

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.109



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



CFRP 约束圆中空夹层钢管混凝土短柱 轴心受压性能试验研究

廖静, 唐红元, 岳兆阳, 曾跃佳, 周孝军
(西华大学结构工程研究所, 成都 610039)

摘要:对圆中空夹层钢管混凝土(CFDST)短柱和 CFRP 约束 CFDST(CFRP-CFDST)短柱进行了轴压试验,研究混凝土强度和 CFRP 粘贴层数对 CFRP 约束 CFDST 短柱轴压性能的影响,得到了 CFDST 短柱和 CFRP 约束 CFDST 短柱的典型破坏模式、荷载-位移曲线及荷载-应变曲线。试验结果表明:与 CFDST 试件相比,CFRP 约束 CFDST 试件的极限承载能力显著提高,且贴布层数越多,钢管混凝土短柱的极限承载力越高。给出了避免内钢管先于外钢管屈曲破坏的内钢管最小壁厚计算式,并提出了 CFRP 约束 CFDST 短柱的轴压极限承载力计算式,该计算式计算结果与试验结果吻合较好。

关键词:钢管混凝土;短柱;碳纤维增强聚合物(CFRP);极限承载力

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)04-0124-09

Experimental research on axial compression performance of CFRP-confined concrete-filled double skin steel tube stub columns

LIAO Jing, TANG Hongyuan, YUE Zhaoyang, ZENG Yuejia, ZHOU Xiaojun
(Institute of Structural Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China)

Abstract: In this work, the axial compression tests of circular concrete-filled double skin steel tube (CFDST) stub columns and CFRP-confined CFDST (CFRP-CFDST) stub columns were carried out. The influences of concrete strength, the number of CFRP layers on the axial compression performance of CFRP-confined CFDST stub columns were investigated. The typical failure modes, the load-displacement curves and load-strain curves of CFDST stub columns and CFRP-confined CFDST stub columns were obtained. The test results show that the ultimate bearing capacity of CFRP-confined CFDST specimens is significantly improved compared with that of CFDST specimens. And the more layers of CFRP, the higher the ultimate bearing capacity of CFST stub columns. Finally, the calculation formula of the minimum wall thickness of the inner steel tube to avoid the buckling failure of the inner steel tube prior to that of the outer steel tube is given. And a

收稿日期:2021-03-10

基金项目:教育部春晖计划合作项目(Z2016156)

作者简介:廖静(1996-),女,主要从事结构工程研究,E-mail:1145671173@qq.com。

唐红元(通信作者),博士,教授,E-mail:tanghyseu@163.com。

Received: 2021-03-10

Foundation items: Chunhui Project of Ministry of Education (No. Z2016156)

Author brief: LIAO Jing (1996-), main research interest: structural engineering, E-mail: 1145671173@qq.com.

TANG Hongyuan (corresponding author), PhD, professor, E-mail: tanghyseu@163.com.

calculation formula of the ultimate bearing capacity of CFRP-confined CFDST stub columns under axial compression is proposed. The prediction results of the presented calculation method agree well with the experimental results.

Keywords: concrete-filled steel tube; stub columns; carbon fiber reinforced polymer(CFRP); ultimate bearing capacity

钢管混凝土结构越来越广泛地应用于各种类型的工程结构中,如高层建筑和大跨度桥梁^[1-2]。钢管混凝土柱是一种高强度、高刚度的组合构件,当构件受压时,外部钢管对内部混凝土起到约束作用,延缓混凝土受压开裂,由于内部混凝土的填充,外部钢管截面刚度提高^[3]。中空夹层钢管混凝土柱采用内空心钢管,不仅显著减轻了结构重量,而且大大提高了钢管混凝土的弯曲刚度、延性和抗震性能^[4]。目前,对圆中空夹层钢管混凝土(CFDST)短柱轴压性能的研究已经取得了很多成果。其中,对CFDST短柱轴心受压性能的数值模拟研究^[5-6],提出了许多具有参考价值的极限强度计算公式。在关于CFDST短柱的轴压试验中,构件的内外钢管形状可分为外方内圆、外圆内方、内外同心圆、内外椭圆和内外矩形等^[7-8],由于圆形空心截面比方形空心截面更难发生局部屈曲,因此,在CFDST中使用圆管作为内外管较好^[9-11]。也有学者将夹层混凝土更换为高强混凝土^[4,12-13],以提高CFDST短柱的强度。

