

# 钢管钢骨高强混凝土压弯柱全过程分析

刘 晓<sup>1,2</sup>, 李 敏<sup>2</sup>, 王连广<sup>3</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 100084 北京; 2. 沈阳大学 建筑工程学院, 110044 沈阳;

3. 东北大学 资源与土木工程学院, 110004 沈阳)

**摘 要:** 为了研究钢管钢骨高强混凝土组合柱的压弯性能,采用试验和非线性全程分析的计算程序,对工字形钢骨的钢管钢骨高强混凝土组合构件进行研究. 试验主要参数为轴压比 ( $n = 0.5 \sim 0.85$ ) 和钢骨的不同加载方向(强轴和弱轴). 研究结果表明:荷载-挠度典型曲线表现为弹性、弹塑性和破坏的三阶段特征;承载力随轴压比的增加而减小,随截面惯性矩的增加而呈现非线性增长;峰值点挠度随轴压比和加载方向的不同没有明显变化;组合柱符合平截面假定,挠度曲线符合正弦半波分布. 纤维模型法编制的非线性分析程序与试验结果吻合较好,并采用此程序系统地分析了轴压比、长细比和混凝土强度等参数对压弯构件荷载-变形曲线全过程的影响.

**关键词:** 钢管钢骨高强混凝土;压弯承载力;全过程分析;轴压比;长细比.

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)06-0121-05

## Full-range analysis of steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to compression-flexure loading

LIU Xiao<sup>1,2</sup>, LI Min<sup>2</sup>, WANG Lian-guang<sup>3</sup>

(1. Dept. of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 2. School of Architectural and Civil Engineering, Shenyang University, 110044 Shenyang, China; 3. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, 110004 Shenyang, China)

**Abstract:** In order to study the compression-flexural performance of steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete (STSRHC) members, the compression-flexural behavior of I shape of STSRHC were studied by experimental research and non-linear full-range compute program. The parameters in the study include the ration of axial compression ( $n = 0.5 - 0.85$ ) and different loading direction of steel-reinforce (major axis and minor axis). The results showed that the typical curve of load-deflection have elastic, elastic-plastic and failure three stages. Bearing capacity of composite column decrease with the increase of axial compression ratio, and increase with the moment of inertia nonlinear increase. The peak deflection isn't different with the axial compression ratio and loading direction. The composite member is up to plane section assumption; The deflection of member is up to sine curve. The non-linear compute program by fiber model goes well with the experimental result, and axial compression ratio, slender ratio and strength of concrete are studied on the full-range of load-deflection.

**Key words:** steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete; bearing capacity of compression-flexure; full-range analysis; axial compression ration; slender ratio

收稿日期: 2011-03-24.

基金项目: 辽宁省科学技术计划资助项目(2011230008).

作者简介: 刘 晓(1974—),女,副教授,博士后;

王连广(1964—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 刘 晓, liuxiao19740701@sina.com.

钢管钢骨高强混凝土(Steel Tube Columns Filled with Steel-Reinforced High-strength Concrete, STSRHC)是将工字钢插入空钢管中,并浇筑混凝土而形成组合构件,与钢骨混凝土和钢管混凝土相比,它具有承载力高、抗震性好、耐火性和耐腐

蚀性能好等特点<sup>[1-5]</sup>. 目前,已有对内部为十字形钢骨的 STSRHC 进行了 2 个压弯试件研究,并给出了简化计算公式<sup>[6]</sup>. 而对内部为工字形钢骨的 STSRHC 的研究,主要有:轴压构件的试验和理论研究<sup>[7-9]</sup>,抗弯构件的试验和理论研究<sup>[10]</sup>,而对此类构件的压弯试验研究未见报道,但在实际工程中组合柱多处于压弯受力状态,因此本文对这种新型组合构件进行了压弯性能的全过程研究.

