

复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压力学性能研究^{*}

王志滨^{1†}, 魏飞豹¹, 池思源², 余鑫¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建建泰建筑科技有限责任公司, 福建 福州 350500)

摘要:进行了9根带纵向加劲肋的复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压试验. 试验结果表明构件的承载力随着偏心距和长细比的增大而下降, 但随着核心混凝土强度的提高而提高. 基于充分验证的有限元模型, 研究复式薄壁方钢管混凝土偏压柱的工作机理, 并进行大量的参数分析. 研究表明: 外钢管的约束主要集中在角部, 混凝土承担了大部分荷载, 填充核心混凝土可改善组合构件的延性. 钢材屈服强度、内钢管混凝土含钢率和径宽比越大, 相对轴力-相对弯矩相关曲线的平衡点的横、纵坐标越小; 但是随着混凝土强度的增大, 相关曲线的平衡点的横、纵坐标均有增大的趋势; 随着长细比的增大, 轴力-弯矩相关曲线趋近于直线. 最终建议了复式薄壁方钢管混凝土偏压柱的承载力简化计算式.

关键词:复式薄壁方钢管混凝土; 纵向加劲肋; 偏压; 有限元模型; 简化计算

中图分类号: TU398.9; TU317.1

文献标志码: A

Study on Behaviour of Composite Concrete-filled Square Thin-walled Steel Tubular Columns under Eccentric Compression

WANG Zhibin^{1†}, WEI Feibao¹, CHI Siyuan², YU Xin¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Jiantai Building Technologies Co Ltd, Fuzhou 350500, China)

Abstract: The tests of 9 composite concrete-filled square thin-walled steel tubular (CCFSTST) columns with longitudinal stiffeners under eccentric compression were carried out. The test results indicated that the load-carrying capacity decreased with the increase of eccentricity and slenderness ratio, but increased with the increase of core concrete strength. Based on the finite element model verified by the test results, the working mechanism of CCFSTST columns was studied and the parametric analysis was conducted. It can be found that the confinement of the outer steel tube is focused on the corners of the cross-section, the majority of the load is resisted by the concrete and the ductility of the composite column is enhanced by filling core concrete. With the increase of the steel yield strength, steel ratio of inner concrete-filled steel tube and diameter to width ratio, the abscissa and ordinate values of the equilibrium point in the relative axial compression versus relative moment relationship decreased, but they increased with the increase of concrete strength. Meanwhile, with the increase of slenderness ratio, the axial compression ver-

^{*} 收稿日期: 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308124), National Natural Science Foundation of China(51308124); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01696), Natural Science Foundation of Fujian Province (2017J01696); 福州市科技计划项目(2017-G-101), Science and Technology Planning Project of Fuzhou (2017-G-101)

作者简介: 王志滨(1979-), 男, 福建惠安人, 福州大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: wangzhibin@fzu.edu.cn

sus moment relationship trended to be a straight line. Finally, the simplified model was proposed to predict the load-carrying capacity of CCFSTST columns under the eccentric compression.

Key words: composite concrete-filled square thin-walled steel tube; longitudinal stiffener; eccentric compression; finite element model; simplified model

圆钢管混凝土柱的承载力高,且塑性好,被大量应用于高耸和大跨的结构中^[1].随着材料强度的提高和截面尺寸的缩小,其耐火极限和组合抗弯刚度将迅速降低.为提高该类构件的耐火极限,文献^[2]提出了截面形状为圆套圆的复式钢管混凝土柱,该组合柱有内外两个圆钢管,同时在内管中和内外管夹层中均填充了混凝土.

文献^[2-5]接着开展了圆套圆复式钢管混凝土短柱的轴压试验,试验表明该类构件具有较高的承载力和轴压刚度以及较好的延性.文献^[6]发现方套圆复式钢管混凝土柱具有较好的抗震性能.文献^[7]的圆套圆复式钢管混凝土柱的抗火试验结果表明:核心圆钢管混凝土受到了外部混凝土的有效保护,构件的耐火极限随着内钢管厚度的增大而增大.复式方钢管混凝土具有表面平整和节点构造简单的优点,但同时使用两个钢管将导致柱子用钢量增大.因此,为减小该类组合柱的用钢量,并进一步减少焊接工作量,可采用4个带卷边的冷弯角钢焊接成带内纵肋的方形薄壁外管.纵向加劲肋已被证明是提高薄壁方钢管混凝土构件力学性能的有效方法^[8-10].

针对外管为带纵向加劲肋的薄壁方钢管的复式薄壁钢管混凝土构件,研究者开展了一系列研究.研究表明:该类构件的抗弯承载力对比薄壁方钢管混凝土构件高32.5%^[11];复式薄壁方钢管混凝土轴压短柱的承载力和延性远高于对比薄壁方钢管混凝土短柱^[12];相同长度的情况下,和对比薄壁方钢管混凝土轴压长柱相比,复式薄壁方钢管混凝土轴压长柱的稳定承载力平均提高了30%左右^[13].

但到目前为止尚未见和复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压力学性能相关的研究报道.本文进行了9个偏压柱的试验研究;采用有限元法开展机理分析和参数分析;最后建议了复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压承载力的简化计算公式.

1 试验研究

1.1 试验概况

进行了9个复式薄壁方钢管混凝土柱(截面尺

寸如图1所示)的偏压试验研究.试验的参数主要包括试件的计算长度(L_0 = 两刀铰间的距离)和偏心距(e).

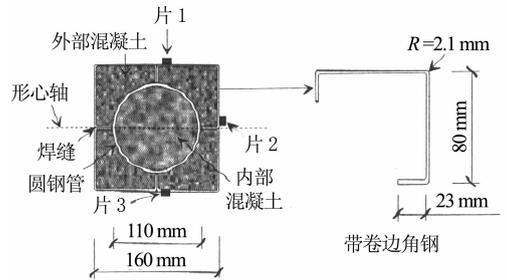


图1 构件截面

Fig. 1 Cross-section of specimens

图1中外管和内管厚度(t_o 和 t_i)分别为2.1 mm和1.95 mm; R 为外管转角外半径.外部混凝土立方体抗压强度($f_{cu,o}$)均为46.6 MPa;核心混凝土立方体抗压强度($f_{cu,i}$)包括低强与高强两种,强度值均列于表1中;外钢管和内钢管屈服强度(f_{yo} 、 f_{yi})分别为289.5 MPa和298.5 MPa.表1给出了构件的详细参数. N_{uc} 、 $N_{u,FE}$ 和 N_{uc} 分别为实测极限承载力、有限元模型预测承载力和简化公式预测承载力; λ 为长细比.构件编号定义如下:CCFST代表复式薄壁方钢管混凝土试件;第1个数字“1”和“2”分别代表 L_0 为1 190和2 290 mm;第2个数字“25”和“110”分别代表核心混凝土立方体抗压强度为25.8 MPa和109.7 MPa;第3个数字“30”和“60”分别代表 e 为30 mm和60 mm;最后一个字母“a”和“b”代表两个一样的试件.

