การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง (ช่วงเสา 6 – 9 เมตร) โดยวิธีไฟไนท์อีลีเม้นท์แบบแผ่นสามมิติโดยใช้โปรแกรม RAM Concept

A Study of Optimal Thickness for Post-Tensioned Concrete Flat Slab (Span Length 6 – 9 m.) Using 3D Plate Finite Element using RAM Concept Program

พัทธนันท์ มณีชนพันธ์ (Pattharnan Maneechanaphan)[1]

ฉัตร สุจินดา (Chatr Suchinda)[2]

[1]*นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม pattharnan@gmail.com*

[2]*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม chart.su@spu.ac.th*

บทคัดย่อ : บทความนี้เสนอถึงการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง โดยอาศัยข้อมูล ราคาต่อหน่วยของวัสดุคอนกรีต ลวดอัดแรง เหล็กเสริม ไม้แบบ และค่าแรงในประเทศไทย เพื่อนำมาทดลองออกแบบแผ่นพื้นที่มีความหนา และน้ำหนักบรรทุกจรต่างๆ กัน โดยใช้โปรแกรม RAM Concept ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลีเม้นท์แบบแผ่นสามมิติ มีกรณีศึกษาสำหรับการจัดเรียงตำแหน่งของเสาในพื้นคือ กรณีควบคุมแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว 0.5 และ 1.0 น้ำหนักบรรทุกจร 200 และ 400 กก/ม^2 Span Length 6 และ 9 เมตร กำลังอัดประลัยคอนกรีต 35 MPa (357 กก/ซม^2) โดยมีข้อกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ตรงหัวเสาที่คอนกรีตไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ จากนั้นได้นำผลการออกแบบไปหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายความหนาที่เหมาะสม ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด เพื่อช่วยให้วิศวกรและผู้ที่สนใจสามารถนำไปประมาณราคา และเป็นแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น

ABSTRACT: The paper presents a study to determine optimal thicknesses for post-tensioned concrete flat slabs based on construction unit costs in Thailand including concrete, prestressing cables, rebars, formworks and labors. The trial designs were performed for various parameters including thicknesses and live loads. The RAM Concept program based on 3-dimensional plate finite element analysis was used. The studied column layouts include square and rectangular having short to long span ratios 0.5 and 1.0 with 200 and 400 kg/m^2 live loads, 6 and 9 m span lengths and 35 MPa (357 kg/cm^2) ultimate strength concrete given that the drop panels and shear reinforcements would be added at the column heads where the concrete cannot resist the punching shear. Then, the results from these designs were used to determine the prediction equations for the optimum slab thicknesses which give the lowest total construction cost. This guideline could help engineers and other interested parties for preliminary design and the construction cost estimation.

KEYWORDS : Design guidelines, Post-tensioned Flat Slabs, Plate Bending Finite Element Analysis

1. รายละเอียดทั่วไป

ในปัจจุบัน ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คานเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอาคารทั่วไปและอาคารที่มีช่วงยาวมากๆ เนื่องจากราคาค่าก่อสร้างต่ำกว่าและมีระยะเวลาก่อสร้างสั้นกว่าระบบพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

Post-Tensioning Institute [1] มีข้อแนะนำเกี่ยวกับความหนาของแผ่นพื้น ซึ่งกำหนดไว้เป็นอัตราส่วนช่วงความยาว (Span Length) ต่อความหนา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนช่วงความยาวต่อความหนา ของพื้นที่แนะนำโดย Post-Tensioning Institute [1]

ชนิดของพื้น	ช่วงต่อเนื่อง		ช่วงเดี่ยว	
	หลังคา	พื้น	หลังคา	พื้น
พื้นทางเดียว	50	45	45	40
พื้นสองทาง	45-48	40-45	-	-
พื้นสองทางแบบรังผึ้ง 1×1 เมตร	40	35	35	30
ความหนาของคานกว้าง	35	30	30	26
พื้นมีคานซอยรองรับทางเดียว	42	38	38	35

