

文章编号:1673-9469(2009)02-0022-04

钢筋混凝土框架振动台试验模型的数值模拟研究

李荣华, 邸庆霜, 杨树标, 胡光园
(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:采用 OpenSees 有限元系统作为分析工具, 本文针对一个钢筋混凝土框架结构的振动台模型试验, 选取了几种典型工况进行了数值模拟研究。数值模拟研究包括结构动力特性的分析、弹性及弹塑性时程分析, 并给出了结构塑性发展历程。模型实测与理论计算响应结果对比分析表明: 振动台模型试验实测结果与理论计算值吻合较好, 说明文中所采用的分析模型及方法是可行的, 可以作为振动台结构模型试验的分析工具。

关键词:相似原理; 振动台试验; 数值模拟; OpenSees

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

Numerical simulation of a RC frame shaking table test model

LI Rong-hua, DI Qing-shuang, YANG Shu-biao, HU Guang-yuan
(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Numerical simulation of a 4 story RC frame shaking table test model was carried out using of OpenSees finite element analysis system in this paper. Numerical simulation results include elasto-plastic time history analysis and plastic hinge evolution. It was concluded from comparisons between experimental results and numerical simulation results that numerical simulation results are consistent with experimental results.

Key words: similitude theory; shaking table test; numerical simulation; OpenSees

我国现行建筑抗震设计规范(GB50011-2001)对结构罕遇地震下的弹塑性变形验算进行了规定。对于一些特殊复杂结构通常采用振动台模型试验来进行结构抗震性能的研究^[1]。数值模拟技术是研究结构抗震性能的另一种重要手段, 对于三维空间结构弹塑性地震反应分析问题来说尤为如此^[2,3]。目前弹塑性时程分析主要集中在复杂特殊结构的工程应用上^[4], 常用结构软件包括 ANSYS、SAP2000、ETABS、Midas 等^[3]。本文以 OpenSees 有限元系统为分析工具, 针对某4层钢筋混凝土框架结构的振动台试验模型进行了数值模拟研究, 给出了试验模型弹塑性时程分析结果及结构塑性发展历程, 并进行了试验实测与理论计算响应结果的对比分析, 得到了一些有意义的结论。

1 振动台试验模型概况

1.1 原型结构概况

本振动台试验模型所对应的原型结构为一4层钢筋混凝土框架结构, 总高17m, 首层层高5m, 其余各层层高4m; 柱网尺寸为8m×8m。原型结构属丙类建筑, 工程抗震设防烈度为7度, 设计地震分组为第一组, 设计基本地震加速度为0.1g, 场地类别为Ⅱ类场地, 框架抗震等级为三级, 设计活荷载为4.0kN/m²。混凝土强度等级为C25, 钢筋等级为HPB235和HRB335级。

1.2 完全质量相似模型

根据结构模型相似理论, 并考虑振动台台面尺寸及承载能力等条件的限制, 确定模型的几何

尺寸比例为 $S_L = 1/8$, 弹性模量相似常数为 $S_E = 0.22$ 。试验模型采用了完全质量相似模型, 等效密度相似比为 $S_p = 1.74$ 。根据一致相似律^[5]计算的主要相似常数如下: $S_1 = 1/2\sqrt{2}$, $S_m = 1/290.9$, $S_f = 1/290.9$, $S_a = 1$ 。试验模型以微粒混凝土和镀锌铁丝制造^[6]。模型总质量为 5.332t, 其中模型及附加质量重为 2.125t, 刚性底座重为 3.21t。

2 模型结构弹塑性时程分析

以 OpenSees 有限元系统为工具^[7], 对试验模型结构弹性及弹塑性进行了时程分析, 并与振动台试验结果进行了对比。

2.1 材料及单元分析模型

混凝土和钢筋的本构模型分别选用修正后的 Kent & Park 应力-应变关系和忽略包辛格效应的双线性弹塑性模型来模拟。OpenSees 中对应的材料模型分别为 Concrete 02 模型和 Steel 01 模型, 如图 1。对于钢筋混凝土梁柱等构件采用带塑性区的非线性梁柱单元 (Nonlinear Beam Column Element) 进行的模拟。由于在振动台试验过程中未观测到模型结构楼板产生明显破坏现象, 因此在混凝土楼板的模拟中采用四节点四边形单元 (Quad Element) 来对楼板进行模拟, 并且只考虑板的弹性效应。OpenSees 中带有“equalDOF”多点约束命令 (Multi-Point Constraints), 可以将不同自由度的梁柱单元与板单元进行连结, 从而模拟梁板结构体系。