表1 试件和试验结果
Tab. 1 Details of specimens and test results

试件编号	λ	L_0 /mm	$f_{cu,i}$ /MPa	N_{uc} /kN	$N_{u,FE}$ /kN	N_{uc} /kN
CCFST1-25-30	25.8	1 190	25.8	1 022.8	899.1	933.4
CCFST1-25-60a	25.8	1 190	25.8	644.5	638.4	717.0
CCFST1-25-60b	25.8	1 190	25.8	665.3	638.4	717.0
CCFST1-110-30	25.8	1 190	109.7	1 260.7	1 137.5	1 119.2
CCFST1-110-60	25.8	1 190	109.7	713.0	757.3	811.4
CCFST2-110-30a	49.6	2 290	109.7	992.3	940.1	962.1
CCFST2-110-30b	49.6	2 290	109.7	918.0	940.1	962.1
CCFST2-110-60a	49.6	2 290	109.7	545.0	627.1	701.5
CCFST2-110-60b	49.6	2 290	109.7	574.5	627.1	701.5

试件采用如下加工流程:1)首先加工 2 个尺寸为 170 mm×170 mm×10 mm 的钢盖板,为了和加载板可靠连接,在下盖板形心处焊接一个凸榫,在上盖板的形心处开一个直径为 111 mm 的浇筑孔,孔两侧焊接 2 个凸榫(图 2). 2)将内管和下端板焊接牢固,然后制作 4 片图 1 所示的带卷边的冷弯角钢并将其拼焊成外部方管,将外管和下端板焊接牢固. 3)在试件上端将纵向加劲肋和内管焊牢. 4)浇筑外部混凝土,并养护 1 周,之后将外部混凝土上端面打磨平整,并将上盖板和内、外钢管焊牢. 5)最后浇筑核心混凝土,待养护 1 周后将其上端面打磨平整.

试验在福建农林大学结构试验室的 500 t 压力机上进行. 试验时首先将上、下刀铰通过高强螺栓固定在压力机上;接着吊装下加载板、试件和上加载板. 试件测量装置如图 2 所示:共设置 2~4 个位移计用于量测试件轴向变形;共设置 3~5 个位移计用于量测试件的挠曲线;在试件中截面设置了 3 个应变片用于测量受拉区边缘、形心轴和受压区边缘处的纵向应变,应变片位置如图 1 所示.

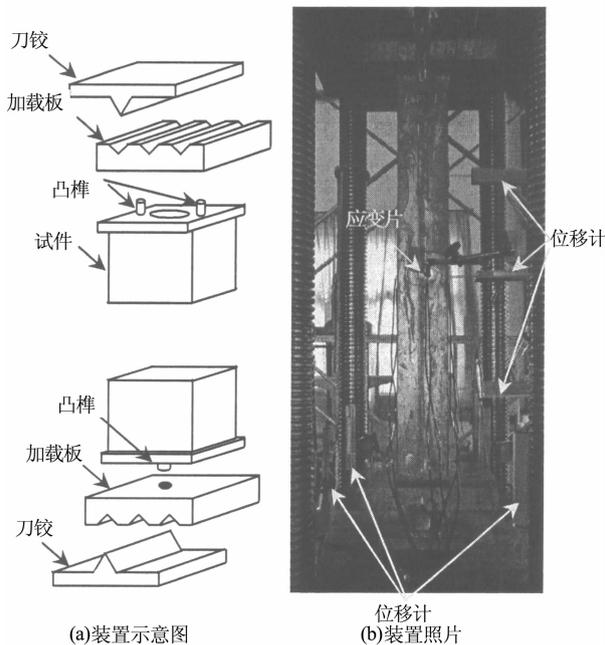


图 2 试验装置
Fig. 2 Test setup

试验采用如下加载制度: a) 预加载, 荷载为 10% 的有限元预测承载力 ($0.1N_{u,FE}$). b) 正式加载, 采用荷载加载, 荷载增量为 $0.1N_{u,FE}$, 每级持荷 2 min. c) 加载至 $0.7N_{u,FE}$ 后改用位移控制, 位移加载速率统一采用 1 mm/min, 直至钢管开裂、钢管严重屈曲或试件的承载力下降到 $0.7N_{u,FE}$.

1.2 试验过程及结果

图 3 给出了典型试件 CCFST2-110-30a 挠曲线的发展过程. 可发现荷载增长至 $0.5N_{uc}$ (N_{uc} 为构件实测的极限承载力) 以前, 试件的挠度较小; 荷载增长至 $0.8N_{uc}$ 时最大挠度出现在试件跨中, 挠曲线形状接近正弦半波; 之后试件挠度的增长速度加快, 最终全截面发展塑性, 在跨中截面形成塑性铰. 由于较大的压应力作用, 在塑性铰位置受压区边缘的钢管首先发生屈曲; 随着挠度和曲率的增加, 外钢管屈曲的范围由受压区边缘扩大到两侧.

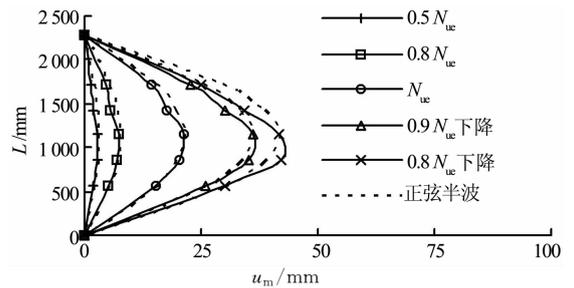


图 3 典型试件(CCFST2-110-30a)的侧向挠度
Fig. 3 Lateral deflection of the typical specimen CCFST2-110-30a

图 4 给出了所有试件的破坏模态, 图 5 给出了典型试件 CCFST2-110-60a 的破坏模态. 可发现: a) 长构件的最大挠度一般出现在跨中, 而短构件则较少出现在跨中; b) 破坏截面处受压区边缘及侧面的外管向外屈曲; c) 外钢管屈曲处的外部混凝土被压碎, 同时混凝土(包括外部和核心混凝土)的受拉区出现分布较均匀的横向裂缝; d) 由于受到内外混凝土的约束作用, 内钢管未出现局部屈曲现象.

