

# 长期荷载作用下圆端形钢管混凝土力学性能

廖仁生<sup>1</sup>, 李永进<sup>1,2</sup>, 刘文华<sup>2</sup>, 张铮<sup>3</sup>

(1. 福建江夏学院 工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002;

3. 福建工程学院 教学与质量管理办公室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 采用有限元法, 全过程分析了考虑长期荷载作用下时构件的应变-荷载曲线。基于有限元模型, 分析了长期荷载作用下圆端形钢管混凝土柱的工作机理。结果表明: 考虑长期荷载作用影响对圆端形钢管混凝土柱的内力分布、变形有较大影响, 对承载力影响不大, 且随着高宽比的增大, 构件的峰值荷载增大, 延性减小。

**关键词:** 圆端形钢管混凝土; 长期荷载; 轴压; 力学性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0048-05

## Mechanical properties of concrete-filled steel tubes with round ends under long-term load

LIAO Rensheng<sup>1</sup>, LI Yongjin<sup>1,2</sup>, LIU Wenhua<sup>2</sup>, ZHANG Zheng<sup>3</sup>

(1. School of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

3. Teaching Quality Management Office, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The finite element method was used to analyze the whole process of the strain-load curve of the member considering the long-term load. Based on the finite element model, the working mechanism of the round-end concrete-filled steel tube column under long-term load was analyzed. Research results show that the effect of long-term load has a greater impact on the internal force distribution and deformation of the round-end concrete-filled steel tube column, but has little impact on the bearing capacity, and as the aspect ratio increases, the peak load of the member increases and the ductility decreases.

**Keywords:** round-end concrete-filled steel tubes; long-term load; axial pressure; mechanical properties

圆端形钢管混凝土柱在长期荷载作用下, 钢管内混凝土会发生徐变和收缩<sup>[1]</sup>, 引起构件位移增大、内力重分布、刚度降低, 从而对圆端形钢管混凝土柱的整体力学性能产生较大影响。圆端形钢管混凝土柱轴压、偏压、偏拉等方面已有较多学者进行研究<sup>[2-6]</sup>, 但考虑长期荷载作用下圆端形钢

管混凝土力学性能的相关报道较少。

由于桥梁的使用年限较长<sup>[7]</sup>, 圆端形钢管混凝土柱作为桥梁结构的主要承力构件<sup>[8-10]</sup>, 长期荷载对其影响不容忽视。为此, 本文通过有限元分析法, 对圆端形钢管混凝土柱在长期荷载作用下的力学性能进行研究。

收稿日期: 2021-11-14

基金项目: 福建江夏学院科研创新团队(19KTXZ02); 福建江夏学院科研人才培育项目(JXZ2020012)

第一作者简介: 廖仁生(1994—), 男, 福建龙岩人, 助理实验师, 硕士, 研究方向: 钢-混凝土组合结构。

通信作者: 李永进(1980—), 男, 福建福州人, 教授, 博士, 研究方向: 钢-混凝土组合结构。

1 有限元模型建立

1.1 混凝土和钢管材料本构模型

1) 长期荷载作用阶段混凝土本构模型

长期荷载作用下混凝土徐变收缩效应明显,采用文献[11]提供的三维黏弹性本构模拟此阶段的混凝土,其应力-应变关系可表示为:

$$\sigma_{ij}(t) = \delta_{ij} \left[ \lambda \varepsilon_{kk}(t) - \int_0^t \psi_1(t-t_0) \frac{\partial \varepsilon_{kk}(t_0)}{\partial t_0} dt_0 \right] + 2G \varepsilon_{ij}(t) - \int_0^t \psi_2(t-t_0) \frac{\partial \varepsilon_{ij}(t_0)}{\partial t_0} dt_0 \quad (1)$$

式中参数含义详见文献[11],该模型中,还需确认的核心混凝土最终徐变系数  $\varphi_u = 0.9$  [12]。

2) 承载力分析阶段混凝土本构模型

长期荷载作用阶段结束后进入承载力分析阶段,采用文献[11]提供的塑性损伤本构来模拟此阶段的混凝土,其长期荷载作用影响时的应变  $\varepsilon_t$  和对应短期荷载作用下应变  $\varepsilon_{\tau 0}$  关系可表示为:

$$\varepsilon_t = [1 + \varphi(t, \tau_0)] \varepsilon_{\tau 0} + \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_{sh} = 5.36 \times 10^{-4}$  [13]。

