

加载条件变化对圆端形钢管混凝土短柱应力迁移的有限元分析

李 兵¹, 谢 晋¹, 杨永生², 佟 舟³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学学报编辑部, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳城市建设学院土木工程系, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要 目的 研究圆端形钢管混凝土短柱在拆分荷载作用下受力性能,以改进圆端形钢管混凝土短柱的性能。方法 利用 ABAQUS 软件对不同加载条件下轴压圆端形钢管混凝土短柱进行模拟分析,考虑到圆端钢管混凝土短柱可以看做是由双圆形混凝土柱与矩形混凝土柱的组合,按单独加载垫块(方形、矩形、椭圆形)设置于柱截面整体中点和两个加载垫块(双方形、双圆形)分别设置于圆端的圆形中心进行轴压分析。结果 对比两种不同荷载落点的圆端形钢管混凝土短柱承载力后发现,以两端半圆形钢管圆心点为荷载落点的圆端形钢管混凝土短柱承载能力更高。加载垫块形状越接近外部钢管形状时,其承载能力越强。加入工字钢强化的圆端形钢管混凝土短柱承载能力明显强于正常情况下圆端形钢管混凝土短柱。结论 采用内置工字型钢的方法可以改善圆端形钢管混凝土短柱应力不均匀现象,提高其承载能力。

关键词 圆端形钢管混凝土;垫块形状;双点局部轴压;应力迁移;钢管钢管混凝土

中图分类号 TU392.1

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Influence of Loading Conditions on Force Transfer in Concrete Filled Steel Tubular Short Columns with Circular Ends

LI Bing¹, XIE Jin¹, YANG Yongsheng², TONG Zhou³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Editorial Department of Journal, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction, Shenyang, China, 110167)

Abstract: The purpose of this paper is to study the mechanical behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) columns with circular ends under split load, and to provide reference for the improvement of the performance of CFST short columns with circular ends ABAQUS software is

收稿日期:2020-07-28

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52027811);辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10100099);沈阳市科技计划项目(20-206-4-13)

作者简介:李兵(1974—),男,教授,博士,主要从事地铁施工监测、工程结构抗震、钢结构等方面研究。

used to simulate and analyze the axial compression circular end concrete-filled steel tubular short column under different loading conditions. Considering that the circular end concrete-filled steel tubular short column can be regarded as the combination of double circular concrete column and rectangular concrete column, the single loading cushion block (square, rectangular, elliptical) is set at the overall midpoint of the column section, and two loading cushion blocks (two-sided and double circular) are set respectively. Axial compression analysis was carried out at the center of the circular end. By comparing the bearing capacity of two kinds of circular ended CFST short columns with different load drop points, it can be concluded that the bearing capacity of circular end CFST short columns with semi-circular steel tubes at both ends as load drop points is high. The closer the shape of the loading pad is to the shape of the external steel tube, the stronger the bearing capacity is. The bearing capacity of the circular ended concrete-filled steel tube short column strengthened by I-beam is obviously stronger than that of the circular ended concrete-filled steel tube short column under normal conditions. This paper puts forward the improvement measures for the uneven stress phenomenon in the simulation of the circular end concrete-filled steel tube short column. The method of internal I-section steel can improve the uneven stress phenomenon of the circular end concrete-filled steel tube short column, and improve its bearing capacity.

Key words: concrete filled steel tube with circular end; shape of cushion block; double point local axial compression; stress migration; steel reinforced concrete filled steel tube

