•土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400404

本刊网刊

CFRP加固含缺陷方钢管混凝土短柱轴压性能

牛海成[1],秦子恒[1],李雨萱[1],尚天宇[2]

(1.河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454000;2.中建城市建设发展有限公司,北京 100037)

摘　要:为研究含缺陷方钢管混凝土短柱的轴压性能,本文以混凝土密实度损失率、缺陷类型、缺陷位置及碳纤维增强复合材料(CFRP)加固方式为设计参数,设计并浇筑了12根方钢管混凝土短柱试件(包括无缺陷、离散型缺陷、集中孔洞缺陷和CFRP加固缺陷试件),并进行了轴压试验,分析了不同参数对试件的荷载–位移曲线、荷载–应变曲线及延性的影响规律。研究结果表明:当混凝土密实度损失率小于5%时,离散型缺陷对试件的受压性能影响较小,随着密实度损失率的增加,试件受压性能明显降低,与无缺陷试件相比,当密实度损失率达15%时,其承载力和延性分别降低了26.9%和26.3%。在相同密实度损失率下,集中孔洞缺陷对试件受压性能的不利影响高于离散型缺陷,且近壁集中孔洞缺陷相较于中心集中孔洞缺陷对受压性能影响更大;采用CFRP加固后,密实度损失率为15%的试件极限承载力和延性较未加固试件分别提高9.1%和14.7%,对于内含集中孔洞缺陷的试件,全包裹加固效果优于半包裹加固。基于多元线性回归方法,本文提出了内含集中孔洞缺陷方钢管混凝土短柱的承载力计算公式,计算结果与实测值吻合较好。试验结果明确了不同类型缺陷、缺陷位置及CFRP加固措施对试件轴压性能的影响,可为实际工程中类似缺陷构件的评估与修复加固提供参考。

关键词:方钢管混凝土柱;缺陷;轴压试验;CFRP加固;承载力公式

中图分类号:TU398　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0214-10

钢管混凝土结构具有强度高、延性好、耐疲劳、塑性优等特点[1–3],广泛应用于桥梁、高层建筑及大跨度结构等[4–6]。此外,其简洁的构造方式缩短了施工工期,提高了施工效率,节约了施工成本[7–8]。

实际工程中,由于钢管内部构造复杂、混凝土运输泵送浇筑困难、振捣不充分及现场施工影响等往往会造成钢管混凝土存在密实度缺陷[9]。张戎令等[10]对不同核心混凝土缺陷率及缺陷位置的圆钢管混凝土柱进行了轴压试验,发现其承载力损失随缺陷率的增大而增大。沈奇罕等[11]探究了球冠形脱空缺陷对椭圆形钢管混凝土短柱轴压性能的影响,发现球冠形脱空缺陷削弱了椭圆钢管与核心混凝土之间的相互作用,导致承载力、初始刚度和延性均有所降低。Zhang等[12]研究了振捣不均匀在混凝土内部产生孔洞缺陷引起的损伤破坏行为,试验结果表明,内部孔洞缺陷引起较高的应力集中,降低了混凝土的抗压强度和变形能力。Zhang等[13]探究了钢管与核心混凝土之间的三角间隙缺陷对方钢管混凝土短柱轴心受压性能的影响,结果表明,间隙缺陷对承载力有显著影响,当间隙比为0.45%～12.50%时,承载力下降1.66%～17.72%。Cui等[14]通过单轴受压试验,研究了不同尺寸和倾角的内部孔洞缺陷对混凝土变形破坏的影响,试验结果表明,预制缺陷角度接近45°时,缺陷尺寸对混凝土的变形和破坏影响较大。

对于存在缺陷的钢管混凝土柱,许多学者提出了不同的加固方式。郝兆峰等[15]对存在不同位置缺陷的圆钢管混凝土柱采取注浆补强,结果表明,补强后圆钢管混凝土柱的承载力有一定提升,但仍低于无缺陷圆钢管混凝土柱的承载力。张昆昆等[16]采用CFRP加固具有球冠形脱空缺陷的圆钢管混凝土柱,发现CFRP有效延缓了钢管过早屈曲,使极限承载力明显提高。Du等[17]利用CFRP加固钢管混凝土梁,由于CFRP的横向约束和纵向加固,梁的抗弯能力和刚度得到了提升。王静峰等[18]对脱空缺陷的圆钢管混凝土短柱采用CFRP进行加固,发现加固后试件的变形能力显著提高。

收稿日期:2024－05－29　　**修回日期:**2024－07－17　　**网络出版日期:**2024－08－05

基金项目:国家自然科学基金项目(U1904188);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102320085);河南省高等学校重点科研项目(23B560004)

作者简介:牛海成(1979—),男,副教授,博士. 研究方向:钢与混凝土组合结构. E-mail:niuhch@hpu.edu.cn

综上所述，国内外现有研究多集中在内含缺陷的圆钢管混凝土柱且缺陷类型较为单一，针对不同类型缺陷对钢管混凝土柱受压性能不利影响的量化研究尚少且采取的加固措施也主要围绕圆钢管混凝土柱展开，针对内含不同类型缺陷方钢管混凝土短柱受力性能的研究报道较少。方钢管混凝土短柱具有节点构造简单、延性好、角部约束能力强等优点，在实际工程中亦广泛运用[19–20]。因此，对比研究不同类型缺陷及加固方式对方钢管混凝土短柱受压性能的影响规律是非常有必要的。基于此，本文研究了密实度损失率、缺陷类型、缺陷位置以及CFRP加固方式等参数对方钢管混凝土短柱的承载能力、延性的影响规律，以期为实际工程提供参考。

1　试验概况

1.1　试验设计

以混凝土密实度损失率、缺陷类型及位置和CFRP加固方式为参数，设计浇筑了12根方钢管混凝土短柱，其中，包括1根无缺陷、4根离散型缺陷（密实度损失率分别为1%、5%、10%、15%）、2根集中孔洞缺陷（密实度损失率为10%，分为中心集中孔洞与近壁集中孔洞）和5根采用不同CFRP加固（全包裹与半包裹）的方钢管混凝土短柱。所有方钢管边长200 mm、高度600 mm、壁厚3.75 mm。试件具体参数见表1。

表1　试件主要参数

Tab. 1　Main parameters of the specimen

试件编号	缺陷类型	ρ_l/%	加固形式
CFST–M	无缺陷	0	
CFST–1%	离散型孔洞	1	
CFST–5%	离散型孔洞	5	
CFST–10%	离散型孔洞	10	
CFST–15%	离散型孔洞	15	
CFSTC–10%	中心集中孔洞	10	
CFSTJ–10%	近壁集中孔洞	10	
CFRPT	离散型孔洞	15	全包裹
CFRPC	中心集中孔洞	10	全包裹
CFRPJ	近壁集中孔洞	10	全包裹
CFRPCB	中心集中孔洞	10	半包裹
CFRPJB	近壁集中孔洞	10	半包裹