3) 钢材本构模型

钢材的本构模型采用二次塑流模型,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。

1.2 有限元模型

圆端形钢管混凝土柱构件有限元模型中钢管和混凝土分别采用壳单元(S4R)和实体单元(C3D8),混凝土和钢管的接触面有法向和切向接触,分别用硬接触和库伦摩擦模型进行模拟,其中库伦摩擦系数取 0.6 [13]。为确保端板和钢管之间不发生相对运动,采用 \*Tie 接触将两者连接在一起。

柱构件的加载方式为,长期荷载作用阶段时,在上端板  $x$  轴方向施加恒定的长期荷载  $N_L$ ,当长期荷载作用结束时,在上端板处施加位移荷载,直至构件破坏,进而获得长期荷载作用下的圆端形钢管混凝土荷载-应变全过程曲线。在有限元模型中,限制柱下端板  $x、y、z$  轴的所有自由度,柱上端板限制除  $x$  轴平动自由度之外的 5 个自由度,并在  $x$  轴平动自由度上施加长期荷载  $N_L$  和长期荷载作用结束后的位移。

1.3 模型验证

根据上述建模方法,建立长期荷载作用下的圆端形钢管混凝土柱有限元数值模型,将数值分析结果同已有的长期荷载作用下的圆形钢管混凝土试

验数据 [14] 和短期荷载作用下的轴压圆端形钢管混凝土试验数据 [15] 进行对比,对上述建模方法进行验证,试验结果和计算结果对比曲线见图 1。

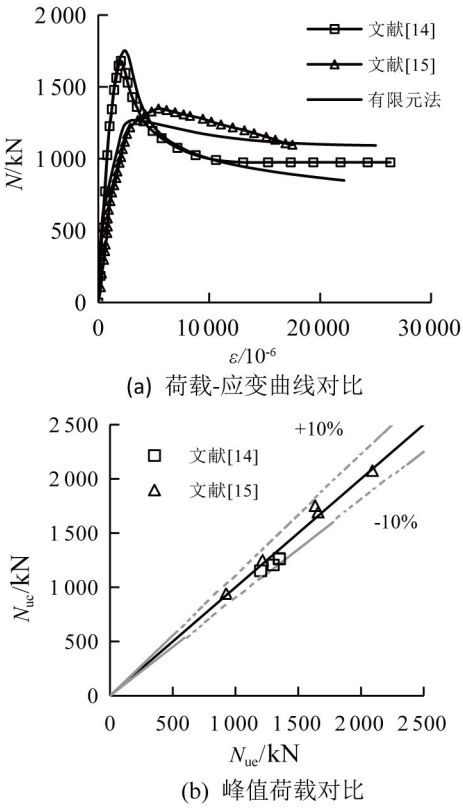


图 1 试验结果和计算结果对比曲线

Fig.1 Comparison curve between test results and calculation results

从图 1(a)(b)可看出,有限元计算所得荷载-应变曲线同试验所得曲线吻合程度较高,数值模型计算峰值荷载同试验值误差均在 10% 以内。通过长期荷载作用下的圆形钢管混凝土试验数据、短期荷载作用下的圆端形钢管混凝土的轴压试验数据,验证了模型的合理性,基于此模型,可进行长期荷载作用下的圆端形钢管混凝土柱力学性能研究。

2 有限元模型分析

采用上述建模及有限元分析方法,可得圆端形钢管混凝土在长期荷载作用下的荷载-应变曲线,对其受力全过程进行分析,基本参数:圆端形钢管截面长边边长  $D$  为 1 600、800、1 200、2 000 mm;圆端形钢管截面短边边长  $B = 800$  mm;长细比  $\lambda_x = 22$ ;C50 混凝土;Q355 钢材;含钢率  $\alpha_s =$

0.1;长期荷载比  $n = N_L / N_u = 0.4$  ( $N_L$  长期荷载,  $N_u$  极限荷载),长期荷载持荷年限为 50 a。

2.1 荷载-应变全过程分析

图 2 给出了长期荷载作用下圆端形钢管混凝土的荷载-应变全过程曲线,其中 A、B、C、D 分别代表长期荷载开始作用时、长期荷载结束作用时、达到峰值荷载时、峰值荷载下降至 85% 时。图中还分别给出在受力全过程中圆端形钢管混凝土钢管、平直段和圆弧段混凝土各自的承载力变化情况。在长期荷载作用下,平直段混凝土荷载卸载了 23.9%,圆弧段则卸载了 24%,钢管承担荷载增加了 38.7%,从数字上体现了混凝土卸载的部分全部转由钢管承担。

