

文章编号:1673-2049(2009)01-0001-06

内置 CFRP 圆管的方钢管混凝土 中长柱偏压试验

李帼昌, 韩 刘

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:通过对 10 根内置碳纤维复合材料(CFRP)圆管的方钢管高强混凝土柱和 4 根方钢管高强混凝土柱的承载力进行对比试验,分析了 CFRP 含量、偏心距和长细比等参数对试件性能的影响。结果表明:在长细比相同的条件下,随着偏心距的增大,相同 CFRP 含量的方钢管高强混凝土柱承载力降低;在长细比和偏心距相同的情况下,随着 CFRP 含量的增加,方钢管高强混凝土柱承载力有显著提高,对核心混凝土约束效应增加,增强了构件的延性;随着长细比的增大,相同 CFRP 含量和相同偏心距的方钢管高强混凝土柱承载力降低。试验结果为进一步分析和推导承载力公式打下了基础。

关键词:方钢管混凝土;偏压构件;CFRP 圆管;极限承载力;长细比;偏心距

中图分类号:TU392.3 **文献标志码:**A

Experiment on Eccentrically Compression of Middle Long Columns of Concrete-filled Square Steel Tube with Inner CFRP Circular Tube

LI Guo-chang, HAN Liu

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Upon the contrast test of bearing capacities of ten columns of high-strength concrete-filled square steel tubes with inner carbon fiber reinforced polymer (CFRP) circular tube and four columns of high-strength concrete-filled square steel tubes, the influences of different parameters on the performance of test specimens were studied, from the analysis of test curves. The conclusion can be drawn that under the precondition of same slenderness ratio, the eccentricity increases, and the bearing capacity of column of high-strength concrete-filled square steel tube with the same content of CFRP reduces. Under the precondition of the same eccentricity and the same slenderness ratio, the content of CFRP increases, and the bearing capacity of the column of high-strength concrete-filled square steel tube obviously increases. The restraint effect on the core concrete increases, the yield time of structural member is prolonged. Under the precondition of the same eccentricity and the same content of CFRP, the slenderness ratio increases, and the bearing capacity of the column of high-strength concrete-filled square steel tube obviously reduces. The test results make good preparations for further formula derivation and research.

Key words: concrete-filled square steel tube; eccentrically compressed member; CFRP circular tube; ultimate bearing capacity; slenderness ratio; eccentricity

收稿日期:2008-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50678106)

作者简介:李帼昌(1964-),女,辽宁昌图人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:cegcli@sju.edu.cn。

0 引言

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而成的一种新型组合结构。钢管混凝土按截面形式不同分为方钢管混凝土、圆钢管混凝土和多边形混凝土等^[1-4]。方钢管混凝土具有承载力高、塑性好、抗震性能强、防火性能优于钢结构等特点,尤其可以有效地提高构件的延性以及适应现代工程结构向大跨、高耸、重载发展和承受恶劣条件的需要。与圆形截面钢管混凝土受压构件相比,方形钢管混凝土受压构件截面的相对惯性矩较大,稳定性能好;与矩形钢管混凝土相比,方钢管混凝土两主轴方向的惯性矩相同,更适于双向受弯构件。而纤维复合材料(FRP)是由高性能纤维与基体按一定比例混合,并经过一定工艺复合形成的一种高性能新型材料。近些年来,随着生产工艺的提高,FRP开始在土木工程领域应用,并逐渐受到广泛的关注。本文中研究

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2	D3
t/mm	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
L/mm	800	800	800	800	800	800	800	800	1 200	1 200	1 200	1 600	1 600	1 600
λ	13.86	13.86	13.86	13.86	13.86	13.86	13.86	13.86	20.78	20.78	20.78	27.71	27.71	27.71
e/mm	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	30	45	60
CFRP 层数	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

在制作试件之前应按照要求的尺寸加工空心方钢管,采用单侧焊接,在工厂的车床上车出断面,有效地保证了端面的平整。对应每个试件加工 2 块尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的盖板,保证盖板和空钢管的几何中心对中,先将空钢管的一端与盖板焊接;采用标号为 C90 的商品混凝土浇筑,待浇筑混凝土后,将试件上端面的多余混凝土磨平,再将钢管的另一端与盖板焊接,并保证焊缝的质量。同时制作尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体试块,采用标准养护,试验方法参照《普通混凝土力学试验方法标准》(GB/T 50018—2002),其龄期为 28 d,试块强度为 92 MPa,混凝土应力-应变曲线如图 1 所示。

