

[文章编号] 1002-8412(2011)02-0009-07

基于非线性纤维梁柱单元的钢管混凝土框架 动力时程分析

王 军^{1,2}, 王文达^{1,2}, 张鹏鹏^{1,2} (1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘 要] 目前,用于钢管混凝土框架结构动力时程分析的计算理论模型主要有:纤维模型和三维有限元模型,三维有限元模型计算量大,且数值计算收敛困难,在钢管混凝土结构动力时程分析中的应用受到一定限制。为了研究钢管混凝土框架结构在地震作用下的抗震性能,本文在构件层次上运用 OpenSees 计算平台中的非线性纤维梁-柱单元对钢管混凝土框架结构进行模拟计算,通过对其他研究者完成的某模拟地震振动台试验钢管混凝土框架模型进行数值模拟,输入不同工况的地震波对该模型进行了动力时程分析,总体上数值模拟结果和试验结果吻合较好,表明基于 OpenSees 平台的非线性纤维模型方法能够较好地模拟钢管混凝土框架结构的动力特性。

[关键词] 非线性纤维梁柱模型;钢管混凝土;框架;动力性能;时程分析

[中图分类号] TU375.4;TU311 [文献标识码] A

Dynamic Time History Analyses of Concrete-filled Steel Tubular Frames Based on Nonlinear Fiber Beam-column Element

Wang Jun^{1,2}, Wang Wen-da^{1,2}, Zhang Peng-peng (1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: There are two main kinds of approach to simulate the dynamic behavior of the concrete filled steel tubular (CFST) frame structures, i. e., three dimension finite element method and fiber model based on nonlinear fiber beam-column. The three dimension finite element method is limited to be used because of it's computational efficiency and convergence. In order to study the seismic performance of the CFST frame structures, the nonlinear fiber beam-column element based on the OpenSees platform is used in this paper. A typical frame structure model with circular CFST columns which is performed shaking table test by the other researcher is used to verify and simulate under different earthquake waves. The numerical results are match well with the tested results in general. It shows that the nonlinear fiber beam-column model can simulate the dynamic behavior of the CFST frame rationally and logically.

Keywords: nonlinear fiber beam-column model; concrete filled steel tube (CFST); frame structure; dynamic behavior; dynamic time history analyses

E-mail: wangwd@lut.cn

1 前言

钢管混凝土结构由于具有良好的力学性能,在现代建筑中的应用越来越多^[1],而钢管混凝土框架结构是其重要的结构形式之一。目前,对钢管混凝土框架结构的地震反应分析研究相对较少,对钢管

混凝土框架结构抗震性能的研究大多集中在拟静力试验方面,文献[1]中已有较全面的归纳,本文不再赘述。对钢管混凝土结构的拟动力试验和振动台试验研究相对更少,拟动力试验主要有:宗周红等^[2]对一榀由钢管混凝土柱和组合楼盖经由半刚性连接构成的组合框架 1/3 比例模型的拟动力试验研究;周栋梁等^[3]人的 2 层 2 跨的环梁连接钢筋混凝土

[收稿日期] 2010-07-29

[基金项目] 甘肃省高等学校基本科研业务专项(0904ZTB147)

梁-钢管混凝土柱框架的拟动力试验研究; Tsai 等^[4,5]人的 3 层 3 跨足尺钢管混凝土框架的拟动力试验; 以及 Herrera 等^[6]对一榀 4 层 4 跨钢管混凝土柱-钢梁抗弯框架进行的分析与相似比为 0.6 的拟动力试验。振动台试验目前也不多, 有黄襄云等^[7]对两层单跨钢管混凝土组合框架结构进行的振动台试验研究; 童菊仙等^[8]对某五层方钢管混凝土框架结构进行的无支撑和有支撑模型地震模拟振动台试验; 许成祥等^[9]对某 8 层圆钢管混凝土框架模型进行的地震模拟振动台试验; 以及 Han 等^[10]分别进行的两个 30 层的圆形及方形钢管混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构模型的模拟地震振动台试验研究。试验研究表明, 钢管混凝土框架结构具有良好的抗震性能。

