การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง โดยวิธีไฟไนท์อีลีเม้นท์แบบแผ่นสามมิติโดยใช้โปรแกรม CSI SAFE

A Study of Optimal Thickness for Post-Tensioned Concrete Flat Slab using 3D Plate Finite Element using CSI SAFE Program

ธนัญกรณ์ ต่อศิริสกุลวงศ์[1*], ฉัตร สุจินดา[2]

[1] นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม tanunkorn@hotmail.com

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

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอถึงการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง โดยอาศัยข้อมูล ราคาต่อหน่วยของวัสดุคอนกรีต ลวดอัดแรง เหล็กเส้น แบบหล่อ และค่าแรงในประเทศไทย เพื่อนำมาทดลองออกแบบแผ่นพื้นที่มีความหนา และน้ำหนักบรรทุกจรต่าง ๆ กัน โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลีเม้นท์แบบแผ่นสามมิติ มีกรณีศึกษาคือ สี่เหลี่ยมซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว 0.5 และ 1.0 น้ำหนักบรรทุกจร 200 และ 400 kg/m^2 ระยะช่วงเสา 6 และ 9 m กำลังอัดประลัยคอนกรีต 35 MPa (357 kg/cm^2) โดยมีข้อกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel ตรงหัวเสาที่คอนกรีตไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ จากนั้นได้นำผลการออกแบบไปหาสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ทำนายความหนาที่เหมาะสม ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด เพื่อช่วยให้วิศวกรและผู้ที่สนใจสามารถนำไปประมาณราคา และเป็นแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น

ABSTRACT

This paper presents a study to determine optimal thicknesses for post-tensioned concrete flat slabs based on construction unit costs in Thailand including concrete, prestressed cables, rebars, formworks and labors. The trial designs were performed for various parameters including thicknesses, and live loads. The CSI Safe program based on 3-dimensional plate finite element analyses 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 spans and 35 MPa (357 kg/cm^2) concrete ultimate strength given that the drop panels 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

* ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)

could help engineers and other interested parties for preliminary design and the construction cost estimation.

คำสำคัญ: Design guidelines, Post-tensioned Flat Slabs, Plate Bending Finite Element Analyses

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คานเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในอาคารทั่วไปและอาคารที่มีช่วงยาวมากๆ เนื่องจากราคาค่าก่อสร้างต่ำกว่าและมีระยะเวลาก่อสร้างสั้นกว่าระบบพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

The Post-Tensioning Institute (1999) มีข้อแนะนำเกี่ยวกับความหนาของแผ่นพื้น ซึ่งกำหนดไว้เป็นอัตราส่วนช่วงความยาว (Span) ต่อความหนา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่แนะนำโดย Post Tensioning Institute (1999)

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

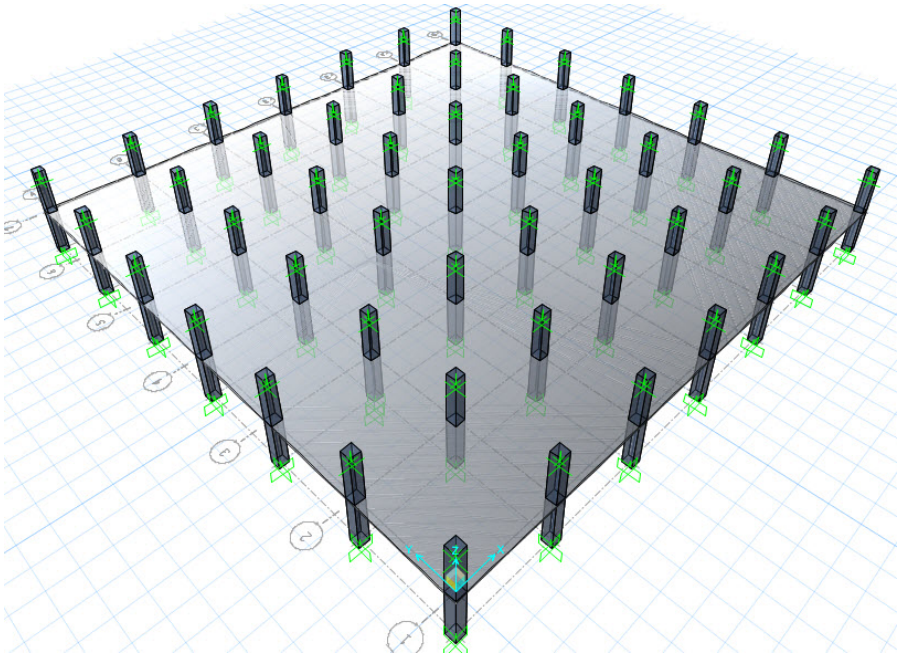
อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้น ของ Post Tensioning Institute (1999) ในตารางที่ 1 ได้มาจากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศสหรัฐอเมริกา และยังกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นช่วง เช่นสำหรับพื้นสองทางต่อเนื่องมีช่วง 40-45 เป็นต้น อีกทั้ง Post Tensioning Institute (1999) ไม่ได้ระบุปริมาณน้ำหนักบรรทุกของพื้น ซึ่งแน่นอนว่าราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรง สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันก็ย่อมทำให้ความหนาที่เหมาะสมต่างกัน

ในปัจจุบันมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นไร้คานซึ่งใช้วิธีวิเคราะห์ไฟไนท์อีลีเม้นท์ (Finite Element Analysis) เช่น RAM Concept (Bentley Systems Inc., 2010), Adapt Builder (Adapt Corporation, 2009) และ CSI SAFE (Computers and Structures Inc., 2009) โปรแกรมดังกล่าวใช้อีลีเม้นท์แบบแผ่น (Plate Finite Element) ซึ่งให้คำตอบของหน่วยแรงที่เกิดจากการกระจายของแรงทั้งสองทิศทาง ซึ่งวิธีนี้เป็นการมองโครงสร้างในแบบสามมิติโดยตรง และได้มีผู้ศึกษา

(ฉัตร สุจินดา, 2551, 2552) มาแล้วว่าให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างได้มากกว่าแบบสองมิติ สมชาย ตงอาภรณ์ (2552) ได้ศึกษาการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติ โดยใช้โปรแกรม RAM Concept (Bentley Systems, Inc., 2010) โดยมีระยะช่วงเสาเพียงช่วงเดียวคือที่ 8 m โดยได้ศึกษาน้ำหนักบรรทุกจร 300 - 500 kg/m^2

บทความนี้เป็นการนำโปรแกรม CSI SAFE (Computers and Structures Inc., 2009) มาทดลองออกแบบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม ที่ให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุดโดยใช้ข้อมูลราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศไทย สำหรับ ระยะช่วงเสา 6 และ 9 m และน้ำหนักบรรทุกจร 200 และ 400 kg/m^2 แตกต่างจากงานวิจัยของสมชาย ตงอาภรณ์ (2552) ซึ่งศึกษาเฉพาะช่วง 8 m และใช้โปรแกรม RAM Concept (Bentley Systems, Inc., 2010) โดยกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel ที่หัวเสาเมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เพียงพอ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณราคาและออกแบบเบื้องต้นต่อไป

แบบจำลองสามมิติสำหรับระบบพื้นใช้ไฟไนท์อีลีเม้นท์แบบแผ่น (Plate Element) เป็นตัวแผ่นพื้น และใช้อีลีเม้นท์โครงข้อแข็ง (Frame Element) เป็นเสา ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบจำลองไฟไนท์อีลีเม้นท์ของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง

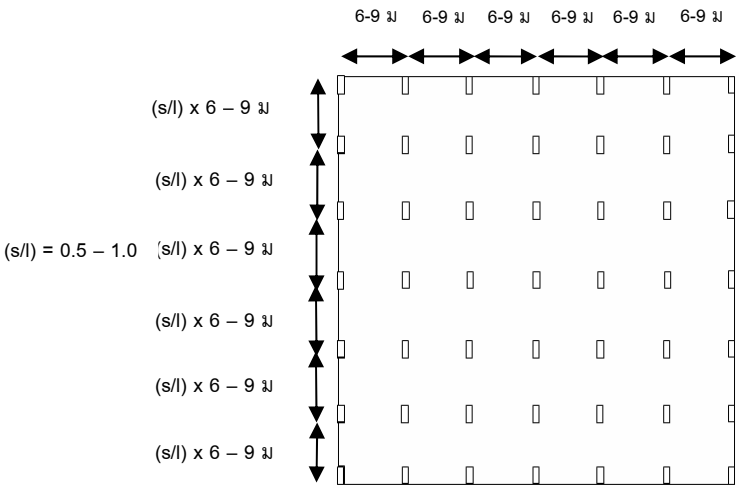
กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในแต่ละกรณีศึกษา จะกำหนดความหนาของแผ่นพื้น, ระยะช่วงเสา, และน้ำหนักบรรทุกจรต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงวางลวดอัดแรงทางด้าน Band และ Uniform Direction โดย เริ่มต้นให้จำนวน ลวดมีค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยในหน้าตัดคอนกรีตไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ระบุไว้ในข้อกำหนด 18.12.4 ของ ACI318-08 (ACI Committee 318, 2008) คือ 8.8 kg/cm^2 (125 psi) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ระบบโครงสร้างและตรวจสอบหน่วยแรงต่าง ๆ ที่หน้าตัดวิกฤตว่าผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่ หากไม่ผ่านผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเพิ่มจำนวนลวดอัดแรงในบริเวณที่เกี่ยวข้องที่ละเส้น แล้วทำการวิเคราะห์ตรวจสอบซ้ำจนกว่าจะได้หน่วยแรงที่หน้าตัดวิกฤตผ่านทั้งหมด ในบางครั้งอาจต้องมีการเพิ่ม Drop Panel ที่บริเวณหัวเสา เมื่อออกแบบเสร็จแล้วนำผลของการออกแบบที่ได้นำมาคำนวณปริมาณวัสดุและค่าแรงทั้งหมดเป็น ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร

2. ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

ขั้นตอนการหาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กำหนดรูปแบบการจัดเรียงของเสา ในการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ 2 กรณีคือ สี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว 0.5 และ 1.0 ดังแสดงภาพที่ 2 แผ่นพื้นทั้งหมดมีระยะช่วงเสา (Span) คือ 6 และ 9 m ใช้ระยะ Span สูงสุดที่แนะนำโดย (Aalami, 1989) เสาสูง 3 m (มีทั้งเสาบนและเสาล่าง) เสาและพื้นใช้คอนกรีตกำลังอัดประลัย $f_c' = 35MPa$ (357 kg/cm^2) รับน้ำหนักตายตัวที่ไม่ใช่น้ำหนักของตัวพื้นเอง (Super-imposed Dead Load) W_{SDL} = 120 kg/m^2 และรับน้ำหนักบรรทุกจร W_{LL} = 200 และ 400 kg/m^2



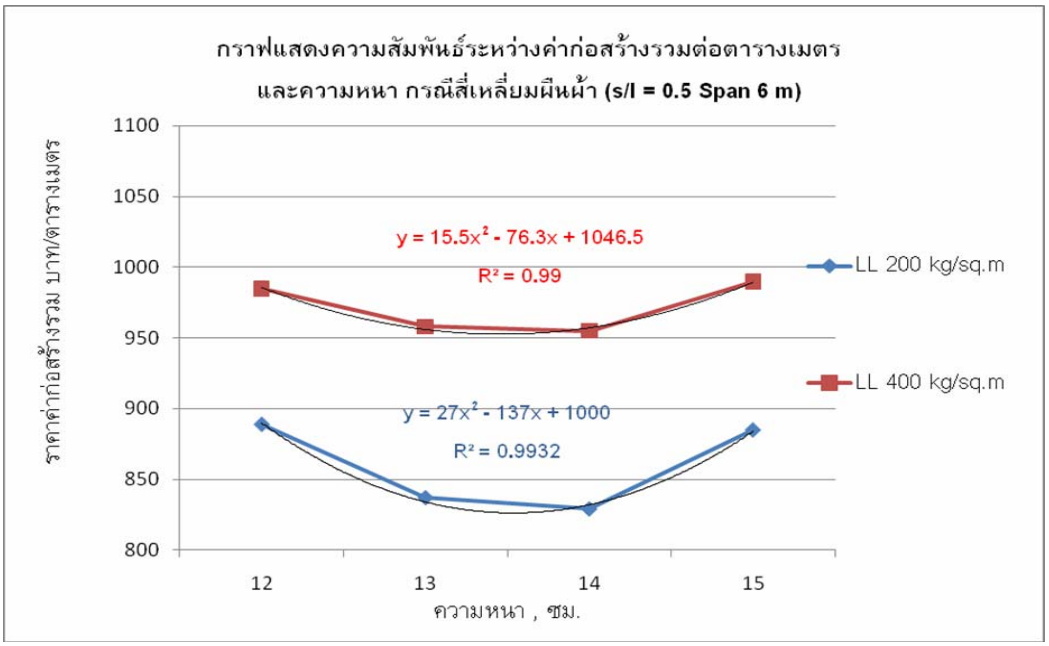
ภาพที่ 2 กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (s/l) 0.5 และ 1.0