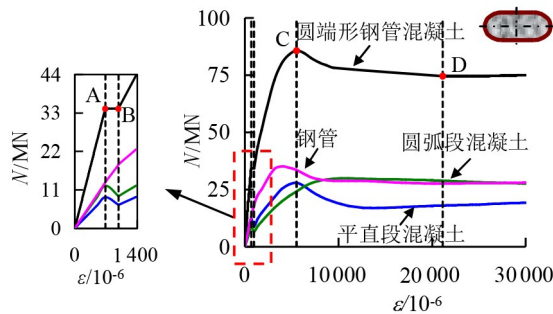


图 2 长期荷载作用下圆端形钢管混凝土荷载-应变曲线  
Fig.2 load-Strain curve of concrete filled steel tube with round ends under long-term load

如图 3 所示,考虑长期荷载的影响下,构件的峰值荷载由 85 562 kN 增加到了 85 703 kN,峰值荷载增幅 0.17%,几乎没有变化。峰值荷载对应应变由 3 285 增加到了 5 527,增幅 68.25%,峰值荷载对应应变增幅 68.3%,显著增大,亦即考虑长期荷载后,柱构件的刚度明显降低,而延性显著增强。

2.2 高宽比影响分析

图 4 给出了考虑长期荷载作用与否的峰值荷载、峰值应变和高宽比的关系曲线。高宽比(圆端形钢管截面长边边长/圆端形钢管截面短边边长)为 1~2.5 时,考虑长期荷载情况下,对应极限荷载增幅范围为 0.2%~3.2%,长期荷载作用对构件的极限荷载无明显影响,从曲线中还可看出,随着高宽比增大,圆端形钢管混凝土的极限荷载大幅提升。高宽比 1~2.5 时,考虑长期荷载情况下,对应峰值应变增幅范围为 68.3%~98.5%,高宽比增大,峰值荷载对应应变先大幅下降,而后趋

于稳定,长期荷载对构件的延性性能影响显著,随高宽比的增大,增长幅度逐渐降低而后趋于平缓。

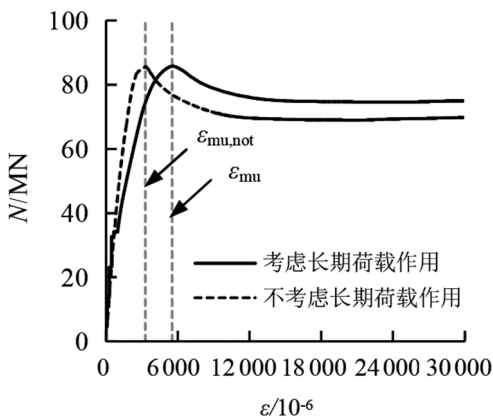
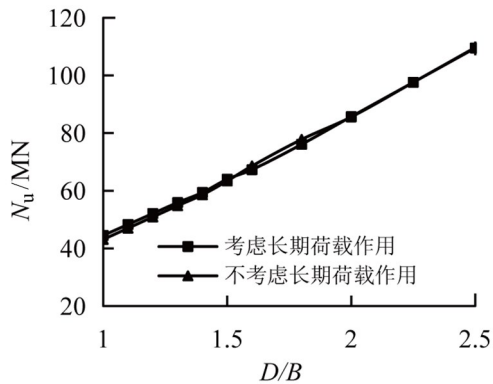
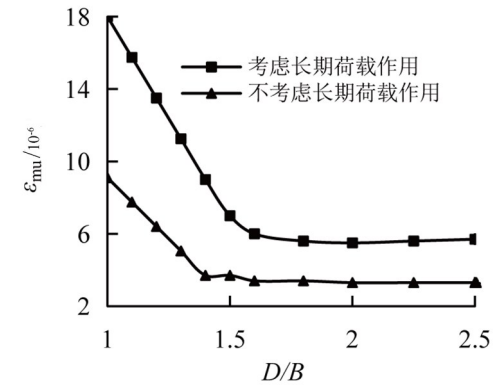


图 3 考虑长期荷载与否荷载-应变曲线  
Fig.3 load-Strain curve considering long-term load or not



(a) 对峰值荷载的影响



(b) 对峰值应变的影响

图 4 考虑长期荷载与否对不同高宽比钢管混凝土柱的峰值荷载及峰值应变的影响情况  
Fig.4 Influence of long-term load on the peak load and peak strain of concrete-filled steel tube columns with different aspect ratios and the situation without long-term load

