

DOI:10.11918/202311039

双壁波纹钢管混凝土构件短柱轴压力学性能

路博^{1,2}, 崔燕³, 方勇^{1,2}, 王玉银^{1,2}, 李豪^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

摘要: 为改善空心钢筋混凝土柱(HRC)的使用与受力性能, 提出一种双壁波纹钢管混凝土(CFDCST)构件。本文共进行了4个大尺寸双壁波纹钢管混凝土短柱与2个空心钢筋混凝土短柱的轴压试验, 关键试验参数为试件类型与波纹钢管类型。分析构件的破坏模式, 对比不同参数下构件的承载力、峰值应变、延性系数等关键力学指标, 获得荷载-波纹钢管应变关系曲线以揭示试件的约束机理并验证外波纹钢管类型的影响。试验结果表明: 外波纹钢管可为夹层混凝土提供约束作用, 且螺旋角越小, 外波纹钢管的约束作用越强; 内波纹钢管则主要为夹层混凝土内壁提供有效支撑, 以保持截面的完整性。名义约束效应系数与空心率相近时, 由于咬口滑移影响, 大螺旋角双壁波纹钢管混凝土比小螺旋角双壁波纹钢管混凝土的峰值应力、峰值应变与延性系数分别降低15.5%、21.8%与16.7%。在总用钢量相近的情况下, 小螺旋角双壁波纹钢管混凝土柱的承载力、峰值应变与延性系数分别比空心钢筋混凝土柱提高10.6%、36.2%与50.0%。基于试验结果, 检验了3种典型承载力公式的适用性, 并提出了相应设计建议。

关键词: 组合结构; 空心钢筋混凝土; 波纹钢管; 双壁构件; 约束机理

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)01-0056-09

Axial behavior of concrete-filled double-skin corrugated steel tubular columns

LU Bo^{1,2}, CUI Yan³, FANG Yong^{1,2}, WANG Yuyin^{1,2}, LI Hao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 3. Shenzhen Municipal Design and Research Institute, Shenzhen 518029, Guangdong, China)

Abstract: To enhance the service and mechanical performance of hollow reinforced concrete (HRC), this study introduces a novel composite column, named concrete-filled double-skin corrugated steel tube (CFDCST). This paper conducted a total of 4 large-size CFDCST short columns and 2 HRC short columns, and the main parameters of the test were the type of specimen and the type of outer corrugated steel tube (CST). The failure modes were analyzed and the key mechanical indicators such as the load-bearing capacity, peak strain, and ductility coefficient of the specimens under different parameters were compared and analyzed. The load-CST strain curves were obtained to reveal the confinement mechanism and verify the influence of the outer CST types. The results show that the outer CST can provide confinement to the sandwiched concrete and the smaller the helical angle, the larger the confinement effect. The inner CST primarily offers effective support for unconfined inner concrete wall to preserve the integrity of the cross-section. When the nominal confinement factor and the hollow ratio were basically similar, due to the slippage of the lock-seam, the peak stress, peak strain, and ductility coefficient of CFDCST columns with large helical angle were 15.5%, 21.8% and 16.7% lower than those of CFDCST columns with small helical angle, respectively. When the total steel ratio was basically similar, the load-bearing capacity, peak strain, and ductility coefficient of the CFDCST columns with small helical angle were 10.6%, 36.2% and 50.0% higher than those of HRC columns. Finally, based on the test results, the applicability of 3 typical bearing-capacity formulas was assessed and the corresponding design recommendations were given subsequently.

Keywords: composite structure; hollow reinforced concrete; corrugated steel tube; double-skin column; confinement mechanism

收稿日期: 2023-11-15; 录用日期: 2023-12-17; 网络首发日期: 2024-03-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240305.2359.004>

基金项目: 深圳市市政设计研究院有限公司科技攻关项目(KT19001)

作者简介: 路博(1995—), 男, 博士研究生; 王玉银(1975—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 方勇, fangyong@hit.edu.cn; 王玉银, wangyuyin@hit.edu.cn

与实心钢筋混凝土相比,空心钢筋混凝土具有更大的强度/质量比与刚度/质量比,受弯与受扭承载效率更高。同时其内部空心能有效减小结构自重,从而明显降低地震作用与对下部基础的要求,目前已被广泛应用于桥梁工程^[1-3],中国 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》^[4]也给出了推荐的截面形式。然而内部空心也引入了以下问题:1)规范推荐的截面形式较为复杂,需要配置双排纵筋、大量箍筋和横向拉结筋以保证其受力性能,同时需要内部支模,导致施工较为繁琐^[5-6];2)空心率较大时,混凝土膨胀量较小,箍筋发挥的作用有限,在地震、风荷载等往复作用下,无约束的外保护层和无支撑的内壁容易成为破坏源头^[7-8];3)内、外表面混凝土均暴露在外,容易发生腐蚀,且内壁腐蚀损伤难以维护,对构件耐腐蚀性能带来严峻考验^[9]。

为针对性地改善空心钢筋混凝土构件的施工便捷性、抗震性能与耐腐蚀性能,作者于2015年提出了一种新型空心截面组合构件,命名为“双壁波纹管钢管混凝土”,并在文献[10]中介绍了初探性的试验结果,证明了该种构件的有效性。

