การเปรียบเทียบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง : กรณีศึกษา

COMPARISON OF WSD AND SDM FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES : A CASE STUDY

กฤติน เมฆอรุณกมล
ทรงศักดิ์ ประสิทธิวิริยะกุล
นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

KRITTIN MEKAROONKAMON
SONGSAK PRASITVIRIYAKUL
Undergraduate Students, Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

ดร.วัฒนชัย สมิทธากร
อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

DR.WATANACHAI SMITTAKORN
Lecturer, Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Project Advisor

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และ วิธีกำลัง (SDM) ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. โดยทำการเปรียบเทียบในด้านความประหยัดและความปลอดภัย โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา คือ โครงข้อแข็งแบบปอร์ตัล (portal frame) ประกอบด้วยคานและเสา จำนวน 2 ช่วง และสูง 2 ชั้น โดยพิจารณาความยาวช่วงและน้ำหนักบรรทุกจรที่ค่าต่าง ๆกัน

ผลการศึกษาพบว่า การออกแบบด้วยวิธีกำลังให้ความประหยัดมากกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มมากขึ้น ผลต่างนี้จะมีแนวโน้มลดน้อยลง ส่วนในด้านความปลอดภัยจะอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบพลาสติก ซึ่งพบว่าการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนที่จะวิบัติได้มากกว่าวิธีกำลัง แต่ทั้งนี้การวิบัติของโครงสร้างตัวอย่างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานจะเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ซึ่งเป็นการวิบัติอย่างฉับพลันและไม่ปลอดภัย

ABSTRACT

The purpose of this project 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 spans. Various span lengths and live loads are investigated.

Results from the study are led to a conclusion 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 collapse.

บทนำ

การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยมีวิธีการคำนวณออกแบบที่ได้รับความนิยมอยู่ 2 วิธี คือ วิธีหน่วยแรงใช้งาน หรือ Working Stress Design (WSD) และ วิธีกำลัง หรือ Strength Design Method (SDM) ซึ่งทั้งสองวิธีมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกัน จึงเป็นเรื่องน่าสนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยทั้งสองวิธีนี้ ทั้งในด้านความประหยัดและความปลอดภัย โดยในโครงงานนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างที่ได้เลือกไว้เป็นกรณีศึกษา

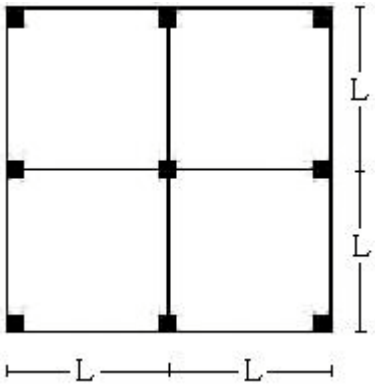
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการคำนวณออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และวิธีกำลัง (SDM) ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท.
2. เปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริม และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการคำนวณออกแบบ
3. ประเมินข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองวิธี

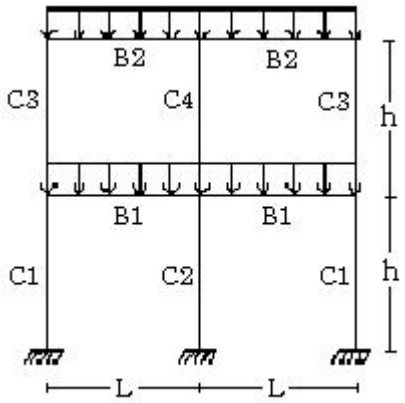
ขอบเขตของโครงงาน

1. การคำนวณออกแบบโครงสร้างอ้างอิงตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งานใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 [1] และวิธีกำลังใช้มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 [2]
2. โครงสร้างตัวอย่างที่ใช้เป็นโครงข้อแข็งแบบปอร์ตัล (portal frame) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนของคานและเสา ขนาด 2 ช่วงความยาว สูง 2 ชั้น ความสูงชั้นละ 3 เมตร มีจุดรองรับแบบยึดแน่น น้ำหนักบรรทุกกระทำเฉพาะแนวดิ่ง ดังรูปที่ 1และ 2
3. การคำนวณออกแบบจะเปลี่ยนค่าน้ำหนักบรรทุกจรซึ่งในที่นี้ใช้น้ำหนักบรรทุกจร 4 ค่า คือ 100 300 500 และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนน้ำหนักบรรทุกคงที่กำหนดให้ใช้ 700 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เท่ากันตลอด ส่วนช่วงความยาวของโครงสร้างจะพิจารณาที่ 4 6 8 และ 10 เมตร

4. การเปรียบเทียบในด้านความประหยัดจะเปรียบเทียบเฉพาะปริมาณเหล็กเสริมโดยกำหนดขนาดหน้าตัดของโครงสร้างให้เท่ากัน
5. การเปรียบเทียบในด้านความปลอดภัยจะอาศัยทฤษฎีพลาสติกในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ



