文章编号: 1007－6069(2011)01－0054－06

方钢管高强混凝土柱恢复力模型研究

马恺泽[1],梁兴文[1],李　斌[2]
(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055; 2. 内蒙古科技大学 建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘　要: 根据23根方钢管高强混凝土柱在反复水平荷载作用下的试验结果,通过理论分析和试验结果的回归分析,提出了方钢管高强混凝土柱的恢复力模型; 确定了轴压比、约束效应系数、长细比等主要参数与恢复力模型之间的关系; 给出了各特征点参数的计算方法。研究结果表明: 最大荷载与屈服荷载的比值、退化刚度与弹性刚度的比值都随着轴压比和长细比的增加而减小,随着约束效应系数的增加而增大; 按建议的恢复力模型计算的骨架曲线与试验曲线符合较好。文中建议的恢复力模型既反映了主要影响因素,又便于对结构进行非线性动力分析。

关键词: 方钢管混凝土柱; 恢复力模型; 轴压比; 约束效应系数; 长细比
中图分类号: TU318; P315.97　　**文献标志码**: A

Research on the restoring force model of high strength concrete-filled rectangular steel tubular columns

MA Kaize[1], LIANG Xingwen[1], LI Bin[2]
(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi 710055, China;
2. Architectural Engineering Institute, Inner Mongolia Scientific And Technical University, Baotou 014010, China)

Abstract: Based on experimental results of 23 high strength concrete-filled rectangular steel tubular (HCRST) columns subjected to cyclic lateral load, the restoring force model of HCRST columns is researched. Through theoretical and regression analysis and experimental results, the relations between the restoring model of HCRST columns and axial load ratio, confinement effect coefficient as well as slenderness ratio are discussed. The calculating methods and steps are established. The results show that the ratios of degraded stiffness to elastic stiffness and maximum loads to yielding loads are proportional with confinable effect coefficient, and are inversely proportional with axial load ratio and slenderness ratio. Many various influential factors are considered in the restoring force model of HCRST columns. The model is close to the experimental results, which can be conveniently applied to nonlinear dynamic analysis of tall building composite structures.

Key words: concrete-filled rectangular steel tubular columns; restoring force model; axial load ratios; confinement effect coefficient; slenderness ratio

引言

在地震工程中,选取构件的恢复力模型是对结构进行弹塑性分析的重要基础,合理地确定恢复力模型及

收稿日期: 2009－09－08;　**修订日期**: 2009－11－09
基金项目: 高等学校博士学科点专项基金项目(20070703002); 内蒙古自然科学基金项目(2007110201); 内蒙古教育厅项目(NJ06141)
作者简介: 马恺泽(1981－),男,博士研究生,主要从事组合结构的研究. E-mail: topmkz@126.com
通讯作者: 梁兴文(1952－),男,教授,博士生导师,主要从事复杂结构分析. E-mail: liangxingwen@yahoo.com.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

特征点参数对结构分析结果有着重要的影响。国内外学者对钢管混凝土柱的滞回性能进行了大量的试验研究[1]，但对其恢复力模型的研究相对较少。屠永清[2]提出了圆钢管混凝土压弯构件的恢复力模型; 韩林海[3]提出了方钢管混凝土压弯构件的恢复力模型; 张素梅[4]给出了单向压弯构件的恢复力模型; 梁书亭[5]进行了钢管混凝土梁柱构件恢复力模型的研究，并给出了钢管混凝土框架的骨架曲线。从以往的研究来看，现有的钢管混凝土柱的恢复力模型存在以下问题: (1) 不适合于高强混凝土构件或结构，高强混凝土构件或结构的变形性能有其特殊性; (2) 建立恢复力模型时缺乏足够的试验数据，不能反映诸方面的因素影响。

针对上述问题，在作者进行的 8 个方钢管高强混凝土混凝土柱的试验基础上，收集了国内外其他学者进行的 23 根方钢管高强混凝土柱的试验资料，对影响其恢复力模型的主要因素进行分析; 依据主要的影响因素，通过对试验结果的回归分析，提出了方钢管高强混凝土柱的恢复力模型。