为进一步揭示所提双壁构件的工作机理并探究波纹管类型对轴压力学性能的影响,本文对4个大尺寸双壁波纹管钢管混凝土短柱与2个空心钢筋混凝土短柱进行了轴压试验,关键试验参数为试件类型与外波纹管螺旋角(外波纹管类型)。试验中对波纹管的应变发展与破坏现象进行详细监测和分析。基于试验结果,验证了3种典型的轴压承载力计算公式对本文提出双壁构件的适用性,并给出了相应的设计建议。

1 双壁波纹管钢管混凝土

镀锌波纹管(galvanized corrugated steel tube,以下简称“波纹管”或“CST”)是由热轧平钢板经热浸镀锌、机械轧制、螺旋卷管、咬口接缝形成的金属管材,因镀层优良的附着性和防腐能力,其使用年限一般可达50~100 a^[11-12]。同时,经机械轧制的波纹褶皱有效提高了其抗侧刚度(是相同壁厚平钢管的10~50倍),使以薄壁为特征的波纹管亦具有优异的侧向刚度和局部稳定性^[13]。作者前期对实心波纹管混凝土力学性能的研究表明,将波纹管作为外围约束管材时,环向应力一般可达0.8~0.9倍名义屈服强度,可以为核心混凝土提供优秀的约束作用从而明显改善核心混凝土的强度与延性^[14]。

双壁波纹管钢管混凝土(concrete-filled double-skin corrugated steel tubular column,以下简称“CFDCST”)

是将镀锌波纹管放置于空心钢筋混凝土内、外表面形成的一种新型组合构件(见图1),可以实现波纹管与空心钢筋混凝土的优势互补。内、外波纹管作为永久性施工模板与夹层钢筋混凝土的防腐保护套管,可有效改善空心钢筋混凝土的施工性能与耐腐蚀性能。同时,外波纹管可为夹层混凝土提供侧向约束,使其处于三向受压状态,显著提升构件的受力性能并减少箍筋用量;内薄壁波纹管则主要发挥其抗侧刚度大的优势,为混凝土内壁提供有效支撑,使薄壁内管的使用成为可能,相比于内管采用平钢管可以提升材料的承载效率。得益于独特的波纹构造,波纹管具有更大的耗能能力与较强的钢-混凝土界面黏结性能^[15-16],在受到横向撞击作用时,波纹管的能量耗散作用可减轻内部夹层混凝土的损伤。此外,波纹管基本不传递纵向荷载,该种构件不仅现场浇筑方便,也非常适合于工厂预制化加工。

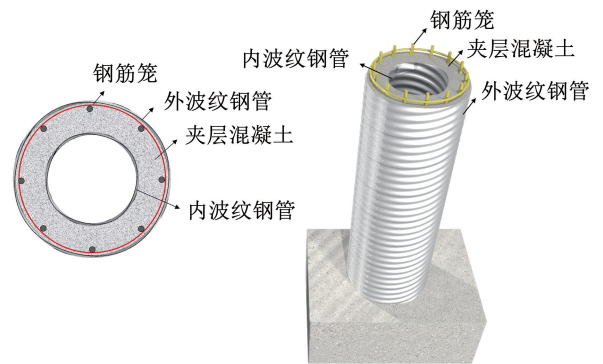


图1 CFDCST 截面形式

Fig. 1 Cross-section type of CFDCST

综上所述,双壁波纹管钢管混凝土能充分发挥各部件的优势,有效改善传统空心钢筋混凝土柱的使用性能与受力性能;施工方便,减小巧工用量,缩短施工周期,且可实现工厂预制化加工。在桥梁结构、海洋结构、风机塔架结构等领域中有着良好的应用前景。

2 试验概况

2.1 试件设计

本文共设计了2组共4个双壁波纹管钢管混凝土试件与1组共2个空心钢筋混凝土试件,设计长径比为3,试验的主要参数为试件类型(空心钢筋混凝土与双壁波纹管钢管混凝土)和波纹管类型(大、小螺旋角试件)。目前市面上波纹管产品常见的波形参数为波长×波高($h \times l$) = 38 mm × 6.5 mm、68 mm × 13 mm、75 mm × 25 mm、125 mm × 25 mm等规格,每种波形参数都对应确定的板带宽度 B_0 。