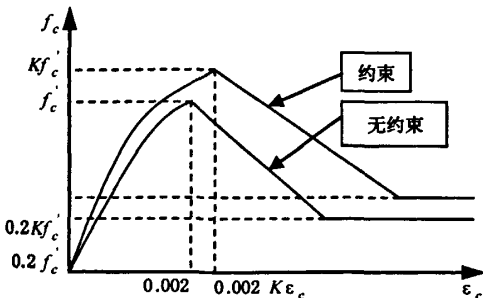


图1 Kent & park 混凝土应力应变曲线
Fig.1 Concrete model of kent & park

2.2 地震波及分析工况的选取

振动台试验过程中选择了三条地震波作为模拟地震振动台台面输入波, 分别是: EI - Centro波、

Taft 波和兰州人工波^[8,9]。试验工况总数为 21 个。本文的数值模拟分析中之选择了对应于 7 度基本烈度和 9 度罕遇烈度的 EI - Centro 波及兰州人工波的四组试验工况, 代号为 GK6, GK8, GK18, GK20。限于篇幅, 后续的对比分析只给出了 9 度罕遇烈度 EI - Centro 波 (GK18) 的分析结果。

2.3 有限元分析模型的建立

在进行试验模型的有限元分析之前, 首先对实际试验模型结构进行系统测量, 各层梁、柱构件平均尺寸误差在 2% 以内。模型制造过程中将每层楼盖结构中的次梁忽略, 同时将楼板厚度增大, 由相似条件下的 15mm 增加为 40mm, 增加的楼板厚度按附加质量来考虑。

3 结果对比分析

3.1 模型动力特性对比

试验模型实测结果与理论计算结果的对比列于表 1, 实测值与理论计算值基本吻合。

表 1 试验模型实测频率与理论计算对比

Tab.1 Frequency and periodic of test model

频率	试验值	理论值	误差 (%)
1 阶	5.40	4.99	7.59
2 阶	19.60	17.76	9.34
3 阶	28.20	28.07	0.46

3.2 模型弹塑性时程响应对比

试验模型楼层加速度、楼层位移时程响应列于表 2。除实测值外, 表中数据为弹性时程分析结果, 圆括号内数据为弹塑性时程分析结果。误差计算时, 以实测结果为基准, 理论值采用弹塑性时程分析结果。图 2a 为 9 度罕遇烈度地震作用下模型顶层加速度理论与实测值时程对比。图 2b 为 9 度罕遇烈度地震作用下模型顶层位移理论与实测值时程对比。除个别测点存在一定差异外, 整体结果吻合较好。

3.3 模型弹塑性发展历程

模型结构在地震波激励输入的过程中, 构件不断进入塑性状态。试验模型各阶段塑性铰发展见图 3。0.666 4s 时, 结构顶层达到正的最大侧移值。0.735 0s 时, 模型结构第一次出现塑性铰, 位置在 1 层柱底。0.774 2s 结构顶层达到负的最大

表 2 9 度罕遇烈度下楼层加速度与楼层位移响应对比
Tab.2 Comparison of max floor acceleration and displacement under seldom intensity IX

楼层	GK18(EI 波) 楼层加速度响应(cm/s^2)			GK18(EI 波) 楼层位移(mm)		
	实测	理论	误差(%)	实测	理论	误差(%)
4	1 144.000	1 436.86 (1 179.43)	3.10	14.080	13.407 (13.426)	4.64
3	1 070.000	1 314.03 (1 091.40)	2.00	12.540	11.753 (11.959)	4.63
2	969.000	1 112.99 (959.956)	0.93	9.310	8.716 (9.064)	2.64
1	840.000	870.48 (781.320)	6.99	5.340	4.560 (4.833)	9.49