ในตารางที่ 1 อัตราส่วนช่วงความยาวต่อความหนาของพื้นของ Post Tensioning Institute [1] ได้มาจากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศสหรัฐอเมริกา และยังกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นช่วง เช่น สำหรับพื้นสองทางต่อเนื่องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ช่วง 40-45 เป็นต้น อีกทั้ง Post Tensioning Institute [1] ไม่ได้ระบุน้ำหนักบรรทุกของพื้น ซึ่งแน่นอนว่าราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรง สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันก็ย่อมทำให้ความหนาที่เหมาะสมต่างกัน

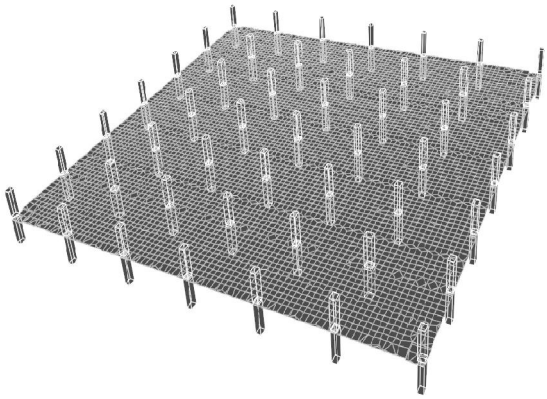
ในปัจจุบันมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นไร้คานซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนท์อีลีเม้นท์ (Finite Element Analysis) เช่น RAM Concept, Adapt Builder และ CSI SAFE ซึ่งทั้ง 3 โปรแกรมมีลักษณะการวิเคราะห์ที่คล้ายกัน คือ ผู้ใช้โปรแกรมเป็นผู้กำหนดความหนาพื้นและปริมาณลวดอัดแรงเอง โปรแกรมจะทำการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดวิกฤต กับหน่วยแรงที่ยอมให้ และคำนวณระยะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นของแผ่นพื้นให้ ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมจำเป็นต้องอ่านค่าจากเส้น Contour เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมให้ หากไม่ผ่านตามข้อกำหนดต่างๆ ผู้ใช้โปรแกรมจะทำการปรับโครงสร้างที่ออกแบบ เช่นการเพิ่มปริมาณลวดอัดแรงหรือ เพิ่มความหนาของแผ่นพื้นเอง จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณปริมาณเหล็กเสริม และเขียนรายละเอียดเหล็กเสริมให้ลงบนแปลนพื้นโดยอัตโนมัติ โปรแกรมจะทำการตรวจสอบแรงเฉือนเจาะทะลุที่หัวเสา หากตรวจสอบแรงเฉือนเจาะทะลุไม่ผ่าน ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเพิ่ม Drop Panel เอง โดยโปรแกรม RAM Concept V8i จะออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแบบ Shear Stud ใน ขณะที่โปรแกรม CSI SAFE 12.3 และ Adapt Builder 3.2 ออกแบบเหล็กเสริมที่หัวเสา ได้ทั้งแบบ Shear Stud และเหล็กปลอก ในส่วนของการคำนวณปริมาณวัสดุ โปรแกรม CSI SAFE 12.3 และ Adapt Builder 3.2 จะคำนวณปริมาณวัสดุมาให้ ในขณะที่โปรแกรม RAM Concept V8i สามารถคำนวณปริมาณวัสดุและราคาวัสดุรวมมาให้เลย

โปรแกรมทั้งสามที่กล่าวมาขั้นต้น ใช้อีลีเม้นท์แบบแผ่น (Plate Element) ในการวิเคราะห์แผ่นพื้น ซึ่งจะให้คำตอบของหน่วยแรงที่เกิดจากการกระจายของแรงในทั้งสองทิศทาง ซึ่งเป็นการมองโครงสร้างในแบบสามมิติโดยตรง ฉัตร สุจินดา [2], [3] ได้ศึกษามาแล้วว่าวิธีดังกล่าว ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างได้มากกว่าสองมิติ สมชาย ตงอาภรณ์ และฉัตร สุจินดา [4] ได้ศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติ โดยใช้โปรแกรม RAM Concept โดย

