

文章编号:1673-9469(2025)03-0006-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.002

带脱空缺陷 SRCFT 短柱的轴压性能分析

詹界东,李成武*,滕振超,梁晨光,陈忠伟

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为探究带脱空缺陷钢管混凝土(SRCFT)短柱的轴压性能和破坏模式,建立了轴压作用下带脱空缺陷 SRCFT 短柱的有限元模型,分析不同脱空形式下 SRCFT 短柱的脱空率、钢管强度、钢管厚度、混凝土强度、钢管强度和钢管类型等参数,探讨带脱空缺陷 SRCFT 短柱的轴压性能和破坏模式。结果表明:带脱空缺陷 SRCFT 短柱的极限承载力随着钢管强度、钢管厚度、混凝土强度、钢管强度以及钢管类型的增加而增大。带环形脱空缺陷试件的脱空率在 1.1%~3.3% 时,试件极限承载力降低 19.11%~20.91%;带球形脱空缺陷试件的脱空率在 2.2%~6.6% 时,试件极限承载力降低 8.74%~15.77%。随着脱空率的增加,试件极限承载力减小且轴压性能出现一定的削弱。该研究可为带脱空缺陷 SRCFT 短柱的研究提供理论基础。

关键词: 脱空缺陷;十字钢管;钢管混凝土短柱;轴压性能;有限元分析

中图分类号:TU398.9

文献标识码:A

Analysis of Axial Compression Performance of SRCFT Short Columns with Void Defects

ZHAN Jiedong, LI Chengwu*, TENG Zhenchao, LIANG Chenguang, CHEN Zhongwei

(School of Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: In order to explore the axial compression performance and failure mode of steel reinforced concrete filled steel tubular (SRCFT) short columns with initial concrete imperfection, a finite element model of SRCFT short columns with initial concrete imperfection under axial compression is established, the parameters of SRCFT short columns with different gap radio, steel tube strength, steel tube thickness, concrete strength, steel strength and steel type are analyzed, and the axial compression performance and failure mode of SRCFT short columns with initial concrete imperfection are discussed. The results show that the SRCFT short columns with initial concrete imperfection increase with the increase of steel tube strength, steel tube thickness, concrete strength, steel strength and steel type. The specimens with annular debonding defects exhibited ultimate bearing capacity reductions from 19.11% to 20.91% when the debonding rate increased from 1.1% to 3.3%, while those with spherical cap debonding defects showed capacity decreases from 8.74% to 15.77% corresponding to debonding rates progressing from 2.2% to 6.6%. That is, with the increase of the gap ratio, the ultimate bearing capacity of the specimen decreases and the axial compression performance is weakened. It can provide a theoretical basis for the study of SRCFT short columns with initial concrete imperfection.

Key words: initial concrete imperfection; cross profile steel; concrete filled steel tubular short column; axial compression performance; finite element analysis

收稿日期:2024-01-31

基金项目:黑龙江自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者:詹界东(1970—),男,吉林榆树人,博士,教授,从事组合结构方面的研究。

* 通信作者:李成武(1998—),男,江西吉安人,硕士研究生,从事组合结构方面的研究。

钢-混组合结构由于具有较好的承载力、延性和抗震性能,在交通和土木工程领域被广泛应用,常见于高层建筑和桥梁等^[1]。然而在实际工程中,大量结构存在脱空问题^[2],使得钢管与混凝土之间出现约束不足的情况,进而导致钢管混凝土试件承载力不足。因此,国内外学者对带缺陷钢管混凝土试件研究较多。廖飞宇等^[3-9]对带脱空缺陷钢管混凝土柱开展了抗弯性能、抗压性能、受剪性能及受拉性能的力学试验,采用数值模拟方法对带脱空缺陷构件进行了受力全过程分析,揭示了钢管与混凝土之间相互作用的影响,并通过理论分析提出简化模型,预测带脱空缺陷钢管混凝土柱的极限承载能力,发现带脱空缺陷会对构件会造成较大影响,并大大降低构件的承载能力。

尽管带脱空缺陷的钢管混凝土试件有许多研究,但针对带脱空缺陷钢管混凝土(Steel-Reinforced-Concrete-Filled Tube, SRCFT)试件轴压性能的研究尚有欠缺。鉴于脱空缺陷可能造成严重的后果,结合 SRCFT 试件在实际工程中的应用现状,有必要进一步研究带脱空缺陷 SRCFT 试件的轴压性能。因此,本文采用数值模拟方法对带脱空缺陷 SRCFT 短柱的轴压性能和破坏模式展开研究。

1 带脱空缺陷 SRCFT 短柱的有限元模型

1.1 材料本构模型

1.1.1 混凝土

由于钢管对核心混凝土起到约束作用,无脱空缺陷和球冠形脱空缺陷试件中的核心混凝土需要考虑钢管的约束效应。因此,采用刘威^[10]提出的约束混凝土应力-应变关系模型:

$$\sigma/f_c = \begin{cases} 2\varepsilon/\varepsilon_0 - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2 & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \frac{\varepsilon/\varepsilon_0}{\beta_0(\varepsilon/\varepsilon_0 - 1)^2 + \varepsilon/\varepsilon_0} & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\xi = A_s f_y / A_c f_c \quad (4)$$

$$\beta_0 = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \times (f_c)^{0.5} \times 0.5 \quad (5)$$