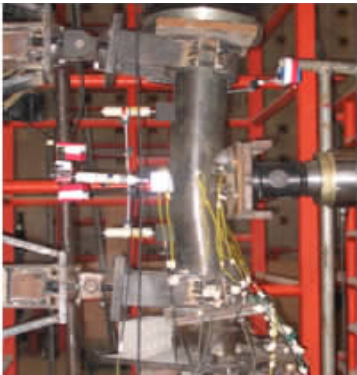
1 试验概况

1.1 设计参数

试验设计的压弯柱为 5 个圆钢管钢骨高强混凝土. 参数主要为:轴压比  $n_0$  ( $n_0 = N/N_0$ ,  $N$  为柱上下两端轴力,  $N_0$  为轴压极限荷载);加载方向分别沿工字钢的强轴和弱轴;钢管的截面尺寸为  $\text{O}165 \times 4.5 \text{ mm}$ , 钢骨为 10 号工字型钢,试件长度为 825 mm,套箍指标  $\theta = 0.871$  ( $\theta = A f_{ly} / A_c f_{ck}$ ,  $A_c$  为截面混凝土面积,  $f_{ck} = 48.6 \text{ MPa}$  为核心混凝土轴心抗压强度标准值,  $A_l$  为钢管面积,  $f_{ty} = 330 \text{ MPa}$  为钢管屈服强度),配骨指标  $\rho = 0.599$  ( $\rho = A_s f_{sy} / A_c f_{ck}$ ,  $A_s$  为钢骨面积,  $f_{sy} = 360 \text{ MPa}$  为钢骨屈服强度). 试件详细情况见表 1.



(a) 加载初期



(b) 极限状态



(c) 混凝土压溃

图 1 试验图

2 试验分析

由试验得到钢管钢骨高强混凝土压弯构件的荷载 - 挠度 ( $P - u_m$ ) 曲线,见图 2,主要包括弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段:弹性阶段,外部荷载  $P$  与挠度  $u_m$  成比例增加,但挠度的增长速度明显落后于外荷载,且预加轴力的大小决定了压弯构件弹性阶段的长短;弹塑性阶段,  $P - u_m$  明显偏离原有直线,荷载的增加速度逐渐减慢,试件达到极限荷载;破坏阶段,部分混凝土逐渐退出工作,试件呈现下降趋势,表现为塑性或强化现象.

2.1 影响参数分析

本次对钢管钢骨高强混凝土压弯承载力的试

表 1 试验参数

| 试件名称 | 轴压比 $n_0$ | 加载方向 | 计算值<br>$P_j^0 / \text{kN}$ | 试验值<br>$P_u / \text{kN}$ | $P_u / P_j^0$ |
|------|-----------|------|----------------------------|--------------------------|---------------|
| YW1  | 0.562     | 强轴   | 638.28                     | 682.00                   | 1.068         |
| YW2  | 0.681     | 强轴   | 510.12                     | 544.70                   | 1.068         |
| YW3  | 0.749     | 强轴   | 404.25                     | 410.00                   | 1.014         |
| YW4  | 0.749     | 弱轴   | 353.20                     | 368.60                   | 1.044         |
| YW5  | 0.851     | 强轴   | 255.44                     | 267.32                   | 1.047         |

1.2 试验现象

首先按设计轴压比施加轴向压力,试件始终保持垂直,没有侧向挠度,见图 1(a);然后施加水平力,在加载初期,侧向挠度缓慢增加,在达到极限荷载之前没有局部鼓曲,但轴压比较小的试件,钢管受拉侧氧化层脱落的现象较明显,表明受拉侧钢管应变已达到屈服;当达到极限荷载之后挠度迅速增加,且在加载区附近有局部鼓曲现象,见图 1(c),表明内部混凝土已经压碎,受拉侧钢管表面有明显的拉伸现象,具有明显的弯曲破坏特征;试件的跨中挠度在整个加载过程中为最大,且基本符合正弦曲线,见图 1(b).

验研究,主要分析轴压比和加载方向对承载力的影响. 通过试验得到各自的荷载 - 挠度曲线.

