

ความน่าจะเป็นของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติเหล็กเสริมในจังหวัดนครราชสีมา

Probability of Failure of Reinforced Concrete Short Column under Uncertainty of Properties of Reinforcing Bars in Nakhon Ratchasima Province

จงศิลป์ สุขุมจริยพงศ์¹

Received: March, 2015; Accepted: June, 2015

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาความน่าจะเป็นของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดตามแนวแกน สำหรับที่פקอาศัย ซึ่งออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน การศึกษานี้คุณสมบัติตัวแปรสุ่มที่นำเสนอในรูปข้อมูลสถิติคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกทุกจร ซึ่งได้นำมาพิจารณาร่วมกันเพื่อคำนวณความน่าจะเป็นของเสา โดยข้อมูลดิบของคุณสมบัติเหล็กเสริมเป็นการรวบรวมผลทดสอบในจังหวัดนครราชสีมาเท่านั้น การคำนวณความน่าจะเป็นตั้งบนพื้นฐานวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลและทฤษฎีความน่าจะเป็น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการประเมินความน่าจะเป็นควรอ้างอิงวิธีกำลัง ซึ่งเหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกว่าเหล็กเสริมขนาด DB25 สาเหตุเนื่องจากความไม่แน่นอนของคุณสมบัติทางสถิติของเหล็กเสริม นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มค่าที่เหมาะสมของน้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบ และตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 200 kg/m^2 และ 0.50 ซึ่งความน่าจะเป็นที่กรณีดังกล่าวมีค่าตั้งแต่ 0.3×10^{-5} ถึง 2.0×10^{-5} น้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นเป้าหมาย 3.5×10^{-5} เนื่องจากผลการวิเคราะห์ขึ้นกับข้อมูลทางสถิติของตัวแปรสุ่ม โดยเฉพาะข้อมูลคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่รวบรวมในจังหวัดนครราชสีมา ดังนั้น

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล นครราชสีมา
E-mail: aob_32@hotmail.com

ควรมีการเก็บรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติเหล็กเสริมให้มีจำนวนเพิ่มขึ้น เพื่อนำไปใช้ปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานของประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ : วิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล; ทฤษฎีความน่าจะเป็น; เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก; การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน; การออกแบบโดยวิธีกำลัง

Abstract

This article proposed the results of the probability of failure of the reinforced concrete of short column which was under the axial compressive load for residential building. The column was designed by the Working Stress Design (WSD) method. In this study, the statistical properties of random variables such as diameter of reinforcing bar, yield strength of reinforcing bar, compressive strength of concrete and live load were considered together to calculate the probability of failure of column. The raw data of properties of reinforcing bar were collected from the tested results in Nakhon Ratchasima province. The analysis process of the probability of failure based on the Monte Carlo Simulation Method (MCSM) and the Probability of failure theory. The results revealed that the assessment of the probability of failure base on the Strength Design Method (SDM) which the analysis results from the reinforcing bar size DB12 DB16 and DB20 were more appropriate than bar size DB25 due to the uncertainty of the statistical properties of reinforcing bar. Furthermore, the appropriate live load and strength reduction factor of reinforcing bar were 200 kg/m^2 and 0.50. The probability of failure of this case was 0.3×10^{-5} to 2.0×10^{-5} which was less than the criteria of probability of failure. Due to the analysis results depended on the statistical data of random variables that were collected in only Nakhon Ratchasima province, therefore, the properties data of reinforcing bar should be collected more data to improve the standard of Working Stress Design of Thailand.

Keywords: Monte Carlo Simulation Method; Probability of Failure Theory; Reinforced Concrete Short Column; Working Stress Design; Strength Design Method

บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง คงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี และเสียค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาน้อยกว่าโครงสร้างประเภทอื่น (Chovichien, V., 2009) อีกทั้งวัสดุหลักที่เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถจัดหาได้ง่าย ราคาไม่แพงมาก และมีแรงงานฝีมือที่มีความชำนาญงานคอนกรีตจำนวนมากในประเทศ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบเห็นได้ทั่วไป ได้แก่ อาคาร ถนน สะพาน เป็นต้น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยมีวิธีที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายด้วยกัน 2 วิธี คือ การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) และการออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design Method: SDM) (Jiravacharadet, M., 2006; Chovichien, V., 2009) วิธีการออกแบบทั้งสองให้ผลการออกแบบที่แตกต่างกันในด้านต่าง ๆ เช่น ความประหยัด ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ความปลอดภัยขณะใช้งาน เป็นต้น (Mekaroonkamon, K. et al., 2003) ที่ผ่านมานักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาผลการออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีทั้งสองในมุมมองต่าง ๆ กัน เช่น Mekaroonkamon, K. et al. (Mekaroonkamon, K. et al., 2003) นำเสนอผลการเปรียบเทียบการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานกับวิธีกำลัง ในมุมมองด้านความประหยัดและความปลอดภัยของโครงสร้าง Vongchavalitkul, S. and Boonsuan, W. (Vongchavalitkul, S. and Boonsuan, W., 2005) ศึกษาผลของอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อดัชนีความน่าเชื่อถือของคานที่เหมาะสมสำหรับคานที่ออกแบบโดยวิธีกำลัง Suchinda, C. (Suchinda, C., 2009) ศึกษาพารามิเตอร์เพื่อใช้กำหนดหน่วยแรงที่ยอมรับของเหล็กเสริมที่เหมาะสม สำหรับใช้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เป็นต้น ทุกงานวิจัยมุ่งเน้นศึกษาเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อโครงสร้าง และการใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัยโครงสร้างมีอยู่ด้วยกันหลายอย่างเช่นคุณสมบัติของวัสดุขนาดแรงกระทำขนาดโครงสร้าง เป็นต้นและเป็นที่ทราบดีว่าในขั้นตอนการออกแบบจะกำหนดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงคุณสมบัติของตัวแปรดังกล่าวมีค่าไม่แน่นอน การออกแบบหรือประเมินความปลอดภัยโครงสร้างจึงต้องพิจารณาความไม่แน่นอนหรือคุณสมบัติทางสถิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลประเมินความน่าจะเป็นของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวของที่พักอาศัยที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน โดยพิจารณาร่วมกับความไม่แน่นอนของคุณสมบัติตัวแปรสุ่มบางค่าที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนการออกแบบ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกจรผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงคุณสมบัติแท้จริงของโครงสร้างในขั้นตอนการออกแบบยิ่งขึ้น การศึกษากำหนดสมมติฐานความน่าจะเป็นที่เสาเข็มในขั้นตอนการออกแบบคือ โอกาสที่ผลประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนเสาโดยปลอดภัยตามทฤษฎีการออกแบบ มีค่าน้อยกว่าผลคำนวณน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงสู่เสาตามแนวแกน นอกจากนี้ได้ศึกษาแนวโน้มการกำหนดใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกจรคงที่และตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการออกแบบ ภายใต้ความไม่แน่นอนของตัวแปรสุ่มที่กำหนดใช้ในการศึกษา เพื่อให้ผลการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานมีความปลอดภัย และสอดคล้องกับคุณสมบัติของตัวแปรสุ่มที่เกี่ยวข้องมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์คุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีตที่นำมาทดสอบในจังหวัดนครราชสีมา เฉพาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและกำลังที่จุดครากเหล็กเสริม
2. เพื่อนำเสนอผลประเมินความน่าจะเป็นวิธีในขั้นตอนการออกแบบของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ปลอกเดี่ยวที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน
3. เพื่อนำเสนอแนวโน้มนำการกำหนดใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกจรคงที่และตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมที่เหมาะสม ในขั้นตอนการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานสำหรับที่พักอาศัย

ระเบียบวิธีการวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทความนี้เป็นการศึกษาความน่าจะเป็นวิธีในขั้นตอนการออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เสาสั้นกรณีศึกษากำหนดให้รับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนเท่านั้น และมีอัตราส่วนความขรุขระน้อยไม่เกินพิกัดที่จะทำให้เกิดการโก่งเคาะทางข้างตามข้อกำหนดการออกแบบการศึกษาได้กำหนดขอบเขตโดยเป็นการรวบรวมผลทดสอบคุณสมบัติเหล็กเสริมจากหน่วยงานแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งนำเสนอเพียง 2 คุณสมบัติสำคัญที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลในบทความ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม ข้อมูลที่รวบรวมได้นำมาตรวจสอบประเภทการแจกแจง คำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ผลได้กำหนดแปลนอาคารและข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษา สำหรับใช้ประกอบการคำนวณน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงเสากรณีศึกษาตามแนวแกนเท่านั้น จากนั้นออกแบบเสาด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานโดยใช้ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นค่าคงที่หรือค่าระบุ บันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้คำนวณความน่าจะเป็นวิธีเสาตามสมมติฐานข้างต้น ค่าความน่าจะเป็นวิธีที่ประเมินได้นำมาใช้กำหนดแนวโน้มน้ำหนักบรรทุกจรคงที่และตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมที่เหมาะสมในการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดเขียนในโปรแกรม Microsoft Excel 2010 โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

3.1 การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD)

การออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ได้ดำเนินการตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ที่จัดทำโดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) (The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, 2010) ซึ่งมีสมการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยตามแนวแกนเสา (P_{WSD}) ดังสมการที่ (1)

$$P_{WSD} = 0.85 A_g (0.25 f'_c + f_s \rho_g) \quad (1)$$

เมื่อ A_g คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว (cm^2)
 f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (ksc)

f_s คือ หน่วยแรงปลอดภัยของเหล็กเสริมในแนวตั้งของเสา (ksc) ซึ่งให้ใช้เท่ากับร้อยละ 40 ของกำลังครากต่ำสุดตามค่าเกณฑ์กำหนด แต่ต้องไม่เกิน 2,100 ksc

ρ_g คือ อัตราส่วนของเนื้อที่เหล็กเสริมตามแนวตั้ง (A_s) ต่อเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g)

3.2 การออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design Method: SDM)

การออกแบบเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวโดยวิธีกำลัง ได้ดำเนินการตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ที่จัดทำโดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, 2012) ซึ่งมีสมการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยตามแนวแกน (ϕP_{SDM}) ดังสมการที่ (2)

$$\phi P_{WSD} = 0.80\phi[(0.85f'_c(\bar{A}_g - \bar{A}_{st})) + (f_y\bar{A}_{st})] \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับโครงสร้างรับแรงอัดตามแนวแกนใช้ค่าเท่ากับ 0.70 เมื่อการก่อสร้างมีการควบคุมงานเป็นอย่างดีและมีการควบคุมคุณภาพวัสดุ

$\bar{A}_g$ คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว (cm^2)

$\bar{A}_{st}$ คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมตามยาว (cm^2)

f_y คือ กำลังครากที่กำหนดของเหล็กเสริม (ksc)

3.3 วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation Method: MCSM)

วิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นเทคนิคที่ใช้สร้างผลลัพธ์เชิงตัวเลขโดยไม่ต้องดำเนินการทดสอบจริงแต่จำเป็นต้องมีข้อมูลผลการทดสอบเดิม เพื่อนำมาตรวจสอบลักษณะการแจกแจงและคำนวณหาค่าตัวแปรเชิงสถิติที่สำคัญของข้อมูล ข้อมูลเชิงสถิติดังกล่าวจะสามารถใช้สร้างชุดข้อมูลเชิงตัวเลขเพิ่มขึ้นใหม่ที่มีคุณสมบัติตามชุดข้อมูลเดิม เมื่อพิจารณาตัวแปรเชิงสุ่ม X ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) แทนด้วย $F_X(x)$ ดังนั้น สามารถสร้างชุดข้อมูลของตัวแปรเชิงสุ่ม x_i เพิ่มขึ้นจากอินเวอร์สฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมตามสมการที่ (3) (Andrzej, S. N. and Kevin, R. C., 2000) ดังนี้

$$x_i = F_x^{-1}(u_i) \quad (3)$$

เมื่อ u_i คือ ตัวเลขสุ่ม (Random Number) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