1　试验概况

为研究方钢管高强混凝土柱的恢复力模型，完成了 8 根方钢管高强混凝土柱的往复水平加载试验[6]。通过改变试件的轴压比、含钢率和长细比，研究其在往复水平荷载作用下的滞回性能，比较各参数对试验结果的影响。试件设计尺寸如图 1 所示。材料强度及试件参数如表 1 所示，b 为钢管的边长; t 为钢管壁厚; L 为试件计算高度; n_0 为实际轴压比; f_y 为钢材屈服强度平均值; f_{cu}为混凝土立方体抗压强度平均值。

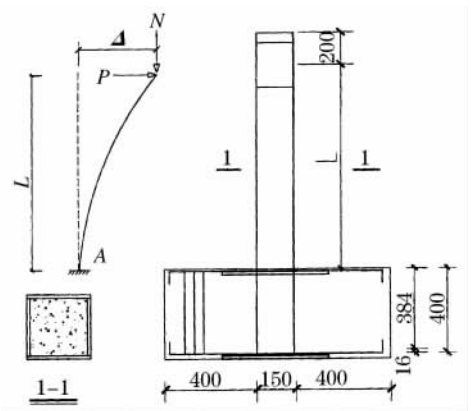

图 1　试件设计图

Fig. 1　The design chart of specimens

表 1　材料强度及试件参数

Table 1　Material properties and parameters of the specimens

试件编号	b/mm	t/mm	L/mm	n_0	f_y/MPa	f_{cu}/MPa
FGZ－1	150	5.5	900	0.496	291.8	65.1
FGZ－2	150	5.5	900	0.506	291.8	65.1
FGZ－3	150	3.1	900	0.493	252.6	65.1
FGZ－4	150	3.1	900	0.497	252.6	65.1
FGZ－5	150	5.5	900	0.698	291.8	65.1
FGZ－6	150	5.5	900	0.702	291.8	65.1
FGZ－7	150	5.5	1 250	0.493	291.8	65.1
FGZ－8	150	5.5	1 250	0.495	291.8	65.1

试件的最终破坏如图 2 所示，从 8 个试件的试验现象可以看出，试件的破坏形态大致相同，都为柱脚鼓曲的压弯破坏，属于弯曲型破坏，延性较好。由于试件 FGZ－3 和 FGZ－4 的含钢率较低，钢管对核心混凝土的约束作用变小，极限荷载过后，试件的承载力下降较快; 试件 FGZ－4 在加载后期出现焊缝撕裂，观察发现方钢管内的核心混凝土已经被压碎。随着轴压比的增大，试件 FGZ－5 和 FGZ－6 与 FGZ－1 和 FGZ－2 相比柱底部的钢管鼓曲的程度增加，鼓曲范围增大，破坏时鼓曲严重。由于长细比增加，试件 FGZ－7 和 FGZ－8 和与 FGZ－1 和 FGZ－2 相比，故其整体挠曲明显。柱底部钢管鼓曲的位置大约距柱底 $b/4 \sim b/3$。



图 2　试件最终破坏形态

Fig. 2　Failure modes of the specimens

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

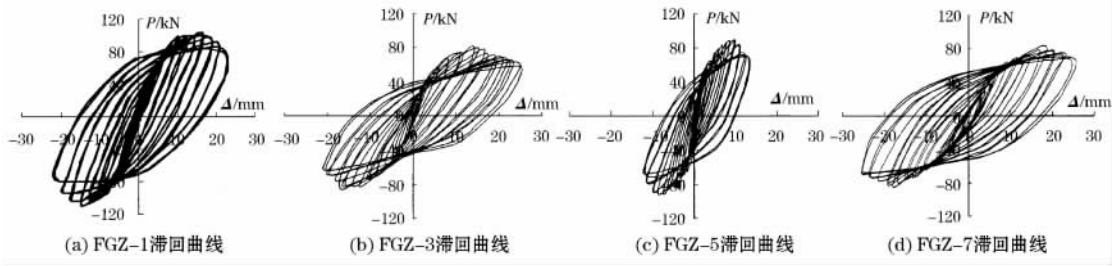

图3 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 3 $P-\Delta$ hysteretic curves of the specimens

由图3滞回曲线可知,方钢管高强混凝土柱滞回曲线饱满,没有明显的捏缩现象;随着轴压比的增加,滞回曲线的饱满程度降低,滞回环所包围的面积明显减小;达到最大荷载后,承载力衰减,极限变形和荷载循环次数都小于轴压比小的试件。随着含钢率的增加,滞回环所包围的面积增加。极限变形和荷载循环次数增加,滞回曲线饱满程度增加。从滞回曲线上看,方钢管高强混凝土柱刚度退化要明显好于高强混凝土柱[6],循环次数要比高强混凝土柱多。且没有高强混凝土柱滞回曲线那样明显的捏缩现象。

