การเปรียบเทียบการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง

COMPARISON OF WSD AND SDM FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

กฤติน เมฆอรุณกมล (Krittin Mekaroonkamon)

นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: m_krittin@hotmail.com

ทรงศักดิ์ ประสิทธิวิริยะกุล (Songsak Prasitviriyakul)

นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: inzako17@hotmail.com

วัฒนชัย สมิทธากร (Watanachai Smittakorn)

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: fcewsk@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. โดยทำการเปรียบเทียบในด้านความประหยัดและความปลอดภัย โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา คือ โครงข้อแข็งแบบปอร์ตัล (portal frame) ที่ประกอบด้วยคานและเสา จำนวน 2 ช่วง สูง 2 ชั้น โดยพิจารณาความยาวช่วง และน้ำหนักบรรทุกจรที่มีค่าต่างๆ กัน

ผลการศึกษาพบว่า การออกแบบด้วยวิธีกำลังให้ความประหยัดมากกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มมากขึ้น ผลต่างนี้จะมีแนวโน้มลดน้อยลง ส่วนในด้านความปลอดภัยซึ่งอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบพลาสติกพบว่า การออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนที่จะวิบัติ ได้มากกว่าวิธีกำลัง แต่ทั้งนี้ การวิบัติของโครงสร้างตัวอย่างโดยส่วนใหญ่ ที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน จะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ซึ่งเป็นการวิบัติอย่างฉับพลัน

ABSTRACT: The purpose of this study is to compare the design of reinforced concrete structures by the means of Working Stress Design (WSD) and Strength Design Method (SDM) according to E.I.T. Standard. Economy and safety are two major aspects of interest. The structures used as the case studies are portal frames composed of beams and columns in 2 stories and 2 bays. Various span lengths and live loads are investigated.

Results from the study have shown that the design by SDM is more economical than that by WSD. However, these differences tend to decrease as live load increases. In term of safety, with the use of plastic analysis theory, structures designed by WSD have more capacity to withstand the applied load before collapse. Nevertheless, the design by WSD should be used with extra care since almost all of the structures designed by this method fail by shear in beams which is an abrupt failure.

KEYWORDS: REINFORCED CONCRETE, WORKING STRESS DESIGN, STRENGTH DESIGN METHOD

1. บทนำ

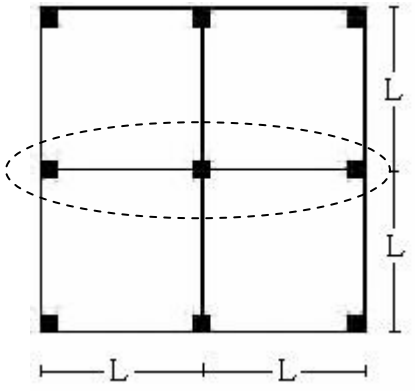
การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในประเทศไทยมีวิธีการออกแบบที่ได้รับความนิยมอยู่ 2 วิธี คือ วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design หรือ WSD) และ วิธีกำลัง (Strength Design Method หรือ SDM) ทั้งสองวิธีนี้มีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบที่แตกต่างกัน จึงเป็นเรื่องน่าสนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีทั้งสองนี้ ทั้งในด้านความประหยัดและความปลอดภัย โดยในการศึกษานี้ จะพิจารณาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างที่ได้เลือกไว้เป็นกรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์

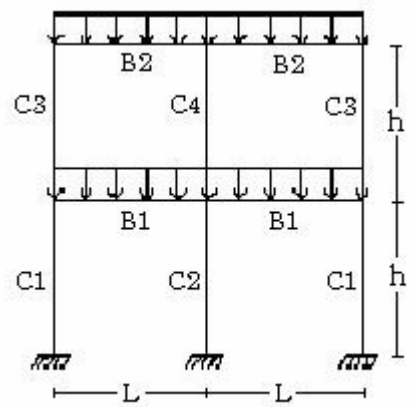
1. เปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริม และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการออกแบบ
2. ประเมินข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองวิธี

3. ขอบเขตของการศึกษา

1. โครงสร้างตัวอย่างที่เลือกใช้เป็นโครงข้อแข็งแบบปอร์ตัล (portal frame) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนของคานและเสาขนาด 2 ช่วงความยาว สูง 2 ชั้น ความสูงชั้นละ 3 เมตร มีจุดรองรับแบบยึดแน่น รับน้ำหนักบรรทุกกระทำเฉพาะในแนวดิ่งเท่านั้น ดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แผนผังโครงสร้างที่ใช้เป็นโครงสร้างตัวอย่าง



