

文章编号:1673-2049(2011)03-0088-05

基于统一强度理论的矩形钢管混凝土短柱 轴压承载力计算

王娟,赵均海,吴赛,刘朝

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:考虑矩形钢管长边、短边对核心混凝土的不同约束作用,将其对核心混凝土所产生的侧向压力等效为圆形钢管对核心混凝土产生的均匀侧向压力,并采用双剪统一强度理论对钢管内核心混凝土的受力进行分析;提出了矩形钢管混凝土短柱简单、实用的轴压承载力计算公式,并对影响因素进行了分析;将该公式计算值与相应文献试验值、其他公式计算值进行了比较,吻合较好。结果表明:所推公式具有很好的适用性,为矩形钢管混凝土柱的研究提供了一定的理论依据。

关键词:约束作用;双剪统一强度理论;矩形钢管混凝土;短柱;轴压承载力

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

Calculation of Axial Bearing Capacity of Rectangular Concrete-filled Steel Tube Short Column Based on Twin Shear Unified Strength Theory

WANG Juan, ZHAO Jun-hai, WU Sai, LIU Zhao

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

Abstract: Considering the difference between restriction effect on core-concrete provided by broad faces and that provided by narrow faces of the rectangular steel tube appropriately, the lateral pressure of rectangular steel tube towards core-concrete was equivalent to the uniform lateral pressure towards it. Based on the twin shear unified strength theory, the force of core-concrete in the rectangular steel tube was analyzed. The simple and practical calculation formula of the axial bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tube short column was proposed, meanwhile, the influencing factors on the bearing capacity were analyzed. The calculation results in the paper were compared with the experiment results and the calculation results in relevant documents, coinciding well with each other. The result shows that the formula deduced in the paper has good applicability and the solution has an important practical value.

Key words: restraining effect; twin shear unified strength theory; rectangular concrete-filled steel tube; short column; axial bearing capacity

0 引言

钢管混凝土是在薄壁钢管中填入混凝土所形成

的一种新型组合构件,它利用钢管对混凝土的约束作用使得核心混凝土的强度得到提高。目前,各国对圆形钢管混凝土构件的研究已经相对成熟^[1],而

收稿日期:2011-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50908015);陕西省自然科学基金项目(SJ08E204)

作者简介:王娟(1987-),女,陕西延安人,工学硕士研究生,E-mail:wangjuanchd@126.com。

对矩形钢管混凝土构件的研究还相对缺乏。由于矩形钢管混凝土不仅具有钢管混凝土承载力高、塑性和韧性性能好以及节约钢材的优点外,还具有与梁、柱连接点处理更为方便的自身特点^[2],因而有着良好的发展前景。

目前,各国已有许多矩形钢管混凝土柱轴压承载力计算的规程或规范,同时也有许多学者在对矩形钢管混凝土进行了大量试验研究后,给出了各自的计算公式,但仍存在一定的缺陷,如文献[3]中利用矩形钢管长边所提供的侧压力计算核心混凝土强度,偏于保守,同时承载力的计算公式建立的基础为钢管长边、短边同时达到屈服强度,缺乏事实依据;《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004)^[4]与文献[5]中忽略了核心混凝土所受的约束作用;文献[6]、[7]中仅是在方钢管轴压承载力计算公式中加入了相应的修正约束效应系数,缺乏系统的理论推导,并且文献[6]中所加入的修正系数仅仅是根据3个实测值反推而得,不具备广泛的适用性;文献[8]中运用混凝土五参数破坏准则,虽有一定的精确度,但由于参数过多,使用起来不太方便。本文中笔者在文献[8]的基础上,适当考虑矩形钢管长边、短边约束差异,并将其对核心混凝土所产生的侧向压力等效为圆形钢管对核心混凝土产生的侧向压力,运用双剪统一强度理论分析核心混凝土受力情况,提出了简单、实用的矩形钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式,并与相应试验结果进行了对比。

1 双剪统一强度理论

双剪统一强度理论是一个比较完整的工程结构新理论,它考虑了第二主应力的影响,同时适用于各类不同材料,其数学表达式为^[9]

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

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

式中: F 、 F' 均为主应力强度理论函数; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力; α 为材料的拉压比; σ_s 、 σ_c 、 τ_s 分别为材料的拉伸屈服应力、压缩屈服应力和剪切屈服应力; b' 为反映中间主应力及相应面正应力对材料破坏影响程度的系数; B 为剪应力系数。

