

文章编号:1673-2049(2009)02-0063-05

外方内圆钢管混凝土轴压承载力计算方法

张志权¹,赵胜民²,张玉芬¹,吴涛¹

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061; 2. 陕西省第八建筑工程公司,陕西 西安 710068)

摘要:考虑内外钢管对核心混凝土的双层约束作用以及钢管因环向受拉导致纵向应力降低的影响,对内圆钢管增强方钢管混凝土组合柱的核心混凝土和内外薄壁钢管的轴向极限应力分别进行了理论分析。利用双剪统一强度理论和薄壁圆筒理论计算了钢管的轴压承载力及混凝土在三向受压状态下的轴压承载力,并通过分析内圆钢管径厚比和直径的变化对组合柱轴压承载力的影响,将内圆钢管增强方钢管混凝土的承载力与试验中纯方钢管混凝土柱进行了比较。结果表明:所得组合柱的轴压承载力与文献的试验结果吻合较好;内圆钢管对方钢管混凝土柱的增强作用主要体现在有效增强对核心混凝土的约束作用,大大提高了组合柱的力学性能。

关键词:内圆钢管;方钢管混凝土柱;轴压;极限承载力;径厚比

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Calculation Method of Axial Bearing Capacity of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns Reinforced by Inner Circular Steel Tube

ZHANG Zhi-quan¹, ZHAO Sheng-min², ZHANG Yu-fen¹, WU Tao¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. The Eighth Building Engineering Co., Ltd. of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: With consideration of the double confinement and the decrease of longitudinal stress because of the hoop tension, the ultimate stress of the inner and outer steel tube as well as the inner concrete under axial ultimate stress state were analyzed respectively. The bearing capacity of steel tube was calculated by using the twin shear unified strength theory and the theory of thin-wall cylinder, and the axial bearing capacity of concrete under three-direction compression was also got. Through analyzing that the axial bearing capacity of compound column was influenced by diameter-to-thickness ratio and diameter of inner circular steel tube, a comparison was conducted between the results of the bearing capacity of the concrete-filled square steel tubular columns and that reinforced by the inner circular steel tube. The results show that the axial bearing capacities of the compound column under axial compression agree well with the experimental results of reference. Strength contribution of the inner circular steel tube is that provides particular reinforcement for the inner concrete, so that the concrete-confined square steel tubular column reinforced by inner circular steel tube is greatly improved in mechanics behavior.

Key words: inner circular steel tube; concrete-filled square steel tubular column; axial compression; ultimate bearing capacity; diameter-to-thickness ratio

收稿日期:2009-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50608004);陕西省自然科学基金研究计划项目(SJ08E214)

作者简介:张志权(1973-),男,陕西岐山人,讲师,工学硕士,E-mail:zzqca@163.com。

0 引言

方钢管混凝土中加入圆钢管能发挥圆钢管约束性能好的优点,既可以提高方钢管混凝土柱的抗剪能力和延性及方钢管混凝土结构的承载力,同时具有节点构造简单、外型整洁美观、节点处理简便等特点,因而在工程界日益受到重视。

关于钢管混凝土结构轴压承载力的确定,目前常用的计算方法可概括为 2 类:极限承载力叠加法和基于试验的考虑含钢率(套箍系数)的回归法^[1]。本文中笔者采用叠加法对内圆增强方钢管混凝土柱的承载能力进行了研究,将该组合柱分成内外钢管、内外层混凝土 4 个部分,采用不同的强度准则分析各部分的极限承载能力,根据极限平衡原理得出了该组合柱的轴压承载力,将得出的计算结果与文献试验数据进行了对比,同时分析了内圆钢管的径厚比和直径与组合柱轴压承载力的关系,得出了最优的内圆钢管设计值。将内圆增强方钢管混凝土的承载力与试验中纯方钢管混凝土柱进行了比较。

