

# 内配钢骨及加劲肋的圆钢管混凝土 构件轴拉性能试验研究

李 伟<sup>1</sup>, 李博凡<sup>2</sup>, 李毅平<sup>1</sup>, 王晓栋<sup>2</sup>, 刘 钊<sup>1</sup>, 王先铁<sup>2</sup>

(1. 国网甘肃省电力公司 建设分公司, 甘肃 兰州, 730050; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055)

**摘要:** 为研究内配钢骨及加劲肋的圆钢管混凝土构件轴心受拉性能, 对 7 个钢管混凝土试件进行了轴心受拉试验, 探究不同内部构造形式对构件受拉承载力和刚度的影响。试验结果表明: 内配钢骨和纵向加劲肋能有效地参与受拉作用, 提高构件的受拉承载力和刚度, 当试件达到极限受拉承载力时, 内配钢骨亦能达到受拉屈服。与普通钢管混凝土试件相比, 内配钢骨、纵向加劲肋试件的极限受拉承载力分别提高 13.60% 和 7.82%; 同时内配钢骨和纵向加劲肋试件的承载力提高 22.94%; 内配环肋对试件的极限受拉承载力影响很小, 但环肋能更有效地将外荷载传递给混凝土, 使混凝土均匀受力。利用有限元软件 ABAQUS 对试验试件进行数值模拟分析, 模拟结果与试验结果吻合较好。现有规范对钢管混凝土轴心受拉构件承载力的计算偏于安全, 韩林海提出的钢管混凝土轴心受拉刚度公式计算结果与试验结果吻合较好。

**关键词:** 钢管混凝土; 内配钢骨; 加劲肋; 轴心受拉试验; 承载力; 刚度

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0682-10

## Experimental study on axial tensile behavior of circular concrete-filled steel tubular members with angles and stiffeners

LI Wei<sup>1</sup>, LI Bofan<sup>2</sup>, LI Yiping<sup>1</sup>, WANG Xiaodong<sup>2</sup>, LIU Zhao<sup>1</sup>, WANG Xiantie<sup>2</sup>

(1. State Grid Gansu Power Construction Company, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the axial tensile behavior of circular concrete-filled steel tubular(CFST) members with angles and stiffeners, the axial tension test was carried out on seven specimens to explore the effects of different internal structural forms on the tensile bearing capacity and rigidity of the members. The test results show that the internal angles and longitudinal stiffeners can effectively participate in the tensile action and improve the tensile bearing capacity and rigidity of the test specimens. When the specimens reach the ultimate tensile capacity, the internal angles can reach the tensile yield. Compared with common CFST specimen, the ultimate tensile capacity of the specimens with angles and longitudinal stiffeners is increased by 13.60% and 7.82% respectively, and the bearing capacity of the specimens with internal angles and stiffeners is increased by 22.94%. The internal ring stiffeners has little effect on the ultimate tensile capacity of the specimen, but it can transfer the external load to the inner concrete more effectively, so that the concrete is evenly tensioned. The finite element software ABAQUS is used for numerical simulation analysis of the test specimen, and the simulation results are in good agreement with the test results. The results show that the calculation of the bearing capacity of the test specimen based on the existing codes tends to be conservative, while the calculation results of the axial tensile stiffness formula proposed by Linhai Han are in good agreement with the test results.

**Key words:** CFST; latticed angles; stiffeners; axial tension test; bearing capacity; rigidity

钢管混凝土构件充分利用了混凝土对钢管的支撑作用以及钢管对混凝土的约束作用, 从而具

有优良的受压性能, 被广泛应用于工程实践<sup>[1-6]</sup>. 而钢管混凝土用作输电杆塔、钢管混凝土桁架桥

收稿日期: 2021-01-27 修改稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678474)

第一作者: 李伟(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事输变电工程设计研究. E-mail: 304550629@qq.com

通信作者: 王先铁(1979—), 男, 博士, 教授, 从事钢结构与钢管混凝土结构研究. E-mail: wangxiantie@163.com

的下弦杆时, 拉力会对钢管混凝土构件的破坏起控制作用. 因此, 对钢管混凝土构件受拉性能开展研究具有重要意义.

以往主要针对普通钢管混凝土构件的受拉性能开展研究. 潘友光等<sup>[7]</sup>对普通圆钢管混凝土构件进行了轴拉试验, 结果表明: 内部混凝土的存在可使钢管的受拉纵向屈服应力提高约 10%. 张素梅等<sup>[8]</sup>通过有限元分析, 得出钢管混凝土构件受拉承载能力较空钢管最大提高 15%. 蔡文哲等<sup>[9]</sup>对 10 个钢管混凝土柱在轴向拉力作用下的受力行为进行了数值模拟. 结果表明: 钢管混凝土轴向受拉时, 拉力主要由钢管承担, 混凝土的主要作用是对钢管的径向收缩起支撑作用. Han 等<sup>[10]</sup>对 18 个钢管混凝土试件进行了轴拉试验, 研究了含钢率、混凝土强度、钢管与混凝土粘结力等因素对构件轴拉性能的影响, 提出了轴拉承载力计算公式. Li 等<sup>[11]</sup>对钢管混凝土构件的拉弯性能展开了试验研究和有限元分析, 结果表明: 钢管与混凝土能很好地协同工作, 提高构件的承载能力, 极限荷载时, 构件表现出良好的塑性. Zhou 等<sup>[12]</sup>对不同尺寸的圆钢管混凝土构件和空钢管进行了轴拉试验, 研究其承载力和刚度差异, 结果表明: 与空钢管相比, 钢管混凝土构件的承载力提高 10.2%, 刚度提高 28.7%.

钢管混凝土构件受拉时, 外荷载主要由钢管承担. 当外荷载较大时, 增大钢管壁厚可能会造成钢管难以加工、强度降低、层状撕裂等问题, 因此, 在钢管混凝土内配置加劲件成为提高钢管混凝土构件受拉承载能力的重要途径. 陈驹<sup>[13]</sup>、王军等<sup>[14]</sup>对内配钢筋的钢管混凝土构件和内配角钢的钢管混凝土构件开展了轴拉试验研究, 提出了相应的承载力和刚度计算公式. Xu 等<sup>[15]</sup>采用试验和有限元分析相结合的方法, 研究了内配角钢钢管混凝土构件的传力机理. 结果表明: 内配角钢与外钢管在无任何连接情况下仍能达到受拉屈服.

综上所述, 国内外学者对钢管混凝土受拉性能的研究主要集中于未加劲的普通钢管混凝土构件, 对内配加劲件的钢管混凝土构件受拉性能研究较少. 本文针对内配钢筋和加劲肋的圆钢管混凝土构件进行轴拉试验和有限元模拟分析, 研究其受力过程、破坏机理、承载力及刚度. 将按照国内外规范计算的试验试件受拉承载力和刚度计算结果与试验结果进行对比, 探究现有规范对内配钢筋及加劲肋圆钢管混凝土构件受拉承载力和

刚度的适用性.