2 轴压承载力计算

2.1 矩形钢管对核心混凝土的约束作用

借鉴箍筋约束混凝土等效侧向约束应力确定矩形钢管短边、长边对混凝土的等效侧向约束应力 f_{r1} 、 f_{r2} 的示意图如图1,其表达式分别为

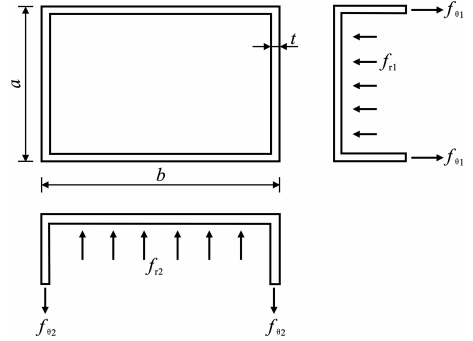


图1 矩形钢管受力

Fig. 1 Forces of Rectangular Steel Tube

$$\left. \begin{aligned} f_{r1} &= k_0 \frac{2f_{\theta 1}}{a/t - 2} \\ f_{r2} &= k_0 \frac{2f_{\theta 2}}{b/t - 2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: k_0 为矩形钢管对混凝土的有效约束系数; $f_{\theta 1}$ 、 $f_{\theta 2}$ 分别为矩形钢管短边和长边的环向应力; a 、 b 分别为矩形钢管的宽度和长度; t 为钢管厚度。

矩形钢管对混凝土的有效约束系数 k_0 为

$$k_0 = 1 - \frac{(a-2t)\tan\theta_1}{3(b-2t)} - \frac{(b-2t)\tan\theta_2}{3(a-2t)} \quad (4)$$

式中: θ_1 、 θ_2 均为核心混凝土有效约束区的约束界线边切角,Mander等^[10]建议取 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$,但考虑到不符合矩形钢管截面要求,本文中采用文献[8]的方法,将 θ_1 、 θ_2 用约束界线边切角系数 ζ_1 、 ζ_2 分别表示为 $\theta_1 = -0.078\zeta_1^2 + 4.8\zeta_1 - 22.6$, $\theta_2 = -0.078\zeta_2^2 + 4.8\zeta_2 - 22.6$, $\zeta_1 = \frac{f_y}{a/t}$, $\zeta_2 = \frac{f_y}{b/t}$, f_y 为钢管抗拉屈服强度。

θ_1 、 θ_2 的计算方法是基于有限试验数据的回归分析,适用于长宽比 b/a 为 1.0~2.0,且高厚比 b/t 为 20~50 的矩形钢管混凝土短柱。

根据材料力学理论,借鉴文献[11]和文献[12]将方钢管混凝土柱转化为等截面且含钢量相同的圆钢管混凝土柱的思想,将矩形钢管等效为圆形钢管进行均匀侧压力 σ_r 的计算

$$\sigma_r = \frac{t(|f_{r1}| + |f_{r2}|)}{R+r} \quad (5)$$

式中: f_{r1} 、 f_{r2} 取相应值的绝对值,即等效侧压力取矩

形钢管长边、短边侧压力的平均值; R 、 r 分别为等效圆钢管的外径和内径。

由 $ab = \pi R^2$ 和 $(a-2t)(b-2t) = \pi r^2$ 可得

$$R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}, r = \sqrt{\frac{(a-2t)(b-2t)}{\pi}} \quad (6)$$

将式(3)、(6)代入式(5), 可得

$$\sigma_r = [2k_0 t \sqrt{\pi} (\frac{f_{01}}{a/t-2} + \frac{f_{02}}{b/t-2})] \cdot [\sqrt{ab} + \sqrt{(a-2t)(b-2t)}]^{-1} \quad (7)$$

2.2 核心混凝土轴压强度

等效圆钢管混凝土短柱中核心混凝土的应力状态为 $0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, 其轴压强度由于外层钢管的套箍作用而得到提高, 取 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r$, 由双剪统一强度理论可得^[13-18]

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (8)$$

因为等效圆钢管比矩形钢管对核心混凝土的约束要好, 所以在式(8)中加入混凝土降低系数 γ_u , 即

$$\sigma_3 = f_c + \gamma_u k\sigma_1 \quad (9)$$

式中: σ_3 为核心混凝土的抗压强度, 即 f_{ci} ; f_c 为核心混凝土的单轴抗压强度; $k = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$, φ 为混凝土内摩擦角, 具体取值可由试验确定; $\gamma_u = 1.67D^{-0.112}$, D 为圆柱直径, 计算时取外径。