外贴CFRP材料加固法具有优异的物理和力学性能,如强度和刚度高、抗疲劳和耐腐蚀性能好、现场可操作性强、施工周期短和不损伤原结构等^[14]。王庆利等^[15-16]对CFRP-钢管混凝土的轴压构件力学性能、压弯构件的滞回性能和方截面碳纤维增强聚

合物-钢管混凝土的扭转性能等进行了试验研究和理论分析。唐红元等^[17-19]对CFRP-不锈钢界面的粘结性能、CFRP约束不锈钢管混凝土短柱的轴压性能进行了深入研究。但关于外贴CFRP布加固CFDST短柱的研究甚少,目前,只有Wang等^[20]做了关于FRP-CFDST试件的轴压性能试验,讨论了空心截面比、玻璃钢壁厚和纤维纵周比对环形截面短柱荷载-应变曲线和混凝土应力-应变曲线的影响。

对于CFRP-CFDST短柱的轴压研究目前还未见报道。笔者拟通过对CFRP-CFDST短柱进行轴压试验,研究CFRP层数和混凝土强度对CFRP-CFDST短柱极限承载力的影响,提出CFRP-CFDST短柱的轴压极限承载力计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

对2根CFDST试件和4根CFRP-CFDST试件进行轴压试验,研究的参数包括混凝土强度等级(C40、C60)和CFRP层数(2、4)。为了保证试件符合短柱的定义,并避免试件出现整体屈曲^[3],试件的长度设置为直径的3倍。内外钢管均采用强度等级为Q345的圆无缝钢管,试件的具体测量数据见表1。

表1 试件测量数据

Table 1 The measured data of specimens

试件编号	CFRP层数	$D_o \times t_o$	$D_i \times t_i$	L/mm	f_{cu}/MPa
C120×40-0	0	121.33 mm×4.43 mm	57.87 mm×4.03 mm	360	50.2
C120×40-2	2	121.27 mm×4.33 mm	57.96 mm×3.98 mm	360	50.2
C120×40-4	4	121.42 mm×4.36 mm	57.56 mm×4.00 mm	360	50.2
C120×60-0	0	121.25 mm×4.37 mm	57.71 mm×4.03 mm	360	66.5
C120×60-2	2	121.30 mm×4.25 mm	57.77 mm×3.93 mm	360	66.5
C120×60-4	4	121.47 mm×4.23 mm	57.71 mm×3.91 mm	360	66.5

注: D_o 为外钢管直径; t_o 为外钢管厚度; D_i 为内钢管直径; t_i 为内钢管厚度; L 为试件高度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度。试件编号由3部分组成,分别表示外钢管的公称直径、混凝土强度等级和CFRP层数。

在试件制作之前用砂纸打磨掉钢管上的锈迹,然后在内外钢管靠近端部处分别焊接4个钢条来连接内外钢管。为了确保试件上下两端部水平,对试件两端进行线切割。浇筑混凝土时,在混凝土振动

台上对混凝土进行振捣密实,同时对不同强度等级的混凝土分别制作3个标准立方体试块。对于CFRP-CFDST试件,在混凝土浇筑14 d后,用酒精、砂纸对外钢管表面再次进行清理。然后将碳纤