由标准拉伸试验得到钢材屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 和弹性模量 E_s 等指标,见表 2。

本试验采用的碳纤维织物是由日本 TORAY T700-12K 碳纤维编织的高性能单向布,德国 EPO 公司生产,其主要技术性能指标(生产厂家提供)见表 3。黏贴剂采用辽宁省建设科学研究院生产的 JGN-C 建筑结构黏合剂,底胶采用的是 JGN-P 建筑

的是一种新型组合结构——内置碳纤维复合材料(CFRP)圆管的方钢管高强混凝土。它能在原来的基础上缩小构件的横截面积,减少钢材和混凝土的用量,并在工程中提高空间的使用率。在工程实践中,柱除了受轴向压力之外,还往往受弯矩作用,因此研究钢管混凝土偏压构件的受力性能也很重要^[5-12]。本文中通过对 10 根内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土中长柱偏压构件的静力压缩试验,初步探讨了该类构件的受力性能。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验主要参数为长细比 λ 、偏心距 e 和 CFRP 含量。该试验所设计的方钢管混凝土柱的截面尺寸均为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,高度 L 分为 800、1 200、1 600 mm 三种,方钢管厚度 t 均为 5 mm。试件的相关参数见表 1。

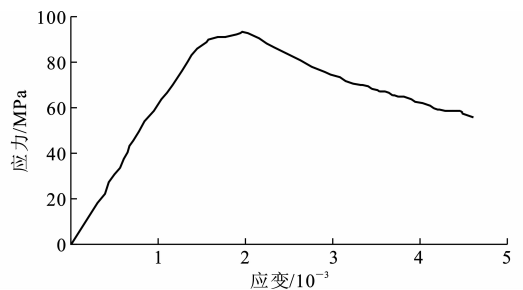


图 1 混凝土应力-应变曲线

Fig. 1 Stress and Strain Curve of Concrete

表 2 钢材的参数

Tab. 2 Parameters of Steel MPa

参数	f_y	f_u	E_s
平均值	320	423	2.1×10^5

结构黏合剂。黏贴工艺参考中国建设部建筑物鉴定与加固规范管理委员会于 2001 年 9 月制定的《粘贴碳纤维增强复合材料加固混凝土工程施工与验收暂行规定》执行,纵向、环向各缠绕 1 层碳纤维织物。

在浇筑混凝土过程中,首先将钢管直立,再将混凝土从钢管上端分层灌入,同时进行振捣。待养护

表 3 CFRP 性能指标

Tab. 3 Performance Indexes of CFRP

性能指标	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ MPa	伸长 率/%	单位质量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$)	厚度/ mm
TORAY T700-12K 碳纤维	1 988	2.3×10^3	2.1	300	0.167
1 层纵向和 1 层 环向 CFRP 圆管	1 726	3.6×10^5	3.9	600	0.335

28 d 后,用角磨机将混凝土面与钢管端面找齐,焊接另一块盖板,保证核心混凝土与钢管共同受力。

内置 CFRP 圆管的方钢管混凝土柱截面见图 2。在方钢管混凝土柱中布置纵向和横向电阻应变片 8 片,在方钢管混凝土柱 1/4 高处布置纵向和横向电阻应变片 4 片。

1.2 试验过程

试验在沈阳建筑大学结构工程实验室 5 000 kN 压力机上进行,试验装置见图 3,试件上端刀铰,下端球铰。试验采用分级加载制,在弹性范围内,每级加载为预计极限荷载的 1/10,于每级加载后记录仪表读数,持载 2 min 后再进行下一级加载。当荷载达到极限荷载的 60% 后,每级加载减为预计极限荷载的 1/20~1/15。临近极限荷载前,级差更小,最后徐徐连续加载直至试验结束。采用 U-CAM-70A 静态数据采集系统采集数据,同时记录和绘制荷载-柱中挠度($P-\delta$)曲线。

2 试验现象与结果

2.1 试验现象

对试验的全过程进行观测,结果表明,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压中长柱,相对于普通方钢管高强混凝土偏压中长柱的极限承载力