式中: f_y 、 f_c 分别为钢材屈服强度,MPa;混凝土轴心抗压强度,MPa; σ 、 ε 、 β_0 、 ξ 、 A_s 、 A_c 的物理意义见文献^[10]。

由于存在环向间隙,核心混凝土在没有外钢

管约束的情况下达到极限承载力。因此,对于环形脱空缺陷试件中的核心混凝土,采用 Attard 和 Setunge^[11]提出的无约束混凝土应力-应变关系模型,其表达式如下:

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (6)$$

式中: $Y = \sigma/f_c$, $X = \varepsilon/\varepsilon_{c0}$,其中 f_c 同上, ε_{c0} 、 A 、 B 、 C 、 D 的取值参考文献^[11]。

混凝土受拉应力-应变关系参考沈聚敏^[12]提出的关系模型,开裂应力 σ_{t0} 按式(7)确定:

$$\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.25f_c)^{2/3} \quad (7)$$

1.1.2 钢材

钢管与钢骨本构模型采用考虑应力硬化的双折线弹塑性本构模型,表达式见式(8),其中 E_1 取为 $0.01E_s$ 。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y + E_1(\varepsilon - \varepsilon_y) & (\varepsilon > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_s 为钢材的弹性模量,MPa; f_y 为钢材的屈服强度,MPa; ε_y 为钢材达到峰值应力 f_y 时所对应的应变值。

1.2 有限元模型

试件主要由上下垫板、钢管、混凝土和钢骨组成。垫板采用离散刚体,混凝土和钢管均采用实体单元(C3D8R),钢骨采用壳单元(S4R)。垫板与钢管采用“Tie”绑定方式,与混凝土采用面面接触。边界条件及网格划分如图1所示。对于环形脱空试件,钢管和混凝土前期处于未接触状态,两者之间不存在接触摩擦。两者接触后产生法线方向和切线方向的接触作用。对于无脱空和球冠形脱空的钢管混凝土,钢管与混凝土之间存在法向“硬”接触和切向接触,切向接触使用“罚”函数定义,摩擦系数设置为 0.6 ^[13]。

2 有限元模型验证

为验证带脱空缺陷 SRCFT 短柱有限元模型的准确性,选取文献^[4]中的5个试验试件和文献^[14]中的3个试验试件,用于对比有限元计算结果。如图2所示,有限元计算结果与试验结果吻合较好,但仍存在些许误差。这可能由于试验中混凝土被视为离散体,而有限元分析中混凝土被视为各向同性的连续体,有限元软件无法对混凝土特性做到完美还原。两者对比见表1与图3,最大误差在 6.57% 以内,满足工程要求。