维浸渍胶按比例混合,充分涂抹在CFRP上,并沿着外钢管环向粘贴CFRP。待CFRP与胶层完全固化后,在CFRP表面相应位置粘贴应变片。试件制作过程如图1所示。

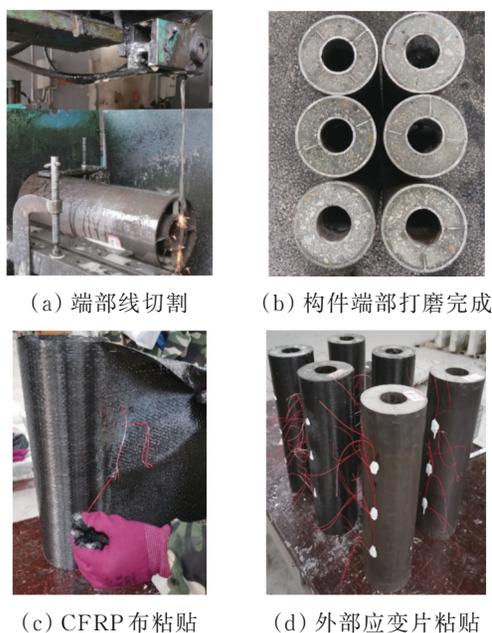


图1 试件制作过程

Fig. 1 Making process of specimen

1.2 材料性能

按照《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[21]的要求对钢材的拉伸试样进行拉伸试验,得到外钢管的屈服强度 f_{yo} 为486.0 MPa,抗拉强度 f_{uo} 为629.8 MPa,弹性模量 E_o 为 2.08×10^5 MPa;内钢管的屈服强度 f_{yi} 为430.0 MPa,抗拉强度 f_{ui} 为570.0 MPa,弹性模量 E_i 为 2.20×10^5 MPa。

CFRP材料由上海妙翰建筑科技有限公司生产,型号为CFS-I-300,理论厚度 t_{cf} 为0.167 mm,抗拉强度 f_{cf} 为3 483 MPa,弹性模量 E_{cf} 为231 GPa,伸长率 ϵ_{cf} 为1.69%。碳纤维浸渍胶也由上海妙翰建筑科技有限公司提供,其中胶水和固化剂的配合比为2:1,其抗拉强度为50.1 MPa,弹性模量为3.03 GPa。

混凝土立方体试块与试件在相同条件下养护成型,试验时C40、C60混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 分别为50.2、66.5 MPa。

1.3 试验加载方案及测点布置

轴压试验在5 000 kN电液伺服万能试验机上进行,试验荷载和应变等数据通过数据采集系统自动采集。采用位移控制加载,以0.4 mm/min的恒

定速率进行,当加载至轴向位移量达到构件高度的10%时停止试验。对于CFDST试件,在外钢管长度方向1/4、1/2和3/4处分别粘贴一横一纵2个应变片,用于测量试件的环向和纵向应变,并在间隔90°的位置再以相同方式布置6个应变片。对于CFRP-CFDST试件,不仅在上述位置粘贴应变片,还在CFRP对应位置再粘贴6个环向应变片用于测量CFRP布的环向应变。同时,在试件两对侧布置2个位移计,用于监测试件的轴向变形,应变片、位移计和压力传感器数据均通过DM-YB1860动静态测试分析系统自动采集,应变片具体布置情况及试验装置见图2。