钢管混凝土结构具有强度高、防火性能强,同时可以改善混凝土结构性能的特点^[1-3],如何改进钢管混凝土结构的性能成为研究热点,例如改进混凝土性能、本构模型;改变钢管混凝土结构形式;改变钢管混凝土结构外部环境;钢管混凝土柱与梁之间的连接^[4-8]。而圆端形钢管混凝土柱同时还拥有较小的流体阻力系数和合理的主、次轴分布等优点,因此钢管混凝土构件被广泛应用于各种建筑形式中^[9]。针对圆端形钢管混凝土柱,任志刚等^[10]研究了圆端形钢管混凝土中柱的轴压性能。沈奇罕等^[11]研究了圆端形椭圆钢管混凝土柱在单点轴向局部压力作用下的力学性能。王静峰等^[12]研究了圆端形钢管混凝土短柱的受剪性能。任志刚等^[13]研究了圆端形钢管混凝土柱的纯弯性能。马贤峰^[14]研究了椭圆钢管混凝土柱的抗震性能和计算方法。王凤芹等^[15]研究了椭圆钢管混凝土中、长柱轴压性能。

现阶段对钢管混凝土结构的研究中发现,当圆端形钢管混凝土结构受外界荷载作用时,存在应力分布不均现象,导致圆端形钢

管混凝土结构承载能力下降。笔者针对这种情况,提出分别在圆端形钢管混凝土结构中心位置设置加载垫块和在两端半圆形钢管圆心位置设置两个加载垫块,通过改变垫块形状,得出不同垫块形状对圆端形钢管混凝土结构性能影响;借鉴钢骨-钢管混凝土结构形式,提出在圆端形钢管混凝土短柱内部加入型钢,以改进圆端形钢管混凝土短柱的性能。

1 有限元模型建立与验证

1.1 本构关系选择

文中混凝土本构关系选择丁发兴等^[16]建立的混凝土受压力学统一模型,本构关系如下:

$$y = \frac{A_1 \cdot x - x^2}{1 + (A_1 - 2) \cdot x}, x \leq 1. \tag{1}$$

$$y = \frac{x}{\alpha_1 \cdot (x - 1)^2 + x}, x > 1. \tag{2}$$

式中: $y = \frac{\sigma_c}{f_c}$; $x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$; $A_1 = 9.1 \cdot f_{cu}^{-\frac{4}{9}}$; $\alpha_1 = 2.5 \times 10^{-5} \cdot f_{cu}^3$ 。其中 σ_c 为混凝土受压应力; ε_c 为

混凝土受压应变; f_c 为混凝土轴心抗压强度; ε_0 为混凝土单轴抗压峰值应变; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; A_1 为曲线上升段参数; α_1 为曲线下降段参数。

钢材使用的本构模型为理性弹塑性模型^[17-18],本构关系如下:

$$\sigma_t = E_s \cdot \varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y.$$

(3)

$$\sigma_t = f_y, \varepsilon > \varepsilon_y.$$

(4)

式中: σ_t 为钢材应力; ε 为钢材应变; ε_y 为钢材屈服应变; f_y 为钢材屈服强度。

1.2 模型参数及模型验证

钢材与混凝土之间的接触面法向方向设定“硬接触,允许接触后分离”,切向方向设定为“罚摩擦模型”,摩擦系数取为0.3,单元属性设定为C3D8R^[19],模型加载通过位移

控制。笔者选取文献[11]中试件为基准试件,建立有限元模型如图1所示,试件参数见表1。表中所有试件长度均为600 mm,其中RC-72为文献[11]中基准试件。

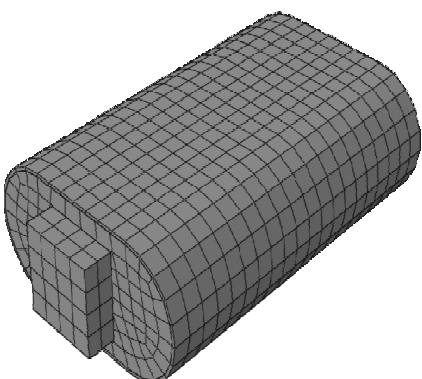


图1 有限元模型
Fig. 1 Modeling diagram

表1 试件参数
Table 1 The parameters of specimens

试件编号	截面长度/mm	截面宽度/mm	钢管厚度/mm	钢材型号	核心混凝土强度	含钢率/%	受压面积/比	垫块形状	轴向承载力/kN
RC-72	400	200	5	Q345	C50	8	4	正方形	2 522
SY-1	400	200	5	Q345	C50	8	4	正方形	1 967
SY-2	400	200	5	Q345	C50	8	4	矩形	2 001
SY-3	400	200	5	Q345	C50	8	4	椭圆形	2 096
SY-4	400	200	5	Q345	C50	8	4	双圆形	2 189
SY-5	400	200	5	Q345	C50	8	4	双方形	2 285