1) 不同轴压比情况,见图 2(a). 4 个试件除了施加的轴力大小不同之外,其他各个参数均相同,从图中可见,轴压比的增量  $\Delta n$  依次为 0.12、0.07、0.10,极限荷载的增加幅度分别为 0.201、0.247 和 0.348,可见承载力的降低幅度不与轴力的增加幅度成线性比例,而是随轴压比的增加,降低幅度越来越大. 这是因为随着预压力的增加,加大了截面进入塑性的深度,降低了构件继续承担荷载的能力,所以承载力降低幅度加大. 从图 2(a)的横坐标分析,轴压比的变化基本没有影响极限荷载(图中黑点)所对应的挠度值,即结构的

峰值位移没有太大变化。

2) 不同加载方向, 见图 2(b), 对轴压比  $n = 0.749$  的试件进行了两种方向的加载试验, 沿弱轴方向加载的试件(YW4) 极限承载力低于强轴方向加载的试件(YW3), 这主要由于二者抗弯能力不同, 即 YW4 惯性矩小于 YW3; 从下降段分析, 可知 YW3 的下降段斜率比 YW4 平缓, 二者其他参数相同只是改变了内部钢骨的加载方向, 这说明钢骨翼缘与钢管对混凝土形成的双重紧箍效应要好于钢骨腹板, 从而对试件的破坏起到一定延缓作用。

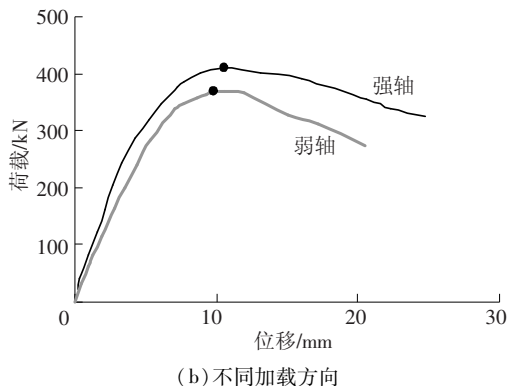
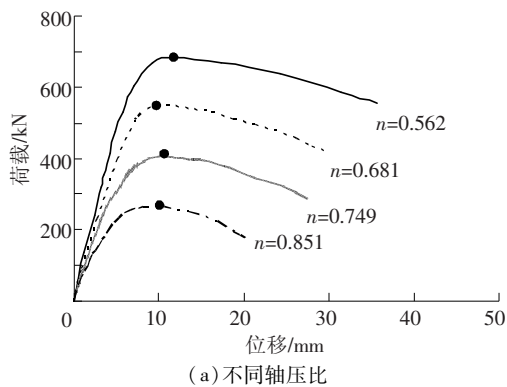


图 2 不同参数的荷载 - 挠度曲线

## 2.2 截面应变分析

通过试验测得柱中截面纵向应变沿截面高度分布情况, 见图 3。所有试件在加载过程中基本上保持平截面变形, 但随着荷载的增加, 中和轴位置发生改变。在加载初期, 中和轴靠近受拉区边缘; 之后, 随着荷载的增加, 中和轴逐渐向受压区偏移, 偏移的距离与轴心压力有关, 轴压比越大, 中和轴越远离形心轴, 靠近受拉区。

## 2.3 侧向挠度分析

图 4 为不同受荷下的侧向挠度。横坐标为试件侧向挠度( $u$ ), 纵坐标为试件各点距试件中部与试件高度的比值( $x/L_0$ ),  $n$  值为各阶段荷载( $N$ ) 与极限荷载( $N_u$ ) 的比值。试验结果表明, 侧向挠度在荷载作用初期变化幅度较小, 当达到 80% 极限荷载时开始明显增加, 且随长细比和偏