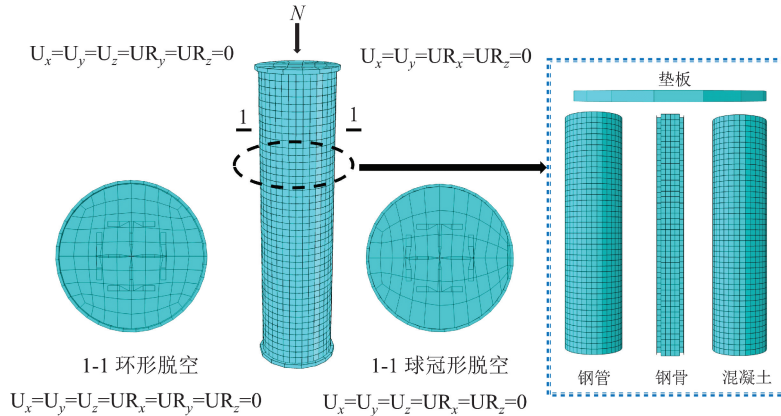


图 1 试件边界条件及网格划分图

Fig. 1 Boundary conditions and mesh division diagram of the specimen

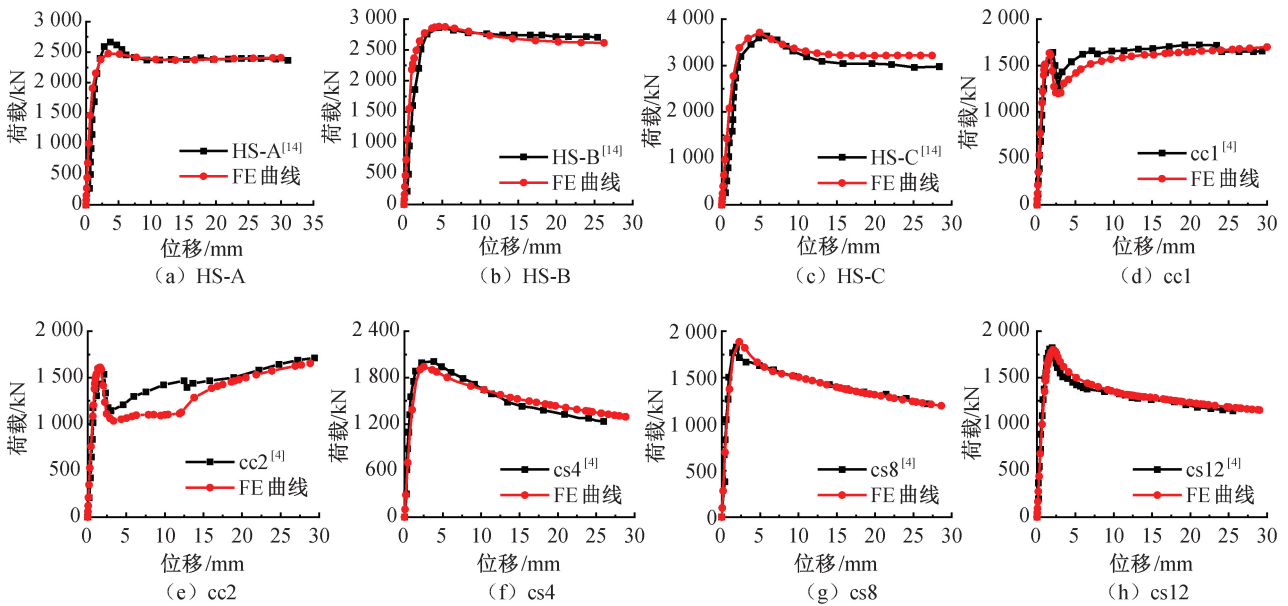


图 2 有限元 (FE) 计算曲线与试验曲线对比

Fig. 2 Comparison of finite element (FE) calculation curves with experimental curve

表 1 有限元与试验数据对比

Tab. 1 Comparison of finite element results and experimental data

试件编号	N_u^T /kN	N_u^s /kN	$\frac{N_u^T - N_u^s}{N_u^T}/\%$
HS-A	2 650	2 476	6.57
HS-B	2 862	2 892	1.05
HS-C	3 640	3 710	1.92
cc1	1 640	1 634	0.37
cc2	1 534	1 610	4.95
cs4	2 010	1 941	3.43
cs8	1 833	1 885	2.84
cs12	1 830	1 800	1.64

注： N_u^T 为试验数据， N_u^s 为有限元数据；编号 HS-A、HS-B、HS-C 为赵大洲^[14]开展的试验，编号 cc1、cc2、cs4、cs8、cs12 为 Liao 等^[4]开展的试验。

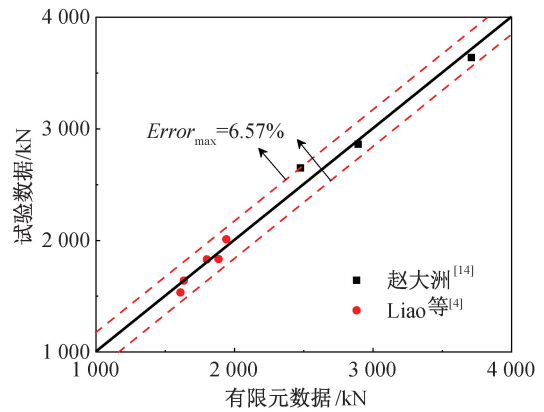


图 3 试件试验数据与有限元数据对比

Fig. 3 Comparison between test data and finite element data of specimens

3 带脱空缺陷 SRCFT 短柱参数分析

本文设计两种脱空形式各 14 根试件进行轴压性能分析,并提取出所有试件荷载-位移曲线,得到环形脱空轴压极限承载力(表 2)和球冠形脱空轴压极限承载力(表 3),并分析了混凝土强度 f_{cu} 、钢管强度 f_{sy} 、钢管厚度 t 、钢筋强度 f_{ly} 、钢筋类型和脱空率 χ 对带脱空缺陷 SRCFT 短柱轴压承载力性能的影响。

3.1 环形脱空

3.1.1 混凝土强度

由图 4(a)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着混凝土强度的增加而增大;混凝土强度为 80 MPa 的试件比强度为 60 MPa 和 70 MPa 的试件,其极限承载力分别提高 14.95% 和 7.06%。这是因为随着混凝土强度的提高,核心混凝土贡献的承载力增加,从而提高了试件极限承载力。

表 2 环形脱空 SRCFT 短柱试件参数

Tab. 2 Parameters of the circular voided SRCFT short column specimens

分析参数	编号	试件尺寸 ($D \times t \times L$)/mm	混凝土 强度/MPa	钢管强度 /MPa	钢筋强度 /MPa	钢筋 类型	脱空率 χ /%	极限承载力 /kN
标准试件	SRCFT-CG-1	219×4×876	60	345	345	I10	1.1	3 369.74
混凝土强度	SRCFT-CG-2	219×4×876	70	345	345	I10	1.1	3 618.09
	SRCFT-CG-3	219×4×876	80	345	345	I10	1.1	3 873.65
	SRCFT-CG-4	219×4×876	60	235	345	I10	1.1	3 199.26
钢管强度	SRCFT-CG-5	219×4×876	60	420	345	I10	1.1	3 463.49
	SRCFT-CG-6	219×5×876	60	345	345	I10	1.1	3 602.86
钢管厚度	SRCFT-CG-7	219×6×876	60	345	345	I10	1.1	3 851.11
	SRCFT-CG-8	219×4×876	60	345	235	I10	1.1	3 034.77
钢筋强度	SRCFT-CG-9	219×4×876	60	345	420	I10	1.1	3 590.72
	SRCFT-CG-10	219×4×876	60	345	345	I12	1.1	3 633.97
	SRCFT-CG-11	219×4×876	60	345	345	I14	1.1	3 919.76
脱空率	SRCFT-CG-12	219×4×876	60	345	345	I10	2.2	3 334.16
	SRCFT-CG-13	219×4×876	60	345	345	I10	3.3	3 295.05
	SRCFT-NG-1	219×4×876	60	345	345	I10	0.0	4 166.24