รูปที่ 2 แบบจำลองของโครงสร้างตัวอย่าง

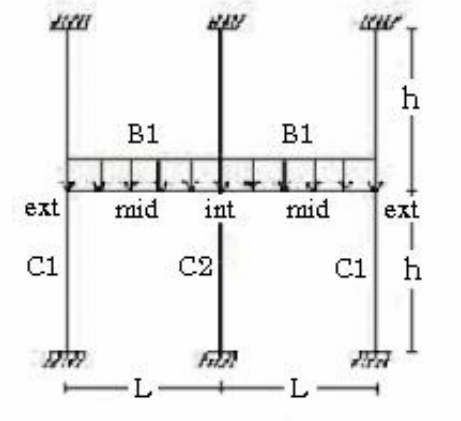
2. การออกแบบโครงสร้างอ้างอิงตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งานใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 [1] และวิธีกำลังใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 [2]
3. ในการออกแบบ จะเปลี่ยนค่าน้ำหนักบรรทุกจร จำนวน 4 ค่า คือ 100, 300, 500, และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนน้ำหนักบรรทุกคงที่กำหนดให้ใช้ 700 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เท่ากันโดยตลอด ส่วนความยาวช่วงของโครงสร้างจะพิจารณาที่ 4, 6, 8, และ 10 เมตร
4. คุณสมบัติของวัสดุ กำหนดไว้ดังนี้ คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย (f_c') เท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กเสริมมีกำลังดึงที่จุดคราก (f_y) เท่ากับ 3000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ยกเว้นเหล็กปลอกในคาน มีกำลังดึงที่จุดคราก เท่ากับ 2400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
5. การเปรียบเทียบในด้านความประหยัด จะเปรียบเทียบเฉพาะปริมาณเหล็กเสริม โดยการศึกษานี้ได้กำหนดให้ใช้ขนาดหน้าตัดของโครงสร้างเท่าๆ กัน สำหรับความยาวช่วงที่เท่ากัน
6. การเปรียบเทียบในด้านความปลอดภัย จะทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ ก่อนเกิดการวิบัติ (collapse) โดยจะถือว่าโครงสร้างเกิดการวิบัติ เมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) ขึ้นในคานจนกระทั่งโครงสร้างขาดเสถียรภาพ (unstable) หรือเมื่อแรงเฉือนในคานเกินกว่ากำลังต้านทาน หรือเมื่อแรงที่เกิดขึ้นในเสาเกินกว่ากำลังต้านทานของเสาตาม Interaction diagram

4. ขั้นตอนการศึกษา

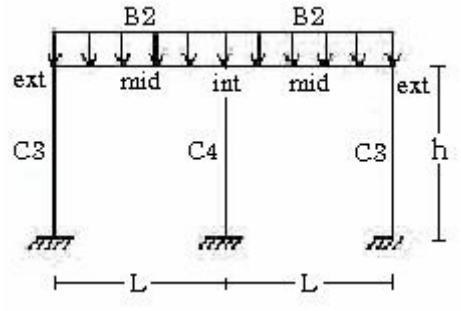
1. เลือกขนาดหน้าตัดคาน และเสา สำหรับโครงสร้างตัวอย่างแต่ละความยาวช่วง
2. วิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน สำหรับใช้ในการออกแบบ โดยใช้โครงสร้างเป็นโครงสร้างย่อย (subframe) ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 สำหรับชั้นล่าง และชั้นบน ตามลำดับ และใช้น้ำหนักบรรทุกสำหรับวิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง ตามสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$w = DL + LL \quad (1)$$

$$w_u = 1.4DL + 1.7LL \quad (2)$$

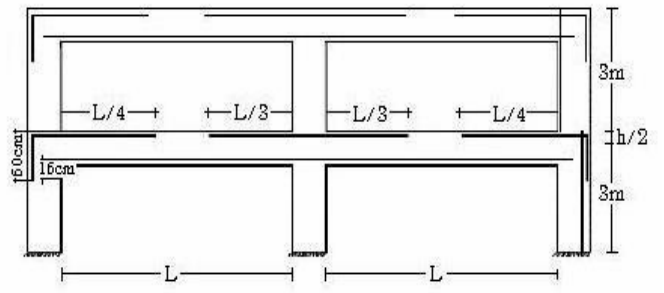


รูปที่ 3 โครงสร้างย่อยที่ใช้ในการออกแบบคานและเสา ชั้นที่ 1



รูปที่ 4 โครงสร้างย่อยที่ใช้ในการออกแบบคานและเสา ชั้นที่ 2

3. ออกแบบโครงสร้าง ด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. โดยทำการออกแบบเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กลูกตั้งในคาน ส่วนในเสาจะทำการออกแบบเฉพาะเหล็กตามยาวเท่านั้น
4. คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้าง โดยสมมุติให้มีการจัดวาง และการหยุดเหล็กเสริมดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระยะหยุดเหล็กเสริมในโครงสร้าง

5. วิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ได้ออกแบบไว้แล้ว เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (w_c) ที่แต่ละโครงสร้างสามารถรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ โดยใช้วิธีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก และทำการวิเคราะห์โครงสร้างไปทีละขั้น จนกระทั่งโครงสร้างเกิดการวิบัติ

5. ผลการศึกษา

การออกแบบโครงสร้างตัวอย่าง โดยเปลี่ยนค่าความยาวช่วง และน้ำหนักบรรทุกจรค่าต่างๆ กัน ได้ผลโดยสรุป ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการ เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และวิธีกำลัง (SDM) จะเห็นได้ว่า วิธีหน่วยแรงใช้งานได้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าวิธีกำลังตั้งแต่ 29 ถึง 47 เปอร์เซ็นต์ โดยความแตกต่างนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มมากขึ้น เช่น กรณีที่โครงสร้างตัวอย่างความยาวช่วง 6 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 300, 500, และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วิธีหน่วยแรงใช้งานได้ปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าวิธีกำลัง เท่ากับ 44, 38, และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ยกเว้นกรณีโครงสร้างตัวอย่างที่มีความยาวช่วงน้อยๆ และรับน้ำหนักบรรทุกจรน้อยๆ ไม่สามารถบอกได้ เนื่องจาก

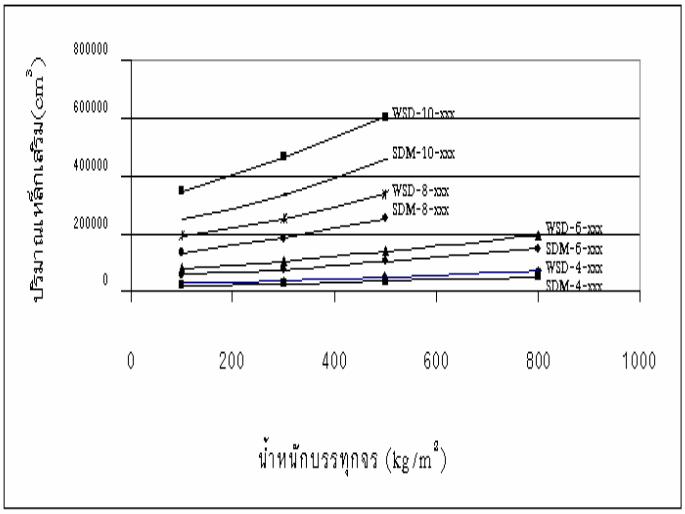
ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการนั้น ถูกควบคุมโดยค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้ในมาตรฐานของ ว.ส.ท.

ตารางที่ 1 ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างต่างๆ

โครงสร้างตัวอย่าง	ปริมาณเหล็กเสริมรวม (cm^3)	ปริมาณเหล็กเสริมต่อปริมาตรของคอนกรีต (kg/m^3)	ปริมาณเหล็กเสริมที่วิธีWSDใช้มากกว่าวิธี SDM (%)
WSD-4-100	27399	109.8	37
SDM-4-100	20002	80.1	
WSD-4-300	36017	144.3	45
SDM-4-300	24784	99.3	
WSD-4-500	48180	193	47
SDM-4-500	32820	131.4	
WSD-4-800	70549	282.6	41
SDM-4-800	49905	199.9	
WSD-6-100	81238	109.9	34
SDM-6-100	60704	82.1	
WSD-6-300	104928	141.9	44
SDM-6-300	72719	98.3	
WSD-6-500	139496	188.6	38
SDM-6-500	101389	137.1	
WSD-6-800	191392	258.8	29
SDM-6-800	148223	200.4	
WSD-8-100	192234	133.9	46
SDM-8-100	131608	91.7	
WSD-8-300	250163	174.3	36
SDM-8-300	183518	127.6	
WSD-8-500	337685	235.3	33
SDM-8-500	253945	176.9	
WSD-10-100	346853	126.2	40
SDM-10-100	247819	90.2	
WSD-10-300	462572	168.3	39
SDM-10-300	330973	120.4	
WSD-10-500	600822	218.6	32
SDM-10-500	454930	165.5	

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการและค่าน้ำหนักบรรทุกจร แสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของการออกแบบด้วยทั้งสองวิธี สำหรับโครงสร้างที่มีความยาวช่วงเท่ากัน เกือบจะขนานกัน แสดงว่า น้ำหนักบรรทุกจร มีผลน้อยต่อความแตกต่างของปริมาณเหล็กเสริม หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความแตกต่างนี้ เป็นผลเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

เมื่อนำโครงสร้างต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้แล้วนี้ ไปทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (w_c) ก่อนที่โครงสร้างจะวิบัติ ผลลัพธ์ที่ได้ สรุปไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า โครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ได้ประมาณ 2.0 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (DL+LL) แต่การวิบัติของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานนี้ เกือบทั้งหมด เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ยกเว้นโครงสร้างที่มีความยาวช่วง 6 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เกิดการวิบัติขึ้นที่เสาชั้นบนต้นริม (C3)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมและค่าน้ำหนักบรรทุกจร