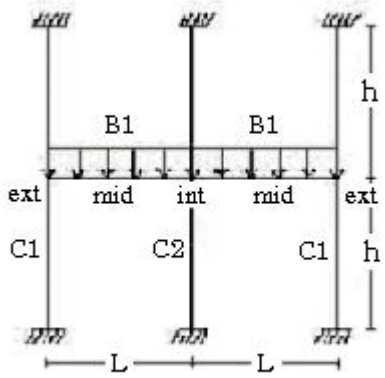
รูปที่ 1 แผนผังโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบ



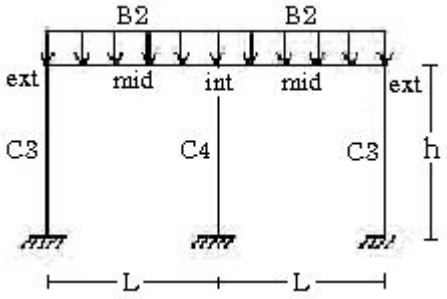
รูปที่ 2 โครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบ

ขั้นตอนการศึกษา

1. วิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ โดยใช้โครงสร้างเป็นโครงสร้างย่อย (subframe) สำหรับชั้นล่างและชั้นบน ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ

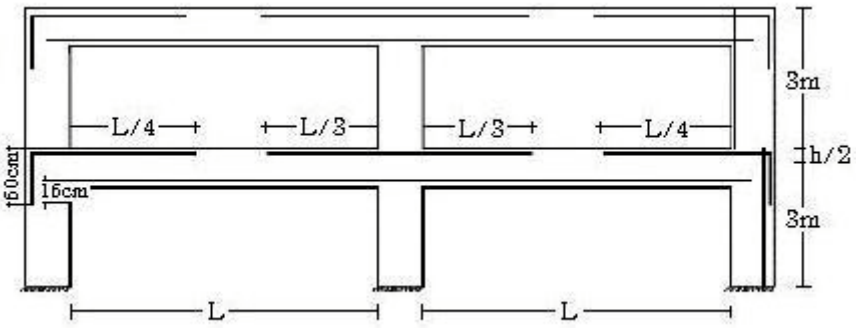


รูปที่ 3 โครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบคาน เสา ชั้นที่ 1



รูปที่ 4 โครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบคาน เสา ชั้นที่ 2

2. ออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลังอ้างอิงตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. โดยทำการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กลูกตั้งในคาน ส่วนในเสาทำการคำนวณออกแบบเฉพาะเหล็กตามยาว
3. วิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างสามารถรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ โดยสมมุติให้โครงสร้างเกิดการวิบัติเมื่อเกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) ขึ้นในคานจนโครงสร้างไม่มีเสถียรภาพ (unstable) หรือเมื่อเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน หรือเมื่อแรงภายในเสามีค่าถึงจุดสูงสุดตาม Interaction diagram
4. ถอดแบบเพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างโดยสมมุติให้มีการจัดวาง และการหยุดเหล็กเสริมดังรูปที่ 5