1 试验研究

1.1 试件设计

为研究内配钢筋和加劲肋圆钢管混凝土构件的轴拉力学性能, 设计了 7 个轴拉试件, 试件设计参数和试件图分别如表 1、图 1 所示. 钢管由两块钢板卷制焊接而成, 外径均为 400 mm, 长度为 3 000 mm, 壁厚为 6 mm. 内配纵肋焊接在钢管内壁, 其截面尺寸为 4-4 mm×24 mm. 由于钢管内部无法施焊, 故内配钢筋仅一端与端板焊接, 钢筋截面尺寸为 4-L40 mm×4 mm. 环肋焊接在钢管内壁, 与纵肋相交处断开纵肋, 其截面尺寸为 5 mm×24 mm. 为固定钢筋位置, 在角钢上下端 100 mm 处设置长度为 50 mm 的拉结筋, 分别与角钢及钢管点焊. 为了保证受拉过程中试件端板与钢管之间可靠传力, 在试件两端焊接 16 块加劲板. 试件两端端板采用高强螺栓与加载装置连接.

表 1 试件主要参数  
Tab. 1 Main parameters of specimens

试件 编号	钢管			加劲环 板间距	纵肋 尺寸	内配钢 骨尺寸
	长度 /mm	直径 /mm	厚度 /mm			
ZL-1	3 000	400	6	未设置	0	0
ZL-2	3 000	400	6	$D_c$	0	0
ZL-3	3 000	400	6	$D_c$	0	4-L40×4
ZL-4	3 000	400	6	$D_c$	4-24×4	0
ZL-5	3 000	400	6	$D_c$	4-24×4	4-L40×4
ZL-6	3 000	400	6	$1.5 \times D_c$	0	0
ZL-7	3 000	400	6	$2 \times D_c$	0	0

注:  $D_c$  为钢管外径.

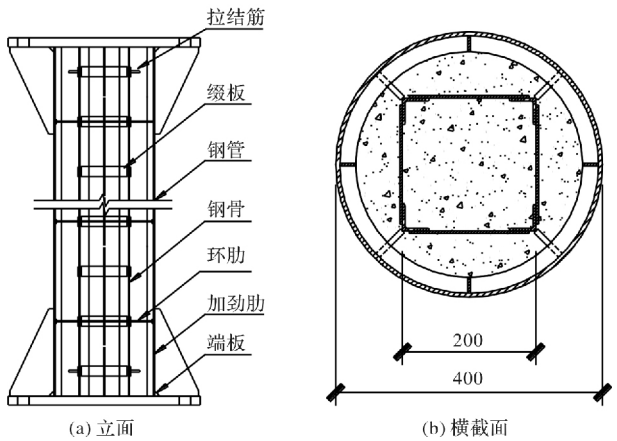


图 1 钢管混凝土试件  
Fig. 1 CFST specimens

1.2 材料力学性能

试件除角钢采用 Q235B 钢材外, 其余钢材均采用 Q345B; 混凝土强度等级为 C50. 钢材的材性试验结果见表 2. 混凝土 28 d 实测立方体抗压强度标准值为 52.07 MPa, 弹性模量为 34 250 MPa.

表 2 钢材材性试验结果

Tab. 2 Material properties of steel

取样部位	厚度 $t/\text{mm}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{MPa}\times 10^5$	伸长率 $\delta/\%$
钢管	6(5.67)	393	520	2.14	33.2
环肋	5(4.76)	390	546	2.11	33.1
钢骨	4(3.81)	298	463	2.13	43.1
纵肋	4(3.86)	392	568	2.10	33.1

注: 括号内数值为实测厚度.

1.3 加载装置

采用 8 000 kN 电液伺服实验机对试件进行加载, 试件下端与底座固接, 上端通过刚性法兰与作动器连接. 试验装置如图 2 所示. 试验采用分级加载. 先预加载至承载力设计值的 10%, 再卸载到 0%, 检查试验装置、测试仪器是否正常工作. 正式加载时, 在承载力设计值的 60%之前, 每一级荷载增量取设计值的 10%; 当荷载达到设计值的 60%后, 荷载增量取设计值的 5%; 当荷载接近设计值时, 缓慢持续加载. 轴拉试件以跨中应变达到  $5\,000\times 10^{-6}$  时对应的荷载作为试件的极限荷载<sup>[10]</sup>. 为避免试件断裂对试验系统的不利影响, 当试件跨中应变超过  $5\,000\times 10^{-6}$  后停止加载.

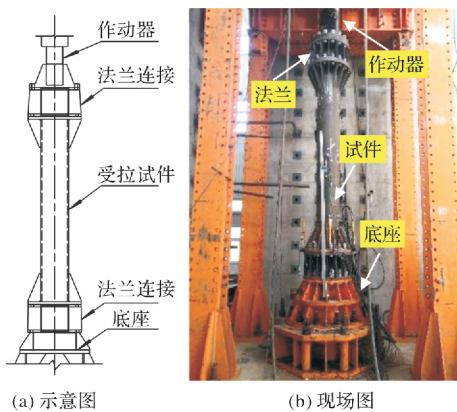


图 2 试验装置  
Fig. 2 Test setup

1.4 测点布置

试件位移计与应变片布置如图 3 所示. 在试件下端板布置 4 个位移计以测量试件的纵向位移, 编号分别为 W1~W4. 在试件中部前后对称布置 2 个位移计以测量试件的颈缩变形, 编号分别为 W5、W6. 在距试件两端 500 mm 处均匀布置 8 个

纵向应变片, 试件跨中均匀布置 8 个纵向应变片和 4 个环向应变片, 以监测试件的纵向和环向应变, 用“L”和“H”分别表示纵向和环向, 应变以拉为正、压为负.

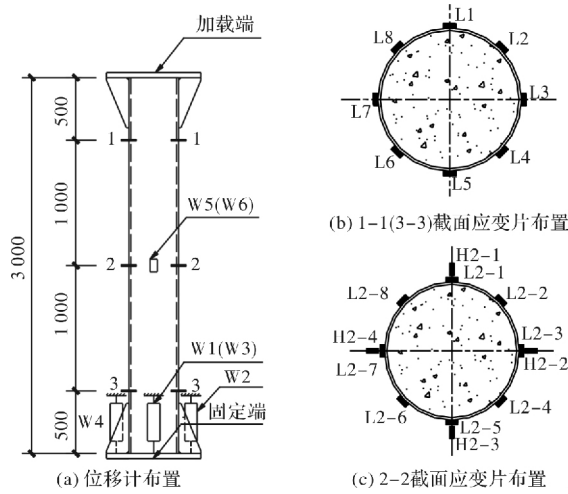


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of measurement points

2 试验结果及分析

2.1 试件变形

各试件试验现象基本一致. 加载过程中, 试件的轴向和颈缩变形不明显. 各试件的变形形态如图 4 所示. 通过测量加载前后试件的长度和截面周长变化, 可得到试件的轴向和环向变形, 测量结果如表 3 所示. 由表 3 可知, 各试件近加载端的颈缩变形最大.



