

缺陷钢管混凝土偏压试件承载性能研究

陆征然^{1,2}, 赵明歌¹

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究3种缺陷类型钢管混凝土(CFST)偏压试件的承载性能. 方法 在冠状脱空试件承载性能试验研究的基础上, 利用ABAQUS有限元数值模拟平台, 分析不同缺陷类型(球冠形脱空、环向均匀脱空、复合缺陷)和不同缺陷等级(脱空率)等因素对CFST承载性能的影响. 结果 球冠形脱空缺陷降低了钢管对混凝土的约束效应, 进而降低了CFST的极限承载力; 环向均匀脱空缺陷不仅降低了CFST的承载力, 而且改变了CFST试件的破坏模态; 复合缺陷钢管混凝土试件的破坏模态与环向均匀脱空缺陷类似. 结论 环向脱空比球冠脱空缺陷对于CFST试件的极限承载力影响更显著, 复合缺陷相较环向脱空缺陷对于CFST试件的极限承载力影响不显著.

关键词 钢管混凝土缺陷; 承载力; 偏心受压; 球冠脱空; 环向脱空

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on Bearing Performance of Defective Concrete Filled Steel Tube Members

LU Zhengran^{1,2}, ZHAO Mingge¹

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Study the load-bearing performance of eccentrically compressed members of concrete filled steel tube (CFST) with three types of defects. Based on the experimental research of bearing performance, the ABAQUS finite element numerical simulation analysis platform was used to analyze the CFST of different defect types (spherical crown voiding, uniform circumferential voiding, composite defects) and different defect levels (gap ratio). The spherical crown-shaped voiding defect reduces the restraining effect of the steel tube on the concrete, thereby reducing the ultimate bearing capacity of CFST; the uniform circumferential voiding defect not only reduces the bearing capacity of CFST, but also changes the breakage of CFST members. Ring mode; the failure mode of the composite-defective concrete-filled steel tube members is similar to the ring-shaped uniform voiding defect. The ring-shaped voiding has a more significant effect on the ultimate

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678375); 辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1907121); 辽宁省自然科学基金项目(20180550442); 辽宁省教育厅基础研究项目(lnjc202019)

作者简介: 陆征然(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事工程结构可靠度等方面研究.

bearing capacity of the CFST column than the spherical crown voiding defect. Circumferential voids have a more significant impact on the ultimate bearing capacity of CFST columns than spherical cap void defects, and composite defects have less significant effects on the ultimate bearing capacity of CFST columns than the circumferential void defects.

Key words: defects of concrete filled steel tube; bearing capacity; eccentric pressure; spherical gap; circumferential gap

钢管混凝土柱具有施工便利、承载力高、延性好、技术经济等优点,日益成为桥梁发展的重要结构形式^[1-2]. 由于施工初期混凝土的干缩、服役过程混凝土的徐变、恶劣的天气环境等因素导致钢管和混凝土界面粘结力下降,进而导致 CFST 试件中钢管和混凝土出现冠状、环状脱空缺陷^[3-5]以及复合缺陷. 脱空缺陷降低了 CFST 试件的极限承载力.

针对脱空缺陷混凝土试件,国内外学者进行了一系列研究工作. 李颀^[6]完成了 24 根带脱空缺陷的钢管混凝土试件偏压试验. 叶勇等^[7]通过有限元平台研究了脱空对方钢管混凝土短柱轴压受力性能的影响. 刘彦彬^[8]研究了带缺陷钢管混凝土试件的滞回性能,并探讨了脱空率对试件承载力的影响规律. Pan Shengshan^[9]提出了一种利用分布式温度检测系统对 CFST 界面分离进行检测的方法,探讨了温度对于 CFST 界面分离的影响. Nie Jianguo 等^[10]完成了 8 根钢管混凝土压弯扭试件的拟静力试验,并分析了截面类型为圆形和方形的钢管混凝土柱的力学性能. Wang Yuhang 等^[11-12]在 Nie Jianguo 等研究的基础上,揭示了钢管混凝土试件在复杂受力状态下钢管和混凝土的应力应变发展趋势. 柯晓军等^[13]通过钢管混凝土组合柱偏心受压试验,考察了破坏形态及约束机理. 张昆昆等^[14]研

究了 CFRP 加固带球冠形脱空缺陷的 CFST 短柱轴压的力学性能. 张建威等^[15]探讨了剪跨比与脱空率对钢管混凝土柱在压弯剪复合作用下的滞回性能的影响. 刘夏平等^[16]对 30 个脱空钢管混凝土进行了偏压试验,结果表明脱空缺陷的存在降低了钢管对混凝土的约束力.