将式(7)代入式(9), 可得

$$f_{ci} = f_c + \gamma_u k [2k_0 t \sqrt{\pi} (\frac{f_{01}}{a/t-2} + \frac{f_{02}}{b/t-2})] \cdot [\sqrt{ab} + \sqrt{(a-2t)(b-2t)}]^{-1} \quad (10)$$

2.3 矩形钢管混凝土轴压承载力

由于矩形钢管长边对核心混凝土的约束较弱, 本文中假设钢管长边所受拉应力达到屈服强度时, 即 $f_{01} = f_y$ 时, 构件破坏。在矩形钢管角点处, 由于短边和长边弯矩相同, 因而

$$f_{r2} = \frac{a^2}{b^2} f_{r1} \quad (11)$$

将式(3)代入式(11), 化简可得

$$f_{02} = \frac{a^2(b/t-2)}{b^2(a/t-2)} f_{01} = \frac{a^2(b/t-2)}{b^2(a/t-2)} f_y \quad (12)$$

矩形钢管混凝土轴压极限承载力 N 即为矩形钢管与抗压强度提高后的核心混凝土极限承载力之和, 即

$$N = A_s f_s + A_c f_{ci} \quad (13)$$

式中: A_s 为矩形钢管截面面积; A_c 为核心混凝土截面面积。

将式(10)、(12)代入式(13), 可得

$$N = A_s f_y + A_c \{ f_c + \gamma_u k \cdot$$

$$\frac{2k_0 t f_y \sqrt{\pi(a^2 + b^2)}}{b^2(a/t-2)[\sqrt{ab} + \sqrt{(a-2t)(b-2t)}]} \} \quad (14)$$

3 结果对比与分析

3.1 极限承载力验证

对于侧向压应力较小的矩形钢管混凝土, 一般可取 $k = 1.5 \sim 5.0$, 本文中取 $k = 2.6$, 将相关试验数据代入式(14)进行计算, 并将计算结果与试验结果及其他文献公式计算结果进行对比, 见表 1。由表 1 可以看出, 本文计算结果与试验结果、文献[3]中的公式计算结果吻合良好。说明本文中将矩形钢管长边、短边约束力等效为圆形钢管均匀侧压力, 并将双剪统一强度理论应用于矩形钢管混凝土短柱的承载力计算中是可行的, 同时, 试验实测承载力值与本文承载力公式计算值之比的平均值为 1.001 6, 其中多组数据都几乎与实测值相等, 也说明了本文计算方法具有较好的精确度。

3.2 影响因素分析

以 $a \times b$ 分别为 $150 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、 $250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 及 f_c 为 23.6 MPa 的试件为例, 分析不同钢管厚度 t 时, 钢管长宽比 b/a 、钢管抗拉屈服强度 f_y 和构件轴压极限承载力 N 之间的关系, 见图 2。由图 2 可以看出: 当 f_y 一定时, 矩形钢管混凝土轴压承载力随着 b/a 的增大而增大; 当 b/a 一定时, 矩形钢管混凝土轴压承载力随着 f_y 的增大而增大; 同时对比图 2(a) 与图 2(b) 也可发现, 钢管厚度 t 的增大也可使构件承载力得到提高。

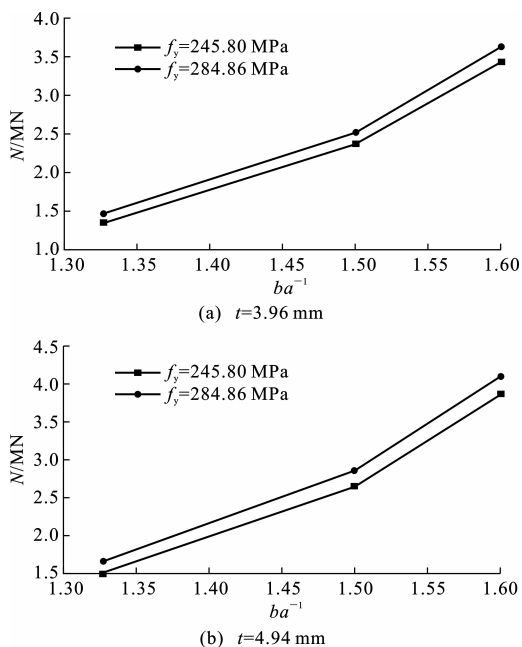


图 2 N 与 b/a 、 f_y 的关系

Fig. 2 Relations of N and b/a , f_y

表 1 承载力计算结果与试验结果的比较

Tab.1 Comparisons Between Calculation Results and Experiment Results of Bearing Capacities