2 恢复力模型研究

2.1 骨架曲线

根据试验结果可知,方钢管高强混凝土柱的水平荷载-位移($P-\Delta$)骨架曲线可简化为图4所示的3折线,其上的3个特征点分别对应于屈服点 Y、最大荷载点 M 和破坏点 U。

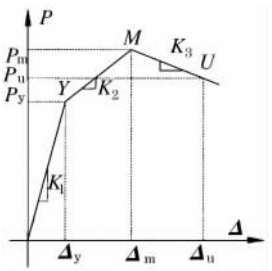

图4 骨架曲线

Fig. 4 The envelope curves

确定骨架曲线模型需要9个关键参数:弹性阶段刚度 $\boldsymbol{K}_1$,屈服荷载 $\boldsymbol{P}_y$,屈服位移 $\boldsymbol{\Delta}_y$、极限荷载 $\boldsymbol{P}_{max}$、极限位移 $\boldsymbol{\Delta}_m$、屈服后刚度 $\boldsymbol{K}_2$、设计极限荷载 P_u、设计极限位移 $\boldsymbol{\Delta}_u$ 和下降段刚度 $\boldsymbol{K}_3$。影响骨架曲线的参数有:钢材屈服强度、混凝土强度、约束效应系数、轴压比、长细比等。如果将这些因素全部考虑,虽然能够反映实际情况,但计算复杂。如果只考虑个别影响因素,将很难反映实际情况,给计算结果带来较大误差。研究结果表明[6],影响方钢管高强混凝土柱强度和刚度的因素主要有轴压比、约束效应系数和长细比。因此,文中主要依据这3个因素建立恢复力模型。

(1) 屈服前刚度

屈服以前,构件基本出于弹性阶段,刚度变化较小,通过结构力学可确定方钢管高强混凝土柱弹性阶段刚度 $\boldsymbol{K}_1$,即

$$\boldsymbol{K}_1 = \frac{3(\boldsymbol{EI})_e}{L^3} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{EI}$ 为柱截面抗弯刚度;$\boldsymbol{L}$ 为柱计算高度,可采用EC4[10]的形式,即 $\boldsymbol{EI}=\alpha \boldsymbol{E}_s \boldsymbol{I}_s+\beta \boldsymbol{E}_c \boldsymbol{I}_c$,通过数据回归分析,$\alpha=1$,$\beta=0.62$,其中 $\boldsymbol{E}_s$ 和 $\boldsymbol{E}_c$ 分别为钢材和核心混凝土的弹性模量;$\boldsymbol{I}_s$ 和 $\boldsymbol{I}_c$ 分别为钢管截面和核心混凝土截面的惯性矩;$\boldsymbol{L}$ 为柱计算长度。

(2) 屈服荷载

通过分析试验结果,最大荷载与屈服荷载的比值随着轴压比和长细比的增加而减小,随着约束效应系数的增加而增大。其关系表达式为:

$$\frac{\boldsymbol{P}_m}{\boldsymbol{P}_y} = 1.3 - 0.5n + 0.35\zeta - 0.01\lambda \tag{2}$$

(3) 屈服位移

屈服位移由屈服荷载和屈服前刚度确定,计算公式为

$$\boldsymbol{\Delta}_y = \boldsymbol{P}_y / \boldsymbol{K}_1 \tag{3}$$

(4) 极限承载力

根据对试验结果的统计回归,可得极限荷载 $\boldsymbol{P}_m$ 与极限受弯承载力 $\boldsymbol{M}$ 的表达式,即

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}} = (1.05 - 0.2n + 0.3\zeta)\frac{\boldsymbol{M}_{\mathrm{u}}}{\boldsymbol{L}} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{M}$ 为极限受弯承载力,可通过 EC4 的方法得到。EC4 规程提供的相关方程形式为曲线形式,其表达式为:

$$\boldsymbol{N} = \boldsymbol{N}_{\mathrm{cr}}[k_1 - (k_1 - k_2 - 4k_3)\boldsymbol{M}/\boldsymbol{M}_{\mathrm{u}} - 4k_3(\boldsymbol{M}/\boldsymbol{M}_{u})^2] \tag{5}$$