3.4 ทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probability of Failure Theory)

ความน่าจะเป็น (Probability of Failure: P_f) มีความสัมพันธ์กับส่วนเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin: Z) ของโครงสร้าง เป็นการคำนวณที่ตั้งบนพื้นฐานทฤษฎีความน่าเชื่อถือ (Reliability Theory) การคำนวณจะพิจารณาความแตกต่างระหว่างตัวแปรความต้านทานการวิบัติ (Resistance: R) นั่นคือผลคำนวณความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของหน้าตัดเสาที่ได้จากการออกแบบกับตัวแปรของแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง (Load: L) นั่นคือผลคำนวณน้ำหนักที่เสาต้องรับตามแนวแกนตามแปลนคานพื่นกรณีศึกษา ความน่าจะเป็นของโครงสร้างจึงมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) (Andrzej, S. N. and Kevin, R. C., 2000)

$$P_f = P(Z = R - L < 0) \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ความน่าจะเป็นของโครงสร้างจะเกิดขึ้นเมื่อความสามารถต้านทานการวิบัติมีค่าน้อยกว่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง การคำนวณความน่าจะเป็นของโครงสร้างจึงสามารถนำวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลมาประยุกต์ใช้ และนำเสนอในรูปแบบสมการที่ (5) (Andrzej, S. N. and Kevin, R. C., 2000) ดังนี้

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R < L) \quad (5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบการสุ่ม

ผลการดำเนินการศึกษา

การรวบรวมข้อมูลดิบของคุณสมบัติเหล็กเสริมคอนกรีตที่นำมาทดสอบในจังหวัดนครราชสีมาว่าเป็นเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งมีด้วยกัน 4 ขนาด คือ DB12 DB16 DB20 และ DB25 และเหล็กเสริมแต่ละขนาดมีจำนวนข้อมูลดิบที่ได้จากการเฉลี่ยค่าผลทดสอบขึ้นตัวอย่าง 3 ชั้น เท่ากับ 58 59 55 และ 17 ข้อมูล ตามลำดับ ข้อมูลดิบที่รวบรวมได้นำมาตรวจสอบและคำนวณคุณสมบัติทางสถิติของเหล็กเสริมได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 และในการศึกษาได้อ้างอิงข้อมูลสถิติของประเทศไทยที่มีนักวิจัยศึกษาไว้ เพื่อนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์นั่นคือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและน้ำหนักบรรทุกจรที่พิกัดภัย (Vongchavalitkul, S., 2014) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางสถิติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการคำนวณ

ขนาดเหล็กเสริม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง			กำลังที่จุดคราก		
	ประเภทการแจกแจง	ค่าเฉลี่ย (mm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mm)	ประเภทการแจกแจง	ค่าเฉลี่ย (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ksc)
DB12	Min. Extreme	11.77	0.26	Weibull	5,059.94	800.87
DB16	Min. Extreme	15.72	0.22	Weibull	4,968.55	719.19
DB20	Min. Extreme	19.67	0.47	Normal	4,725.29	697.41
DB25	Normal	24.72	0.12	Min. Extreme	4,726.65	1,042.93

หมายเหตุ: Min. Extreme หมายถึง การแจกแจงแบบ Minimum Extreme Value

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางสถิติของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและน้ำหนักบรรทุกจรที่พักอาศัย (Vongchavalitkul, S., 2014)

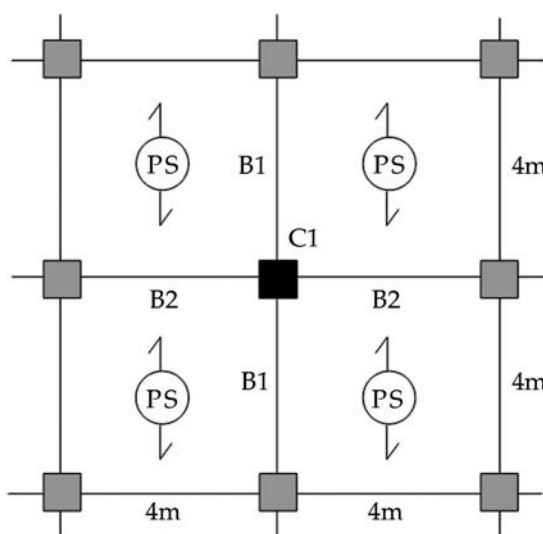
	ค่าระบุ	ประเภทการแจกแจง	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) (ksc)	180	Lognormal	215.0	17.20
น้ำหนักบรรทุกจรที่พักอาศัย (q) (kg/m^2)	150	Normal	182.4	34.66

การวิเคราะห์ได้กำหนดแปลงเสาคานพื้นของที่พักอาศัยกรณีศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1 เสา C1 คือ เสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวกรณีศึกษาที่รับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนเท่านั้น และเสา C1 รับน้ำหนักบรรทุกทุกเป็น 3 เท่าของแปลงที่กำหนด การวิเคราะห์เริ่มคำนวณน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่ถ่ายน้ำหนักลงสู่เสา C1 ตามแนวแกนด้วยวิธีแรงปฏิกิริยาปลายคาน โดยใช้น้ำหนักบรรทุกจรที่พักอาศัยตามค่าระบุดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นคำนวณตามรายละเอียดโครงสร้างที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 3 ขั้นตอนนี้ได้กำหนดใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบต่างกันอีก 6 ค่า คือ 182.4 200 220 240 260 และ 280 kg/m^2 จากนั้นคำนวณออกแบบเสาทุกกรณีด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานตามสมการที่ (1) บันทึกพื้นที่เหล็กเสริมตามแนวยาวที่ต้องการ การออกแบบใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามค่าระบุ คือ 180 ksc และใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมอีก 9 ค่า คือ 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบทุกกรณีนำไปใช้คำนวณขั้นตอนต่อไป