波纹钢管的螺旋角主要与其公称直径和板带宽度相关(见图 2),其计算方法为

$$\theta_h = \arcsin\left(\frac{B_0}{\pi D_0}\right) \quad (1)$$

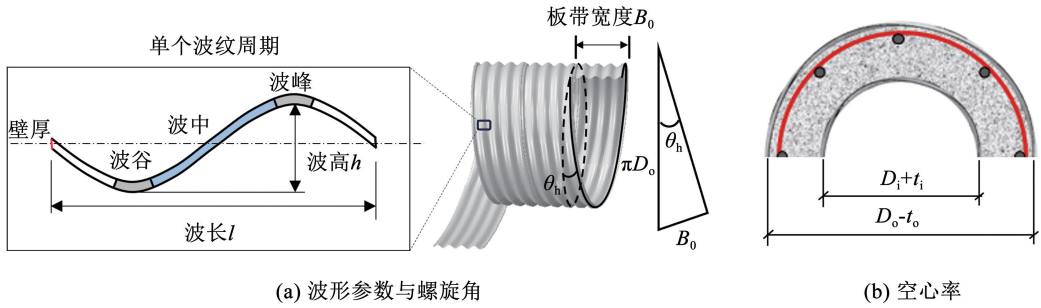


图 2 波纹钢管参数与空心率

Fig. 2 Corrugated steel tube parameters and hollow ratio

试验中大螺旋试件外管波形为 68 mm × 13 mm, 板带宽度为 612 mm, 实测螺旋角为 25°; 小螺旋角试件外管波形为 38 mm × 6.5 mm, 板带宽度为 152 mm, 实测螺旋角为 6°; 内管波形均为 38 mm × 6.5 mm。由于加工条件限制,二者实测外径存在差异(见表 1),但试验中基本保证其名义约束效应系数 ξ_n 与空心率 χ 相近(见图 2),名义约束效应系数和空心率分别用下式计算:

$$\xi_n = \alpha_n \frac{f_{yo}}{f_{co}} \quad (2)$$

$$\alpha_n = \frac{A_{so}}{A_{c,n}} \quad (3)$$

$$\chi = \frac{D_i + t_i}{D_o - t_o} \quad (4)$$

式中: D_i 和 t_i 分别为内波纹钢管的公称直径和壁厚; t_o 为外波纹钢管的壁厚; α_n 为外波纹钢管的名义含钢率; f_{yo} 为外波纹钢管名义屈服强度,按式(5)计

算; f_{co} 为混凝土的轴心抗压强度; A_{so} 为考虑波纹放大系数 η 的外波纹钢管截面面积, $A_{so} = \eta \pi D_o t_o$, 本文中的大、小螺旋角波纹钢管, η 分别取 1.03 和 1.04^[17]; $A_{c,n}$ 为夹层混凝土的名义截面面积, $A_{c,n} = \pi(D_o - t_o)^2/4$ 。

大螺旋角试件实测名义约束效应系数和实测空心率分别为 0.103 和 0.57,与小螺旋角试件实测名义约束效应系数 0.105 和实测空心率 0.59 基本相同。空心钢筋混凝土试件与小螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件具有相近的外径、空心率与总含钢率(小螺旋角双壁波纹钢管试件纵筋含钢率 1.77%, 箍筋含钢率 0.54%, 波纹钢总含钢率 3.43%, 总含钢率 5.74%; 空心钢筋混凝土试件纵筋含钢率 3.15%, 箍筋含钢率 2.69%, 总含钢率 5.84%),以验证双壁波纹钢管混凝土构件的有效性。试件参数与平均力学指标见表 1。

表 1 试件基本参数及试验结果

Tab. 1 Parameters and test results of specimens

试件编号	D_o/mm	t_o/mm	D_i/mm	t_i/mm	χ	f_{co}/MPa	f_{yo}/MPa	f_{yi}/MPa	ξ_n	N_u/kN	$\epsilon_u/10^{-6}$	D_d
CL-1.6-250-1.6-1	462.1	1.61	259.0	1.55	0.57	45.5	326.2	362.3	0.103	5 098	3 888	1.55
CL-1.6-250-1.6-2												
C-1.6-235-1.2-R-1	413.0	1.55	240.5	1.14	0.59	45.8	306.1	261.1	0.105	5 290	4 975	1.86
C-1.6-235-1.2-R-2												
H-235-16-1	413.5	—	245.1	—	0.59	45.8	—	—	—	4 783	3 653	1.24
H-235-16-2												

注:试件编号中 CL-1.6-250-1.6 代表大螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件;C-1.6-235-1.2-R 代表小螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件;H-235-16 代表空心钢筋混凝土对比件;编号最后一位数字代表该组中的试件编号; f_{co} 代表试验当天测得混凝土轴心抗压强度; f_{yo} 与 f_{yi} 分别代表外、内波纹钢管名义屈服强度,用式(5)计算; ϵ_u 代表峰值应变,即承载力时对应的轴向应变; D_d 代表延性系数,用式(6)计算。

2.2 试件加工

为保证构件具有足够的加工精度,所有试件都

按以下步骤加工:

1) 用线切割切平波纹钢管的两端,保证其平整

度与垂直度;

2) 在内波纹管外表面积贴应变片, 将导线延长并在外围贴胶水防止受潮或损坏(见图 3(a));

3) 将波纹管分别与上托板、下端板焊接(见图 3(b));

4) 绑扎钢筋骨架, 放置外管并用定位环严格定

位以保证内外钢管与钢筋骨架同心放置(见图 3(c)), 随后将外管与下端板进行焊接;

5) 浇筑混凝土, 养护完成后将顶面磨平, 并用高强石膏找平;

