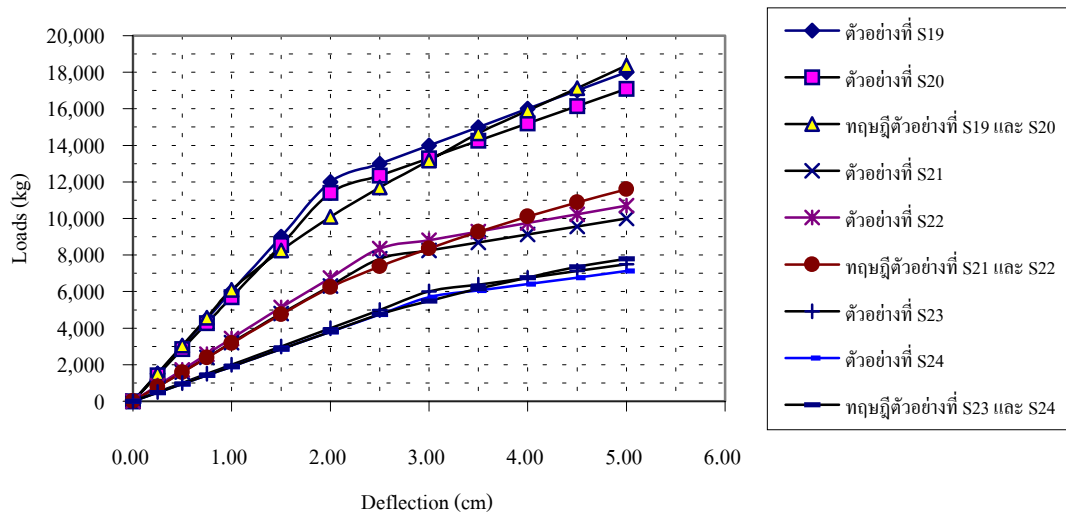
จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (4) พบว่าผลการทดสอบให้กำลังดัดสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีประมาณ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยใช้ฉีโปกซีเป็นตัวยึดนั้น ทำให้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีโมเมนต์แตกร้าสูงกว่ากรณีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มส่วนปลอดภัยให้กับองค์อาคารของโครงสร้างได้มากขึ้น และเป็นที่ยอมรับได้ในการใช้งานจริง แต่ในทางปฏิบัติแล้ววิศวกรมีความจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้เหล็กเสริมมีกำลังไม่เกินกำลังของคอนกรีต เพื่อป้องกันการวิบัติที่จะเกิดขึ้นกับคอนกรีต ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้อาคาร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (2)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบกับ ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)

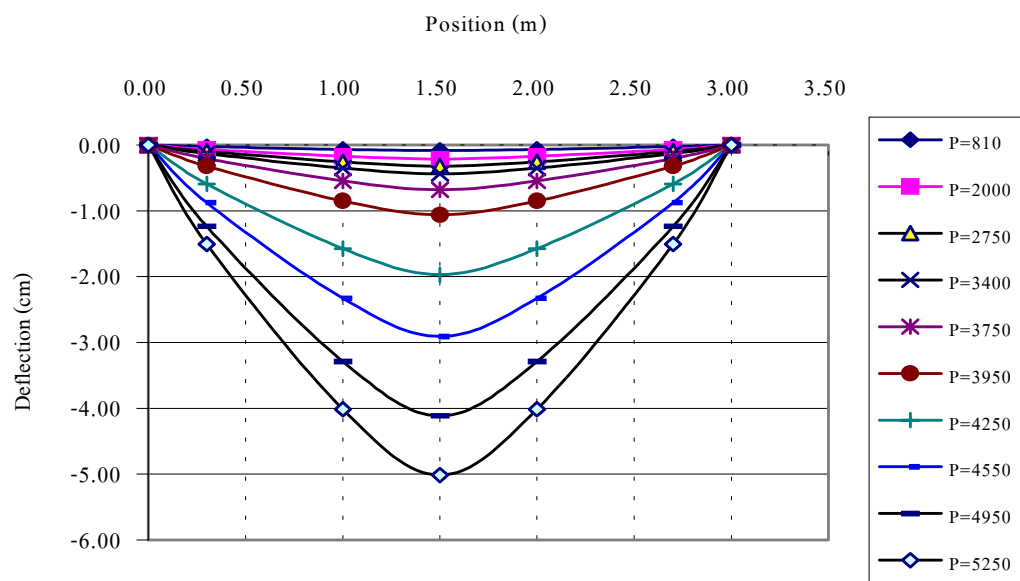
4.4 ระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

จากการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น ได้ทำการวัดระยะการแอ่นตัวที่ระดับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ด้วยมาตรวัดละเอียดทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งทำการติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบของการแอ่นตัวตามแนวเส้นของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

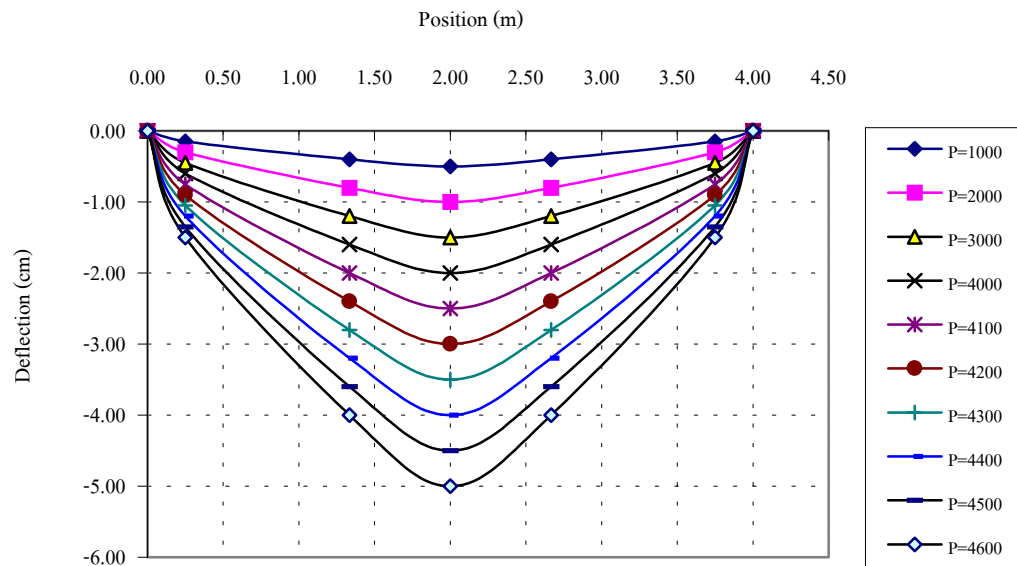
4.4.1) ตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2) พบว่ารูปแบบของการแอ่นตัวตามแนวเส้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า เส้นกราฟจะมีความโค้งมากที่สุดตรงบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป เนื่องจากเกิดการวิบัติขึ้นตรงบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั่นเอง ส่วนบริเวณอื่นๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งน้อยมาก

4.4.2) ตัวอย่างกลุ่มที่ (3) พบว่ารูปแบบของการแอ่นตัวตามแนวเส้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟจะมีความโค้งอย่างชัดเจนที่สุดบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก และจะมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งมากขึ้นที่ตำแหน่งปลายสุดของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังตัด เนื่องจากเกิดการวิบัติขึ้นตรงบริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็ก

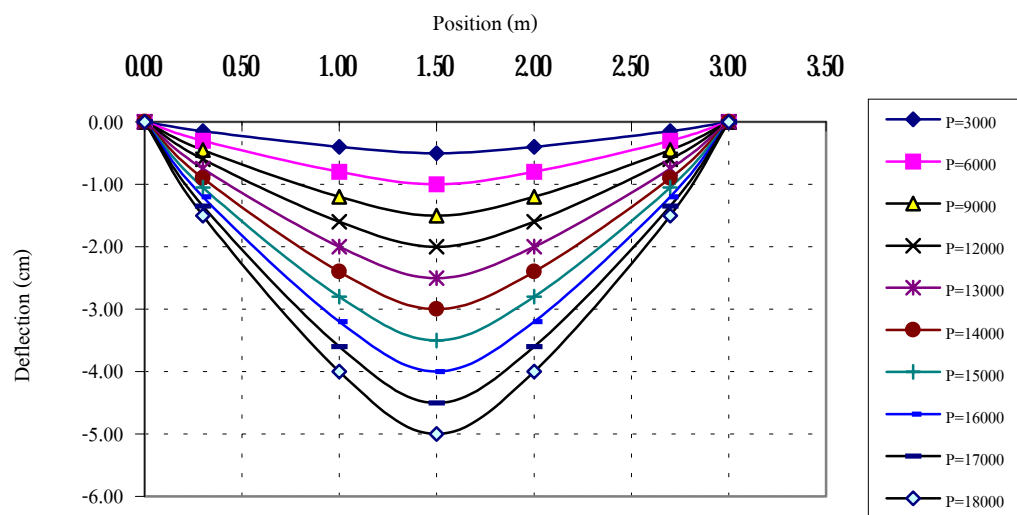
4.4.3) ตัวอย่างกลุ่มที่ (4) พบว่ารูปแบบของการแอ่นตัวตามแนวเส้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟจะมีความโค้งมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เนื่องจากเกิดการวิบัติขึ้นตรงบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ส่วนบริเวณอื่นๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งน้อยมา แต่จะเกิดขึ้นที่ระดับของน้ำหนักบรรทุกรวมสูงกว่ากรณีของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ
ของตัวอย่างกลุ่มที่ (3)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นตัวตามแนวเส้นกับตำแหน่งต่างๆ
ของตัวอย่างกลุ่มที่ (4)