对钢管混凝土框架力学性能的理论研究也较少, 主要有: 丁阳等^[11]和王铁成等^[12]用 ANSYS 对钢管混凝土框架试验进行的非线性有限元模拟; 聂建国等^[13]、刘晶波等^[14]分别对某 10 层和 15 层方钢管混凝土框架结构进行的静力推覆分析; 王文达等^[15]在考虑材料非线性和几何非线性的基础上进行的钢管混凝土柱-钢梁平面框架结构力学性能的非线性有限元分析; 王文达等^[16]建议的单层钢管混凝土框架的荷载-位移恢复力模型; 王文达等^[17]进行的钢管混凝土框架的简化二阶弹塑性分析并建议了其荷载-位移曲线的简化计算方法; 王文达等^[18]对钢管混凝土框架结构基于性能的抗震设计理论若干关键问题的探讨。

本文运用 OpenSees 计算平台来模拟钢管混凝土框架结构的动力时程反应。国内外已有大量研究者运用了 OpenSees 计算平台来进行了模拟计算, 如韩小雷等^[19]采用 OpenSees 进行了足尺 4 层框架结构的静力及动力弹塑性分析。王文达等^[20]基于 OpenSees 计算平台对钢管混凝土单层框架进行了滞回性能的数值分析。本文拟采用 OpenSees 软件中的非线性纤维梁柱单元, 通过对截面的纤维划分, 采用不同材料的单轴受力本构模型来模拟输入地震波作用下钢管混凝土框架结构的地震反应。

2 分析模型概况

选取了许成祥等^[9]设计制作的钢管混凝土框架结构模拟地震振动台试验模型为研究对象, 为单跨两开间的 8 层圆钢管混凝土柱-钢梁框架结构, 按 1/10 缩尺比例设计制作。

模型的主要参数如下:

(1) 试验模型几何参数为层高 0.35m, 两开间均为 0.60m, 进深 0.60m, 模型立面、平面及工字钢梁断面分别如图 1(a)、图 1(b)、图 1(c) 所示。

(2) 试验模型固定在振动台上, 结构采用外加强环节点和加劲肋板式柱脚。用附加配重的方法模拟重力相似关系考虑了填充墙、隔墙等恒荷载及楼面活载的作用, 将这些荷载用楼面附加质量来模拟, 试验模型每层附加质量 56kg, 模型总质量 760kg。钢管选用 $\Phi 68\text{mm} \times 3\text{mm}$ 无缝钢管, 钢梁为 $\text{H}40\text{mm} \times 45\text{mm} \times 2.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 焊接钢梁。楼板为 20mm 厚现浇混凝土板。楼板混凝土的立方体抗压强度为 23.28MPa, 钢管内混凝土的立方体抗压强度为 38.65MPa, 钢管的屈服强度为 286.55MPa, 钢梁屈服强度为 285.36MPa, 加强环板的屈服强度为 288.48MPa。

