

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E42154



PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN AND EVALUATION OF
BUCKLING RESTRAINED KNEE BRACED TRUSS MOMENT FRAMES

MR. NATTAPAT WONGPAKDEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING (CIVIL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

2011



Performance-Based Seismic Design and Evaluation of Buckling Restrained Knee Braced Truss Moment Frames

Mr. Nattapat Wongpakdee B.Eng. (Civil Engineering)

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Engineering (Civil Engineering) Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi 2011

Thesis Committee



(Signature)

.....
(Aphinat Ashakul, Ph.D.)

Chairman of Thesis Committee

(Signature)

.....
(Asst. Prof. Sutat Lelatawiwat, Ph.D.)

Member and Thesis Advisor

(Signature)

.....
(Asst. Prof. Arnon Wongkaew, Ph.D.)

Member

Thesis Title	Performance-Based Seismic Design and Evaluation of Buckling Restrained Knee Braced Truss Moment Frames
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Nattapat Wongpakdee
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutat Leelataviwat
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

E 42154

Performance evaluation of an innovative structural steel framing system called Buckling-Restrained Knee Braced Truss Moment Frame (BRKB-TMF) was carried out. This structural system harnesses the advantages of open-web steel truss girders and Buckling Restrained Braces (BRBs). Key advantages of open-web trusses include light weight, simple connections, and open passages for mechanical ductwork and pipes. In this system, the open-web trusses are designed to be elastic while BRBs are strategically placed and designed to dissipate seismic energy. The combined features of the open-web trusses and BRBs lead to a system with enhanced performance, safety, and economy. A performance based design procedure has been developed for the proposed system. A four-story building structure was selected as a case study. The structure designed by the presented procedure was subjected to nonlinear static (pushover) and dynamic analyses. The pushover analysis was done to determine the overall response, the sequence of inelastic activities leading to collapse, and the failure mechanism. In the nonlinear dynamic analyses, the study frame was subjected to a suite of selected earthquake records scaled to represent various levels of earthquake ground motion intensity. Incremental dynamic analysis approach was applied to examine the behavior of the structure at different levels of ground motion intensity all the way up to the collapse level. The analyses provided very promising results in terms of the effectiveness and robustness of the system. The results of the collapse evaluation indicated that the probability of collapse under the maximum considered earthquake ground motions was less than 10%. The frame passed the collapse evaluation criterion according to FEMA P695. The key design parameters were found to be the target drift and the deformation capacity of the BRBs. It was also found that deformation capacity of 4% strain provided an optimum performance. This strain level is achievable with current BRB technology.

Keywords: Buckling Restrained Braces / Collapse Evaluation / FEMA P695 / Incremental Dynamic Analysis / Performance-Based Plastic Design / Truss Moment Frames

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและประเมินสมรรถนะ โครงถักต้านแรงคัตเสริมองค์อาคาร รังยึดที่ไม่โก่งเคาะ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายณัฐภูภัทร วงศ์ภักดี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2544

