

# 圆端形钢管混凝土柱局压力学性能研究

刘华东<sup>1</sup>, 汤永强<sup>2</sup>

(1. 广东粤海粤东供水有限公司, 广东 揭阳 522000; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

**摘要:** 采用有限元软件 ABAQUS 对圆端形钢管混凝土柱局压力学性能及受力机理进行数值模拟, 对试件受力全过程、接触力及参数进行分析。结果表明: 同一截面钢管圆弧段相比平直段约束作用更强, 接触力更大, 且自端部向下, 截面各点处的接触力逐渐减小; 当局压面积比由 1.44 分别增大至 4、9、16 时, 圆端形钢管混凝土柱局压承载力分别降低 33.6%、54.7%、66.1%; 钢管屈服强度由 235 MPa 增加至 345、390、420 MPa 时, 试件刚度无明显变化, 局压承载力分别提高 33.7%、47.3%、56.4%; 当混凝土立方体抗压强度由 30 MPa 分别增加至 35、40、45、50 MPa 时, 试件刚度逐渐增大, 局压承载力分别提高 2.2%、4.1%、6.4%、11.2%; 含钢率由 0.05 增加至 0.1、0.15、0.2 时, 试件刚度增大, 局压承载力分别提高 57.7%、114.6%、165.3%。

**关键词:** 圆端形钢管混凝土柱; 局压性能; 有限元分析; 接触应力; 参数分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.05.011

## Local Compression Mechanical Properties of Circular-ended Concrete-filled Steel Tubular Columns

LIU Huadong<sup>1</sup>, TANG Yongqiang<sup>2</sup>

(1. Guangdong Yuehai Yuedong Water Supply Co., Ltd., Jieyang 522000, China; 2. Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** A numerical simulation of the local compressive mechanical properties and force mechanism of concrete-filled steel tubular (CFST) columns with rounded ends was conducted using the finite element software ABAQUS. The entire loading process, contact forces, and relevant parameters of the specimens were analyzed. The results indicate that, within the same cross-section, the circular arc segment of the steel tube provides stronger confinement and experiences greater contact forces compared to the straight segment. Moreover, the contact forces gradually decrease from the end downwards along the column. When the local compressive area ratio increases from 1.44 to 4, 9, and 16, the local compressive bearing capacity of the CFST columns with rounded ends decreases by 33.6%, 54.7%, and 66.1%, respectively. As the yield strength of the steel tube increases from 235 MPa to 345, 390, and 420 MPa, there is no significant change in the stiffness of the specimens, but the local compressive bearing capacity increases by 33.7%, 47.3%, and 56.4%, respectively. When the compressive strength of the concrete cube increases from 30 MPa to 35, 40, 45, and 50 MPa, the stiffness of the specimens gradually increases, and the local compressive bearing capacity improves by 2.2%, 4.1%, 6.4%, and 11.2%, respectively. As the steel ratio increases from 0.05 to 0.1, 0.15, and 0.2, the stiffness of the specimens increases, and the local compressive bear-

ing capacity enhances by 57.7%, 114.6%, and 165.3%, respectively.

**Key words:** circular-ended concrete-filled steel tubular columns; local compression performance; finite element analysis; contact stress; parametric analysis

钢管混凝土柱具有承载力大、刚度强、塑性韧性好、施工便捷等优点,在桥梁结构中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。为满足桥梁横桥向刚度与顺桥向刚度的要求,将桥墩和拱桥桥肋设计成圆端形截面。当圆端形钢管混凝土截面长短轴比较小时,试件受力特点与圆钢管混凝土柱相似,钢管对混凝土的约束大致呈各向同性;当截面长短轴比较大时,试件截面趋于矩形,试件受力特点与矩形钢管混凝土柱相似,钢管平直段对混凝土约束作用较弱,平直段钢管极易发生局部屈曲,但整体表现出良好的组合效应。

目前,圆端形钢管混凝土构件相关的试验研究与理论分析相对成熟。任志刚等<sup>[5]</sup>对圆端形钢管混凝土短柱进行了轴压试验,分析了截面长短轴比和钢管厚度对于极限承载力的影响;Hou等<sup>[6]</sup>对圆端形钢管混凝土短柱进行了轴压试验,分析了试件各部分的破坏形态,研究了截面长短轴比的变化对约束效应以及试件延性的影响;陈立康等<sup>[7]</sup>对17个圆端形钢管混凝土短柱进行了轴压试验,分析了截面长短轴比、含钢率以及试件构造等参数对破坏形态及力学性能指标的影响,并结合矩形钢管混凝土短柱轴压承载力公式,建立了圆端形钢管混凝土短柱实用承载力计算方法;Liu等<sup>[8]</sup>和 Patel<sup>[9]</sup>采用有限元方法对圆端形钢管混凝土柱的偏压力学性能进行研究,得出了承载力实用计算公式;王志滨等<sup>[10]</sup>对12个圆端形钢管混凝土柱进行了偏压试验,分析了偏心距和长细比对试件承载力以及延性的影响,并在有限元方法验证基础上通过参数分析提出了圆端形钢管混凝土柱轴压以及偏压承载力计算方法。