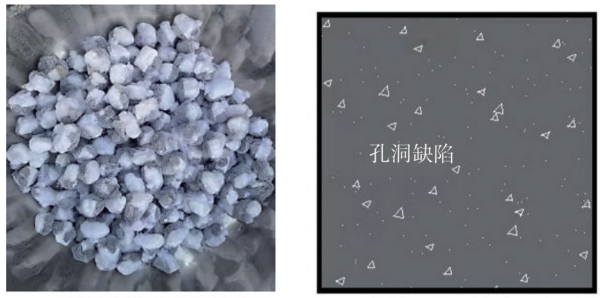
注：ρ_l为混凝土密实度损失率，即混凝土内部气孔、孔洞等缺陷的体积与混凝土总体积的比值。

1.2　试件制作

首先，截取长度为600 mm的方钢管，在一端焊接厚度为10 mm的钢板进行封口；随后，浇筑混凝土，并使用振捣棒振捣密实，覆盖保鲜膜进行养护；养护28 d后采用高强砂浆抹平钢管顶部，再焊接另一块钢板后进行轴心受压试验。

1.2.1　离散型孔洞缺陷试件

预制离散型孔洞缺陷时，选择聚氯乙烯泡沫作为模拟离散型孔洞缺陷的材料。将聚氯乙烯泡沫切割成1 cm^3左右的不规则体，并与粗骨料绑扎，配制混凝土时，掺入一定量的绑有聚氯乙烯泡沫的粗骨料，完成浇筑。预制离散型孔洞缺陷及示意图如图1所示。考虑到钢管内部构造复杂，可能导致振捣不充分、排气不畅产生大量气泡，故设计最大密实度损失率为15%。



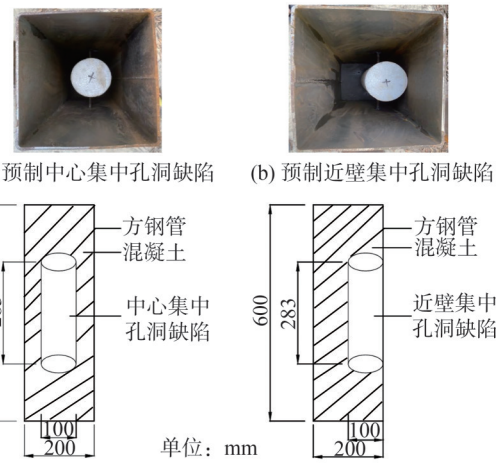
(a) 预制离散型孔洞缺陷　(b) 离散型孔洞缺陷示意图

图1　离散型孔洞缺陷及示意图

Fig. 1　Discrete void defects and schematic diagram

1.2.2　集中孔洞缺陷试件

集中孔洞缺陷可分为中心集中孔洞缺陷和近壁集中孔洞缺陷两类。采用直径100 mm、高度283 mm的聚氯乙烯泡沫圆柱体模拟密实度损失率为10%的集中孔洞缺陷，并用细钢筋将其固定在钢管内部的预定位置，随后进行混凝土浇筑。集中孔洞缺陷如图2所示。



(a) 预制中心集中孔洞缺陷　(b) 预制近壁集中孔洞缺陷

(c) 集中孔洞缺陷示意图

图2　预制集中孔洞缺陷及示意图

Fig. 2　Prefabricated concentrated void defects and schematic diagram

1.2.3　CFRP加固试件

待加固的含缺陷方钢管混凝土短柱制作方法同上所述。浇筑完成后，保持钢管表面干燥、平整，在各面中部粘贴应变片后涂抹保护剂。将碳纤维浸渍胶水充分搅拌后均匀涂抹在钢管表面，粘贴碳纤维布，按顺时针方向缠绕一层。随后，用刮板沿碳纤维编织方向将内部气泡及多余浸渍胶刮出，使碳纤维布与钢管完全贴合。最后，再次涂抹碳纤维浸渍胶，使浸渍胶充

分浸润碳纤维布。加固完成后将试件放至通风处，待浸渍胶完全固化，CFRP加固试件如图3所示。



图3 CFRP加固试件

Fig. 3 CFRP-strengthened specimens

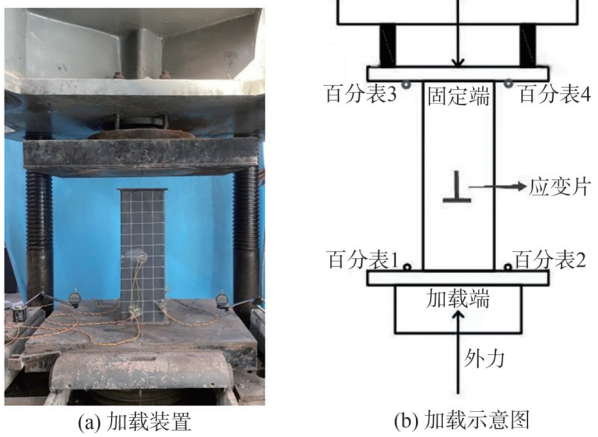
1.3 材料性能

混凝土设计强度等级为C60，采用同批次混凝土制作3个标准立方体试块及6个棱柱体试块。将混凝土试块养护28 d后，测得其基本力学性能参数如下：抗压强度为61.10 MPa，轴心抗压强度为46.90 MPa，弹性模量为40.85 GPa，泊松比为0.22。

钢管选用Q355级方钢管，边长200 mm，壁厚3.75 mm，两端采用边长250 mm、厚10 mm的钢板焊接封口。依据GB/T228.1—2021[21]对3个钢管标准试样进行室温拉伸试验。实测钢管屈服强度为376 MPa，抗拉强度为475 MPa，伸长率为22%。

1.4 试验仪器

试验加载装置为YAW–5000型微机控制电液伺服压力试验机，测量及数据采集仪器是XL2118A32静态电阻应变仪和百分表。试件安装完毕后，先进行预加载，施加10%的预估承载力，检查采集系统是否正常工作。正式加载采用单调分级加载方式：加载初期，每级加载200 kN；加载至60%预估承载力后，每级加载100 kN；接近预估承载力时，每级加载50 kN。加载装置、应变片及百分表布置如图4所示。