2.2 ใช้ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรงซึ่งเป็นข้อมูลในประเทศไทย (สมชาย ตงอาภรณ์, 2552) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรง (สมชาย ตงอาภรณ์, 2552)

ประเภท		ราคาต่อหน่วย (บาท)		แหล่งที่มาของข้อมูล
		วัสดุ	ค่าแรง	
ลวดเกลียวอัดแรง (Low relaxation) 12.7 มม Grade 270		71 / kg	20 / kg	SCG
		68 / kg	20 / kg	PTE
		65 / kg	19 / kg	C-Post
คอนกรีตกำลังอัดประลัย	35 MPa	2,070 / m^3	100 / m^3	สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์
เหล็กเส้น (SD-40)		18.7 / kg	2 / kg	
แบบหล่อ (เฉลี่ยการใช้งาน 3 ครั้ง)		125 / m^2	120 / m^2	

2.3 จากผลของการทดลองออกแบบสำหรับแต่ละกรณีศึกษา นำราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตร ที่ได้นำมาเขียนกราฟ เช่นกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า (s/l = 0.5 Span 6 m) ได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรและความหนา กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า (s/l = 0.5 Span 6 m)

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

ตารางที่ 3 ความหนาที่เหมาะสมสำหรับกรณีระยะช่วงเสา น้ำหนักบรรทุกจรต่าง ๆ

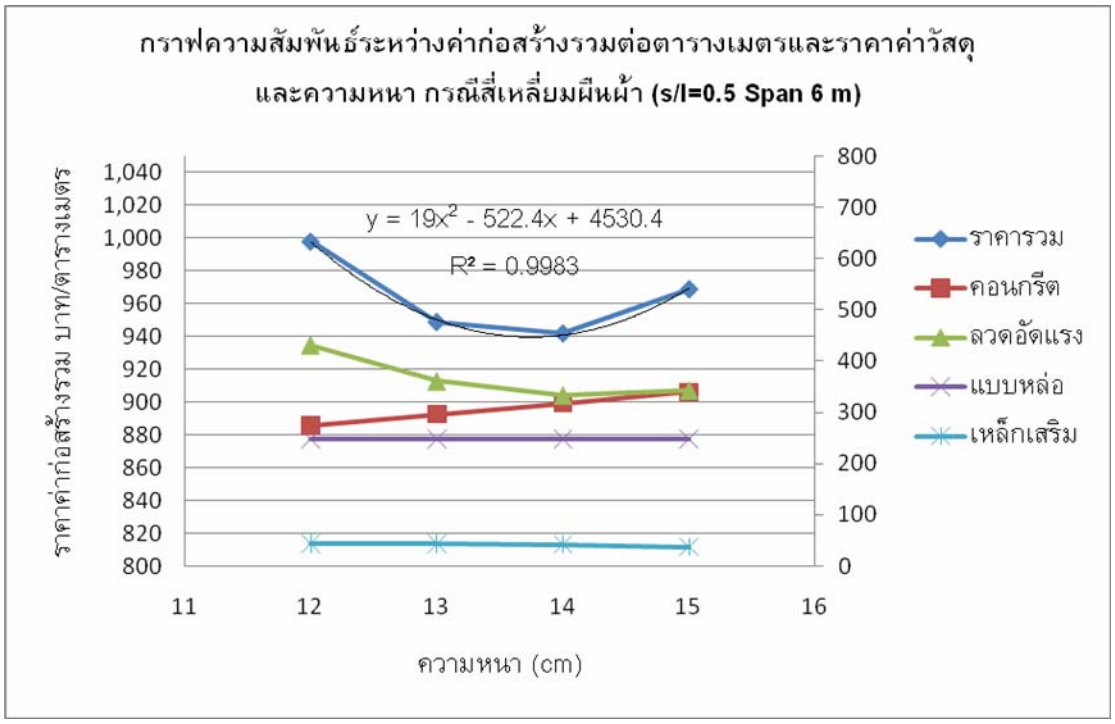
กรณี		ระยะช่วงเสา (m)	น้ำหนักบรรทุกจร W_{LL} (kg/m^2)	ความหนาที่เหมาะสม t (cm)
1	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	6	200	10.41
			400	13.54
		9	200	14.75
			400	20.41
2	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	6	200	13.66
			400	13.75
		9	200	15.40
			400	20.40