本文采用 ABAQUS 有限元软件对圆端形钢管混凝土柱在局压荷载作用下的受力机理展开研究,分析各参数的变化对试件受力性能的影响规律。

## 1 有限元分析

### 1.1 材料本构模型

圆端形钢管由圆弧段和平直段组成,圆弧段对混凝土具有较强的约束效应,平直段与混凝土之间的接触应力较小,其约束效应相对较弱。若将混凝土本构关系按照半圆和矩形截面进行组合,将会导致混凝土平直段与圆弧段应力-应变关系不连续

等问题。因此,本文选用文献[11-12]建议的混凝土应力-应变关系等效模型进行有限元计算。

受压区混凝土的应力-应变关系表达式为

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

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$y = \frac{\sigma}{f'_c} \quad (3)$$

$$\beta_0 = [2.36 \times 10^{-5} (D/B)^5]^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \times (f'_c)^{0.5} \cdot 0.5 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (5)$$

式中: $x$ 为应变的归一化参数; $y$ 为应力的归一化参数; $\varepsilon$ 为混凝土应变; $D$ 为截面长轴; $B$ 为截面短轴; $\beta_0$ 为约束效应综合系数,反映钢管几何和材料特性对混凝土约束效果的贡献, $\beta_0 \geq 0.12$ ;  $A_s$ 为钢管截面面积; $A_c$ 为混凝土截面面积; $f'_c$ 和  $f_{ck}$ 分别为混凝土圆柱体抗压强度和轴心抗压强度; $f_y$ 为钢材的屈服强度; $\xi$ 为混凝土约束效应系数; $\varepsilon_0$ 和  $\varepsilon_c$ 分别为被动约束下的混凝土峰值应变和素混凝土的峰值应变,分别表示为

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6} \quad (7)$$

采用能量破坏准则来定义混凝土受拉软化性能,即应力-断裂能关系,混凝土受拉软化模型如图1所示,图中  $\sigma_f$  和  $U_1$  分别为混凝土的应力和裂缝宽度。由图可知,当裂缝宽度达到  $U_{10}$  (混凝土极限值)时混凝土应力为0; $G_f$ 为断裂能,强度等级为C20和C40的混凝土断裂能分别取40 N/m和120 N/m; $\sigma_{10}$ 为混凝土开裂应力,其表达式为

$$\sigma_{10} = 0.26 \times (1.25f'_c)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

进行有限元分析时,钢材采用有明显屈服平台的二次流塑模型,应力-应变关系表达式为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ -a\varepsilon_s^2 + b\varepsilon_s + c, & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y, & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[ 1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right], & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y, & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_s$  为钢材的应力;  $\varepsilon_s$  为钢材的应变;  $E_s$  为钢材的弹性模量;  $\varepsilon_{e1}$  为弹性极限应变;  $\varepsilon_{e2}$  为屈服应变;  $\varepsilon_{e3}$  为极限强度应变;  $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_c$ , 其中  $E_c$  为混凝土弹性模量, 取值 206 GPa;  $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$ ;  $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$ ;  $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$ ; a、b 和 c 均代表无量纲系数,  $a = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$ ,  $b = 2a\varepsilon_{e1}$ ;  $c = 0.8f_y + a\varepsilon_e^2 - b\varepsilon_e$ 。

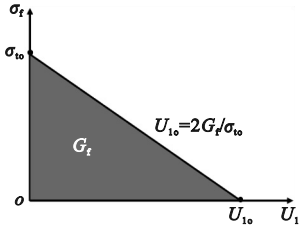


图 1 混凝土受拉软化模型

Fig. 1 The tensile softening model of concrete

应力 - 应变关系曲线如图 2 所示。

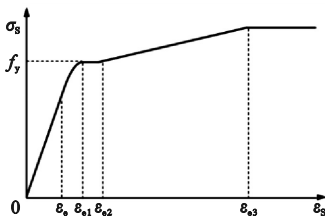


图 2 钢材应力 - 应变关系曲线

Fig. 2 The stress-strain relationship curve of steel

## 1.2 有限元模型建立

采用 ABAQUS 建立有限元模型 (FEM), 如图 3 所示。

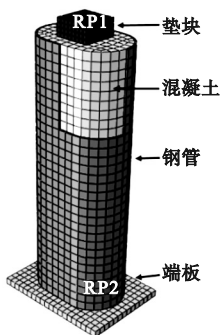


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

模型主要由端板、圆端形钢管、核心混凝土及垫块组成。建立有限元模型时, 以上四部分均采用八节点三维缩减积分实体单元 (C3D8R)。为了真实模拟局压试验时试件的边界条件, 在上部垫块和下部端板的中心点位置布置参考点 RP1 和

RP2, 将上部垫块和下部端板分别与参考点 RP1 和 RP2 进行耦合, 试件底部需进行固定约束, 即约束 X、Y、Z 三个方向的转角和位移。试件顶部需施加轴向位移, 同时, 约束 X、Y 方向的位移和绕 Z 轴的转角。