(a) 加载装置 (b) 加载示意图

图4 试验加载装置及示意图

Fig. 4 Test loading setup and schematic diagram

2 试验现象

2.1 无缺陷及缺陷试件

无缺陷试件加载初期无明显现象；随着荷载的增加，柱中上部漆面开始出现微裂纹；加载至85%峰值荷载时，试件内部发出混凝土挤压的“咔咔”声，钢管中上部漆面出现褶皱，并发展为高度约1.0 cm的轻微鼓突，随后鼓突缓慢增大并沿斜向扩展；加载至峰值荷载时，上部鼓突连成一片，且鼓突高度迅速增加，各侧面凸起高度1.5～2.0 cm，此时柱中部也出现鼓突；加载完成后柱中部鼓突更为明显，中上部鼓突高度2.0～3.0 cm。

离散型缺陷试件与无缺陷试件的破坏过程相似，且破坏程度随密实度损失率的增大而加剧。试件CFST–1%的破坏过程及最终破坏形态与无缺陷试件基本一致；试件CFST–5%和试件CFST–10%的钢管中上部局部鼓突出现较早，并且在峰值荷载时柱中下部出现新的局部屈曲，随后迅速发展，沿横向贯通各侧面；试件CFST–15%的鼓突发生更早，当加载至80%峰值荷载时柱中部出现了明显的鼓突，峰值荷载时柱中下部也发生鼓突现象，形成较为明显的屈曲，试件破坏时最大鼓突高度达3.8 cm。试件最终破坏形态如图5所示。

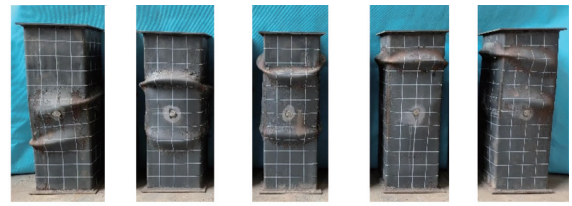


图5 离散型孔洞缺陷试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens with discrete void defects

集中孔洞缺陷试件的破坏过程与无缺陷试件相似，但破坏位置有所不同。对于中心集中孔洞缺陷试件CFSTC–10%，加载至峰值荷载时，柱中部出现鼓突并迅速扩展，直至贯穿整个横截面。造成上述现象可能的原因是，位于试件中心的集中孔洞缺陷周围的混凝土被压溃，外围钢管瞬间丧失支撑作用，导致钢管壁出现局部屈曲并迅速发展，最终破坏形态如图6所示。对于近壁

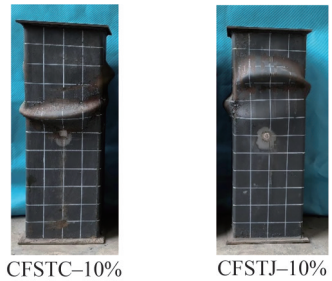


图6 集中孔洞缺陷试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimens with concentrated void defects

集中孔洞缺陷试件CFSTJ–10%，在峰值荷载时，靠近壁孔洞缺陷侧的钢管壁向内挤压破坏较为严重，最终破坏形态如图6所示。

2.2　CFRP加固缺陷试件

采用CFRP全包裹加固、密实度损失率最大的离散型孔洞缺陷试件CFST–15%，在加载至峰值荷载前，仅上部出现微鼓，CFRP裹材发出“噼啪”的声响；加载至峰值荷载时，柱顶处鼓突贯穿整个横截面，局部变形过大处的CFRP发生断裂。试件最终破坏形态如图7(a)所示。

集中孔洞缺陷试件采用全包裹和半包裹两种加固方式。全包裹试件CFRPC和CFRPJ破坏时，钢管局部鼓突分别出现在柱上部和中部，CFRP裹材均在峰值荷载时断裂，最终破坏形态见图7(b)和图7(c)。

半包裹试件CFRPCB柱中部靠上位置鼓突发展为环向破坏，CFRP材料断裂如图7(d)所示。试件CFRPJB发生破坏时，由于裹材对缺陷处的包裹作用，导致鼓突率先发生在柱上部裹材边缘处，加载完成后各侧面鼓突均位于裹材上部且连成一片，CFRP材料在鼓突处断裂，破坏形态见图7(e)。



(a) CFRPT　(b) CFRPC　(c) CFRPJ　(d) CFRPCB　(e) CFRPJB

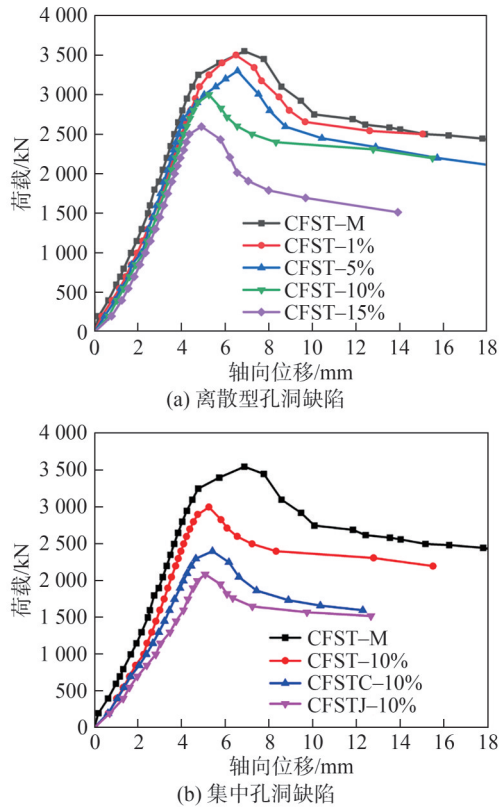
图7　CFRP包裹加固试件破坏形态

Fig. 7　Failure modes of CFRP-wrapped strengthened specimens

3　试验结果分析

3.1　缺陷试件荷载–位移曲线

含不同类型缺陷各试件的荷载–位移曲线如图8所示。由图8(a)可知，加载初期，各试件荷载–位移曲线呈线性增长，轴压刚度随密实度损失率的增加而降低。当加载至85%峰值荷载时，荷载–位移曲线开始呈非线性增长趋势，试件进入弹塑性阶段，此时轴向位移增长速度大于荷载增长速度。随着荷载的增加，试件CFST–1%与CFST–M的荷载–位移曲线最为接近，说明当密实度损失率较小时，离散型孔洞缺陷对方钢管混凝土短柱的受压性能影响不大。随着密实度损失率的增加，试件CFST–5%和CFST–10%的极限承载力明显下降，峰值位移亦迅速减小。密实度损失率最大的试件CFST–15%在加载至90%峰值荷载时，轴向位移迅速增长，主要原因是内部混凝土孔洞缺陷被挤压填充，同时钢管壁局部屈曲加剧。内含离散型缺陷方钢管混凝土短柱荷载–位移曲线下降段较为平缓，说明试件仍具有较好的变形能力。