1 组合柱轴压工作机理分析

文献[2]中得出:方钢管对核心混凝土的约束力主要集中在 4 个角上,并且约束力很不均匀,角部的混凝土受的约束强,边部中间管壁的混凝土受的约束弱,约束力没有圆钢管对内部混凝土的约束力强。当方钢管达到极限强度时,角部钢管发生塑性变形,边部中间管壁发生局部失稳,混凝土被压碎。可以看出,方钢管的约束作用不如圆钢管的约束作用明显,即方形截面钢管混凝土承载力的提高不如圆形截面钢管混凝土构件,因此采用内圆钢管增强方钢管混凝土结构有较强的理论意义和工程价值。

由文献[3]、[4]可知:在加载初期,内钢管与混凝土之间就有压力存在,在这种压力作用下,内钢管局部屈曲延缓;当荷载增大时,随着混凝土泊松比的增大并超过钢材时,截面整体开始进入塑性阶段,混凝土和钢管之间产生相互作用力(紧箍力和鼓胀力),这在内外钢管和内外层混凝土之间均同时产生,混凝土处于三向受压状态,混凝土的承载力得到提高,钢管也由于混凝土挤压应力的存在,其抗变形能力有所增强。外层混凝土得到方钢管的约束力,同时对内钢管产生包裹作用可延缓内钢管过早出现凸皱,从而使内层混凝土同时得到内外钢管的环向紧箍力,获得更高的塑性阶段;在外钢管屈服后,其对混凝土的约束作用显著增强,随着荷载的进一步

增大,方钢管和内钢管相继屈服,发生塑流现象,试件轴向应变发展加剧,钢管所受的环向拉应力不断增大,混凝土中的微裂缝亦不断扩展,直到试件破坏。

2 极限承载力计算公式的推导

2.1 极限平衡法

由于方钢管混凝土内部约束机理复杂,在计算中将其等效为圆钢管受力情况进行分析,如图 1 所示。在极限强度破坏平衡下,内外钢管处于轴压、环拉和径向受压的三向应力状态,混凝土处于三向应力状态,截面受力如图 2 所示。

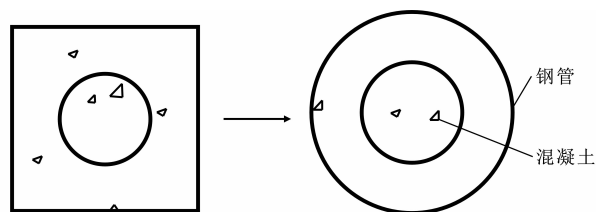


图 1 截面的等效

Fig. 1 Equivalent Cross-section

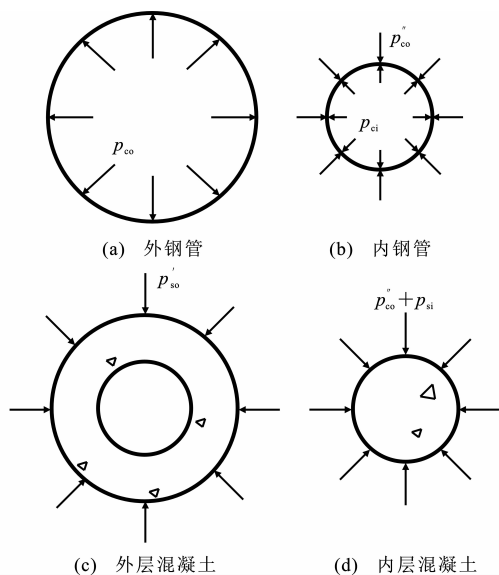


图 2 组合柱轴压受力

Fig. 2 Axial Compressive Forces of Compound Column
由极限平衡法得

$$N = N_{so} + N_{si} + N_{co} + N_{ci} \quad (1)$$

式中: N 、 N_{so} 、 N_{si} 、 N_{co} 、 N_{ci} 分别为组合柱、外钢管、内钢管、外层混凝土及内层混凝土的极限承载力。

2.2 钢管承载力计算

2.2.1 双剪统一强度理论

1991 年,俞茂宏在其双剪强度理论的基础上,以双剪应力单元体为物理模型,建立了一种全新的考虑了中间主应力影响的适用于不同材料的双剪统

一强度理论^[5],其主应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} F &= \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F &= \frac{\alpha}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_s & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为 3 个主应力; α 为材料的拉压强度比, $\alpha = \sigma_s / \sigma_c$, σ_s 、 σ_c 分别为材料的拉伸屈服极限和压缩屈服极限; b 为加权参数,反映了中间切应力及相应作用面上正应力对材料屈服或破坏的影响。