มี Span Length คือ 8 เมตร โดยได้ศึกษาน้ำหนักบรรทุกจร 300 - 500 กก/ม^2 ธนัญกรณ์ ต่อศิริสกุลวงศ์ และฉัตร สุจินดา [5] ได้ศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติ โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE โดยมี Span Length 2 ค่าคือ 6 และ 9 เมตร และได้ศึกษาน้ำหนักบรรทุกจร 200 และ 400 กก/ม^2

บทความนี้เป็นการนำโปรแกรม RAM Concept มาทดลองออกแบบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม ที่ให้ราคาค่าก่อสร้างต่ำสุดโดยอ้างอิงข้อมูลราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศไทย สำหรับ Span Length 6 และ 9 เมตร กำลังอัดประลัยคอนกรีต 35 MPa (357 กก/ซม^2) และน้ำหนักบรรทุกจร 200 และ 400 กก/ม^2 โดยกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่หัวเสาเมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เพียงพอ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณราคาและออกแบบเบื้องต้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของสมชาย ตงอาภรณ์ และฉัตร สุจินดา [4] ที่ศึกษาเฉพาะ Span Length 8 เมตร ในขณะที่งานวิจัย ธนัญกรณ์ ต่อศิริสกุลวงศ์ และฉัตร สุจินดา [5] ศึกษาโดยใช้โปรแกรม CSI SAFE

แบบจำลองสามมิติสำหรับระบบพื้นใช้ไฟไนท์อีลีเมนท์แบบแผ่น (Plate Element) เป็นตัวแผ่นพื้น และใช้อีลีเมนท์โครงข้อแข็ง (Frame Element) เป็นเสา ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบจำลองไฟไนท์อีลีเม้นท์ของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในแต่ละกรณีศึกษา จะกำหนดความหนาของแผ่นพื้น, Span Length, และน้ำหนักบรรทุกจรต่างๆ กัน จากนั้นจึงวางลวดอัดแรงทั้งทางด้าน Band และ Uniform Direction โดยเริ่มต้นให้จำนวนลวดมีปริมาณเพียงพอที่ทำให้ค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยในหน้าตัดคอนกรีตไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ระบุไว้ในข้อกำหนด 18.12.4 ของ ACI318-08 [6] คือ 8.8 กก/ซม^2 เสร็จแล้ววิเคราะห์ระบบโครงสร้างและ ตรวจสอบหน่วยแรงต่างๆ ที่หน้าตัดวิกฤตว่าผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่ หากไม่ผ่าน ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเพิ่มจำนวนลวดอัดแรงในบริเวณที่เกี่ยวข้องทีละเส้น แล้วทำการวิเคราะห์ตรวจสอบซ้ำจนกว่าจะได้หน่วยแรงที่หน้าตัดวิกฤตผ่านทั้งหมด ในบางครั้งอาจต้องมีการเพิ่ม Drop Panel และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่บริเวณหัวเสา ในการศึกษานี้ใช้ขนาดของ Drop Panel เริ่มต้น ตามมาตรฐานที่ระบุไว้ใน ACI318-08 [6] ข้อ 13.2.5 และจะเพิ่มขนาดความหนาของ Drop Panel จนกว่าโปรแกรมจะทำการตรวจสอบแรงเฉือนเจาะทะลุที่หัวเสาผ่าน นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบระยะการโก่งตัวของแผ่นพื้นตามข้อกำหนดของ ACI318-08 [6] ข้อ 9.5 ด้วยเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นที่ศึกษาบางกรณี ต่ำกว่าที่ ACI318-08 อนุญาตให้ยกเว้นการตรวจสอบระยะการโก่งตัว เมื่อออกแบบเสร็จแล้ว โปรแกรมจะแสดงผลของปริมาณวัสดุและค่าแรงและราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรมาให้