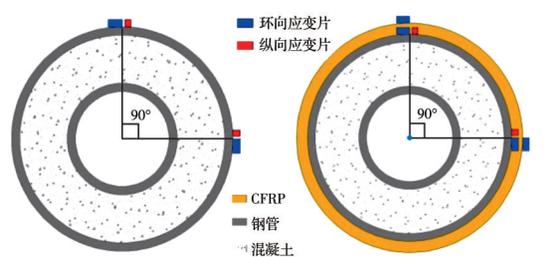


图2 应变片布置及试验装置

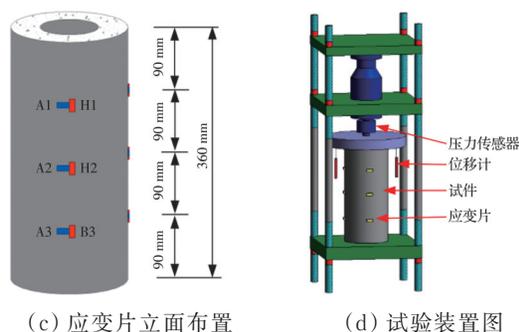


图2 应变片布置及试验装置

Fig. 2 Strain gauge arrangement and experimental device

2 试验结果及分析

2.1 试验观察结果

2.1.1 CFDST试件的破坏模式 在加载初期,试件无明显变形,当加载至极限荷载 N_{uc} (表1)的70%~80%时,外钢管管壁出现斜向45°的吕德尔斯

滑移线,如图3(a)所示,意味着钢管已屈服;随着荷载的继续增加,由于端部效应的影响,在试件上下两端处出现了明显的局部屈曲,但发展较慢。随后,在试件中部高度处也开始出现向外的局部屈曲,其发展速度明显快于端部。当轴向位移量达到构件高度的10%时,停止试验。CFDST试件的典型失效模式如图3(b)、(c)所示,其中,在试件中部高度和距离上下两端各35 mm处,外钢管发生向外的局部屈曲;在试样的中间高度处,内钢管向内局部屈曲。试验所观察到的破坏模式与文献[22-23]结果类似。

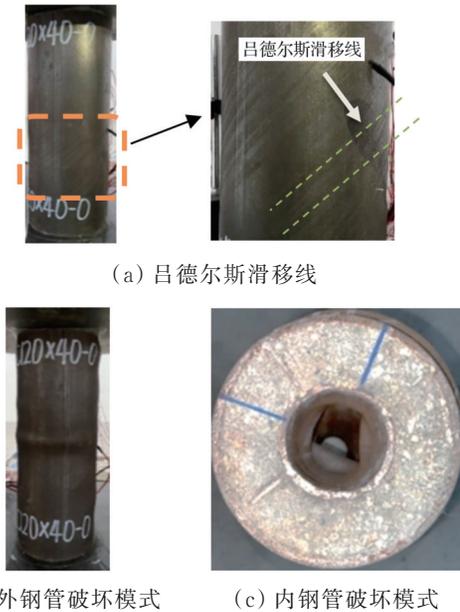


图3 CFDST试件破坏模式

Fig. 3 Failure modes of CFDST specimens

2.1.2 试件CFRP-CFDST的破坏模式 CFRP-CFDST试件的破坏模式如图4所示。在加载初期,试件均未产生明显变形。当试件达到极限承载力时,CFRP在试件中部高度处突然断裂,导致试件的承载力急剧下降,CFRP-CFDST试件因此失效。CFRP-CFDST的典型破坏模式如图4所示。CFRP-CFDST试件的破坏模式为CFRP在试件中部高度处突然断裂,试验结束后发现内钢管发生向内的局部屈曲,这些现象均与Wang等^[20]的试验结果相似。此外,Hu等^[24]关于FRP约束CFST的轴压试验中FRP破坏位置也与此相似。

2.2 轴向荷载-位移曲线

所有试件的轴向荷载-位移曲线如图5所示,图中位移采用2个位移计的平均值。对于CFDST试件,当达到极限荷载后,曲线出现短暂的下降段后承载力又随着轴向位移的增加而增大。当轴向位