已有研究成果为缺陷 CFST 试件极限承载性能的研究奠定了基础^[17-18],但目前国内外对于带复合缺陷的 CFST 偏压试件承载性能研究较少. 基于此,笔者对不同缺陷类型、等级条件下 CFST 偏压试件的承载性能进行试验研究,并且利用 ABAQUS 有限元软件,在单一缺陷条件下,对不同缺陷等级的 CFST 偏压试件承载性能进行分析.

1 球冠形脱空和无脱空试件原型试验

1.1 试件设计及制作

笔者共进行了 4 根试件的承载性能试验,包括 3 根球冠脱空和 1 根无脱空试件. 球冠形脱空 $\chi = d/D$,其中 χ 为脱空率, d 为脱空值, D 为钢管外直径. 加载方式中的偏压距离为 $1/6D$ (为小偏心受压,对全桥施加荷载进行分析,提取拱肋的弯矩与轴力,实际计算得出偏心距). 所有试件钢管截面 $D \times t = 700 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,其中 t 为钢管壁厚. 试件参数见表 1.

表 1 球冠和无脱空试件参数

Table 1 Parameters of spherical cap and non-void components

试件编号	长度/mm	加载方式	脱空类型	混凝土强度	f_{cu}/MPa	$\chi/\%$
CN-0-1	3 000	偏压	—	C50	50	0
CS-2-1	3 000	偏压	球冠	C50	50	2. 14
CS-4-2	3 000	偏压	球冠	C50	50	4. 28
CS-6-3	3 000	偏压	球冠	C50	50	6. 42

注:试件编号中,第一个字母 C 表示 CFST 试件,第二个字母 N、S 分别表示无脱空、球冠形脱空;第一个数字表示脱空率,0、2、4、6 分别代表脱空率为 0%、2. 14%、4. 28%、6. 42%;最后一个数字代表试件编号; f_{cu} 为混凝土标准立方体抗压强度.

试件制作时,首先按要求的长度加工空钢管,对应每个试件加工两个板厚 20 mm、边长 900 mm 方钢板作为试件的端板,下端板通过焊接与钢管的下部连接在一起.混凝土浇筑之前,将模具至于钢管内部并临时固定用以获得设计的脱空值.当混凝土初凝后,用机械千斤顶将模具小心抽出,用直尺对脱空缺陷的尺寸逐一进行测量,保证误差不超过 0.1 mm.对无脱空的钢管正常进行混凝土浇筑,混凝土到达养护时间后将上端板与试件上部焊接在一起.

1.2 加载及测量方案

试验先进行预加载,然后进行正式加载,当试件持续加载至轴向位移达到 60 mm 时,结束试验,试验装置如图 1 所示.分别在 1/4L、1/2L、3/4L 设置位移计,并且粘贴位移应变花,用来测量试件横向、纵向、剪切应变.图 2 脱空率为 4.28% 球冠脱空试件试验的横截面图.

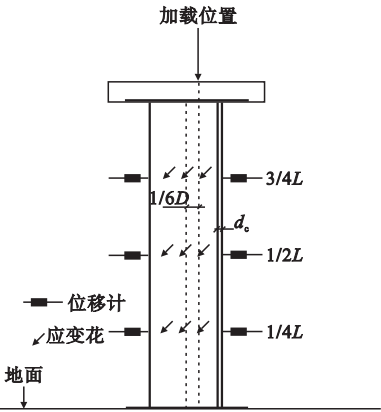


图 1 试验装置

Fig. 1 Test setup

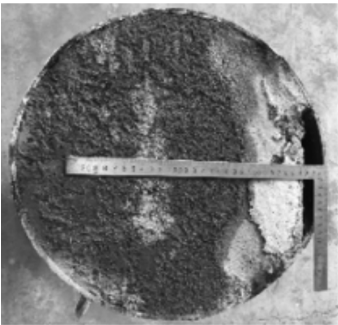


图 2 试件横截面

Fig. 2 Cross-section of component

1.3 试验结果

无脱空试件,峰值荷载前,试件无明显破坏.峰值荷载后,试件 1/2L 处有明显的鼓曲,随着轴向变形的增大,试件 3/4L 处出现明显的鼓曲现象.

球冠形脱空试件的破坏过程整体上与无脱空试件的破坏过程相近.峰值荷载前,试件无明显破坏.峰值荷载后,试件发出闷响,试件 1/2L 处出现明显的鼓曲,且随着脱空率的增大鼓曲现象越明显,同时随着轴向变形的增大,试件 3/4L 处出现明显的鼓曲现象.