4.5 รูปแบบการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

4.5.1 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (1) และ (2) พบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเกิดการแตกร้าวขึ้นโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึงในช่วงที่มีการตัดสูงสุดคือ ช่วงกึ่งกลาง ความยาวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยจะสังเกตเห็นเป็นรอยแตกร้าวเล็กๆ ขนานกับแนวแรง ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง

4.5.2 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยแรงเฉือนขวาง

จากการทดสอบกำลังรับแรงของตัวอย่างกลุ่มที่ (3) พบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเกิดการแตกร้าวขึ้นโดยแรงเฉือนขวางที่จุดปลายสุดของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยจะสังเกตเห็นเป็นรอยแตกร้าวทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวแรง การแตกร้าวเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวด้านล่างของคอนกรีต มีหน่วยแรงเฉือนมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนที่คอนกรีตจะรับได้



รูปที่ 4.20 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยแรงเฉือนขวางที่ปลายของแผ่นเหล็ก

4.5.3 การแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด

จากการทดสอบตัวอย่างกลุ่มที่ (4) พบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กการแตกร้าวเกิดขึ้นในช่วงที่มีแรงคดมีค่าสูงสุด คือ ช่วงระหว่างจุดถ่ายน้ำหนักลงสู่พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยจะสังเกตเห็นเป็นรอยแตกร้าว เนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงกดอัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด

4.6 กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ระยะการแอนตัว $L/240$ และ $L/360$

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก น้ำหนักบรรทุกรวมที่เพิ่มขึ้นและค่าคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ระยะการแอนตัว $L/240$ และ $L/360$ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะเป็นระยะการแอนตัวสูงสุดที่ยอมให้ในการใช้งานจริงสำหรับการออกแบบโครงสร้างอาคาร

จากผลการเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกรวมที่เพิ่มขึ้นของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปทั้งที่ไม่มีเสริมกำลังและที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ระยะการแอนตัวทั้ง $L/240$ และ $L/360$ นั้น พบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีกำลังรับแรงเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ คือ ตัวอย่างกลุ่มที่ (4) มีเปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างกลุ่มที่ (3) และน้อยที่สุดเป็นตัวอย่างกลุ่มที่ (2)

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรง
สำเร็จรูปที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุก จากการทดสอบ (กก.)	น้ำหนักบรรทุก จากทฤษฎี (กก.)	ค่าคลาดเคลื่อน จากการทดสอบกับ ผลทางทฤษฎี (%)	น้ำหนักบรรทุก ที่เพิ่มขึ้น (%)
S1 และ S2	4,100	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S3 และ S4	2,500	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S5 และ S6	1,600	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S7 และ S8	5,125	4,650	9.27	25.00
S9 และ S10	3,105	3,158	1.71	24.20
S11 และ S12	2,000	2,100	5.00	25.00
S13 และ S14	6,318	6,102	3.42	54.10
S15 และ S16	4,950	4,850	2.02	98.00
S17 และ S18	3,306	3,173	4.02	106.62
S19 และ S20	7,313	7,175	1.89	78.37
S21 และ S22	4,968	4,750	4.39	98.72
S23 และ S24	3,501	3,173	9.37	118.81

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรง
สำเร็จรูปที่ระยะการแอ่นตัว *L/360*