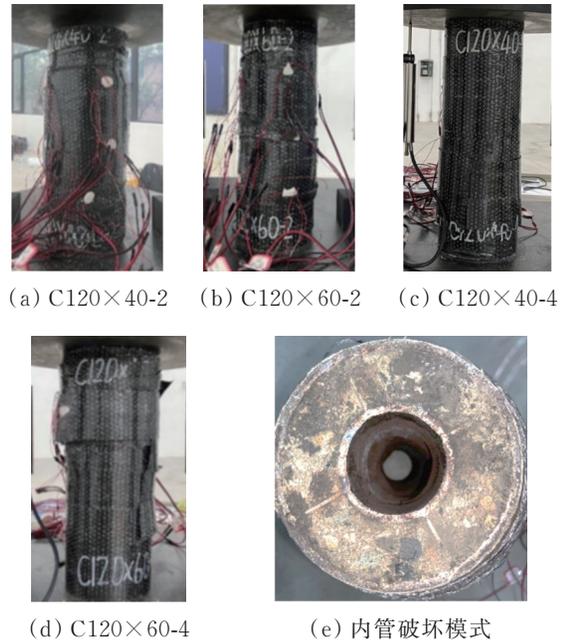
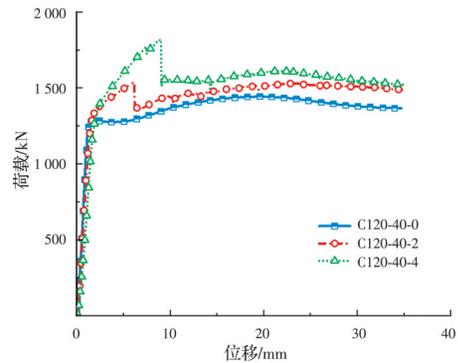


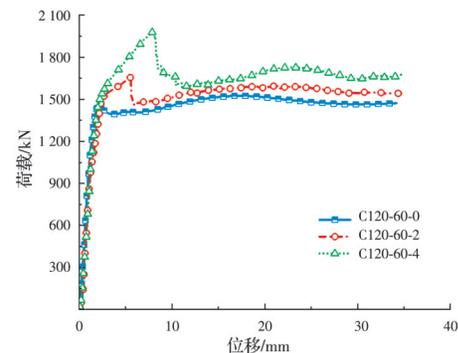
图4 CFRP-CFDST试件破坏模式

Fig. 4 Failure modes of CFRP-CFDST specimens

移达到20 mm后曲线开始出现下降趋势,但此时试件仍然具有较高的承载能力。曲线趋势与文献[22, 25-26]结果一致。



(a) C40构件荷载-位移曲线



(b) C60构件荷载-位移曲线

图5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

CFRP-CFDST 试件在加载初期曲线和 CFDST 试件几乎重合。当 CFDST 试件的曲线达到第 1 峰值点开始出现下降时,CFRP-CFDST 试件则因为 CFRP 的约束,其曲线进入了一个斜率不同于初始阶段的硬化阶段,且 CFRP 层数越多,试件的承载力增长越多。当 CFRP 发生断裂时,CFRP-CFDST 试件的承载能力突然下降,荷载-位移曲线出现陡降,经过短暂的波动后,曲线的发展趋势与 CFDST 试件大致相同。试件即使发生了较大的塑性变形,承载力并未出现急剧下降的趋势,而是进入了一个长延性阶段,因此,试件具有良好的延性。此外,CFRP 层数越多,试件的极限承载力和对应的轴向位移越大,表明 CFRP 在提高试件承载力的同时也提高了试件的变形能力。

对于 CFDST 试件其极限承载力 N_{uc} 定义为试件轴向荷载达到第 1 峰值点时的荷载。对于 CFRP-CFDST 试件,其极限承载力定义为 CFRP 发生断裂时的荷载。所有试件的极限承载力试验结果列于表 2, N_{uc} 为预测极限承载力, N_{ue} 表示极限承载力试验测量值。

