

方钢管混凝土柱塑性变形性能的试验研究

徐培蓁^{1,2}, 聂瑞锋², 叶列平¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 提出了允许部分柱屈服的混合型屈服机制, 允许部分方钢管混凝土柱屈服耗能, 但要求柱不丧失承载力以避免层倒塌, 为考察方钢管混凝土柱屈服后的力学性能, 对方钢管混凝土柱在低周反复荷载作用下的力学性能进行了试验研究, 分析了轴压比、含钢率、长细比等参数对方钢管混凝土柱滞回曲线、刚度曲线、延性系数、塑性变形性能的影响。试验结果表明: 方钢管混凝土柱屈服后承载力无明显下降, 具有良好的延性和耗能能力, 且随含钢率的增加, 钢管混凝土柱的耗能能力和塑性变形能力提高; 而随轴压比和长细比的增大, 钢管混凝土柱的耗能能力和塑性变形能力却相应降低。

关键词: 方钢管混凝土柱; 低周反复荷载; 耗能能力; 延性系数; 累积塑性变形

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)05-0609-07

在美国北岭和日本阪神地震后, 钢管混凝土结构的抗震性能得到了广泛的重视。日本对方钢管混凝土抗震性能方面的研究较早, 也较为全面^[1-4]。我国对钢管混凝土结构的研究近年来发展很快, 已出版了钢管混凝土结构设计与施工规程 CECS28^[5], 矩形钢管混凝土结构技术规程 CECS159^[6], 规程中对钢管混凝土的变形计算只给出了拉伸和压缩及弯曲的刚度计算公式, 对钢管混凝土柱的变形性能没有涉及。国内学者通过试验和数值分析对方钢管混凝土的塑性变形性能进行了探讨, 李立明等^[7]通过试验研究了含钢率、长细比和轴压对方钢管混凝土柱延性的影响。韩林海、陶忠^[8]在大规模参数分析结果的基础上, 考察了轴压比、长细比、含钢率、钢材屈服极限和混凝土抗压强度等参数, 对方钢管混凝土柱延性系数的影响规律。郭立春^[9]通过对十六根矩形钢管混凝土在一定轴压下, 进行低周反复荷载试验, 得出在中、高轴压比作用下, 截面宽厚比的变化, 对钢管混凝土柱的位移延性影响不大, 随宽厚比的增加, 试件的延性有所降低。张建辉等^[10]基于恢复力模型, 计算了方钢管混凝土柱的位移延性系数, 并分析了长细比、含钢率与轴压比对延性系数的影响。通过以上研究明确了钢管混凝土柱延性系数的数值及其影响因素, 但结构在遭遇地震时, 钢管混凝土柱的变形性能既与最大位移相关, 也与累积滞回耗能相关, 因此应充分考虑构件累积滞回耗能产生的损伤对钢管混凝土柱性能的影响。

针对钢管混凝土柱框架结构, 笔者等提出了允许部分柱屈服的整体型屈服机制^[11], 通过设立承载力较大的边柱来避免层屈服破坏机制, 而允许中柱柱端屈服, 从而使得中柱的强柱弱梁条件得以放松, 从而充分发挥了钢管混凝土柱良好的塑性变形能力及耗能能力。

为保证部分柱屈服机制的抗震安全性, 要求允许屈服柱在屈服后能够具有足够累积耗能能力, 承载力无显著降低。为此, 本文通过六根方钢管混凝土柱在一定轴力下的低周反复水平荷载下的试验, 对轴压比、含钢率和长细比对钢管混凝土柱塑性变形性能的影响进行了分析研究, 为基于部分柱屈服机制设计的框架结构中允许屈服的钢管混凝土柱提供设计依据。

1 试验概况

1.1 试件参数

根据《建筑抗震设计规范 GB50011-2001》^[12]和《钢管混凝土结构设计与施工规程 CECS28: 90》^[5]按

收稿日期: 2010-06-30 修改稿日期: 2011-07-15

基金项目: 中国博士后科学基金(20080440398); 国家自然科学基金资助项目(50808104)

