

文章编号:1673-2049(2009)04-0095-05

# 钢骨-方钢管自密实高强混凝土 短柱的轴压承载力

孙珊珊,赵均海,薛 颢,肖海兵,王继秀

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**采用统一强度理论对轴心受压钢骨-方钢管自密实高强混凝土短柱的核心混凝土、钢管以及型钢钢管在三向应力状态下的轴向极限承载力进行了分析;通过引入考虑厚边比影响的等效约束折减系数和考虑尺寸效应影响的混凝土强度折减系数,将方钢管对混凝土的约束等效为圆钢管对混凝土的约束,从而推导出钢骨-方钢管自密实高强混凝土短柱轴压承载力的理论计算公式;将该公式的计算结果与试验结果和已有公式的计算结果进行比较,各结果吻合良好。结果表明:该公式有很强的适用性,对发挥材料潜力、节约材料具有实际意义,并且为此类结构的研究提供了重要的依据。

**关键词:**统一强度理论;钢骨-方钢管自密实高强混凝土;短柱;轴压承载力

中图分类号:TU398

文献标志码:A

## Axial Bearing Capacity of Square Steel Tube Short Columns Filled with Steel-reinforced Self-consolidating High-strength Concrete

SUN Shan-shan, ZHAO Jun-hai, XUE Hao, XIAO Hai-bing, WANG Ji-xiu

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the unified strength theory, the axial ultimate bearing capacities of square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under three-dimensional stress were analyzed. By introducing the equivalent constraints reduction factor and concrete strength reduction factor, which respectively considered the influence of thickness-length ratio and scale effect, the confinement of square steel tube towards concrete was equivalent to the confinement of circular steel tube towards it. Thus, the formulas for calculating ultimate bearing capacity of the square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-compacting high-strength concrete were deduced. A reasonable match was reached by comparing the results calculated by the formulas with the test results and the calculated result of existed formulas. The result shows that the formulas have significances in exerting material potentials and saving materials, and also provide the important basis for structural analysis.

**Key words:** unified strength theory; square steel tube filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete; short column; axial bearing capacity

收稿日期:2009-07-02

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(SJ08E<sub>2</sub>04)

作者简介:孙珊珊(1986-),女,山东胶州人,工学硕士研究生,E-mail:sunjin1986123@163.com。

## 0 引言

钢-混凝土组合结构由于其具有较高的承载力、良好的延性以及较强的耗能能力,已被广泛应用于工业建筑、近海工程、高层建筑以及地下建筑中<sup>[1]</sup>。工程中常采用的组合柱有钢管混凝土柱和钢筋混凝土柱,综合二者的优缺点,文献[2]中提出了一种新型的重载柱,即钢筋-方钢管自密实高强混凝土柱。该新型重载柱通过钢管、钢筋和混凝土的协同工作达到了提高柱的承载力、延性以及耐火性能的目的,由于其具有钢筋混凝土柱和钢管混凝土柱的优点,可用于地铁站台柱和桥梁结构中。方钢管混凝土柱四边虽然对核心混凝土的约束效应比较差,经济效益不如圆钢管混凝土柱,但具有节点构造简单、受弯性能好、空间布置方便等优点,使其具有良好的工程应用前景。自密实混凝土是一种新型绿色高性能混凝土,具有高流动性、高密实度、大变形、填充能力强和良好的粘聚性等特性,仅靠自重,无须振捣即可充满模板和包裹钢筋,硬化后具有良好的力学性能和耐久性,施工噪音小、速度快<sup>[3-6]</sup>。笔者在统一强度理论的基础上,引入混凝土强度折减系数<sup>[7]</sup>和等效约束折减系数<sup>[8]</sup>,将方钢管对混凝土的约束等效为圆钢管对混凝土的约束<sup>[9-12]</sup>,并采用双剪统一强度理论分别对钢筋-方钢管自密实高强混凝土短柱的核心混凝土、钢管以及型钢钢管的承载力进行理论分析,推导了该新型重载柱的承载力公式,并将该公式的计算结果与文献成果进行比较,最后进一步分析了各参数对极限承载力的影响。

## 1 统一强度理论

图1为钢筋-方钢管自密实高强混凝土柱的截面形式。

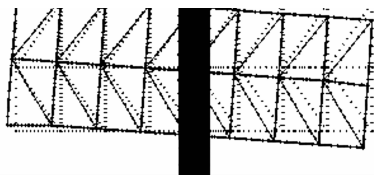


图1 钢筋-方钢管自密实高强混凝土柱的截面形式  
Fig.1 Section Shapes of Square Steel Tube Columns Filled with Steel-reinforced Self-consolidating High-strength Concrete