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{cr}} = \varphi(A_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{y}} + A_{\mathrm{c}}f_{\mathrm{c}}) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{u}} = f_{\mathrm{y}}[A_{\mathrm{s}}(B - 2t - \boldsymbol{d}_{\mathrm{c}})/2 + Bt(t + \boldsymbol{d}_{\mathrm{c}})] \tag{7}$$

式中,φ 为轴压稳定系数; k_1、k_2、k_3 为计算系数; $\boldsymbol{N}_{\mathrm{cr}}$为轴压承载力,$\boldsymbol{M}_{\mathrm{u}}$ 为纯弯承载力,分别按式(4) 和式(6) 确定; $\boldsymbol{d}_{\mathrm{c}}$ 为截面中和轴距受压区边缘的距离,$\boldsymbol{d}_{\mathrm{c}} = \dfrac{A_{\mathrm{s}} - 2Bt}{(B-2t)\rho + 4t}$,其中 $\rho = 0.6f_{\mathrm{c}}/f_{\mathrm{y}}$

(5) 极限位移

$$\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{m}} = (2.73 - 0.23n + 1.01\zeta - 0.24\lambda)\frac{\boldsymbol{P}_{m}}{\boldsymbol{K}_{\mathrm{e}}} \tag{8}$$

(6) 屈服后刚度 $\boldsymbol{K}_2$

$$\boldsymbol{K}_2 = \frac{\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{y}}}{\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{y}}} \tag{9}$$

(7) 设计极限荷载

设计界限荷载取极限荷载的 0.85 倍,即

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{u}} = 0.85\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}} \tag{10}$$

(8) 设计极限位移

设计界限荷载取极限荷载的 0.85 倍,即

$$\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{u}} = \boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{m}} - \frac{0.15\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}}{\boldsymbol{K}_3} \tag{11}$$

(9) 下降段刚度

方钢管高强混凝土柱的下降段刚度可表示为

$$\boldsymbol{K}_3 = \frac{\boldsymbol{P}_{\mathrm{u}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}}{\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{u}} - \boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{m}}} = \frac{-0.15\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}}}{\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{u}} - \boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{m}}} \tag{12}$$

式中,K_3 为退化刚度。通过分析试验结果,并进行多元线性回归后得

$$\boldsymbol{K}_3/\boldsymbol{K}_1 = 0.097 - 0.19n + 0.023\zeta - 0.025\lambda \tag{13}$$

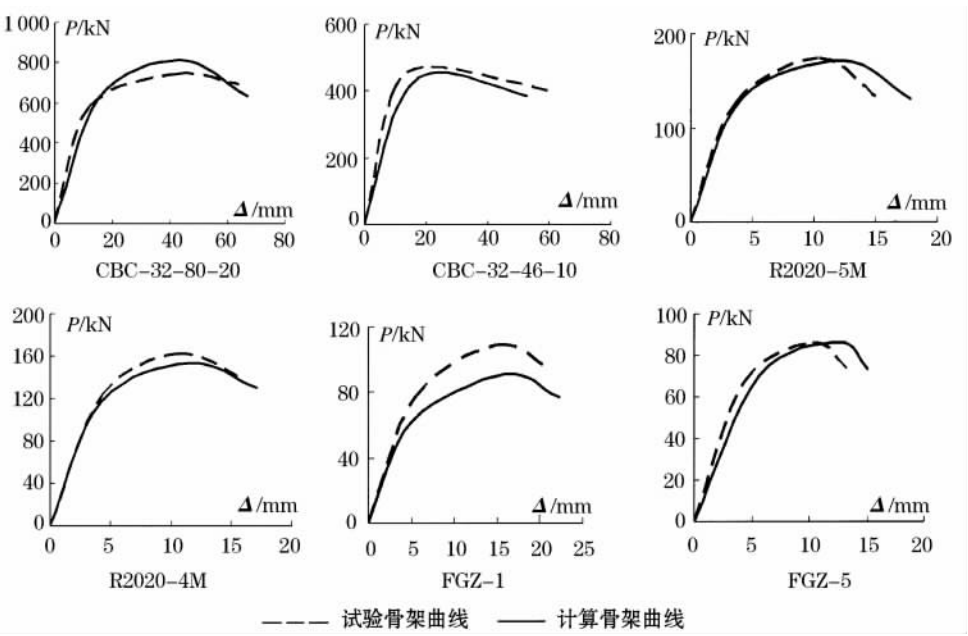

图 5　计算骨架曲线与试验曲线的比较

Fig. 5　The comparisons between computational envelope curves and testing envelope curves