提高 1.92%~11.28%,但随着偏心距的增加,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压中长柱的极限承载力提高幅度减小。这是由于在偏压试验中,试件属于弹塑性失稳破坏,纵向 CFRP 增强了核心混凝土的纵向弯曲刚度,而环向 CFRP 又增强了核心混凝土的环向刚度,为核心混凝土提供了更多的紧箍力。在加载初期,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土的纵向压缩量和横向挠度都不甚明显,基本上与荷载呈线性关系;随着荷载的增大,试件的变形也随之增加;当荷载达到极限荷载的 80% 左右时,柱中 CFRP 开始断裂并且伴有爆裂声,试件变形显著增加直至达到极限荷载;此后,试件所承受的荷载开始下降而试件变形不断增加,直至试件破坏。在试验过程中,试件在其他条件相同情况下的极限承载力随着偏心距的增大而减小,随着长细比的增大而减小。

2.2 试验结果

图 4 为 CFRP 含量影响曲线。图 4 中曲线的特点是:在加载初始阶段,荷载较小时,挠度也较小,曲线呈线性发展,属于弹性阶段,如图 4(a)中的试件 B1 曲线的 oa 段所示;之后,进入弹塑性阶段,变形的增长比率大于荷载的增长比率,如图 4(a)中的试件 B1 曲线的 ab 段所示;达到极限荷载后,曲线出现下降段,柱体塑性发展趋势明显,挠度明显增加,但承载力下降较慢,属于延性破坏,如图 4(a)中的试件 B1 曲线的 bc 段所示。

当荷载达到极限荷载的 80% 时,内置的 CFRP 圆管破坏,由 CFRP 圆管提供的紧箍力消失,柱内混凝土紧箍力由方钢管提供,试件进入方钢管高强混凝土工作状态,随着荷载的增加,试件逐步屈服,最后破坏。

由图 4(a)可以看出,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土柱(试件 B1)和普通方钢管高强混凝土柱(试件 A1)从加载初期至极限承载力之前,两者的 $P-\delta$ 曲线基本重合,但试件 B1 的极限承载力高于试件 A1,并且在下降段,试件 B1 的曲线较试件 A1 的曲线更为平缓,说明在加载过程中 CFRP 圆管起到了很好的增强试件延性的作用,很好地约束了核心混凝土,提高了试件的承载力。图 4(b)~(d)的曲线特点与图 4(a)的曲线特点基本相同。通过比较图 4 中的 4 组曲线可以发现,随着偏心距的增大,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土柱和普通方钢管高强混凝土柱的极限承载力差距越来越小,图 4(d)的 2 条曲线基本重合,由此可以看出,在相同条

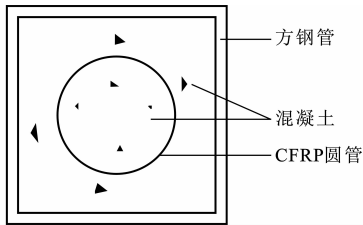


图 2 内置 CFRP 圆管的方钢管混凝土柱截面

Fig. 2 Section of Concrete-filled Square Steel Tube with Inner CFRP Circular Tube