注:试件编号 NG 和 CG 分别表示无脱空和环形脱空; D 、 t 、 L 分别为试件钢管的外径、管厚和试件长度;环形脱空率 $\chi = 2d_s/D$; d_s 为脱空距离(从混凝土边缘到钢管内表面的最大距离)。

表 3 球冠形脱空 SRCFT 短柱试件参数

Tab. 3 Parameters of spherical cap-shaped hollow SRCFT short column specimens

分析参数	编号	试件尺寸 ($D \times t \times L$)/mm	混凝土 强度/MPa	钢管强度 /MPa	钢筋强度 /MPa	钢筋 类型	脱空率 χ /%	极限承载力 /kN
标准试件	SRCFT-SG-1	219×4×876	60	345	345	I10	2.2	3 802.23
混凝土强度	SRCFT-SG-2	219×4×876	70	345	345	I10	2.2	4 310.53
	SRCFT-SG-3	219×4×876	80	345	345	I10	2.2	4 323.32
	SRCFT-SG-4	219×4×876	60	235	345	I10	2.2	3 465.40
钢管强度	SRCFT-SG-5	219×4×876	60	420	345	I10	2.2	4 024.40
	SRCFT-SG-6	219×5×876	60	345	345	I10	2.2	4 089.07
钢管厚度	SRCFT-SG-7	219×6×876	60	345	345	I10	2.2	4 319.85
	SRCFT-SG-8	219×4×876	60	345	235	I10	2.2	3 464.26
钢筋强度	SRCFT-SG-9	219×4×876	60	345	420	I10	2.2	4 029.36
	SRCFT-SG-10	219×4×876	60	345	345	I12	2.2	4 086.00
	SRCFT-SG-11	219×4×876	60	345	345	I14	2.2	4 382.65
脱空率	SRCFT-SG-12	219×4×876	60	345	345	I10	4.4	3 569.74
	SRCFT-SG-13	219×4×876	60	345	345	I10	6.6	3 509.28
	SRCFT-NG-1	219×4×876	60	345	345	I10	0.0	4 166.24

注:试件编号 NG 和 SG 分别表示无脱空和球冠形脱空; D 、 t 、 L 分别为试件钢管的外径、管厚和试件长度;球冠形脱空率 $\chi = d_s/D$; d_s 同上。

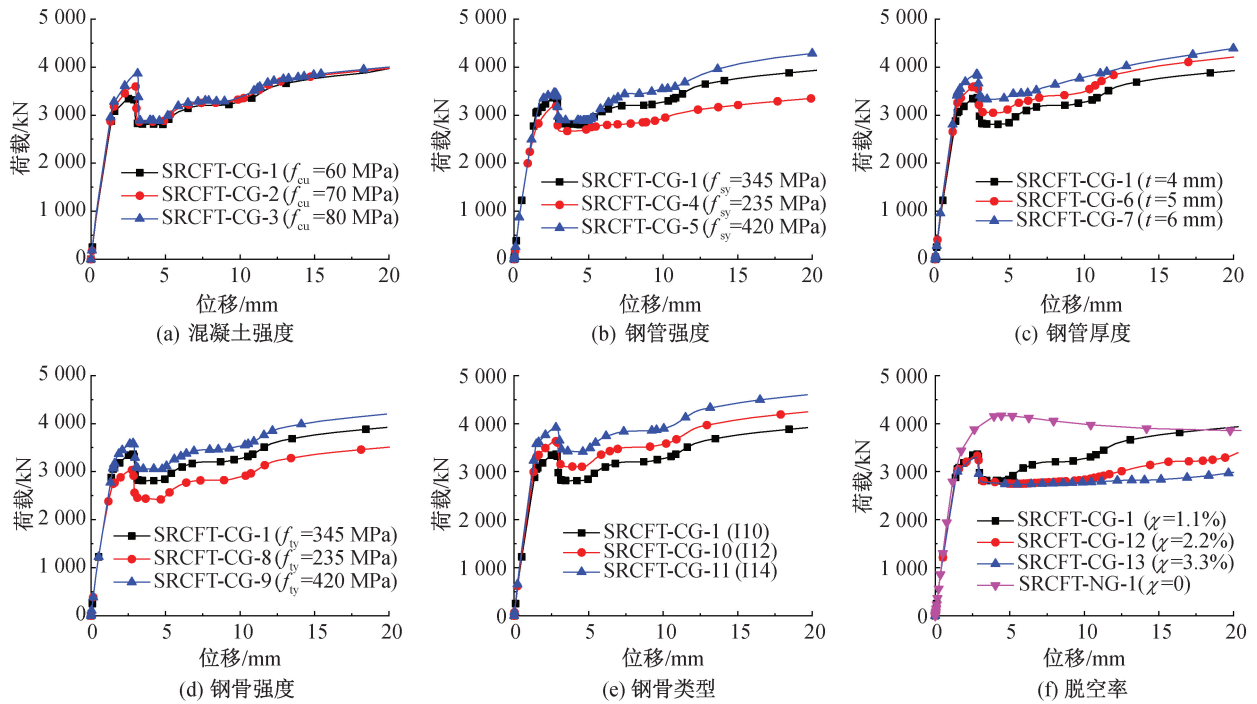


图4 环形脱空 SRCFT 短柱荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of annular voided SRCFT short column