图 4 试件变形

Fig. 4 Deformation of specimens

表 3 试件伸长量与颈缩量(单位: mm)

Tab. 3 Elongation and necking shrinkage of specimens/mm

试件编号	伸长	1-1 截面	2-2 截面	3-3 截面
		颈缩	颈缩	颈缩
ZL-1	31	11	10	9
ZL-2	28	10	8	9
ZL-3	32	10	8	8
ZL-4	27	9	7	7
ZL-5	23	9	6	7
ZL-6	27	10	8	9
ZL-7	26	11	9	8

2.2 裂缝分布

为观察试件内部混凝土的开裂情况, 试验后将试件外钢管割开, 得到各试件内部混凝土的裂缝分布情况, 如图 5 所示. ZL-1 试件内部混凝土开裂, 表明外荷载能通过钢管与混凝土之间的相互作用传递至内部混凝土. 与 ZL-1 试件相比, ZL-2 试件由于环肋的存在, 环肋两侧的混凝土裂缝更密集, 最大裂缝宽度出现在相邻环肋之间, 表明环肋能更均匀地将外荷载传递至内部混凝土, 使混凝土均匀受力. ZL-3 试件的混凝土裂缝宽度和间距均小于 ZL-2 试件, 表明内配钢筋有效参与了试件的受拉作用并抑制了混凝土裂缝的发展. 与 ZL-2 试件相比, ZL-4 和 ZL-5 试件的混凝土裂缝密而窄, 表明内配件参与了试件的受拉作用并抑制了混凝土的开裂. ZL-6 和 ZL-7 试件由于环肋间距较大, 内部混凝土裂缝的发展与普通钢管混凝土试件 ZL-1 相似.

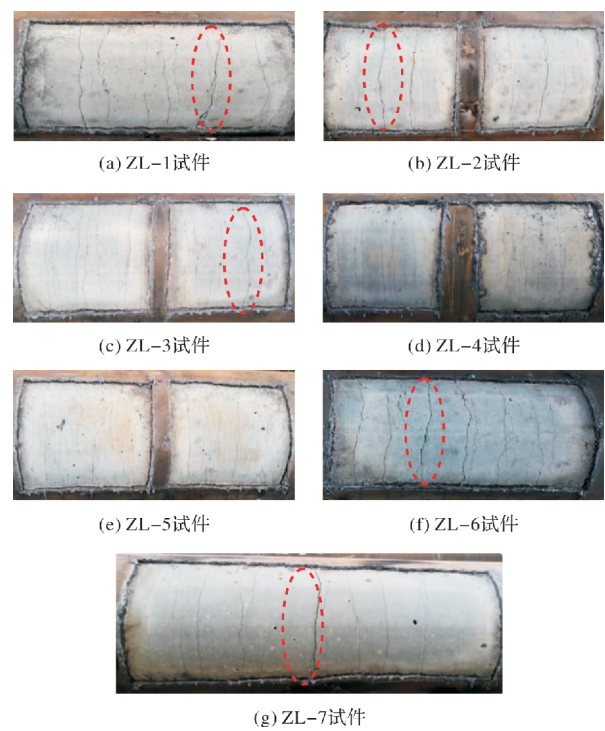


图 5 试件内部混凝土裂缝形态  
Fig. 5 Crack patterns of concrete in specimens

2.3 荷载-位移曲线及承载力

各试件的荷载-位移曲线如图 6 所示. 由图可知, 各试件的荷载-位移曲线都包括明显的弹性阶段、弹塑性阶段及塑性阶段. 加载初期, 试件整体处于弹性状态, 荷载与位移呈线性关系; 随着荷载增加, 试件进入弹塑性阶段, 试件受拉刚度明显降低; 塑性发展阶段, 荷载仍保持缓慢增加.

各试件的受拉承载力如表 4 所示. 由表 4 可知, 环肋对试件的受拉承载力影响较小, 因此, 可取 ZL-1、ZL-2、ZL-6 及 ZL-7 试件的受拉承载力平均值 3 446 kN 作为该含钢率普通钢管混凝土构件的受拉承载力. 由 ZL-3、ZL-4 及 ZL-5 试件受拉承载力与该值对比可知, 内配钢筋使试件受拉承载力提高 471.3 kN, 提高幅度为 13.60%. 试件内配 4-L40×4 的钢筋屈服荷载 367.9 kN<471.3 kN, 表明内配钢筋能很好地参与试件的受拉作用并达到受拉屈服. 加劲纵肋使试件受拉承载力提高 269.47 kN, 提高幅度为 7.82%; 同时内配钢筋和加劲纵肋使试件受拉承载力提高 790.56 kN, 提高幅度为 22.94%.

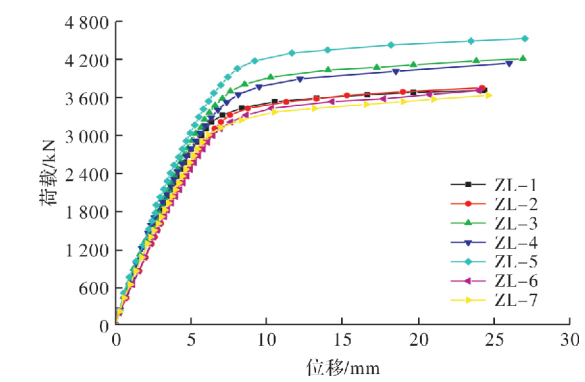


图 6 各试件荷载-位移曲线  
Fig. 6 Load-displacement curves of specimens

表 4 试件受拉承载力试验值  
Tab. 4 Test values of ultimate tensile bearing capacity of specimens

试件编号	环板间距 /mm	纵肋尺寸 /mm	钢筋尺寸 /mm	受拉承载力 试验值/kN
ZL-1	未设置	0	0	3 476.59
ZL-2	$D_c$	0	0	3 481.33
ZL-3	$D_c$	0	4-L40×4	3 917.36
ZL-4	$D_c$	4-24×4	0	3 715.47
ZL-5	$D_c$	4-24×4	4-L40×4	4 236.56
ZL-6	$1.5 \times D_c$	0	0	3 423.42
ZL-7	$2 \times D_c$	0	0	3 402.65

2.4 荷载-应变曲线

各试件中部荷载-平均纵向应变曲线如图 7 所示. 由图可知, 各试件应变发展趋势基本一致. 加载初期, 应变呈线性增长, 试件处于弹性状态; 随着荷载增加, 纵向变形速率加快, 呈现出非线性特征, 试件开始屈服, 应变快速增大. 与普通钢管混凝土试件相比, 内配纵向加劲肋和钢筋小幅提高了试件的刚度.



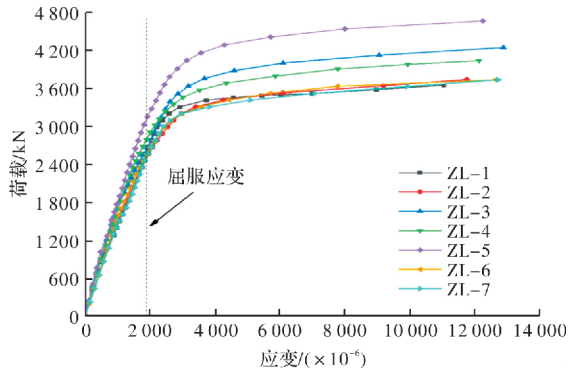


图7 试件中部荷载-平均纵向应变曲线

Fig. 7 Load-average longitudinal strain curves in the middle of each specimen

图8为各试件中部荷载-平均环向应变曲线。由图可知,加载过程中,钢管环向应变较小。当试件达到受拉极限荷载时,各试件钢管横向往应变均未达到屈服应变,其原因为核心混凝土抑制了钢管的颈缩变形。