作者简介: 徐培蓁(1974-), 女, 山东青岛人, 青岛理工大学副教授, 清华大学博士后, 主要从事钢管混凝土抗震设计和结构振动控制。

II类场地上的7度设防标准设计试件.柱高分别为2100 mm和1700 mm,见图1,钢管截面外包尺寸为300 mm×300 mm,厚度根据不同腹厚比取5 mm、7.5 mm和10 mm三种,钢材选用Q235,钢管采用两块宽为600 mm的钢板折90度对接焊接.底板采用700 mm×500 mm×20 mm,中心对称的焊接在钢管底部.各试件的具体参数见表1,其中CFT代表钢管混凝土构件;L、M分别代表长度为2100 mm和1700 mm的试件,体现了长细比的变化;5、7.5、10分别代表钢管壁厚为5 mm、7.5 mm和10 mm,代表了含钢率的不同;轴压比设定为0.2、0.6和0.4分别用A、B和C表示.钢材的屈服强度 f_y 是通过低碳钢标准试件进行受拉试验所得,混凝土的抗压强度标准值 f_{cu} 是通过标准试块试验所得.钢材和混凝土各力学性能列于表2.对试件施加恒定轴压力 N 和反复水平力 P .试验装置如图2所示.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

Specimen ID	$B \times t \times L / \text{mm}$	B / t	n	λ	α	N / kN
CFT-M5	300×5×1700	60	0.4	19.6	0.07	1187
CFT-M10	300×10×1700	30	0.4	19.6	0.15	1837
CFT-L7.5	300×7.5×2100	40	0.4	24.2	0.11	1515
CFT-M7.5A	300×7.5×1700	40	0.2	19.6	0.11	757
CFT-M7.5B	300×7.5×1700	40	0.6	19.6	0.11	2272
CFT-M7.5C	300×7.5×1700	40	0.4	19.6	0.11	1515

Notes: ① B —steel tube length of outsourcing, ② t —thickness of steel tube; ③ L —length of specimen loading, ④slenderness ratio $\lambda=2\sqrt{3}/B$; ⑤axial compression ratio $n=N/A_s f_y+A_c f_c$; ⑥sectional steel ratio $\alpha=[B^2-(B-2t)^2]/B^2$.

表 2 材料性能

Tab. 2 Material property

Material	Yield stress	Ultimate stress	Modulus of elasticity
Steel	f_y / MPa	f_u / MPa	E_s / MPa
	299.2	367.5	2.06×10^5
Concrete	f_{cu} / MPa	f_c / MPa	E_c / MPa
	35	23.34	3.15×10^4