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 计算骨架曲线与试验骨架曲线的比较

通过上述公式计算,所有关键参数全部确定,图5为计算骨架曲线与试验骨架曲线的比较图。从图中可以看出,采用文中方法确定的骨架曲线与试验骨架曲线较为接近。

2.3 恢复力模型

图6给出了方钢管高强混凝土柱的恢复力模型,其中 *OYMU* 为图4中的简化骨架曲线,*OYMU* 与 *O′Y′M′U′* 关于原点O对称,其滞回规律如下:

(1) 当恢复力未达到屈服荷载 $\boldsymbol{P}_y$ 之前,构件处于弹性阶段,加、卸载按线弹性规律。

(2) 当恢复力超过屈服荷载 $\boldsymbol{P}_y$,但未达到最大荷载 $\boldsymbol{P}_m$ 时,构件进入弹塑性阶段,卸载刚度取屈服前刚度 $\boldsymbol{K}_1$;当卸载幅度为 $2\boldsymbol{P}_y$ 时,进入反向弹塑性阶段,并按弹塑性刚度反向加载。如图6所示,从弹塑性阶段的点1开始卸载,当卸载幅值达到 $2\boldsymbol{P}_y$ 时,即图中的点2,进入反向弹塑性阶段,开始按照屈服后刚度反向加载,反向加载至点3后卸载,规则与正向卸载相同。

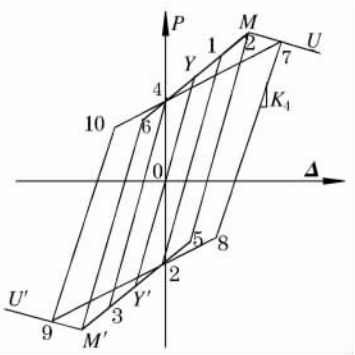

图6 恢复力模型

Fig. 6 The restoring force model

(3) 当恢复力在正向或反向超过了最大荷载,进入了下降段。卸载刚度按公式(14)计算,在不同位移幅值下卸载刚度的退化率与轴压比和约束效应系数有很大关系。如图所示,当加载到7点后,刚度发生变化,7点的纵坐标 P_s 经回归分析可用式(15)计算,由7点继续加载至反向骨架曲线上的9点,9点的坐标与正向的点7关于原点对称。

$$\boldsymbol{K}_4 = \boldsymbol{K}_1\left[\frac{\Delta_y}{\Delta}\right]^{0.05-0.33n+0.86\zeta-0.003\lambda} \tag{14}$$

$$\frac{\boldsymbol{P}_s}{\boldsymbol{P}_{un}} = -0.16-0.68n-0.26\zeta+0.007\lambda \tag{15}$$

式中:$\boldsymbol{K}_4$ 为卸载刚度;$\boldsymbol{\Delta}$ 为卸载点对应的位移值;$\boldsymbol{P}_s$ 软化点恢复力;$\boldsymbol{P}_{un}$ 为卸载点恢复力。

2.4 计算滞回曲线与试验滞回曲线的比较

图7为根据上述方法和步骤计算的部分方钢管高强凝土柱滞回曲线与试验滞回曲线的比较图。

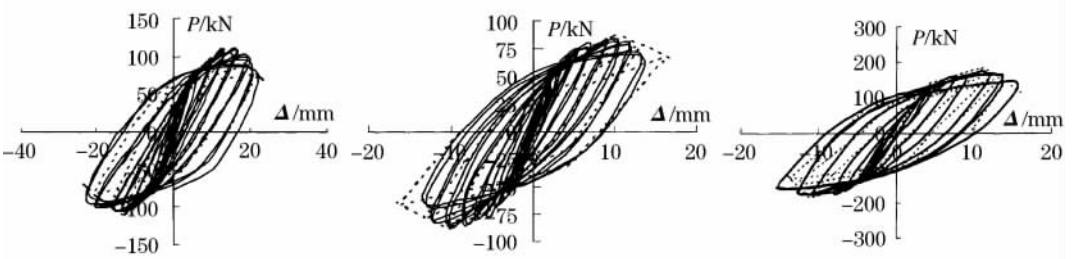

图7 计算滞回曲线与试验滞回曲线的比较

Fig. 7 The comparisons of computational hysteretic curves and testing hysteretic curves