试件 编号	a/mm	b/mm	t/mm	A_{s1}/mm^2	A_{s2}/mm^2	A_c/mm^2	f_y/MPa	f_c/MPa	γ_u	N_{exp}/kN	N_0/kN	N/kN	$N_{\text{exp}}N_0^{-1}$	$N_{\text{exp}}N^{-1}$	数据 来源
1	100.0	100.0	3.96	760.64	760.64	8 478.73	254.20	23.60	0.984	651	587	614.03	1.109 0	1.060 2	文献 [3]
2	150.0	200.0	3.96	1 156.64	1 552.64	27 290.73	254.20	23.60	0.925	1 450	1 333	1 370.17	1.087 8	1.058 3	
3	200.0	200.0	3.96	1 552.64	1 552.64	36 894.73	254.20	23.60	0.910	1 724	1 660	1 693.00	1.038 6	1.018 3	
4	200.0	300.0	4.94	1 927.19	2 915.19	55 157.61	245.80	23.60	0.890	2 579	2 492	2 552.44	1.034 9	1.010 4	
5	150.0	200.0	4.00	1 168.00	1 568.00	27 264.00	284.86	22.06	0.925	1 423	1 381	1 422.06	1.030 4	1.000 7	文献 [7]
6	150.0	300.0	4.00	1 168.00	2 368.00	41 464.00	284.86	22.06	0.904	1 993	1 922	1 976.61	1.036 9	1.008 3	
7	200.0	300.0	4.00	1 568.00	2 368.00	56 064.00	284.86	22.06	0.890	2 410	2 358	2 404.78	1.022 1	1.002 2	
8	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	343.30	27.37	0.986	900	863	990.81	1.000 0	0.958 8	
9	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	343.30	28.64	0.986	900	873	971.18	1.021 5	0.978 2	文献 [19]
10	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	357.50	28.01	0.986	920	895	968.26	0.970 9	0.929 5	
11	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	386.30	28.01	0.986	950	950	987.90	0.963 0	0.921 1	
12	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	386.30	25.46	0.986	950	930	906.94	1.042 9	0.992 3	
13	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	384.70	25.46	0.986	900	927	916.72	1.030 9	0.981 8	
14	80.0	120.0	5.00	750.00	1 150.00	7 700.00	384.70	28.01	0.986	910	945	938.07	1.027 9	0.980 7	
15	76.6	152.3	3.00	441.60	895.80	10 328.78	430.00	25.02	0.975	819	834	868.17	0.982 0	0.943 4	文献 [20]
16	76.5	152.8	4.47	643.95	1 326.07	9 719.18	383.00	21.59	0.975	1 006	964	1 016.21	1.043 6	0.989 9	
17	101.8	152.4	4.32	842.23	1 279.41	13 392.68	413.00	21.59	0.960	1 144	1 165	1 214.86	0.982 0	0.941 7	
18	102.8	152.7	4.57	897.82	1 353.91	13 445.83	365.00	19.84	0.959	1 224	1 088	1 140.51	1.125 0	1.073 2	
19	101.3	151.4	5.72	1 093.44	1 666.58	12 576.81	324.00	19.84	0.960	1 335	1 144	1 207.92	1.167 0	1.105 2	
20	102.1	152.4	7.34	1 391.08	2 129.48	12 039.48	358.00	19.84	0.960	1 691	1 499	1 568.96	1.128 1	1.077 8	

注: A_{s1} 、 A_{s2} 分别为矩形钢管短边和长边截面面积; N_{exp} 为相应文献试验结果; N_0 为文献[3]中引用文献[4]计算公式所得结果。

4 结 语

(1) 本文在双剪统一强度理论的基础上, 通过分析核心混凝土所受应力状态以及将钢管长边、短边对核心混凝土的不同约束应力等效为圆形钢管对核心混凝土的均匀侧压力, 得出了具有较高精确度的矩形钢管混凝土承载力计算公式, 有较好的适用性。

(2) 钢管长宽比 b/a 与钢管屈服强度 f_y 对矩形钢管混凝土的轴压承载力 N 有一定影响, 并且 N 随着 b/a 和 f_y 的增大而增大。

(3) 当取不同 k 值时, 即取不同核心混凝土内摩擦角 φ 值, 可得到不同精度的轴压承载力 N 。

参考文献:

References:

[1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2003.
ZHONG Shan-tong. Concrete-filled Steel Tubular Structures[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press,2003.