(a) 离散型孔洞缺陷　(b) 集中孔洞缺陷

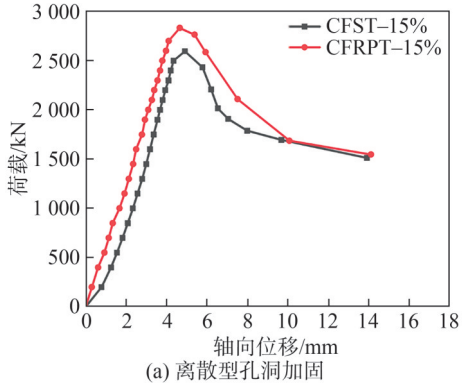
图8　含不同类型缺陷各试件的荷载–位移曲线

Fig. 8　Load–displacement curves of specimens containing different defect types

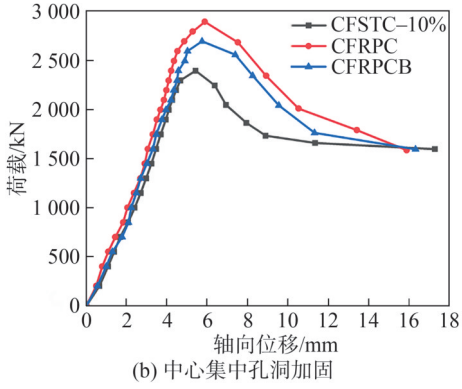
由图8(b)可知：1)相同密实度损失率条件下，与离散型孔洞缺陷相比，集中孔洞缺陷对方钢管混凝土柱受压性能产生的不利影响更大，承载力与轴压刚度均显著降低。主要原因是离散型孔洞缺陷分布较均匀，避免了应力集中现象。2)与中心集中孔洞缺陷相比，近壁集中孔洞缺陷导致承载力及刚度下降幅度更大，主要是因为中心集中孔洞周围有混凝土支撑，而近壁缺陷处在受压过程中逐渐形成偏心受压，随着荷载的增加，缺陷处钢管因缺少混凝土的支撑而过早屈曲，导致破坏迅速发生。

3.2　加固试件荷载–位移曲线

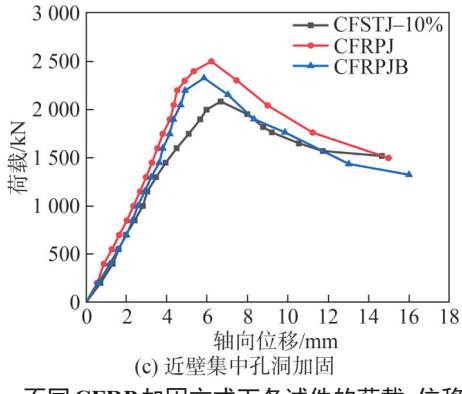
不同CFRP加固方式下各试件的荷载–位移曲线如图9所示。



(a) 离散型孔洞加固



(b) 中心集中孔洞加固



(c) 近壁集中孔洞加固

图9 不同CFRP加固方式下各试件的荷载–位移曲线

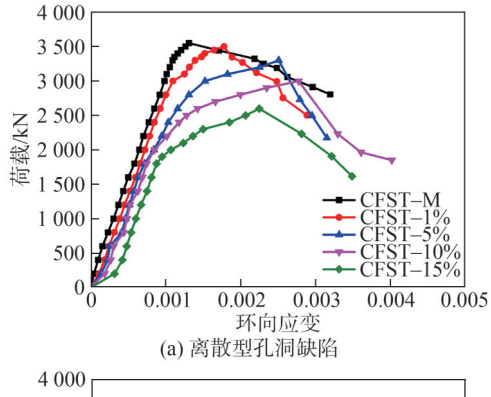
Fig. 9 Load–displacement curves of specimens under different CFRP strengthening schemes

由图9(a)可知，采用CFRP加固可显著提高含离散型缺陷试件的轴压刚度和承载力。由于加载过程中核心混凝土不断挤压钢管壁，导致钢管横向变形增大，CFRP的约束作用逐渐增强，为方钢管提供了较强的环向约束作用，避免了方钢管局部屈曲的过早出现，提高了承载能力。

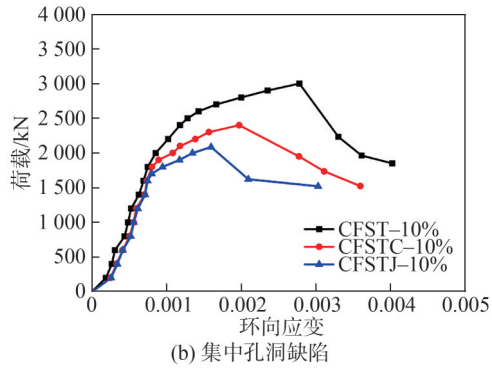
由图9(b)与(c)可知，无论采用全包裹还是半包裹的加固方式，试件的承载力与轴压刚度均有所提高且全包裹加固效果优于半包裹加固。尤其对于内含近壁集中孔洞缺陷的方钢管混凝土柱图9(c)：当加载至70%峰值荷载时，未加固试件的轴压刚度显著降低，轴向位移迅速增长；采用CFRP加固后，轴压刚度未发生明显降低，主要是CFRP的约束作用有效降低了近壁集中孔洞缺陷的不利影响。

3.3 荷载–应变曲线

实测含不同类型缺陷各试件的荷载–环向/纵向曲线如图10和11所示。



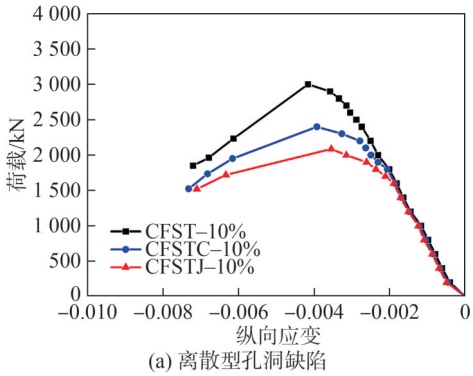
(a) 离散型孔洞缺陷



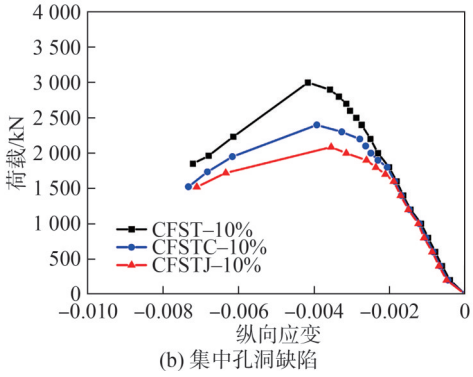
(b) 集中孔洞缺陷

图10 含不同类型缺陷各试件的荷载–环向应变曲线

Fig. 10 Load–hoop strain curves of specimens containing different defect types



(a) 离散型孔洞缺陷



(b) 集中孔洞缺陷

图11 含不同类型缺陷各试件的荷载–纵向应变曲线

Fig. 11 Load–longitudinal strain curves for specimens with different defect types