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุก จากการทดสอบ (กก.)	น้ำหนักบรรทุก จากทฤษฎี (กก.)	ค่าคลาดเคลื่อน จากการทดสอบกับ ผลทางทฤษฎี (%)	น้ำหนักบรรทุก ที่เพิ่มขึ้น (%)
S1 และ S2	2,800	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S3 และ S4	1,600	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S5 และ S6	950	-	-	(เป็นพื้นควบคุม)
S7 และ S8	3,403	3,500	2.85	21.54
S9 และ S10	2,070	2,105	1.69	29.38
S11 และ S12	1,236	1,250	1.13	30.11
S13 และ S14	4,856	5,063	4.26	73.43
S15 และ S16	3,312	3,167	4.38	107.00
S17 และ S18	2,165	2,109	2.59	127.89
S19 และ S20	4,998	5,188	3.80	78.50
S21 และ S22	3,350	3,243	3.19	109.38
S23 และ S24	2,220	2,109	5.00	133.68

4.7 การติดตั้งแผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป

การเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก เพื่อเพิ่มสติเฟเนส กำลังรับการค้ำ และกำลังเฉือนนั้นจะทำการติดแผ่นเหล็กเข้ากับท้องพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยใช้อีพอกซีและสลักเกลียวเป็นตัวยึด อีพอกซีที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไปสามารถผสมให้เข้ากันด้วยมือในภาชนะแล้วต้องนำมาใช้ทันที อีพอกซีที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ (cement paste) ที่ผิวท้องพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปและสามารถแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องได้ในเวลาที่รวดเร็ว นอกจากนั้นแล้วอีพอกซีที่ใช้จะต้องมีกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) อย่างน้อยเท่ากับกำลังเฉือนของคอนกรีตและมีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างได้ ส่วนสลักเกลียวที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นสลักเกลียวกำลังสูง เพราะว่าจะช่วยลดขนาดของสลักเกลียวและขนาดรูเจาะ พื้นผิวคอนกรีตบริเวณท้องพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่จะทำการติดแผ่นเหล็กจะต้องทำความสะอาดด้วยทรายพ่น พื้นผิวของแผ่นเหล็กจะต้องทำความสะอาดด้วยการขัดกระดาษทราย เจาะรูที่ปลายแผ่นเหล็กตามขนาดที่ออกแบบทั้งสองด้านเพื่อใส่สลักเกลียว

4.8 สรุปผลการศึกษา

- 4.8.1) ผลการทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตทับหน้า พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จนกระทั่งค่าความเครียดของคอนกรีตมีค่าประมาณ -0.002 ซึ่งเป็นจุดที่คอนกรีตมีค่าหน่วยแรงสูงสุดเรียกว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีต หลังจากนั้นคอนกรีตจะมีอัตราการลดลงของหน่วยแรงอย่างรวดเร็ว เมื่อคอนกรีตมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีกำลังอัดประลัยโดยเฉลี่ยประมาณ 250 กก./ซม.^2 ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าใกล้เคียงกันกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่นำเสนอโดย Park, R., and Paulay, T. (1975) ดังแสดงในสมการ (2.3) และสมการ (2.4) จึงใช้สมการดังกล่าวในการวิเคราะห์กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก
- 4.8.2) ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป พบว่าพิกัดปฏิบัติการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,750 \text{ กก./ซม.}^2$ หน่วยแรงครากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,877 \text{ กก./ซม.}^2$

โมดูลส์ยึดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,042,000 กก./ชม.² จากทั้งแผ่นเหล็กที่มีความหนา 2.5 มม. และ 5 มม.

- 4.8.3) จากผลการทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความยาวช่วงต่างๆ พบว่ากำลังและสติฟเนส มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลัง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสติฟเนสในช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้น และกำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีค่าลดลงเมื่อความยาวช่วงมีค่าเพิ่มขึ้น
- 4.8.4) จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ได้จากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พบว่าผลการทดสอบให้กำลังสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยใช้ข้อปอกซีเป็นตัวยึดจะมีโมเมนต์แตกร้าสูงกว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลัง จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มส่วนปลอดภัยให้กับองค์อาคารของโครงสร้างได้มากขึ้น
- 4.8.5) จากผลการทดสอบของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทำให้สามารถสรุปแนวทางการออกแบบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็กตามรูปแบบของการวิบัติ ซึ่งประกอบด้วย การวิบัติโดยการคัตที่ผิวรับแรงดึง การวิบัติโดยแรงเฉือนขวางที่ปลายของแผ่นเหล็ก และการวิบัติโดยการคัตที่ผิวรับแรงกดอัด ได้ดังนี้
- 4.8.5.1) กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกนและสมการโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก
- 4.8.5.2) กำลังเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น สามารถหาได้จากสมการที่นำเสนอโดย McGregor, J. G., and Hanson, J. M. (1969) ดังแสดงในสมการ (3.24) เนื่องจากอัตราส่วนปริมาณลวดอัดแรงต่อพื้นที่หน้าตัดพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยมาก
- 4.8.5.3) หน่วยแรงเฉือนขวางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็กนั้น สามารถหาได้จาก