心距的增加而加大。

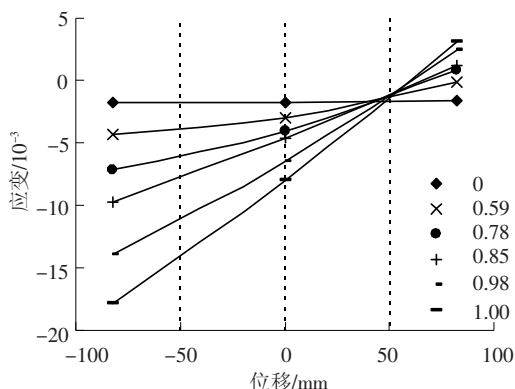


图 3 截面应变分布

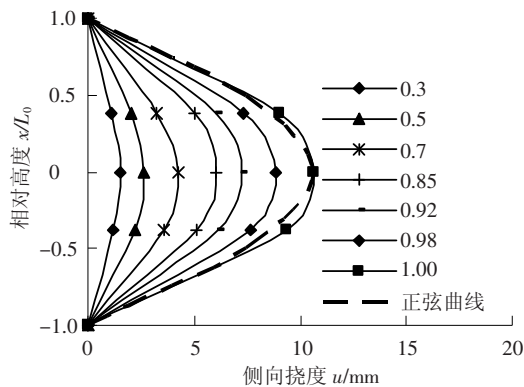


图 4 典型侧向挠度

## 3 数值计算

### 3.1 本构模型与假定

钢材本构关系采用 5 阶段典型方程, 混凝土本构关系采用修正后的核心混凝土 2 阶段典型方程<sup>[7]</sup>。STSRHC 组合柱采用如下假定: ① 忽略钢材和混凝土之间相对滑移; ② 不考虑构件的剪切变形; ③ 截面上应变分布满足平截面; ④ 组合柱两端为铰接, 侧向挠度为正弦半波曲线。

### 3.2 计算程序

根据纤维模型法, 将混凝土、钢管及钢骨的截面上进行条带划分, 条带划分数量以满足精度为准, 利用平衡条件得

$$N_{in} = \sum_{i=1}^n 2\sigma_{ci} dA_{ci} + \sum_{i=1}^m 2\sigma_{ti} dA_{ti} + \sum_{i=1}^k \sigma_{si} dA_{si} + \sigma_{s1} A_{s1} + \sigma_{s2} A_{s2} \quad (1)$$

$$M_{in} = \sum_{i=1}^n 2\sigma_{ci} dA_{ci} z_{ci} + \sum_{i=1}^m 2\sigma_{ti} dA_{ti} z_{ti} + \sum_{i=1}^k \sigma_{si} dA_{si} z_{si} + \sigma_{s1} A_{s1} z_{s1} + \sigma_{s2} A_{s2} z_{s2} \quad (2)$$

$$\theta_i = id\theta \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中:  $t$  和  $t_w$  分别是钢管壁厚和钢骨腹板厚度;  $A_{s1}$  和  $A_{s2}$  分别为钢骨上下翼缘的面积;  $dA_{si}$ 、 $dA_{ci}$

和  $dA_{ii}$  分别为对应圆心角  $d\theta_i$  的钢管、核心混凝土和钢管的截面积;  $\sigma_{ii}$ 、 $\sigma_{si}$  和  $\sigma_{ci}$  分别是钢管、钢管和核心混凝土的应力;  $\sigma_{sfl}$  和  $\sigma_{sf2}$  分别是工字钢上下翼缘的应力;  $r_c$  为钢管内径.

具体计算流程见图 5.

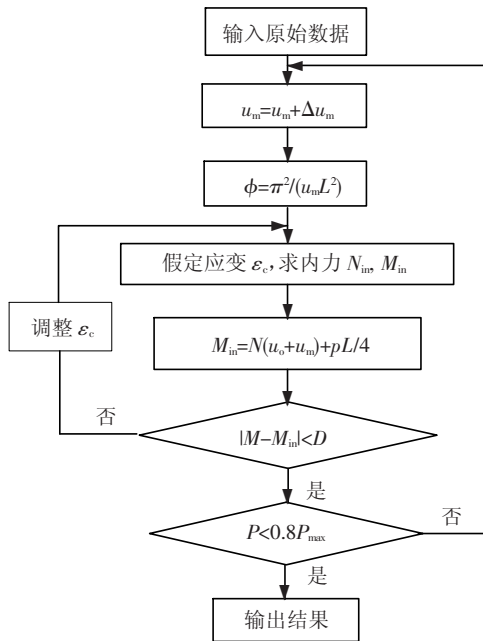
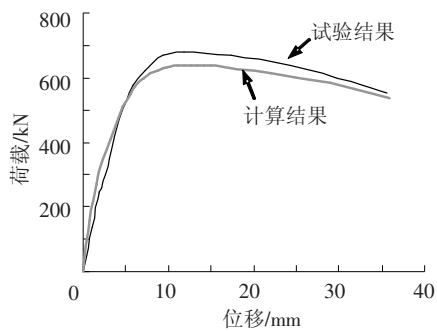