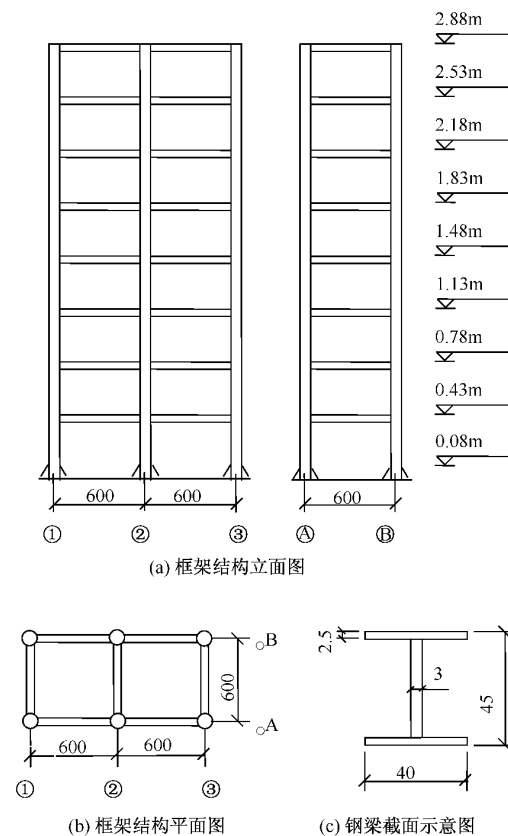


图 1 模型参数示意

Fig. 1 Parameters of the model

3 数值分析模型

本文模拟的是一个 1/10 的缩尺比例振动台试验, 基本参数采用文献 [9] 中提供的几何尺寸和材

料参数确定。因原文献中缺少个别参数,本文根据模型特点暂取了相应数值,最后得到与试验测得的自振频率相近的模型作为最后的计算模型。采用 OpenSees 程序中提供的非线性纤维梁柱单元 (Nonlinear Beam Column Element) 来模拟钢管混凝土框架中的钢梁及钢管混凝土柱,不考虑楼板对梁柱刚度的影响,只考虑节点刚性区域对梁柱单元长度的影响,对梁和柱的计算长度进行了一定的调整。本文采用的纤维模型需要在钢管混凝土柱截面和钢梁截面上进行纤维划分,钢梁、圆钢管混凝土柱截面纤维划分如图 2(a)、图 2(b)所示。计算时模型阻尼比 ξ 取为 0.05。

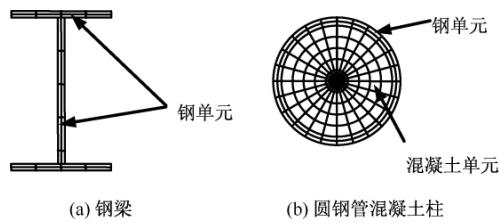


图 2 钢梁及钢管混凝土柱截面纤维划分
Fig.2 Fiber sections of steel beam and concrete-filled steel tubular column

3.1 基本假定

本文计算中采用了以下假定:

- (1) 钢管与混凝土粘结良好,无相对滑移,协调变形。
- (2) 构件变形满足平截面假定。
- (3) 不考虑剪切变形。

3.2 材料本构模型

混凝土材料模型采用 OpenSees 软件中提供的混凝土材料模型,其单轴应力-应变关系表达式采用 Kent-Scott-Park 混凝土模型,采用考虑线性软化的 Concrete02 模型模拟钢管混凝土柱核心混凝土。需要输入的参数为:受压时的混凝土峰值强度 σ_0 及应变 ε_0 ,破坏强度 σ_{cu} 及应变 ε_{cu} ,混凝土抗拉强度 σ_t 及关系曲线中线性下降段的斜率 E_{ls} ,见图 3 所示。参数确定方法与王文达等^[20]相同。

钢材采用 OpenSees 平台中的 Steel02 模型进行模拟,如图 4 所示,为双线性随动强化模型,强化段的模量取为 $0.01E_s$, E_s 为钢材的弹性模量,加卸载刚度采用初始弹性模量 E_s ,通过材料参数设置改变双线性模型中弹塑性段分支点附近的弧度变化,从而考虑一定范围内材料的包辛格效应。用 Steel02

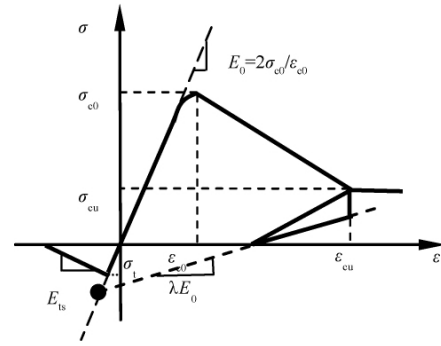


图 3 混凝土模型
Fig.3 Stress-strain relationship of concrete

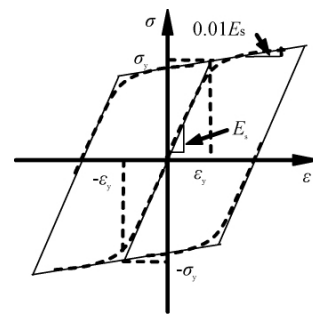


图 4 钢材模型
Fig.4 Stress-strain relationship of steel

模型模拟框架中的钢管和钢梁,参数取值也和王文达等^[20]相同。

3.3 输入地震波

本文所选输入地震波为模型试验中输入的 El-centro 波(1940,N-S)和天津波(N-S),分别如图 5(a)、图 5(b)所示。输入地震波方向沿 AB 向输入。试验加载工况如表 1 所示。

表 1 各工况下输入的地面峰值加速度值(g)
Table 1 The input peak ground acceleration(PGA)(g)

工况	El-centro 波	天津波
1	0.267	
2		0.287
3	0.500	
4		0.501
5	0.712	
6		0.719
7	0.960	
8		0.960