บทคัดย่อ

E42154

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของระบบโครงสร้างเหล็กต้านทานแรง
แผ่นดินไหวชนิดใหม่เรียกว่า โครงถักต้านแรงคัตเสริมองค์อาคารรังยึดที่ไม่โก่งเคาะ (BRKB-TMF)
ระบบโครงสร้างชนิดนี้ถูกพัฒนาโดยนำโครงถักและองค์อาคารรังยึดที่ไม่โก่งเคาะมารวมเข้าด้วยกัน
กัน โครงถักเป็น โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา ใช้งานได้อย่างง่าย และมีช่องเปิดให้กับงานระบบและงาน
ท่อ ภายใต้แรงแผ่นดินไหวโครงถักถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic) ขณะที่องค์
อาคารรังยึดที่ไม่โก่งเคาะจะทำหน้าที่สลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหว การรวมกันของโครงสร้างทั้ง
สองจะเพิ่มสมรรถนะและความปลอดภัยให้อาคาร อีกทั้งยังง่ายต่อการซ่อมแซมและประหยัดค่าใช้จ่าย
ในการบำรุงรักษาหลังเกิดแผ่นดินไหว อาคารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นอาคารโครงสร้าง
เหล็กสูง 4 ชั้น ออกแบบด้วยวิธีคำนึงถึงสมรรถนะเป็นหลัก (performance-based design) การ
วิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น การ
วิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าใช้ศึกษาผลตอบสนองโดยรวมและลำดับการเกิดการครากขององค์
อาคารต่างๆจนกระทั่งโครงสร้างพังทลาย การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ใช้วิธีพลศาสตร์แบบค่อยๆ
เพิ่มความรุนแรงเพื่อหาระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้ระบบโครงสร้างพังทลาย การ
วิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพและความทนทานการวิเคราะห์ระบบโครงสร้าง BRKB-TMF อยู่ใน
ระดับดีน่าพอใจ ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวสูงสุดที่นำมาพิจารณา ระบบโครงสร้างมี
ค่าความน่าจะเป็นในการพังทลายต่ำกว่า 10% โดยผลการวิเคราะห์ผ่านเกณฑ์การประเมินสมรรถนะ
ตามระเบียบวิธี FEMA P695 ระยะการเคลื่อนตัวเป้าหมายสูงสุดและค่าการยึดตัวสูงสุดขององค์อาคาร
รังยึดที่ไม่โก่งเคาะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าการยึดตัวสูงสุด

E42154

ขององค์อาคารรั้งยึดที่ไม่โก่งเดาะที่ 4% เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน ซึ่งค่าการยึดตัวสูงสุดระดับนี้อยู่ในระดับที่สามารถทำได้ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน

คำสำคัญ : การประเมินการพังทลายของโครงสร้าง / การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์แบบค่อยๆเพิ่มความรุนแรง / การออกแบบด้วยวิธีพลาสติกโดยคำนึงถึงสมรรถนะเป็นหลัก / โครงถักต้านแรงดัด / องค์อาคารรั้งยึดที่ไม่โก่งเดาะ / FEMA P695

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support for this research was provided by the Office of the Higher Education Commission, Thailand, under the Higher Education Research Promotion and National Research University Project and the Computational Science Engineering Research Cluster at King Mongkut' s University of Technology Thonburi. The author gratefully acknowledges the support from these agencies.

The author is thankful to Aphinat Ashakul, Ph.D., chairman of the thesis committee, Asst. Prof. Arnon Wongkaew, Ph.D., member of thesis committee, gratefully appreciate Asst. Prof. Sutata Leelataviwat, Ph.D. for his assistance, encouragement and guidance throughout the course of study, and also the members of collaborative research project for their recommendation.

Special thanks are due to Amnart Khumphanit and Eknara Junda for their contributed information, and to other students in Civil Engineering Department King Mongkut' s University of Technology Thonburi for their entertainment.

Finally, to my family

CONTENTS

	PAGE
ENGLISH ABSTRACT	ii
THAI ABSTRACT	iii
ACKNOWLEDGEMENTS	v
CONTENTS	vi
LIST OF TABLES	viii
LIST OF FIGURES	ix
LIST OF SYMBOLS	xi
LIST OF TECHNICAL VOCABULARY AND ABBREVIATIONS	xiii
 CHAPTER	
1. INTRODUCTION	1
1.1 Background	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of Research	3
1.4 Organization and Outline	3
 2. REVIEW OF RELEVANT STUDIES	 4
2.1 Truss Moment Frames	4
2.2 Knee Braced Moment Frames	6
2.3 Buckling Restrained Braces	7
2.4 Performance-Based Plastic Design (PBPD)	9
2.5 Performance Assessment per FEMA P695 Methodology	12
 3. PERFORMANCE-BASED PLASTIC DESIGN OF BRKB-TMF	 20
3.1 Design Yield Mechanism	20
3.2 Selection of Target Drift and Design Base Shear	21
3.3 Design of BRBs (Designated Yielding Members)	23
3.4 Design of Trusses and Columns (non-Designated Yielding Members)	24
3.4.1 Design of Truss Members	24
3.4.2 Design of Columns	25
 4. ARCHETYPE STRUCTURE	 29
4.1 Building Configuration	29
4.2 Gravity Loading Criteria	30
4.3 Design Base Shear and Lateral Force Distribution	31
4.4 Design of BRBs	32
4.5 Design of Truss Members	33
4.6 Design of Columns	35
 5. ANALYTICAL MODEL	 36
5.1 Component Modelling	36
5.1.1 Buckling Restrained Braces (BRBs)	37
5.1.2 Top and Bottom Chords	38
5.1.3 Diagonal and Vertical Members	39
5.1.4 Columns	39
5.1.5 Non-Simulated Failure Modes	40