绝大多数钢管混凝土中采用的钢管均满足径厚比(或边厚比)大于或等于 20,因此将钢管视为薄壁钢管。由薄壁圆筒理论得,轴向压应力 σ_z 、径向压应力 σ_r 和环向拉应力 σ_θ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= N_s / (2\pi r t) \\ \sigma_r &= -p \\ \sigma_\theta &= pr/t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: N_s 为钢管所承受的轴向压力; p 为核心混凝土对钢管的径向压应力; r 、 t 分别为钢管的外壁半径和壁厚。

根据薄壁圆筒理论,轴压下钢管的承载力^[6]为

$$N_s = 2\pi r t \sigma_s \frac{1+b}{\alpha} - 2\pi r^2 p \frac{1+b}{\alpha} - 2\pi r t a b p \quad (4)$$

由上述可知,钢管的承载力是 p 的函数,要确定最大承载力就必须确定相应的侧向力。根据试验分析,组合柱极限状态下,内外钢管均达到屈服。当钢管的环向应力达到钢管屈服极限而发生大变形时,失去约束能力,此时钢管混凝土的承载力达到最大值。由环向拉应力强度条件可得最大侧向力 σ_θ ,即

$$\sigma_\theta = \begin{cases} pr/t \leq f_{so} \\ pr/t \leq f_{si} \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_{so} 、 f_{si} 分别为外钢管和内钢管的屈服强度。

2.2.2 方钢管承载力

将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圆钢管混凝土的钢与混凝土面积,即

$$\left. \begin{aligned} r_o &= B/\sqrt{\pi} = 0.564 \, 2B \\ t_o &= [r_o - (B - 2t_s)]/\sqrt{\pi} = 0.564 \, 2[r_o - (B - 2t_s)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: B 、 t_s 分别为方钢管混凝土的外边长和钢管壁厚; r_o 、 t_o 分别为等效圆钢管外壁半径和钢管壁厚。

由于方钢管对混凝土的不均匀约束,引入了考虑边厚比影响的等效约束折减系数 ξ ,将等效圆钢管对混凝土的均匀约束进行折减^[7]。令边厚比 $v = t/B$,则其表达式为

$$\xi = 66.474 \, 1v^2 + 0.991 \, 9v + 0.416 \, 18 \quad (7)$$

由式(5)得 $p_{so} = t_o f_{so} / r_o$,其中 p_{so} 为方钢管对

外层混凝土的侧向力,故等效圆钢管对外层混凝土产生的侧向力 p'_{so} 为

$$p'_{so} = \xi t_o f_{so} / r_o \quad (8)$$

将式(8)代入式(4),即得到方钢管的极限承载力。由于大多数钢材是具有明显屈服点的材料,并且拉压比相同,在应用统一强度理论时取材料拉压强度比 $\alpha = 1$ 。当 $b = 0.5$ 时,可得 Mises 屈服准则的线性逼近公式,即

$$N_{so} = 3\pi r_o t_o f_{so} (1 - \xi) - \pi t_o^2 \xi f_{so} \quad (9)$$

2.2.3 内圆钢管承载力

由图 2 可知,内圆钢管不仅受内层混凝土的紧箍力 p'_{co} 作用,同时还受外层混凝土的反向约束力 p_{si} 作用,故 $p_{si} = p_{ci} - p'_{co}$,因 $2\pi r_i p'_{co} = 2\pi r_o p'_{so}$,所以