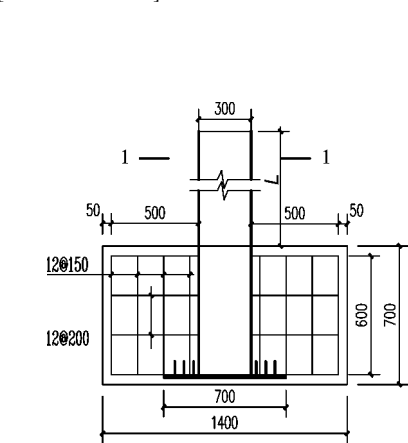


图 1 试件尺寸
Fig. 1 Specimen size

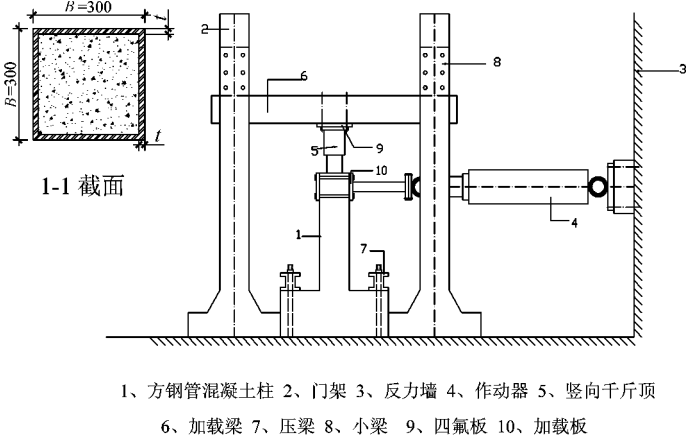


图 2 钢管混凝土柱加载装置
Fig. 2 CFST column load device

1.2 加载方案

试验过程中,首先在柱顶施加轴压力,并保持轴力恒定到试验结束,然后在柱顶施加水平荷载.水平加载采用力一位移控制混合加载制度:试件屈服前取设计屈服荷载的1/3、2/3、3/3进行加载,但试验过程中没观测到刚度下降,随后减小级差,以20 kN为级差继续进行力控制加载,直到加载曲线上出现刚度下降,以此时施加的荷载作为试件实际屈服荷载 P_y ,对应的屈服位移为 Δ_y ,见图3.试件屈服后,采用 $1.0\Delta_y$ 、 $2.0\Delta_y$ 、 $3.0\Delta_y$ 、 $5.0\Delta_y$ 、 $6\Delta_y$ 、 $7.0\Delta_y$ 、 $8.0\Delta_y$ 进行加载.试件屈服前,每级加载循环1次,屈服后每级加载循环2次.取试件达到的最大荷载值为

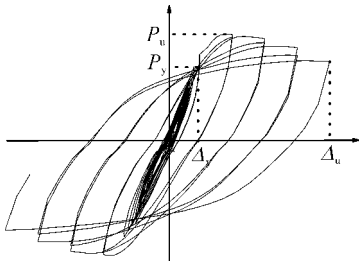


图 3 试验控制参数
Fig. 3 Specimen control parameters

P_u ,在位移控制加载过程中,当荷载下降到最大荷载值 P_u 的85%时停止加载,此时对应的位移取为极

限位移 Δ .

1.3 试验数据的量测

利用作动器上的力传感器和位移传感器获得钢管混凝土柱往复加载时的荷载-位移滞回曲线. 在各钢管混凝土柱底的三个截面(分别距柱底 20 mm、150 mm 和 300 mm 左右)的外包钢管处粘贴了 12 片电阻应变片和 4 片电阻应变花, 见图 4.

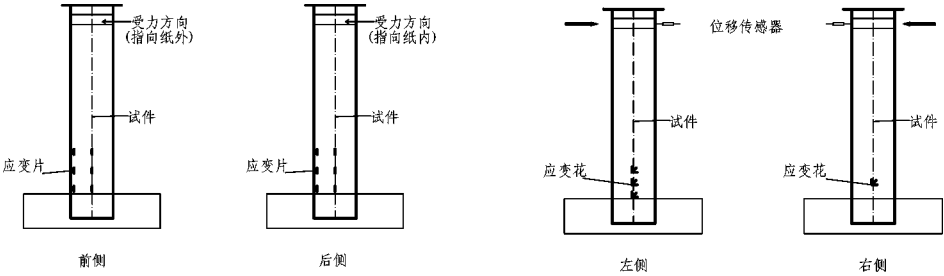


图 4 应变片 布置

Fig. 4 Strain distribution schematic diagram

2 试验结果及分析

2.1 试件的破坏特征

试件的水平变形角达到 1%~1.5%时, 在滞回曲线上开始出现塑性下降段, 随之试验转为位移控制, 至试件的水平承载力下降到峰值荷载的 85%以下, 停止试验. 试件破坏时, 伴随着钢管内发出混凝土压碎的声音, 先是出现图 2 所示的前侧或后侧的钢管底端一侧起鼓, 然后相对的另一侧也出现起鼓现象; 随加载控制位移的增加, 钢管底端左右两侧也相继出现起鼓现象, 钢管柱的底端变形呈灯笼状, 见照片 1. 也有试件在钢管底端前后侧出现起鼓现象后, 出现侧焊缝开裂, 且随加载控制位移的增加, 焊缝开裂严重, 并伴随着混凝土压碎流出, 见照片 2.