圆端形钢管与混凝土之间的接触包括切向行为和法向行为, 法向行为设定为“硬接触”, 切向行为采用“罚”, 摩擦系数取 0.3。底部端板和顶部垫块与试件之间通过绑定约束。

## 1.3 有限元验证

采用文献 [13] 中试验的两组试件 SY-ZC1-1 和 SY-ZC1-2 进行有限元验证, 通过试验和有限元计算得到荷载 - 位移曲线, 结果如图 4 所示。

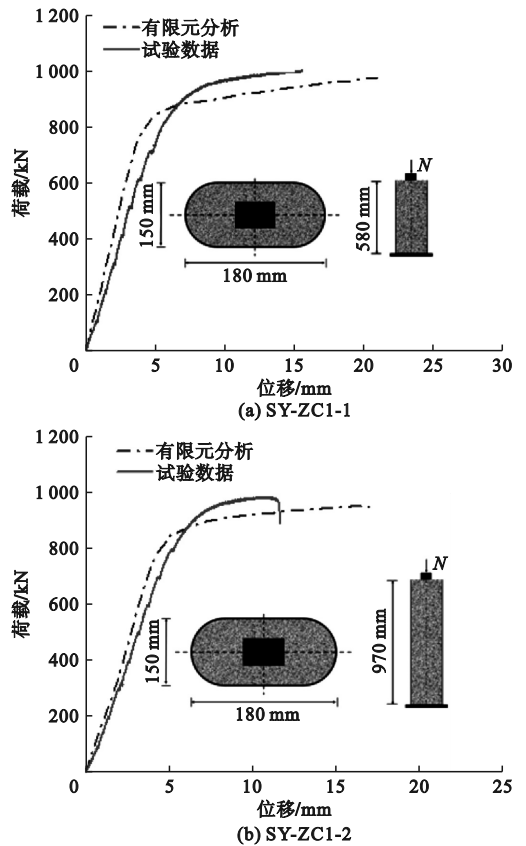


图 4 荷载 - 位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve

由图 4 可知, 达到极限承载力  $N_{uc}$  之前, 有限元模拟与试验实测得到的荷载 - 位移曲线变化趋势基本一致, 且刚度偏差较小,  $N_{uc, 模拟}/N_{uc, 试验}$  的均值和标准差分别为 1.02 和 0.04。

将试验和有限元模拟得到的破坏形态进行对比, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 在局压荷载作用下, 加载垫块周边的混凝土发生剪切破坏, 距离试件顶端  $0 \sim H/4$  ( $H$  为试件高度) 高度范围内的混凝土产生局部鼓

曲,且自端部向下鼓曲变形逐渐减小,随着截面长短轴比的增加,混凝土圆弧段的损伤程度逐渐降低。

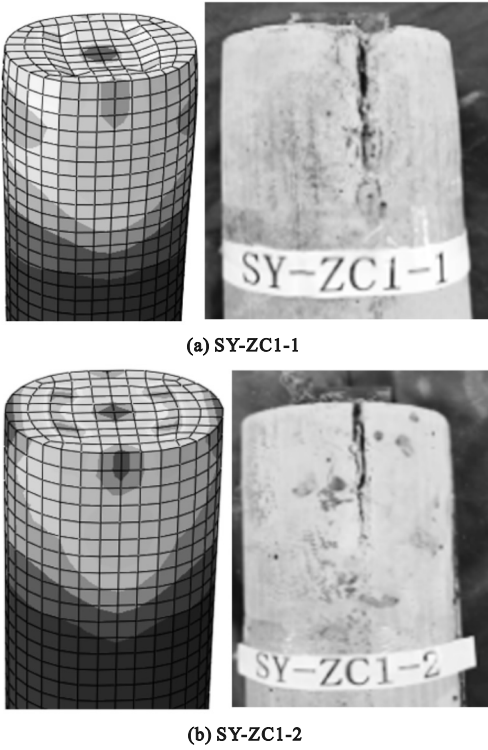


图 5 试件破坏形态  
Fig. 5 Test piece failure mode

综上,有限元建模过程中所采用的本构模型及所设置的边界条件可靠,能较好地分析圆端形钢管混凝土柱在局压荷载下的各项力学性能。

## 2 受力机理分析

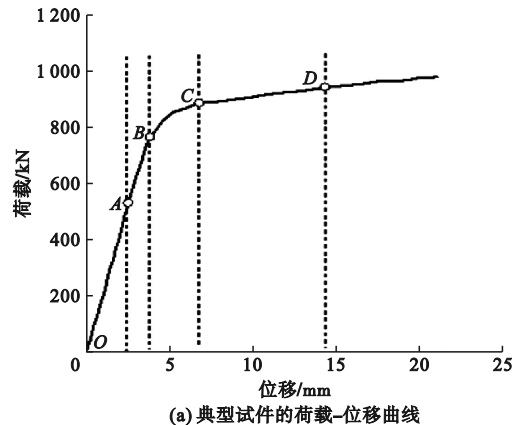
### 2.1 受力全过程分析

图 6(a)为典型试件 SY-ZC1-1 在局压荷载下的荷载-位移曲线,在曲线上定义 A、B、C、D 四个特征点,将荷载-位移曲线分为弹性阶段(OA 段)、弹塑性阶段(AB 段)、塑性强化阶段(BC 段)以及平缓阶段(CD 段)。图 6(b)和图 6(c)为试件 SY-ZC1-1 在距离试件顶端  $H/4$  和  $H/2$  高度处截面各部件的荷载-纵向位移曲线。由图 6(b)和图 6(c)可知,距离试件顶端  $H/4$  和  $H/2$  高度处的截面核心混凝土在加载过程中先进入弹塑性阶段,随后圆端形钢管所承担的荷载达到峰值,继续加载至试件全截面达到峰值荷载时,核心混凝土也同步达到峰值荷载。

