文章编号:1000-1301(2008)06-0134-08

足尺钢框架振动台试验及动力弹塑性数值模拟

韩小雷^{1,2},陈学伟¹,郑 宜¹,彭樵斌¹

(1.华南理工大学 土木与交通学院高层建筑结构研究所,广东 广州 510640;2.华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510640)

摘要:本文通过有限元分析程序 OpenSees对一足尺四层钢框架结构进行静力及动力弹塑性分析,结构构件采用自由度较少的纤维模型模拟。在振动台试验之前,预测足尺钢框架结构连续在小震、中震及大震作用下的响应,将预测分析结果与振动台试验结果进行对比,结果显示该数值模拟方法能很好地反映结构的弹塑性行为及破坏机制,准确预测结构的地震响应及大震下结构倒塌时间。这进一步说明基于纤维模型的整体结构弹塑性分析方法,由于自由度数少,适用于整体结构抗震分析。
 关键词:弹塑性时程分析;钢框架;足尺试件;振动台试验;预测性分析
 中图分类号:TU318

Dynam ic experiment and numerical simulation of a full scale steel frame

HAN Xiaole^{1, 2}, CHEN Xuewe¹, Jack CHEANG, PENG Q iaobin¹ (1. Tall Building Structure Research Institute, College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper presents the inelastic static and dynamic analysis of a 4 - story full-scale steel moment resisting frame structure with OpenSees, in which the structural members are simulated by the fiber-element models The seismic responses of the full-scale structure under frequent, moderate and severe ground motions are predicted prior to the shaking-table test. Correlated with the experimental results, the analytical results confirm the accuracy of this numerical simulation method, both represent the inelastic behavior and the failure mechanism and predict the seismic responses and the collapse moment of the structure under severe ground motion. The study confirms the validity of the global seismic responses of the inelastic analysis procedure on the basis of the fiber-element model, which reduces the calculating cost due to fewer DOFs

Key words: inelastic time-history analysis; steel frame; full scale specimen; shaking table test; blind analysis

引言

2007年 9月 27日在目前世界上最大的模拟地震振动台 (日本 E - Defense)上进行了足尺钢框架振动台 试验,并举行了 2007年度预测性分析比赛 (B lind analysis contest)^[1]。该比赛由第 14届世界地震工程会议 (14WCEE)与日本防灾科学技术研究所兵库抗震工学研究中心联合举办,分四个组别: 3D科研组、3D工程 组、2D科研组及 2D工程组,由日本、美国、中国、新西兰、意大利和英国等多个国家共 47个队伍参加,代表了 工程抗震结构非线性领域的最新研究和应用水平。该比赛要求对一足尺钢框架结构进行振动台试验预测性

收稿日期: 2008 - 03 - 13; 修订日期: 2008 - 04 - 10. 基金项目:广东省自然科学基金项目(06105416);华南理工大学科研基金项目(304 - E30270) 作者简介:韩小雷(1964 -),男,教授,博士,主要从事复杂结构的抗震研究. Email: xlhan@ scut edu cn

2

分析,提交分析结果(包括结构各种地震反应及倒塌时间)并与振动台试验结果进行对比,以结果的准确性 作为评判的标准。本文作者参加了这次比赛,并荣获 3D科研组第三名^[2]。本文着重论述该振动台试验以 及本文作者在比赛中所完成的基于纤维模型的结构弹塑性数值模拟方法。

1 足尺试验模型

1.1 E-D efen se振动台

2005年 1月 15日,日本防灾科学技术研究所 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,以下简称 N IED)在神户附近的 Miki市建成了目前世界上最大的模拟地震振动台 E-Defense^[3]。 E-Defense全称为"实体三维振动破坏试验振动台", E-Defense振动台由实验楼、控制楼、油压设备、准备楼和 三维振动台等设施组成,其尺寸为 20 m ×15 m,最大竖向承载力为 12 000 kN,其 *XY*方向最大加速度为 900 cm / s^2 , *Z*方向最大加速度为 1 500 cm / s^2 。

1.2 足尺钢框架主体结构

本次振动台结构试验的试件为一个钢框架 +压型钢板混凝土楼板的结构体系。试件结构平面为 10 m x6 m的矩形, Y方向两跨,柱距为 5 m, X方向一跨,柱距为 6 m。其中, Y方向为试件受荷的主要方向。试件基础高度为 1.5 m,首层层高为 3.875 m,2~4层层高均为 3.500 m,女儿墙高度为 0.600 m,试件总高为 16.475m。试件各层结构布置见图 1,各构件截面与材料见表 1。