3.1.2 钢管强度

由图4(b)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随钢管强度的增加而有所增大;试件 SRCFT-CG-5($f_{sy} = 420$ MPa)比试件 SRCFT-CG-4($f_{sy} = 235$ MPa)和 SRCFT-CG-1($f_{sy} = 345$ MPa)极限承载力分别提高 8.26%和 2.78%。这是因为试件存在脱空缺陷,混凝土和钢管、钢骨处于独立工作状态,此时钢管的作用类似于空钢管。虽然钢管强度增加,但没有与混凝土协同工作,很容易进入屈服状态,因此试件极限承载力的提升幅度有限。

3.1.3 钢管厚度

由图4(c)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随钢管厚度的增加而增大;钢管厚度为 6 mm 的试件比钢管厚度为 4 mm 和 5 mm 的试件的极限承载力分别提高 14.29%和 6.89%。这是因为试件存在脱空缺陷,钢管的作用类似于空钢管,但钢管厚度增加,外配钢率提高且钢管的受力面积增大,使得承载力得到提升。

3.1.4 钢骨强度

由图4(d)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着钢骨强度的增加而增大;试件 SRCFT-CG-9($f_{ty} = 420$ MPa)比试件 SRCFT-CG-8($f_{ty} = 235$ MPa)和 SRCFT-CG-1($f_{ty} = 345$ MPa)的

极限承载力分别提高 18.32%和 6.56%。这是因为截面尺寸一定时,随着钢骨强度增加,钢骨翼缘与腹板之间混凝土受到的约束作用增强,从而提高了试件的极限承载力,残余强度也略有提高^[15]。

3.1.5 钢骨类型

由图4(e)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着钢骨类型的提升而增大;钢骨类型为 I14 的试件比钢骨类型为 I10 和 I12 的试件的极限承载力分别提高 16.32%和 7.86%。分析原因如下:由于钢骨类型的提高,改变了钢骨的面积,使得内含钢量增大,试件的刚度得到提升,进而使混凝土内部裂缝延缓产生,从而提高了试件的极限承载力。

3.1.6 脱空率

由图4(f)可知:带环形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着脱空率的增大而减小;与无脱空 SRCFT 短柱相比,脱空率为 1.1%、2.2%和 3.3%的试件的极限承载力分别降低 19.11%、19.97%和 20.91%。这是因为试件存在环形脱空,所以钢管与混凝土在到达极限承载力前一直处于未接触状态,钢管起不到约束作用^[16]。此时混凝土与钢骨共同作用,钢管独立工作,导致试件极限承载力降低。随着位移的增大,直到钢管与混凝土接触,三者共同作用使得下降后的承载力出现部分回升。

综上所述:该类组合柱在保持截面尺寸和球冠形脱空率不变的情况下,提高钢管强度和钢骨强度对试件极限承载力的提升效果有限。虽然混凝土强度越大,试件极限承载力越高,但在到达极限承载力后急剧下降。因此,在满足工程可行性和经济性要求下,建议 SRCFT 短柱使用混凝土强度为 60 MPa,钢管强度和钢骨强度均为 345 MPa,钢管厚度为 5 mm,钢骨类型为 I12 进行试件制作。

3.2 球冠形脱空

3.2.1 混凝土强度

由图 5(a)可知:随着混凝土强度提高,带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的极限承载力增大。试件 SRCFT-SG-3($f_{cu} = 80$ MPa)比 SRCFT-SG-1($f_{cu} = 60$ MPa)和 SRCFT-SG-2($f_{cu} = 70$ MPa)的极限承载力分别提高 13.7%和 6.55%。这是因为混凝土强度越高,贡献的承载力越高,从而试件极限承载力提高^[17]。但是,这种情况的增加会降低钢管的约束效应,使试件荷载-位移曲线下降段变陡,刚度下降变快。

3.2.2 钢管强度

由图 5(b)可知:带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随钢管强度的增加而增大;试件 SRCFT-SG-5($f_{sy} = 420$ MPa)比试件 SRCFT-SG-4($f_{sy} = 235$ MPa)和 SRCFT-SG-1($f_{sy} = 345$ MPa)极限承载

力分别提高 16.13%和 5.84%。分析原因如下:随着钢管强度的增加,核心混凝土所受的约束效应提高,从而延缓了混凝土开裂,使试件的承载力提高。

3.2.3 钢管厚度

由图 5(c)可知:带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随钢管厚度的增加而增大;试件 SRCFT-SG-7($t = 6$ mm)比试件 SRCFT-SG-1($t = 4$ mm)和 SRCFT-SG-6($t = 5$ mm)极限承载力分别提高 13.61%和 5.64%。分析原因是^[18]:随着钢管厚度的增加,钢管对混凝土的约束作用增强,很大程度上延缓混凝土开裂,从而自身承载能力也随之增强。

3.2.4 钢骨强度

由图 5(d)可知:带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着钢骨强度的增加而增大;试件 SRCFT-SG-9($f_{ty} = 420$ MPa)比试件 SRCFT-SG-8($f_{ty} = 235$ MPa)和 SRCFT-SG-1($f_{ty} = 345$ MPa)的极限承载力分别提高 16.31%和 5.97%。这是因为截面尺寸一定时,随着钢骨强度增加,试件的截面强度和轴向刚度增大,从而提高试件的极限承载力。