2.4 จากข้อมูลในตารางที่ 3 นำมาหาสมการถดถอยโดยใช้โปรแกรม E-view 5.1 (IHS Inc., 2006), โดยกำหนดความหนาที่เหมาะสมเป็นตัวแปรตาม ส่วนกำลังอัดประลัย น้ำหนักบรรทุกจร และระยะช่วงเสาถึงเสา เป็นตัวแปรต้น จะได้สมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อ

t = ความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม (cm)
Span = ระยะช่วงเสา (m)
W_{LL} = น้ำหนักบรรทุกจร (kg/m^2)
R^2 = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
s/l = อัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว

3. อภิปรายผลการศึกษา

ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมและราคาวัสดุและค่าแรงแยกประเภท สำหรับกรณีสีเหลี่ยมผืนผ้า (s/l = 0.5 Span 6 m) สำหรับกรณีอื่นๆ มีลักษณะคล้ายกัน



ภาพที่ 4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมและราคาวัสดุและค่าแรงแยกประเภท กับความหนาของแผ่นพื้น กรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า (s/l = 0.5 Span 6 m)

3.1 จากเส้นกราฟของราคาคอนกรีต และเหล็กเส้นใน ภาพที่ 4 จะสังเกตได้ว่าที่ความหนา 12 cm ราคาเหล็กเส้นต่อตารางเมตรสูงกว่าที่ความหนา 15 cm เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนา 12 cm มีความลึกประสิทธิผล (Effective Depth) จะมีค่าน้อยทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ที่ความหนา 12 cm หรือมากกว่า มีแนวโน้มของปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้นแต่มีปริมาณเหล็กเส้นลดลงเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น

จากเส้นกราฟปริมาณลวดอัดแรงต่อตารางเมตร จะสังเกตได้ว่า ที่ความหนาน้อยจะมีปริมาณลวดอัดแรงมาก แต่เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นให้มากขึ้น ปริมาณลวดอัดแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความหนาน้อยระยะเยื้องศูนย์ (Eccentricity) จะมีค่าน้อยทำให้เกิดแรงยกตัวของลวดน้อย จึงต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากขึ้น นอกจากนี้ในระหว่างขั้นตอนออกแบบพบว่าที่ความหนาน้อยจำเป็นจะต้องเพิ่มปริมาณลวดให้มากกว่าปริมาณต่ำสุด 8.8 kg/cm^2 (125 psi) แต่ในกรณีความหนาสูงสุดของแต่ละกรณีที่ศึกษามักจะไม่ต้องเพิ่มปริมาณลวดจากปริมาณต่ำสุด

จากเส้นกราฟปริมาณแบบหล่อต่อตารางเมตร ที่ความหนาน้อยจะมีปริมาณแบบหล่อมาก เมื่อเพิ่มความหนามากขึ้นปริมาณแบบหล่อจะลดลง เนื่องจากที่บริเวณหัวเสาของกรณีความหนาน้อย มีปริมาณหน่วยแรงเฉือนเจาะทะลุ (Punching Shear) เกินกว่าที่คอนกรีตจะรับได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มแป้นหัวเสา (Drop Panel) ให้มากขึ้น

จากเส้นกราฟค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่ ที่ความหนาน้อยจะมีราคารวมต่อพื้นที่มาก เมื่อเพิ่มความหนาในช่วงกลางๆ ค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะลดลงแต่เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปอีกค่าก่อสร้างรวมต่อพื้นที่จะกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าก่อสร้างรวมของราคาคอนกรีต เหล็กเส้น ลวดอัดแรง และแบบหล่อ ซึ่งราคาของคอนกรีตและเหล็กเส้นมีแนวโน้มโดยรวมที่เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น แต่ราคาลวดอัดแรงและแบบหล่อมีแนวโน้มในทางตรงกันข้าม จึงทำให้ราคารวมต่ำสุดเมื่อความหนาของแผ่นพื้นมีค่าอยู่ในช่วงกลางๆ ซึ่งหากหาสมการถดถอยของราคารวม ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของแผ่นพื้น t แล้วนำมาหาความหนา ทำให้ $\frac{dp}{dt}=0$ จะสามารถประมาณความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งในกรณีศึกษาอื่นๆ ก็มีลักษณะของเส้นกราฟของราคารวมที่คล้ายคลึงกัน จึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ในบทความนี้