由图10(a)和11(a)可知：对于含离散型孔洞缺陷的试件，在弹性阶段时，环向应变和纵向应变的发展趋势基本相同，均呈线性缓慢增长，在同级荷载作用下，钢管的环向应变与纵向应变均随混凝土密实度损失率的增大而增加；峰值荷载后，环向及纵向应变快速增长。主要原因是，加载过程中混凝土挤压破碎进而填充了孔洞，核心混凝土开始挤压钢管，受力主体由混凝土向钢管转移，此时钢管约束作用显著增强，发生严重的局部屈曲，应变迅速增大。

图10(b)和11(b)说明，当密实度损失率同为10%时，加载初期，缺陷类型及缺陷位置对钢管应变影响较小。随着荷载的增加，环向应变与纵向应变迅速增长，不同缺陷位置对钢管应变的影响开始显现。在同级荷载下，近壁集中孔洞缺陷试件的钢管应变大于中心集中孔洞缺陷试件。这主要是由于集中孔洞缺陷贴近方钢管内壁，导致混凝土受压不均匀，缺陷处钢管因缺少混凝土支撑而过早发生局部屈曲，峰值荷载时缺陷侧钢管屈曲严重；而中心集中孔洞缺陷试件，由于缺陷四周混凝土的支撑作用，避免了环向鼓突过早出现，但在峰值荷载时，中心缺陷周围混凝土被压溃，导致外侧钢管缺少支撑而迅速发生局部屈曲。

3.4　承载力分析

引入承载力系数λ对比分析无缺陷试件、含缺陷试件和加固缺陷试件的承载力，计算公式如下：

$$\lambda=\frac{N_{\mathrm{ue}}}{N_{\mathrm{u-M}}} \tag{1}$$

式中，N_{ue}为含缺陷及加固缺陷试件的承载力，$N_{\mathrm{u-M}}$为无缺陷试件的承载力。

含不同缺陷类型试件的承载力系数比较如图12所示。由图12(a)可知，随着方钢管混凝土短柱密实度损失率的增加，其承载力逐渐降低。试件CFST–5%、CFST–10%和CFST–15%的极限承载力相较于无缺陷试件CFST–M分别降低了7.0%、16.0%和27.0%。经CFRP加固后，试件CFRPT–15%的承载力较未加固试件CFST–15%提高了9.6%。因此，对于离散型孔洞缺陷，密实度损失率是影响方钢管混凝土短柱极限承载力的主要因素，且当密实度损失率较大时，采取CFRP加固对承载力的提升效果不明显。由图12(b)可以看出：1)相同密实度损失率下，离散型孔洞缺陷试件CFST–10%、中心集中孔洞缺陷试件CFSTC–10%与近壁集中孔洞缺陷试件CFSTJ–10%的承载力系数分别为0.84、0.68与0.59，说明集中孔洞缺陷对承载力的不利影响高于离散型孔洞缺陷，近壁集中孔洞缺陷的影响比中心集中孔洞缺陷更为显著；2)对于中心集中孔洞缺陷，采用CFRP半包裹与全包裹加固，承载力系数分别提高了

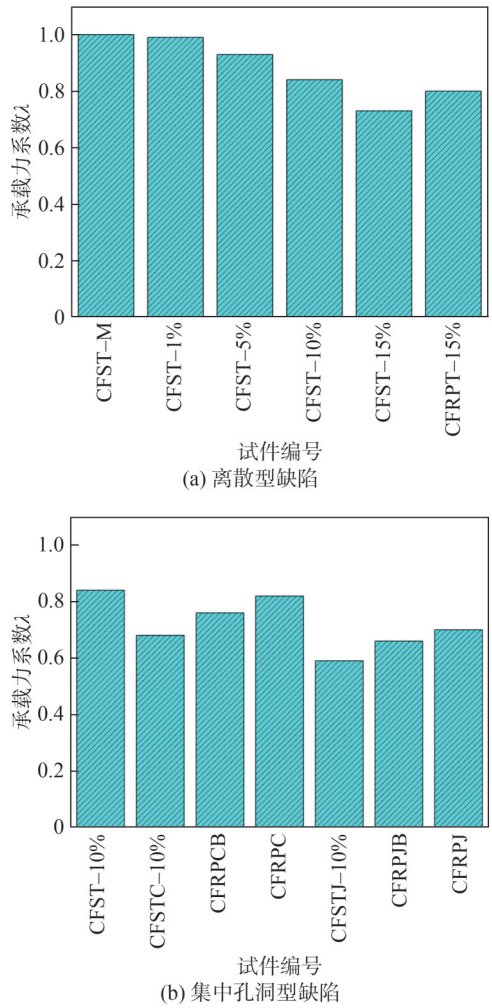


图12　含不同类型缺陷各试件的承载力系数比较

Fig. 12　Comparison of load-carrying capacity coefficients for specimens with various defect types

11.8%与20.6%；3)对于近壁集中孔洞缺陷，采用半包裹与全包裹加固，承载力系数分别提高了11.9%与18.6%，说明全包裹加固方式对提高承载力有较大帮助，且对中心集中孔洞缺陷的提升效果更明显。

3.5　延性分析

利用延性系数μ来分析不同类型缺陷对方钢管混凝土柱变形能力的影响，计算公式如下：

$$\mu=\frac{\Delta_{\mathrm{u}}}{\Delta_{\mathrm{y}}} \tag{2}$$

式中：Δ_{u}为荷载–位移曲线下降至85%峰值荷载时对应的位移；Δ_{y}为屈服荷载对应的位移，按$\Delta_{\mathrm{y}}=\Delta_{0.75}/0.75$计算，其中，$\Delta_{0.75}$为荷载加载至75%峰值荷载时对应的位移[22]。

含不同类型缺陷试件的延性系数如图13所示。由图13(a)可知，随着方钢管混凝土短柱密实度损失率增加，延性系数整体呈降低趋势。与无缺陷试件CFST–M相比，试件CFST–1%、CFST–5%、CFST–10%和CFST–

15% 的延性系数分别降低了 9.1%、10.3%、22.3% 和 26.3%。由此可见，密实度损失率较大时，混凝土较早发生破坏，钢管承担更多压力，导致构件延性变差。采用 CFRP 加固后，试件 CFRPT–15% 的延性系数较试件 CFST–15% 提高了 14.7%。