由图可知,方钢管高强混凝土柱计算曲线与试验曲线较为接近,说明了所提恢复力模型的可靠性,但也存在一定的差异。主要有以下几个方面的原因:

(1) 建议的恢复力模型是折线型,而实际恢复力模型都是曲线型,刚度是连续变化的。

(2) 影响恢复力模型的因素很多,本次计算只考虑了3个主要因素。

(3) 由于试件加载的不对称和材料的离散性,因而计算结果与试验结果也会存在一定的差异。

3 结论

(1) 由恢复力模型分析可知,最大荷载与屈服荷载的比值,随着约束效应系数的增加而增大,随着轴压比和长细比的增加而减小。退化刚度与弹性刚度比值的绝对值随着约束效应系数增大而逐渐增大,而随着

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轴压比和长细比增加逐渐减小。卸载刚度随着位移幅值的增加而退化,且在不同位移幅值下的卸载刚度与轴压比、长细比和约束效应系数有关。

(2) 通过对试验结果进行多元线性拟合,确定了恢复力模型参数与轴压比、约束效应系数和长细比的关系,给出了确定恢复模型特征点参数的方法和步骤以及便于工程应用的实用公式。

(3) 按文中提出的恢复力模型计算的滞回曲线与试验滞回曲线比较接近,可供对方钢管高强混凝土结构进行弹塑性动力分析时参考。

参考文献

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构理论与实践[M](第二版). 北京: 科学出版社,2007.
HAN Linhai. Theory and practice of concrete-filled steel tubular structure[M]. Beijing: Science Press,2007.

[2] 屠永清. 钢管混凝土压弯构件恢复力特征的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学,1994.
TU Yongqing. Research on the characteristics of restoring force for concrete-filled steel tube compression-bending members[D]. Harbin: Harbin Building University,1994.

[3] 韩林海, 陶　忠. 方钢管混凝土柱的延性系数[J]. 地震工程与工程振动,2000, 20(4): 56 - 65.
HAN Linhai,TAO Zhong. Ductility coefficient of concrete filled steel tubular columns with square sections[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2000, 20(4):56 - 65.

[4] 张素梅, 刘界鹏, 王玉银, et al. 双向压弯方钢管高强混凝土构件滞回性能试验与分析[J] 建筑结构学报,2005, 26(3): 9 - 18.
ZHANG Sumei,LIU Jiepeng,WANG Yuyin,et al. Hysteretic behavior of biaxial loaded high strength concrete-filled square hollow section beam-column[J]. Journal of building structures,2005, 26(3):9 - 18.

[5] 孙修礼, 梁书亭,段友利. 钢管混凝土框架骨架曲线研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 99 - 103.
SUN Xiuli,LIANG Shuting,DUAN Youli. Research on skeleton curves of concrete-filled steel tubular frame structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 27(1):99 - 103.

[6] Varma A H,Richard J M. Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns [J]. Journal of Structural Engineering,2004, 13(2): 169 - 179.

[7] 游经团. 矩形钢管混凝土压弯构件滞回性能研究[D]. 福州: 福州大学,2002.
YOU Jingtuan. Study for dynamical behaviors of concrete filled rectangular steel tubes[D]. Fuzhou: Fuzhou University,2002.

[8] 李学平,吕西林,郭少春. 反复荷载作用下矩形钢管混凝土柱的抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2005, 25(5): 95 - 103.
LI xueping,LÜ Xilin,GUO Shaochun. Seismic behavior of CFRT columns under cyclic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007,25(5):95 - 103.

[9] 马恺泽. 方钢管高强混凝土柱抗震性能研究[D]. 内蒙古科技大学,2008.
MA Kaize. Study on seismic behaviors of high strength concrete-filled rectangular steel tube columns[D]. Inner Mongolia Scientific and Technical University,2008.

[10] Eurocode4 (EC4) ,Design of composite steel and concrete structure-part Ⅰ: General rules and for buildings[S].

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net