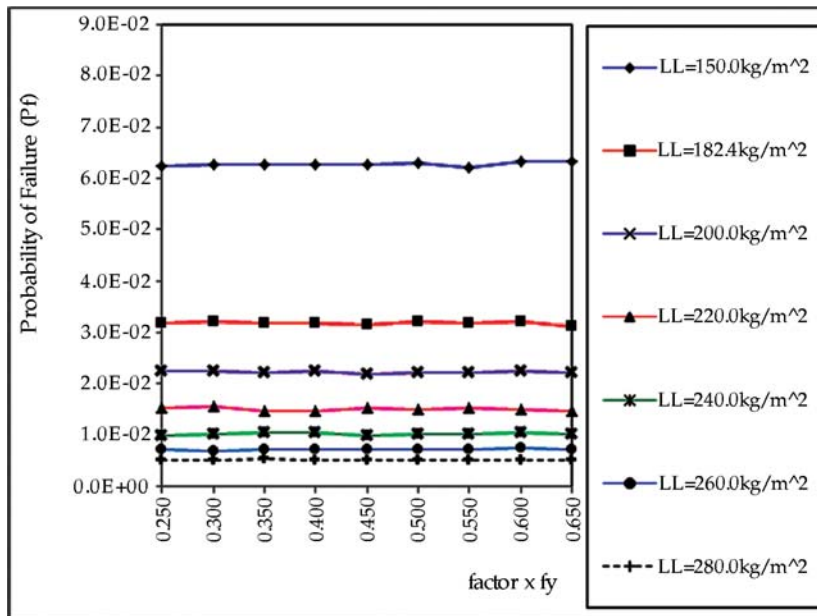
ตารางที่ 3 ส่วนประกอบอื่นของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องในการศึกษา

ประเภทโครงสร้าง	รายละเอียด
C1 เสากรณีศึกษา	ขนาดหน้าตัด 0.25 x 0.25
B1 คานต่อเนื่อง	ขนาดหน้าตัด 0.15 x 0.50 m
B2 คานต่อเนื่อง	ขนาดหน้าตัด 0.15 x 0.50 m
PS แผ่นพื้นสำเร็จรูปตัน	ความหนา 0.05 m
คอนกรีตเททับหน้าพื้น PS	ความหนา 0.05 m
คาน B1 และ B2 รับผนังก่ออิฐมวลเบาคြိးแผ่น ฉาบปูนเรียบ 2 ด้าน ตลอดความยาวคาน สูง 2.50 m	

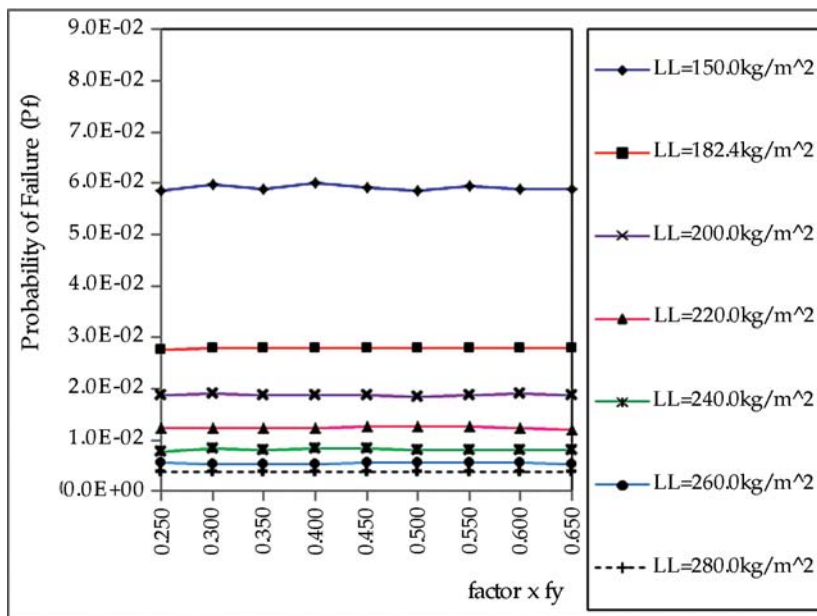
การคำนวณความน่าจะเป็นวิบัติเสาในขั้นตอนการออกแบบ ตั้งบนพื้นฐานวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลและทฤษฎีความน่าจะเป็นวิบัติดังสมการที่ (3) ถึง (5) ประกอบกับสมมติฐานความน่าจะเป็นวิบัติข้างต้น การศึกษาเริ่มคำนวณความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนเสาตลอดภัยด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานตามสมการที่ (1) โดยใช้ผลลัพธ์การออกแบบเสาข้างต้นคำนวณร่วมกับค่าสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม กำลังที่จุดครากเหล็กเสริม และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังตารางที่ 1 และ 2 ผลลัพธ์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลคำนวณการถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกองศา C1 ตามแนวแกนดัดแปลงในรูปที่ 1 โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของน้ำหนักบรรทุกจรดังตารางที่ 2 และน้ำหนักบรรทุกคงที่ตามข้อมูลในรูปที่ 1 และตารางที่ 3 ขั้นตอนนี้ตัวแปรสุ่มแต่ละตัวจะถูกสุ่มมา 50,000 ตัวอย่างต่อการคำนวณแต่ละกรณีในแต่ละรอบ ทำการคำนวณซ้ำ 10 รอบต่อกรณี และหาค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นวิบัติแต่ละกรณี ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5