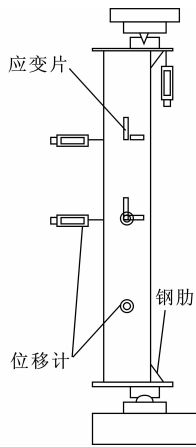


图 3 试验装置

Fig. 3 Setting of Test

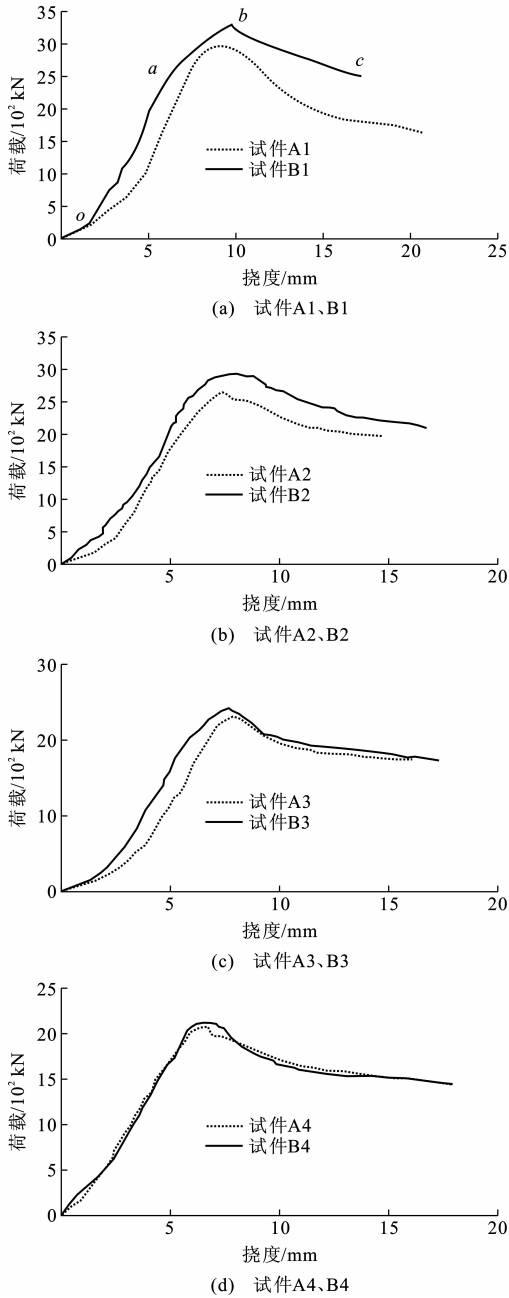


图4 CFRP含量影响曲线

Fig. 4 Influence Curves of Contents of CFRP

件下,CFRP圆管的约束效应随着偏心距的增大而逐渐降低。

图5为偏心距影响曲线。图5(a)的4条 $P-\delta$ 关系曲线在试件加载初期基本重合,之后达到各自的极限承载力,最后进入下降段,下降段曲线平稳。由图5(a)可以看出,内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱的极限承载力随着偏心距的增大而逐步降低。图5(b)、(c)的曲线特点和图5(a)的曲线特点基本相同。通过比较图5中的3组曲线可以发现,随着长细比的增大,内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱和普通方钢管高强混凝土柱的极限承载力

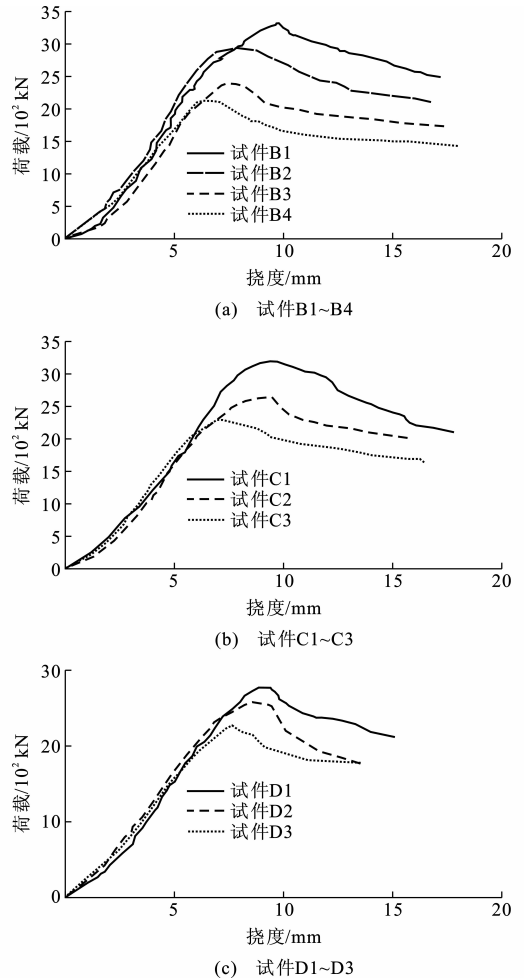


图5 偏心距影响曲线

Fig. 5 Influence Curves of Eccentricity

差距越来越小,由此可以看出,在相同条件下,偏心距对试件极限承载力的影响随着长细比的增大而逐渐降低。

图6为长细比影响曲线。图6(a)的3条 $P-\delta$ 关系曲线在试件加载初期基本重合,之后达到各自的极限承载力,最后进入下降段,下降段曲线平稳。由图6(a)可以看出,内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱的极限承载力随着长细比的增大而逐步降低。图6(b)、(c)的曲线特点和图6(a)的曲线特点基本相同。通过比较图6中的3组曲线可以发现,随着偏心距的增大,内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱和普通方钢管高强混凝土柱的极限承载力差距越来越小,由此可以看出,在相同条件下,长细比对极限承载力的影响随着偏心距的增大而逐渐降低。