6) 将上端板与外管、内托板焊接, 完成试件加工(见图 3(d))。

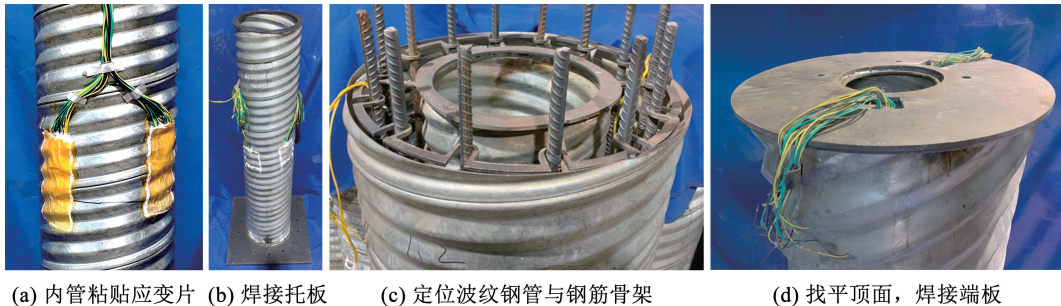


图 3 试件加工过程

Fig. 3 Specimen fabrication process

2.3 材料性能

2.3.1 混凝土

考虑到夹层厚度较小, 所有试件都采用商用细石混凝土, 在浇筑混凝土过程中预留 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块(测试立方体抗压强度)与 150 mm × 150 mm × 300 mm 的棱柱体试块(测试弹性模量与棱柱体抗压强度), 并与试件在相同条件下养护。根据规范 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[18], 在试验当天测得的强度见表 1, 测得的弹性模量和泊松比分别为 30.6 GPa 和 0.2。

2.3.2 钢筋与波纹管

由于波纹管在波峰、波中与波谷处冷弯程度不同, 导致其材性存在明显差异^[10]。因此试验中对波纹管各部位分别取样(见图 4); 根据文献^[14]的验证结果, 采用式(5)按照各部位比重计算平均强度作为波纹管强度特征值。

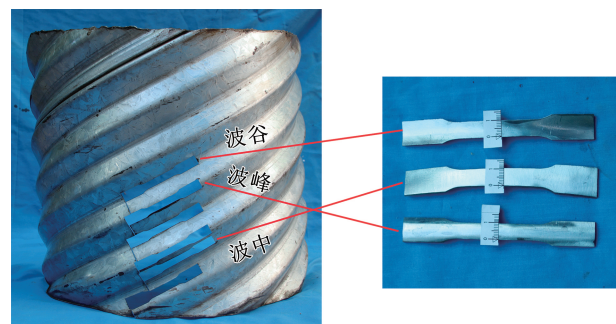


图 4 波纹管材性件

Fig. 4 CST tensile coupons

$$\begin{cases} f_y = \lambda_c f_{yc} + \lambda_m f_{ym} + \lambda_t f_{yt} \\ f_u = \lambda_c f_{uc} + \lambda_m f_{um} + \lambda_t f_{ut} \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_y 为名义屈服强度; f_u 为名义极限强度; λ_c 、 λ_m 和 λ_t 分别是波峰、波中与波谷的权重系数, 按照文献^[17]取值; f_{yc} 、 f_{ym} 和 f_{yt} 分别是波峰、波中与波谷的屈服强度; f_{uc} 、 f_{um} 和 f_{ut} 分别是波峰、波中与波谷的极限强度。

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》^[19], 最终测得波纹管平均屈服强度见表 1, 弹性模量为 185 GPa。测得小螺旋角双壁波纹管混凝土试件纵筋的屈服强度为 455.8 MPa, 箍筋的屈服强度为 381.9 MPa, 弹性模量为 205 GPa。空心钢筋混凝土试件纵筋的屈服强度为 433.7 MPa, 箍筋的屈服强度为 303.7 MPa, 弹性模量为 205 GPa。

2.4 加载及监测装置

试验在哈尔滨工业大学结构与抗震实验中心 1 000 t 电液伺服压力机上完成, 加载速度为 1.0 mm/min。在正式加载前, 所有试件都预加载至预估承载力的 10% 以消除虚位移, 并且确保所有仪器都可正常工作。为了避免试件端部局压破坏, 所有试件都进行了端部加强(见图 5)。

在试件周围均匀布置 4 个位移传感器(LVDT)以测量轴向位移, 在内、外波纹管的中截面处沿环向均匀布置 4 个应变测点, 每个测点都分别测量波峰、波中与波谷的环向与纵向应变(见图 5)。同时, 在中截面咬口处粘贴了刻度贴纸, 以精确测量波纹管在咬口区域的滑移量。此外, 为了测量内管的屈曲情况, 在试件内部放置了高清录像机, 在试验中全程记录了内管的试验现象(见图 6)。