照片 1 CFT-M7.5B
Pho. 1 CFT-M7.5B



照片 2 CFT-M7.5A
Pho. 2 CFT-M7.5A

2.2 荷载-位移滞回曲线

滞回曲线是结构抗震性能的综合体现, 曲线的饱满程度与构件的耗能能力密切相关. 各试件的荷载-位移滞回曲线如图 5 所示, 除试件 CFT-M5(图 5(d))外, 其余各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线均呈现饱满的纺锤形. 试件 CFT-M5 的 $P-\Delta$ 位移曲线显得扁长、不饱满, 滞回曲线面积较小, 说明该试件滞回耗能能力较弱, 这是由于该试件含钢率低, 试验过程中没加侧向支撑, 该试件安装就位时施加轴压力的千斤顶作用点没有作用到试件中心造成的.

通过对比各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线, 可知随着轴压比(图 5(a)(b)(c))的增大, 试件是水平承载力虽

有提高,但塑性变形能力降低;随着钢管混凝土含钢率(图 5(c)(d)(e))的提高,试件的水平承载能力和塑性变形能力提高;随着长细比(图 5(c)(f))的增加,试件的水平承载能力及塑性变形能力均下降.各试件的屈服位移、屈服荷载、极限位移和极限荷载等指标,见表 3.

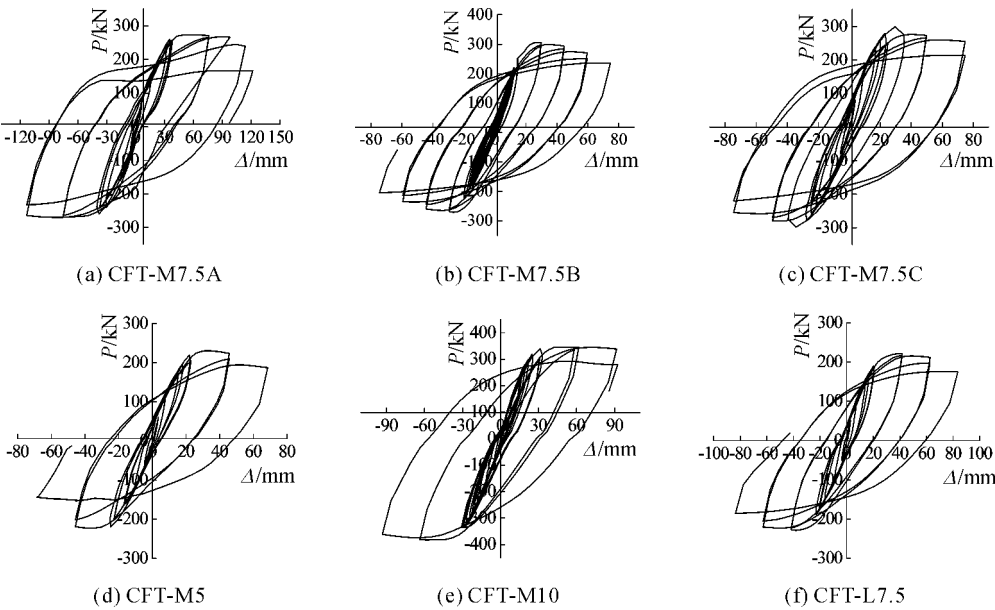


图 5 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 5 $P-\Delta$ hysteresis curve

表 3 极限荷载及屈服荷载试验值

Tab. 3 Ultimate load and yield load test value

Spesimen ID	P_u /kN	P_y /kN	Δ_u /mm	Δ_y /mm
CFT-M7.5A	273.37	195.3	121.33	20.8
CFT-M7.5B	305.97	218.7	74.6	17.5
CFT-M7.5C	299.16	231.2	74.59	17.4
CFT-M5	230.54	220.0	68.73	18.9
CFT-M10	382.43	253.0	92.28	19.2
CFT-L7.5	228.8	190.0	83.6	21

Notes: P_u test ultimate load; P_y test yeild load; Δ_u test ultimate displacement; Δ_y test yeild displacement.