5.2 System Modelling	40
6. PERFORMANCE ASSESSMENT	43
6.1 Nonlinear Static and Dynamic Analyses	43
6.1.1 Nonlinear Static Analysis (Pushover)	43
6.1.2 Nonlinear Dynamic Analysis (Time-History)	45
6.2 Collapse Evaluation	47
6.3 Performance Sensitivity	49
7. SUMMARY AND CONCLUSIONS	55
REFERENCES	57
APPENDIX	
A. TRUSS CONFIGURATION AND APPROXIMATION OF STRAIN DEMAND	60
A.1 Selection of Truss geometry	61
A.2 Approximation of Strain Demand	63
B. LOAD DEFINITIONS FOR THE ARCHETYPE STRUCTURE	65
B.1 Gravity Loading Definitions	66
B.2 Design Base Shear and Lateral Force Distribution	68
C. EXAMPLE OF DESIGN CALCULATION	71
C.1 Analysis of Truss	72
C.2 Section Design of Truss	73
C.3 Analysis of Column	74
C.4 Section Design of Column	75
D. DETERMINATION OF FRAGILITY CURVES	77
D.1 Logarithmic Normal Distribution	78
CIRRICULUM VITAE	83

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
2.1 BRB Tests Results Summarized by Lopez and Sabelli, and those by Ngamsangeam	8
2.2 Summary of Far-Field Record Set	13
2.3 Spectral Shape Factor for Archetype for SDC D_{max} on Example Range	17
2.4 Total System Collapse Uncertainty Value (β_{TOT}) for Model Quality (B) Good and Period-Based Ductility greater than three	19
2.5 Acceptable Values of Adjusted Collapse Margin Ratio on Example Range	19
4.1 Design Roof Gravity Loads	30
4.2 Design Floor Gravity Loads	31
4.3 Design Parameters for Example 4-Story BRKB-TMF	31
4.4 Lateral Force Distribution	32
4.5 Required Strength of BRB	32
4.6 Maximum Core Strain Demand for Various Truss Geometry	32
4.7 Required Strength of Truss Members	34
4.8 Truss Section Design Results	34
4.9 Parameters for Column Design	35
4.10 Required Strength and Column Sections	35
5.1 Modelling Truss Members	41
6.1 CMR and $ACMR$ of SCBF, BRBF and BRKB-TMF	47
6.2 Acceptable Values of Adjusted Collapse Margin Ratio	48
6.3 Core Strain Demand Related to Story Drift	50
A.1 Maximum Core Strain of Various Geometry at 3% Story Drift	62
B.1 R_{μ} - μ -T relationship by Newmark and Hall	69
B.2 Lateral Force Distribution of the Archetype Structure	70
C.1 Analysis Result of the Truss at 3 rd Floor	73