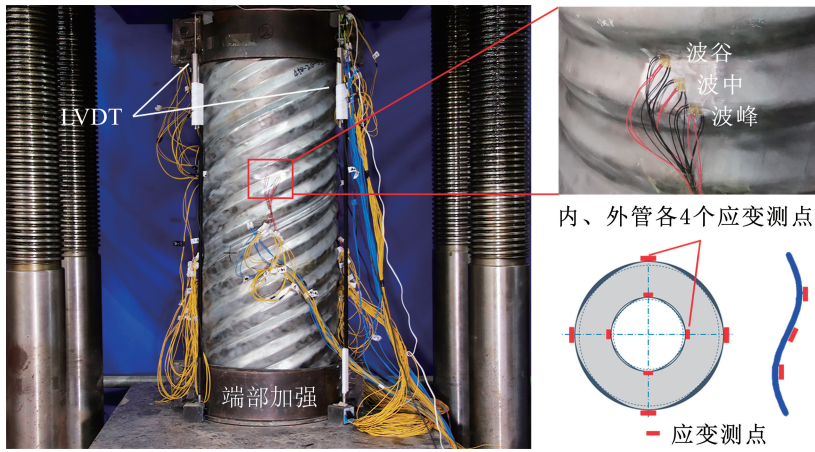


图 5 加载与监测装置

Fig. 5 Test instrumentation and monitoring scheme

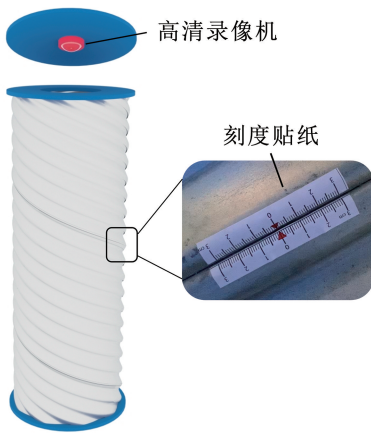


图 6 录像机和刻度贴纸布置

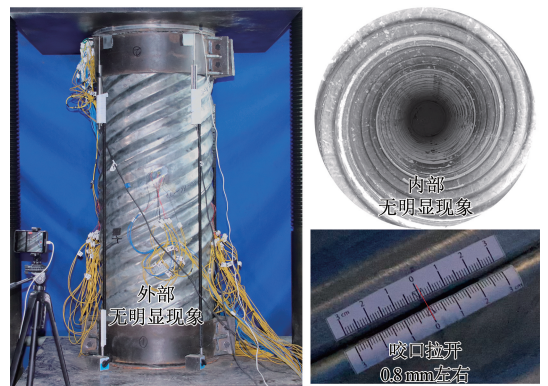
Fig. 6 The arrangement of the video recorder and the graduated sticker

3 试验结果分析

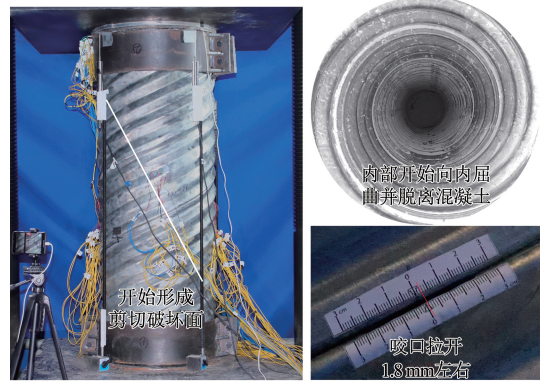
3.1 破坏现象分析

双壁波纹钢管混凝土试件具有相似破坏现象,其中小螺旋角试件的破坏模式与作者前期进行的初探性试验一致^[10];大螺旋角试件的典型破坏现象见图 7。

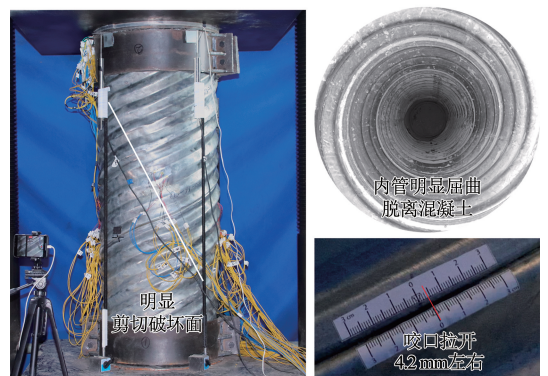
在达到峰值荷载时,小螺旋角试件没有明显试验现象,而大螺旋角试件外波纹钢管咬口处可观察到轻微错动,错动位移为 0.8 mm。随着位移继续增大,荷载下降到承载力的 85% 时,由于名义约束效应系数(ξ_n)仅为 0.1 左右,大、小螺旋角试件外部均可以观察到轻微的剪切破坏面。内波纹钢管可以观察到在剪切破坏起始位置发生了轻微屈曲,并有脱离混凝土的趋势。剪切破坏导致试件承载力发生劣化,尤其是大螺旋试件,其性能劣化表现得更加严重。此时大螺旋角试件的咬口已发生了明显错动,错动位移约为 1.8 mm。直到加载结束,所有试件都发生了明显的剪切破坏,大螺旋角试件咬口错动 4.2 mm,而小螺旋角的试件在试验过程中未观察到咬口发生错动(见图 8)。



(a) 达到承载力时的试验现象



(b) 下降到承载力85%时的试验现象



(c) 试验结束时的破坏现象

图 7 大螺旋角试件的破坏现象

Fig. 7 Failure phenomena of CFDCST specimens with large helical angle

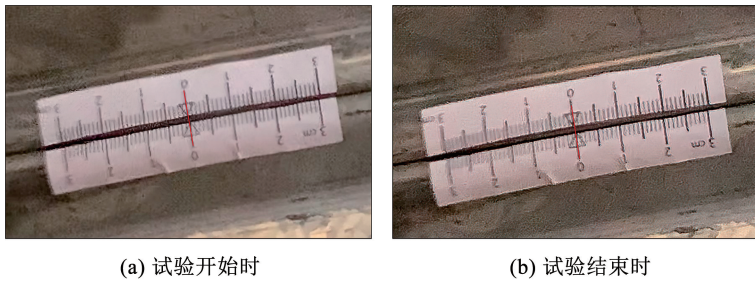


图 8 小螺旋角试件咬口试验现象

Fig. 8 The lock-seam phenomenon of CFDCST specimens with small helical angle

空心钢筋混凝土试件都发生了脆性破坏, 导致其力学性能较差(见图 9)。在达到承载力后, 空心钢筋混凝土内、外壁的混凝土保护层逐渐脱落, 试件发生压溃破坏。随着轴向位移增大, 其纵筋与箍筋逐渐裸露并发生了严重的屈曲。但由于钢筋骨架较强, 柱子仍然保持了一定的承载能力。