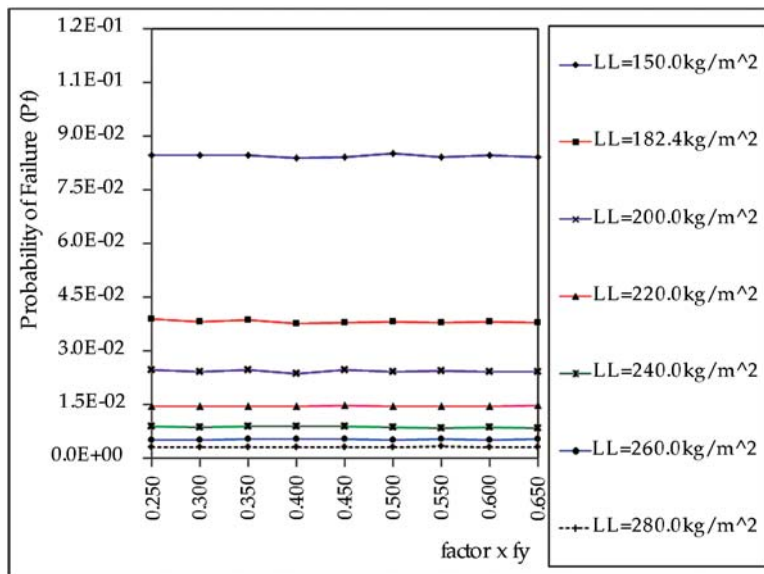
รูปที่ 1 แปลนที่พักอาศัยกรณีศึกษา



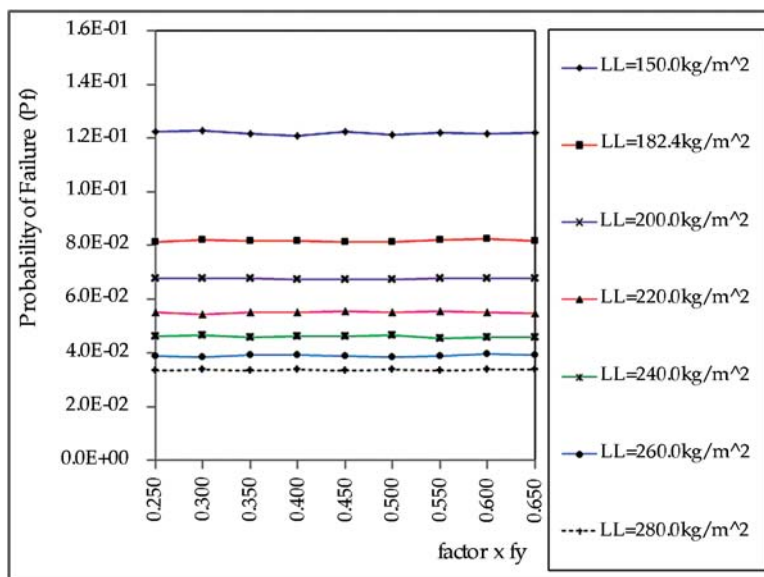
รูปที่ 2 ความน่าจะเป็นที่ของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB12 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี WSD



รูปที่ 3 ความน่าจะเป็นที่ของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB16 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี WSD



รูปที่ 4 ความน่าจะเป็นของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB20 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี WSD

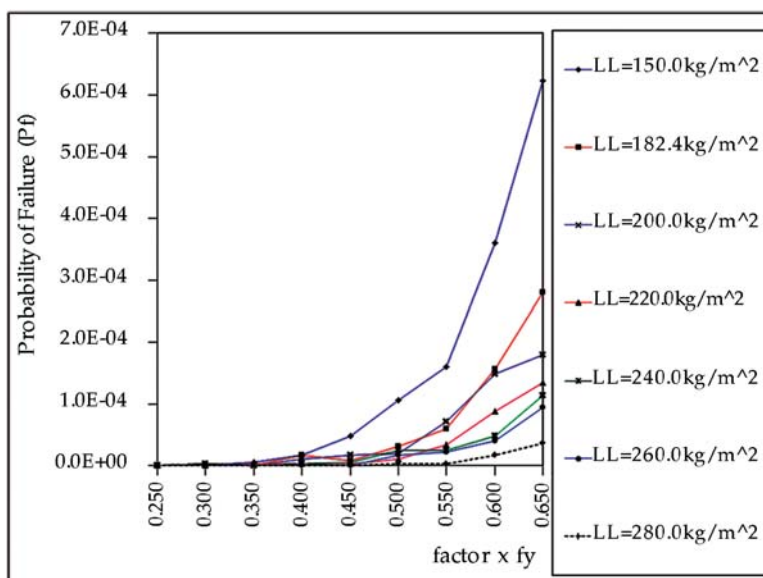


รูปที่ 5 ความน่าจะเป็นของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB25 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี WSD

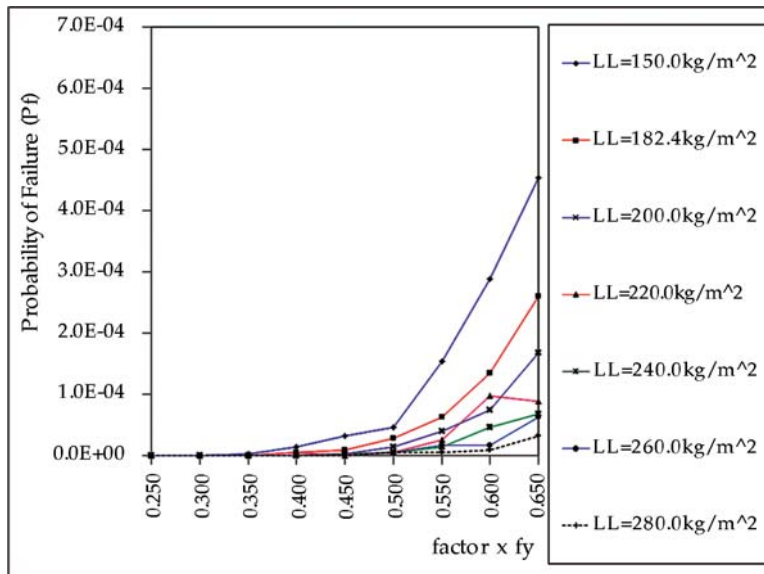
จากรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 พบว่ากรณีใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบเดียวกัน แต่ใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมต่างกัน ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นวิบัติมีแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับกรณีใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบต่างกัน แต่ใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมเดียวกัน ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นวิบัติมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าการประเมินด้วยวิธีข้างต้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบทำให้ความน่าจะเป็นวิบัติมีค่าลดลง

และเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นที่กรณีวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบเท่ากับ ค่าต่ำสุดตามข้อกำหนด 150 kg/m^2 พบว่าถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ความน่าจะเป็นที่มีแนวโน้มค่อนข้างสูงมีค่า 5.9×10^{-2} ถึง 8.5×10^{-2} แต่ถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 ความน่าจะเป็นที่มีแนวโน้มสูงกว่าเหล็กเสริมขนาดอื่นมีค่า 12.1×10^{-2} ถึง 12.3×10^{-2} และถ้าวิเคราะห์ กรณีใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบเท่ากับค่าเฉลี่ยทางสถิติหรือสภาพจริงปัจจุบัน 182.4 kg/m^2 พบว่าถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ความน่าจะเป็นที่มีแนวโน้มลดลงจากกรณีแรก แต่ยังคงค่อนข้างสูงมีค่า 2.8×10^{-2} ถึง 3.9×10^{-2} แต่ถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 ความน่าจะเป็นที่มีแนวโน้มลดลงจากกรณีแรกเช่นกัน แต่ยังคงสูงกว่าเหล็กเสริมขนาดอื่นในกรณีเดียวกันมีค่า 8.1×10^{-2} ถึง 8.2×10^{-2} สำหรับกรณีอื่นผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นให้ค่าในทำนองเดียวกัน และมีค่าค่อนข้างสูงทุกกรณี ส่วนเหล็กเสริมขนาด DB25 ยังให้ผลวิเคราะห์ที่แตกต่างและมากกว่าเหล็กเสริมขนาดอื่นทุกกรณีเช่นกัน

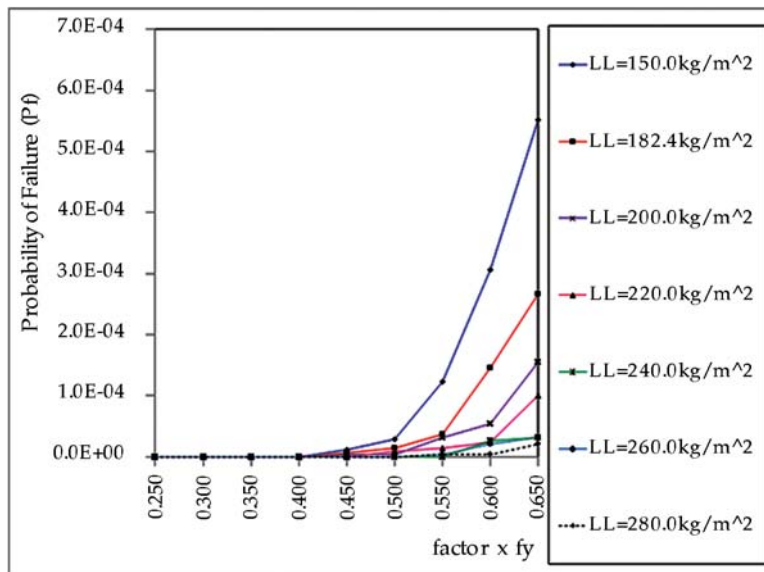
ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่การข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุและน้ำหนักบรรทุกจรรวมพิจารณา จะส่งผลให้ผลคำนวณความสามารถในการต้านทาน น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนเสาปลอดภัยด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน มีโอกาสน้อยกว่าผลคำนวณการถ่วง น้ำหนักบรรทุกลงเสาตามแนวแกนค่อนข้างมาก หรือกล่าวได้ว่ามีความน่าจะเป็นที่ค่อนข้างสูงทุกกรณี ซึ่งไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์การออกแบบ โดยเฉพาะกรณีใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบ ที่พิจารณาต่ำสุดตามกฎหมายกำหนดเท่ากับ 150 kg/m^2 ที่ให้ค่าความน่าจะเป็นที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ความน่าจะเป็นที่คำนวณได้เป็นการประเมินในขั้นตอนการออกแบบ ซึ่งไม่มีเกณฑ์กำหนดค่าความน่าจะเป็น ที่ยอมรับได้ชัดเจน การศึกษานี้จึงได้ประเมินความน่าจะเป็นอีกครั้งโดยใช้ข้อมูลการออกแบบเสาเดิม แต่คำนวณความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนเสาปลอดภัยด้วยวิธีกำลัง ตามสมการที่ (2) ซึ่งเป็นการคำนวณความน่าจะเป็นที่สภาวะขีดจำกัดสูงสุด โดยมีค่าความน่าจะเป็น เป้าหมายสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวหล่อในที่ที่สภาวะดังกล่าวเท่ากับ 3.5×10^{-5} (Suchinda, C., 2007) ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9



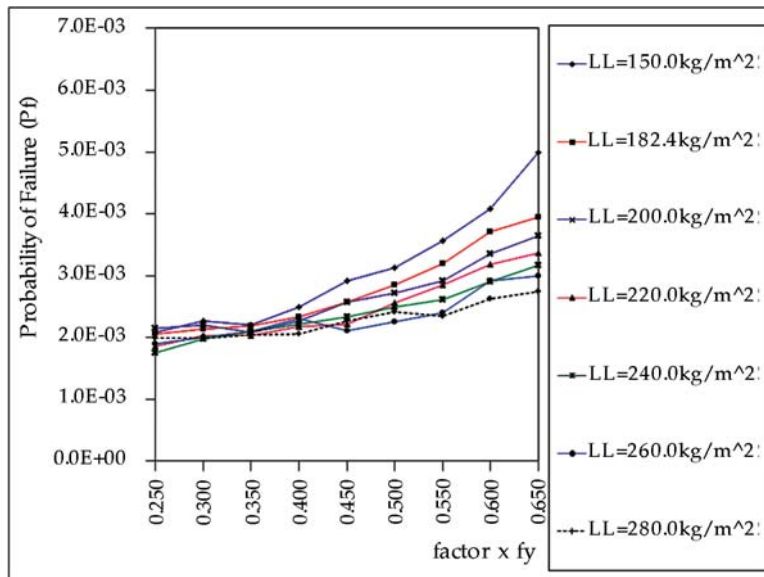
รูปที่ 6 ความน่าจะเป็นของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB12 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี SDM