2 有限元分析

2.1 材料模型

钢材的本构关系采用文献[1]提出的塑性分析本构关系模型.对于无脱空试件和球冠脱空试件的核心混凝土在偏压过程中受到外钢管的约束作用,韩林海^[1]通过大量的 CFST 柱轴心受压和受弯试验,得出了考虑约束效应系数的混凝土应力-应变关系模型.其塑性性能主要取决于约束效应系数 ξ . $\xi = f_y A_s / f_{ck} A_c$, 其中 A_s 与 A_c 分别表示钢管和核心混凝土的横截面面积; f_y 表示钢管的屈服强度; f_{ck} 表示混凝土轴心抗压强度标准值.

表达式为

$$y = 2x - x^2, \quad x \leq 1. \tag{1}$$

$$y = \begin{cases} 1 + q(x^{0.1\xi} - 1), & \xi \geq 1.12; \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x}, & \xi < 1.12; \end{cases} \quad (x > 1). \tag{2}$$

式中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, $y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$, $\sigma_0 = [1 + (-0.054\xi^2 + 0.4\xi)(\frac{24}{f_c})^{0.45}]f_c$, 其中 f_c 圆柱体抗压强度, $\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + [1400 + 800(\frac{f_c}{24} - 1)]\xi^{0.2}$, $\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5f_c$, $\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \times f_c^2 \times 3.51 \times 10^{-4}$.

在核心混凝土的受拉区,采用沈聚敏^[19]所提出的混凝土开裂应力-应变关系模型,开裂应力 σ_{i0} 表达式如下:

$$\sigma_{i0}=0.26\times(1.25f_c)^{2/3}.$$

(3)

2.2 接触模型

外钢管采用四点完全积分格式的壳单元(S4),核心混凝土采用八节点三维实体单元(C3D8),上、下两端板采用离散刚体壳单元.模型中考虑了钢管与核心混凝土之间的相对滑移,以“表面与表面接触”定义两者的相互作用,法向行为采用硬接触“Hard”模型来定义,切向行为定义为“库伦摩擦接触”,摩擦系数设为0.6^[1].钢管与上下两端版之间的相互作用采用绑定“Tie”来定义.

2.3 有限元与试验结果对比

为了验证有限元模型的合理性与有效性,模型参数的选取和加载方式与试验试件制作和加载方式相同.

2.3.1 破坏形态对比

笔者以球冠形脱空率为4.28%为例,有限元模拟结果与试验破坏形态对比如图3所示.从图中可以看出,模拟试件1/2 L和3/4 L

处的应力较集中,对应试验试件1/2 L和3/4 L处有明显的鼓曲.模拟结果与试验结果形态一致,验证了模型的准确性.

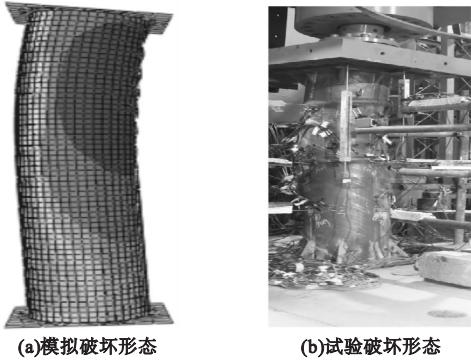


图3 试件破坏形态对比

Fig. 3 Comparison of component failure modes

2.3.2 荷载-应变曲线对比

完好试件与球冠脱空偏压试件荷载-应变曲线如图4所示.从图中可以看出,试验结果与模拟结果总体上比较吻合,验证了有限元模型的可靠性.在加载初期,荷载-应变关系曲线呈线性变化,随着荷载的增加,试件进入弹塑性阶段,曲线上升幅度减小.当峰值荷载过后,曲线进入下降段,试件的承载能力下降.