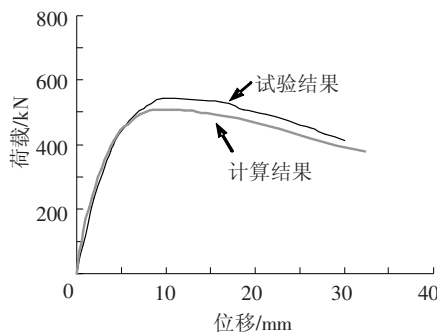
图 5 程序流程图

3.3 数值计算与试验结果对比

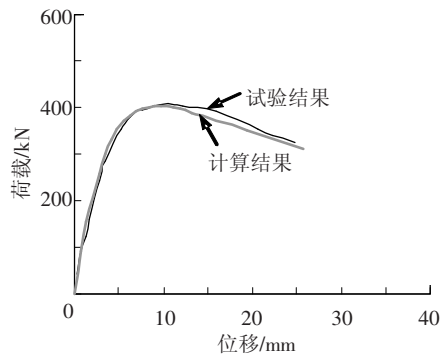
按照上述计算程序将试验参数输入程序中, 得到数值计算曲线和试验曲线的对比, 见图 6, 全过程曲线形状基本相同, 二者的平均误差为 1.048, 离散系数为 0.016, 在理想范围内.



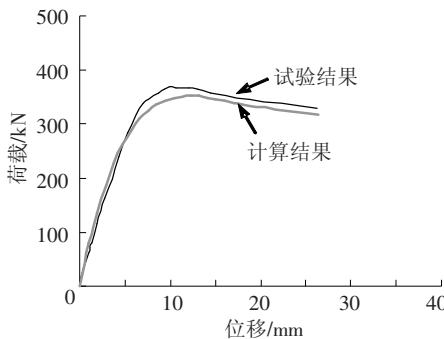
(a) YW1



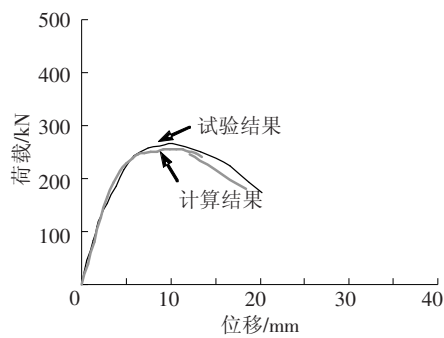
(b) YW2



(c) YW3



(d) YW4



(e) YW5

图 6 计算结果和试件结果对比

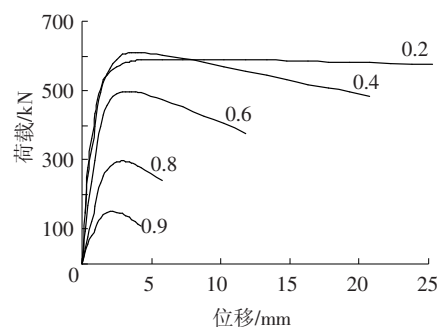
利用程序 YWTCSLX 对钢管钢骨高强混凝土影响因素进行分析. 设定基本参数混凝土强度  $f_{ck} = 48.6 \text{ MPa}$ ,  $f_{ty} = f_{sy} = 320 \text{ MPa}$ , 配骨指标  $\rho = 0.52$ , 套箍指标  $\theta = 0.63$ , 计算长度  $l_0 = 600 \text{ mm}$ , 钢管半径  $R_1 = 100 \text{ mm}$ , 壁厚  $t = 4.2 \text{ mm}$ , 内埋置 I10 工字钢. 计算在其他参数不变情况下, 分别改变轴压比、长细比和混凝土等级, 由此得到荷载 - 变形关系的影响曲线, 见图 7.

1) 轴压比的影响, 见图 7(a). 组合柱随轴压比的增加承载力降低, 曲线下降段的斜率越来越陡, 表明构件延性逐渐降低; 弹性段随轴压比的增加而减小, 因为在预压轴力作用下, 构件提前进入弹塑性阶段; 此外, 图中还表明, 当轴压比较小时, 增加适当的轴压比有助于构件提高承载能力, 如: 轴压比为 0.4 的承载力高于轴压比为 0.2 的极限承载力.