2.3 刚度曲线

从试验数据可以看出试件的刚度处于不断变化的过程中,近似通过 $P-\Delta$ 滞回曲线每次循环的各峰值点与原点连线的斜率来表示,即试件的等效刚度 K ,如图 6 所示.

从各试件的刚度曲线可以看出,直到试件屈服以前,各钢管混凝土的刚度几乎没有出现退化的迹象,表现为一条直线.随着位移加载的开始,试件的刚度不断下降,且随着加载的继续,刚度下降的趋势趋于平缓,直至试件破坏为止.

3 钢管混凝土柱的塑性变形性能

3.1 位移延性系数

位移延性系数常用来衡量构件的延性,是重要的抗震设计指标.试验得到的位移延性系数 μ 见表 4.出试件 CFT-M5 外,各试件的位移延性系数都超过了 4. 位移延性系数随含钢率的增加而增大,随轴压比和长细比的增大而减小.

3.2 累积塑性变形倍率

累积滞回耗能产生的损伤对钢管混凝土柱变形性能的影响不容忽略.通过试验得到钢管混凝土柱

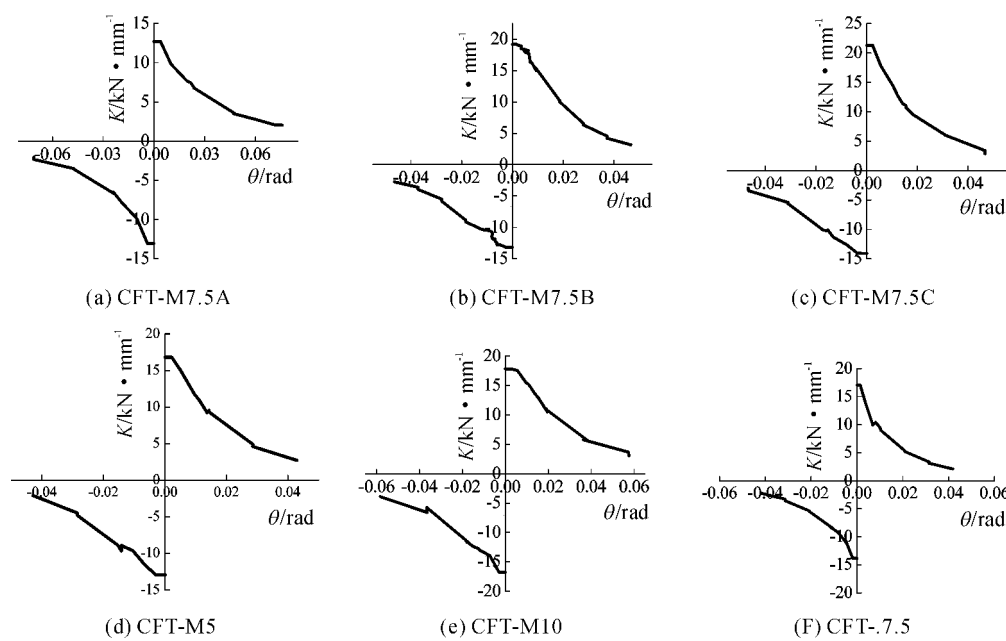


图 6 刚度退化曲线
Fig. 6 Stiffness degradation curve

的累积塑性变形率, 为部分柱铰屈服机制中允许屈服的柱提供设计依据. 累积耗能能力可通过式(1)的累积塑性变形倍率 η 反映^[13].

$$\eta=\frac{E_p}{M_y \cdot \theta_y}$$

(1)

式中: E_p 为构件端部累积塑性耗能; M_y 为构件的屈服弯矩; θ_y 为构件端部的弯矩达到 M_y 时的转角.
钢管混凝土柱端累积塑性耗能 E_p 通过试验得到滞回曲线求的, 计算到试件的水平承载力下降到峰值荷载的 85%, 通过公式(1)计算得到各试件的累积塑性变形倍率 η , 见表 4.