3.2.5 钢骨类型

由图 5(e)可知:带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着钢骨类型的提升而增大;钢骨类型为 I14 的试件比钢骨类型为 I10 和 I12 的试件的极限承载力分别提高 15.27%和 7.26%。

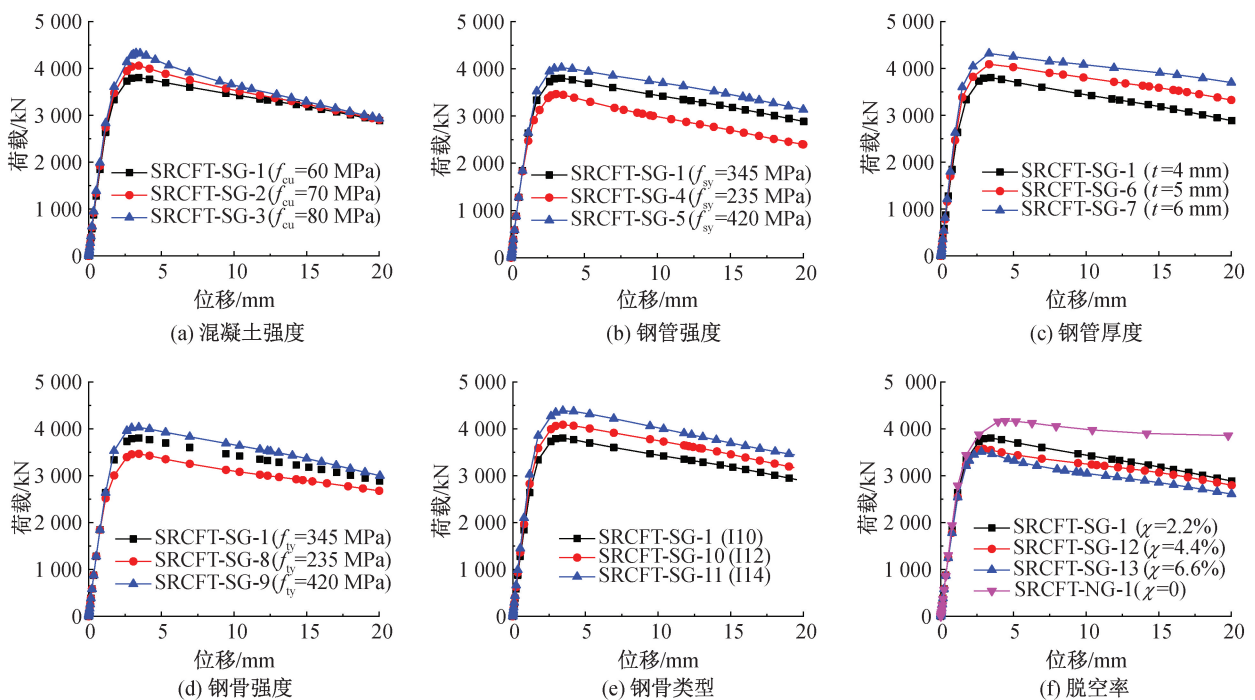


图5 球冠形脱空 SRCFT 短柱荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of the spherical cap-shaped hollow SRCFT short column

钢筋类型的提高,改变了钢筋的面积,使试件的内含钢量增加,试件的抗弯能力得到提升,从而减缓混凝土受弯处裂缝的产生,使试件的极限承载力增加。

3.2.6 脱空率

由图 5(f) 可知:带球冠形脱空缺陷 SRCFT 短柱的承载力随着脱空率的增大而减小;与无脱空 SRCFT 短柱相比,脱空率为 2.2%、4.4% 和 6.6% 的试件的极限承载力分别降低 8.74%、14.32% 和 15.77%。分析原因如下:试件存在球冠形脱空,钢管与混凝土一侧存在未接触状态,钢管约束效应减小,导致试件极限承载力降低。此时试件向缺陷一侧弯曲,承载力呈平稳曲线下降。

综上可知:在该类组合柱截面尺寸和球冠形脱空率下,钢管强度和钢筋的强度增加对试件的极限承载力提升作用较小。钢管厚度的增加试件在到达极限承载力后的持荷时间能够延长。在满足工程的可行性和经济性的前提下,建议 SRCFT 短柱可用混凝土强度为 60 MPa,钢管强度和钢筋强度均为 345 MPa,钢管厚度为 5 mm,钢筋类型为 I12 进行试件制作。

4 破坏模式

4.1 环形脱空

以 SRCFT-CG-1 试件为例,试件在轴压下的破坏模式如图 6—图 8 所示。与无脱空试件相比,带环形脱空试件混凝土与钢管受荷初期未接触,钢管对混凝土无法起到约束作用。如图 6 所示,钢管和钢筋进入屈服状态后,管壁两端出现鼓曲,此时

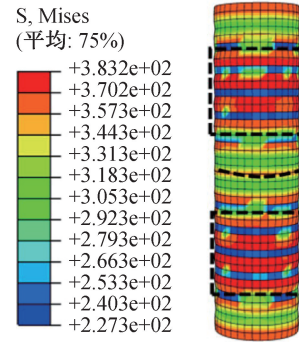


图 8 环形脱空 SRCFT 短柱承载力平稳处应力云图(单位: MPa)