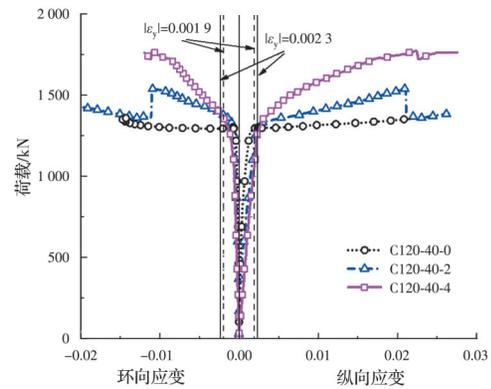
表 2 试件试验结果

Table 2 Experimental results of specimens

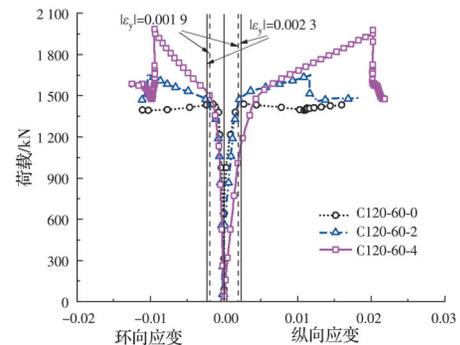
试件编号	N_{uc}/kN	N_{ue}/kN	$\frac{N_{uc}}{N_{ue}}$
C120×40-0	1 285.25	1 283.70	1.00
C120×40-2	1 539.44	1 625.87	1.06
C120×40-4	1 819.89	1 987.18	1.09
C120×60-0	1 439.42	1 377.24	0.96
C120×60-2	1 657.00	1 698.70	1.03
C120×60-4	1 986.21	2 033.23	1.02

2.3 轴向荷载-应变曲线

因试验同种类型应变片测得的数据变化趋势基本一致,为便于比较,轴向荷载-应变曲线中的应变数据取自纵向应变片 A1 和环向应变片 H1,如图 6 所示。在初始阶段曲线都表现出线弹性,直到应力水平近似等于或略低于钢管的屈服应力为止。随着应变的增加,CFRP-CFDST 试件与 CFDST 试件的曲线出现明显差异,CFDST 试件随着应变的增加的承载力,基本维持不变,而 CFRP-CFDST 试件的荷载随着应变的增加而增加。在相同应变水平下,CFRP-CFDST 试件的承载能力明显大于 CFDST 试件,表明 CFRP 能够有效提升试件的轴压性能。



(a) C40 构件轴向荷载-应变曲线



(b) C60 构件轴向荷载-应变曲线

图 6 轴向荷载-应变曲线

Fig. 6 Axial load-strain curves

2.4 试验结果分析

2.4.1 CFRP 与钢管的协同工作 图 7 比较了同一位置处 CFRP 和外钢管的轴向荷载-环向应变曲线。从图 7 可以看出,碳纤维布与外钢管在同一位置处的环向应变基本一致,表明碳纤维布与外钢管的协同状态良好。因此,在轴压作用下,钢管与外层 CFRP 处于应变协调状态。

2.4.2 CFRP-CFDST 试件的极限承载力提升能力 试件的极限承载力提升率 η 可由式(1)定义。

$$\eta = \frac{N_u - N_{u,0}}{N_{u,0}} \quad (1)$$

式中: N_u 为 CFRP 约束试件的极限承载能力; $N_{u,0}$ 为对应未粘贴 CFRP 的 CFDST 试件的极限承载能力。

图 8 比较了承载力提升率与 CFRP 层数的关系。相比于试件 C120-40-0,试件 C120-40-2 和 C120-40-4 的极限承载力分别提高了 19.76% 和 41.60%。相比试件 C120-60-0,试件 C120-60-2 和 C120-60-4 的极限承载力分别提高了 15.12% 和 37.99%。对比两组数据可以看出,CFRP 能有效提升试件的极限承载能力,且提升规律与贴布层数近