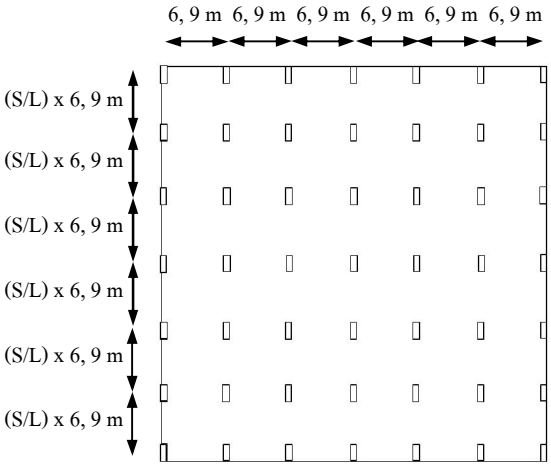
2. ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กำหนดรูปแบบการจัดเรียงของเสา

ในการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ 2 กรณี คือ สี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว 0.5 และ 1.0 ดังแสดงภาพที่ 2 แผ่นพื้นทั้งหมดมี

Span Length คือ 6 และ 9 เมตร ใช้ Span Length สูงสุดที่แนะนำโดย Aalami [7] เสาสูง 3 เมตร (มีทั้งเสาบนและเสาล่าง) เสาและพื้นใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัย $f'_c = 35Mpa$ รับน้ำหนักตายตัวที่ไม่ใช่น้ำหนักของตัวพื้นเอง (Super-imposed Dead Load) W_{SDL}= 120 กก/ม^2 (เช่น คอนกรีต Topping, วัสดุปูพื้น, ท่อประปา-แอร์, ฝ้าเพดาน) และน้ำหนักบรรทุกจร W_{LL}= 200 และ 400 กก/ม^2



ภาพที่ 2 กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าและจัตุรัส ซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (S/L) 0.5 และ 1.0

2.2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรง

รวบรวมราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรงซึ่งเป็นข้อมูลในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 2

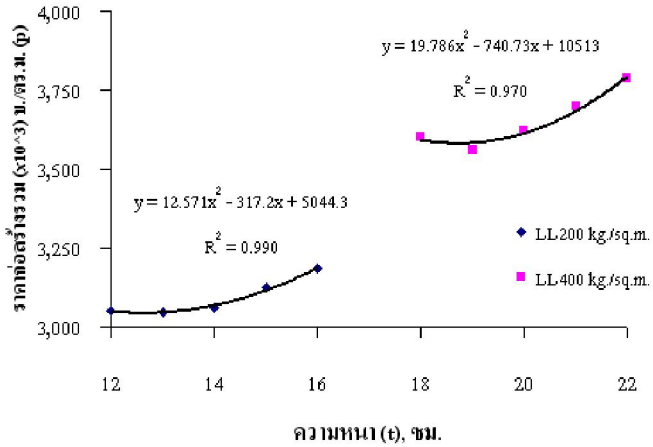
ตารางที่ 2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรง

ประเภท	ราคาต่อหน่วย (บาท)	
	วัสดุ	ค่าแรง
ลวดเกลียวอัดแรง (Low relaxation) 12.7 มม Grade 270	48/กก	25/กก
คอนกรีตกำลังอัดประลัย (35 MPa)	2,680/ม^3	430/ม^3
เหล็กเสริม (SD-40)	22.5/กก	2.8/กก
ไม้แบบ (เฉลี่ยการใช้งาน 3 ครั้ง)	125/ม^2	120/ม^2

แหล่งที่มาของข้อมูล : ดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ [8] และกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง [9]

2.3 นำราคาค่าก่อสร้างที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์

จากผลของการทดลองออกแบบ สำหรับแต่ละกรณีศึกษา นำราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร ที่ได้นำมาเขียนกราฟ เช่น กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (S/L=1.0 Span Length=9 เมตร) ได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ ค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรและความหนา กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (S/L=1.0 Span Length=9 เมตร)