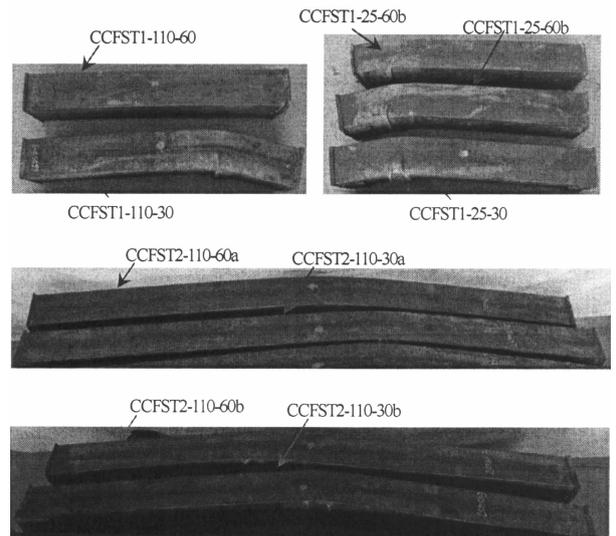


图 4 所有试件破坏模态
Fig. 4 Failure appearance of all specimens

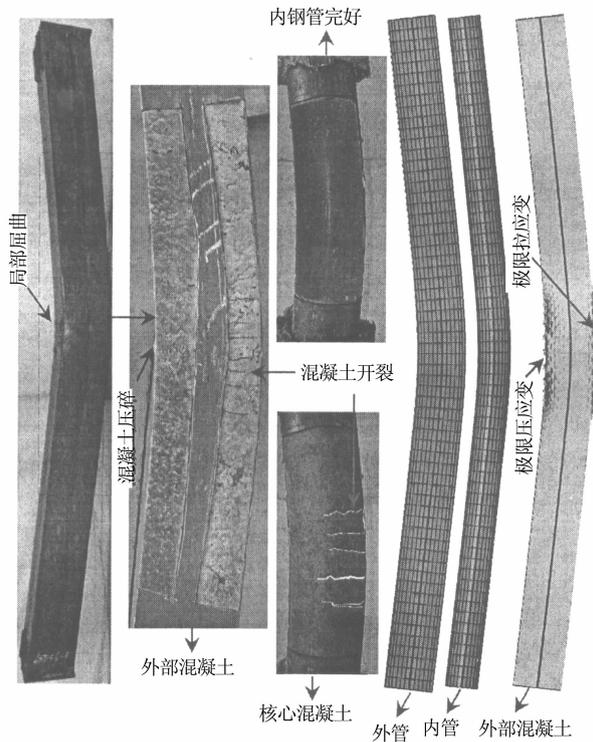


图 5 典型试件 CCFST2-110-60a 的破坏模式
Fig. 5 Failure appearance of the typical specimen CCFST2-110-60a

试件的实测荷载(N)-最大挠度(u_m)曲线列于图 6 中。由图 6 可知: 和传统钢管混凝土构件相似, 随着偏心距和长度的增大, 试件承载力显著下降, 但曲线的下降段变缓, 说明试件延性得到了显著改善。同时可见构件的承载力随着核心混凝土强度的提高而提高。图 7 给出了所有试件的实测荷载(N)-最大纵向应变(ϵ)曲线, 图中横坐标 ϵ 以受拉为正。由图 7 可发现: 1) 对于偏心较小($e=30$ mm)的试件, 加载初期试件全截面受压; 但随着荷载的增大, 构件的挠度进一步发展, 二阶弯矩的影响增大, 受拉区边缘开始发展拉应变。2) 对于偏心较大($e=60$ mm)的试件, 该类试件承受较大的弯矩, 因此从加载初期试件的中截面就存在拉应变, 纵向应变值随着挠度和曲率的增大而增大。

2 机理分析和参数分析

受试验条件和经费的限制, 试件数量有限且尺寸一般较小。有限元法常用于开展机理分析和范围较大的参数分析。

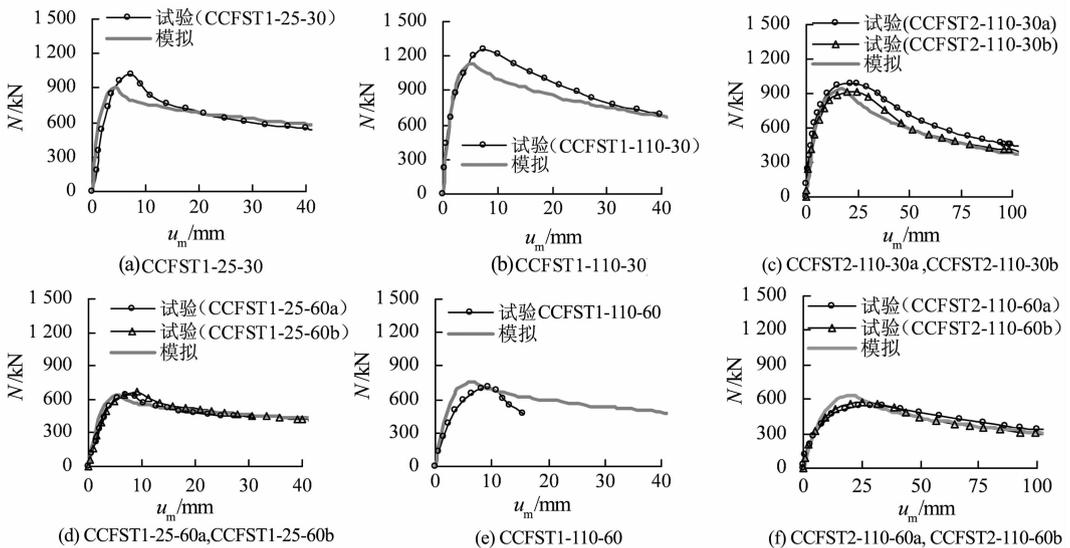


图 6 $N-u_m$ 曲线
Fig. 6 $N-u_m$ curves

2.1 有限元模型

本文采用有限元软件 ABAQUS 建立复式薄壁方钢管混凝土偏压柱的有限元模型, 材料本构采用文献[1]建议的弹塑性模型, 其中等效约束混凝土受压本构为:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 (x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \epsilon / \epsilon_0$; $y = \sigma / f'_c$; ϵ 和 σ 分别为约束混凝土的纵向应变和应力; $\epsilon_0 = \epsilon_c + 800\xi^{0.2} 10^{-6}$; f'_c 为混凝土