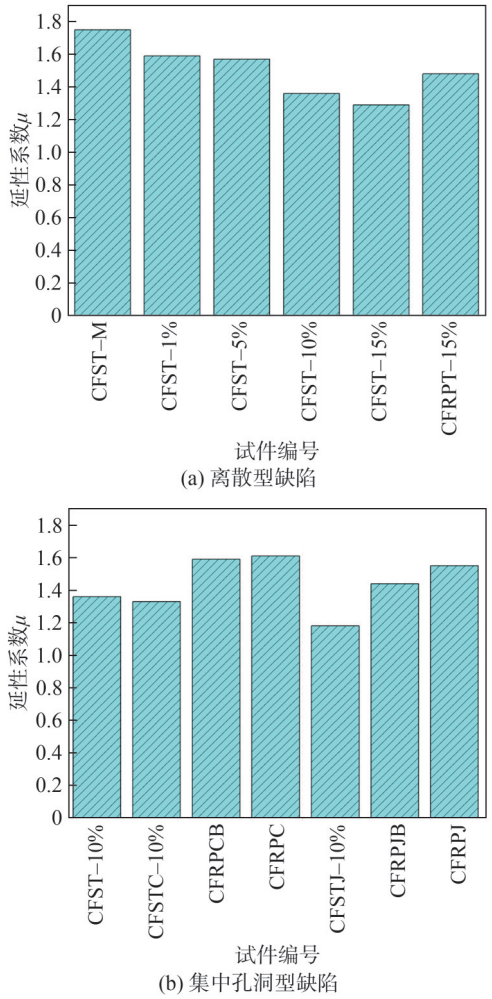


图 13 含不同类型缺陷各试件延性系数

Fig. 13 Comparison of ductility coefficients for specimens with different type of defects

由图 13(b)可知：1)在相同密实度损失率下，相较于 CFST–10%，试件 CFSTC–10% 和 CFSTJ–10% 延性系数分别降低了 2.2% 和 13.2%。说明相同密实度损失率下，不同缺陷类型对延性的影响程度不同，其中近壁集中孔洞缺陷对延性的不利影响最大。2)采用 CFRP 加固后，内含缺陷的方钢管混凝土柱延性均有一定提高。采取半包裹加固和全包裹加固后，对于中心集中孔洞缺陷，延性系数分别提高了 19.5% 和 21.1%；对于近壁集中孔洞缺陷，延性系数分别提高了 22.1% 和 31.4%。说明采用 CFRP 加固对提高内含近壁集中孔洞缺陷的方钢管混凝土柱的延性更有效。CFRP 虽然是脆性材料，但其有效约束限制了方钢管的局部变形，延缓了方钢管屈曲的发生，对缺失的核心混凝土起到了补充、支撑的作用，提高了构件的变形能力。

4 承载力计算公式修正

目前，计算方钢管混凝土短柱轴压承载力的方法有许多，例如中国规范《钢管混凝土结构技术规程》(GB 55004—2021)[23]、美国规范 ANSI/AISC 360–22[24]、Zhang[25]及 Sakino[26]等提出的计算公式，但上述公式均未考虑缺陷对方钢管混凝土柱承载力的影响，而核心混凝土含有缺陷时受力非常复杂且集中孔洞缺陷在实际工程中较常出现。故分析集中孔洞缺陷对方钢管混凝土短柱承载力的影响具有重要的现实意义。

基于此，以中国规范[23]为基础，结合本文试验数据和文献[27–29]中的数据，对含集中孔洞缺陷的方钢管混凝土短柱极限承载力计算公式进行修正。

规范[23]给出的承载力 N_0 公式如下：

$$N_0 = A_{sc} f_{sc} \tag{3}$$

$$f_{sc} = (1.212 + B\theta + C\theta^2) f_c \tag{4}$$

式(3)～(4)中：A_{sc} 为钢管混凝土截面面积，mm^2；f_{sc} 为混凝土抗压强度设计值，N/mm^2；θ 为约束效应系数；B、C 按照规范中方钢管约束效应系数的影响系数取值；f_c 为混凝土轴心抗压强度，N/mm^2。θ、B、C 的计算公式分别表示为：

$$\theta = \frac{A_s f}{A_c f_c} \tag{5}$$

$$B = 0.131 f/213 + 0.723 \tag{6}$$

$$C = -0.070 f_c/14.4 + 0.026 \tag{7}$$

式(5)～(7)中：f 为钢材抗压强度设计值，N/mm^2；A_s、A_c 分别为钢管与核心混凝土的截面面积，mm^2。

基于含集中孔洞缺陷方钢管混凝土短柱的轴心受压试验结果可知，密实度损失率、缺陷位置是影响其承载力的主要因素。此外，方钢管的尺寸对承载力也有一定影响[30]。因此，以密实度损失率、缺陷位置以及方钢管厚宽比为变量，通过多元线性回归方法，建立了含集中孔洞缺陷方钢管混凝土短柱的承载力折减回归模型，具体方程如下：

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 \tag{8}$$

式中：α_0、α_1、α_2、α_3 为偏回归系数；x_1 为密实度损失率，取各文献中的实际密实度损失率；x_2 为缺陷中心至方钢管截面中心距离与方钢管边长一半的比值；x_3 为方钢管的厚宽比。

利用最小二乘原理，求得偏回归系数 α_0、α_1、α_2、α_3 分别为 1.489、1.075、0.105、−55.360，因此，承载力折减系数的回归方程为：

$$y = 1.489 + 1.075x_1 + 0.105x_2 - 55.360x_3 \tag{9}$$

回归结果中 R 检验值为 0.954，表明该模型回归拟

合效果较好。

因此，考虑集中孔洞缺陷的方钢管混凝土短柱轴心受压承载力计算公式为：

$$N_u=(1-y)A_{sc}(1.212+B\theta+C\theta^2)f_c \quad (10)$$

采用式(10)计算本文及文献[27–29]中含集中孔洞缺陷方钢管混凝土短柱的轴压承载力并与试验值进行对比，结果见表2。

表2　试验值与计算值对比

Tab. 2　Comparison of test values and calculation values

文献来源	试件编号	N_t/kN	N_u/kN	$N_u \cdot N_t^{-1}$
本文	CFSTC–10%	2 400	2 168	0.903
	CFSTJ–10%	2 086	1 879	0.901
文献[27]	试件6	1 854	2 174	1.118
	试件7	1 944	1 994	1.191
	试件8	1 674	1 587	1.165
	试件9	1 362	2 169	1.170
文献[28]	2号试件	853	795	0.932
	3号试件	838	791	0.944
	4号试件	819	781	0.954
	5号试件	808	767	0.949
	6号试件	796	753	0.946
文献[29]	编号5	6 248	5 926	0.948
	编号6	6 214	5 906	0.950
	编号7	6 113	5 714	0.935
	编号8	5 913	5 522	0.934
	编号9	5 789	5 330	0.921
	编号10	5 717	5 147	0.900
	编号11	5 569	5 023	0.902
	编号12	5 499	4 965	0.903
	编号13	5 227	4 789	0.916
	编号14	5 199	4 698	0.904
	编号15	5 074	4 569	0.900