จากกราฟในภาพที่ 3 แสดงราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร p และความหนาของแผ่นพื้น t ซึ่งนำมาหาความหนาที่เหมาะสม (ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุด) คือจุดที่ $\frac{dp}{dt} = 0$ จะได้ความหนาที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่ศึกษาต่างๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความหนาที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกรณี

กรณี		ระยะช่วงเสา (ม)	น้ำหนักบรรทุกจร W_{LL} , (กก/ม^2)	ความหนาที่เหมาะสม t , (ซม)
1	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	6	200	11.27
			400	12.07
		9	200	12.62
			400	18.72
2	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	6	200	12.35
			400	12.81
		9	200	16.00
			400	19.56

2.4 หาสมการถดถอย

จากข้อมูลในตารางที่ 3 นำมาหาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม E-view 5.1โดยกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นตัวแปรตาม โดยระยะช่วงเสาถึงเสาเป็นตัวแปรต้น จะได้สมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายความหนาแผ่นพื้นที่เหมาะสมและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อ

T = ความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม (ซม)

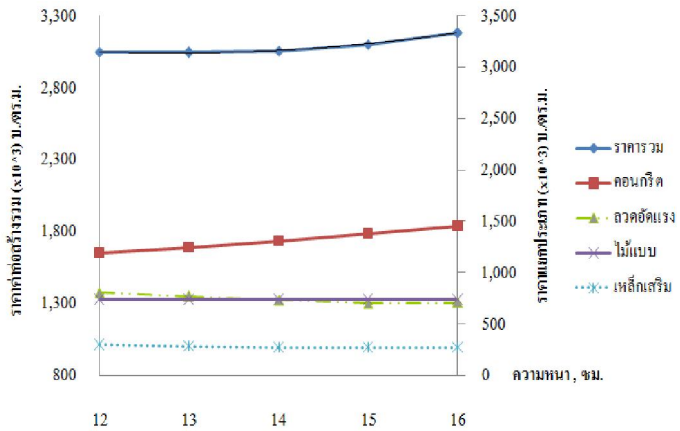
Span_Length = ระยะช่วงเสา (ม)

S/L = อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว

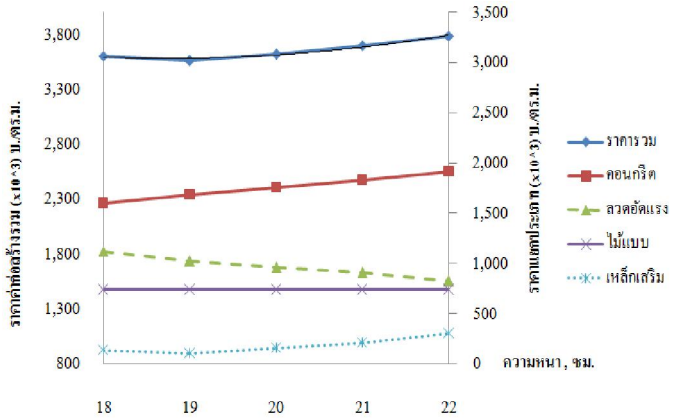
R^2 = Coefficient of Determination

3. อภิปรายผลการศึกษา

ภาพที่ 4 และ 5 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาก่อสร้างรวมและราคาวัสดุและค่าแรงแยกประเภทสำหรับกรณีสี่เหลี่ยม S/L=1.0 Span Length=9 เมตร LL 200 กก/ม^2 และ 400 กก/ม^2 ตามลำดับ สำหรับกรณีอื่นๆ มีลักษณะคล้ายกัน



ภาพที่ 4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวม ราคาวัสดุ และค่าแรงแยกประเภท กับความหนาแผ่นพื้น กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (S/L=1.0 Span Length=9 เมตร LL 200 กก/ม^2)



ภาพที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวม ราคาวัสดุ และค่าแรงแยกประเภท กับความหนาแผ่นพื้น กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส (S/L=1.0 Span Length=9 เมตร LL 400 กก/ม^2)