$$p_{si} = p_{ci} - \frac{r_o}{r_i} p'_{so} \quad (10)$$

式中: p_{ci} 为混凝土侧向力; r_i 为内圆钢管外壁半径。

由式(5)得

$$p_{si} = t_i f_{si} / r_i \quad (11)$$

式中: t_i 为内圆钢管壁厚。

将式(11)代入式(4),即得到内圆钢管的极限承载力,Mises 线性逼近计算值为

$$N_{si} = -\pi t_i^2 f_{si} \quad (12)$$

2.3 混凝土承载力计算

2.3.1 三向受压混凝土轴压强度

由于内外钢管的约束作用,内外层混凝土均假定处于三向受压状态,混凝土的轴向应力 f'_c 与 p 之间的关系为^[8]

$$f'_c = f_c (1 + 1.5 \sqrt{\frac{p}{f_c}} + 2 \frac{p}{f_c}) \quad (13)$$

式中: f_c 为 $p = 0$ 时混凝土的轴心抗压强度。

2.3.2 外层混凝土承载力

本文中对方钢管对混凝土的约束不作有效约束区和非有效约束区的划分,而是采用混凝土强度折减系数 $\gamma_u = 1.67 D_c^{-0.112}$ 来考虑非有效约束区侧向约束减弱的影响^[9],其中 D_c 为等效圆钢管混凝土钢管的内径。

外层混凝土受到外钢管的侧向约束力 p_{co} 作用,其值为

$$p_{co} = p'_{so} = \xi t_o f_{so} / r_o \quad (14)$$

在引入混凝土强度折减系数和等效约束折减系数后,其外层混凝土的极限承载力为

$$\begin{aligned} N_{co} &= A_{co} \gamma_u f'_{co} = A_{co} \gamma_u f_c (1 + 1.5 \sqrt{\frac{p_{co}}{f_c}} + 2 \frac{p_{co}}{f_c}) = \\ &\pi (r_o^2 - r_i^2) \gamma_u f_c (1 + 1.5 \sqrt{\frac{\xi t_o f_{so}}{r_o f_c}} + 2 \frac{\xi t_o f_{so}}{r_o f_c}) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: A_{co} 为外层混凝土截面面积; f_{co}' 为外层混凝土强度。

2.3.3 内层混凝土承载力

由式(10)可得内层混凝土侧向力为

$$p_{ci}=p_{si}+p_{co}=p_{si}+\frac{r_o}{r_i}p_{so}=\frac{t_i}{r_i}f_{si}+\frac{\xi t_o}{r_i}f_{so}\quad(16)$$

将式(16)代入式(13),可得到极限承载力为

$$N_{ci}=A_{ci}f_{ci}=A_{ci}f_c(1+1.5\sqrt{\frac{p_{ci}}{f_c}}+2\frac{p_{ci}}{f_c})=\\ \pi r_{ci}^2f_c[1+1.5\sqrt{\frac{1}{f_c}(\frac{t_i}{r_i}f_{si}+\frac{\xi t_o}{r_i}f_{so})}+\\ \frac{2}{f_c}(\frac{t_i}{r_i}f_{si}+\frac{\xi t_o}{r_i}f_{so})]\quad(17)$$

式中: A_{ci} 为内层混凝土截面面积; f_{ci}' 为内层混凝土强度; r_{ci} 为内层混凝土直径。

将式(9)、(12)、(15)、(17)代入式(1)可得到内圆增强方钢管混凝土组合柱的轴压承载力。

3 公式的验证与分析

用得到的计算公式分析文献[3]的试验数据,结果见表1。由表1可以看出,本文计算值与试验值吻合较好,证明本文计算方法可应用于该组合结构中,内钢管分担的承载力很小,故组合柱在极限状态时,承载力基本上都是由方钢管混凝土承担的,内钢管只起到了横向约束混凝土的作用。为更好地了解