注：N_t为承载力的试验值，N_u为承载力计算值，N_u/N_t为方钢管混凝土短柱承载力计算值与试验值之比。

由表2可知，在考虑集中孔洞缺陷的情况下，方钢管混凝土短柱承载力计算值与试验值之比N_u/N_t的平均值为0.968，表明本文提出的承载力修正公式与实测值较为吻合，但也出现部分偏差较大的情况。由于数据有限，该修正公式的准确性有待进一步提高。

5　结　论

1）含离散型孔洞缺陷与集中孔洞缺陷的方钢管混凝土柱的破坏过程相似，但破坏位置略有差异。前者局部屈曲多出现在柱中上部，后者主要出现在集中孔洞缺陷处，且钢管局部屈曲发生较早，鼓突程度更严重。

2）含离散型缺陷的方钢管混凝土短柱的极限承载力、轴压刚度、延性均随密实度损失率的增加而降低。当密实度损失率小于5%时，对方钢管混凝土短柱的受压性能影响不大。

3）在相同密实度损失率条件下，集中孔洞缺陷对方钢管混凝土短柱承载力、延性的不利影响大于离散型孔洞缺陷，且近壁集中孔洞缺陷较中心集中孔洞缺陷产生的不利影响更为显著。

4）采取CFRP加固含缺陷方钢管混凝土短柱，可明显提高其承载力、延性，并且全包裹加固方式的效果优于半包裹加固方式。

5）针对核心混凝土内含集中孔洞缺陷的方钢管混凝土短柱，提出了相应的承载力修正公式，计算结果与试验实测值吻合较好。

参考文献：

[1] Liao Feiyu,Han Hao,Wang Yuhang.Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular(CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load[J].China Civil Engineering Journal,2019,52(7):57–68.[廖飞宇,韩浩,王宇航.带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究[J].土木工程学报,2019,52(7):57–68.]

[2] Yao Dunrong,Deng Nianchun.Vehicle-bridge coupling vibration analysis of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(12):3693–3704.[姚敦荣,邓年春.大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3693–3704.]

[3] 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.

[4] Han Linhai,Mu Tingmin,Wang Facheng,et al.Design theory of CFST(concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering[J].China Civil Engineering Journal,2020,53(5):1–24.[韩林海,牟廷敏,王法承,等.钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J].土木工程学报,2020,53(5):1–24.]

[5] Fan Jiansheng,Zhu Yaoyu,Cui Bing,et al.A review on research and applications of concrete-filled steel-plate composite bridge tower[J].China Civil Engineering Journal,2023,56(4):61–71.[樊健生,朱尧于,崔冰,等.钢板–混凝土组合结构桥塔研究及应用综述[J].土木工程学报,2023,56(4):61–71.]

[6] Wang Fei.Research on the key technology of suspender replacement of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering Society,2021,38(12):61–67.[王菲.大跨度钢管混凝土拱桥吊杆更换关键技术研究[J].铁道工程学报,2021,38(12):61–67.]

[7] Zhong Shantong.The continuity of axial compressive behaviors of concrete filled steel tube(CFST) for circular, octagonal, square and rectangular forms[J].Progress in Steel Building Structures,2004,6(2):14–22.[钟善桐.圆、八边、正方与矩形钢管混凝土轴心受压性能的连续性[J].建筑钢结构进

展,2004,6(2):14–22.]

[8] Wang Yanlei, Cai Gaochuang, Si Larbi A, et al. Monotonic axial compressive behaviour and confinement mechanism of square CFRP-steel tube confined concrete[J]. Engineering Structures,2020,217:110802.

[9] Ye Yong,Li Wei,Liu Xiaojuan,et al.Behaviour of concrete-filled steel tubes with concrete imperfection under axial tension[J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(14): 743–756.

[10] Zhang Rongling, Hao Zhaofeng, Ma Lina, et al. Influence of defect rate and location of core concrete on the bearing capacity of concrete-filled steel tubular[J]. Building Structure,2021,51(2):78–84.[张戎令,郝兆峰,马丽娜,等. 核心混凝土缺陷率与缺陷位置对钢管混凝土承载力的影响[J]. 建筑结构,2021,51(2):78–84.]

[11] Shen Qihan, Wang Jingfeng, Li Jingzhe. Experimental investigation and design of axially loaded concrete filled elliptical steel tubular stub columns with spherical gaps[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(12): 141 – 150. [沈奇罕, 王静峰,李景哲.带球冠形脱空缺陷椭圆钢管混凝土短柱轴压性能及计算方法研究[J]. 工程力学,2022,39(12): 141–150.]

[12] Zhang Kunpeng, Wang Chaolin, Zhao Yu, et al. Experimental study on cracking behavior of concrete containing hole defects[J].Journal of Building Engineering,2023,65:105806.

[13] Zhang Wanpeng,Mao Yiyang,Xing Zhiquan,et al.Axial compression behavior of square CFST short column with triangular-corner gap[J]. Journal of Building Engineering, 2023,80:108046.

[14] Cui Wei,Liu Manman,Song Huifang,et al.Influence of initial defects on deformation and failure of concrete under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020,234:107106.

[15] Hao Zhaofeng,Zhang Rongling,Li Zhiyang,et al.Experimental study on bearing capacity of concrete-filled steel tubular members before and after grouting retrofit with different defect rates[J].Journal of Building Structures,2019,40(S1):241–250.[郝兆峰,张戎令,李志杨,等. 钢管混凝土构件不同密实度损失率注浆补强前后承载能力试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(S1):241–250.]

[16] Zhang Kunkun,Liao Feiyu,Huang Zhiwei.Axial compression behavior of CFRP reinforced concrete filled steel tubes with spherical-cap gap[J].Journal of Building Structures, 2019, 40(S1): 220 – 225. [张昆昆, 廖飞宇, 黄志伟. CFRP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(S1):220–225.]

[17] Du Yansheng,Gao Dinghui,Chen Zhihua,et al.Experimental study on the flexural behavior of square high-strength concrete-filled steel tube beams with different CFRP wrapping schemes[J].Composite Structures,2023,304:116325.

[18] Wang Jingfeng, Xiao Qiang, Shen Qihan, et al. Analysis on the axial behavior of CFRP wrapped circular CFST stub columns with initial concrete imperfection[J]. Progress in Steel Building Structures,2021,23(6):44–53.[王静峰,肖强,沈奇罕,等.CFRP包裹带脱空缺陷钢管混凝土短柱的轴压性能分析[J]. 建筑钢结构进展,2021,23(6):44–53.]