笔者以文献[11]中试验为参照,建立圆端形钢管混凝土短柱模型,并与试验结果对比,应力-位移曲线如图2所示。从图中可以看出,模拟曲线与试验曲线变化趋势相同,在开始阶段,两条曲线呈现明显的线性变化,出现拐点后,曲线趋于平直,有限元模拟的轴向承载力最大值约为试验结果的80%,这一差别主要是有限元分析中使用的材料参数与试验中材料参数之间的差异造成的。

笔者分别进行在圆端形钢管混凝土短柱整体中心点设置单独加载垫块(方形、矩形、椭圆形)和两端半圆形钢管圆心位置分别设置两个加载垫块(双方形、双圆形)两种工况下的模拟试验,得出应力迁移情况。同时对

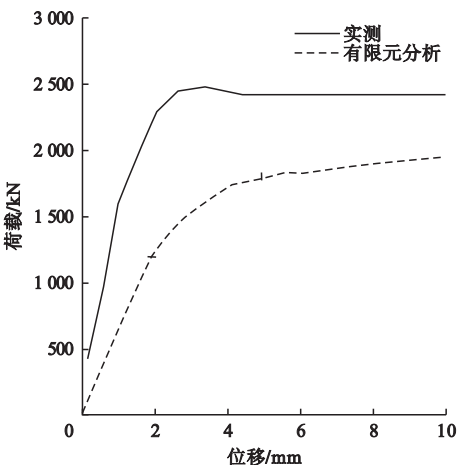


图2 典型试件实测曲线与有限元曲线对比
Fig. 2 Comparison of measured curve and finite element curve of typical specimen

内置工字型钢的圆端形钢管混凝土短柱进行模拟。

2 有限元结果与分析

2.1 荷载 - 位移分析

不同形状垫块试件应力 - 应变曲线如图 3 所示。从图 3 可知,当放置单独加载垫块时,垫块形状越接近于外部钢管形状,最大轴向应力值越高。在分别放置两个加载垫块情况下的最大应力值明显高于放置单独加载垫块。分析原因:①圆端形钢管混凝土短柱中部平直钢管对混凝土的约束能力较弱,而单独加载垫块情况下的约束情况主要是以中部平直钢板的约束为主。分别放置两个加载垫块主要是依靠两端半圆形钢板进行约束,同时在圆端形钢管混凝土短柱中,两端半圆形钢管对混凝土的约束能力高于中部平直钢板对混凝土的约束能力,故单独加载垫块的应力最大值明显小于两个加载垫块的应力最大值。②在圆端形钢管混凝土短柱两端半圆形钢管圆心位置分别放置两个加载垫块时,因为其对于中部混凝土有挤压作用,相当于为中部混凝土施加水平约束,让中部混凝土处于强于原始状态的三向受压状态,所以提高了圆端形钢管混凝土短柱的轴向压应力性能。

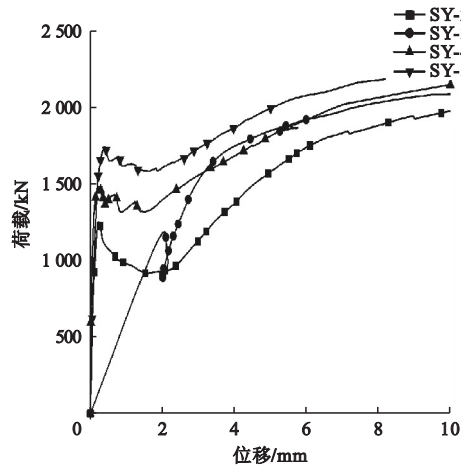


图 3 不同形状垫块下试件荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Load displacement curves of specimens with different shapes of cushion blocks