ตารางที่ 4 สมการถดถอยทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

กรณี	สมการทำนายความหนา (ซม)	R^2	ความคลาดเคลื่อน (Residual), (ซม)
1. สี่เหลี่ยมจัตุรัส	$T = 0.01955\ W_{LL} + 1.4967\ Span_length - 3.750$	0.902	-0.980 ถึง 0.980
2. สี่เหลี่ยมผืนผ้า (S/L=0.5)	$T = 0.01005\ W_{LL} + 1.7333\ Span_length - 0.835$	0.928	-0.775 ถึง 0.775
3. สี่เหลี่ยม อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (S/L) ($0.5 \le S/L \le 1.0$)	$T = 0.0148W_{LL} + 1.6150\ Span_length - 3.68\ (S/L) + 0.468$	0.896	-1.632 ถึง 1.278

3.1 จากเส้นกราฟของราคาคอนกรีต และเหล็กเสริมในภาพที่ 4 จะสังเกตได้ว่าที่ความหนา 12 ซม ราคาเหล็กเสริมต่อตารางเมตร มีค่าสูงกว่าที่ความหนา 16 ซม เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนา 12 ซม มีค่าความลึกประสิทธิผลน้อย จึงทำให้ปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น นั่นคือที่ความหนา 12 ซม หรือมากกว่า มีแนวโน้มของปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้นแต่มีปริมาณเหล็กเสริมลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น

3.2 จากเส้นกราฟในภาพที่ 5 ราคาเหล็กเสริมต่อตารางเมตรที่ความหนา 18 ซม มีค่าสูงกว่าที่ความหนา 19 ซม เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องที่จากบริเวณหัวเสาของกรณีความหนา 18 ซม มีปริมาณแรงเฉือนเจาะทะลุเกินกว่าที่จะเสริมเหล็กรับแรงเฉือนอย่างเดียวได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่ม Drop Panel และต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนบริเวณนี้เพิ่มขึ้น ที่ความหนา 19 ซม หรือมากกว่า มีแนวโน้มของปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น

3.3 จากเส้นกราฟในภาพที่ 4 และ 5 ปริมาณลวดอัดแรงต่อตารางเมตร จะสังเกตได้ว่า ที่ความหนาน้อยจะมีปริมาณลวดอัดแรงมาก แต่เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้มากขึ้น ปริมาณลวดอัดแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนาน้อย ระยะเยื้องศูนย์จะมีค่าน้อย ทำให้เกิดแรงยกตัวของลวดน้อย จึงต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากขึ้น นอกจากนี้ในระหว่างขั้นตอนออกแบบพบว่าที่ความหนาน้อยจำเป็นจะต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากกว่าปริมาณต่ำสุด 8.8 กก/ซม^2 แต่ในกรณีความหนาสูงสุดของแต่ละกรณีที่ศึกษามักจะไม่ต้องเพิ่มปริมาณลวดจากปริมาณต่ำสุด

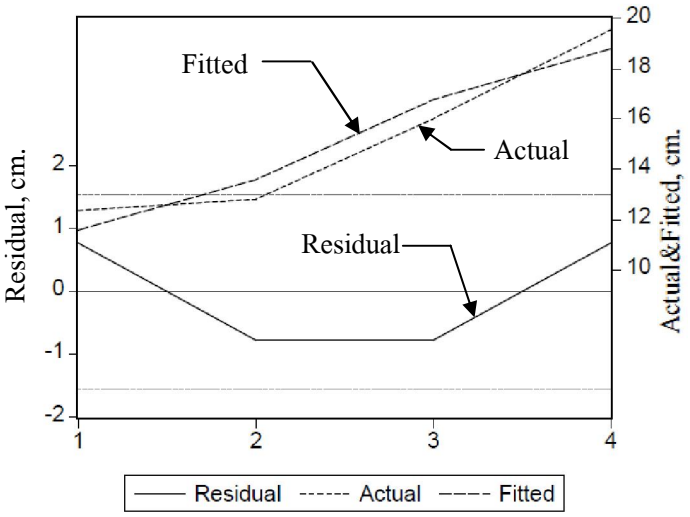
3.4 จากเส้นกราฟในภาพที่ 4 และ 5 ปริมาณไม้แบบต่อตารางเมตร จะสังเกตได้ว่าปริมาณไม้แบบต่อตารางเมตร มีค่าคงที่สำหรับทุกความหนา ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรม RAM Concept ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณไม้แบบด้านข้าง ซึ่งถือว่ามีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณไม้แบบทั้งหมด