图 9 空心钢筋混凝土试件破坏现象

Fig. 9 Failure phenomenon of HRC specimens

3.2 荷载-轴向应变曲线

所有试件的荷载-轴向应变曲线见图 10(a), 轴

向应变由轴向位移除以试件高度得到。由于外管直径存在差异, 为了直观地对比构件的力学性能, 将荷载-轴向应变曲线进行归一化处理, 见图 10(b)。需要说明的是, 尽管双壁构件在实际工程中一般主要承受弯矩作用, 但是其在轴向荷载作用下下降段的劣化程度仍可作为衡量波纹管对核心混凝土约束效应的关键指标, 本文用延性系数 D_d 评估构件的延性(见表 1), 延性系数计算公式为^[20]

$$D_d = \frac{\varepsilon_{85}}{\varepsilon_y} \tag{6}$$

式中: ε_{85} 为荷载下降到承载力 85% 时对应的轴向应变; ε_y 为试件的屈服应变, 参考文献[20]计算。

由图 10 与表 1 可知, 尽管具有相近的总含钢率, 小螺旋角双壁波纹管钢管混凝土试件的承载力、峰值应变与延性系数分别比空心钢筋混凝土提高 10.6%、36.2% 与 50.0%。这是因为虽然空心钢筋混凝土的配箍率较高, 但由于空心截面构件混凝土向外膨胀量小且内壁无支撑, 箍筋不能充分发挥约束作用。然而双壁波纹管钢管混凝土构件的外与内波纹管可为核心混凝土提供有效的约束与支撑, 明显改善构件的力学性能。

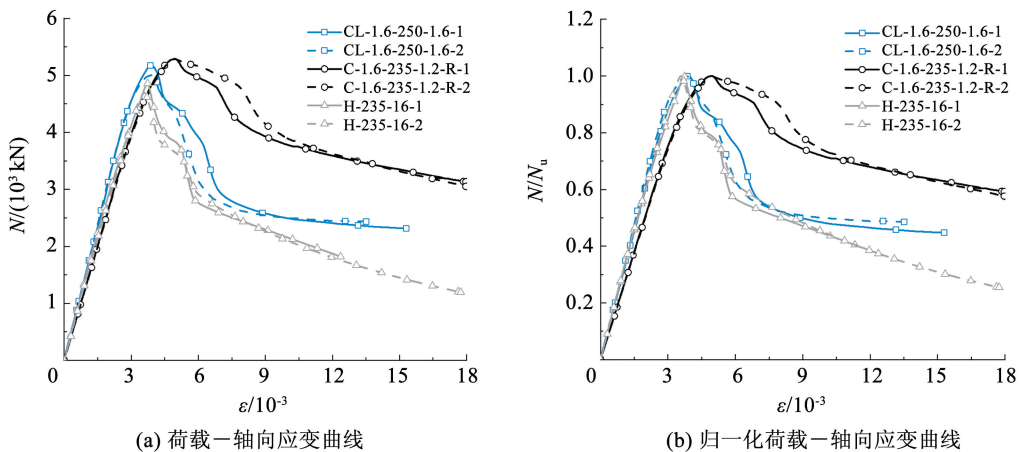


图 10 荷载-轴向应变曲线

Fig. 10 Load-longitudinal strain curves

在小、大螺旋角双壁波纹管混凝土试件的承载力中直接扣除纵筋与波纹管承担的纵向荷载,然后除以夹层混凝土的公称面积(以 $D_o - t_o$ 为外直径,以 $D_i + t_i$ 为内直径计算得到的环形面积)可得到夹层混凝土的峰值应力,小螺旋角试件与大螺旋角试件分别为 52.4 MPa 与 44.3 MPa,大螺旋角试件低 15.5%。此外,大螺旋角试件的峰值应变与延性系数分别比小螺旋角试件低 21.8% 与 16.7%。这说明当螺旋角较大时,在受力过程中波纹钢管的咬口会发生滑移,导致了波纹管发生了一定程度

的应力释放,此时外波纹钢管的约束效应不能充分发挥^[21]。而螺旋角较小时,咬口局部无滑移现象,外波纹管可以达到较高的应力水平,可为夹层混凝土提供充分的约束作用。