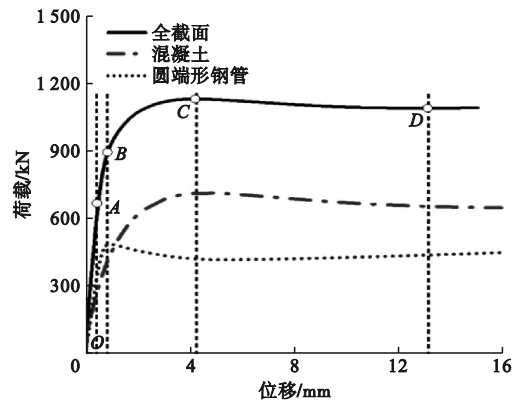
试件在受力全过程中,圆端形钢管与核心混凝土共同承担荷载,表 1 为典型试件 SY-ZC1-1 在

不同特征点处钢管与核心混凝土的荷载分担情况。

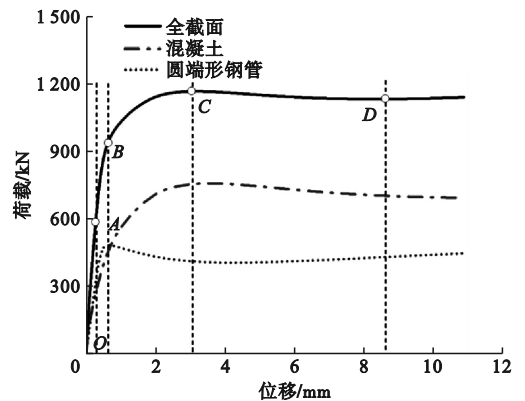
由表 1 和图 6(b)及图 6(c)可知,当荷载达到峰值荷载,距离试件顶端  $H/4$  和  $H/2$  高度处的截面核心混凝土荷载分担比分别为 62.26% 和 64.47%,超过特征点 C 后,试件承载力均开始下降,但受钢管与局压影响范围外的混凝土双重作用,承载力下降幅度较小,特征点 D 处距离试件顶端  $H/4$  和  $H/2$  高度处的截面核心混凝土荷载分担比为 60.1% 和 61.93%。



(a) 典型试件的荷载-位移曲线



(b) 距离试件顶端  $H/4$  截面的荷载-位移曲线



(c) 距离试件顶端  $H/2$  截面的荷载-位移曲线

图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve

表1 不同特征点处各部件纵向荷载分担比例

Table 1 The proportion of longitudinal load sharing among various components at different characteristic points.

特征点	组成部件	荷载分担比例/%	
		距离试件顶端 $H/4$	距离试件顶端 $H/2$
A	钢管	51.97	54.55
	混凝土	47.99	45.37
B	钢管	51.06	50.93
	混凝土	40.65	48.49
C	钢管	37.54	35.23
	混凝土	62.26	64.67
D	钢管	39.90	38.06
	混凝土	60.10	61.93

## 2.2 试件截面纵向应力分析

图7为典型试件SY-ZC1-1在局压作用下达到峰值荷载时不同高度处截面混凝土的纵向应力分布云图。图中正值代表纵向拉应力,负值代表纵向压应力。

由图7可知,在距离试件顶端  $H/4$  高度处,混凝土全截面受压,纵向压应力值从截面中心至边缘逐渐减小。随着截面高度的变化,最大压应力区域逐渐转移,在距离试件顶端  $H/2$  高度处,最大压应力处在截面两侧圆弧段。

## 2.3 接触力分析

图8为典型试件SY-ZC1-1在不同截面处钢管和混凝土接触应力-纵向位移曲线。图中  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  分别代表点1、点2、点3、点4处钢管与混凝土的接触应力。