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
1.1 Buckling-Restrained Knee Braced Truss Moment Frame (BRKB-TMF)	2
2.1 Test Setup	4
2.2 Hysteretic Loop of Conventional Open-Web Truss Moment Frame tested by Goel and Itani	5
2.3 Hysteretic Loop of Special Truss Moment Frame tested by Goel and Itani	5
2.4 Yield Mechanism of KBMF System	6
2.5 Hysteretic Response of KBMF	6
2.6 Behavior of BRB compared with that of a Conventional Brace	7
2.7 Hysteretic Response of BRBs	9
2.8 Energy Balance Concept	10
2.9 Collapse Assessment Concept of FEMA P695 Methodology	12
2.10 Response Spectra of 44 Individual Components of the Normalized Far-Field Record Set and Median	14
2.11 Example of Response under a Selected Ground Motion with Increasing Intensity	15
2.12 Dynamic Response of the Structure by IDA Approach	16
2.13 Fragility Curve of an Example Archetype Structure	16
2.14 Idealized Nonlinear Static Pushover Curve	17
3.1 Pre-selected Yield Mechanism of BRKB-TMF	20
3.2 Plastic Deformation of BRB	21
3.3 Brace Strain Demand for Different Plastic Drift Ratios	22
3.4 Truss Design Concept	25
3.5 Equivalent Multi-span Beam with Subjected to End Moment	25
3.6 Free Body Diagram of Column Tree	27
3.7 Performance-Based Plastic Design Flowchart for BRKB-TMF System	28
4.1 Building Plan	29
4.2 Building Elevation	30
4.3 Selected Frame Dimension for Archetype Structure	33
4.4 Hysteretic Backbone Envelope of Brace	34
4.5 Section Configuration	35
5.1 Analytical Model of an Archetype Structure	36
5.2 BRB Configuration	37
5.3 Load-Deformation Characteristic of BRBs	37
5.4 Comparison of Hysteretic Loops of BRBs from Computer Model and Test Results	38
5.5 Force-Deformation Relationship for Top and Bottom Chords of the Trusses	38
5.6 Buckling Element Model	39
5.7 End Moment versus Drift Response Envelope	40
5.8 Modelling of Truss Members	41
5.9 Base Shear-Roof Drift Plot Based on 4 Different Computer Models	42
5.10 Story Drift Response of 4 Different Computer Models	42
6.1 Pushover Curve of BRKB-TMF under PBPD Lateral Force Distribution	44
6.2 Overstrength and Period-Based Ductility Determined from Static Pushover Curve	44
6.3 Column Moments at Maximum Base Shear	45
6.4 Maximum Interstory Drifts under 2/3MCE Ground Motions	46

6.5	Maximum Interstory Drifts under MCE Ground Motions (excluding 5 collapse motions)	46
6.6	Incremental Dynamic Analysis Plotted between Intensity Measure (S_a) and Engineering Demand Parameter (θ)	47
6.7	Fragility Curve	49
6.8	Fragility Curves for BRKB-TMF with 3% Maximum BRB Core Strain	49
6.9	Fragility Curves for BRKB-TMF with 5% Maximum BRB Core Strain	50
6.10	Response Sensitivity due to BRB Strain Capacity	51
A.1	Application of Law of Cosines	62
A.2	Brace Strain Demand from Law of Cosines versus Approximation	64
B.1	Gravity Load Definition	68
B.2	Idealized Inelastic Spectra by Newmark and Hall for EP-SDOF	69
C.1	Structural Analysis of the Truss at 3 rd Floor	72
C.2	Multi-span Beam Subjected to an End Moment	74
C.3	Column Tree Analysis	75
D.1	Examples of Cumulative Distribution Functions	79
D.2	Least Square Fit for the Probability of Collapse (Fragility Curve)	79
D.3	IDA Results of Each Ground Motion Component	80