模型中加载工况主要为试验中输入的 El-centro

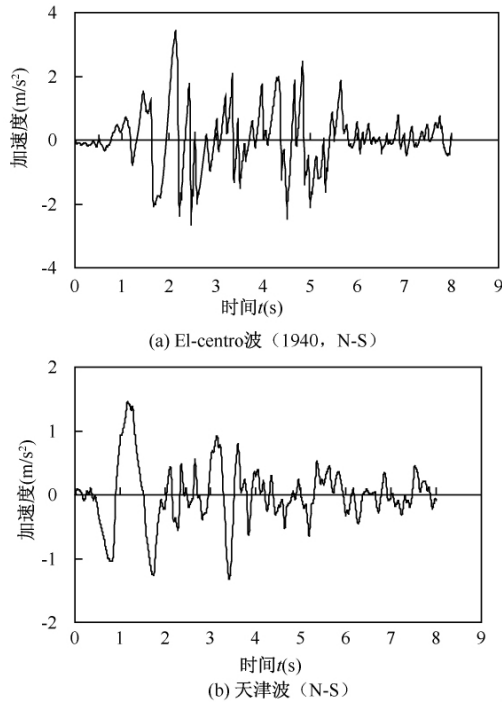


图 5 输入的两种地震波

Fig. 5 The two earthquake waves

波和天津波的加载工况,共 8 组工况,每组工况中输入不同峰值加速度的地震动。

4 数值模型计算结果

数值模型计算的结构前 5 阶自振频率与试验模型测出的结构前五阶自振频率对比如表 2 所示。

在输入地震动峰值加速度为 0.96g 时,天津波和 El-centro 波作用下的结构顶点位移时程曲线分别如图 6(a)、(b) 所示。由图可见,不同地震波输入下结构的反应不同,El-centro 波作用下结构顶层最大位移值达到 6.12mm,发生在 2s 左右,而天津波为 3.59mm,发生在 2.5s 左右。

表 2 数值计算与试验得到的结构自振频率对比

Table 2 Comparison of natural vibration frequency between numerical and test

	第一阶 (Hz)	第二阶 (Hz)	第三阶 (Hz)	第四阶 (Hz)	第五阶 (Hz)
数值计算	9.51	10.91	17.75	37.10	38.26
试验值	9.61	10.94	18.34	31.88	35.53

数值模拟所得各工况下楼层最大位移反应如图 7 所示,从图中可以看出,楼层的最大位移都发生在顶层,随着楼层的增加位移值增大,并且,随着峰值

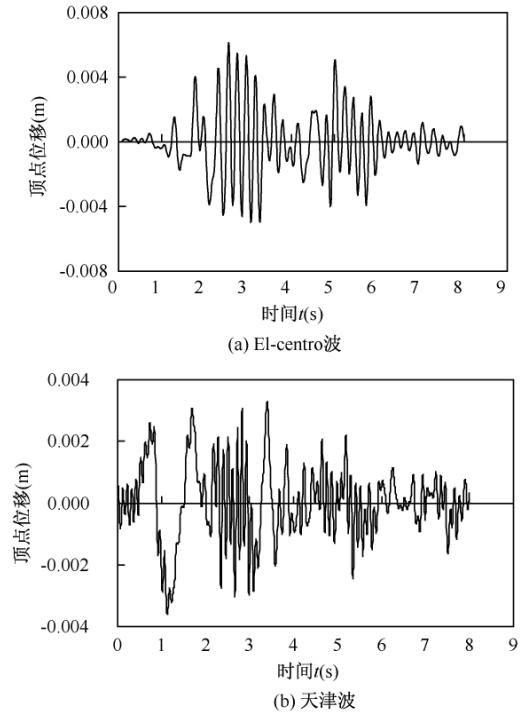


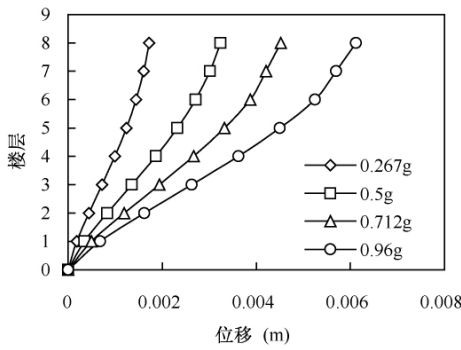
图 6 不同地震波作用下结构的顶点位移时程曲线 (PGA = 0.96g)

Fig. 6 Peak displacement time history under different waves (PGA = 0.96g)