1991年俞茂宏在双剪强度理论基础上,建立了一种全新的考虑中间主应力 $\sigma_2$ 影响的适用于各种不同材料的双剪统一强度理论,其数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) &= \sigma_s & \sigma_2 &\leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 &= \sigma_s & \sigma_2 &\geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}, b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_s}{\sigma_s - \tau_s} = \frac{(1+\alpha) - T}{T - 1}, T = \frac{\sigma_s}{\tau_s} \quad (2)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 分别为3个主应力; $\alpha$ 为材料的拉压比; $\sigma_s$ 为材料拉伸屈服极限强度; $\sigma_c$ 为材料压缩屈服极限强度; $\tau_s$ 为材料剪切屈服极限强度; $b$ 为反映中间主剪应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的系数; $T$ 为切应力系数。

## 2 轴压承载力计算

### 2.1 受力模型

在该新型组合柱中,核心混凝土和钢筋受三向压应力作用,外层钢管受纵向压应力、环向拉应力和径向压应力作用。钢筋被包裹在混凝土中,提高了柱的抗剪能力<sup>[13]</sup>;钢管对混凝土施加了有效的连续横向约束作用,提高了混凝土的抗压强度,并显著地改善了混凝土特别是高强混凝土延性差的特性;钢管内混凝土的存在避免了钢管向内凹曲,并且增加了钢管的刚度和抗局部以及整体的屈曲能力,同时也提高了钢管的耐久性和柱的耐火性。

### 2.2 钢管承载力

将钢筋-方钢管混凝土的钢与混凝土面积按等面积方法分别转化为钢筋-圆钢管混凝土的钢与混凝土的面积<sup>[14]</sup>,其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} B^2 &= \pi(r_0 + t_0)^2 \\ (B - 2t)^2 &= \pi r_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $B$ 、 $t$ 分别为方钢管混凝土的外边长和钢管壁厚; $r_0$ 、 $t_0$ 分别为等效圆钢管内壁半径和钢管壁厚。

考虑到方钢管对混凝土的不均匀约束,引入考虑厚边比影响的等效约束折减系数 $\xi$ ,将等效圆钢管对混凝土的均匀约束进行折减。令厚边比 $\nu = t/B$ ,则 $\xi$ 的表达式为

$$\xi = 66.474 1\nu^2 - 0.991 9\nu + 0.416 18 \quad (4)$$

等效圆钢管混凝土的内压力 $p_1$ 为

$$p_1 = p/\xi$$

式中: $p$ 为方钢管对核心混凝土的等效均匀内压力。

本文中采用统一强度理论,根据其中的厚壁圆筒理论,在轴心压力下等效圆钢管混凝土的内压力 $p_1$ 为

$$p_1 = \frac{\sigma_s}{1-\alpha} \left[ \left( \frac{r_0}{r_0 + t_0} \right)^{\frac{2(1+b)(\alpha-1)}{2+2b-\alpha}} - 1 \right] \quad (5)$$

根据塑性力学的厚壁圆筒理论可得<sup>[15]</sup>

$$\sigma_{sp} = \frac{pr_0^2}{(r_0 + t_0)^2 - r_0^2} = \frac{\xi p_1 r_0^2}{(r_0 + t_0)^2 - r_0^2} \quad (6)$$

钢管承担的轴向压力  $N_{sp}$  为

$$N_{sp} = A_{st} \sigma_{sp} \quad (7)$$

式中:  $A_{st}$  为外包钢管截面面积;  $\sigma_{sp}$  为外包钢管轴向抗压强度。

### 2.3 核心混凝土承载力

核心混凝土屈服条件的非线性方程<sup>[16]</sup>为

$$\sigma_{cp} = f_c (1 + 1.5 \sqrt{p/f_c} + 2p/f_c) = f_c (1 + 1.5 \sqrt{p_1 \xi / f_c} + 2p_1 \xi / f_c) \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{cp}$  为核心混凝土轴向抗压强度;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值。