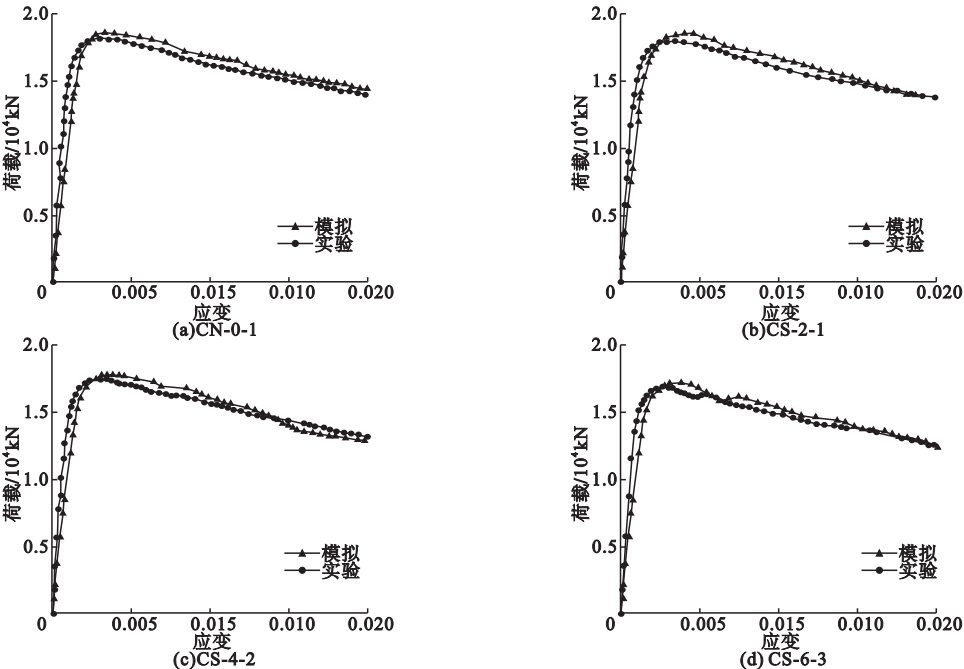


图4 荷载-应变曲线

Fig. 4 Force-strain curves

2.4 不同脱空条件下偏压试件承载性能的有限元分析

笔者对3根环向脱空和9根复合脱空试

件进行承载性能模拟. 加载方式中的偏压距离为 $1/6D$, 所有试件钢管的截面 $D \times t = 700\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. 试件参数见表2.

表2 环向和复合试件参数

Table 2 Circumference and composite component parameters

序号	试件编号	长度/mm	加载方式	脱空类型	混凝土强度	f_{cu}/MPa	$\chi/\%$
1	CC-2-1	3000	偏压	环向	C50	50	2.14
2	CC-4-2	3000	偏压	环向	C50	50	4.28
3	CC-6-3	3000	偏压	环向	C50	50	6.42
4	CC2-S2-1	3000	偏压	复合	C50	50	2.14
5	CC2-S4-2	3000	偏压	复合	C50	50	2.14
6	CC2-S6-3	3000	偏压	复合	C50	50	2.14
7	CC4-S2-1	3000	偏压	复合	C50	50	4.28
8	CC4-S4-2	3000	偏压	复合	C50	50	4.28
9	CC4-S6-3	3000	偏压	复合	C50	50	4.28
10	CC6-S2-1	3000	偏压	复合	C50	50	6.42
11	CC6-S4-2	3000	偏压	复合	C50	50	6.42
12	CC6-S6-3	3000	偏压	复合	C50	50	6.42

注:试件编号中,第一个字母C表示CFST试件,第二个字母C表示环向脱空;C2、C4、C6分别表示环向脱空缺陷脱空率为2.14%、4.28%、6.42%;S2、S4、S6分别表示球冠脱空缺陷脱空率为2.14%、4.28%、6.42%;第一个数字表示脱空率,2、4、6分别代表脱空率为2.14%、4.28%、6.42%;最后一个数字表示试件编号.

在前述球冠脱空试件有限元分析及试验的基础上,分别建立环状、复合脱空条件下的CFST试件有限元模型. 对于环状脱空试件,其核心混凝土在达到极限承载力之前并未和外钢管发生接触,因此采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中的单轴应力-应变关系曲线对环状及复合脱空试件中无约束的核心混凝土进行模拟^[20].

3 计算结果分析

3.1 环向均匀脱空对承载性能的影响

模拟得到3个环向脱空试件荷载-应变曲线如图5所示. 从图中可以看出,与完好CFST试件相比,环向脱空试件破坏过程的荷载-应变关系曲线有明显变化. 环向脱空试件达到峰点后荷载急剧下降,核心混凝土与外钢管发生接触后其荷载又开始缓慢回升. 与完好CFST试件相比,环向脱空试件的承载力有明显降低,且峰值点对应的应变也

较前者有显著减小.