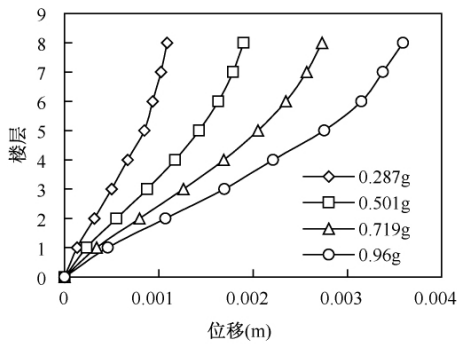
加速度的增加,各层位移响应增大。

图 8 所示为 PGA 等于 0.96g 时试验与数值计算所得各层最大位移值对比。可以看出,天津波作用下,数值计算与试验结果得出的各层最大位移吻合较好,而 El-centro 波作用下模拟较差。数值计算时,El-centro 波作用下最大位移为 6.12mm,天津波作用下为 3.59mm。而试验中,El-centro 波作用时结构顶层最大位移为 2.31mm,天津波作用时最大为 3.84mm。另外,从图中还可以看出,试验时结构位移反应值呈倒三角形,结构变形呈弯剪型,计算模拟时结构位移反应也是呈倒三角形,但主要表现为剪切型变形。

数值模拟的两种不同地震波作用下结构各层间位移如图 9 所示。从图中可以看出,数值模拟中结构最大层间位移发生在结构层第 3 层,这与试验中结构层最大位移发生在第 3 层的结论相符。数值计算得出的最大层间位移为 El-centro 波作用时的 1.01mm,这与试验得出的最大层间位移为天津波作用时的 1.1mm 相近。说明数值模拟分析得出的结构受力形式与试验结果基本吻合。



(a) El-centro波



(b) 天津波

图 7 不同地震波作用下结构楼层最大位移包络图

Fig.7 Maximum story drift envelop curves under different PGA and waves

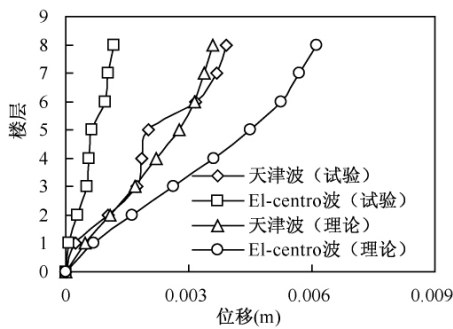


图 8 楼层最大位移的试验值与理论值对比 (PGA = 0.96g)

Fig.8 Comparison of maximum peak story displacement between numerical and test (PGA = 0.96g)

本文模拟的结果与试验结果在天津波作用下效果较好,El-centro 波作用下效果较差,可能原因有以下几点:

(1) 参数的取值不准确,由于只运用到文献中提供的一些参数,有些参数只能通过调试得出,这难免带来一定的误差。

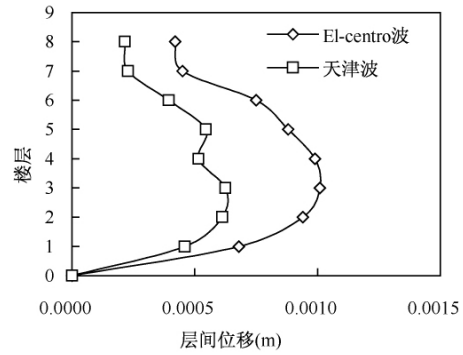


图 9 不同地震波下楼层层间位移对比 (PGA = 0.96g)

Fig.9 Comparison of maximum story drift under different waves (PGA = 0.96g)

(2) 为了简化计算模型,数值模型中采用了一些基本假定:不考虑楼板的刚度影响;不考虑纤维梁柱单元的剪切变形。这些都会对计算结果的精确度带来一定的影响。

(3) 试验本身难免存在误差。这也会导致试验结果与计算结果不相符。

5 结语

基于本文的研究,有以下结论:

(1) 基于 OpenSees 求解平台,通过选择合理的材料模型参数,用非线性纤维梁-柱单元可以实现对钢管混凝土框架结构的动力时程分析,且总体上理论模拟效果较好。纤维模型的计算方法能够考虑钢管混凝土中核心混凝土的约束效应,使得这种基于材料的建模方法适用性更广。