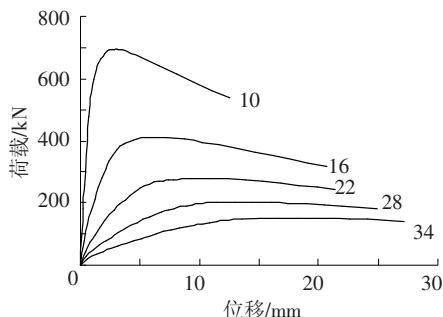
2) 长细比的影响, 见图 7(b). 承载力随长细

比的增加而降低,但降低幅度逐渐减缓,当长细比  $\lambda = 4L_0/D \geq 20$ ,构件因失稳而导致变形过大,承载能力将很快丧失。

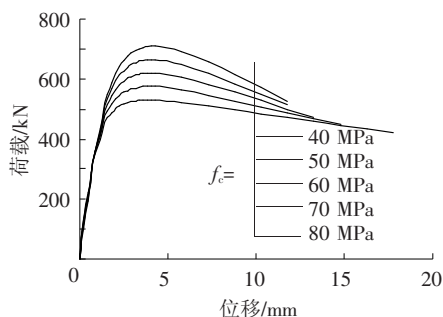
3) 混凝土等级的影响,见图 7(c)。随着混凝土等级的提高,承载能力加强,弹性阶段加大;但过极值点后,曲线斜率随混凝土等级的提高而越来越陡,表明构件延性逐渐降低。



(a) 轴压比的影响



(b) 长细比的影响



(c) 混凝土强度等级的影响

图7 计算参数对荷载-变形关系的影响

## 4 结 论

1) 在压弯荷载作用下,组合柱的荷载-挠度曲线呈现弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段特征,其中弹性阶段的长短与预加轴力大小有关,破坏阶段的曲线形式与轴压比有关。

2) 在压弯荷载作用下,组合柱随轴压比的增加而减小,降低幅度与轴力呈现非线性,但对峰值点的挠度影响不大;强轴方向的承载力高于弱轴,且钢骨翼缘与钢管对混凝土形成的双重紧箍效应要好于钢骨腹板。

3) 在压弯荷载的整个加载过程中,试件截面始终保持平面;侧向挠度曲线沿构件高度符合正弦半波分布;与计算程序的基本假定相符合。

4) 钢管钢骨混凝土 YWTCSLX 非线性分析程序计算结果与试验结果吻合较好。通过参数分析可知:轴压比越大,承载力越低,曲线的下降段越陡;长细比越大,承载力越低,当  $\lambda > 20$  时,转变为失稳;混凝土等级越高,承载力越强,下降段越陡,延性较差。

## 参考文献:

- [1] LIN Haihan. The influence of concrete compaction on the strength of concrete filled steel tubes [J]. Journal of Advances in Structural Engineering, 2000, 3 (2): 131 - 136.
- [2] BRUNEAU M, MARSON J. Seismic design of concrete-filled circular steel bridge piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1): 24 - 34.
- [3] ELLOBODY E, YOUNG B, LAM D. Behavior of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62(11): 706 - 715.
- [4] LIE T T, KODUR V K R. Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural Engineering, 1996, 122(1): 30 - 36.
- [5] 刘界鹏,张素梅,郭兰慧. 圆钢管约束高强混凝土短柱的轴压力学性能 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(4): 528 - 531.
- [6] WANG Qingxiang, ZHAO Dazhou, GUAN Ping. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete [J]. Journal of Engineering Structures, 2004, 26(7): 907 - 915.
- [7] HE Yibin, XIAO Alin. Limit analysis of steel tubular columns filled with structural steel [C]//Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Steel-Concrete Composite and Hybrid Structures (Special Issue of Steel Construction). Harbin: [s. n.], 2006: 544 - 550.
- [8] 杨包生. 钢管-钢管混凝土组合柱受力性能的研究 [D]. 内蒙古:内蒙古科技大学, 2006.
- [9] 刘晓,王连广. 钢管-钢管混凝土组合短柱轴压承载力研究 [J]. 东北大学学报:自然科学版, 2010, 31(4): 589 - 592.
- [10] 刘晓,王连广. 钢管钢骨高强混凝土抗弯构件试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1651 - 1655.

(编辑 赵丽莹)