[19] Tan Qiuhong, Chen Zongping, Jing Chenggui. Experimental investigation on mechanical performance and bearing capacity calculation of spiral stirrup-reinforced concrete-filled square steel tubular columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 102 – 109. [谭秋虹,陈宗平,经承贵. 方钢管螺旋筋复合约束混凝土柱偏压性能试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2020,41(4): 102–109.]

[20] Gao Pan,Zhou Xuhong,Liu Jiepeng,et al.Experimental assessment on the size effects of square concrete-filled steel tubular columns under axial compression[J].Engineering Structures,2023,281:115706.

[21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:国标准出版社,2021.

[22] 陶忠,于清. 新型组合结构柱・试验、理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006.

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 组合结构通用规范:GB 55004—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.

[24] AISC.Specification for structural steel buildings:ANSI/AISC360–22[S].Chicago:American Institute of Steel Construction,2022.

[25] Zhang Sumei,Guo Lanhui,Ye Zaili,et al.Behavior of steel tube and confined high strength concrete for concrete-filled RHS tubes[J].Advances in Structural Engineering, 2005,8(2):101–116.

[26] Sakino K, Nakahara H, Morino S, et al.Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering,2004,130(2):180–188.

[27] Liu Kai. Experimental study on performance of concrete filled square steel tubular short column with core defect[D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2014.[刘开. 核心砼带缺陷方钢管混凝土短柱受压性能试验研究[D]. 天津:河北工业大学,2014.]

[28] Zhao Xin,Liu Kai,Cui Wei,et al.Study on axial compressive capacity of short columns of concrete-filled square steel tube with defects[C]//Proceedings of the 13th National Academic Symposium on Modern Structural Engineering.Beijing:Industrial Construction Magazine Agency, 2013:1349–1352.[赵欣,刘开,崔炜,等. 带缺陷方钢管混凝土短柱轴压承载力研究[C]//第十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集.北京:工业建筑杂志社,2013:1349–1352.]

[29] Wang Hong. Analysis of bearing capacity of concrete filled steel tubular with defects based on orthogonal test design[J]. Construction Technology,2023,52(4):111–116.[王红. 基于正

交试验设计的带缺陷钢管混凝土轴压承载力分析[J].施工技术,2023,52(4):111–116.]
[30] Wang Ziyi,Zhong Yukai,Jiang Ke,et al.Post-fire behaviour and resistances of square recycled aggregate concrete-filled stainless steel tube stub columns[J].Thin-Walled Structures,2024,197:111564.

Axial Compression Performance of Concrete-filled Square Steel Tube Stub Columns Reinforced with CFRP

NIU Haicheng[1], *QIN Ziheng*[1], *LI Yuxuan*[1], *SHANG Tianyu*[2]

(1.School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2.China Construction City Development Corporation Limited, Beijing 100037, China)

Abstract:

Objective Internal defects in concrete-filled square steel tube (CFSST) columns reduce bearing capacity, ductility, and other properties. Therefore, it is important to address the adverse effects caused by defects in the core concrete. In this study, these effects are analyzed, carbon fiber cloth is used to strengthen defective CFSST columns, and a calculation formula for the axial compressive capacity of concrete-filled square short columns with concentrated holes is proposed.

Methods Twelve short CFSST columns with no defects, discrete defects, concentrated cavity defects, and single-layer CFRP-reinforced defects were designed, considering parameters such as concrete density loss rate, defect type, defect location, and CFRP reinforcement method. Axial compression tests were conducted on columns without defects and without reinforcement, and failure phenomena under different parameters were observed. The effects of these parameters on load–displacement curves, load–strain curves, and ductility were analyzed. Further axial compression tests were conducted on columns with near-wall and central concentrated cavity defects using full-wrap and half-wrap reinforcement methods. By introducing bearing capacity and ductility coefficients, the performance of reinforced specimens was analyzed and compared with unreinforced specimens. Based on Chinese national standards, a reduction coefficient was fitted using multiple linear regression with density loss rate, defect location, and thickness-to-width ratio as variables, and a reduction equation was established. The ultimate bearing capacity was calculated using this equation and compared with experimental values.

Results and Discussions Test results show that the coating on the steel pipe surface of non-defective specimens gradually folds and bulges when the load reaches 85% of the peak load. With increasing density loss rate, bulging in specimens with discrete defects occurs earlier. Failure in near-wall cavity specimens occurs at the defect location, while central cavity specimens fail near the column center. Reinforced specimens show delayed bulging compared to unreinforced specimens, with full-wrap reinforcement performing better than half-wrap reinforcement. When the density loss rate is less than 5%, discrete defects have little effect on compressive performance. As the density loss rate increases, compressive performance decreases significantly. The ultimate bearing capacity and ductility of CFST–5% and CFST–10% decrease by 7.0% and 16.0%, respectively, and ductility decreases by 10.3% and 22.3%, respectively. At a 15% loss rate, bearing capacity and ductility decrease by 26.9% and 26.3%, respectively. Under the same density loss rate, concentrated cavity defects have a greater adverse effect than discrete defects. The ultimate bearing capacity of specimens with central and near-wall cavity defects decreases by 19.1% and 29.8%, respectively, compared with specimens with a 10% discrete defect rate. Near-wall defects have a greater effect than central defects, reducing ultimate bearing capacity by 13.2% compared to central defects. After CFRP reinforcement, the ultimate bearing capacity and ductility of specimens with a 15% density loss rate increase by 9.1% and 14.7%, respectively. For central cavity defects, semi-wrap reinforcement increases bearing capacity and ductility coefficients by 11.8% and 19.5%, respectively, while full-wrap reinforcement increases them by 20.6% and 21.1%. For near-wall defects, semi-wrap reinforcement increases these coefficients by 11.9% and 22.1%, and full-wrap reinforcement increases them by 18.6% and 31.4%, respectively. This indicates that full-wrap reinforcement is more effective than semi-wrap reinforcement. A formula for calculating the bearing capacity of short concrete-filled square columns with concentrated cavity defects was developed using multiple linear regression. The average ratio N_u/N_t between calculated and experimental values is 0.968, indicating good agreement.

Conclusions The results show that defects in the core concrete of CFSST columns adversely affect bearing capacity and ductility, while CFRP reinforcement improves compressive performance. The proposed formula effectively predicts the bearing capacity of specimens with concentrated cavity defects and can serve as a reference for practical engineering evaluation.

Key words: concrete-filled square steel tubular column; defect; axial compression test; CFRP reinforcement; bearing capacity formula

（编辑　张　琼）

引用格式: Niu Haicheng,Qin Ziheng,Li Yuxuan,et al.Axial compression performance of concrete-filled square steel tube stub columns reinforced with CFRP[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):214–223.[牛海成,秦子恒,李雨萱,等.CFRP加固含缺陷方钢管混凝土短柱轴压性能[J].工程科学与技术,2026,58(3):214–223.]