注:圆括号内为加速度加载弹性分析结果

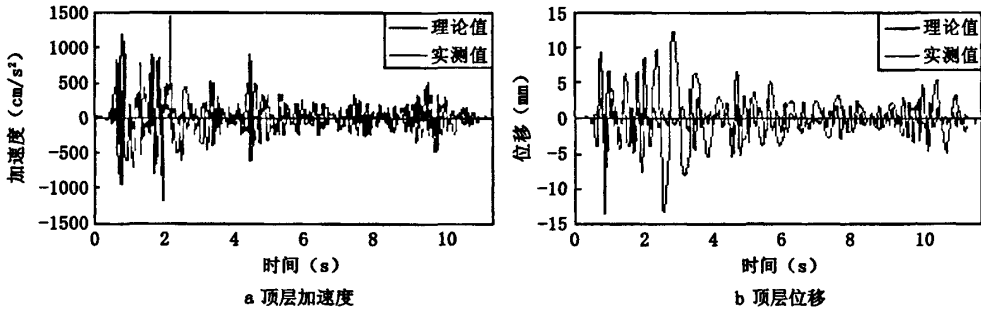


图 2 9 度罕遇烈度 EI 波试验模型理论与实测响应对比
Fig.2 Comparison of model response between computation and test

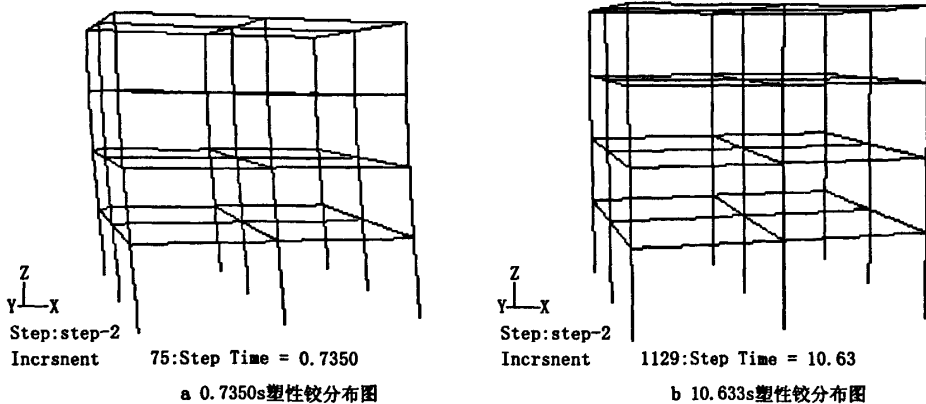


图 3 9 度罕遇 EI 波试验模型结构塑性发展历程
Fig.3 Plastic evolution of scaled down structure under GK18

侧移值。之后随着时间增长,结构中塑性铰数量不断增加。4.533s 之后结构顶层侧移趋于平稳,结构塑性铰数量不再剧烈变化。分析终止的 10.633s

时,模型 1、2 层大部分构件都已产生塑性铰,此时的结构已接近破坏状态,与振动台试验结束时模型状态基本吻合。

4 结论

1) 振动台试验结束后,模型结构已接近可变体系的机构,但是仍能保持整体性而不倒塌,说明结构满足规范规定的“大震不倒”抗震设防目标。

2) 数值模拟结果与试验实测结果吻合较好,说明文中所采用的 OpenSees 有限元分析模型及方法是可行的,同时也说明可以采用 OpenSees 作为结构弹塑性分析工具是可行的,可以作为振动台试验结果的辅助检验工具。

参考文献:

- [1] 杨树标,李荣华.振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(1):08-11.
- [2] 马路,张崇厚.一单索系曲线斜拉桥的结构分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(12):4-7.
- [3] 胡宝琳,李国强.框架结构层间位移的分析方法比较[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(11):17-19.
- [4] 庄萌,王宗纲,钱稼茹.CNP1000安全壳1:10模型的模态分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(13):7-11.
- [5] 张敏政.地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J].地震工程与工程振动,1997,17(2):52-58.
- [6] HARRIS H. G, SABNIS G M.
- [7] SILVIA MAZZONI, FRANK MCKENNA, MICHAEL H, *et al.* OpenSees Users Manual [R]. PEER, University of California, Berkeley. 2007.
- [8] 杨树标,杨艳秋.框架复合隔震结构地震响应分析[J].河北建筑科技学院学报,2006,23(1):23-26.
- [9] 孙武,杨树标,吴斌,等.并联复合隔震结构地震反应时程分析[J].河北建筑科技学院学报,2004,21(1):52-55.
- [10] 王涛,孟丽岩,孙景红,等.框架-剪力墙结构的弹塑性地震反应[J].黑龙江科技学院学报,2008,18(6):455-459.