核心混凝土承担的轴向压力  $N_{cp}$  为

$$N_{cp} = \gamma_u A_c \sigma_{cp} \quad (9)$$

式中:  $\gamma_u$  为考虑尺寸效应影响的混凝土强度折减系数,  $\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112}$ ,  $D_c$  为等效钢筋-圆钢管混凝土柱的内径;  $A_c$  为核心混凝土的截面面积。

### 2.4 钢筋承载力

钢筋包裹在混凝土中处于三轴应力状态  $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ , 根据材料力学理论可知

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{2t_0}{D - 2t_0} f_{yt} \quad (10)$$

$$\sigma_3 = \frac{N_{bp}}{A_{ss}} \quad (11)$$

式中:  $D$  为等效钢筋-圆钢管混凝土外直径;  $A_{ss}$  为钢筋的截面面积;  $f_{yt}$  为外钢管的屈服强度。

对于大多数金属类材料, 都有明显的屈服点, 并且抗拉强度和抗压强度相等, 因此材料的拉压比  $\alpha = 1$ 。

由于  $\frac{\sigma_1 + \alpha \sigma_3}{1 + \alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} < \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \sigma_2$ , 根据统一强度理论, 将  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  代入式(1)可得

$$\frac{1}{1+b} \left( \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} + b \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} \right) - \frac{N_{bp}}{A_{ss}} = f_{ys} \quad (12)$$

钢筋承担的轴向压力  $N_{bp}$  为

$$N_{bp} = \left[ \frac{1}{1+b} \left( \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} + b \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} \right) - f_{ys} \right] A_{ss} \quad (13)$$

式中:  $f_{ys}$  为钢筋三轴受压屈服强度。

### 2.5 短柱轴压承载力

钢筋-方钢管自密实混凝土短柱的轴压承载力  $N_u$  由外钢管、核心混凝土、钢筋共同承担, 即

$$N_u = N_{sp} + N_{cp} + N_{bp} \quad (14)$$

将式(7)、(9)、(13)代入式(14), 整理可得

$$N_u = A_{st} \frac{\xi p_1 r_0^2}{(r_0 + t_0)^2 - r_0^2} + \gamma_u A_c f_c (1 + 1.5 \sqrt{p_1 \xi / f_c} + 2p_1 \xi / f_c) + \left[ \frac{1}{1+b} \left( \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} + b \frac{2t_0}{D-2t_0} f_{yt} \right) - f_{ys} \right] A_{ss} \quad (15)$$

## 3 结果比较与分析

### 3.1 极限承载力验算

由于大多数低强度钢材是有明显屈服点的材料, 并且抗拉强度和抗压强度相同, 取材料的拉压比  $\alpha = 1$ , 统一强度理论退化为统一屈服准则, 此时取不同  $b$  值, 统一屈服准则就变为具体的已知屈服准则或现在还未定义的新屈服准则, 将式(5)中的  $\alpha$  取为 1, 并求其极限, 得等效圆钢管的塑性极限荷载  $p_1$  为

$$p_1 = -2\sigma_s \frac{1+b}{2+b} \ln \frac{r_0}{r_0 + t_0} \quad (16)$$

由于不能得到真实试验时材料的剪切屈服极限强度  $\tau_s$  和拉伸屈服极限强度  $\sigma_s$  的具体数据, 本文中取  $b = 0.5$  进行分析, 同时对应于 Mises 准则的线性逼近式。将  $b = 0.5$  及式(16)代入式(15)进行计算分析, 其计算结果与文献[17]和文献[2]的结果对比见表 1。从表 1 可以看出: 本文方法计算所得理论值与文献[17]试验实测值吻合良好, 从而验证了该理论公式的正确性; 试验实测值与按式(15)、文献[2]中公式计算的极限承载力之比的平均值分别为 1.007、0.856, 由此可见, 本文计算方法精确度更高。

### 3.2 $\alpha$ 、 $b$ 对极限承载力的影响

对于高强度钢材, 材料拉压比  $\alpha$  不再等于 1, 图 2 为试件 H-1、I-1 的极限承载力  $N$  随  $\alpha$ 、 $b$  的变化情况。从图 2 可以看出, 当  $\alpha$  一定时, 承载力随着  $b$  的增大而增大, 当  $b$  一定时, 承载力随着  $\alpha$  的增大而增大。由此可见,  $\alpha$ 、 $b$  作为决定承载力大小的最主要因素, 对于不同的材料, 考虑  $\alpha$ 、 $b$  的影响, 会使构件强度计算更加精确。从图 2 还可以看出, 试件 H-1 的承载力明显高于试件 I-1 的承载力, 这主要是由于试件 H-1 和试件 I-1 的钢筋截面形式不一样, 并且试件 H-1 的含骨率明显高于试件 I-1。