表 4 累积塑性变形倍率 η
Tab. 4 Cumulative plastic deformation rate η

num	$E_p/\text{kN} \cdot \text{m}$	P_y/kN	Δ_y/m	L/m	$M_y/\text{kN} \cdot \text{m}$	θ_y/rad	μ	η
CFT-M7.5A	194.8	195.3	0.021	1.7	332.0	0.012 4	5.8	47.5
CFT-M7.5B	155.6	218.7	0.018	1.7	371.8	0.010 3	4.3	40.7
CFT-M7.5C	162.0	231.2	0.017	1.7	393.0	0.010 0	4.3	41.2
CFT-M5	52.5	220.0	0.019	1.7	374.0	0.011 2	3.6	12.6
CFT-M10	168.7	253.0	0.019	1.7	430.1	0.011 2	4.8	35.1
CFT-L7.5	101.9	190.0	0.021	2.1	399.0	0.010 0	4.0	25.5

随含钢率的增加, 累积塑性变形倍率增大, 钢管混凝土柱的耗能能力提高; 随轴压比的增加累积塑性变形倍率减小, 钢管混凝土柱的耗能能力降低; 随长细比的增大, 随轴压比的增加累积塑性变形倍率减小, 钢管混凝土柱的耗能能力降低. 累积塑性变形倍率考虑了滞回耗能, 其值远大于单调耗能指标位移延性系数的两倍.

4 结 论

- 通过对 6 根方钢管混凝土柱在低周反复荷载作用下的试验研究, 可得以下结论:
- (1) 试验所得各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线均比较圆滑、饱满, 表明钢管混凝土柱具有良好的耗能能力.
 - (2) 钢管混凝土屈服后, 骨架曲线仍呈非线性上升态势, 在加载后期, 骨架曲线保持水平或略微下降, 说明钢管混凝土柱屈服后, 承载能力下降不明显.

(3)随含钢率的增加, 位移延性系数和累积塑性变形倍率增大, 钢管混凝土柱的耗能能力提高; 随轴压比的增大, 试件的水平承载能力会提高, 但塑性变形能力却相应降低, 刚度下降快, 位移延性系数和累积塑性变形倍率减小, 钢管混凝土柱的耗能能力降低; 随长细比增大, 试件的水平承载能力会降低, 刚度退化较快, 位移延性系数和累积塑性变形倍率减小, 钢管混凝土柱的耗能能力降低。

参考文献 References

- [1] 河野昭彦, 松井千秋, 田中幸仁. 繰返し水平力と変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の実験的研究 [A]. 日本建築学会構造系論文集 (547), 2001: 193-198.
Kawano Akihiko, Mstsui Chiaki, Tanaka Yukihito. An experimental study on concrete-filled circular tube beam-columns under cyclic horizontal and axial loading [A]. Journal of structural and construction engineering, Transactions of AIJ (547), 2001: 193-198.
- [2] 松井千秋, 津田恵吾. コンクリート充填角形鋼管柱の構造性能と軸力制限値 [A]. 日本建築学会構造系論文集 (504), 1998: 103-110.
Atsui Chiaki, Tsuda Keigo. Etc. Structural performance and axial load limit of concrete filled steel square tubular columns [A]. Journal of structural and construction engineering, Transactions of AIJ (504), 1998: 103-110.
- [3] 中原浩之, 蛭川利彦, 崎野健治. コンクリート充填鋼管柱の一定軸力下における繰返し曲げ性状 [A]. 日本建築学会構造系論文集 (568), 2003: 139-146.
Nakahara Hiroyuki, Ninakawa Toshihiko, Sakino Kenji. Cyclic bending behavior of concrete filled steel tubular columns under constant gravity load [A]. Journal of structural and construction engineering, Transactions of AIJ (568), 2003: 139-146.
- [4] 社団法人日本鋼構造協会. CFT 柱を用いた鉄骨骨組の動的耐震設計法ガイドライン [S]. 2006.
A seismic design guideline Japanese of steel framed structure using CFT column [S]. 2006.
- [5] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 CECS28 [S]. 1990.
China association for engineering construction standardization. Specification for design and construction of concrete-filled steel tubular structures CECS28 [S]. 1990.
- [6] 中国工程建设标准化协会标准. 矩形钢管混凝土结构技术规程 CECS159 [S]. 2004.
China association for engineering construction standardization. Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members CECS159 [S]. 2004.
- [7] 李黎明, 李 宁, 陈志华, 等. 方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(4): 817-822.
LI Li-ming, LI Ning, CHEN Zhi-hua, et al. Anti-seismic test on concrete-filled square steel tube column [J]. Journal of Jilin university: Engineering, 2008, 38(4): 817-822.
- [8] 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 Lin-hai, 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.
- [9] 郭力春. 矩形钢管混凝土柱抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
GUO Li-chun. Rectangular steel reinforced concrete column seismic performance study [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [10] 张建辉. 方钢管混凝土框架柱的抗震性能分析 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
ZHANG Jian-hui. Repaired concrete-filled rectangular steel tubular frame column anti-seismic performance analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [11] XU Pei-zhen, KAWANO Akihiko. Effects of column-to-beam strength ratio on earthquake responses of CFT moment resistant frames permitting inner columns to yield [A]. 8th international symposium on structural engineering for young experts Xi'an, 2004: 545-552.
- [12] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [13] AKIYAMA, Hiroshi. Earthquake-resistant limit-state design for buildings [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.