2.3 混凝土截面应力分析

图 5 为是否受长期荷载影响下的混凝土截面应力(图 2 中 C 点)对比图。考虑长期荷载作用的最大纵向应力为  $1.08f'_c$  ( $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度), 不考虑长期荷载作用时最大纵向应力为  $1.16f'_c$ , 纵向应力的变化是因为长期荷载作用阶段混凝土卸载所致。从图中还可看出, 越靠近圆弧段中点, 混凝土纵向应力值越大, 越靠近平直段中点, 混凝土纵向应力值越小, 相比平直段, 圆弧段钢管对混凝土具有更强的约束效应。

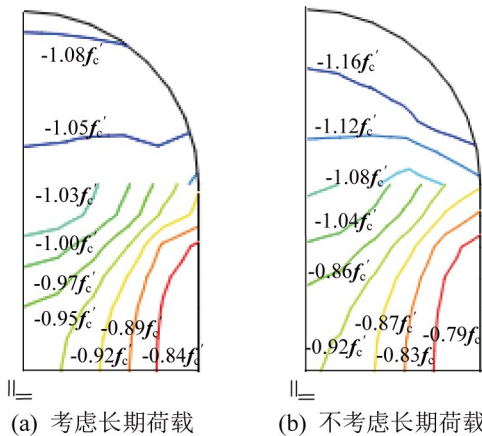


图 5 考虑长期荷载与否混凝土截面应力 (1/4 截面)  
Fig.5 Concrete cross-section stress (1/4 cross-section) considering the long-term load or not

2.4 钢管应力分析

图 6 给出了长期荷载作用与否的钢管关键点 (圆弧段 1 点和平直段 2 点) 的纵向应力 ( $\sigma_{11}$ )、环向应力 ( $\sigma_{22}$ )、Mises 应力 ( $\sigma_M$ ) 变化曲线, 从图 6 可看出, 未达到屈服强度前, 钢管的  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_M$  的增长速度快于  $\sigma_{22}$ , 达到屈服强度后, 钢管  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_M$  的增长速度趋于平缓,  $\sigma_{22}$  继续增长; 进入强化段后, 钢管  $\sigma_M$  和  $\sigma_{22}$  缓慢增长,  $\sigma_{11}$  减小后缓慢增长。从图 6 可得, 钢管和混凝土之间的  $\sigma_{22}$  影响  $\sigma_{11}$ ; 在 C 点, 考虑长期荷载作用的钢管纵向应力高于不考虑长期荷载的情况, 长期荷载作用下混凝土卸去的纵向应力由钢管承担; 而从曲线后续的发展趋势中可看出, 长期荷载对钢管应力值影响不大。

2.5 接触应力分析

图 7 为  $D/B = 2$  时, 考虑长期荷载作用与否的圆端形钢管混凝土, 其钢管和核心混凝土的接触应力-应变曲线。由图 7 可得, 圆端形钢管混凝土平直段的接触应力明显小于圆弧段, 钢管对混凝土的平直段约束力较弱。从图中还可看出, 长期荷载的作用, 延缓了钢管和混凝土之间最大相互作用力的出现时间, 但对接触应力值无明显影响 ( $P_2$  无明显应力值)。

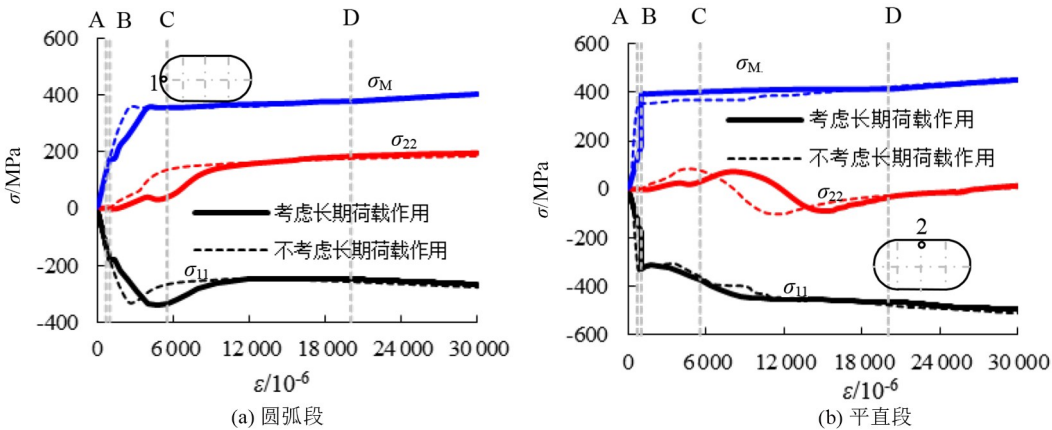


图 6 考虑长期荷载与否钢管应力-应变曲线  
Fig.6 Steel pipe stress-strain curve considering long-term load or not