2.2 不同加载条件下圆端形钢管混凝土短柱受力分析

2.2.1 单独加载垫块形状为正方形时应力应变分析

加载垫块为正方形情况时应力云图如图 4 所示。当在圆端形钢管混凝土短柱整体中心位置放置加载垫块形状为正方形、矩形时,在垫块下部出现明显的应力集中现象(见图 4(b)),造成圆端形钢管对混凝土的约束作用无法充分发挥。从图 4 中可以看出,中部平直钢板的应力云图最先发生变化,随后在圆端形钢管混凝土柱的两端,半圆形钢管范围内出现应力集中情况。随着加载的持续,加载面处中部平直钢管位置首先达到应力最大值,而此时加载面处两端半圆形钢管还没有达到应力最大值,既出现应力迁移的情况。图 4 表明,直到圆端形钢管混凝土短柱破坏,加载平面两端半圆形钢管部分还没有达到应力最大值。

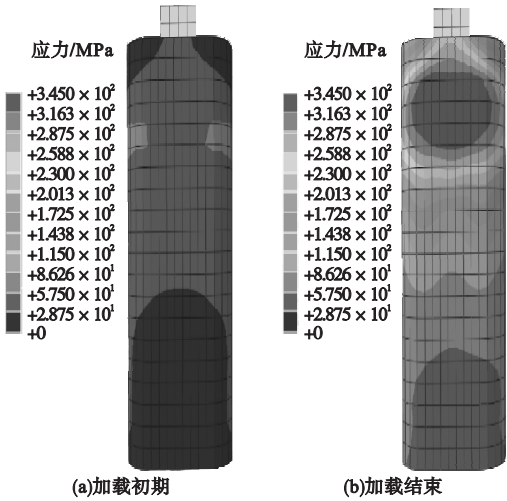


图 4 正方形垫块时钢管应力云图

Fig. 4 Stress contour plots of steel pipe with square cushion block

加载垫块为正方形时应变云图如图 5 所示。从图中可以看出,加载垫块为正方形时,圆端形钢管的中部平直段,最先到达满足钢材破坏的纵向应变,此时两端半圆形钢管还没有达到应变最大值。在这种情况下,由于