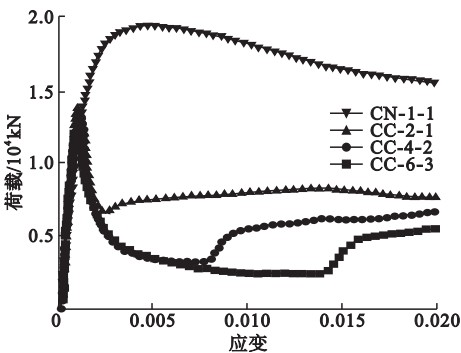


图5 不同脱空率下荷载-应变曲线

Fig. 5 Force-strain curves (different gap ratio)

为了更好地分析脱空率对CFST试件极限承载力的影响,引入极限承载力系数 SI , $SI = N_{ue}/N_{ue-无脱空}$,其中 N_{ue} 为缺陷CFST试件的极限承载力, $N_{ue-无脱空}$ 为完好CFST试件的极限承载力. 绘制出脱空率对环向脱空试件极限承载力影响曲线(见图6). 从图中可以看出,对于环向脱空试件,在脱空率 $\chi = 0\%$ 、2.14%、4.28%、6.42%时,极限承载力分

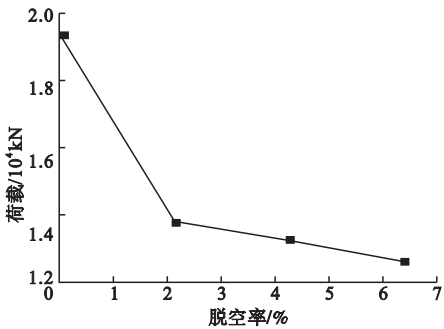


图6 脱空率对环向脱空CFST试件极限承载力影响曲线

Fig. 6 The effect of void rate on ultimate bearing capacity of CFST member with circumferential void

别为 19 376.26 kN、13 761.47 kN、13 280.25 kN、12637.12 kN。由此可知,试

件的极限承载力随脱空率的增大而减小。

3.2 复合缺陷对承载性能的影响

通过以上研究发现 CFST 试件单一缺陷中,环向脱空比球冠脱空对 CFST 试件的极限承载力影响显著。因此笔者研究不同缺陷等级下,复合缺陷对 CFST 偏压试件承载性能的影响,应力云图如图 7 所示。

由模拟结果得出 4 条环向脱空率为 2.14% 条件下复合缺陷试件荷载-应变曲线如图 8 所示。从图中可以看出,复合缺陷 CFST 试件的极限承载力均小于单一环向脱空缺陷试件;复合缺陷偏压试件的荷载-应变曲线与单一环向脱空缺陷试件相似。