## 4 结 语

(1) 给出了基于统一强度理论的钢筋-方钢管自密实高强混凝土短柱轴压极限承载力公式, 该公式考虑了中间主应力及材料的拉压异性对构件承载力的影响, 既可以计算拉压比相同的金属类材料, 也适用于大量拉压比不同的材料, 便于推广。

表 1 承载力计算结果比较

Tab. 1 Comparison of Calculation Results of Load-bearing Capacity

试件 编号	$f_c/\text{MPa}$	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$A_c/\text{mm}^2$	$f_{yt}/\text{MPa}$	$A_{st}/\text{mm}^2$	$f_{ys}/\text{MPa}$	$A_{ss}/\text{mm}$	$N_{\text{exp}}/\text{kN}$	$N_u/\text{kN}$	$N_0/\text{kN}$	$N_{\text{exp}} \cdot N_u^{-1}$	$N_{\text{exp}} \cdot N_0^{-1}$
H-1	48.4	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	4 035	3 991	4 870	1.01	0.83
H-2	48.4	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	4 050	3 991	4 870	1.01	0.83
H-3	70.8	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	4 880	4 813	5 564	1.01	0.88
H-4	70.8	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	4 880	4 813	5 564	1.01	0.88
H-5	48.4	195	4.5	31 730	289	3 429	338	2 866	3 930	3 800	4 486	1.03	0.88
H-6	70.8	195	4.5	31 730	289	3 429	338	2 866	4 750	4 621	5 197	1.03	0.91
H-7	70.8	195	4.5	30 726	289	3 429	327	3 870	4 710	4 796	5 423	0.98	0.87
H-8	48.4	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	3 860	3 991	4 870	0.97	0.79
H-9	70.8	195	5.5	30 990	288	4 169	338	2 866	4 980	4 813	5 564	1.03	0.90
I-1	48.4	195	4.5	33 163	289	3 429	338	1 433	3 410	3 452	4 071	0.99	0.84
I-2	48.4	195	5.5	32 423	288	4 169	338	1 433	3 620	3 656	4 455	0.99	0.81

注： $N_{\text{exp}}$ 为实测组合柱极限承载力； $N_0$ 为按文献[2]中公式计算的极限承载力；试件编号中H代表钢骨的截面形式为十字型，I代表钢骨的截面形式为工字型。

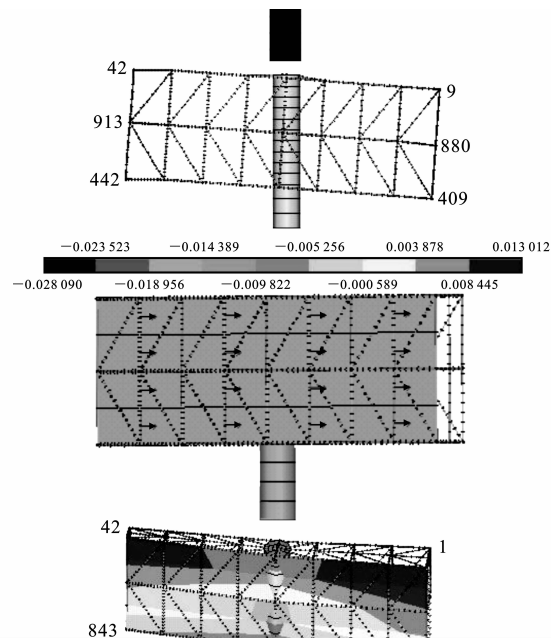


图 2  $N$  与  $\alpha$ 、 $b$  的关系

Fig. 2 Relations Between  $\alpha$ ,  $b$  and  $N$

(2)将本文的计算结果与文献试验结果以及已有公式的计算结果进行对比可知,误差较小,验证了将统一强度理论应用于钢骨-方钢管自密实钢管混凝土的计算方法是可行的。

(3)参数  $\alpha$ 、 $b$  的变化对该新型重载柱承载力的 大小有显著的影响,并且承载力随着  $\alpha$ 、 $b$  的增大而 增大。

参考文献:

References:

[ 1 ] 王清湘,赵大洲,关 萍.轴心受压钢骨-钢管混凝土 组合短柱力学性能研究[J].中国公路学报,2004,17

(3);36-40.