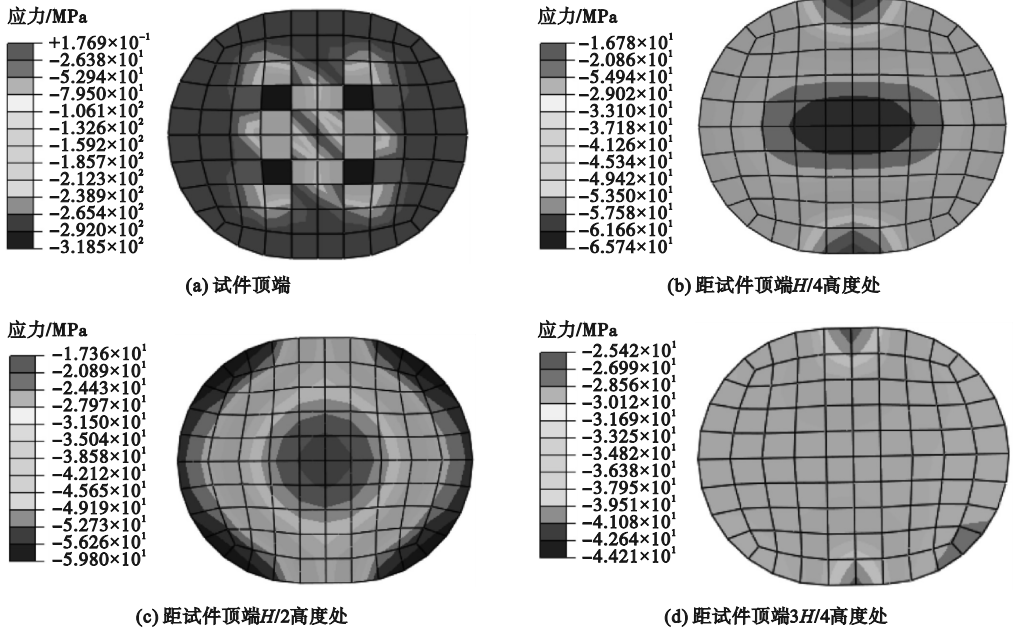


图7 混凝土的纵向应力分布云图(达到峰值荷载)

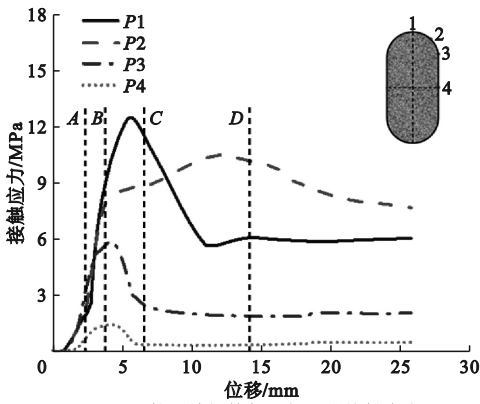
Fig. 7 Contour plot of longitudinal stress distribution in concrete (peak load)

由图8(a)可知:在弹性阶段,试件顶端截面钢管与混凝土的接触应力较小,特征点A处,点1的接触应力  $P_1$  仅为2.07 MPa;当进入弹塑性阶段后,顶端截面混凝土在局压作用下横向膨胀,钢管有效约束了混凝土的横向变形,该过程中混凝土和钢管充分接触,因此,点1、点2、点3在弹塑性阶段的接触应力大幅度提升;进入塑性强化阶段后,当轴向位移达到5.7 mm时,接触应力达到峰值,点2处的接触应力相比点1处小,接触应力持续增加,而点3和点4处的接触应力逐渐降低。对比图8(b)~8(d)发现,距离加载端越远,试件

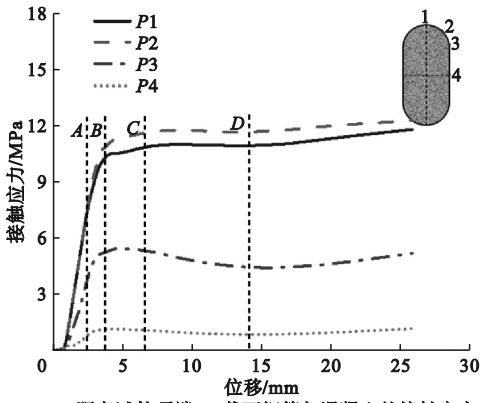
截面各点处对应的接触应力越小,圆弧段上各测点的接触应力基本无差异,而在圆弧段与平直段交界位置的接触应力相比圆弧段有显著下降,平直段接触应力最小。

## 3 参数分析

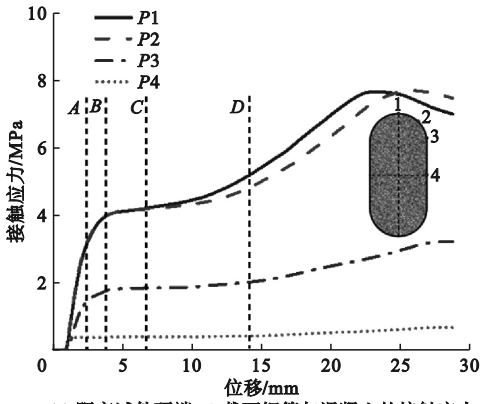
通过典型算例研究局压面积比  $T$ 、钢材强度  $f_y$ 、混凝土强度  $f_{cu}$ 、含钢率  $\alpha$  等参数的变化对研究对象局压承载力以及局压承载力折减系数  $K_L$  的影响。基本算例的主要参数为:  $D \times B = 600 \text{ mm} \times$