圆柱体抗压强度,以 N/mm^2 为单位计.

$$\eta = \begin{cases} 2 & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1.6 + 1.5/x & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25+(\varepsilon-0.5)^7]} f_c^{0.5}, 0.5 \geq 0.12 & (\text{圆钢管混凝土}) \\ \frac{f_c^{0.1}}{1.2 \sqrt{1+\xi}} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

外部混凝土只考虑外部方钢管的约束作用,其约束效应系数 $\xi = f_{y0} A_{s0} / f_{ck,o} A_{ce}$; 内部混凝土只考虑圆钢管的约束作用,其约束效应系数 $\xi = f_{yi} A_{si} / f_{ck,i} A_{ci}$ (其中 A_{s0} 、 A_{si} 和 A_{ci} 分别为外管、内管和核心混凝土的截面面积; A_{ce} 为外管内所包含的空隙截面面积; $f_{ck,o}$ 和 $f_{ck,i}$ 分别为外部和核心混凝土的轴心抗压强度标准值). 该模型得到了 340 个轴压构件的验证,可用于模拟圆、方、矩形钢管混凝土构件^[14]. 混凝土和钢管分别采用 C3D8R 实体单元和 S4R 壳单元. 混凝土和钢材间的法向接触采用“硬

接触”,切向采用“库伦摩擦模型”. 文献[13]的研究表明残余应力和角部的冷弯强化效应对构件承载力的影响可以忽略,因此本文未考虑两者的影响. 同时,模型充分考虑了几何非线性的影响. 对于压弯构件,其几何初始缺陷(初偏心和初弯曲)远小于实际偏心距,且该缺陷的影响可能是有利的,因此在本文的有限元模型中忽略其影响;而文献[8]的研究表明设置了纵向加劲肋后,钢管表面的初始缺陷对薄壁方钢管混凝土构件的力学性能影响较小,因此在本文的有限元模型中也忽略其影响. 网格划分和边界条件详见图 8. 构件采用半模型,其两端平面分别耦合在两个参考点上,参考点到截面中和轴的距离为偏心距 e ,右侧参考点限制除绕 x 轴转动外的所有自由度;左侧参考点限制除绕 x 轴转动和沿 z 轴平动外的所有自由度. 荷载加在左参考点上,采用位移加载.

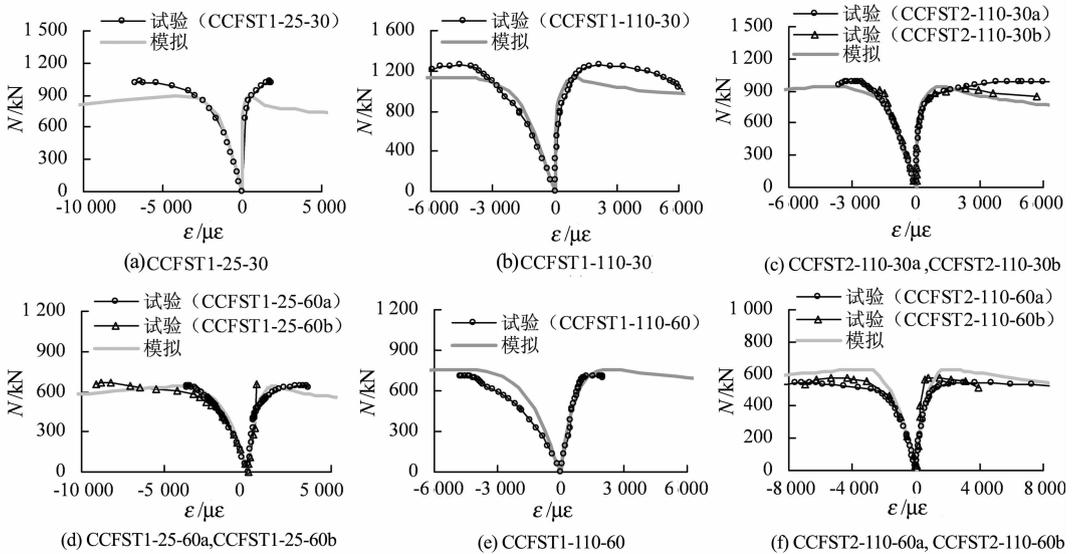


图 7 $N-\varepsilon$ 曲线
Fig. 7 $N-\varepsilon$ curves

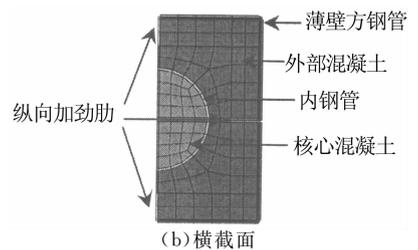
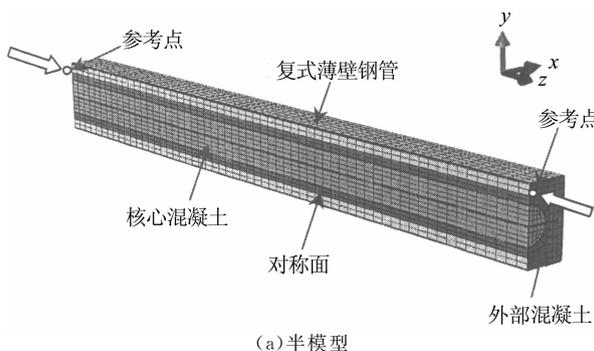


图 8 有限元模型
Fig. 8 Finite element model

图 5 中给出了典型试件 CCFST2-110-60a 的有限元模拟的破坏模态和试验结果比较, 两者吻合较好. 均表现为: 1) 外管局部屈曲; 2) 混凝土在塑性铰截面的受压区边缘发展最大纵向压应变, 在受拉区边缘发展最大纵向拉应变; 3) 内钢管保持完整.

以上模型被成功用于模拟传统带肋薄壁方钢管混凝土柱^[8]和复式薄壁方钢管混凝土构件^[13]. 图 6 和图 7 给出了本文预测和实测荷载-变形曲线的比较; 同时有限元预测极限承载力 ($N_{u,FE}$) 还列于表 1 中, $N_{u,FE}/N_{uc}$ 的均值和均方差分别为 0.987 和 0.084. 因此该模型可很好地模拟复式薄壁方钢管混凝土柱在偏压荷载作用下的受力全过程.