表 1 承载力计算值与试验值对比

Tab. 1 Comparisons of Calculated Values and Experimental Values

试件编号	<i>B</i> /mm	<i>t</i> /mm	<i>f</i> _{so} /MPa	2 <i>r</i> _i /mm	<i>t</i> _i /mm	<i>f</i> _{si} /MPa	<i>f</i> _c /MPa	<i>N</i> _{shi} /kN	<i>N</i> _{si} /kN	<i>N</i> /kN	<i>N</i> · <i>N</i> _{sh} ⁻¹
G1-2	120	2.6	407.5	58.5	1.4	352.5	23.6	980	2.2	1 031.0	1.05
G1-3	120	2.6	407.5	74.0	0.9	680.0	23.6	1 040	1.7	1 111.9	1.06
G1-4	120	2.6	407.5	83.0	0.9	597.0	23.6	1 080	1.6	1 113.0	1.03

注: N_{shi} 为承载力试验值; N 为统一强度理论的 Mises 线性逼近的承载力计算值,即本文计算值。

内圆钢管对方钢管混凝土的增强作用,笔者对文献[3]中内圆钢管在钢管强度和含钢率不变的情况下进行参数转换,组合柱承载力与内圆径厚比及直径比的关系如图3所示。

80 之间,直径在 0.7*B*~0.8*B* 范围内,内圆钢管对方钢管混凝土柱的承载力增强作用明显。根据此规律,本文中在文献试验方钢管混凝土中虚设了与方钢管同强度的内圆钢管,计算其组合柱承载力,发现内圆钢管增强的方钢管混凝土柱承载力提高率基本上在 20% 以上,结果见表2。

4 结 语

本文中考虑了内外钢管对核心混凝土的双层约束作用以及钢管因环向受拉导致纵向应力降低的影响,对内圆钢管增强方钢管混凝土组合柱的核心混凝土和内外薄壁钢管的轴向极限应力分别进行了理论分析。通过双剪统一强度理论和薄壁圆筒理论计算了钢管的极限承载力,并计算了三向受压混凝土轴压强度,得到了组合柱的轴压承载力计算公式。结果表明,内圆钢管对方钢管混凝土柱的增强作用除了贡献自身强度外,主要体现在可以有效增强对核心混凝土的约束作用,从而大大提高该组合柱的力学性能。内填圆钢管对方钢管混凝土的轴压性能增强作用明显,可大大提高极限承载力,该组合柱具有很好的应用前景,本文计算结果可作为进一步试验和理论研究的基础。

参考文献:

References:

[1] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版

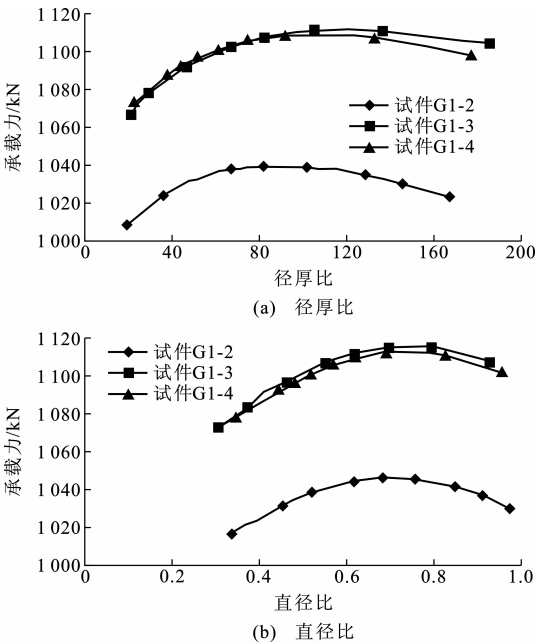


图 3 内圆钢管参数与组合柱承载力的关系

Fig. 3 Relations Between Parameters of Inner Circular Steel Tube and Bearing Capacities of Compound Column

由图3可以看出,随着内圆钢管径厚比和直径的变化,组合柱的承载力随之变化,径厚比*v*在70~

表 2 内圆钢管增强方钢管混凝土柱与纯方钢管混凝土柱轴压承载力比较

Tab. 2 Comparisons of Axial Bearing Capacity of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns and That Reinforced by Inner Circular Steel Tubes