图 1 试件平面及立面图

Fig 1 Framing plan and elevation of the specimen

表 1 钢框架采用构件截面与材料表

Table 1 Sections and materials of the steel frame

层号·	梁 (SN400B)		柱 (BCR295)		
	Gl	G11	G12	C1, C2	
4	H - 346 ×174 ×6 ×9	H - 346 ×174 ×6 ×9	H - 346 ×174 ×6 ×9	RHS - 300 ×9	
3	H - 350 ×175 ×7 ×11	H - 350 ×175 ×7 ×11	H - 350 ×175 ×9 ×14	RHS - 300 ×9	
2	H - 396 ×199 ×7 ×11	H - 400 ×200 ×8 ×13	H - 400 ×200 ×8 ×13	RHS - 300 ×9	
1	H - 400 ×200 ×8 ×13	H - 400 ×200 ×8 ×13	H - 390 ×200 ×10 ×16	RHS - 300 ×9	

试件与振动台的连接为固结,设计中不考虑柱底连接变形或破坏对上部结构的影响。即使上部结构发 生破坏,柱底的连接仍保持在弹性范围。首先利用 16个 M22和 8个 M36锚栓把柱底固结于一钢支座,钢支 座再通过 20个 M48的地脚螺栓与振动台稳固连接,从而达到固结的效果。

为了节省支模和便于施工,试件的楼板均采用压型钢板组合楼板,压型钢板可兼模板的作用。其中,2~

4层楼板均采用波高为 75 mm、厚度为 1.2 mm的镀锌压型钢板,压型钢板上翼缘以上的混凝土厚度为 100 mm,板中配筋为双层双向 D6@150,如图 2所示。组合梁中的栓钉采用单排式排放,栓钉高 110 mm,直径为 19 mm,按 200 mm的间距焊接于钢梁的上翼缘。屋面层楼板采用厚度为 1.2 mm的镀锌平板,其上依次浇有 150 mm的钢筋混凝土板和 100 mm的矿渣混凝土板。试件板钢筋均采用搭接连接。整体结构施工完成后 如图 3所示。



图 2 组合楼板的钢筋布置





图 3 试验前整体结构图 Fig 3 Figure of steel frame before test

1.3 试验选用的地震动

136

本次试验选用 1995年 1月 27日日本兵库县南部地震 (即阪神地震)时在 Takatori记录站的实测记录。 日本兵库县南部地震震级为 7.2,震中位于兵库县首府神户市和淡路岛之间的海底,震源深度为 17.27 km, 属于浅源地震。地震记录持时 41 s,南北方向最大加速度为 0.606 g,东西方向最大加速度为 0.657 g,竖直 方向最大加速度为 0.279 g,其中南北方向作为 Y方向输入,东西方向作为 X输入,竖直方向作为 Z方向输入。

2 OpenSees分析软件及分析模型介绍

2.1 OpenSees分析软件简介

OpenSees全称 Open System for Earthquake Engineering Simulation^[4],是开源的地震工程模拟系统。其程序代码是公开的,用户可以通过编程手段为系统增加新的材料本构和单元类型。程序主要用于分析结构在地震作用下的反应。其功能包括线性分析,静力和动力非线性分析,特征值计算等功能。程序的有限元单元类型丰富,本文结构非线性分析中主要使用非线性梁柱单元 nonlinear beam column,此单元是基于纤维模型的非线性单元,可应用于杆系结构的静力与动力非线性分析并且考虑 *P* - Delta效应。本文混凝土采用 Kent - Scott - Park本构模型^[5,6],如图 4 所示,该模型根据大量试验结果进行回归分析得到,形式简单直观,工程中使用方便,可以考虑横向约束作用对混凝土强度与延性提高的影响。钢材采用 Giuffré-Menegoto - Pin-po^[7,8]本构模型,如图 5 所示,该模型能够很好地模拟钢材的刚度退化及屈曲行为。



7

2.2 数值分析模型

通过 OpenSees vl. 7. 2分析软件对该钢框架结构进行三维弹塑性时程分析,采用纤维单元模拟梁柱构件,考虑 *P*-Delta效应。为了考虑钢柱的屈曲行为,钢柱单元需要稍为细分^[9]。梁柱单元的纤维截面划分 如图 6.图 7所示。