应力迁移,圆端形钢管对受约束区混凝土的约束能力没有充分发挥。加载垫块为矩形时,应力、应变云图变化与加载垫块为正方形时相似,不再赘述。

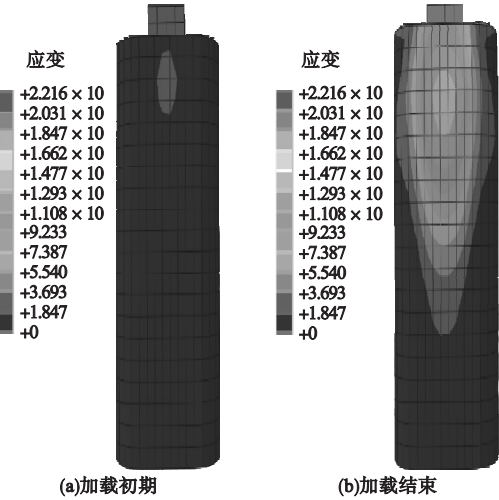


图5 正方形垫块时钢管应变云图

Fig. 5 Strain contour plots of steel pipe with square cushion block

2.2.2 单独加载垫块形状为椭圆形时应力应变分析

加载垫块为椭圆形时应力云图如图6所示。从图中可以看出,初始应力变化位置与加载垫块为正方形、矩形垫块时的初始应力变化位置基本相同。随着加载的持续,钢管

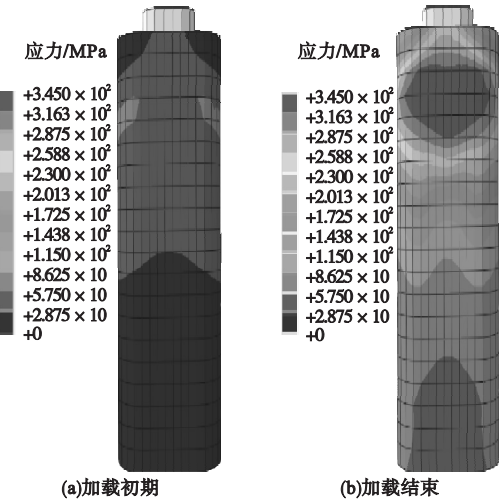


图6 椭圆形垫块时钢管应力云图

Fig. 6 Stress contour plots of steel pipe with elliptical cushion block

的两端半圆形段、平直段均开始发生应力变化,但变化程度不同。随着荷载持续增加,平直段钢管应力变化与两端半圆形段钢管应力变化趋于相同,对比垫块形状为正方形、矩形情况时,应力不均匀现象有所改善,对两端半圆形段钢管的利用率提升,从表1中可知,其最大承载力有所提高。研究表明,当加载垫块为椭圆形时,对圆端形钢管两端半圆形钢管部分约束的利用率强于加载垫块为正方形、矩形的情况。

加载垫块为椭圆形时应变云图如图7所示。从图中可以看出,初始应变出现位置与加载垫块为正方形、矩形时的情况相似,但应力云图变形区域对两端半圆形钢管的覆盖率明显增大,构件承载力最大值大于加载垫块为正方形、矩形时构件承载力最大值。

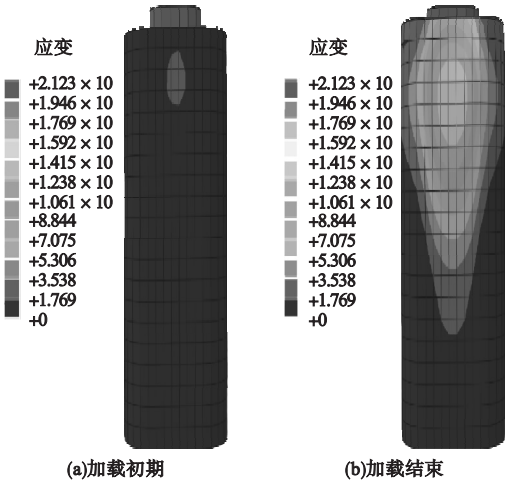


图7 椭圆形垫块时钢管应变云图

Fig. 7 Strain contour plots of steel pipe with elliptical cushion block

2.2.3 拆分加载垫块形状为圆形时应力应变分析

在圆端形钢管混凝土短柱两端半圆形钢管圆心位置分别放置两个圆形加载垫块,试件应力云图如图8所示。从图中可以看出,钢管的最初应力变化位置仍为中部平直钢管处,随着加载的持续,加载平面两端半圆形钢管位置早于中部平直段钢管位置出现最大应力。

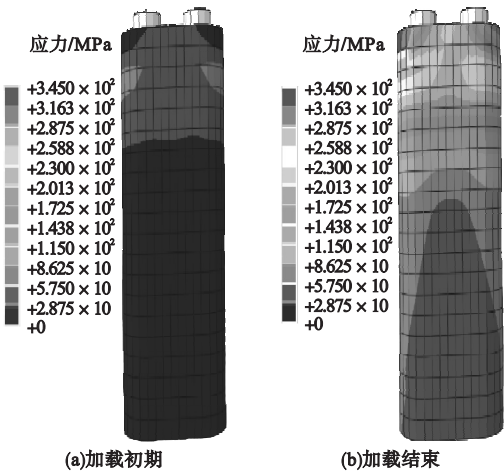


图 8 双圆形垫块时钢管应力云图

Fig. 8 Stress contour plots of steel pipe with double circular cushion block

垫块形状为双圆形时应变云图如图 9 所示。从图中可以看出,最先出现应变变化及最大应变变化位置皆为中心平直钢管处。加载垫块为双方形时的应力、应变云图变化与其相似,不再赘述。