ส่วนผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลังพบว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1.7 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (ในบางกรณีมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานเสียอีก) ทั้งนี้ โครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลังโดยส่วนมาก จะเกิดการวิบัติที่เสาชั้นบนต้อนริม (C3) ยกเว้นโครงสร้างที่มีความยาวช่วง 6 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และโครงสร้างที่มีความยาวช่วง 8 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เกิดการวิบัติเนื่องจากมีจุดหมุนพลาสติกมากจนขาดเสถียรภาพ (collapse mechanism)

ทั้งนี้ มีโครงสร้างที่ออกแบบไว้ แต่ไม่ได้นำมาพิจารณาเปรียบเทียบ คือ โครงสร้างที่ความยาวช่วง 8 และ 10 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เนื่องจาก เมื่อออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน โครงสร้างเสาต้องการปริมาณ

เหล็กเสริมมากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกินกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ว.ส.ท. จึงถือว่าใช้ไม่ได้

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและอัตราส่วนความปลอดภัย

ความยาวช่วง (m)	LL (kg/m^2)	w(DL+LL) (kg/m)	w_c(WSD) (kg/m)	w_c (SDM) (kg/m)	Safety Factor	
					WSD	SDM
4	100	2133	4171	3025	1.96	1.42
	300	2667	5184	3025	1.94	1.13
	500	3200	6235	3732	1.95	1.17
	800	4000	7848	5325	1.96	1.33
6	100	3200	6738	4198	2.11	1.31
	300	4000	7114	5368	1.78	1.34
	500	4800	9331	7214	1.94	1.50
	800	6000	11742	10380	1.96	1.73
8	100	4267	8220	6130	1.93	1.44
	300	5333	10045	8264	1.88	1.55
	500	6400	12471	10824	1.95	1.69
10	100	5333	10799	3681	2.02	0.69
	300	6667	12866	6224	1.93	0.93
	500	8000	15539	7172	1.94	0.90

6. สรุปผล

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างตัวอย่างต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง หากพิจารณาในแง่ของความประหยัดจะพบว่า การออกแบบด้วยวิธีกำลัง จะประหยัดกว่า วิธีหน่วยแรงใช้งาน โดยวิธีกำลังจะได้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่า ตั้งแต่ 29 ถึง 47 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างนี้เป็นผลเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกคงที่เกือบทั้งสิ้น น้ำหนักบรรทุกจรมีผลน้อยมาก ทั้งนี้ เนื่องมาจากการใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) ในการออกแบบด้วยวิธีกำลัง ที่แตกต่างกัน คือ 1.4 สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ 1.7 สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร นั่นเอง

ส่วนการเปรียบเทียบในแง่ของความปลอดภัย โดยการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ที่ทำให้โครงสร้างวิบัตินั้น พบว่า โครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ได้ประมาณ 2.0 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน และมากกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลัง ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1.7 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน จึงอาจสรุปได้ว่า วิธีหน่วยแรงใช้งานมีความปลอดภัยมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การวิบัติของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานนี้ เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ซึ่งเป็นการวิบัติที่ฉับพลัน และไม่มีการเตือนภัย

ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือ การวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลัง ซึ่งโครงสร้างเกิดการวิบัติขึ้นที่เสาชั้นบนต้นริม ได้ค่าความปลอดภัยน้อยเกินจริง เป็นผลเนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการศึกษานี้ ที่มีข้อจำกัดคือ ไม่ยอมให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) ขึ้นในเสา และจะหยุดการคำนวณในทันทีที่แรงภายในที่เกิดขึ้น สัมผัสกับ Interaction diagram ของเสา ทั้งนี้หากยอมให้เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในเสา โครงสร้างดังกล่าว จะยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง ก่อนจะเกิดการวิบัติ นอกจากนี้ ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง คือการอาศัยโครงสร้างย่อย ดังรูปที่ 3 และ 4 ในการคำนวณค่าแรงภายในสำหรับใช้ในการออกแบบ ซึ่งเป็นผลให้ได้พฤติกรรมที่แตกต่างจากพฤติกรรมของโครงสร้างจริง และมีผลต่อการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และความปลอดภัยของโครงสร้างด้วยเช่นกัน

กล่าวโดยสรุปคือ โครงสร้างตัวอย่างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลัง จึงอาจถือได้ว่าปลอดภัยกว่า แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของกลไกการวิบัติแล้วจะพบว่า การวิบัติของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ซึ่งเป็นการวิบัติอย่างฉับพลัน และอาจไม่มีสัญญาณเตือนให้ทราบก่อนล่วงหน้า จึงถือว่าเป็นอันตรายต่อการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34), 2534
2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38), 2538