[2] 朱万成,凌 丽,唐春安,等. 矩形钢管混凝土短柱破坏过程的数值模拟[J]. 建筑结构,2010,40(1):23-

25,29.
ZHU Wan-cheng, LING Li, TANG Chun-an, et al. Numerical Simulation on Failure Process of Short Concrete-filled Rectangular Steel Tube Columns Under Axial Compressive Loading[J]. Building Structure,2010,40(1):23-25,29.

[3] 高金良,姚民乐. 轴心受压矩形钢管混凝土短柱承载力研究[J]. 建筑材料学报,2006(6):716-719.
GAO Jin-liang, YAO Min-le. Research on Bearing Capacity of Short Rectangular Concrete-filled Steel Column Under Axially Compressive Loading [J]. Journal of Building Materials,2006(6):716-719.

[4] CECS 159:2004,矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
CECS 159:2004, Technical Specification for Structures with Concrete-filled Rectangular Steel Tube Members[S].

[5] 沈祖炎,黄奎生. 矩形钢管混凝土轴心受力构件的设计方法[J]. 建筑结构,2005,35(1):3-4,18.
SHEN Zu-yan, HUANG Kui-sheng. Design Method of Axially Loaded Members of Concrete-filled Rectangular Steel Tube [J]. Building Structure, 2005, 35(1):3-4,18.

[6] 王 蕾,江 雪. 矩形钢管混凝土短柱受压承载力计

- 算[J]. 桂林工学院学报, 2003, 23(4): 441-444.
- WANG Lei, JIANG Xue. Calculation of Load Capacities for Short Concrete-filled Steel-tube Columns with Rectangular Section[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2003, 23(4): 441-444.
- [7] 蒋涛, 沈之容, 余志伟. 矩形钢管混凝土轴压短柱承载力计算[J]. 特种结构, 2002, 19(2): 4-6.
- JIANG Tao, SHEN Zhi-rong, YU Zhi-wei. Calculating Analysis of the Load Capacity of Steel Hollow Rectangle Short Columns Filled with Plain Concrete Under Axial Load[J]. Special Structures, 2002, 19(2): 4-6.
- [8] 龙跃凌, 蔡健, 黄炎生. 矩形钢管混凝土短柱轴压承载力[J]. 工业建筑, 2010, 40(7): 95-99.
- LONG Yue-ling, CAI Jian, HUANG Yan-sheng. Ultimate Capacity of Axially-loaded Rectangular CFT Stub Columns[J]. Industrial Construction, 2010, 40(7): 95-99.
- [9] YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Applications[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [10] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [11] 郭红香, 赵均海, 魏雪英. 方钢管混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 9-11, 4.
- GUO Hong-xiang, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Analysis of Bearing Capacity of Concrete-filled Square Steel Tube Column Under Axial Load[J]. Industrial Construction, 2008, 38(3): 9-11, 4.
- [12] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of Centrally Loaded Concrete-filled Steel-tube Short Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [13] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- ZHAO Jun-hai. Unified Strength Theory and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [14] 张志权, 赵均海, 张玉芬, 等. 复合钢管混凝土柱轴压承载力的计算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 67-70.
- ZHANG Zhi-quan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Yu-fen, et al. Axial Bearing Capacity of Composite Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 67-70.
- [15] 赵均海, 孟晓健, 刘建军, 等. 圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 70-74.
- ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, et al. Bearing Capacity of Concrete-filled Double-skin Steel-tube Stub Column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 70-74.
- [16] 翟越, 赵均海, 计琳, 等. 钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 55-58.
- ZHAI Yue, ZHAO Jun-hai, JI Lin, et al. Unified Solutions on Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 55-58.
- [17] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 40-46.
- YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 40-46.
- [18] 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.
- [19] SHAKIR-KHALIL H, ZEGHICH E J. Experimental Behavior of Concrete Filled Rolled Rectangular Hollow-section Columns[J]. The Structural Engineer, 1989, 67(19): 346-353.
- [20] SCHNEIDER S P. Axially Loaded Concrete Filled Steel Tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1125-1138.