在进行结构动力试验之前,N ED 对结构采用的钢材及混凝土进行材料试验,模型材料参数基于上述材料试验进行调整,钢材参数如表 2所示。

表 2 OpenSees钢材的材料参数(W 为腹板,F为翼缘)

Table 2Steel material properties of OpenSees(W - Web, F - Flange)							
构件	屈服强度 F _y /MPa	弹性模量 Es/MPa	构件	屈服强度 F _y /MPa	弹性模量 Es/MPa		
RHS300	350	233 333	H346W	400	200 000		
H400F	325	162 500	H350F	300	200 000		
H400W	370	246 667	H350W	350	233 333		
H340F	300	200 000	H390	300	200 000		
H340W	350	233 333	H396F	300	200 000		
H346F	340	226 667	H396W	360	200 000		



图 8钢梁与组合梁低周往复荷载试验数值模拟



在进行结构动力试验之前,为了解钢构件的抗震性能,NED对钢构件包括钢梁、组合梁及钢柱进行四项 低周往复荷载试验。本文通过纤维单元建立低周往复荷载试验的数值模型,并与试验结果进行对比。通过 对比分析,钢梁与钢柱在不需要进行参数调整的情况下仍与构件试验结果相当吻合,组合梁模型需要进行参 数调整,经过承载力与延性参数调整后基本与试验吻合。试验装置与分析结果如图 & 图 9所示。



图 9 钢柱低周往复荷载试验数值模拟



确定了材料参数与构件模型后,进行整体结构建模,模型如图 10所示。模型质量详细数据由 N ED 提 供。分别在 OpenSees与 SAP2000建立模型并进行模态分析。SAP2000计算得到周期为: $T_1 = 0$ 7313 s, $T_2 = 0$ 697 3 s, $T_3 = 0$ 532 2 s; OpenSees计算得到周期为: $T_1 = 0$ 722 6 s, $T_2 = 0$ 690 6 s, $T_3 = 0$ 528 1 s。两者模态 分析结果基本吻合。

在 0.1 ×Takatori单向地震动激励下对 OpenSees模型进行结构弹性时程分析,并将分析结果与 SAP2000 进行对比,顶部位移反应时程对比如图 11所示。模态分析与弹性时程分析的对比,可以验证 OpenSees模型 的合理性。







3 钢框架的弹塑性分析

3.1 静力弹塑性分析 (pushover)

在计算重力荷载后,对框架 Y方向进行静力弹塑性分析,分析结果如图 12、图 13所示。分析时荷载模 式采用与 Takatori地震动相应的反应谱进行谱分析后得到的楼层作用力。最大的基底剪力为 1 269 kN,相 当于 0.678倍结构总重。由结构变形图可知,大的层间位移集中在首层,出现这种现象的原因是由于柱端局 部屈曲引起的柱子的破坏。

3.2 动力弹塑性分析

2

试验过程分三部分:0.4 ×Takatori小震作用,0.6 ×Takatori中震作用,1.0 ×Takatori大震作用。数值模型采用瑞利阻尼,第一振型与第二振型的阻尼系数为0.02,地震作用及分析步长为0.02 % 时程分析三向地震作用按实际地震动输入。求解方法采用 Newmark直接积分法, =0.5, =0.25,收敛准则为能量准则。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

25





Fig. 12 Deformation of pushover



Fig. 13 Curve of base shear-top displacement of pushover

计算耗时描述:计算模型为三维模型,共 78个节点,100个非线性梁柱纤维单元,地震作用为 0.6 × Takatori(中震作用),步长为 0.02 s,步数为 2500。计算机 CPU为 Intel(R) Pentium (R) Processor 1. 50GHz, 内存为 760 MB,计算时间为 25 min。可见,基于纤维单元的非线性数值模型由于自由度数少,节约了大量计 算时间,提高了计算效率。

3.3 分析结果

两方向首层位移角时程曲线如图 14所示,当位移角达到 ±0.13(rad) 1/8时,认为结构已经倒塌,经 OpenSees分析,结构经过小震中震后,进入大震后 6 26 s,首层位移角达到 0 13 (rad),结构倒塌。试验实测 倒塌时间为 6.24 s





Fig 14 Curve of drift angle time-history on story 1

试验测得结构在 0.6 xTakatori地震动激励下楼层相对位移时程、楼层绝对加速度时程,并计算到相应 楼层剪力时程与倾覆弯矩时程。将 OpenSees计算得到上述反应的最大值与试验结果^[2]进行对比,如图 15 ~图 18所示。结构变形预测稍有偏差,电算结果表明侧向变形集中在首层。而试验结果表明,侧向变形比