3 试验结果分析

3.1 CFRP含量对极限承载力的影响

由图4可以看出,截面几何形状和尺寸相同的

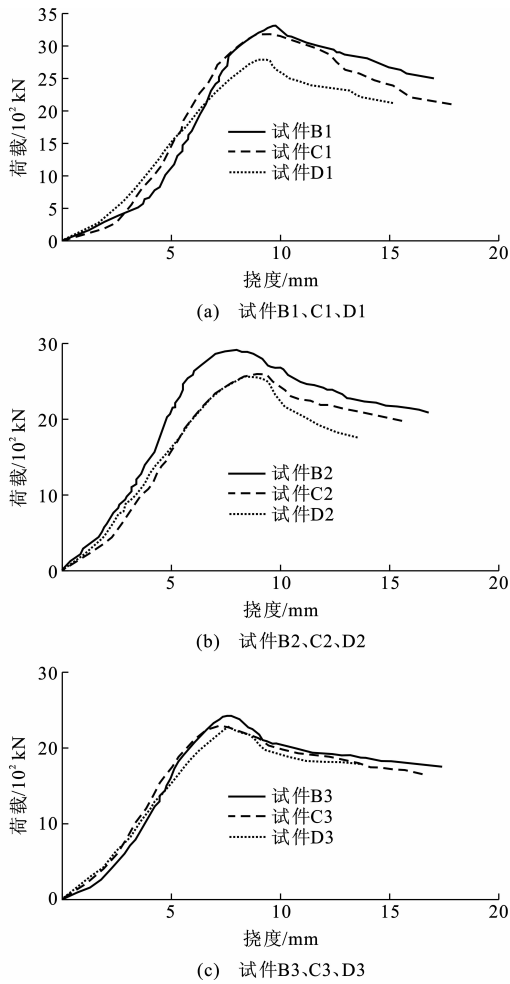


图 6 长细比影响曲线

Fig. 6 Influence Curves of Slenderness Ratio

试件,在偏心距和长细比相同的情况下,随着 CFRP 含量的增加,试件的极限承载力得到提高,幅度在 1.92%~11.28%之间,随着偏心距的增大,内置 CFRP 圆管的方钢管混凝土偏压中长柱的极限承载力提高幅度减小(表 4)。由此可知,CFRP 对核心混凝土的紧箍作用随着偏心距的增大而逐渐减小。

3.2 偏心距对极限承载力的影响

图 7 为试件的极限承载力与偏心距的关系曲线。由图 7 可以看出,在长细比 λ 和 CFRP 含量相同的条件下,随着偏心距 e 的增大,试件极限承载力 P_u 降低。当 $\lambda=13.86$ 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 11.4%~17.7%之间;当 $\lambda=20.78$ 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 12.6%~17.5%之间;当 $\lambda=27.70$ 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 6.5%~12.5%之间。

3.3 长细比对极限承载力的影响

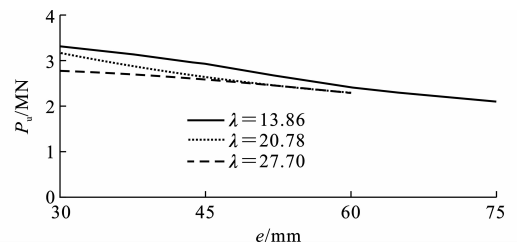
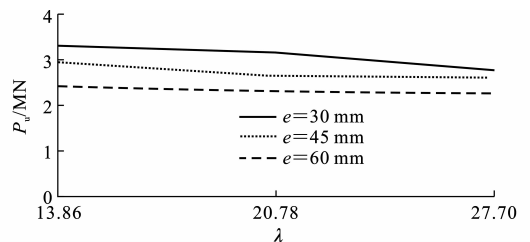
图 8 为试件的极限承载力与长细比的关系曲线。由图 8 可以看出,在偏心距和 CFRP 含量相同

表 4 CFRP 含量对极限承载力的影响

Tab. 4 Influences of Contents of CFRP on Ultimate Bearing Capacities

试件编号	L/mm	e/mm	t_{cf}/mm	f_{cf}/MPa	N_{ue}/kN	$\Delta N/\%$
A1	800	30	0.334	1 500	2 978.3	11.28
B1					3 314.2	
A2	800	45	0.334	1 500	2 645.0	11.00
B2					2 935.9	
A3	800	60	0.334	1 500	2 317.0	4.34
B3					2 417.5	
A4	800	75	0.334	1 500	2 065.7	1.92
B4					2 105.4	