สมการที่นำเสนอโดย Malek, A. M. et al. (1998) ดังแสดงในสมการ (3.25)

- 4.8.5.4) เมื่อได้หน่วยแรงเฉือนขวางที่บริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็กและหน่วยแรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำภายนอกแล้ว ทำให้สามารถหาขนาดสลักเกลียวเพื่อด้านทานแรงเฉือนที่เกินกำลังเฉือนของพืนคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปได้ ดังแสดงในสมการ (3.26) ถึงสมการ (3.28)
- 4.8.5.5) ระยะเวลาแอนตัวของพืนคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นสามารถหาได้จากสมการการแอนตัวแบบยืดหยุ่น ดังแสดงในสมการ (3.29)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปแนวคิดในการออกแบบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก

อาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ที่ใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นระบบพื้นในการก่อสร้าง เมื่ออาคารดังกล่าวต้องการเปลี่ยนแปลงการใช้งาน เช่น จากอาคารที่พักอาศัยหรืออาคารพาณิชย์ไปเป็น โกดังเก็บสินค้า รวมทั้งงานซ่อมแซมอาคารที่ต้องการยืดอายุการใช้งาน หรืออาคารที่ต้องอนุรักษ์ไว้เช่น โบราณสถาน เป็นต้น ทำให้จำเป็นต้องทำการเสริมกำลังให้กับอาคารดังกล่าว การใช้แผ่นเหล็กในการเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยใช้ข้อปอกซีเป็นตัวยึด จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับสภาพการใช้งานในประเทศไทย ดังนั้น จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กทั้งการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำเสนอแนวทางในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก จากผลการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทั้งการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถสรุปแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบตัวอย่างทดสอบโดยใช้รูปแบบการวิบัติเป็นพื้นฐานในการแบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ได้ดังนี้

- 5.1.1) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังเป็นพื้นควบคุม เพื่อเป็นตัวอย่างทดสอบมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบกำลังกับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กในกรณีอื่นๆ
- 5.1.2) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยการดัดที่ผิวรับแรงดึง ปริมาณแผ่นเหล็กที่มากที่สุดที่สามารถใช้เสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้นจะมีขีดจำกัดอยู่ที่หน่วยแรงเฉือนรวมที่ปลายสุดของแผ่นเหล็ก โดยที่รูปแบบการวิบัติยังเป็นการวิบัติโดยการดัดที่ผิวรับแรงดึง ถ้าปริมาณแผ่นเหล็กมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวแล้ว การวิบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะเป็นการวิบัติโดยแรงเฉือนขวาง จึงเกิดกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ (3) ขึ้น
- 5.1.3) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยแรงเฉือนขวาง จากการทดสอบพบว่าพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะเกิดการแตกร้าวขึ้นอย่างฉับพลัน พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะมีความแกร่งลดลงอย่างรวดเร็ว รูปแบบการแตกร้าวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปในลักษณะเช่นนี้ไม่

เหมาะสมในการใช้งานจริง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุง เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวิบัติให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเกิดกรณีศึกษาของการเสริมกำลังเนื้อในให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเป็นตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ (4)

- 5.1.4) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้วิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงกดอัด เพื่อศึกษากำลังใช้งานสูงสุดของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ทำการเสริมกำลังเนื้อในให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปโดยใช้สลักเกลียว เพื่อป้องกันการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสริมแผ่นเหล็กในปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนขวางที่บริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็ก

5.2 สรุปแนวคิดที่ได้จากการวิจัย

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก พบว่าผลการทดสอบให้กำลังสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถสรุปแนวทางการออกแบบการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็กตามรูปแบบของการวิบัติได้ดังนี้