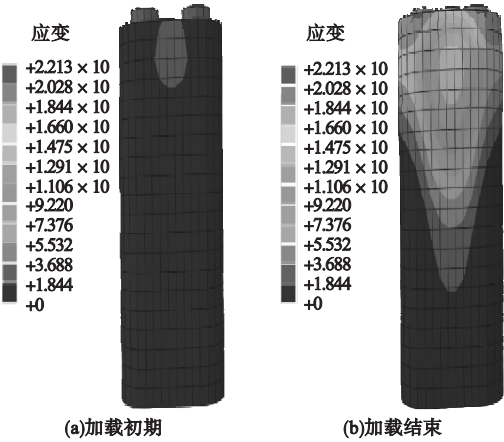


图 9 双圆形垫块时钢管应变云图

Fig. 9 Strain contour plots of steel pipe with double circular cushion block

对比不同形状垫块下试件应力、应变云图及应力-位移曲线可知,当垫块形状为双圆形、双方形时,应力、应变云图变化区域对两端半圆形钢管的覆盖率较高,构件承载力强于垫块形状为方形、矩形的情况。为更好地发挥构件中材料性能,笔者进一步提出了改进措施。

2.3 圆端形钢管混凝土短柱改进措施的提出及验证

笔者参照已有研究中提出的钢骨-钢管混凝土结构形式,在圆端形钢管混凝土短柱内加入型钢,使圆端形钢管混凝土短柱内部发生应力重分布,以提高圆端形钢管混凝土短柱性能。选择 20a 型工字钢作为强化构件,参数见表 3。工字钢高度为 600 mm,工字钢与混凝土之间接触通过绑定约束。改进后圆端形钢管混凝土短柱模型如图 10 所示。改进后试件与双方形加载时圆端形钢管混凝土短柱应力位移曲线如图 11 所示。

表 3 工字型钢截面参数表

Table 3 Section parameters of I-section steel				
工字钢 型号	工字钢截面 高度/mm	工字钢翼缘 厚度/mm	工字钢腹板 厚度/mm	工字钢截面 面积/cm ²
20a	200	100	7	35.5

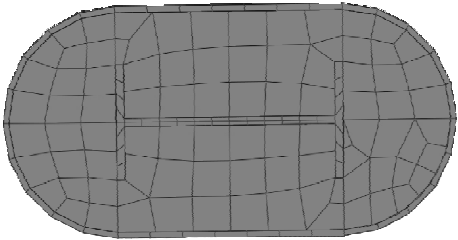


图 10 改进后圆端形钢管混凝土短柱模型

Fig. 10 Model of reinforced concrete filled steel tube stub columns with circular ends

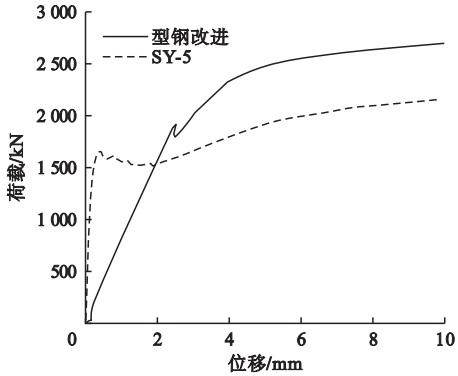


图 11 改进后圆端形钢管混凝土短柱与双方形垫块加载时圆端形钢管混凝土短柱荷载-位移曲线

Fig. 11 Load displacement curves of improved circular end concrete filled steel tube short column and square shaped cushion block

通过图 11 可以看出,改进后圆端形钢管混凝土短柱承载能力明显高于垫块形状为双方形时圆端形钢管混凝土短柱(试件 SY-5),构件性能最大承载力提升了 5%。

内置 20a 工字型钢后,圆端形钢管混凝土短柱应力、应变云图如 12 所示。从图 12 可以看出,初始应力变化位置仍出现在中部平直钢管处。加载结束后,应力迁移情况得到了明显改善,改进后加载位置的应力云图对比改进前,圆端形钢管混凝土短柱应力分布更加均匀。