试件编号	B/mm	t/mm	f_{so}/MPa	$2r_i/\text{mm}$	t_i/mm	v	f_c/MPa	N_{shi}/kN	N/kN	$\frac{N-N_{shi}}{N_{shi}}/\%$	数据来源
CR4-C-8	215	4.38	262.0	160	2.0	80	53.8	3 837	4 810.6	25.4	文献[9]
CR4-D-4-2	323	4.38	262.0	220	2.8	79	27.5	4 830	5 770.9	19.5	
CR8-C-9	180	6.60	824.0	120	1.5	80	61.0	5 870	6 987.9	19.0	
sczs1-1-4	120	3.84	330.0	80	1.0	80	33.0	1 080	1 351.0	25.1	文献[10]
sczs1-1-2	120	3.84	330.1	80	1.0	80	20.9	882	1 094.8	24.1	
sczs1-2-4	140	3.84	330.1	100	1.2	83	36.6	1 470	1 803.9	22.7	
sczs2-1-4	120	5.86	321.1	80	1.0	80	35.2	1 460	1 795.6	23.0	
sczs2-1-1	120	5.86	321.1	80	1.0	80	20.1	1 176	1 437.0	22.2	
CFRT40-3	200	5.00	366.0	140	1.7	82	24.7	2 016	2 776.4	37.7	文献[11]
CFRT40-5	200	5.00	366.0	140	1.7	82	32.5	2 468	3 179.4	28.8	
CFRT60-4	300	5.00	366.0	210	2.5	84	28.3	4 603	5 616.7	22.0	
CFRT60-5	300	5.00	366.0	210	2.5	84	32.5	4 381	6 065.3	38.4	

社,2003.

ZHAO Jun-hai. Strength Theory and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press,2003.

[2] 王 菁,关 罡,李四平,等. 方钢管砼轴压柱承载力的计算[J]. 建筑结构,1997(5):13-15.

WANG Jing, GUAN Gang, LI Si-ping, et al. Computation of Critical Loading for Concrete Filled Square Steel Tubular Columns Under Axial Compression[J]. Building Structure, 1997(5):13-15.

[3] 裴万吉. 复式钢管混凝土柱力学性能分析[D]. 西安: 长安大学,2005.

PEI Wan-ji. Analysis on Mechanics Behavior of Composite Concrete-filled Steel Tubes [D]. Xi'an: Chang'an University,2005.

[4] 王志浩,成 戎. 复合方钢管混凝土短柱的轴压承载力[J]. 清华大学学报: 自然科学版,2005,45(12): 1596-1599.

WANG Zhi-hao, CHENG Rong. Axial Bearing Capacity of Composite-sectioned Square Concrete-filled Steel Tubes[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2005,45(12):1596-1599.

[5] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社,2002.

YU Mao-hong. Strength Theory for Concrete and Its Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

[6] 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.

[7] 张淑云,白国良,高志刚. 高层组合框架-混凝土筒体混合结构静力数值分析[J]. 西安科技大学学报, 2009,29(1):36-40.

ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, GAO Zhi-gang. Static Characteristics of Core-RC and Composite Frame Hybrid Structure in High-rise Buildings[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(1):36-40.

[8] 蔡绍怀,焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J]. 建筑结构学报,1997,18(6):20-25.

CAI Shao-huai, JIAO Zhan-shuan. Behavior and Ultimate Load Analysis of Multi Barrel Tube-confined Concrete Columns[J]. Journal of Building Structures, 1997,18(6):20-25.

[9] 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.

[10] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社,2004.

HAN Lin-hai. Concrete-filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press,2004.

[11] 吕西林,余 勇,陈以一,等. 轴心受压方钢管混凝土短柱的性能研究: 试验[J]. 建筑结构,1999(10):41-43.

LU Xi-lin, YU Yong, CHEN Yi-yi, et al. Studies on the Behavior of Concrete-filled Rectangular Tubular Short Column: Experiment [J]. Building Structure, 1999(10):41-43.