2.2 机理分析

典型算例被用于开展进一步的机理分析, 算例基本参数具体如下: 外管宽度 $B=400$ mm, $t_o=4$ mm, 内管外径 $D=200$ mm, $t_i=5$ mm, 加劲肋高度 $h_r=55$ mm, $R=4$ mm, 内外钢管均采用 Q345, 外部混凝土和核心混凝土分别采用 C40 和 C60, λ 为 30, e 为 100 mm.

典型构件及其组件的 $N-u_m$ 曲线如图 9 所示. 图中给出了 6 条曲线, 分别是考虑混凝土软化影响的整体曲线、不考虑混凝土软化的整体曲线和考虑混凝土软化影响后 4 个组件的曲线. 由图 9 可知: 1) 外部混凝土、核心混凝土、外钢管和内钢管各承担 61.3%、17.6%、10.1% 和 11.1% 的荷载, 可见混凝土承担了约 80% 的荷载. 2) 构件的峰值挠度 (峰值荷载作用时) 主要由外部混凝土和内钢管决定. 3) 当 $N-u_m$ 曲线进入下降段时, 核心混凝土仍可承担更大的荷载, 因此核心填充混凝土可在一定程度上改善构件的延性.

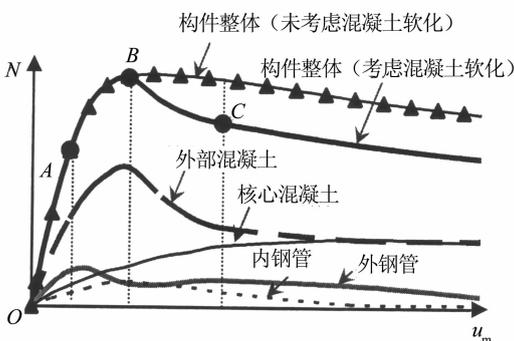


图 9 典型构件的 $N-u_m$ 曲线

Fig. 9 $N-u_m$ curve of the typical specimen

为便于分析, 本文将典型试件的 $N-u_m$ 曲线分为

3 阶段: 1) 弹性段 (OA). 大部分材料处于弹性段; 2) 弹塑性段 (AB). 跨中截面受压区边缘的钢管开始屈服, 受压区边缘的混凝土纵向应力接近其圆柱体抗压强度; 3) 软化段 (BC). C 点时可发现由于挠度增加引起的二阶弯矩效应导致构件的承载力仅下降 2.2%, 而混凝土软化导致承载力下降了 19.1%, 可见对于该典型构件承载力下降的主要原因是混凝土软化.

跨中截面各部分的纵向应力分布和发展过程如图 10 所示. 图中 $f_{c,o}$ 和 $f_{c,i}$ 分别为外部混凝土和核心混凝土的圆柱体抗压强度, f_y 为钢材屈服强度. 典型构件跨中截面几个特征点的外钢管、外部混凝土、内钢管和核心混凝土间的法向约束应力 (p)-挠度 (u_m) 曲线列于图 11 中, 特征点 1~8 的位置也列于图 11 中.

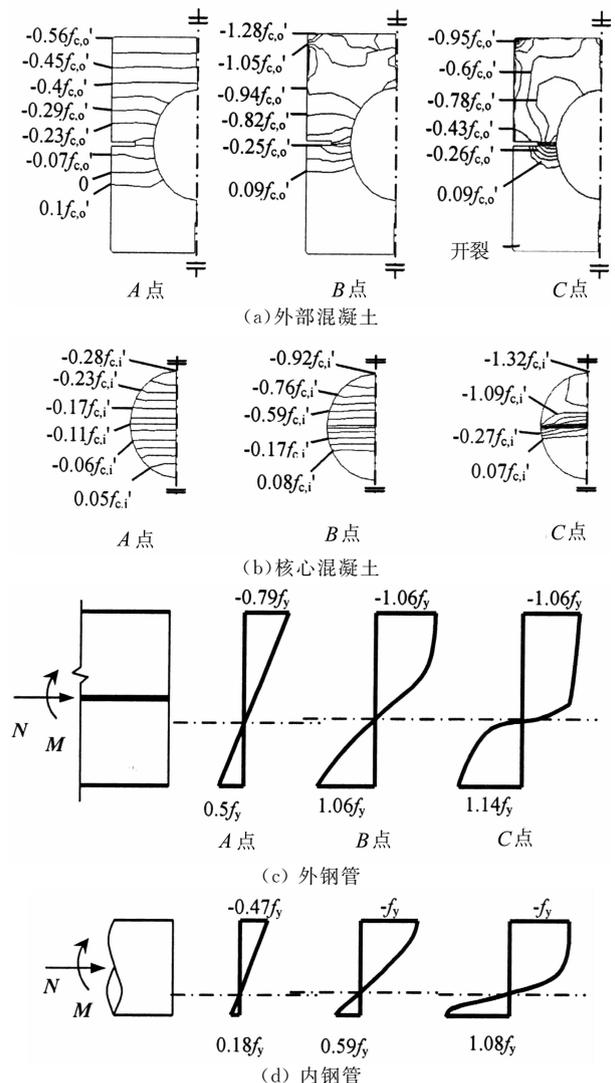


图 10 纵向应力分布

Fig. 10 Longitudinal stress distribution

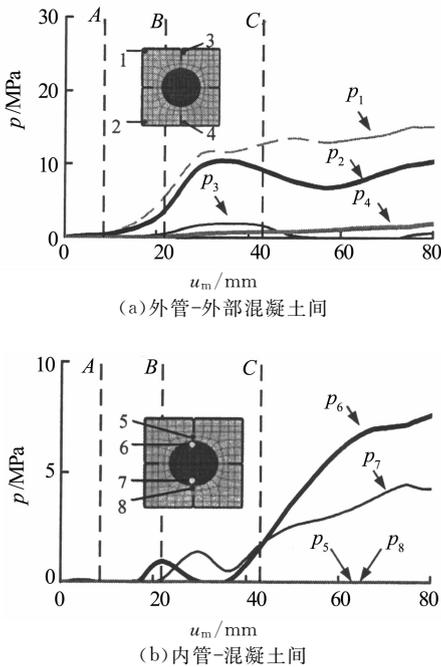


图 11 钢管与混凝土间的接触力

Fig. 11 Interaction between steel tube and concrete

由图 10 和图 11 可发现如下规律:

① A 点荷载作用时, 外钢管、内钢管、外部混凝土和核心混凝土最大纵向压应力值分别为 $0.79f_y$ 、 $0.47f_y$ 、 $0.56f_{c.o}$ 和 $0.28f_{c.i}$ 。外钢管和外部混凝土纵向应力较大的原因是外钢管和外部混凝土受压区边缘距离构件的中和轴较远。这一阶段混凝土和钢管的变形较小, 因此 4 个组件间的接触力几乎为零。

② 峰值荷载作用时 (B 点), 由于受拉区混凝土裂缝向上发展, 中和轴向上移动。此时构件的曲率增大, 外管部分发展塑性, 其受拉区和受压区边缘的钢材纵向应力值超过其屈服强度; 内管受压区边缘也开始发展塑性, 但大部分截面仍处于弹性阶段。由于外管角部的约束作用, 外部混凝土角部区域的最大纵向压应力值 ($1.28f_{c.o}$) 远大于其抗压强度; 其余区域的纵向应力值接近或小于其抗压强度。同时可见, 此时由于受压区混凝土受压产生较大的横向膨胀, 在外管的受压区边缘的角部形成较大约束力 (点 1 处约 5 MPa); 由于相似的原因, 内管受压区边缘也发展了一定的约束力 (点 6 处约 1 MPa); 同时在外管的受拉区边缘的角部形成较大约束力 (点 2 处约 5 MPa), 原因是外管受拉区边缘发展了较大纵向拉应变, 导致该处钢管环向收缩, 从而在点角部形成较大的被动约束力; 其余位置的接触应力均较小。

③ 荷载下降到 80% 峰值荷载后 (C 点), 中和轴

位置没有明显变化。此时混凝土的纵向应力分布不均匀, 由于发展了较大的纵向应变, 外部混凝土受压区边缘的最大纵向压应力值仅为 $0.95f_{c.o}$; 但核心混凝土距离中和轴较近, 其最大纵向应变值较小, 且核心圆钢管的有效约束作用又可提高核心混凝土的峰值应变, 因此此时核心混凝土的最大纵向压应力值 ($1.32f_{c.i}$) 远大于其抗压强度。这一阶段外管和内管进一步发展塑性, 更多钢材的纵向应力值超过其屈服强度。这一阶段, 点 1 和点 2 处的接触应力增大到 10 MPa 左右, 且较为稳定; 点 6 处的接触应力增大到 2 MPa 左右, 且继续保持增长态势; 此时内管受拉区边缘 (点 7 处) 的接触应力也增长到 2 MPa 左右, 且继续保持增长态势, 原因是此时内管受拉区边缘发展了较大的纵向拉应变, 导致该处钢管环向收缩较明显, 从而在点 7 处形成了一定的被动约束力。

2.3 参数分析

图 12 给出了典型短构件 $N/N_u-M/M_u$ 相关曲线 (N 和 M 分别为构件承受的轴压力和弯矩; N_u 和 M_u 分别为构件的轴压承载力和抗弯承载力), 该曲线包括直线段 (CD) 和曲线段 (ABC) 两个部分, 可见相关曲线形状由点 B 的位置决定。

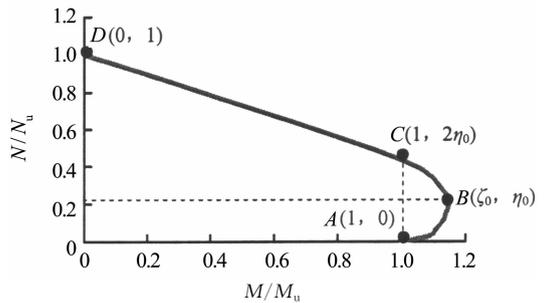


图 12 典型 $N/N_u-M/M_u$ 关系曲线
Fig. 12 Typical $N/N_u-M/M_u$ relation

图 13 对复式薄壁方钢管构件的 $N/N_u-M/M_u$ 相关曲线开展参数分析, 可能的影响参数包括: 外钢管屈服强度 f_{y0} 、内钢管屈服强度 f_{y1} 、外部混凝土强度 $f_{c.u.o}$ 、核心混凝土强度 $f_{c.u.i}$ 、径宽比 D/B 和内钢管混凝土含钢率 $\alpha_{s,i} = A_{s1}/A_{ci}$ (A_{s1} 和 A_{ci} 分别为内钢管和核心混凝土的截面面积)。图 13 中算例的基本参数具体如下: $B=400$ mm, $t_o=4$ mm, $D=280$ mm, $t_i=5$ mm, $h_r=55$ mm, $R=4$ mm, 钢材采用 Q345, 外部和核心混凝土分别采用 C40 和 C60, $\lambda=10$ 。

由图 13 可知: B 点的横坐标 ζ_0 和纵坐标 η_0 随

着 f_{y_o} 、 f_{y_i} 、 $\alpha_{s,i}$ 和 D/B 的增大而减小, 原因是钢材对 N/N_u - M/M_u 相关曲线的“影响”随着以上 4 个参数的增大而增大。

同时可见, ζ_o 和 η_o 随着 $f_{cu,o}$ 和 $f_{cu,i}$ 的增大而增大。原因是混凝土对 N/N_u - M/M_u 相关曲线的“影响”随着以上 2 个参数的增大而增大。