รูปที่ 7 ความน่าจะเป็นของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB16 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี SDM



รูปที่ 8 ความน่าจะเป็นของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB20 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี SDM



รูปที่ 9 ความน่าจะเป็นที่ของเสากรณีใช้เหล็กเสริม DB25 คำนวณความสามารถในการรับกำลังโดยวิธี SDM

จากรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9 พบว่ากรณีใช้น้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบเดียวกันแต่ใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมต่างกัน ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีใช้น้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบต่างกันแต่ใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมเดียวกัน ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบมีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าการประเมินด้วยวิธีข้างต้นทั้งน้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบและตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมมีผลต่อความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลว และเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลววิเคราะห์โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบเท่ากับค่าต่ำสุดตามข้อกำหนด 150 kg/m^2 พบว่าถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าประมาณ 0 ถึง 6.2×10^{-4} แต่ถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าประมาณ 2.1×10^{-3} ถึง 5.0×10^{-3} และถ้าวิเคราะห์กรณีใช้น้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบเท่ากับค่าเฉลี่ยทางสถิติหรือสภาพจริงปัจจุบัน 182.4 kg/m^2 พบว่าถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าประมาณ 0 ถึง 2.8×10^{-4} แต่ถ้าใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าประมาณ 2.1×10^{-3} ถึง 4.0×10^{-3} สำหรับกรณีอื่นผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าในทำนองเดียวกัน นั่นคือ ค่าความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมลดลง หรือใช้น้ำหนักบรรทุกทุกจรคงที่ในการออกแบบเพิ่มขึ้น ส่วนเหล็กเสริมขนาด DB25 ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างจากเหล็กเสริมขนาดอื่นทุกกรณีและมีค่าความน่าจะเป็นที่ความล้มเหลวมีค่าสูงเช่นเดิม สาเหตุหนึ่งเกิดจากคุณสมบัติทางสถิติของกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม ที่มีค่าเฉลี่ยน้อยแต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมขนาดอื่น ซึ่งเป็นเพราะจำนวนข้อมูลดิบที่รวบรวมมาน้อยเกินไปและการกระจายตัวของข้อมูลดิบค่อนข้างสูง ผลการศึกษาจึงสรุปผลเฉพาะกรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 เท่านั้น ส่วนกรณีเหล็กเสริมขนาด DB25 ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ต่อไป

สรุปผลการวิเคราะห์ทุกกรณีพบว่า ผลวิเคราะห์ความน่าจะเป็นวิธีกำลังให้ค่าที่เหมาะสมมากกว่ากรณีอ้างอิงวิธีหน่วยแรงใช้งาน เมื่อพิจารณากรณีใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ที่มีค่าน้อยในการออกแบบเพื่อความประหยัด 150 182.40 และ 200 kg/m² จะให้ค่าความน่าจะเป็นวิธีน้อยกว่าความน่าจะเป็นวิธีเป้าหมาย 3.5×10^{-5} หลายกรณีย่อย แต่เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ ควรกำหนดใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบมากกว่าค่าเฉลี่ยสภาพจริงปัจจุบัน 182.40 kg/m² ที่มีการศึกษาไว้ ดังนั้น จึงเสนอแนวโน้มการปรับใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบที่พิกอาศัยเท่ากับ 200 kg/m² และใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริม 0.50 กรณีดังกล่าวความน่าจะเป็นวิธีมีค่าตั้งแต่ 0.3×10^{-5} ถึง 2.0×10^{-5} น้อยกว่าความน่าจะเป็นวิธีเป้าหมาย การเสนอใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบเท่ากับ 200 kg/m² สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wattanasupt, S. (Wattanasupt, S., 2005) และ Yodmuang, P. (Yodmuang, P., 2008) ที่ได้ศึกษาและประเมินน้ำหนักบรรทุกจรที่เหมาะสมของอาคารที่พิกอาศัยในประเทศไทย และเสนอแนะให้ปรับค่าน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารที่พิกอาศัยเท่ากับ 200 kg/m² สำหรับการเสนอใช้ตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริมเท่ากับ 0.50 พบว่ามีค่ามากกว่าที่กำหนดให้ใช้ในมาตรฐานการออกแบบเสาด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานคือ 0.40 สาเหตุหนึ่งเนื่องจากค่าเฉลี่ยผลทดสอบกำลังที่จุดครากเหล็กเสริมมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนด จึงควรใช้กำลังที่จุดครากเหล็กเสริมในการออกแบบสูงขึ้นโดยมีค่าความปลอดภัยไม่น้อยกว่าเดิม อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากผลทดสอบคุณสมบัติเหล็กเสริมได้จากการรวบรวมในจังหวัดนครราชสีมาเท่านั้น จึงต้องมีการรวบรวมให้มีจำนวนข้อมูลเพียงพอที่ยอมรับให้เป็นตัวแทนระดับภูมิภาคหรือประเทศ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ตามแนวทางที่นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปใช้ในระดับภูมิภาคหรือประเทศด้วยเช่นกัน

สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้ประเมินความน่าจะเป็นวิธีเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวรับแรงตามแนวแกน สำหรับที่พิกอาศัยที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน โดยมีข้อจำกัดคือใช้ข้อมูลสถิติของคุณสมบัติเหล็กเสริมที่รวบรวมผลทดสอบในจังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2556 เท่านั้น และใช้ข้อมูลสถิติของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและน้ำหนักบรรทุกจรที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาไว้สำหรับประเทศไทย ผลการศึกษารูปได้ดังนี้