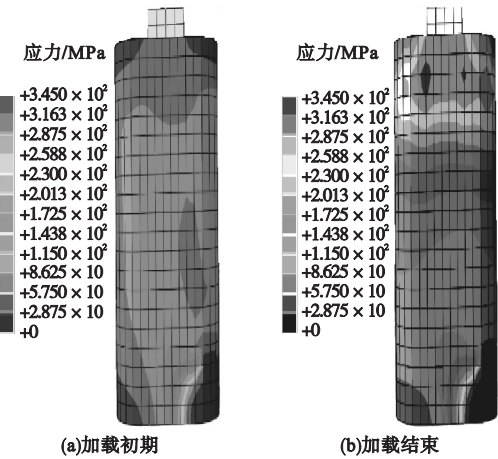


图 12 改进后圆端形钢管混凝土短柱钢管应力云图
Fig. 12 Stress contour plots of improved circular end concrete filled steel tube short column

改进后构件应变云图如图 13 所示。

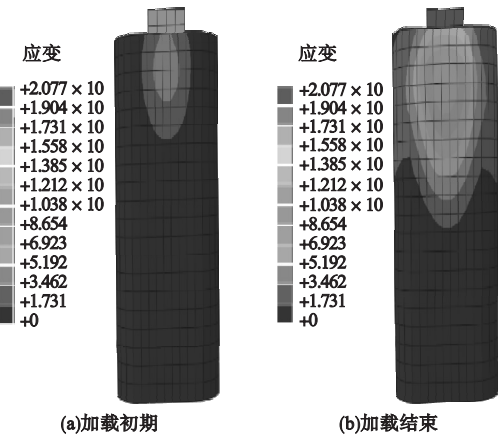


图 13 改进后圆端形钢管混凝土短柱钢管应变云图
Fig. 13 Strain contour plots of improved circular end concrete filled steel tube short column

从图 13 可以看出,最先出现应变变化位置仍在中部平直段钢管,两端半圆形段钢管约束利用率明显提高,通过在圆端形钢管混凝土短柱内部加入工字钢的方式改进其性能,可以增加两端半圆形钢管约束利用率,提高其承载能力。

3 结 论

(1)当加载位置位于圆端形钢管混凝土短柱中心位置时,垫块为单方形、单椭圆形;当加载位置位于两端半圆形段钢管圆心位置时,垫块为双圆形。通过对比可知,当加载位置位于两端半圆形钢管圆心位置时,圆端形钢管混凝土短柱的性能更好。

(2)圆端形钢管混凝土短柱性能取决于对中部平直段钢管与两端半圆形钢管约束的利用情况,当单独垫块加载时,其形状越接近外钢管形状,其承载能力越强。

(3)在圆端形钢管混凝土短柱中加入型钢后承载能力提高,经过型钢强化后的圆端形钢管混凝土短柱对两端半圆形钢管的利用进一步加强。

参考文献

[1] 卢炜. 钢管约束的钢管混凝土短柱轴压性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018. (LU Wei. Study on axial compression behavior of concrete filled steel tubular stub columns confined by steel tubes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)
[2] 郝祯,刘栋栋. 不同轴力作用下钢管混凝土柱耐火性能分析[J]. 建筑结构,2019,49(增刊2):653-657. (HAO Zhen, LIU Dongdong. Fire resistance performance analysis of concrete filled steel tubular columns under different axial forces [J]. Building structure, 2019, 49 (S2): 653 - 657.)
[3] 金浏,樊玲玲,杜修力,等. 圆钢管混凝土柱轴压破坏行为与尺寸效应理论研究[J]. 中国科学:技术科学,2020,50(2):209-220. (JIN Liu, FAN Lingling, DU Xiuli, et al. Failure behavior and size effect theory of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. Chinese science: technical science, 2020, 50 (2): 209 - 220.)
[4] LAI Z C, YAO P Y, HUANG W J, et al. Reactive powder concrete-filled steel tube (RPCFT) members subjected to axial tension;