此外, 和普通钢管混凝土相似, B 点的横、纵坐标值随着 λ 的增大而减小, N/N_u - M/M_u 关系曲线趋近于直线。

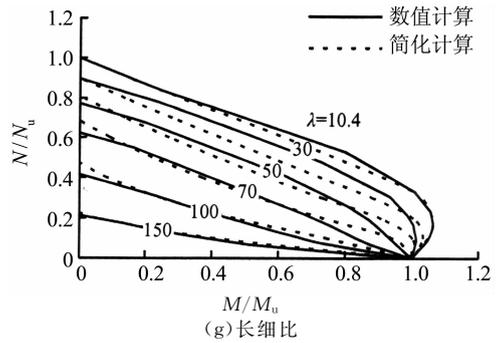
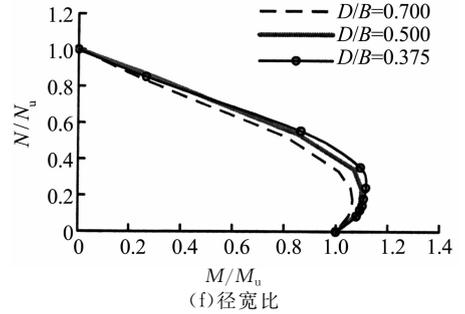
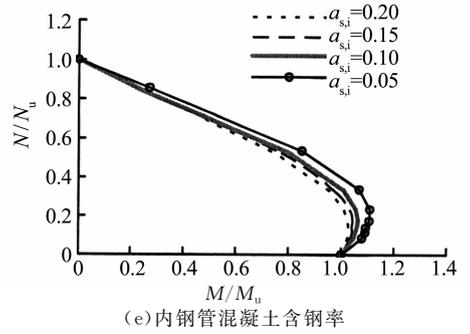
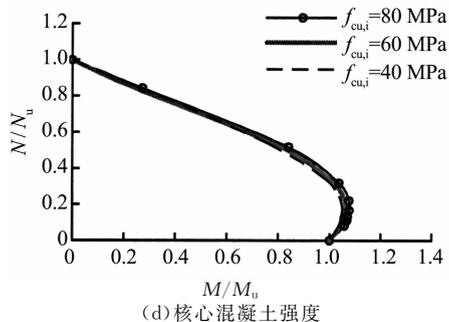
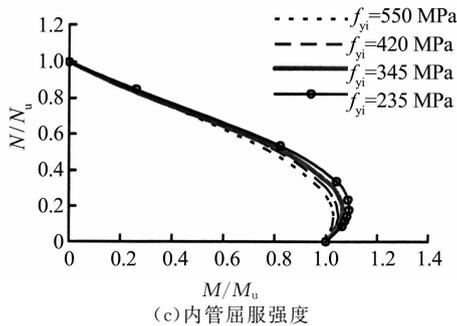
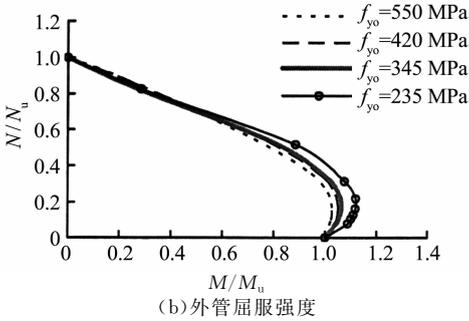
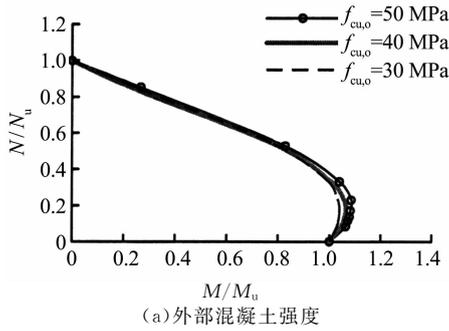


图 13 各参数对 N/N_u - M/M_u 相关曲线的影响
Fig. 13 Effects of various parameters on N/N_u - M/M_u relations

3 简化计算

为促进该类新型构件的推广应用, 有必要建议其偏压承载力的简化计算式. 文献[1]建议了如下钢管混凝土压弯构件的 N/N_u - M/M_u 强度相关方程:

$$\begin{cases} \frac{N}{N_u} + a \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 & (N/N_u \geq 2\eta_o) \\ -b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 & (N/N_u < 2\eta_o) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a=1-2\eta_o$; $b=(1-\zeta_o)/\eta_o^2$; $c=2(\zeta_o-1)/\eta_o$; M_u 为钢管混凝土构件的抗弯承载力; N_u 为短柱的轴压承载力。

式(2)还可用于预测复式薄壁方钢管混凝土短柱的偏压承载力, 但需重新考虑图 13 中的参数对特

征点 B 的坐标值的影响规律,特别是和核心钢管混凝土相关的参数.基于以上参数分析,本文回归了如下复式薄壁方钢管混凝土短柱的特征点 B 的坐标值计算式:

$$\zeta_0 = (0.06 - 0.0085\beta^{0.591})\xi^{-1.59} + 1 \quad (3)$$

$$\eta_0 = (-2.12 - 0.0053\beta)\xi^{0.032} + 2.31 \quad (4)$$

其中 $\xi = f_{y0}A_{s0}/f_{ck,o}A_{ce}$; $\beta = f_{yi}A_{si}/B^2$; A_{si} 为内管截面面积.

同时,长细比对压弯构件稳定承载力的影响不可忽视,文献[1]建议了如下钢管混凝土长柱的 $N/N_u - M/M_u$ 相关方程:

$$\begin{cases} \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 & (N/N_u \geq 2\varphi^3 \cdot \eta_0) \\ -b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right) = 1 & (N/N_u < 2\varphi^3 \cdot \eta_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $a = 1 - 2\varphi^2\eta_0$; $b = (1 - \zeta_0)/(\varphi^3\eta_0^2)$; $c = 2(\zeta_0 - 1)/\eta_0$; $1/d$ 为弯矩放大系数,基于图 13(g) 的参数分析本文对 d 值的计算式进行如下修正:

$$d = 1 - 0.86 \frac{N}{N_E} \quad (6)$$

式中: $N_E = \pi^2 E_{sc} A_{sc} / \lambda^2$; A_{sc} 为构件的截面面积; 组合弹模

$$E_{sc} = \frac{E_s I_{s0} + E_{co} I_{co} + E_s I_{si} + E_{ci} I_{ci} + E_s I_{st}}{I_{s0} + I_{co} + I_{si} + I_{ci} + I_{st}};$$

I_{s0} 、 I_{co} 、 I_{si} 、 I_{ci} 和 I_{st} 分别为外管、外部混凝土、内管、核心混凝土和加劲肋的截面惯性矩; E_s 、 E_{co} 和 E_{ci} 分别为钢材、外部混凝土和核心混凝土的弹模; φ 为复式该类轴压长柱的稳定系数,可采用文献[13]建议的如下简化公式:

$$\varphi = 0.276 + \frac{0.9}{(1 + 5.3 \times 10^{-6} \lambda^{2.46})^2} - \frac{f_{cu,o}}{910} - \frac{f_{cu,i}}{1000} - \frac{f_{yi}}{6250} - \frac{D}{9B} \quad (7)$$

复式薄壁方钢管混凝土短柱的轴压承载力 (N_u) 采用文献[12]建议的如下计算式预测:

$$N_u = f_{c,o} A_{co} + (A_{s0} + A_{st}) f_{y0} + f_{c,i} A_{ci} + A_{si} f_{yi} \quad (8)$$

式中: A_{co} 、 A_{ci} 和 A_{st} 分别为外部混凝土、内部混凝土和纵向加劲肋的截面面积.