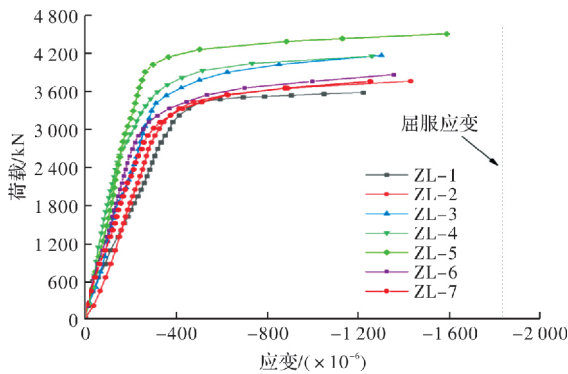


图8 试件中部荷载-平均环向应变曲线

Fig. 8 Load-average hoop strain curves in the middle of each specimen

### 3 非线性有限元分析

#### 3.1 材料本构关系

采用有限元软件 ABAQUS 对试件进行数值模拟。钢材本构关系采用韩林海等<sup>[16]</sup>提出的五折线本构模型。采用 ABAQUS 中的非耦合型延性损伤准则<sup>[17]</sup>模拟钢材刚度退化和破坏现象,参考 Wierzbicki<sup>[18-19]</sup>和 Xue<sup>[20]</sup>提出的金属材料损伤理论。Yu<sup>[21]</sup>将钢材的等效塑性损伤应变  $\bar{\epsilon}_0^{pl}$  与应力三轴度  $\eta$  的关系简化为

$$\bar{\epsilon}_0^{pl} = \begin{cases} \infty, & \eta \leq -1/3 \\ C_1 / (1 + 3\eta), & -1/3 \leq \eta \leq 0 \\ C_1 + (C_2 - C_1)(\eta/\eta_0)^2, & 0 \leq \eta \leq \eta_0 \\ C_2 \eta_0 / \eta, & \eta \geq \eta_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $C_2 = -\ln(1 - A_R)$ ;  $C_1 = C_2(\sqrt{3}/2)^{1/n}$ ;  $\sigma = K(\epsilon)^n$ 。

式中:  $C_1$  为钢材平板纯剪切状态下( $\eta=0$ )等效塑性损伤应变  $\bar{\epsilon}_0^{shear}$ ;  $C_2$  为单轴拉伸时( $\eta=\eta_0$ )的等效塑性损伤应变  $\bar{\epsilon}_0^{axi}$ ;  $\eta_0$  为常数,取  $1/3$ ;  $K$ 、 $n$  为钢材硬化参数,由钢材拉伸试验真实应力-应变曲线拟合得到。

损伤后的应力下降路径如图9所示。图中  $\bar{\epsilon}_0^{pl}$  为钢材进入损伤时的等效塑性应变,  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  为钢材最终失效时的等效塑性应变。钢材达到峰值应力后的下降路径可以表示为剩余应力形式,即:  $\sigma = (1 - D)\bar{\sigma}$ ,  $D$  为强度和刚度退化损伤因子,当  $D=0$  时,钢材进入初始损伤;  $D=1$  时,钢材完全破坏,失效单元删除。

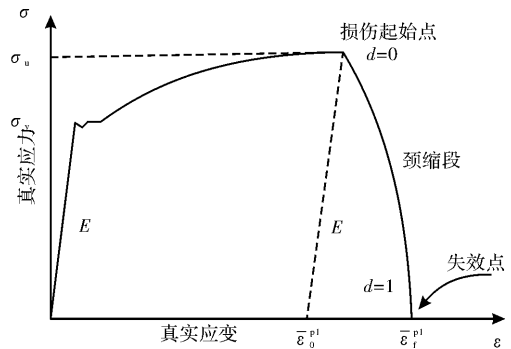


图9 钢材损伤下降路径

Fig. 9 Steel damage descent path

混凝土采用韩林海等<sup>[16]</sup>提出的塑性损伤模型,该模型可有效模拟多轴应力状态下混凝土的塑性性能。混凝土弹性模量取试验值,泊松比取  $0.2$ <sup>[16]</sup>。塑性模型中的膨胀角  $\psi$  取  $30^\circ$ ,双轴受压强度与单轴受压强度之比  $f_{b0}/f_{c0}$  取  $1.16$ ,拉、压子午线偏量第二应力不变量的比值  $K_c$  取  $0.6667$ ,黏性系数  $\mu$  取  $0.00025$ <sup>[22]</sup>。对于混凝土的受拉本构关系,采用能量破坏准则考虑混凝土受拉软化性能更具有收敛性<sup>[23]</sup>,其主要参数包括混凝土的断裂能和开裂应力。对于断裂能的计算采用 CEB-FIP MC90<sup>[24]</sup>中提供的计算公式,对于开裂应力参考沈聚敏<sup>[23]</sup>给出的混凝土抗拉强度计算公式。

#### 3.2 有限元模型

各部件均选用 8 节点减缩积分实体单元 (C3D8R)。钢管、加劲肋及加载板之间采用绑定连接;钢管和混凝土之间的相互作用采用接触模拟,法向为硬接触,切向为法摩擦,摩擦系数取  $0.60$ <sup>[25]</sup>。模型一端固定,另一端约束除轴向位移外的所有自由度并施加位移荷载。试件有限元模型如图10所示。

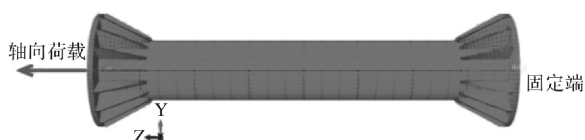


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

### 3.3 破坏形态

各试件的破坏形态如图 11 所示, 由图 11 可知, 各试件受拉破坏发生在试件中部或试件中部靠

近加载端区域. 其中, 配有加劲环肋试件的破坏位置均在试件中部至加载端区域之间环肋的边缘.

### 3.4 有限元模拟结果与试验结果对比

有限元分析的荷载-位移曲线与试验结果对比如图 12 所示. 由图可知, 有限元与试验荷载-位移曲线吻合较好, 表明有限元模型能较为准确地模拟内配钢骨及加劲肋圆钢管混凝土构件的轴拉承载性能.