- 5.2.1) กำลังรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก จากสมการความสมดุลของแรงในแนวแกน และสมการโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กดังนี้

$$C_c = S + P$$

$$M = C_c(d_s - \gamma_c) + P(d_{pl} - d_s)$$

- 5.2.2) กำลังเนื้อของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก สามารถหาได้จากสมการที่นำเสนอโดย McGregor, J. G., and Hanson, J. M. (1969)

$$v_c = 0.16\sqrt{f'_c} + 49\frac{V_u d}{M_u} \quad \text{เมื่อ } \frac{V_u d_s}{M_u} \leq 1.00$$

โดยที่ v_c มีค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'_c}$ และมีค่าไม่เกิน $1.33\sqrt{f'_c}$

- 5.2.3) หน่วยแรงเฉือนของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็กนั้น สามารถหาได้จากสมการที่นำเสนอโดย Malek, A. M. et al. (1998) ดังนี้

$$V_{cs} = b_{pl} \bar{y}_c t_{pl} (b_1 \sqrt{A} + b_2)$$

โดยที่ $b_1 = \frac{E_{pl} \bar{y}_t P_t L_0}{I_w E_c}$

$$b_2 = \frac{E_{pl} \bar{y}_t P_t}{I_{pl} E_c}$$

$$A = \frac{G_a}{t_a t_{pl} E_{pl}}$$

- 5.2.4) แรงเฉือนรวมที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและแผ่นเหล็กมีดังนี้

$$V_{ct} = \sqrt{V_u^2 + V_{cs}^2}$$

- 5.2.5) ขนาดสลักเกลียวสามารถหาได้ดังนี้

$$D = 1.2 \sqrt{\frac{V_b}{0.75 f_b \pi}}$$

- 5.2.6) ระยะเวลาแอนตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น สามารถหาได้จากสมการการแอนตัวแบบยึดหยุ่นดังนี้

$$\Delta = \frac{23 P_t L^3}{1296 E_c I} \quad \text{เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด}$$

$$\Delta = \frac{5 w L^4}{384 E_c I} \quad \text{เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ}$$

5.3 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยตัวอย่างทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 4 กลุ่ม ดังนี้ (1) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ไม่มีการเสริมกำลังเป็นพื้นควบคุม (2) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ออกแบบให้วิบัติโดยการค้ำที่ผิวรับแรงดึง (3) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ออกแบบให้วิบัติโดยแรงเฉือนขวาง (4) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ออกแบบให้วิบัติโดยการค้ำที่ผิวรับแรงกดอัด จากการทดสอบแบบโดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 4 จุด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 5.3.1) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีกำลังรับแรง และสติฟเนสเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ (4) มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 102.91 เปอร์เซ็นต์ มีสติฟเนส เพิ่มขึ้น 108.60 เปอร์เซ็นต์ โดยเกิดการวิบัติเป็นการวิบัติแบบเปราะเนื่องจากผิวคอนกรีตด้านที่รับแรงกดอัดเกิดการรูดแตกในบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ (3) มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 94.51 เปอร์เซ็นต์ มีสติฟเนส เพิ่มขึ้น 101.47 เปอร์เซ็นต์ โดยเกิดการวิบัติเป็นการวิบัติแบบเปราะในรูปแบบของการเลื่อนที่บริเวณปลายสุดของแผ่นเหล็ก ซึ่งพื้นจะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด การแตกร้าวจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ (2) มีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้น 25.87 เปอร์เซ็นต์ มีสติฟเนสเพิ่มขึ้น 31.67 เปอร์เซ็นต์ โดยเกิดการวิบัติเนื่องจากการค้ำในบริเวณกึ่งกลางของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งการแตกร้าวจะค่อยๆ เกิดการขยายตัว และการแอ่นตัวของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่น้ำหนักบรรทุกรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- 5.3.2) ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงทางทฤษฎีของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดสอบน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์
- 5.3.3) พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยใช้ข้อปอกซีเป็นตัวยึดนั้น ทำให้พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปมีโมเมนต์แตกร้าวที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำได้ทำให้สามารถเพิ่มส่วนปลอดภัยให้กับองค์อาคารของโครงสร้างได้มากขึ้นและเป็นที่ยอมรับได้ในการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ
- 5.3.4) จากการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก พบว่าการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นมีขั้นตอนต่างๆ มากมาย ดังนั้น เพื่อความสะดวก รวดเร็ว และเหมาะสมในการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงได้เขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการออกแบบไว้ด้วย