Fig. 8 Stress cloud diagram at the stable bearing capacity of the annular void SRCFT short column (unit: MPa)

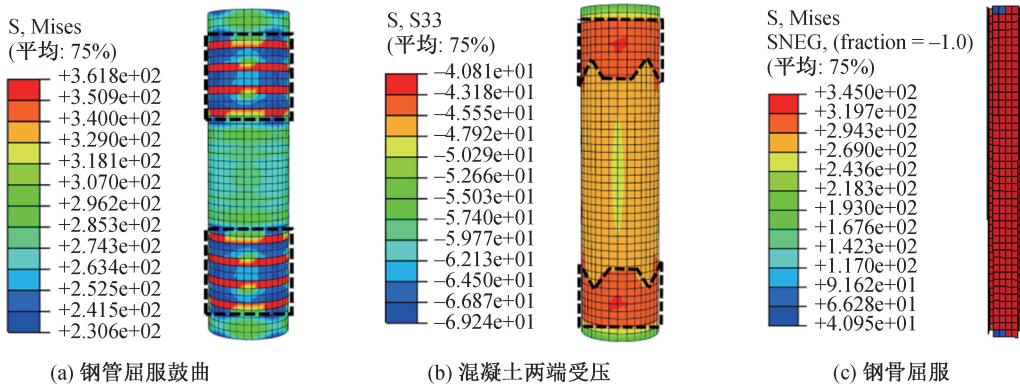


图 6 环形脱空 SRCFT 短柱极限承载力处应力云图(单位: MPa)

Fig. 6 Stress cloud diagram at the ultimate bearing capacity of the annular void SRCFT short column (unit: MPa)

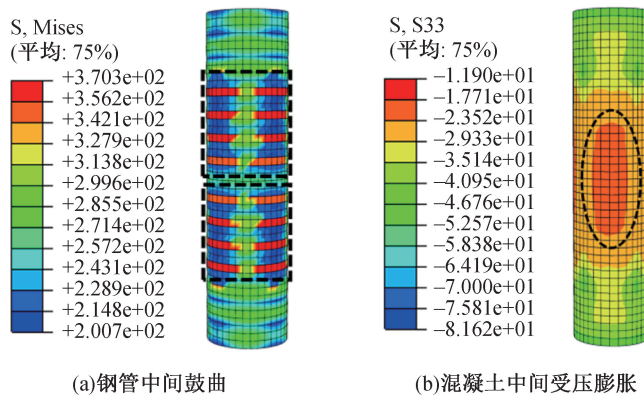


图 7 环形脱空 SRCFT 短柱承载力回升处应力云图(单位: MPa)

Fig. 7 Stress cloud diagram at bearing capacity recovery of the annular void SRCFT short column (unit: MPa)

混凝土中的钢筋起到支撑作用,混凝土两端受力。如图 7 所示,在承载力开始回升时,钢管中部开始出现鼓曲,钢筋已经屈服,混凝土受压中间膨胀;随着位移的增大,混凝土受压膨胀与钢管接触,此时钢管对混凝土开始起到约束作用;钢管对混凝土的约束作用越来越明显,混凝土中部受到很好地约束。最后从图 8 的应力云图中可以看出,钢管变形从接近中部鼓曲慢慢转移至两端,期间三者很好地协同作用,由于钢筋和钢管的约束作用,试件整体受压较为均匀。

4.2 球冠形脱空

以 SRCFT-SG-1 试件为例,试件在轴压下的破坏模式如图 9 和图 10 所示。与无脱空试件相比,带球冠形脱空缺陷试件由于一侧脱空的问题,钢管对混凝土约束作用降低,球冠形试件一侧存在混凝土和钢管未接触的空隙,所以试件向缺陷一侧受弯。由于混凝土中存在钢筋,钢筋对试件的受弯起到有效的抑制作用。通过图 9 应力云图可以发现,钢管和钢筋出现屈服,此时,在试件的脱空侧钢管两端有部分发生局部鼓曲,中间部分有轻微鼓曲,这时钢管与混凝土在缺陷处不断挤压。如图 10 所示试件受弯程度慢慢变大,钢筋逐渐达到极限状态。此时由于试件一侧的空隙,使得截面中心左右两侧受荷面积不一致,所以试件在脱空侧慢慢弯曲且钢管变形严重。最后,在轴压荷载作用下,由于试件脱空的问题,导致钢管对混凝土的约束不足,使得混凝土在脱空一侧慢慢出现裂缝。随着位移继续增大,脱空侧与钢管接触边界不断挤压,脱空侧混凝土裂缝扩大而破坏。

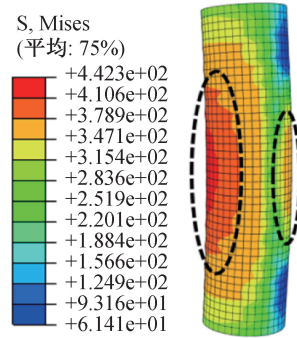


图 10 球冠形脱空 SRCFT 短柱承载力平稳处应力云图(单位: MPa)

Fig. 10 Stress cloud diagram at the stable bearing capacity of the spherical cap gap SRCFT short column (unit: MPa)

5 结论

1) 基于钢材双折线模型、约束和无约束混凝土应力应变模型,建立带不同脱空缺陷形式 SRCFT 短柱在轴压荷载作用下的数值模型,考虑钢管与混凝土的接触问题,通过与已有试验结果对比分析,验证材料本构关系和模型建立的合理性。