- experimental study and design[J]. Structures, 2020,28:933-942.
- [5] THANH D H, CHI P H, LE T, et al. Optimization design of rectangular concrete-filled steel tube short columns with balancing composite motion optimization and data-driven model[J]. Structures, 2020,28:757-765.
 - [6] FAN J C, ZHAO J H, GAO W Q. Moment-rotation model of endplate blind bolted joints with CFST column [J]. Journal of constructional steel research, 2021, 176(11): 106446.
 - [7] LI H B, YAN P F, SUN H, et al. Axial compression performance and ultrasonic testing of multicavity concrete-filled steel tube shear wall under axial load [J]. Advances in civil engineering, 2020,2020:72-82.
 - [8] ADITYA K T, ASHOK K G. Post-fire exposure behavior of circular concrete-filled steel tube column under axial loading [J]. International journal of steel structures, 2021, 21:52-65.
 - [9] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6):50-61.
(CHEN Baochun, WEI Jiangang, ZHOU Jun, et al. Application of concrete-filled steel tube arch bridges in China; current status and prospects[J]. China civil engineering journal, 2017, 50(6):50-61.)
 - [10] 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.
(REN Zhigang, ZHANG Ming, WEI Wei, et al. Axial compression performance of RCFST middle long columns[J]. Journal of architectural science and engineering, 2020(3):18-27.)
 - [11] 沈奇罕, 林沁, 王静峰. 圆端形椭圆钢管混凝土短柱局部轴向受压性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020,22(2):25-35.
(SHEN Qihan, LIN Qin, WANG Jingfeng. Study on the behavior of round-ended elliptical concrete-filled steel tube stub columns under axial local compression [J]. Progress in building steel structures, 2020, 22(2): 25-35.)
 - [12] 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.
(WANG Jingfeng, SHENG Mingyu, SHEN Qihan, et al. Investigation on shear behavior of round-ended elliptical concrete-filled steel tubular members [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science edition), 2020,43(1):81-87.)
 - [13] 任志刚, 肖萌. 圆端形钢管混凝土构件纯弯力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020,37(2):44-53.
(REN Zhigang, XIAO Meng. Mechanical behaviors of concrete-filled round end steel tubular members under pure bending [J]. Journal of architectural science and engineering, 2020,37(2):44-53.)
 - [14] 马贤峰. 椭圆钢管混凝土抗震性能试验与计算方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
(MA Xianfeng. Experimental study on seismic behavior and calculation method of concrete filled elliptical steel tube [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.)
 - [15] 王凤芹, 王静峰, 沈奇罕. 椭圆钢管混凝土中、长柱轴压性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019,42(7):952-958.
(WANG Fengqin, WANG Jingfeng, SHEN Qihan. Study of axial compressive behavior of slender elliptical concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science edition), 2019,42(7):952-958.)
 - [16] 余志武, 丁发兴. 混凝土受压力学性能统一计算方法[J]. 建筑结构学报, 2003,4:41-46.
(YU Zhiwu, DING Faxing. Unified calculation method for compressive properties of concrete [J]. Journal of building structures, 2003, 4: 41-46.)
 - [17] 余洁, 王余航, 王维, 等. 压弯扭复合荷载作用下钢管约束钢筋混凝土柱的承载力及弯扭相关关系研究[J]. 建筑结构学报, 2020,41(5):96-107.
(YU Jie, WANG Yuhang, WANG Wei, et al. Ultimate capacity and bending-torsion correlation of steel tube confined RC columns under combined compression-bending-torsion load [J]. Journal of building structures, 2020, 41(5):96-107.)
 - [18] 杨志坚, 韩嘉明, 杨军彩, 等. 空心圆钢管混凝土轴压柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020,36(3):429-438.
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, YANG Juncui, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3):429-438.)
 - [19] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
(CAO Jinfeng, SHI Yiping. FAQs of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)