จากผลงานวิจัยครั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยแผ่นเหล็ก สามารถเพิ่มกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปได้จริง แต่ในการประยุกต์ใช้งานจริงจะขึ้นอยู่กับวิศวกรผู้ออกแบบ

5.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

จากการทำวิจัยการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้น สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อประโยชน์สำหรับการศึกษาในอนาคตและการประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัติได้ดังนี้

- 5.4.1) ก่อนการประยุกต์ใช้งานจริงในทางปฏิบัตินั้น จะต้องศึกษาเกี่ยวกับการคืบและความล้าว่ามีพฤติกรรมของการยึดเนื่องจากอ็อกซิเจนเป็นอย่างไร รวมทั้งปัจจัยเนื่องจากสภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ และความชื้นที่มีต่อจุดยึดของอ็อกซิที่ใช้ในการเสริมกำลังของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วย
- 5.4.2) เพื่อให้การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กนั้นมีความสมบูรณ์มากที่สุด ควรมีกรณีศึกษาเพิ่มเติมในส่วนที่เป็นการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ออกแบบให้ปฏิบัติโดยการตัดที่ผิวรับแรงดึง โดยมีการเสริมกำลังเนื้อในให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปด้วยสลักเกลียว ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ
- 5.4.3) การเสริมกำลังให้กับพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปนั้น ยังพบว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนที่เป็นการเสริมกำลังพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย เมื่อมีความจำเป็นเช่น องค์กรอาคารอยู่ในสภาพที่ต้องสัมผัสกับดินหรือถูกแดดฝน ซึ่งการใช้แผ่นเหล็กอาจนำมาซึ่งปัญหาที่เกิดจากสนิมได้ เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยสามารถป้องกันปัญหาที่เกิดจากสนิมได้

เอกสารอ้างอิง

- ชยาทิพย์ วัฒนวิทย์กิจ (2539). **วัสดุก่อสร้าง**. พิมพ์ครั้งที่ 5. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ต่อกุล กาญจนาลัย (2539). **การออกแบบคอนกรีตอัดแรง**. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- มงคล จิรวชิรเดช (2543). **การออกแบบโครงสร้างเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศรีกริช หิรัญมาศ (2541). **คอนกรีตเสริมเหล็ก II**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุธรรม สุริยะมงคล วรชนพงศ์ นูรัตน์ภิรมย์ และจรรยา รุ่งอมรรัตน์ (2540). กำลังรับแรงค้ำและดัชนีความเหนียวของโครงสร้างผนังคอนกรีตรับแรงเฉือนแบบมีปีก. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4**. 1:STR-1-STR-7.
- สุรเกตุ ยี่งี่ยมขง (2542). กรณีศึกษาการเลือกใช้พื้นที่สำเร็จรูปที่เหมาะสมในงานอาคาร. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5**. 1:STR-9-STR-16.
- Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. D., Jirsa, J. O., and Kreger, M. E. (1999). Rehabilitation of Shear Critical Concrete Columns by Use of Rectangular Steel Jackets. **ACI Structural Journal**. 96(1):68-78.
- An, W., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1991). R/C Beams Strengthened with FRP Plate. II: Analysis and Parametric Study. **Journal of Structural Engineering**. 117:3434-3455.
- Bonacci, J. F., and Maalej, M. (2000). Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams. **ACI Structural Journal**. 97 (5):703-711.
- Chajes, M. J., Januszka, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., William, J., and Finch, W. (1995). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics. **ACI Structural Journal**. 92(3):295-303.
- Ghobarah, A., Aziz, T. S., and Biddah, A. (1997). Rehabilitation of Reinforced Concrete Frame Connections Using Corrugated Steel Jacketing. **ACI Structural Journal**. 4(3):283-294.
- Hamoush, S. A., and Ahmad, S. H. (1990). Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams. **Journal of Structural Engineering**. 116:356-371.