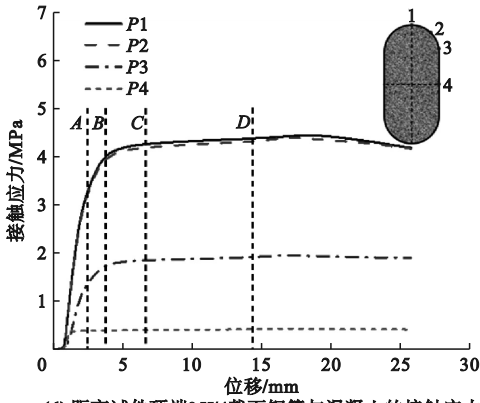
(a) 试件顶端钢管与混凝土的接触应力



(b) 距离试件顶端H/4截面钢管与混凝土的接触应力



(c) 距离试件顶端H/2截面钢管与混凝土的接触应力



(d) 距离试件顶端3H/4截面钢管与混凝土的接触应力

图 8 典型试件在不同截面处钢管和混凝土接触应力 - 纵向位移曲线

Fig.8 Stress-longitudinal displacement curves of contact between steel tube and concrete at different sections of typical specimens

400 mm;  $H = 1\ 500$  mm;  $\Gamma = 4$ ; 钢管壁厚  $t = 11.6$  mm;  $\alpha = 0.1$ ;  $f_y = 235$  MPa。

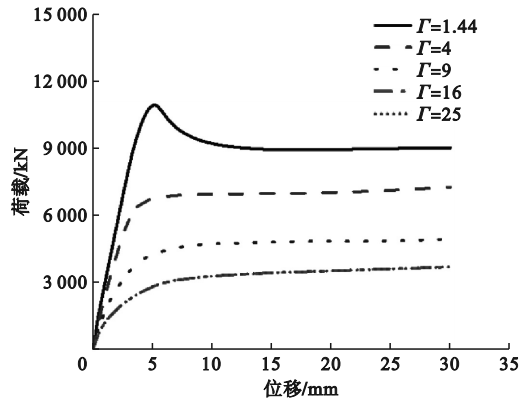
局压承载力折减系数  $K_L$  的计算式为

$$K_L = \frac{N_{ul}}{N_u} \quad (10)$$

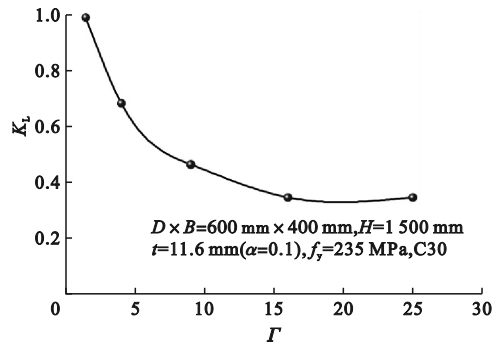
式中:  $N_u$  为圆端形钢管混凝土柱轴压承载力;  $N_{ul}$  为圆端形钢管混凝土柱局压承载力。

### 3.1 局压面积比

图 9 为局压面积比  $\Gamma$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响。



(a) 局压面积比  $\Gamma$  对局压荷载 - 位移关系的影响



(b) 局压面积比  $\Gamma$  对  $K_L$  的影响

图 9 局压面积比  $\Gamma$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响  
Fig.9 Influence of local compression area ratio  $\Gamma$  and  $K_L$  on the load-displacement relationship under local compression

由图 9 (a) 可知: 当  $\Gamma$  由 1.44 分别增大至 4、9、16 时, 圆端形钢管混凝土柱局压承载力分别降低了 33.6%、54.7%、66.1%, 但当  $\Gamma \geq 16$  后, 随着  $\Gamma$  继续增加, 试件局压承载力无明显变化; 随着  $\Gamma$  逐渐增大, 试件刚度虽逐渐减小, 但延性逐渐增强。由图 9 (b) 可知,  $K_L$  在  $\Gamma$  较小 ( $\Gamma \leq 9$ ) 时下降幅度较大, 局压面积比  $\Gamma$  由 1.44 增大至 9 时,  $K_L$  从 0.98 减小到 0.47, 下降了 52%, 当  $\Gamma$  由 9 继续增加至 25 时,  $K_L$  的下降速率减慢。

### 3.2 钢材屈服强度

图 10 为钢材屈服强度  $f_y$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响。

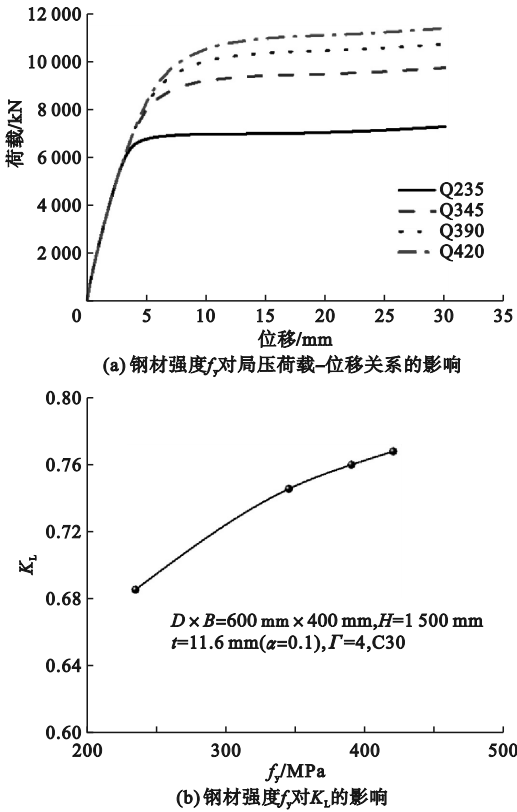


图 10 钢材强度  $f_y$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响  
 Fig. 10 Influence of steel strength  $f_y$  on the load-displacement relationship and  $K_L$  under local compression