3.5 จากเส้นกราฟในภาพที่ 4 และ 5 ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่ ที่ความหนาน้อย จะมีราคารวมต่อพื้นที่มา เมื่อเพิ่มความหนาในช่วงกลางๆ ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปอีก ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่กลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าก่อสร้างรวม เป็นผลรวมของราคาคอนกรีต เหล็กเสริม ลวดอัดแรง และไม้แบบ ซึ่งราคาของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีแนวโน้มโดยรวมที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น (ยกเว้นในกรณีความหนา 12 ซม) แต่ราคาลวดอัดแรงมีแนวโน้มในทางตรงกันข้าม ส่วนราคาไม้แบบนั้นคงที่สำหรับทุกความหนา จึงทำให้ราคารวมต่ำสุดเมื่อความหนาของพื้นมีค่าอยู่ในช่วงกลางๆ ซึ่งหากสมการถดถอยของราคารวม p ที่เป็นฟังก์ชั่นของความหนาของแผ่นพื้น t แล้วนำมาหาความหนา ทำให้ $\frac{dp}{dt} = 0$ จะสามารถประมาณค่าความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งในกรณีศึกษาอื่นๆ ก็มีลักษณะเส้นกราฟของราคารวมที่คล้ายคลึงกัน จึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ในบทความนี้

3.6 สมการถดถอยของทั้ง 3 กรณี มีค่า Coefficient of Determination (R^2) ระหว่าง 0.896 ถึง 0.928 ซึ่งแสดงว่าระดับความสัมพันธ์ของจุดข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นสมการถดถอย อยู่ในระดับที่ดี สำหรับความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) ของทั้ง 3 กรณี มีค่าตั้งแต่ 0.775 ถึง 1.278 ซม ซึ่งในกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กรณี 1 และ 2) มีความคลาดเคลื่อนของการทำนาย ระหว่าง 0.775 ถึง 0.980 แสดงว่าสมการทำนายความหนาอยู่ในระดับที่ดี เนื่องจากมีค่าไม่ถึง 1.0 ซม เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เพราะผู้ออกแบบนิยมกำหนดความหนาของแผ่นพื้นเป็นจำนวนเต็ม ส่วนกรณีสี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (S/L) มีความคลาดเคลื่อนของการทำนายระหว่าง -1.632 ถึง 1.278 ซม มีค่าสูงกว่าของกรณี

สี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากนำข้อมูลกรณีของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามารวมกัน

3.3 ภาพที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบความหนาที่เหมาะสมของจุดข้อมูล (Actual) จากตารางที่ 3 และของที่ทำนายได้ (Fitted) จากสมการในตารางที่ 4 และความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) โดยใช้โปรแกรม E-view 5.1 สำหรับกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้กราฟดังแสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความหนาที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบ (Actual) ที่ได้จากสมการทำนาย (Fitted) และความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสอง (Residual) สำหรับกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส

จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า ความคลาดเคลื่อนของการทำนาย สำหรับกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีค่า คือในช่วง -0.98 ถึง 0.98 ซม

ตารางที่ 4 แสดงถึงสมการทำนายทั้ง 3 กรณีคือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และรวมทั้งสี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (S/L=0.5) เพื่อให้สามารถทำนายความหนาที่เหมาะสมที่มีค่า S/L ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 และได้รวบรวมช่วงความคลาดเคลื่อนของทั้ง 3 กรณีที่ศึกษาเอาไว้