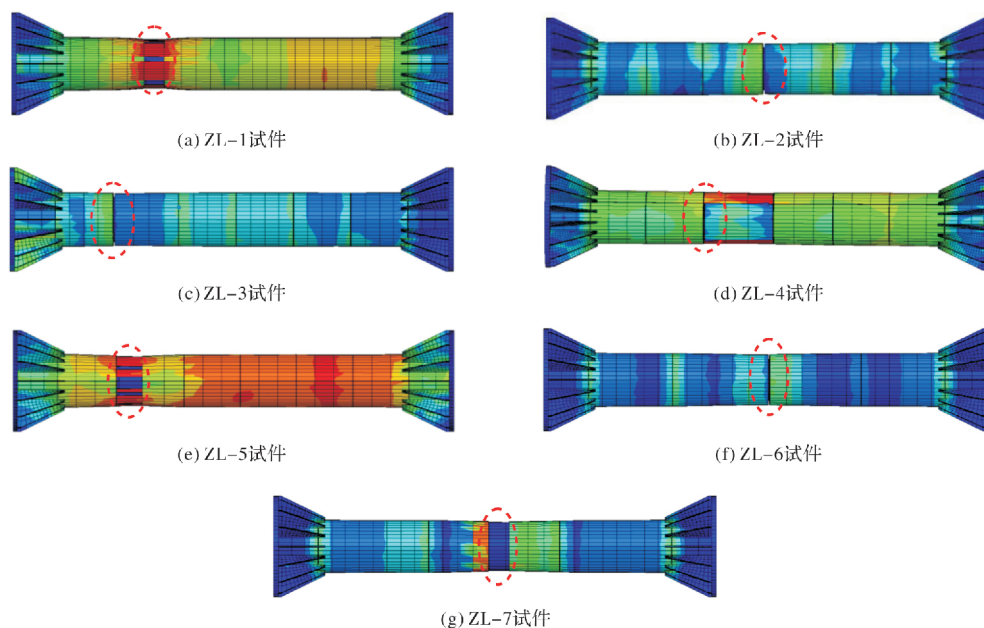
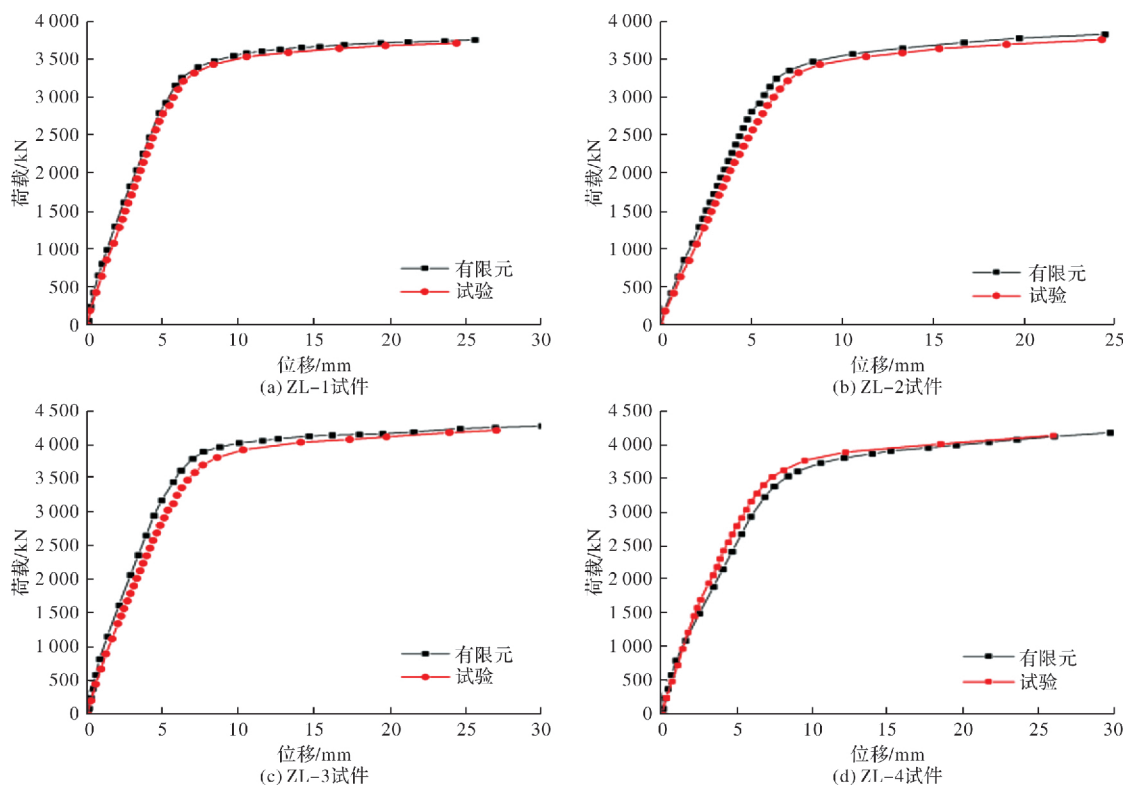


图 11 试件有限元分析破坏形态

Fig. 11 Failure patterns of finite element analysis of specimens



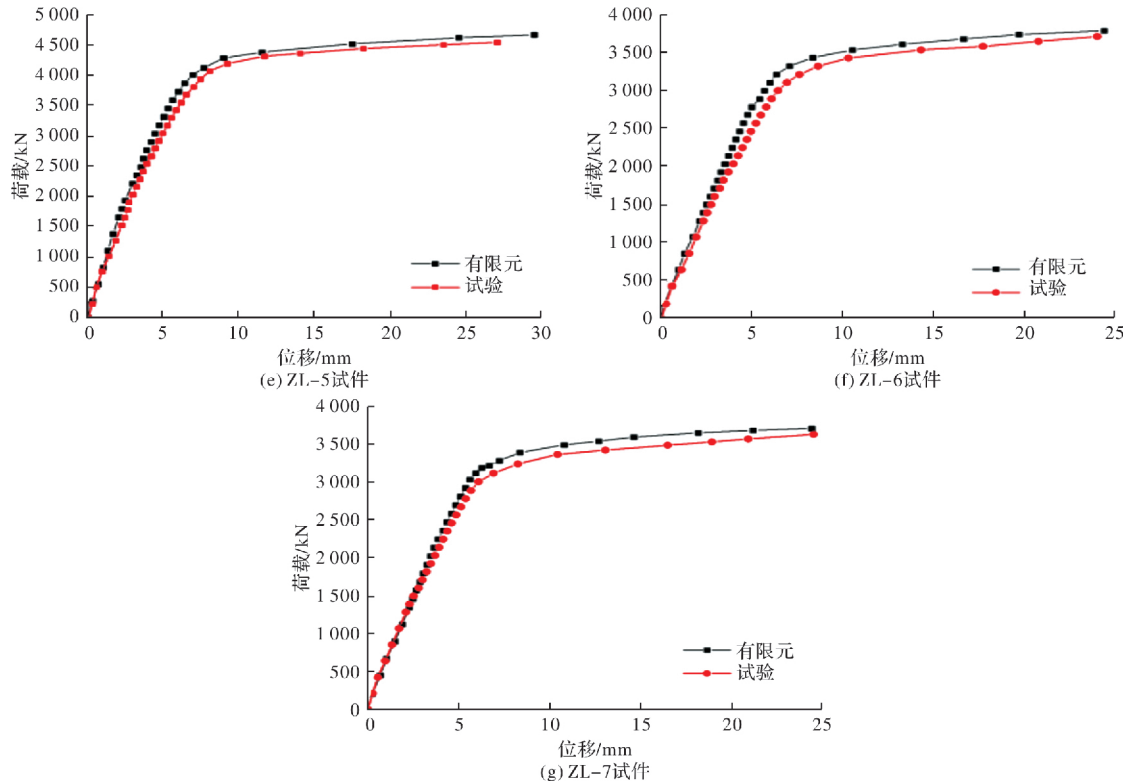


图 12 有限元与试验荷载-位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of load-displacement curves between FEM and test

试件的有限元模拟承载力与试验结果对比如表 5 所示. 由表可知,  $N_F/N_u$  平均值为 1.016 2, 最大偏差为 2.78%, 二者吻合较好.