1. การคำนวณความน่าจะเป็นวิธีเสาที่อ้างอิงวิธีหน่วยแรงใช้งานหรือประเมินในขั้นตอนการออกแบบนั้นได้ผลลัพธ์ทุกกรณีดังนี้ กรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 มีความน่าจะเป็นวิธีตั้งแต่ 5.0×10^{-3} ถึง 6.3×10^{-2} เหล็กเสริมขนาด DB16 มีความน่าจะเป็นวิธีตั้งแต่ 3.6×10^{-3} ถึง 6.0×10^{-2} เหล็กเสริมขนาด DB20 มีความน่าจะเป็นวิธีตั้งแต่ 2.9×10^{-3} ถึง 8.5×10^{-2} และเหล็กเสริมขนาด DB25 มีความน่าจะเป็นวิธีตั้งแต่ 3.3×10^{-2} ถึง 1.2×10^{-1} ซึ่งภาพรวมความน่าจะเป็นวิธีมีค่าค่อนข้างสูงและไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การออกแบบเท่าที่ควร โดยความน่าจะเป็นวิธีที่มีค่าน้อยเป็นกรณีที่กำหนดใช้น้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบที่มีค่าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าผลวิเคราะห์กรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 ให้ค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งแตกต่างจากกรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 สาเหตุหนึ่งเนื่องจากคุณสมบัติทางสถิติของเหล็กเสริมขนาด DB25 ที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล มีการกระจายตัวสูงกว่าเหล็กเสริมขนาดอื่น และมีจำนวนข้อมูลดิบที่รวบรวมได้ค่อนข้างน้อย

2. การคำนวณความน่าจะเป็นที่เสาที่อ้างอิงวิธีกำลังหรือประเมินที่สภาวะขีดจำกัดสูงสุดนั้น ได้ผลลัพธ์ทุกกรณีดังนี้ กรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 มีความน่าจะเป็นตั้งแต่ 0 ถึง 6.2×10^{-4} เหล็กเสริมขนาด DB16 มีความน่าจะเป็นตั้งแต่ 0 ถึง 4.5×10^{-4} เหล็กเสริมขนาด DB20 มีความน่าจะเป็นตั้งแต่ 0 ถึง 5.5×10^{-4} และเหล็กเสริมขนาด DB25 มีความน่าจะเป็นตั้งแต่ 1.8×10^{-3} ถึง 5.0×10^{-3} ซึ่งภาพรวมความน่าจะเป็นที่มีความสอดคล้องกับสภาพจริงของโครงสร้างและวัตถุประสงค์การออกแบบ ยกเว้นกรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB25 ที่ให้ค่าความน่าจะเป็นที่สูงกว่าและไม่สอดคล้องกับกรณีใช้เหล็กเสริมขนาดอื่นทุกกรณี สาเหตุเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในข้อ 1. ดังนั้น การศึกษานี้จึงสรุปผลเฉพาะกรณีใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 DB16 และ DB20 เท่านั้น ส่วนเหล็กเสริมขนาด DB25 ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อยืนยันคุณสมบัติทางสถิติแท้จริงของเหล็กเสริมและสรุปผลการวิเคราะห์ที่ใหม่อีกครั้ง

3. ผลการศึกษายังพบว่าแนวโน้มค่าที่เหมาะสมของน้ำหนักบรรทุกจรคงที่ในการออกแบบที่พิชิตอาศัยเท่ากับ 200 kg/m^2 และตัวคูณลดกำลังเหล็กเสริม 0.50 ซึ่งในกรณีดังกล่าวความน่าจะเป็นมีค่าตั้งแต่ 0.3×10^{-5} ถึง 2.0×10^{-5} น้อยกว่าความน่าจะเป็นเป้าหมายสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวหล่อในที่นั้นคือ 3.5×10^{-5} อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากข้อมูลคุณสมบัติเหล็กเสริมได้จากการรวบรวมผลทดสอบในจังหวัดนครราชสีมาเท่านั้น ดังนั้น ควรมีการเก็บรวบรวมข้อมูลให้มีจำนวนเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงพัฒนา มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานของประเทศไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สงวน วงษ์ขวลิตกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีวินทร์ ลิ้มศิริ ที่ให้ข้อเสนอแนะและข้อมูลประกอบการจัดทำบทความนี้ตลอดมา

References

- Andrzej, S. N. and Kevin, R. C. (2000). Reliability of Structures. Singapore : McGraw-Hill
- Chovichien, V. (2009). Reinforced Concrete Design (Working Stress Design : WSD). 5th ed. Bangkok
- Chovichien, V. and Chovichien, V. (2011). Reinforced Concrete Design (Strength Design Method : SDM). 5th ed. Bangkok
- Jiravacharadet, M. (2006). Reinforced concrete design, Working stress design method, strength design method. 4th ed. School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima
- Mekaroonkamon, K., Prasitviriyakul, S. and Smittakorn, W. (2003). Comparison of WSD and SDM for reinforced concrete structures : a case study. Civil Engineering Project, Academic Year 2002. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok

- Suchinda, C. (2007). A parametric study for choosing appropriate allowable stress for rebars in the design code. The 12nd National Convention on Civil Engineering. May 2 -4, 2007
- Suchinda, C. (2009). The strength reduction factors for reinforced concrete design standards based on Thailand statistical data. The Research Report of Sripatum University. Bangkok
- The Engineering Institute of Thailand under H. M. The King's Patronage. (2010). EIT. Standard 1007-34. 11th ed. Bangkok
- The Engineering Institute of Thailand under H. M. The King's Patronage. (2012). EIT. Standard 1008-38. 8th ed. Bangkok
- Vongchavalitkul, S. (2014). Uncertainty model of concrete elastic modulus effect to critical reinforce concrete buckling load. The 19th National Convention on Civil Engineering. May 14 - 16, 2014
- Vongchavalitkul, S. and Boonsuan, W. (2005). Effect of reinforcement ratio to reliability index of beam. KKU Engineering Journal. Vol. 32. No. 2. pp. 173-181
- Wattanasupt, S. (2005). An investigation of the appropriate live loads for buildings design. Master of Engineering. Faculty of Engineering, Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology, Bangkok
- Yodmuang, P. (2008). An investigation of the live loads for residential buildings and convenience building. Master of Science in Industrial Education. Faculty of Industrial Education and Technology, Civil Technology Education, King Mongkut's University of Technology, Bangkok