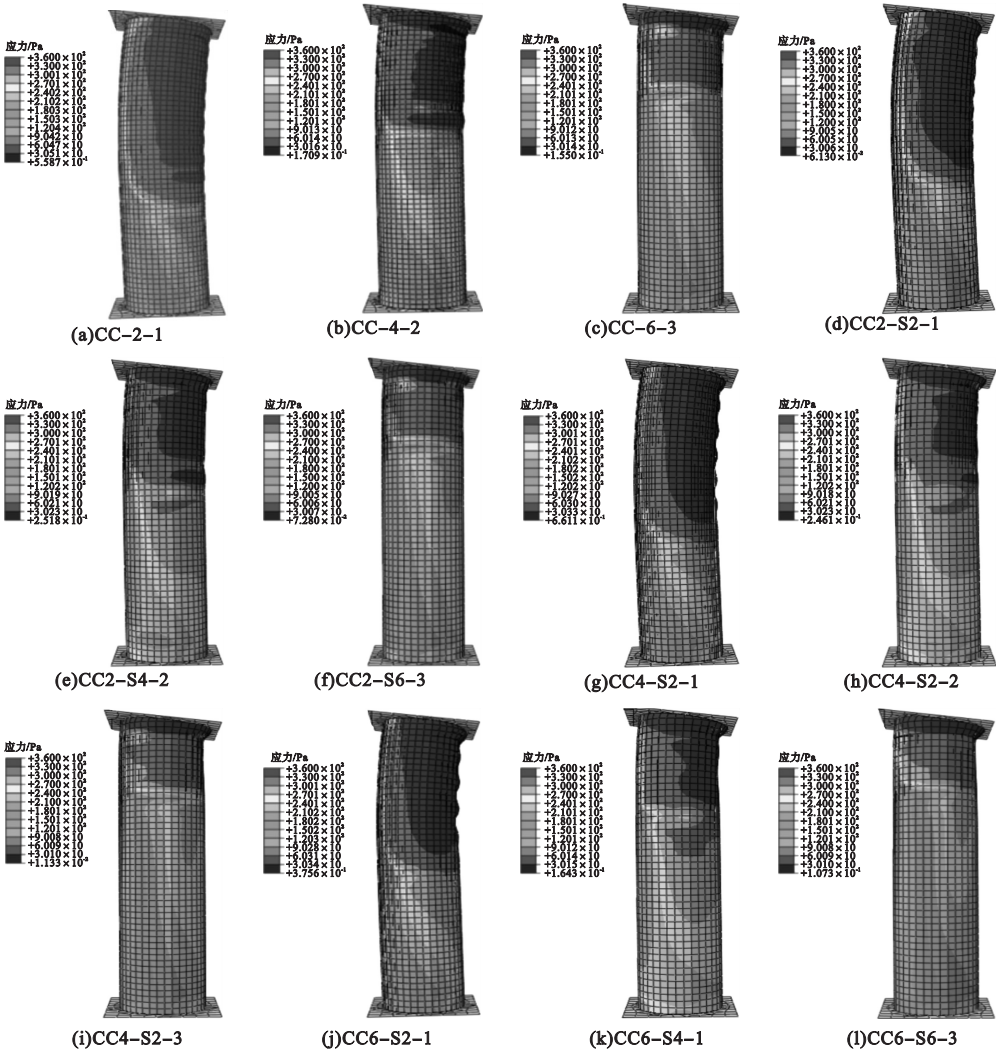


图7 复合缺陷应力云图

Fig. 7 Composite defect stress contour plots

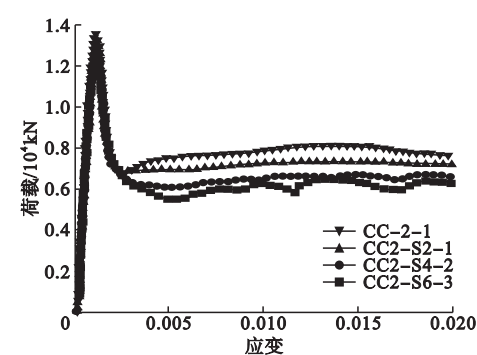


图8 环向脱空率2.14%试件荷载-应变曲线

Fig. 8 The ring-to-empty rate is 6.42% test load-strain curves

有限元计算得到4组复合缺陷CFST偏压试件极限承载力与脱空率关系曲线如图9所示。从图中可以看出,只改变试件的脱空率,复合缺陷CFST试件其他参数不变时,随着脱空率的增大,试件的极限承载力逐渐减小。复合缺陷CFST偏压试件,脱空率 $\chi = 0\%$ 、2.14%、4.28%、6.42%时,极限承载力分别为13761.47 kN、13332.27 kN、12836.71 kN、12586.93 kN。

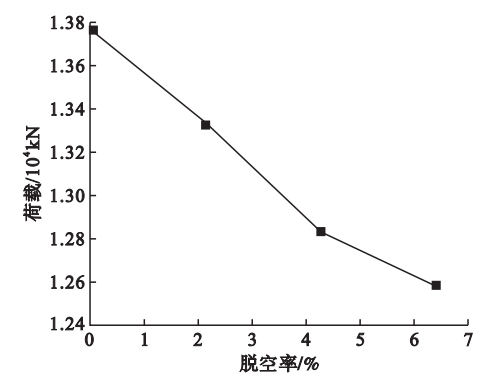


图9 脱空率2.14%对复合缺陷试件承载力影响曲线

Fig. 9 The de-emptying rate of 2.14% affects the curve of the load carrying capacity of the composite defect test piece

有限元计算得到4条环向脱空率为4.28%条件下复合缺陷试件荷载-应变曲线如图10所示。从图中可以看出,复合缺陷CFST试件的极限承载力均小于单一环向脱空试件。应变在0.008左右时,单一环向脱空试件混凝土与外钢管接触,提高了试件的承