复式薄壁方钢管混凝土构件的抗弯承载力 (M_u) 采用文献[11]建议的如下计算式预测:

$$M_u = \gamma_{m0} W_{scm} f_{scy} + W_r f_{y0} + \gamma_{mi} W_{scm,i} f_{scy,i} \quad (9)$$

式中: $W_{scm} = [B^4/6 - \pi D^4/32 - 2nt_0 h_r (B - 2t_0 -$

$h_r)]/B$ 代表外钢管和外部混凝土的组合抗弯模量; $W_r = nt_0 h_r (B - 2t_0 - h_r)$ 代表加劲肋抗弯模量; $W_{scm,i} = \pi D^3/32$ 代表核心圆钢管混凝土的抗弯模量; n 为一条外钢管壁上的加劲肋数量; γ_{m0} 和 γ_{mi} 分别为外部方钢管混凝土和核心圆钢管混凝土的弯矩系数.

$$\gamma_{m0} = -0.04\chi^{-2.5} \ln \xi + 1.04\chi^{-0.8} \quad (10)$$

$$\gamma_{mi} = 0.48 \ln(\xi + 0.1) + 1.1 \quad (11)$$

$$f_{scy} = C_1 \chi^2 f_{y0} + C_2 (1.18 + 0.85 \xi) f_{ck} \quad (12)$$

$$f_{scy,i} = (1.14 + 1.02 \xi_i) f_{ck,i} \quad (13)$$

式中: $C_1 = \alpha/(1 + \alpha)$; $C_2 = (1 + \alpha_n)/(1 + \alpha)$; $\alpha = A_{s0}/A_{co}$; $\alpha_n = A_{s0}/A_{ce}$; $\xi_i = f_{yi} A_{si}/f_{ck,i} A_{ci}$; $f_{ck,i}$ 为核心混凝土的轴心抗压强度; $\chi = D/(B - 2t_0)$.

式(2)~(13)的适用范围为: $f_{y0} = 235 \sim 550$ MPa, $f_{cu,o} = 30 \sim 50$ MPa, $D/B = 0.375 \sim 0.7$, $\alpha_{s,i} = 0.05 \sim 0.2$, $f_{yi} = 235 \sim 550$ MPa, $f_{cu,i} = 40 \sim 80$ MPa. 考虑到内部圆钢管的约束作用可提高核心混凝土的延性,和钢管混凝土叠合柱相似,实际使用时核心混凝土强度宜取 C40~C80,且应高于外部混凝土强度;核心圆钢管混凝土宜承担 30%~60% 的荷载.图 13(g) 给出了采用式(5)~(13)预测的复式薄壁方钢管混凝土偏压柱相关曲线与有限元计算结果的比较,两者总体吻合较好.同时,采用式(5)~(13)预测的承载力 (N_{uc}) 还与试验实测结果 (N_{ue}) 进行比较,计算结果均列于表 1 中, N_{uc}/N_{ue} 的均值和均方差分别为 1.038 和 0.14,可见建议的公式具有较好的预测精度.

4 结论

本文进行了 9 个复式薄壁方钢管混凝土柱的偏压试验,并基于数值模型开展机理分析和参数分析,主要得出如下结论:

1) 试验表明组合柱的承载力随着构件长度或偏心距的增大而下降,但随着核心混凝土强度的提高而提高.

2) 混凝土承担了大部分荷载,外钢管约束力主要集中在角部区域,核心圆钢管混凝土可改善构件的延性.

3) 偏压构件的相关曲线的平衡点的坐标值随着钢材强度、内钢管混凝土含钢率和径宽比的增大而减小;但随着混凝土强度的增大而增大;随着长细比

的增大, 相关曲线趋近直线。

4) 建议了精度较高的复式薄壁方钢管混凝土偏压柱的承载力简化计算式。

参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016: 67—113, 250—251.
HAN L H. Theories and experiment of concrete filled steel tube [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 67—113, 250—251. (In Chinese)
- [2] LIEW J Y R, XIONG D X. Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(9): 1487—1503.
- [3] 江韩, 储良成, 左江, 等. 轴心受压双钢管混凝土短柱正截面受压承载力理论分析及试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 96—105.
JIANG H, CHU L C, ZUO J, *et al.* Theoretical analysis and experimental study on normal cross-section load-carrying capacity for concrete-filled double steel tubular short columns subjected to axial compression load [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(4): 96—105. (In Chinese)
- [4] 方小丹, 林斯嘉. 复式钢管高强混凝土柱轴压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4): 236—245.
FANG X D, LIN S J. Axial compressive test of columns with multi barrel tube-confined high performance concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 236—245. (In Chinese)
- [5] WAN C Y, ZHA X X. Nonlinear analysis and design of concrete-filled dual steel tubular columns under axial loading[J]. *Steel and Composite Structures*, 2016, 20(3): 571—597.
- [6] QIAN J R, LI N B, JI X D, *et al.* Experimental study on the seismic behavior of high strength concrete-filled double-tube columns[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 13: 47—57.
- [7] ROMERO M L, ESPINÓS A, PORTOLÉJ M, *et al.* Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99(15): 536—545.
- [8] TAO Z, UY B, HAN L H, *et al.* Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47(12): 1544—1556.
- [9] 黄远, 朱正庚, 杨扬, 等. 端部设肋方钢管混凝土框架柱抗震性能分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 89—96.
HUANG Y, ZHU Z G, YANG Y, *et al.* Seismic analysis of the square concrete-filled steel tube frame column with end ribs [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(1): 89—96. (In Chinese)
- [10] 汪梦甫, 杨冕. 端部带肋方钢管混凝土柱抗震试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 31—37.
WANG M F, YANG M. Seismic analysis of the square concrete-filled steel tube frame column with end ribs [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 31—37. (In Chinese)
- [11] 王志滨, 张万安, 池思源, 等. 复式薄壁方钢管混凝土构件受弯性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(7): 78—84.
WANG Z B, ZHANG W A, CHI S Y, *et al.* Flexural behavior of composite concrete-filled square thin-walled steel tubular specimens [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(7): 78—84. (In Chinese)
- [12] WANG Z B, TAO Z, YU Q. Axial compressive behaviour of concrete-filled double-tube stub columns with stiffeners[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 120(11): 91—104.
- [13] 王志滨, 高扬虹, 池思源, 等. 复式薄壁方钢管混凝土长柱的轴压稳定问题研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(12): 41—48.
WANG Z B, GAO Y H, CHI S Y, *et al.* Study on stability of composite concrete-filled square thin-walled steel tubular slender columns under axial Compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(12): 41—48. (In Chinese)
- [14] TAO Z, WANG Z B, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 89(5): 121—131.