3 结论

1) 通过有限元分析了圆端形钢管混凝土轴压柱在长期荷载影响下的工作机理, 可知长期荷载对峰值荷载影响不明显, 对构件延性性能影响显著。

- 2) 随着高宽比的增大, 构件的刚度和极限荷载随之增大, 延性性能下降。
- 3) 钢管对混凝土圆弧段的约束力要强于平直段, 相较于不考虑长期荷载圆端形钢管混凝土峰值荷载点对应的纵向应力, 混凝土的纵向应力



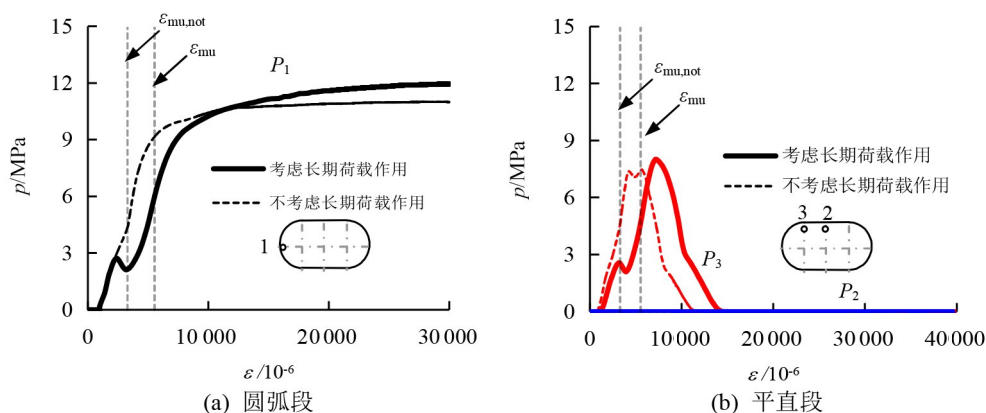


图 7 考虑长期荷载与否接触应力-应变曲线

Fig.7 Contact stress-strain curve considering long-term load or not

降低,钢管的纵向应力增大。

4) 在长期荷载的影响下,延缓了跨中截面钢

管和混凝土最大相互作用力出现的时间,但对接触力值影响不大。

参考文献:

[1] 王志滨,吴扬杭,余鑫,等.圆端形钢管混凝土柱的偏压力学性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(4):177-185.

[2] 任志刚,王高宇,李培鹏.变圆心角圆端形钢管混凝土轴压短柱承载力[J].武汉理工大学学报,2020,42(10):29-36.

[3] 刘文华.长期荷载作用对圆端形和六边形钢管混凝土柱的力学性能影响研究[D].福州:福建农林大学,2019.

[4] 王元丰.钢管混凝土徐变理论[M].北京:科学出版社,2013.

[5] 任志刚,张铭,魏巍,等.圆端形钢管混凝土中长柱轴压性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):18-27.

[6] 任志刚,张铭,刘闯,等.圆端形钢管混凝土中长柱轴心受压承载性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(14):62-68.

[7] 王凤芹,王静峰,沈奇罕.圆端形钢管混凝土短柱偏压性能和破坏机理分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(11):1521-1529.

[8] 郝怀霖,王志滨,吴泓均.圆端形钢管混凝土构件的偏拉力学性能研究[J].建筑钢结构进展,2020,22(5):93-98.

[9] 王静峰,盛鸣宇,沈奇罕,等.圆端形椭圆钢管混凝土构件受剪性能分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):81-87.

[10] 住房和城乡建设部.建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[11] 李永进,廖飞宇.长期荷载作用对钢管混凝土叠合柱力学性能影响[J].北京工业大学学报,2013,39(8):1187-1192.

[12] 李永进,廖飞宇.钢管混凝土中核心混凝土的徐变系数终值研究[J].华东交通大学学报,2012,29(5):7-12.

[13] 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,2018.

[14] HAN L H, LI Y J, LIAO F Y. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(12): 1534-1543.

[15] 王志滨,陈靖,谢恩普,等.圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J].建筑结构学报,2014,35(7):123-130.

(责任编辑:陈雯)