3.3 应变分析

根据试验中在外波纹管波峰、波中与波谷粘贴的应变片所测得的应变数据,可以绘制归一化荷载-CST 环向应变关系曲线与归一化荷载-CST 纵向应变关系曲线见图 11。

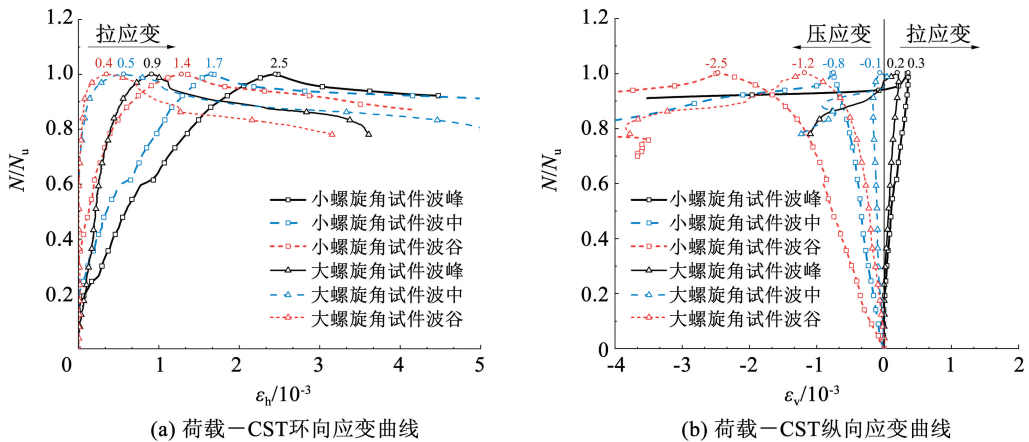


图 11 荷载-CST 应变曲线

Fig. 11 Load-CST strain curves

从图 11 可以看出,外波纹钢管应变分布存在严重的非均匀性。波峰、波中与波谷的环向应变均表现为拉应变,且从波峰、波中到波谷依次减小。这与实心波纹管混凝土构件的应变分布规律是一致的^[14],说明外波纹钢管主要为核心混凝土提供侧向约束作用。纵向应变从波峰、波中到波谷由拉应变转变为压应变,表明波纹钢管在轴压荷载作用下存在显著的“局部弯折效应”^[14]。

同时可明显观察到大螺旋角试件的应变分布规律虽然与小螺旋角试件相同,但无论是环向还是纵向应变的发展都相对不充分,其幅值均明显小于小螺旋角试件。说明在工程中应用该种构件时应考虑大螺旋角对构件力学性能的不利影响,尽量选择螺旋角较小的波纹钢管作为外约束管材,根据作者前期相关研究,建议外波纹钢管的螺旋角不宜超过 15° ^[21]。

4 承载力公式讨论

为了验证现有的可能适用于本文提出双壁波纹管混凝土试件的承载力计算公式的适用性,选取 3 个典型公式进行了对比验证。

4.1 GB 50010《混凝土结构设计规范》推荐的公式

该规范^[22]采用简单叠加的方式,不考虑钢管和混凝土的组合作用,计算公式为

$$N_u = A_c f_{co} + A_s f_s \quad (7)$$

式中: A_c 为混凝土截面面积,本文中取公称面积; A_s 为钢筋面积; f_s 为钢筋屈服强度。

计算得到:大螺旋角试件承载力 5 151 kN,误差为 1.0%;小螺旋角试件承载力 4 622 kN,误差为 -12.6%。可见该公式可用于预测大螺旋角双壁波纹管混凝土试件的轴压承载力,但会明显低估小螺旋角试件的轴压承载力。

4.2 T/CCES 7《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》推荐的公式

该规范将外管与混凝土视为整体,采用统一理论计算二者承载力后与内管承载力叠加,计算公式为

$$N_u = N_{osc,u} + N_{i,u} \quad (8)$$

式中: $N_{osc,u}$ 为外钢管和夹层混凝土截面抗压承载力,本文用混凝土公称截面面积计算; $N_{i,u}$ 为内钢管截面的抗压承载力。具体计算公式参考文献^[23]。

计算得到:大螺旋角试件承载力 7 073 kN,误差为 38.7%;小螺旋角试件承载力 5 989 kN,误差为

13.2%。可见该公式会高估大、小螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件的轴压承载力。

4.3 课题组前期针对实心构件提出的公式

课题组前期提出的公式^[14]适用于实心波纹钢管混凝土,计算公式为

$$N_u = f_{cc} A_{ce} + f_s A_s \quad (9)$$

式中: A_{ce} 为按照波纹钢管内径计算的混凝土截面面积,本文中取外管内径与内管外径之间的夹层混凝土面积; f_{cc} 为核心混凝土的峰值压应力,参考文献[14]计算。

计算得到:大螺旋角试件承载力5 760 kN,误差为13.0%;小螺旋角试件承载力5 194 kN,误差为-1.8%。可见该公式会高估大螺旋角试件的承载力,但是对小螺旋角试件的承载力预测较为准确。

综上所述以上3种典型轴压承载力计算公式对新型双壁波纹钢管混凝土构件承载力的预测均不够精确,应提出一个可以适配大、小螺旋角双壁波纹钢管混凝土短柱轴压承载力的统一形式计算公式。

5 结论与展望

本文通过对4个双壁波纹钢管混凝土试件与2个空心钢筋混凝土对比件短柱轴压试验的研究与分析,得到以下结论:

1)在总含钢率相近时,小螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件的承载力、峰值应变与延性系数比空心钢筋混凝土试件分别提升了10.6%、36.2%与50.0%,同时将脆性压溃破坏模式转变为加载后期发生的剪切破坏。内、外两层波纹钢管用于改善空心钢筋混凝土的受力性能是有效的。