载力。应变在0.01左右时,混凝土与外钢管发生接触,二者实现互相补强的作用,进而提高试件的承载力。

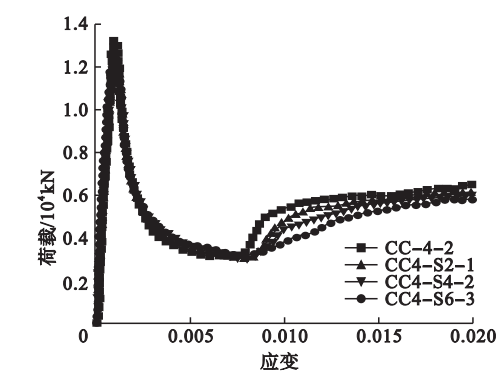


图10 环向脱空率4.28%试件荷载-应变曲线

Fig. 10 The ring-to-empty rate is 4.28% test load-strain curves

有限元计算得到4组复合缺陷CFST偏压试件极限承载力与脱空率的关系曲线如图11所示。从图中可以看出,只改变试件的脱空率,复合缺陷CFST试件其他参数不变时,随着脱空率的增大,试件的极限承载力逐渐减小。复合缺陷CFS偏压试件,脱空率 $\chi = 0\%$ 、2.14%、4.28%、6.42%时,极限承载力分别为132802.51 kN、12736.68 kN、12377.9 kN、12179.14 kN。

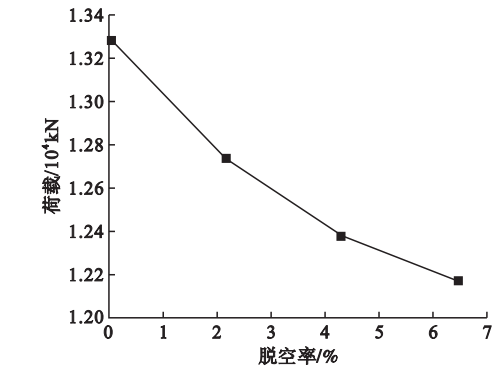


图11 脱空率4.28%对复合缺陷试件承载力影响曲线

Fig. 11 The de-emptying rate of 4.28% affects the curve of the load-bearing capacity of the composite defect test piece

有限元计算得到4条环向脱空率为6.42%条件下复合缺陷试件荷载-应变曲线如图12所示。从图中可以看出,复合缺陷

CFST 试件的极限承载力均小于单一环向脱空试件. 应变在 0.014 左右时,单一环向脱空试件混凝土与外钢管接触,提高了试件的承载力. 应变在 0.015 左右时,混凝土与外钢管发生接触,二者实现互相补强的作用,进而提高了试件的承载力.

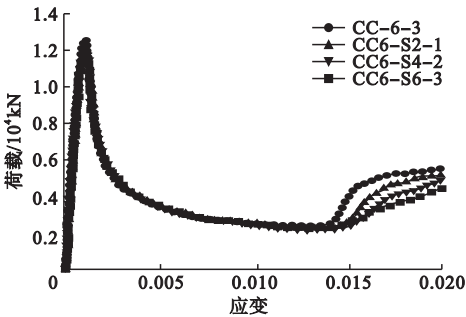


图 12 环向脱空率 6.42% 试件荷载 - 应变曲线
Fig. 12 The ring - to-empty rate is 6.42% test load-strain curves

有限元计算得到 4 组复合缺陷 CFST 偏压试件极限承载力与脱空率的关系曲线如图 13 所示. 从图中可以看出,只改变试件的脱空率,复合缺陷 CFST 试件其他参数不变时,随着脱空率的增大,试件的极限承载力逐渐减小. 复合缺陷 CFST 偏压试件,脱空率 $\chi = 0\%$ 、 2.14% 、 4.28% 、 6.42% 时,极限承载力分别为 12 637.12 kN、12 321.63 kN、12 028.76 kN、11 750.12 kN.

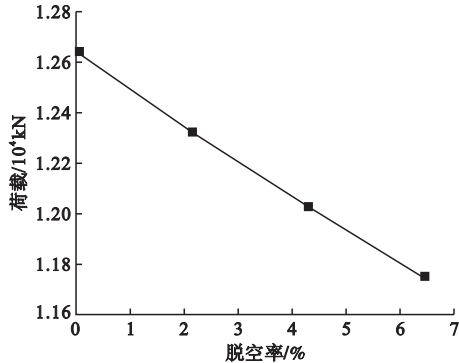


图 13 脱空率 6.42% 对复合缺陷试件承载力影响曲线
Fig. 13 The de-emptying rate of 6.42% affects the curve of the load carrying capacity of the composite defect test piece

4 结 论

(1)笔者建立的有限元模型能较好地模拟带缺陷钢管混凝土试件偏压作用下的力学性能. 结果表明,缺陷的存在降低了钢管混凝土试件的极限承载力.

(2)球冠形脱空 CFST 试件荷载 - 应变曲线的形状和无脱空试件比较无显著区别; 环向均匀脱空试件荷载 - 应变曲线的形状和无脱空试件相比有显著区别; 复合缺陷 CFST 试件荷载 - 应变曲线的形状与环向均匀脱空试件无明显区别.