2) 该类型组合短柱随着钢管强度、钢管厚度、混凝土强度、钢筋强度以及钢筋类型的增加而增大。当带环形脱空缺陷试件的脱空率在 1.1% ~ 3.3% 时,试件极限承载力降低 19.11% ~ 20.91%;而当带球冠形脱空缺陷试件的脱空率在 2.2% ~ 6.6% 时,试件极限承载力降低 8.74% ~ 15.77%。随着脱空率的增加,试件承载力降低且轴压性能出现一定的削弱。

3) 环形脱空试件轴压的破坏形式为钢管与混凝土接触,混凝土中间膨胀,钢管由中部鼓曲转移至两端,钢筋屈服;球冠形脱空试件轴压的破坏形

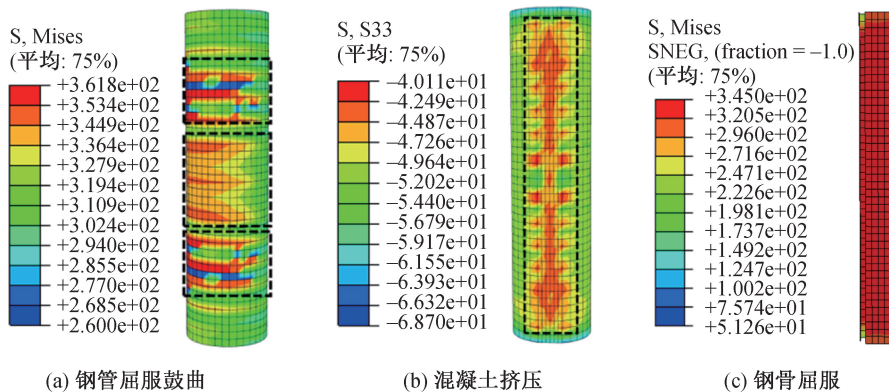


图 9 球冠形脱空 SRCFT 短柱极限承载力处应力云图(单位: MPa)

Fig. 9 Stress cloud diagram of the ultimate bearing capacity of the spherical cap gap SRCFT short column (unit: MPa)

式为混凝土、钢筋和钢管缺陷一侧受弯,钢管脱空侧中部鼓曲,混凝土脱空侧裂缝扩大而破坏。

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.
- [2] 张栋培, 冷飞, 吴二军, 等. 温度梯度作用下钢管混凝土拱桥拱脚混凝土裂缝控制研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 64-70+79.
- [3] 廖飞宇, 李艳飞, 尧国皇, 等. 带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土试件拉弯试验和承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 165-176.
- [4] LIAO F Y, HAN L H, HE S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935.
- [5] LIAO F Y, HAN L H, TAO Z. Behaviour of CFST stub columns with initial concrete imperfection: Analysis and calculations [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 70: 57-69.
- [6] HAN L H, YE Y, LIAO F Y. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016132.
- [7] HAN L H, HOU C, HUA Y X. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression: Life-cycle based performance [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106063.
- [8] 叶勇, 韩林海, 陶忠. 脱空对圆钢管混凝土受剪性能的影响分析[J]. 工程力学, 2016, 33(S1): 62-66+71.
- [9] YE Y, LI W, LIU X J. Behaviour of concrete-filled steel tubes with concrete imperfection under axial tension [J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(14): 743-756.
- [10] 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.
- [11] ATTARD M M, SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. Materials Journal, 1996, 93(5): 432-442.
- [12] 沈聚敏. 钢筋混凝土有限元板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [13] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [14] 赵大洲. 钢管-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [15] 赖柄霖, 温安平, 舒赣平, 等. 超高强型钢混凝土组合柱受力性能及设计方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 139-148.
- [16] 王静峰, 刘伟, 沈奇罕, 等. 考虑环向脱空影响的椭圆钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 50-63.
- [17] 刘子丹, 焦文帅, 程展, 等. 钢管不锈钢管超高性能混凝土柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(5): 17-27.
- [18] 沈金生, 彭宁宁, 安新正, 等. 钢管再生混凝土短柱承载性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 1-6+74.
- [9] 韦明方, 陈星任, 张志军, 等. 双组分硅烷改性聚氨酯中空玻璃密封胶的制备及性能研究[J]. 中国建筑防水, 2024, 42(10): 40-43+47.
- [11] 徐恭圣, 刘云, 于昌权. 基于三维离散元法的钢桥面铺装层间剪切模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 71-75.
- [12] YANG S X, GUO Z X, YE Y, et al. Experimental and numerical study on the shear performance of the stone panel-panel joint in stone cladding [J]. Buildings, 2023, 13(12): 3079.

(责任编辑 周雪梅)

(责任编辑 周雪梅)

(上接第5页)

- [7] WALLAU W, RECKNAGEL C. Durability assessment of structural sealant glazing systems applying a performance test method [J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98: 464-487.
- [8] LACASSE M A, GIFFIN G B, MARGESON J C. Laboratory cyclic fatigue test of silicone sealant mini-specimens [J]. Astm Special Technical Publication, 1999, 1334: 51-65.
- [9] NEMATI G, FU Q, YAN L, et al. The effect of adhesive amount and type on failure mode and shear strength of glued timber-concrete joints [J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128375.