4. สรุป

4.1 จากการศึกษาเพื่อที่จะหาความหนาที่เหมาะสมของพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุด โดยกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่หัวเสา เมื่อคอนกรีตบริเวณรอบหัวเสาไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ และมีการจัดเรียงของเสาที่อยู่ในแนวตั้งฉากที่แตกต่างกัน 3 กรณีคือ (1) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวเท่ากับ 0.5 และ (3) สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 โดยใช้ราคาวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย จะได้เป็นสมการอย่างง่าย ดังในตารางที่ 4 ซึ่งมีค่า R^2 อยู่ในระหว่าง 0.896 ถึง 0.928 และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.775 ถึง 1.278 ซม ซึ่งในกรณีของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.0 ซม เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน ส่วนกรณีสี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวเท่ากับ 0.5 ถึง 1.0 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 1.0 เนื่องจากเป็นการนำข้อมูลของกรณีสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามารวมกัน และสมการถดถอยที่ได้เลือกใช้ไม่ได้เป็นรูปสมการที่อธิบายถึงพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง แต่เป็นการประมาณในเชิงสถิติ จึงทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เมื่อพยายามที่จะใช้สมการทำนายดังกล่าวเพื่ออธิบายกรณีที่ครอบคลุมกว้างขึ้น

สำหรับอาคารที่มีลักษณะการจัดเรียงของเสาแตกต่างกันออกไปจากกรณีที่ศึกษาดังกล่าว อาจจำเป็นต้องประมาณโดยเลือกใช้กรณีที่ใกล้เคียงที่สุด

4.2 จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนช่วงความยาวต่อความหนาที่เหมาะสม สำหรับแผ่นพื้นที่แนะนำโดย Post-Tensioning Institute [1] มีค่าอยู่ระหว่าง 40 - 45 แต่ผลการวิเคราะห์จากการศึกษานี้มีค่าประมาณ 50 - 70 ซึ่งหมายความว่าในกรณีที่ระยะช่วงความยาวของเสาที่ยาวเท่ากัน จะมีความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมน้อยกว่าที่

Post-Tensioning Institute แนะนำ ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากกำลังวัสดุ (คอนกรีตและเหล็กเสริม) ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันแตกต่างไปจากในอดีต ราคาวัสดุ/ค่าแรงในประเทศต่างจากราคาในต่างประเทศ และน้ำหนักบรรทุกของพื้นที่นำมาวิเคราะห์แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] The Post-Tensioning Institute, 1999. Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors, Phoenix, AZ.

[2] ฉัตร สุจินดา, 2551. 14-16 พค. การเปรียบเทียบผลการออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติ และวิธีไฟไนท์อิลิเมสต์แบบแผ่นสามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา.

[3] ฉัตร สุจินดา, 2552. 13-15 พค. การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ทุติยภูมิในพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติ และวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบแผ่นสามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, สุรสัมมนาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.

[4] สมชาย ตงอาภรณ์ และฉัตร สุจินดา, 2552. 20-22 ตค. การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติ. เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5, โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท นครราชสีมา.

[5] ธนัญกรณ์ ต่อศิริสกุลวงศ์ และฉัตร สุจินดา, 2554. 18-20 พค. การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติโดยใช้โปรแกรม CSI SAFE. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, โรงแรมเดอะซานย์ พัทยา จ. ชลบุรี.

[6] ACI Committee 318, 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-08). Farmington Hill, MI.

[7] Aalami, B.O., 1989. Design of Post-Tensioned Floor Slab, June: 59-61.

[8] ดัชนีเศรษฐกิจการค้ากระทรวงพาณิชย์, 2554. มิ.ย. ดัชนีราคาวัสดุก่อสร้าง.

[9] กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง, 2554. มิ.ย. บัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการ สำหรับการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2