2)大螺旋角双壁波纹钢管混凝土试件在加载过程中咬口发生了明显的滑移,应变发展不充分,只能为夹层混凝土提供有限的侧向约束作用。相比于小螺旋角试件,其混凝土峰值应力、峰值应变与延性系数分别降低了15.5%、21.8%与16.7%。

3)课题组前期针对实心波纹钢管混凝土构件提出的轴压承载力计算公式对小螺旋角试件预测最准确,而《混凝土结构设计规范》与《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》分别低估了12.6%与高估了13.2%。由于咬口滑移导致的性能劣化,所有考虑组合作用的公式均高估大螺旋角试件的轴压承载力,仅《混凝土结构设计规范》预测较为准确。工程中建议外管采用小螺旋角波纹钢管以保证构件的受力性能。

展望:相比于空心钢筋混凝土柱,本文提出的双壁波纹钢管混凝土柱具有优异的使用性能和力学性

能。后续可进一步针对螺旋角、空心率、波纹钢管壁厚、混凝土强度等参数进行系统的研究与分析,并提出考虑咬口滑移不利影响的承载力预测公式与约束混凝土本构模型。

参考文献

- [1] ALAJARMEH O S, MANALO A C, BENMOKRANE B, et al. Hollow concrete columns: Review of structural behavior and new designs using GFRP reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 1. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109829
- [2] 申彦利, 赵志宏, 魏博. 钢筋混凝土空心桥墩的振动台试验研究[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(1): 93
SHEN Yanli, ZHAO Zhihong, WEI Bo. Experimental evaluation of reinforced concrete hollow piers based on shaking table test [J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(1): 93
- [3] 吴会阁, 付章建, 侯永康, 等. 不同加载路径下钢筋混凝土矩形空心桥墩抗震性能比较[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(2): 96
WU Huike, FU Zhangjian, HOU Yongkang, et al. Comparison of seismic performance of reinforced concrete hollow rectangular bridge pier under different loading paths [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(2): 96. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.02.96.wuhg.010
- [4] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020
Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020[S]. Beijing: China Communication Press, 2020
- [5] 韩强, 杜修力, 赵彦, 等. 双向压弯状态下矩形空心桥墩循环试验[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(1): 58
HAN Qiang, DU Xiuli, ZHAO Yan, et al. Cyclic testing on rectangular hollow bridge piers under axial load and biaxial bending [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(1): 58. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.01.009
- [6] 韩强, 周雨龙, 杜修力. 钢筋混凝土矩形空心桥墩抗震性能[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 28
HAN Qiang, ZHOU Yulong, DU Xiuli. Seismic performance of reinforced concrete rectangular hollow bridge columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 28
- [7] LEE J H, CHOI J H, HWANG D K, et al. Seismic performance of circular hollow RC bridge columns [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(5): 1456. DOI: 10.1007/s12205-014-1173-z
- [8] ZAHN F A, PARK R, PRIESTLEY M J N. Flexural strength and ductility of circular hollow reinforced concrete columns without confinement on inside face [J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(2): 156. DOI: 10.14359/9295
- [9] HOSHIKUMA J, PRIESTLEY M J N. Flexural behavior of circular hollow columns with a single layer of reinforcement under seismic loading [R]. San Diego: Department of Structural Engineering University of California, 2000
- [10] FANG Yong, WANG Yuyin, HOU Chao, et al. CFDST stub columns with galvanized corrugated steel tubes: Concept and axial behaviour [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107116. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107116

- [11] MARDER A R. The metallurgy of zinc-coated steel[J]. *Progress in Materials Science*, 2000, 45(3): 191. DOI: 10.1016/S0079-6425(98)00006-1
- [12] AULT J P, ELZLY P E. Durability of aluminized type 2 coated corrugated steel pipe exposed throughout the United States[R]. Washington, D. C.: National Corrugated Steel Pipe Association, 2014
- [13] SMITH C D. Longitudinal bending strength of corrugated steel pipe[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1980, 7(3): 547. DOI: 10.1139/l80-062
- [14] WANG Yuyin, YANG Ligui, YANG Hua, et al. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 475. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.093
- [15] YANG Ligui, WANG Yuyin, ELCHALAKANI M, et al. Experimental behavior of concrete-filled corrugated steel tubular short columns under eccentric compression and non-uniform confinement[J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 106064. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111009
- [16] SU Rong, LI Xian, ZHONG Tao, et al. Axial behavior of novel CFST columns with outer welded corrugated steel tubes[J]. *Structures*, 2021, 34: 2708. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.039
- [17] FANG Yong, WANG Yuyin, YANG Ligui, et al. Uniaxial monotonic and cyclic compressive stress-strain model for concrete-filled thin-walled helical corrugated steel tubes[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2023, 149(6): 04023052. DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-11719
- [18] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019
- [19] 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: 中国标准出版社, 2021
- Metallic materials—tensile testing—Part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021
- [20] 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, 2007: 5
- HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures—theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 5
- [21] FANG Yong, WANG Yuyin, YANG Hua, et al. Experimental behavior of concrete-filled thin-walled corrugated steel tubes with large helical angles under monotonic and cyclic axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 173: 109043. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109043
- [22] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [23] 中空夹层钢管混凝土结构技术规程: T/CCES 7—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020
- Technical specification for concrete-filled double skin steel tubular structures: T/CCES 7—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020

(编辑 赵丽莹)