(2) 纤维模型法比有限元法在计算时间上有了很大的改进,提高了计算效率,在分析一些大型框架结构时将会有很大的优势。

参考文献 (References):

- [1] 韩林海,陶忠,王文达. 现代组合结构和混合结构—试验、理论和方法 [M]. 北京:科学出版社,2009
Han Lin-hai, Tao Zhong, Wang Wen-da. Advanced composite and mixed structures—testing, theory and design approach [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [2] 宗周红,林东欣,房贞政,邱法维. 两层钢管混凝土组合框架结构抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 27 ~ 35
Zong Zhou-hong, Lin Dong-xin, Fang Zhen-zheng, Qiu Fa-wei. Experimental research on seismic behavior of a two-story concrete filled steel tubular composite frame [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 27

- ~35 (in Chinese)
- [3] 周栋梁, 钱稼茹, 方小丹, 江毅. 环梁连接的 RC 梁-钢管混凝土柱框架试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004: 37(5): 7~15
Zhou Dong-liang, Qian Jia-ru, Fang Xiao-dan, Jiang Yi. Experimental study on a RC beam-STCC column frame with RC ring beam connectors [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 7~15 (in Chinese)
- [4] Tsai K C, Hsiao P C, Wang K J, et al. Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame-Part I: Specimen design, experiment and analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(7): 1081~1098
- [5] Tsai K C, Hsiao P C. Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame-Part II: Seismic performance of buckling-restrained braces and connections [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(7): 1099~1115
- [6] Herrera R, Ricles J M, Sause R. Seismic performance evaluation of a large-scale composite MRF using pseudo-dynamic testing [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2008, 134(2): 279~288
- [7] 黄襄云, 周福霖. 钢管混凝土结构地震模拟试验研究 [J]. 西北建筑工程学院学报(自然科学版), 2000, 17(3): 14~17
Huang Xiang-yun, Zhou Fu-lin. Experimental investigation on concrete filled steel tubular structure [J]. Journal of Northwest Institute of Architectural Engineering(Natural Sciences Edition), 2000, 17(3): 14~17 (in Chinese)
- [8] 童菊仙, 徐礼华, 凡红. 方钢管混凝土框架模型振动台试验研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(3): 65~69
Tong Ju-xian, Xu Li-hua, Fan Hong. Concrete filled square steel tubular frame model research on shaking table test [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(3): 65~69 (in Chinese)
- [9] 许成祥, 徐礼华, 杜国锋, 凡红. 钢管混凝土柱框架结构模型地震反应试验研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 68~72
Xu Cheng-xiang, Xu Li-hua, et al. Experimental study on earthquake response of a CFST column frame structure model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(3): 68~72 (in Chinese)
- [10] Han L H, Li W, Yang Y F. Seismic behavior of concrete-filled steel tubular frame to RC shear wall high-rise mixed structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(9): 1249~1260
- [11] 丁阳, 许成祥, 戴学新, 李忠献. 钢管混凝土框架结构抗震性能的非线性有限元分析 [J]. 建筑结构, 2004: 34(1): 7~10
Ding Yang, Xu Cheng-xiang, Dai Xue-xin, Li Zhong-xian. Nonlinear finite analysis of seismic behavior of concrete-filled steel tubular frame [J]. Building Structure, 2004, 34(1): 7~10 (in Chinese)
- [12] 王铁成, 卢明奇. 轴压比对方钢管混凝土框架延性影响的有限元分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(1): 70~75
Wang Tie-cheng, Lu Ming-qi. Finite element analysis of effect of axial load level on ductility of CFRT frames [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(1): 70~75 (in Chinese)
- [13] 聂建国, 秦凯, 肖岩. 方钢管混凝土框架结构的 Pushover 分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35(3): 68~70
Nie Jian-guo, Qin Kai, Xiao Yan. Pushover analysis on the seismic behavior of a concrete-filled rectangular tubular frame structure [J]. Industrial Construction, 2005, 35(3): 68~70 (in Chinese)
- [14] 刘晶波, 郭冰, 刘阳冰. 组合梁-方钢管混凝土柱框架结构抗震性能的 Pushover 分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 87~93
Liu Jing-bo, Guo Bing, Liu Yang-bing. Pushover analysis of seismic behavior of steel-concrete composite beam and concrete-filled rectangular tube frame structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 87~93 (in Chinese)
- [15] 王文达, 韩林海. 钢管混凝土框架结构力学性能非线性有限元分析 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 75~83
Wang Wen-da, Han Lin-hai. Nonlinear finite element analysis on mechanics performance of concrete filled steel tubular frame [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(6): 75~83 (in Chinese)
- [16] 王文达, 韩林海. 钢管混凝土框架实用荷载-位移恢复力模型研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(11): 62~69
Wang Wen-da, Han Lin-hai. Research on practical resilience model of load versus displacement for concrete filled steel tubular frame [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 62~69 (in Chinese)
- [17] 王文达, 韩林海. 钢管混凝土框架力学性能的简化二阶弹塑性分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9): 23~26
Wang Wen-da, Han Lin-hai. Simplified second-order elastic-plastic analyses on mechanics behavior of concrete filled steel tubular frame [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2009, 49