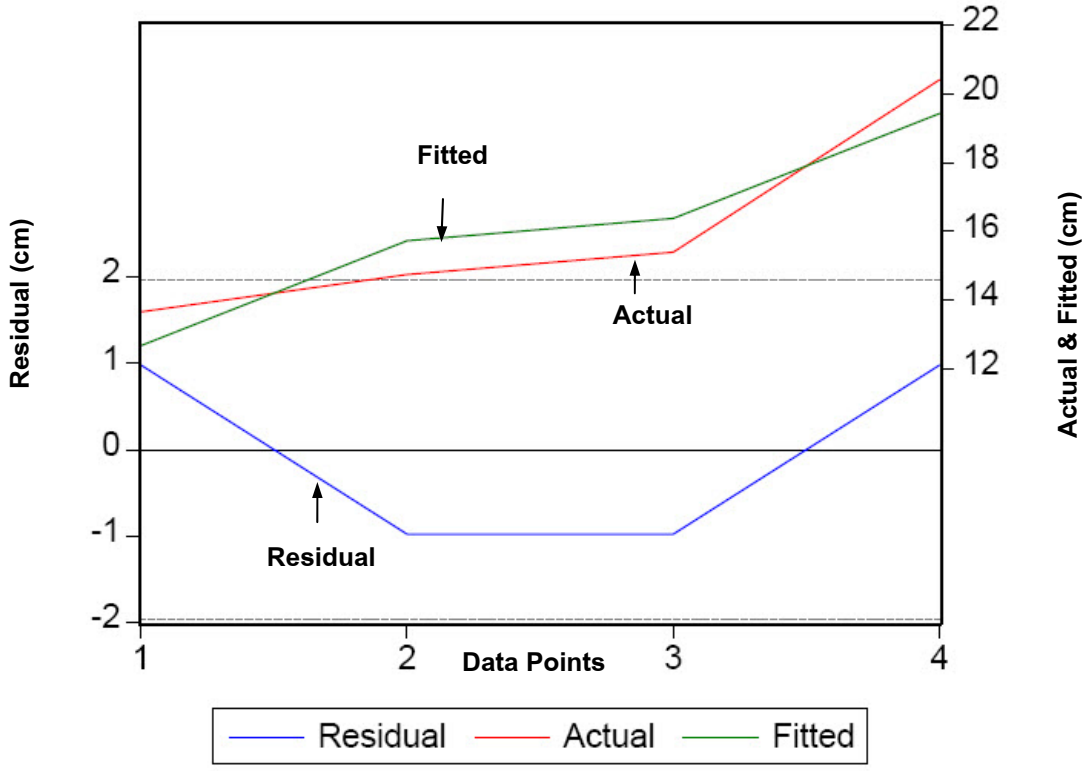
ตารางที่ 4 สมการถดถอยเพื่อทำนายความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

กรณี	สมการทำนายความหนา (cm)	R^2	ความคลาดเคลื่อน Residual (cm)
1. สี่เหลี่ยมจัตุรัส	t = 0.0220*W_{LL} + 1.869*Span - 5.835	0.969	-0.63 ถึง 0.63
2. สี่เหลี่ยมผืนผ้า	t = 0.0512*W_{LL} + 1.231*Span + 2.259	0.856	-0.98 ถึง 0.98
3. สี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (s/l)	t = 0.0186*W_{LL} + 1.550*Span-2.5525*(S/l) + 0.127	0.900	-1.12 ถึง 1.78