(责任编辑 闫纯有)

作者: [李荣华](#), [邸庆霜](#), [杨树标](#), [胡光园](#), [LI Rong-hua](#), [DI Qing-shuang](#), [YANG Shu-biao](#),
[HU Guang-yuan](#)
作者单位: [河北工程大学土木工程学院](#), 河北, 邯郸, 056038
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2009, 26 (2)

参考文献(10条)

1. [杨树标](#); [李荣华](#) [振动台试验模型和原型相似关系的理论研究](#) [期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (01)
2. [马路](#); [张崇厚](#) [单索系曲线斜拉桥的结构分析](#) [期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (12)
3. [胡宝琳](#); [李国强](#) [框架结构层间位移的分析方法比较](#) [期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (11)
4. [庄萌](#); [王宗纲](#); [钱稼茹](#) [CNP1000安全壳1:10模型的模态分析](#) [期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (13)
5. [张敏政](#) [地震模拟实验中相似律应用的若干问题](#) 1997 (02)
6. HARRIS H. G.; SARNIS G. M. [查看详情](#)
7. SILVIA MAZZONI; FRANK MCKENNA; MICHAEL H. [OpenSees Users Manual](#) 2007
8. [杨树标](#); [杨艳秋](#) [框架复合隔震结构地震响应分析](#) [期刊论文]-[河北建筑科技学院学报](#) 2006 (01)
9. [孙武](#); [杨树标](#); [吴斌](#) [并联复合隔震结构地震反应时程分析](#) [期刊论文]-[河北建筑科技学院学报](#) 2004 (01)
10. [王涛](#); [孟丽岩](#); [孙景红](#) [框架、一剪力墙结构的弹塑性地震反应](#) [期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2008 (06)

本文读者也读过(10条)

1. [高剑飞](#). [Gao Jiangfei](#) [OpenSees: 一个专用于土木工程的分析软件](#) [期刊论文]-[四川水利](#) 2007, 28 (5)
2. [杨红](#). [吴晶晶](#). [王志军](#). [YANG Hong](#). [WU Jingjing](#). [WANG Zhi jun](#) [模型化方法对钢筋混凝土框架地震反应的影响分析](#) [期刊论文]-[地震工程与工程振动](#) 2008, 28 (2)
3. [钱江](#). [雷拓](#). [刘凯雁](#). [QIAN Jiang](#). [LEI Tuo](#). [LIU Kai-yan](#) [既有钢筋混凝土框架抗剪能力分析](#) [期刊论文]-[中南大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 41 (3)
4. [潘志宏](#). [李爱群](#). [孙义刚](#). [PAN Zhihong](#). [LI Aiqun](#). [SUN Yigang](#) [基于纤维模型的外包钢加固混凝土框架结构静力弹塑性分析](#) [期刊论文]-[沈阳建筑大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 26 (1)
5. [罗辑](#) [基于OpenSees的钢管混凝土拱桥地震响应分析](#) [期刊论文]-[四川建筑](#) 2006, 26 (3)
6. [李敬彬](#). [赵孟刚](#). [LI Jing-bin](#). [ZHAO Meng-gang](#) [钢筋混凝土框架结构模型模拟地震振动台试验](#) [期刊论文]-[山西建筑](#) 2009, 35 (24)
7. [齐虎](#). [孙景江](#). [林淋](#). [QI Hu](#). [SUN Jing-jiang](#). [LIN Lin](#) [OPENSEES中纤维模型的研究](#) [期刊论文]-[世界地震工程](#) 2007, 23 (4)
8. [阎石](#). [季保建](#). [陈鑫](#). [YAN Shi](#). [JI Baojian](#). [CHEN Xin](#) [高强钢筋高强混凝土柱的非线性数值分析](#) [期刊论文]-[沈阳建筑大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 26 (2)
9. [王瑾](#). [蔡新江](#). [田石柱](#). [WANG Jin](#). [CAI Xinjiang](#). [TIAN Shizhu](#) [基于OpenSees的CFRP加固RC短柱抗震性能数值模拟](#) [期刊论文]-[世界地震工程](#) 2009, 25 (4)
10. [周丽丽](#). [毛晨曦](#). [ZHOU Li-li](#). [MAO Chen-xi](#) [基于OPENSEES的新单轴材料模型的实现](#) [期刊论文]-[低温建筑技术](#) 2010, 32 (1)