- Hognestad, E., Hanson, N. W., and McHenry, D. (1955). Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design. **ACI Structural Journal**. 52:455-479.
- Leet, K. M. (1997). **Reinforced Concrete Design** McGraw-Hill, Inc., New York
- Lehman, D. E., Gookin, S. E., Nacamuli, A. M., and Moehle, J. P. (2000). Repair of Earthquake-Damaged Bridge Columns. **ACI Structural Journal**. 98(2):233-245.
- MacDonald, M. D., and Calder, A. J. J. (1982). Bonded Steel Plating for Strengthening Concrete Structures. **Int. J. Adhesion and Adhesives** 2(2):119-127.
- Malek, A. M., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1998). Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End. **ACI Structural Journal**. 95(1):142-152.
- McGregor, J. G., and Hanson, J. M. (1969). Proposed Changes in Shear Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Beams. **ACI Structural Journal**. 66(4):276-288.
- McLean, D. L., and Marsh, M. L. (1999). Seismic Retrofitting of Bridge Foundations. **ACI Structural Journal**. 96(2):174-182.
- Nilson, A. H. (1987). **Design of Prestressed Concrete** John Wiley and Sons, Inc., New York
- Park, R., and Paulay, T. (1975). **Reinforced Concrete Structures** John Wiley and Sons, Inc., New York
- Priestley, M. J. N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R. (1994). A Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength-Part 2: Test Results and Comparison with Theory. **ACI Structural Journal**. 91(5):537-551.
- Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. W., and Connelly, G. M. (1991). External Reinforcement of Concrete Beams Fiber-Reinforced Plastics. **ACI Structural Journal**. 88(4):490-500.
- Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1991). RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study. **Journal of Structural Engineering** 117(11):3417-3433.
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Jin, L. (1997). Repair of Earthquake-Damaged RC Columns with FRP Wraps. **ACI Structural Journal**. 94(2):206-215.
- Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Shanif, A. M., Azad, A. K., and Al-Sulaimani, G. J. (1994). Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates. **ACI Structural Journal**. 91(6):639-646.

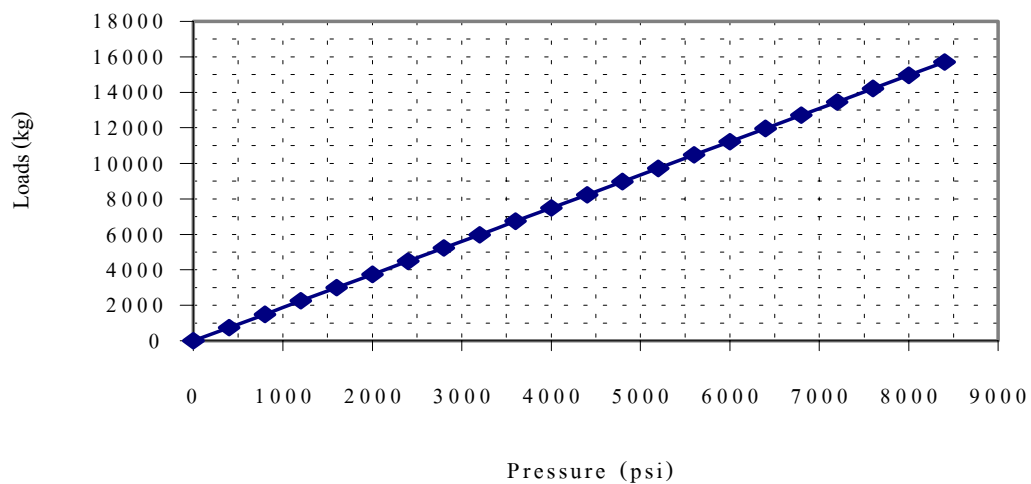
ภาคผนวก

ผลการสอบเทียบเครื่องสูบลมไฮดรอลิก

ผลการสอบเทียบเครื่องสูบไฮดรอลิก

จากผลการสอบเทียบเครื่องสูบไฮดรอลิกกับเครื่องกด UTM พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากเครื่อง UTM กับความดันที่ได้จากเครื่องสูบไฮดรอลิก มีลักษณะแสดงดังรูปในภาคผนวกนี้ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความดันได้ดังนี้

$$\text{Loads (kg)} = (1.874) \text{ Pressure (psi)}$$



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากเครื่อง UTM กับความดันที่ได้จากเครื่องสูบไฮดรอลิก

ประวัติผู้เขียน

นายวิมล สมสะอาด เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2518 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2541 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับสาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยสอน และวิจัย จากการทำงานเกี่ยวกับการเรียนการสอนและงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง ซึ่งทำให้ผู้ วิจัยได้รู้จักตัวเองมากขึ้น จึงเกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมโครง สร้าง เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ความสามารถให้กับตัวเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรม โยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2542