WANG Qing-xiang, ZHAO Da-zhou, GUAN Ping. Study of the Mechanical Properties of Axially Loaded Section Steel and Steel Tube Short Columns Filled with Steel-reinforced Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 36-40.

[ 2 ] 王清湘,朱美春,冯秀峰.型钢-方钢管自密实高强混 凝土轴压短柱受力性能的试验研究[J].建筑结构学 报,2005,26(4):27-31.

WANG Qing-xiang, ZHU Mei-chun, FENG Xiu-feng. Experimental Study on Axially Loaded Square Steel Tubes Filled with Steel-reinforced Self-consoli- dating High-strength Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 27-31.

[ 3 ] 叶燕华,黄炳生,缪汉良,等.自密实混凝土工作性能 的试验研究[C]//宋玉普,贾金青.全国第十届混凝 土基本理论及工程应用学术会议论文集.北京:中 国建筑工业出版社,2008:798-803.

YE Yan-hua, HUANG Bing-sheng, MIAO Han-liang, et al. Experimental Investigation on Workability of Self-compacting Concrete[C]//SONG Yu-pu, JIA Jin-qing. Proceedings of the 10th National Academic Conference on Basic Theories and Engineering Applications of Concrete. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 798-803.

[ 4 ] KENJI S, HIROYUKI N, SHOSUKE M, et al. Behav- ior of Centrally Loaded Concrete Filled Steel Tube Short Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.

[ 5 ] 李小伟,赵均海,朱铁栋,等.方钢管混凝土轴压短柱 的力学性能[J].中国公路学报,2006,19(4):77-81. LI Xiao-wei, ZHAO Jun-hai, ZHU Tie-dong, et al.

- Mechanics Behavior of Axially Loaded Short Columns with Concrete-filled Square Steel Tube [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 77-81.
- [6] 张淑云, 白国良, 李红星, 等. 钢筋混凝土框架异型节点抗剪承载力研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(2): 170-174.
- ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Anti-shear Capacity of Abnormal Joints of RC Frame[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(2): 170-174.
- [7] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥拱肋刚度设计取值分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 34-39.
- WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun. Analysis on Rib Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 34-39.
- [8] 周天华, 郭彦利, 卢林枫, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁节点的非线性有限元分析[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 283-287.
- ZHOU Tian-hua, GUO Yan-li, LU Lin-feng, et al. Nonlinear FEM Analysis of Bearing Capacity Behavior of Concrete-filled Square Tubular Column and Steel Beam Joints[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 283-287.
- [9] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 87-91.
- ZHAO Jun-hai. Unified Strength Theory and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2003: 87-91.
- [10] 何益斌, 刘文竞, 黄 频, 等. 基于双剪统一强度理论的轴心受压钢管-钢管混凝土短柱承载力研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(增): 663-665.
- HE Yi-bin, LIU Wen-jing, HUANG Pin, et al. Study on Load-carrying Capacity of Axial Compressive Circular Steel Tube Column Filled with Steel-reinforced Concrete Based on the Twin Shear Unified Strength Theory[J]. Industrial Construction, 2007, 37(S): 663-665.
- [11] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 231-268.
- ZHONG Shan-tong. The Concrete-filled Steel Tubular Structures[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 231-268.
- [12] 刘文竞. 钢管-钢管混凝土柱分析方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- LIU Wen-jing. Study on Analysis Methods of Circular Steel Tube Column Filled with Steel-reinforced Concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [13] 叶列平, 方鄂华. 钢管混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1-12.
- YE Lie-ping, FANG E-hua. State-of-the-art of Study on the Behaviors of Steel Reinforced Concrete Structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 1-12.
- [14] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论——研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 46-48.
- ZHONG Shan-tong. Unified Theory of CFST — Research and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 46-48.
- [15] 王 仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 202-212.
- WANG Ren, XIONG Zhu-hua, HUANG Wen-bin. Foundation of Plastic Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1982: 202-212.
- [16] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 45-54.
- CAI Shao-huai. Modern Concrete-filled Steel Tube Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 45-54.
- [17] 朱美春, 王清湘, 冯秀峰. 轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 35-41.
- ZHU Mei-chun, WANG Qing-xiang, FENG Xiu-feng. Behavior of Axially-loaded Square Steel Tube Short Columns Filled with Steel-reinforced Self-consolidating High-strength Concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 35-41.