3.2 สมการถดถอยของทั้ง 3 กรณี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 ระหว่าง 0.856 ถึง 0.969 ซึ่งแสดงว่าระดับความสัมพันธ์ของจุดข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นสมการถดถอย อยู่ในระดับที่ดี สำหรับความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) ของทั้ง 3 กรณี มีค่าตั้งแต่ 0.63 ถึง 1.78 cm ซึ่งในกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กรณี 1 และ 2) มีความคลาดเคลื่อนของการทำนาย ระหว่าง -0.63 ถึง 0.98 แสดงว่าสมการทำนายความหนาอยู่ในระดับที่ดี เนื่องจากมีค่าไม่ถึง 1.0 cm เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เพราะผู้ออกแบบนิยมกำหนดความหนาของแผ่นพื้นเป็นจำนวนเต็ม ส่วนกรณีสี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (s/l) มีความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) ระหว่าง

-1.12 ถึง 1.78 cm มีค่าสูงกว่าของกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากนำข้อมูลกรณีของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามารวมกัน

3.3 ภาพที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบความหนาที่เหมาะสมของจุดข้อมูล (Actual) จากตารางที่ 3 และของที่ทำนายได้ (Fitted) จากสมการในตารางที่ 4 และความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) โดยใช้โปรแกรม E-view 5.1 (IHS Inc., 2006) เช่นของกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้กราฟดังแสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความหนาที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบ (Actual) ที่ได้จากสมการทำนาย (Fitted) และความคลาดเคลื่อนของของค่าทั้งสอง (Residual)

จากภาพที่ 5 จะให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (Residual) สำหรับกรณีสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีค่าคือในช่วง -0.98 ถึง 0.98 ซม ตารางที่ 4 แสดงถึงสมการทำนายทั้ง 3 กรณีคือสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า และรวมทั้ง สี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาว (s/l = 0.5) เพื่อให้สามารถทำนายความหนาที่เหมาะสมที่มีค่า s/l ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 และได้รวบรวมช่วงความคลาดเคลื่อน (Residual) ของทั้ง 3 กรณีที่ศึกษาเอาไว้

4. สรุป

จากการศึกษาเพื่อที่จะหาความหนาที่เหมาะสมของพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรง ที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่อตารางเมตรต่ำสุด โดยกำหนดให้เพิ่ม Drop Panel เมื่อคอนกรีตบริเวณรอบหัวเสาไม่สามารถรับแรงเฉือนเจาะทะลุได้ และมีการจัดเรียงของเสาที่อยู่ในแนวตั้งฉาก ที่แตกต่างกัน 3 กรณีคือ (1) สี่เหลี่ยมจัตุรัส (2) สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวเท่ากับ 0.5 และ (3) สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 โดยใช้ราคาวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย จะได้เป็นสมการอย่างง่าย ดังในตารางที่ 4 ซึ่งมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.856 ถึง 0.969 และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.63 ถึง 1.78 cm ซึ่งกรณีของสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.0 cm เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน ส่วนกรณีสี่เหลี่ยมอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวเท่ากับ 0.5 ถึง 1.0 มีค่าสูงเกิน 1.0 เนื่องจากนำข้อมูลของกรณีสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้ามารวมกัน สำหรับอาคารที่มีลักษณะการจัดเรียงของเสาแตกต่างกันออกไปจากกรณีที่ศึกษาดังกล่าว อาจจำเป็นต้องประมาณโดยเลือกใช้กรณีที่ใกล้เคียงที่สุด

5. บรรณานุกรม

ฉัตร สุจินดา, 2551. การเปรียบเทียบผลการออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติและวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบแผ่นสามมิติ, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, 14 - 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2551, บทความเลขที่ STR 010.

ฉัตร สุจินดา, 2552. การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ทุติยภูมิในพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติและวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบแผ่นสามมิติ, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 13 - 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2552, บทความเลขที่ STR 50467.

สมชาย ตงอาภรณ์, 2552. การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนท์แบบสามมิติ, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5, โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท นครราชสีมา, 20 - 22 ตุลาคม พ.ศ. 2552, บทความเลขที่ STR 03.

Aalami, B.O. 1989. Design of Post-Tensioned Floor Slabs. Concrete International, Volume 11 Number 6: 59 – 67.

Aalami, B., Bommer, A. 1999. Design Fundamentals of Post-Tensioned Concrete Floors. Post-Tensioning Institute.

ACI Committee 318, 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08) and Commentary (ACI318R-08).

ADAPT Corporation, 2009. Adapt Builder Program.

Bentley Systems Inc., 2010. RAM Concept Program.

Computers and Structures Inc., 2009. CSI SAFE 12.

Quantitative Micro Software, 2006. Program E-views Version 5.1.