第 6期

较均匀。楼层绝对加速度、楼层倾覆弯矩与楼层剪力基本与试验一致。



Fig. 17 Maximum overturning moment (in Y direction)





试验中结构在 1.0 ×Takatori地震动激励下倒塌,倒塌瞬间(t=6.24 s)快照如图 19所示,可见,首层出现最大层间变形,柱端出现局部屈曲,导致结构整体倒塌,如图 20所示。OpenSees模拟结构 6.26 s倒塌,倒塌瞬间结构变形如图 21所示。经对比分析,表明基于纤维模型的有限元分析程序 OpenSees能够较准确地模拟结构在大震作用下的响应,在试验之前,能准确预测结构倒塌时间及结构变形。



图 19 倒塌快照 Fig. 19 Photo shot of collapse



图 20 柱端局部屈曲 Fig. 20 Local buckling of column end



图 21 OpenSees 模拟倒塌时变形 Fig. 21 Deformation during collapse in OpenSees

4 结论

本文通过基于纤维模型的有限元分析程序 OpenSees对足尺钢框架结构进行非线性分析。在整体分析 之前,本文对钢梁与钢柱构件进行低周往复荷载试验模拟,并与 N ED 提供的试验数据进行比较。通过分 析,调整组合梁的承载力与延性参数,保证纤维单元能够相对准确地模拟组合梁的弹塑性行为,钢柱与钢梁 在无需调整的情况下,计算结果与试验结果基本吻合。钢柱在大震作用下出现局部屈曲,模型通过细分柱单 元并考虑 *P* - Delta效应来实现对局部屈曲模拟。为检验模型,本文对结构进行模态分析与弹性时程分析, 并将结果与 SA P2000分析结果进行对比,表明模型合理。

完成建模后,运用 OpenSees对结构进行静力及动力弹塑性分析。经过分析,表明该结构的破坏机制是 由柱端局部屈曲引起结构抗侧刚度下降,引起倒塌。动力弹塑性分析先后分三个阶段,0.4 ×Takatori小震、 0.6 ×Takatori中震、1.0 ×Takatori大震。程序计算得到结构在中震下的最大响应(包括楼层相对位移,楼层 绝对加速度,楼层剪力与楼层倾覆弯矩数据)与试验实测结果基本吻合,程序预测结构倒塌时间与试验实测 时间非常吻合。通过分析,表明该模型能准确反映钢结构的弹塑性及屈曲行为,能准确评估结构抗震性能, 了解结构破坏机制。研究结果表明,基于纤维模型的整体结构弹塑性分析方法可以通过比较少的自由度,很 好地反映结构弹塑性行为,节约计算时间,高效的完成整体结构抗震性能分析。

基于性能的抗震分析方法是抗震工程的发展方向,经试验校正与验正的非线性分析方法是基于性能的 抗震分析方法的基础。

参考文献:

- National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention Four story steel bulding collapse analysis blind prediction contest rules
 [Z]. http://www.blind anlaysis jp/index_e htm, appendix_e pdf 2007 6 18.
- [2] National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention B lind analysis contest 2007 results of the contest[Z]. http://www.blind-anlaysis jp/index_e htm, appendix_e pdf 2007 12 21.
- [3] Masayoshi SATO, Takahito NOUE General frame work of research topics utilizing the 3D full scale earthquake testing facility[J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4(3): 449 - 456.
- [4] Mazzoni S, Mckenna F, ScottM H, et al Opensees command language manual[Z]. http://Opensees Berkeley edu/OPENSEES/manuals/usemanual/Opensees command language manual June 2006. pdf 2006 - 6 - 19.
- [5] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [J]. ASCE, 1971, 97 (ST7): 1969 1990.
- [6] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, (99 2): 13 27.
- [7] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis of cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non elastic behavior of elements under normal force and bending [R]. Preliminary Report, IABSE, 1973, 13: 15 - 22.
- [8] CEB: RC Elements under Cyclic Loading ³/ State of the Art Report[R]. Thomas Telford, 1996.
- [9] Murat Dicleli, Anshu Mehta Simulation of inelastic cyclic buckling behavior of steel box sections [J]. Computers and Sturctures, 2007, 85: 446

 457.
- [10] Motohide Tada, Makoto Ohsaki, Satoshi Yamada E Defense tests on full scale steel building [C]//Proc. Structural Congress, ASCE, Long Beach, 2007: 247 - 19.