表 5 有限元模拟结果与试验结果对比

Tab. 5 Comparison of bearing capacity between finite element analysis and test results

试件编号	有限元结果 $N_F/\text{kN}$	试验结果 $N_u/\text{kN}$	$N_F/N_u$
ZL-1	3 512.56	3 476.59	1.010 3
ZL-2	3 532.65	3 481.33	1.014 7
ZL-3	4 012.32	3 917.36	1.024 2
ZL-4	3 687.56	3 715.47	0.992 5
ZL-5	4 318.93	4 236.56	1.019 4
ZL-6	3 507.83	3 423.42	1.024 7
ZL-7	3 497.35	3 402.65	1.027 8
平均值			1.0162

### 3.5 损伤演化过程

图 13 给出了内配钢筋及加劲肋圆钢管混凝土构件各部件有限元模拟的应力发展过程. 构件应力发展过程为: 混凝土开裂→钢筋屈服→钢管屈服→构件破坏. 构件达到极限受拉荷载时, 内配钢筋受拉屈服, 表明内配钢筋能有效地参与受拉作用. 内配钢筋是提高构件受拉承载力的有效方式.

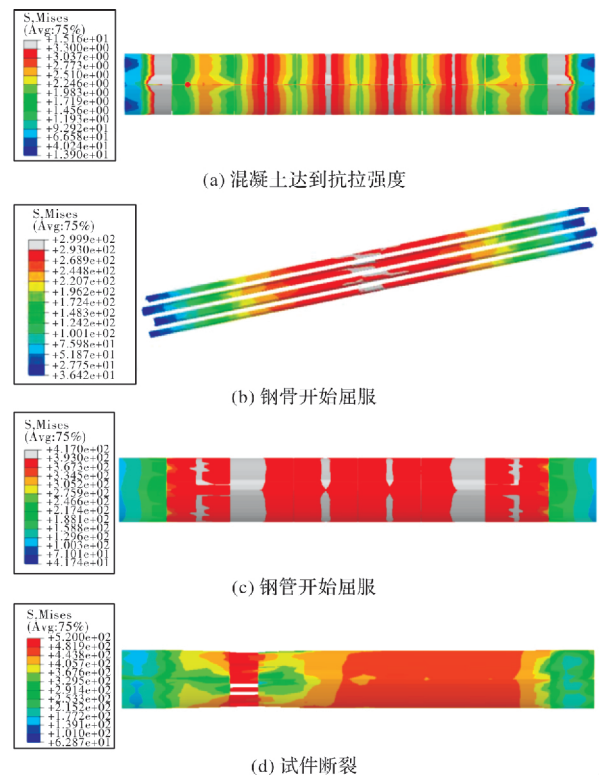


图 13 试件应力发展过程

Fig. 13 Stress development process of specimen

图 14 给出了内配钢筋圆钢管混凝土构件及各部件的荷载-应变曲线. 由图可知, 试件的荷载-应变曲线包括以下四个阶段:

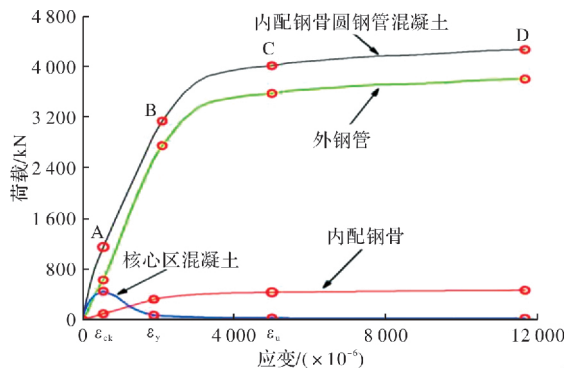


图 14 ZL-3 试件及其组成部件的荷载-应变曲线

Fig. 14 Load-strain curves of ZL-3 specimen and its components

(1) OA 段: 试件整体和各组件均保持弹性状态, 直到 A 点, 核心混凝土出现裂缝, 内力发生重分布. 在此之前, 混凝土与钢骨变形一致. 由于内配角钢的轴向刚度小于混凝土的轴向刚度, 因此, 此时内配钢骨承担外荷载的比例小于混凝土承担的比例. A 点时, 钢管、混凝土和钢骨承担外荷载比例分别为 54.14%、38.58% 和 7.28%.

(2) AB 段: 外荷载保持线性增加. 由于混凝土开裂导致构件的组合刚度下降, 同时内力发生重分布, 混凝土承担的外荷载比例明显下降, 内配角钢承担的外荷载比例有所增加. 由于内配角钢强度低于钢管强度, 内配钢骨比外钢管先达到受拉屈服. B 点时, 外钢管屈服, 此时, 钢管、混凝土和钢骨承担外荷载比例分别为 87.25%、2.07% 和 10.68%.

(3) BC 段: 钢材屈服后进入强化阶段, 荷载呈非线性增长. 以跨中应变达到  $5\,000 \times 10^{-6}$  (C 点) 所对应的荷载作为试件的极限荷载, 此时试件已完全屈服, 钢管、混凝土和钢骨承担外荷载比例分别为 89.09%、0.39% 和 10.52%. 混凝土承担的外荷载很小, 可认为混凝土对构件极限受拉承载力无影响.

(4) CD 段: 此阶段外荷载几乎保持不变, 曲线未出现下降段, D 点的应变大于  $10\,000 \times 10^{-6}$ , 构件表现出良好的塑性.

## 4 承载力与刚度计算

### 4.1 承载力计算

#### 4.1.1 中国规范

《特殊钢管混凝土构件设计规程》(CECS 408: 2015)<sup>[26]</sup> 给出了内配非约束型加劲件的钢管混凝土构件受拉承载力计算公式, 该公式不仅考虑了内部混凝土对钢管的支撑作用, 同时也考虑了加劲件对钢管混凝土构件承载力的提高. 具体公式

如下:

$$N_{ut} = 1.1A_s f_y + \varphi_1 \sum_{i=1}^n A_{si} f_{yi} \quad (2)$$

对于外钢管设置纵向加劲肋的构造形式, 可将钢管与纵肋视为整体, 内部混凝土主要约束钢管的颈缩变形从而提高构件受拉承载力. 故将钢管承载力乘增大系数 1.1, 对应的轴心受拉承载力计算公式为

$$N_{ut} = 1.1A_s f_y + A_{sr} f_{yr} + \varphi_1 A_{sb} f_{yb} \quad (3)$$

式中:  $A_{sr}$ 、 $A_{sb}$  分别为内配纵肋和钢骨面积;  $f_{yr}$ 、 $f_{yb}$  分别为内配纵肋和钢骨的屈服强度;  $\varphi_1$  为内配加劲件承载力修正系数, 为内配加劲件应力与外钢管应力之比, 该值由试验确定.

#### 4.1.2 美国规范与欧洲规范

美国规范 AISC360-16<sup>[27]</sup> 和欧洲规范 Euro-code4<sup>[28]</sup> 对钢管混凝土受拉构件的承载力计算公式一致. 不考虑内部混凝土对构件受拉承载力的提高, 构件受拉极限承载力为加劲件和钢管的受拉承载力之和, 相应计算公式为

$$N_{ut} = 1.1A_s f_y + \sum_{i=1}^n A_{si} f_{yi} \quad (4)$$

#### 4.1.3 韩林海建议公式

Han 等<sup>[10]</sup> 不仅考虑内部混凝土对构件受拉承载力的提高, 同时也考虑含钢率对钢管混凝土受拉构件承载力的影响, 提出了普通钢管混凝土轴拉构件的承载力计算公式为

$$N_{ut} = (1.0 - 0.4\alpha) A_s f_y \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为构件的截面含钢率.