[5] 沈蒲生, 刘哲锋. 角支承钢筋混凝土双向密肋楼盖的破坏形态研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003(8): 68-72.
SHEN Pu-sheng, LIU Zhe-feng. Test and limit load of reinforced concrete waffle slab supported by corner columns of panels[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2003(8): 68-72.

[6] 梁 敏. 现浇钢筋混凝土双向板楼盖结构协同工作分析方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LIANG Min. Research on analytical methods for cast-in-situ reinforced concrete floor structure to consider cooperative work of beam and slab[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.

Experimental research on cast-in-situ reinforced concrete corner
lattice two-way slab

LIANG Xing-wen^{1,2}, LIANG Min¹, HU Xiong-wei¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in Xi'an(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract In order to research the interaction of beam and slab, a cast-in-situ reinforced concrete corner lattice two-way slab supported by columns has been tested step by step under uniform load, and beam's and slab's crack developing process. The failure pattern and mechanical behavior have been analysed. Based on the test results, failure model was set up, and its ultimate loading formula was derived. Comparison of the test results and the results calculated in elasticity and plasticity theory is made, which shows that the results calculated in elasticity and plasticity theory for slab destruction pattern are bigger than the test results.

Key words: cast-in-situ reinforced concrete two-way slab; test; ultimate load; calculation method

Biography: LIANG Xing-wen, Professor, Xi'an 710055, P. R. China Tel: 0086-13636717038, E-mail: liangxwgh@xauat.edu.cn

(上接第 614 页)

Experimental study on seismic behavior of concrete filled square
steel tubular columns to low-cycle reversed horizontal load

XU Pei-zhen^{1,2}, NIE Rui-feng², YE Lie-ping¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract A new global failure mechanism frame with some columns yield was proposed by the authors, some columns are allowed to yield and dissipate energies, which would not lose its bearing to avoid layer collapse. Six concrete filled square steel tubular columns are experimented under low cyclic load for studying its mechanical performance. Test results included the hysteretic curves, rigidity curves and plastic deformation. The influence of such parameters as slenderness ratio, axial compression ratio and sectional steel ratio are analyzed. The plastic deformation and capacity of energy dissipation will improve along with sectional steel ratio increase; and the plastic deformation and capacity of energy dissipation will reduce along with slenderness ratio and axial compression ratio increase.

Key words: concrete filled square steel tubular; low cyclic load; capacity of energy dissipation; displacement ductility; accumulated plastic deformation

Biography: XU Pei-zhen, Associate Professor, Postdoctor of Tsinghua University, Qingdao 266023, P. R. China, Tel: 0086-13705323501, E-mail: xpzzygl@163.com