LIST OF SYMBOLS

SYMBOL

C_0	=	Fundamental-mode (SDOF) displacement relates to roof displacement
C_d	=	Deflection amplification factor
C_s	=	Ground motion intensity at design level
C_u	=	Parameter used for calculating fundamental period
$D_{L,i}; D_{R,i}$	=	Axial force in diagonal member at floor level i
D_y	=	Yielding deformation
D_L	=	Ultimate strain capacity before strength drop
D_R	=	Strain capacity at strength drop
D_X	=	Maximum core strain capacity
E_e	=	Elastic component of energy needed to push structure to target drift
E_p	=	Plastic component of energy needed to push structure to target drift
F_i	=	Lateral force distribution at level i
F'_i	=	Lateral force for one bay at level i
F_L	=	Summation of rebalancing force acting to the left
F_R	=	Summation of rebalancing force acting to the right
F_{int}	=	Summation of rebalancing force of interior column
g	=	Gravitational constant
hc_1	=	Clear height of the first story
h_i	=	height from ground floor to level i
h_n	=	height from ground to the top level
K_0	=	Initial stiffness up to first yield deformation
K_H	=	Strain hardening stiffness of BRB
L_{BRB}	=	Entire length of BRB
l_o	=	Undeformed length of BRB
M	=	Total mass of system
M_{pc}	=	Plastic Moment of column at bases
M_{p-ch}	=	Plastic Moment of chord
M_u	=	Ultimate moment
M_{max}	=	Maximum Moment
N_{BRB}	=	Axial strength of BRB
P_c	=	Axial load in column
P_u	=	Ultimate axial load
P_y	=	Yield load
P_c	=	Compressive yield strength
P_{pr}^+	=	Adjusted brace strength for tension
P_{pr}^-	=	Adjusted brace strength for compression
P_w	=	Applied load to truss member from gravity
P_{ysc}	=	Axial yield strength of steel core
R	=	Response modification coefficient
R_y	=	Material overstrength factor

R_{μ}	=	Yield force reduction factor
S_{CT}	=	Ground motion intensity at collapse
S_{MT}	=	Ground motion intensity at maximum considered earthquake level
S_a	=	Design pseudo-spectral acceleration
S_v	=	Design pseudo-spectral velocity
T	=	Fundamental Period
T_I	=	Fundamental period of the archetype model computed using eigenvalue analysis.
T_a	=	Regression analysis of actual building data
$T_{L,i}; T_{R,i}$	=	Axial force in top chord at floor level i
V	=	Design base shear
V_e	=	Base shear when the structure behaves elastically
V_{max}	=	Maximum base shear
w_n	=	Weight of the structure at top level
α	=	Parameter used for calculating required base shear
α_i	=	Distribution factor
β	=	Compression overstrength factor
β_{TOR}	=	Total system collapse uncertainty
β_i	=	Story shear ratio at level i
γ	=	Energy Factor
Δ_c	=	Yield displacement in compression
Δ_y	=	Yield displacement in tension
δ	=	Plastic deformation
δ_u	=	Ultimate roof drift displacement
$\delta_{y,eff}$	=	Yield roof drift displacement
ε_p	=	Plastic Strain
θ_p	=	Plastic drift ratio
θ_u	=	Target drift ratio
θ_y	=	Yield drift ratio
λ_i	=	Lateral force distribution factor
μ_s	=	Ductility ratio
μ_T	=	Period-based ductility
ζ	=	Overstrength faceter of chord
φ	=	Angle of the first diagonal makes with column
Ω	=	Overstrength factor
Ω_o	=	System overstrength factor
ω	=	Strain hardening factor

LIST OF TECHNICAL VOCABULARY AND ABBREVIATIONS

<i>ACMR</i>	=	Adjusted collapse margin ratio
BRB	=	Buckling Restrained Brace
BRBF	=	Buckling Restrained Brace Frame
BRKB-TMF	=	Buckling-Restrained Knee Braced Truss Moment Frame
<i>CMR</i>	=	Collapse Margin Ratio
CDF	=	Cumulative distribution function
DBE	=	Design Basis Earthquake
DYM	=	Designated yielding member
ft	=	foot
IDA	=	Incremental Dynamic Analysis
in ²	=	square inch
in ³	=	cubic inch
KBMF	=	Knee Brace Moment Frame
kN	=	kilo Newton
kN.m	=	kilo Newton meter
kip	=	kilo pound
kip/ft	=	kilo pound per foot
ksi	=	kilo pound per square inch
MCE	=	Maximum Considered Earthquake
m	=	meter
N/m ²	=	Newton per square meter
non-DYM	=	non-Designated yielding member
PBPD	=	Performance-Based Plastic Design
psf	=	pound square foot
STMF	=	Special Truss Moment Frame
<i>SSF</i>	=	Spectral shape factor
SCBF	=	Special Concentrically Braced Frame
TMF	=	Truss Moment frame