由图 10(a) 可知, 当其他条件不变时,  $f_y$  从 235 MPa 分别增加至 345、390、420 MPa 时, 试件刚度无明显变化, 局压承载力分别提高了 33.7%、47.3%、56.4%, 这是因为钢管屈服强度  $f_y$  的增加使得约束效应系数  $\xi$  逐渐增大,  $\xi$  由 1.17 分别增加至 1.73、1.95、2.11, 钢管对混凝土的约束作用逐渐增强, 且  $f_y$  的增加使得钢管承担纵向荷载的比例增大。由图 10(b) 可知, 当局压面积比  $\Gamma = 4$  时, 增大钢材屈服强度  $f_y$  对于局压承载力折减系数影响较小, 当  $f_y$  由 235 MPa 分别增加至 345、390、420 MPa 时,  $K_L$  分别提高了 8.7%、10.8%、12%。

### 3.3 混凝土抗压强度

图 11 为混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响。

由图 11(a) 可知,  $f_{cu}$  由 30 MPa 分别增加至 35、40、45、50 MPa 时,  $\xi$  由 1.18 分别下降至 1、0.88、0.79、0.71, 试件刚度逐渐增大, 局压承载力分别提高了 2.2%、4.1%、6.4%、11.2%。这是由

于弹性模量随着混凝土强度等级的提高逐渐增大, 试件刚度也逐渐增大, 提高混凝土立方体抗压强度可增加试件的局压承载力。但由于  $\xi$  减小, 钢管对混凝土约束作用逐渐减弱, 因此, 局压承载力提高幅度降低。由图 11(b) 可知, 混凝土强度对  $K_L$  的影响规律与钢材强度相反, 随着混凝土强度等级提高,  $K_L$  逐渐降低, 混凝土立方体抗压强度从 30 MPa 分别增加至 35、40、45、50 MPa 时,  $K_L$  分别降低了 3.5%、7.9%、11.8%、13.2%。

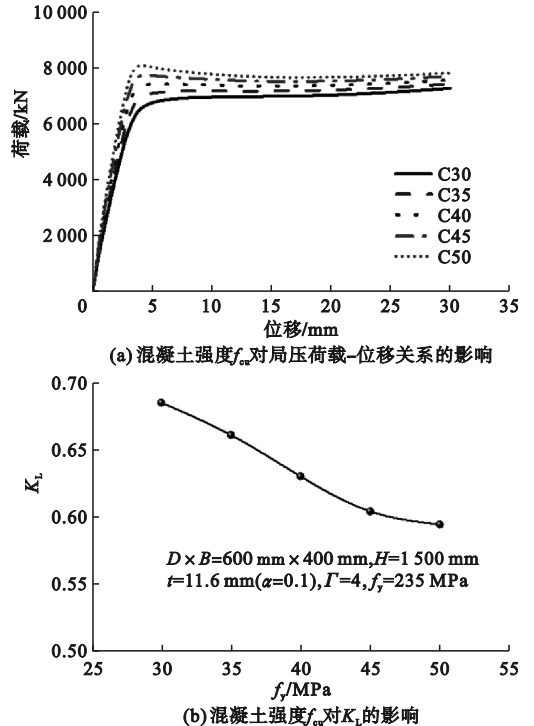
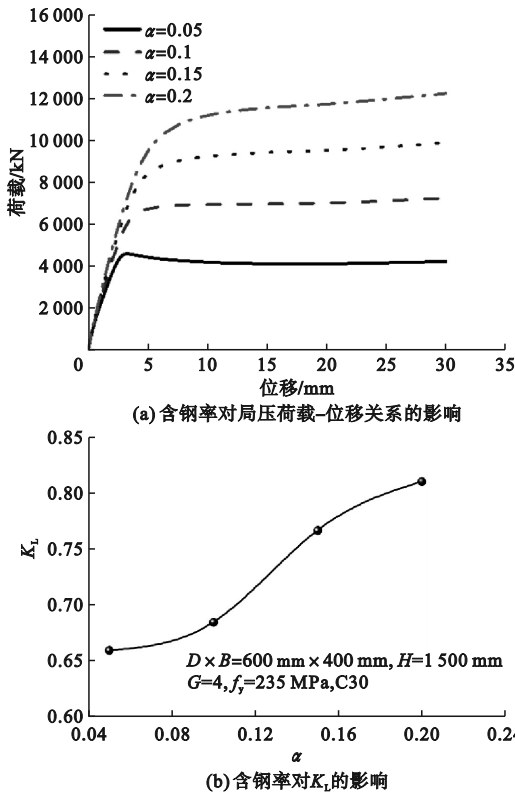