- (9): 23 ~ 26 (in Chinese)
- [18] 王文达,夏秀丽,史艳丽. 钢管混凝土框架基于性能的抗震设计探讨[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(2): 96 ~ 102
Wang Wen-da, Xia Xiu-li, Shi Yan-li. Discussion of performance-based seismic design for concrete-filled steel tubular frame [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(2): 96 ~ 102 (in Chinese)
- [19] 韩小雷,陈学伟,郑宜,彭樵斌. 足尺钢框架振动台试验及动力弹塑性数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 134 ~ 141
Han Xiao-lei, Chen Xue-wei, Jack Cheang, Peng Qiao-bin. Dynamic experiment and numerical simulation of a full scale steel frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 134 ~ 141 (in Chinese)
- [20] 王文达,韩林海. 钢管混凝土柱-钢梁平面框架的滞回关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(12): 1934 ~ 1938
Wang Wen-da, Han Lin-hai. Hysteresis relationship in concrete filled steel tubular columns and steel beam planar frames [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2009, 49(12): 1934 ~ 1938 (in Chinese)

[作者简介] 王军(1985~),男,四川人,硕士生,研究方向为组合结构

(上接第 21 页)

- Beijing: National Defence Industry Press, 1995, 64 ~ 73 (in Chinese)
- [6] 李鸿晶,冯启民,王中生. 平面框架结构抗震易损性的简化分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 18 ~ 25
Li Hong-jing, Feng Qi-min, Wang Zhong-sheng. A Simplified Approach To Vulnerability Analysis for Earthquake-Resistant Plane Frame Structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(4): 18 ~ 25
- [7] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000
Zhao Guo-fan, Jin Wei-liang, Gong Jin-xin. Structure Reliability Theory [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese)
- [8] 白国梁,朱丽华. 基于现行抗震规范的 Kanai-Tajimi 模型参数研究[J]. 世界地震工程, 2004, (3): 114 ~ 118
Bai Guo-liang, Zhu Li-hua. Study on the parameters of Kanai-Tajimi model based on the code (GB50011-2001) [J]. World Earthquake Engineering, 2004, (3): 114 ~ 118 (in Chinese)

[作者简介] 邹玲(1986~),女,安徽六安人,硕士研究生,研究方向:巨-子型有控结构动力可靠度和结构优化

(上接第 27 页)

- Bao Shi-hua. High-rise Building Structure [M]. Beijing: China Water Power Press, 2001 (in Chinese)
- [5] 北村春幸[著],裴星洙,廖红建,张立[译]. 基于性能设计的建筑振动解析[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004
Haruyuki Kitamura [author], Pei Xing-zhu, Liao Hong-jian, Zhang Li [translator]. Seismic Response Analysis Methods for Performance Based Design [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004 (in Chinese)
- [6] 瞿岳前,梁兴文,田野. 基于能量分析的地震损伤性能评估[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 109 ~ 114
Qu Yue-qian, Liang Xing-wen, Tian Yie. Evaluation of seismic damage performance based on energy analysis [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 109 ~ 114 (in Chinese)
- [7] 肖明葵,刘纲,白绍良. 基于能量反应的地震动输入选择方法讨论[J]. 世界地震工程, 2006, 22(3): 89 ~ 94
Xiao Ming-kui, Liu Gang, Bai Shao-liang. Some methods of selecting earthquake wave based on energy responses [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(3): 89 ~ 94 (in Chinese)

[作者简介] 王维(1985~),男,硕士研究生,研究方向为工程抗震