参考式(4), 同时考虑内配钢骨和加劲肋对构件承载力的提高, 同时内配钢骨和加劲肋的圆钢管混凝土构件轴心受拉承载力计算公式为

$$N_{ut} = (1.1 - 0.4\alpha) A_s f_y + \sum_{i=1}^n A_{si} f_{yi} \quad (6)$$

式中:  $A_{si}$  为加劲件面积;  $f_{yi}$  为加劲件屈服强度.

#### 4.1.4 承载力计算结果对比

研究表明, 当试件跨中纵向应变达到  $5\,000 \times 10^{-6}$  时, 钢管已经处于屈服状态, 且荷载-应变曲线的弹塑性阶段已基本结束, 此后, 随着纵向应变增长, 荷载增长非常缓慢. 因此, 取跨中应变超过  $5\,000 \times 10^{-6}$ <sup>[10]</sup> 时对应的承载力作为试件的极限承载力并与上述各公式计算结果对比, 如表 6 所示. 由表可知, 各公式得到的轴拉承载力计算值均小于试验值, 结果偏于安全. 对于普通圆钢管混凝土轴拉构件, 《特殊钢管混凝土构件设计规程》(CECS 408: 2015)、美国规范 AISC360-16 和



欧洲规范 Eurocode4、韩林海建议公式计算结果最大偏差分别为 7.78%、16.05%、9.76%；对于内

配钢筋和纵肋的圆钢管混凝土轴拉构件，最大偏差分别为 14.10%、18.89%、13.73%。

表 6 构件轴拉承载力计算结果与试验结果对比

Tab. 6 Comparisons of calculation results of bearing capacity and test results of axially tensioned members

试件	环板间距 /mm	纵肋尺寸 /mm	钢筋尺寸 /mm	$N_{ut}/\text{kN}$	$N_2/\text{kN}$	$N_3/\text{kN}$	$N_5/\text{kN}$	$N_2/N_{ut}$	$N_3/N_{ut}$	$N_5/N_{ut}$
ZL-1	未设置	0	0	3 477	3 211	2 919	3 137	0.923 5	0.839 5	0.902 4
ZL-2	$D_c$	0	0	3 481	3 211	2 919	3 137	0.922 2	0.838 4	0.901 2
ZL-3	$D_c$	0	4-L40×4	3 917	3 490	3 287	3 505	0.890 8	0.839 0	0.894 8
ZL-4	$D_c$	4-24×4	0	3 715	3 360	3 068	3 287	0.904 4	0.825 9	0.884 7
ZL-5	$D_c$	4-24×4	4-L40×4	4 237	3 693	3 436	3 655	0.859 0	0.811 1	0.862 7
ZL-6	$1.5 \times D_c$	0	0	3 423	3 211	2 919	3 137	0.937 8	0.852 6	0.916 4
ZL-7	$2 \times D_c$	0	0	3 403	3 211	2 919	3 137	0.943 6	0.857 8	0.922 0
平均值								0.911 6	0.837 7	0.897 7

注： $N_{ut}$ 为试验值， $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_5$ 分别为式(3)、(4)、(6)计算值。

## 4.2 刚度计算

### 4.2.1 理论公式

《钢管混凝土结构技术规范》(GB50936-2014)<sup>[29]</sup>、《特殊钢管混凝土构件设计规程》(CECS 408: 2015)<sup>[26]</sup>、AISC360-16<sup>[27]</sup>和 Eurocode4-2004<sup>[28]</sup>规范均未给出钢管混凝土构件的轴拉刚度计算公式。Han 等<sup>[10]</sup>基于试验和有限元分析结果，提出的圆钢管混凝土构件轴拉刚度计算公式为

$$(EA)_t = E_s A_s + 0.1 E_c A_c \quad (7)$$

式中： $(EA)_t$ 为试件的整体刚度； $E_s$ 、 $E_c$ 分别为钢管和混凝土的弹性模量； $A_s$ 、 $A_c$ 分别为钢管和内部混凝土的横截面积。

对于内配纵肋构件，由于纵肋与外钢管焊接，可将纵肋与外钢管视为一体，计算构件整体受拉刚度时直接叠加纵肋的受拉刚度；对于内配钢筋，在弹性阶段，内配钢筋与混凝土之间几乎未发生滑移，内配钢筋对构件的轴拉刚度贡献发生在混凝土开裂后。因此，参考式(7)，提出内配加劲肋和钢筋的圆钢管混凝土构件轴拉刚度计算公式为

$$(EA)_t = E_s A_s + E_{sr} A_{sr} + 0.1 (E_c A_c + E_{sb} A_{sb}) \quad (8)$$

式中： $E_{sr}$ 、 $E_{sb}$ 分别为内配纵肋和内配钢筋的弹性模量； $A_{sr}$ 、 $A_{sb}$ 分别为内配纵肋和内配钢筋的横截面积，其余变量物理意义与式(7)相同。

### 4.2.2 轴拉刚度计算公式验证

根据式(8)计算的试件轴拉刚度如表 7 所示。其中， $(EA)_{tc}$ 为计算结果， $(EA)_t$ 为试验结果，其值为试件荷载-应变曲线原点与钢材屈服点之间的斜率<sup>[10]</sup>。 $(EA)_{tc}/(EA)_t$ 的平均值为 1.02，最大偏差为 4%，计算结果与试验结果吻合较好。

表 7 轴拉刚度计算值与试验值比较

Tab. 7 Comparison of the calculated values of the axial tension stiffness with the experimental values

试件编号	$(EA)_{tc}/10^3 \text{ kN}$	$(EA)_t/10^3 \text{ kN}$	$(EA)_{tc}/(EA)_t$
ZL-1	1.994	1.941	1.03
ZL-2	1.994	1.955	1.02
ZL-3	2.021	2.005	1.01
ZL-4	2.075	2.095	0.99
ZL-5	2.102	2.014	1.04
ZL-6	1.994	1.915	1.04
ZL-7	1.994	1.939	1.03
平均值		1.02	

## 5 结论

对 7 个不同内部构造的圆钢管混凝土试件进行了轴拉试验，结合有限元数值模拟和理论分析，得出以下结论：

(1)内配钢筋、纵向加劲肋试件的轴拉承载力较普通钢管混凝土试件分别提高 13.60% 和 7.82%；同时内配钢筋和纵向加劲肋试件的轴拉承载力较普通钢管混凝土试件提高 22.94%。内配环肋对试件的轴拉承载力影响很小，但环肋能更有效地将外荷载传递给内部混凝土，使混凝土均匀受力；