图 11 混凝土抗压强度  $f_{cu}$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响  
 Fig. 11 Influence of concrete compressive strength  $f_{cu}$  on the local compression load-displacement relationship and  $K_L$

### 3.4 含钢率

图 12 为含钢率  $\alpha$  对局压荷载 - 位移关系及  $K_L$  的影响。钢管壁厚为 6、11.6、16.8、21.5 mm 的试件对应的含钢率分别为 0.05、0.1、0.15、0.2。

由图 12(a) 可知, 含钢率由 0.05 增加至 0.1、0.15、0.2 时, 约束效应系数  $\xi$  从 0.59 分别增加至 1.17、1.76、2.34, 试件刚度增大, 局压承载力分别提高了 57.7%、114.6%、165.3%, 这是因为约束效应系数  $\xi$  增加使钢管对混凝土约束作用增强, 混凝土强度迅速提升, 因此局压承载力提高幅度增大。由图 12(b) 可知, 含钢率对局压承载力折减系数的影响规律与钢材强度一致,  $K_L$  的变化范围为 0.66~0.81。

图12 含钢率对局压荷载-位移关系及 $K_L$ 的影响Fig. 12 Influence of steel ratio on the local compression load-displacement curve and  $K_L$ 

## 4 结论

本文通过有限元模拟对圆端形钢管混凝土柱承受局部压力荷载时的力学性能进行了数值分析,得到如下结论。

1) 通过受力全过程分析得到圆端形钢管混凝土柱各部件在不同受力阶段的荷载分担比例,当达到峰值荷载时,距离试件顶端  $H/4$  和  $H/2$  高度处的截面核心混凝土荷载分担比分别为 62.26% 和 64.47%,钢管的荷载分担比例分别为 37.54% 和 35.23%。

2) 通过接触力分析发现,同一截面圆弧段的接触应力相比平直段更大,且距离加载端越远,截面各点处对应的接触应力越小。

3) 增大局压面积比  $I'$  时,圆端形钢管混凝土柱局压承载力下降;增加钢管屈服强度时,试件刚度无明显变化,但局压承载力提高;增大混凝土立方体抗压强度时,试件刚度增加,局压承载力提高;

增加含钢率时,试件刚度增大,局压承载力提高。

## 参考文献 (References):

- [1] 梁东海. 公路桥梁钢管混凝土拱桥技术分析[J]. 交通建设与管理, 2024(4): 192-194.  
LIANG D H. Technical analysis of concrete filled steel tubular arch bridge of highway bridge[J]. Transport Construction & Management, 2024(4): 192-194. (in Chinese)
- [2] HAN X, HAN B, HE Y K, et al. An investigation into the impact of time-varying non-conservative loads on the seismic stability of concrete-filled steel-tube arch bridges[J]. Buildings, 2024, 14(9): 2739.
- [3] JIA Y, WEI C K, HUANG Z Q, et al. Cable force calculation of cable hoisting of CFST arch bridge research[J]. Buildings, 2023, 13(9): 2370.
- [4] REN Q X, DING J N, WANG Q H, et al. Behavior of slender square hollow steel-reinforced concrete columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103133.
- [5] 任志刚, 张领, 李旗. 带肋圆端形钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(11): 45-52.  
REN Z G, ZHANG L, LI Q. Research on axial compressive performance of ribbed round-ended rectangular concrete-filled steel tubular short columns[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(11): 45-52. (in Chinese)
- [6] HOU W Q, YANG J J, ZHANG Z X, et al. Experimental study and application of manufactured sand self-compacting concrete in concrete-filled-steel-tube arch bridge; a case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00718.
- [7] 陈立康, 黄远. 圆形钢管混凝土柱轴压承载力及承载力组成研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(6): 94-104.  
CHEN L K, HUANG Y. Axial compressive bearing capacity and its composition of circular concrete-filled steel tubular columns[J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(6): 94-104. (in Chinese)
- [8] LIU Y, LIU J, LIU X J, et al. Axial compressive behavior of stone encased concrete-filled square steel tube stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 224: 109134.
- [9] PATEL V I. Analysis of uniaxially loaded short round-ended concrete-filled steel tubular beam-columns[J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110098.
- [10] 王志滨, 吴扬杭, 余鑫, 等. 圆端形钢管混凝土柱偏压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 177-185.  
WANG Z B, WU Y H, YU X, et al. Behavior of concrete-filled round-ended steel tubular column under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(4): 177-185. (in Chinese)
- [11] CHEN D J, FAN Y H, ZHA X X. Machine learning-based strength prediction of round-ended concrete-filled steel tube[J]. Buildings, 2024, 14(10): 3244.
- [12] SHEN Q H, WANG F Q, WANG J F, et al. Cyclic behaviour and design of cold-formed round-ended concrete-filled steel tube columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 190: 107089.
- [13] 谢晋. 圆端形钢管混凝土柱局压性能及优化方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.

(责任编辑: 徐淑姣)