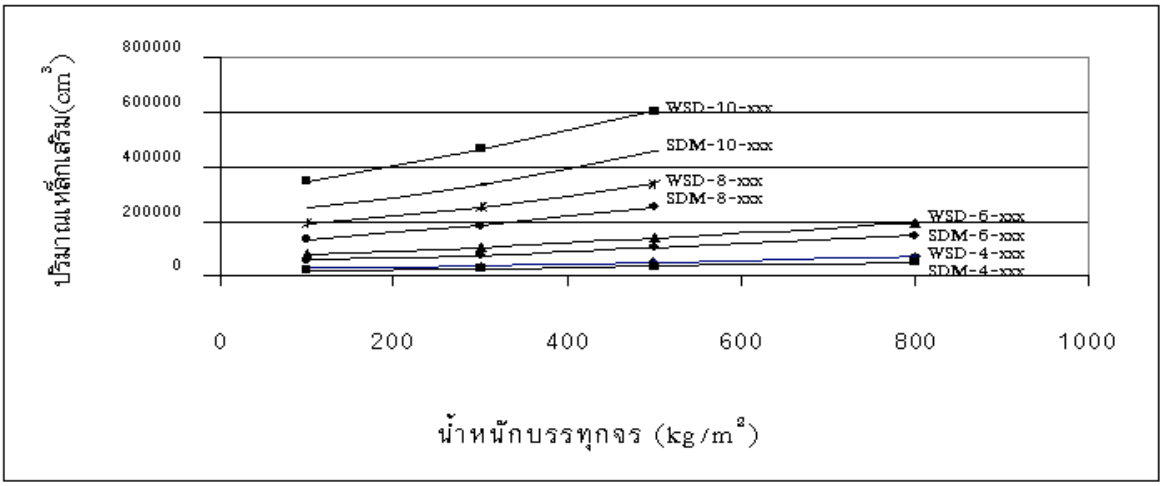


รูปที่ 5 ระยะหยุดเหล็กเสริมในโครงสร้าง

วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

จากการเปรียบเทียบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 32 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) 16 ตัวอย่าง และวิธีกำลัง (SDM) 16 ตัวอย่าง โดยการเปลี่ยนค่าความยาวช่วงและน้ำหนักบรรทุกจร ในแง่ของความประหยัดพบว่าการคำนวณออกแบบด้วยวิธีกำลัง ใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน ดังตารางที่ 1 ส่วนในแง่ของความปลอดภัยการออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (w_c) ได้มากกว่าวิธีกำลัง โดยโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ส่วนมากเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ยกเว้นโครงสร้างที่ความยาวช่วง 6 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เกิดการวิบัติขึ้นที่เสา C3 ส่วนโครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีกำลัง ส่วนมากเกิดการวิบัติที่เสา C3 ยกเว้นโครงสร้างที่ความยาวช่วง 6 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และ โครงสร้างความยาวช่วง 8 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกจร 500 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เกิดการวิบัติเนื่องจาก collapse mechanism ทั้งนี้ มีโครงสร้างที่ไม่ได้นำมาเปรียบเทียบจำนวน 4 โครงสร้าง เนื่องจากการออกแบบเสาในโครงสร้างดังกล่าวใช้ปริมาณเหล็กเสริมเกินกว่าค่าสูงสุดตามมาตรฐาน ว.ส.ท. จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่ความยาวช่วง 8 และ 10 เมตร ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกจร 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เสา C2 ซึ่งออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ใช้ปริมาณเหล็กเสริมเกิน 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกินค่าสูงสุดตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ส่วนเสา C1 และ C3 ไม่สามารถหาค่าปริมาณเหล็กเสริมจากกราฟออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ จึงไม่นำมาเปรียบเทียบ

ในด้านความประหยัดพบว่าการคำนวณออกแบบด้วยวิธีกำลัง (SDM) จะให้ความประหยัดมากกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) ดังรูปที่ 6 อย่างไรก็ตาม หากคำนึงเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างจะพบว่า เมื่อน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มมากขึ้นความ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมกับค่าน้ำหนักบรรทุกจร

แตกต่างของปริมาณเหล็กเสริมจากการออกแบบทั้งสองวิธีมีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 1 เช่น การโครงสร้างตัวอย่างความยาวช่วง 6 เมตร เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจร 300 500 และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ใช้ปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน 39 32 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงว่าการออกแบบโดยวิธีกำลังจะประหยัดน้อยลง เมื่อน้ำหนักบรรทุกจรเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) เท่ากับ 1.7 สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งมากกว่า 1.4 สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ในวิธีกำลังนั่นเอง ทั้งนี้ โครงสร้างตัวอย่างที่รับน้ำหนักบรรทุกจร 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ยังสรุปอย่างแน่ชัดไม่ได้ว่าประหยัดต่างกันเท่าไร เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นค่าต่ำสุดที่กำนดให้ตามมาตรฐานของ ว.ส.ท.

ตารางที่ 1 ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้าง

โครงสร้างตัวอย่าง	ปริมาณเหล็กเสริมรวม (cm^3)	ปริมาณเหล็กเสริมต่อปริมาตรของคอนกรีต (kg/m^3)	ปริมาณเหล็กเสริมที่วิธีWSDใช้มากกว่าวิธีSDM(%)
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	

ส่วนในแง่ของความปลอดภัยพบว่าการคำนวณออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) โครงสร้างตัวอย่างส่วนใหญ่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน แต่การคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลัง (SDM) ส่วนใหญ่จะเกิดการวิบัติที่เสาC3 (เสาริมนอกชั้นบน) และการคำนวณออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่า ดังตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้มาคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (safety factor) พบว่าการคำนวณออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยประมาณ 2.0 ส่วนการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลัง จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่ำกว่า 1.7 ทั้งนี้การวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (w_c) ที่ใช้ในโครงงานนี้ มีข้อจำกัด คือ จะไม่ยอมให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) ในเสา โดยถือว่าถ้าแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสาสัมผัสกับ interaction diagram เสาจะเกิดการวิบัติ และถือว่าน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้น คือค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (w_c) ที่โครงสร้างสามารถรับได้ ซึ่งในความเป็นจริงหากยอมให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) ในเสาได้ โครงสร้างนี้จะยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีก นอกจากนี้ โครงสร้างย่อยที่ใช้ในการออกแบบดังรูปที่ 3 และ 4 ยังมีผลต่อการคำนวณค่าแรงภายในที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งโครงสร้างนี้แตกต่างจากโครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์แบบพลาสติก และทำให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดน้อยลง ส่งผลให้ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

ตารางที่ 2 น้ำหนักบรรทุกสูงสุดและอัตราส่วนปลอดภัยของการคำนวณออกแบบ
โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และวิธีกำลัง (SDM)

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

กล่าวโดยสรุป โครงสร้างตัวอย่างซึ่งออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าการออกแบบด้วยวิธีกำลัง (SDM) ซึ่งอาจถือได้ว่าปลอดภัยกว่า แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยขณะใช้งานแล้วพบว่าการวิบัติของโครงสร้างตัวอย่างซึ่งคำนวณออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน เป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคานซึ่งเป็นการวิบัติอย่างฉับพลัน ไม่มีสัญญาณเตือนให้ทราบก่อนล่วงหน้าซึ่งถือว่าเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน

เอกสารอ้างอิง

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