(2)轴拉荷载下，混凝土率先开裂且几乎不承担外荷载，主要起支撑钢管、抑制钢管颈缩变形的作用；

(3)现有规范对于圆钢管混凝土构件轴拉承载力的计算偏于安全；采用韩林海的建议公式所得

的构件刚度与试验结果吻合较好。

## 参考文献 References

- [1] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 16-26.  
CAI Shaohuai. Recent development of steel tube-confined concrete structures in china[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 16-26.
- [2] HAN Linhai, LI Wei, Bjorhovde Reidar. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures members [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2014, 100: 211-228.
- [3] 余志武,丁发兴,林松. 钢管高性能混凝土短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 41-47.  
YU Zhiwu, DING Faxing, LIN Song. Researches on behavior of high-performance concrete filled tubular steel short column [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(2): 41-47.
- [4] 张素梅,王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱的破坏模式[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 1-10.  
ZHANG Sumei, WANG Yuyin. Failure modes of short columns of high-strength concrete-filled steel tubes[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 1-10.
- [5] 何益斌,肖阿林,郭健,等. 钢骨-钢管自密实高强混凝土偏压柱力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 102-109.  
HE Yibin, XIAO Alin, GUO Jian, et al. Experimental study on behavior of eccentrically loaded steel-reinforced self-compacting high-strength concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 102-109.
- [6] BURAK Evirgen, AHMET Tuncan, KIVANC Taskin. Structural behavior of concrete filled steel tubular sections (CFT/CFST) under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 80: 46-56.
- [7] 潘友光,钟善桐. 钢管混凝土轴心受拉本构关系[J]. 工业建筑, 1990, 20(4): 30-37.  
PAN Youguang, ZHONG Shantong. The axis tensile constitutive relationship of concrete filled steel tubes [J]. Industrial Construction, 1990, 20(4): 30-37.
- [8] 张素梅. 钢管混凝土构件在轴心拉力作用下的性能 [C]//中国钢协-混凝土组合结构协会第三次年会论文集. 哈尔滨:中国钢协, 1991, 24: 32-38.  
ZHANG Sumei. The behavior of concrete-filled tubular members subjected to axial tension [C]//The Third annual meeting of China Steel Construction Society Association for Steel-Concrete Composite Structures. Haerbing: China Steel Construction Society, 1991, 24: 32-38.
- [9] 蔡文哲,史庆轩,王斌. 钢管混凝土构件轴向受拉机理和承载力研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(4): 124-131.  
CAI Wenzhe, SHI Qingxuan, WANG Bin. Research on the axial tensile mechanism and bearing capacity of concrete filled steel tube members [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(4): 124-131.
- [10] HAN Linhai, HE Shanhu, LIAO Feiyu. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2011, 67(11): 1699-1709.
- [11] LI Wei, HAN Linhai, Tak-Ming Chan. Performance of concrete-filled steel tubes subjected to eccentric tension [J]. Engineering Structures, 2015, 141(12): 04015948.
- [12] ZHOU Meng, XU Liyan, TAO Muxuan, et al. Experimental study on confining-strengthening, confining-stiffening, and fractal cracking of circular concrete filled steel tubes under axial tension [J]. Engineering Structures, 2017, 133: 186-199.
- [13] 陈驹,王军,金伟良. 配筋钢管混凝土柱轴拉及偏拉性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 272-277.  
CHEN Ju, WANG Jun, JIN Weiliang. Experimental investigation on concrete-filled steel tubes with reinforcing bars under axial and eccentric tension [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 272-277.
- [14] 王军,董建尧,赵建,等. 内配钢筋钢管混凝土构件轴心受拉性能研究[J]. 钢结构, 2018, 33(7): 33-39.  
WANG Jun, DONG Jianyao, ZHAO Jian, et al. Experiment research on concrete-filled steel tubes with reinforcing bars under axial tension [J]. Steel Construction, 2018, 33(7): 33-39.
- [15] XU Fei, WANG Jun, CHEN Ju, et al. Load-transfer mechanism in angle-encased CFST members under axial tension [J]. Engineering Structures, 2019, 178: 162-178.
- [16] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 第2版. 北京:科学出版社, 2007.  
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: Theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: China Science Publishing, 2007.
- [17] Dassault Systemes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.14 [M]. USA, RI: Providence, 2014.
- [18] WIERZBICKI Tomasz, BAO Yingbin, LEE Young Woong, et al. Calibration and evaluation of seven fracture models [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(4): 719-743.

- Governance :Analysis based on the peak value of coal and carbon dioxide[J]. China Social Sciences, 2015 (9): 84-107
- [16] 刘志海. 我国废玻璃回收利用综述[J]. 玻璃, 2018, 45 (10): 1-8.  
LIU Zhihai. Overview of waste glass recycling in China[J]. Glass, 2018, 45 (10): 1-8
- [17] 王立坤, 李超. 浮法玻璃企业 CO<sub>2</sub> 排放量的测算与控制[J]. 中国建材, 2014(7): 105-108.  
WANG Likun, LI Chao. Calculation and control of CO<sub>2</sub> emission from float glass enterprises[J]. China Building Materials, 2014 (7): 105-108
- [18] 朱海峰. 建筑废弃混凝土资源化利用现状与应用探讨[J]. 建设科技, 2018(8): 141-142.  
ZHU Haifeng. Discussion on resource utilization status and application of building waste concrete [J]. Construction Technology, 2018 (8): 141-142
- [19] 贡小雷, 张玉坤. 物尽其用——废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2011 (2): 138-144.  
GONG Xiaolei, ZHANG Yukun. Making the best of everything :A low-carbon development road for the utilization of waste building materials [J]. Journal of Tianjin University (Social Science Edition), 2011 (2): 138-144
- [20] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016(4): 74-82.  
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation method and practice of carbon dioxide emission in iron and steel production process [J]. Iron and Steel, 2016 (4): 74-82
- [21] 贡小雷, 张玉坤. 物尽其用——废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2011, 13(2): 138-144.  
GONG Xiaolei, ZHANG Yukun. Making the best of everything: A low-carbon development road for the utilization of waste building materials [J]. Journal of Tianjin University (Social Science Edition), 2011, 13 (2): 138-144.

(编辑 沈 波)

(上接第 691 页)

- [19] WIERZBICKI T, XUE L. On the effect of the third invariant of the stress deviator on ductile fracture[R]. Cambridge: MIT Impact and Crashworthiness Lab, 2005.
- [20] XUE L. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids under triaxial loading-Part I: Pressure sensitivity and Lode dependence[R]. Cambridge: MIT Impact and Crashworthiness Lab, 2005.
- [21] HL Yu, DY Jeong. Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched Charpy specimens [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 54(1): 54-62.
- [22] XU Fei, CHEN Ju, TAK-MING Chan. Numerical investigation on compressive performance of CFST columns with encased built-up lattice-angles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 242-253.
- [23] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
SHEN Jumin, WANG Chuanzhi, JIANG Jianjing. Reinforced concrete finite element and limit analysis of slab shell[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [24] CEB-FIP Model Code for Concrete Structure MC1990 [M]. Lausame: Comite Euro-International du Beton (CEB), 1990.
- [25] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.  
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [26] CECS. 特殊钢管混凝土构件设计规程: CECS 408-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
CECS. Design specification for specified concrete filled steel tubular members: CECS 408-2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [27] ANSI/AISC. Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [28] ECS. Eurocode4 design of composite steel and concrete structures [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [29] 哈尔滨工业大学. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Harbin Institute of Technology. Technical code for concrete-filled steel tubular structures: GB 50936-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑 沈 波)