注: t_{cf} 为 CFRP 管的壁厚; f_{cf} 为 CFRP 管的抗拉强度; N_{ue} 为试件极限承载力实测值; ΔN 为试件极限承载力提高率。

图 7 P_u - e 曲线Fig. 7 P_u and e Curves图 8 P_u - λ 曲线Fig. 8 P_u and λ Curves

的条件下,随着长细比的增大,试件极限承载力降低。当 $e=30$ mm 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 3.99%~12.6%之间;当 $e=45$ mm 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 0.9%~10.6%之间;当 $e=60$ mm 时,极限承载力随偏心距降低的幅度在 0.8%~5.1%之间。由此可知,随着偏心距的增大,长细比对极限承载力的影响越来越小。

4 结 语

(1)内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压中长柱的荷载-柱中挠度曲线可以划分为 3 个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段。

(2)内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压

中长柱的破坏属于延性破坏,在达到极限承载力之后,可以经历较大的变形而同时保持相当的强度储备,其延性性能优于方钢管高强混凝土偏压柱。

(3)在长细比相同的情况下,随着偏心距的增大,试件极限承载力降低;在偏心距相同的情况下,随着长细比的增大,试件极限承载力降低。

(4)随着偏心距逐渐增大,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土偏压柱与方钢管高强混凝土偏压柱的极限承载力相比,提高幅度减小。

参考文献:

References:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
CAI Shao-huai. Modern Steel Tube Concrete Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2000.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press,2000.
- [3] 张素梅,郭兰慧,王玉银,等. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报,2004,25(1):17-24.
ZHANG Su-mei, GUO Lan-hui, WANG Yu-yin, et al. Experimental Research and Theoretical Analysis of High Strength Concrete-filled Square Hollow Section Steel Tubes Subjected to Eccentric Loading[J]. Journal of Building Structures,2004,25(1):17-24.
- [4] 王庆利,张永丹,谢广鹏,等. 圆截面 CFRP-钢管混凝土柱的偏压试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2005,25(1):425-428.
WANG Qing-li, ZHANG Yong-dan, XIE Guang-peng, et al. Experimental Study on Eccentrically Compressed Concrete Filled Circular CFRP-steel Tubular Columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2005,25(1):425-428.
- [5] RAZVI S R, SAATCIOGLU M. Circular High-strength Concrete Columns Under Concentric Compression[J]. ACI Structural Journal,1999,96(5):817-825.
- [6] FURLONG R W. Columns Rules of ACI, SSLC and IRFD Compared[J]. Journal of Structural Division, 1983,109(10):2375-2386.
- [7] HAJJAR J F, GOURLEY B C. Representation of Concrete Filled Tubes [J]. Journal of Structural Engineering,1996,123(6):736-744.
- [8] 李荣,滕锦光,岳清瑞. FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域——嵌入式(NSM)加固法[J]. 工业建筑,2004,34(4):5-10.
LI Rong, TENG Jin-guang, YUE Qing-rui. A New Technique for Strengthening Concrete Structures — Near-surface Mounted FRP Reinforcement[J]. Industrial Construction,2004,34(4):5-10.
- [9] 王毅红,郭增辉,李先顺,等. 带有芯钢管的钢管混凝土节点的受力机理[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(1):64-68.
WANG Yi-hong, GUO Zeng-hui, LI Xian-shun, et al. Bearing Mechanism of Concrete-filled Steel Tubular Joint with Core Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2007,24(1):64-68.
- [10] 田宏伟,赵均海,魏锦. 圆钢管混凝土轴压长柱的极限承载力[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(2):74-79.
TIAN Hong-wei, ZHAO Jun-hai, WEI Jin. Ultimate Bearing Capacity of Concrete-filled Circular Steel Tubular Long Columns with Axial Compression [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2007,24(2):74-79.
- [11] 刘永健,刘君平,郭永平,等. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):53-57.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, GUO Yong-ping, et al. Bond-slip Mechanics Behaviors of Structures Concrete Filled Steel Tubes [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2007,27(2):53-57.
- [12] 王毅红,傅鹏斌,毛元平. 芯钢管连接的钢管混凝土节点偏压承载力[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):61-64.
WANG Yi-hong, FU Peng-bin, MAO Yuan-ping. Bearing Capacity of Joint with Core Steel Tube in Concrete Filled Steel Tubular Under Eccentrically Load [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(2):61-64.