(3)环向均匀脱空试件相对于球冠形脱空试件对 CFST 试件的极限承载力影响较大,复合缺陷相较环向均匀脱空缺陷对 CFST 试件的极限承载力影响不显著.

参考文献

[1] 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,2016.
(HAN Linhai. Concrete-filled steel tube structure; theory and practice [M]. 3th ed. Beijing: Science Press, 2016.)
[2] HAN Linhai, LI Wei, BJORHOVDE R. Developments and advanced application of concrete-filled steel tubular(CFST) structures; members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100: 211 - 228.
[3] HAN Linhai, YE Yong, LIAO Feiyu. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142 (12): 12 - 13
[4] LIAO Feiyu, HAN Linhai, TAO Zhong. Behavior of CFST stub columns with initial concrete imperfection; analysis and calculations [J]. Thin-walled structures, 2013, 70: 57 - 69.
[5] LIAO Feiyu, HAN Linhai, HE Shanhu. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection; experiments [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67 (12): 1922 - 1935.
[6] 李硕. 椭圆形钢管混凝土长柱轴压性能研究 [D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2013.
(LI Qi. Research on the axial compression performance of elliptical concrete-filled steel tube long columns [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.)
[7] 叶勇,李威,陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (增刊 1): 324 - 329.
(YE Yong, LI Wei, CHEN Jinyang. Finite

- element analysis of axial compression performance of concrete-filled square steel tube short columns with voids [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S1): 324–329.)
- [8] 刘彦彬. 带缺陷的钢管混凝土试件的滞回性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2013.
(LIU Yanbin. Cyclic performance of concrete-filled steel tubular columns with initial concrete imperfection [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.)
- [9] PAN Shengshan, ZHU Yuxi, LI Dongsheng, et al. Interface separation detection of concrete-filled steel tube using a distributed temperature measuring system [J]. Appl. Sci. 2018, 8(9): 1–19.
- [10] NIE Jianguo, WANG Yuhang, FAN Jiansheng. Experimental research on concrete filled steel tube columns under combined compression-bending-torsion cyclic load [J]. Thin-walled structures, 2013, 67: 1–14.
- [11] WANG Yuhang, ZHOU Xuhong. Non-linear torsion behaviour of concrete filled steel tube columns [J]. Materials & structures, 2016, 49(12): 5227–5241.
- [12] WANG Yuhang, NIE Jianguo, FAN Jiansheng. Fiber beam-column element for circular concrete filled steel tube under axial – flexure-torsion combined load [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 95: 10–21.
- [13] 柯晓军, 苏益声, 商效瑀, 等. 钢管混凝土组合柱压弯性能试验及承载力计算 [J]. 工程力学, 2018, 35(12): 134–142.
(KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Compression and bending performance test and bearing capacity calculation of concrete-filled steel tube composite columns [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(12): 134–142.)
- [14] 张昆昆, 廖飞宇, 黄志伟. CFST 加固带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土短柱轴压性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 220–225.
(ZHANG Kunkun, LIAO Feiyu, HUANG Zhiwei. Study on the axial compression performance of CFST strengthened short columns with spherical crown void defect [J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 220–225.)
- [15] 张建威, 廖飞宇, 张伟杰. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土试件压弯剪复合作用下的滞回性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 251–256.
(ZHANG Jianwei, LIAO Feiyu, ZHANG Weijie. Experimental study on hysteretic behavior of concrete filled steel tubular members with circumferential void under combined action of compression, bending and shear [J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 251–256.
- [16] 刘夏平, 唐述, 唐春会, 等. 脱空钢管混凝土偏心受压力学性能实验研究 [J]. 铁道建筑, 2011(2): 117–121.
(LIU Xiaping, TANG Shu, TANG Chunhui, et al. Experimental study on eccentric compression performance of hollow concrete-filled steel tube [J]. Railway construction, 2011(2): 117–121.)
- [17] 卓宝婷. 方钢管混凝土的受压本构关系试验研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
(ZHUO Baoting. Experimental study on compressive constitutive relationship of concrete filled square steel tube [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.)
- [18] 何骄阳. 脱空钢管混凝土受弯力学试验研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
(HE Jiaoyang. Experimental study on bending mechanics of hollow concrete filled steel tube [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.)
- [19] 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. Finite element analysis of reinforced concrete and limit analysis of plate and shell [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)