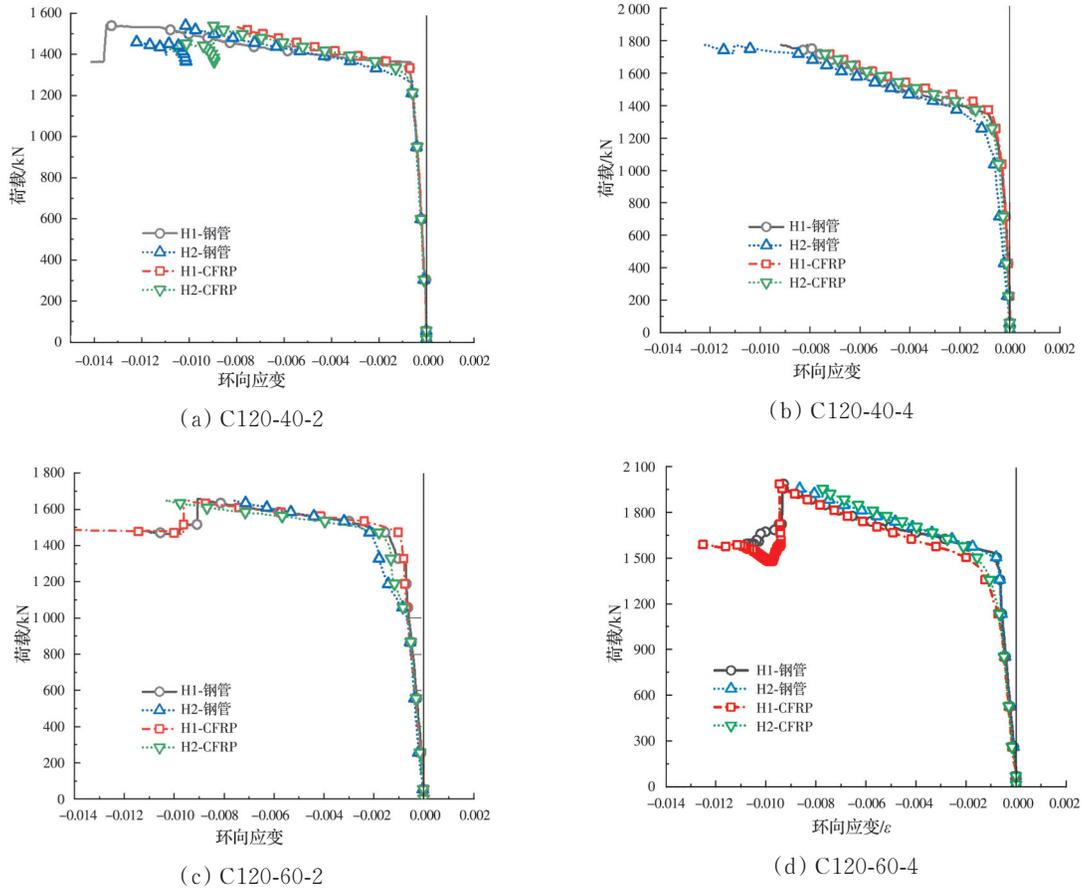


图 7 CFRP 与外钢管的变形协调

Fig. 7 Deformation coordination between CFRP and outer steel tube

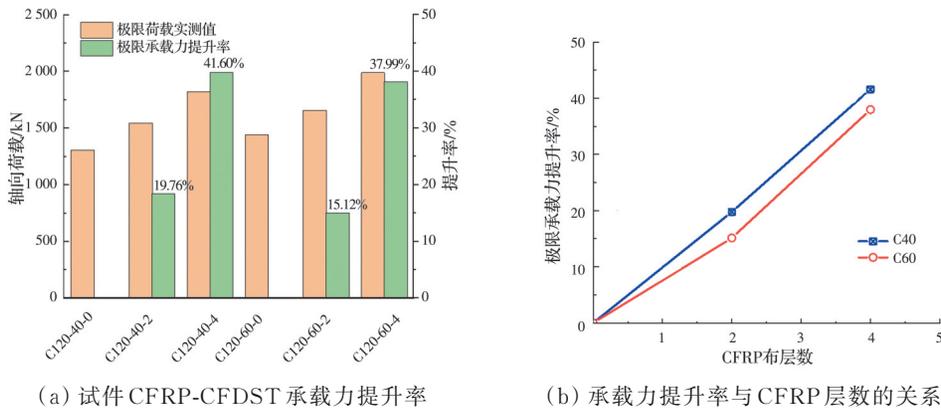


图 8 试件承载力分析

Fig. 8 Analysis of bearing capacity of specimen

似呈线性相关。从图 8(b)可以看出,混凝土强度等级较低的试件极限承载力提升率高于混凝土强度等级较高的试件。因此,对于约束系数小的 CFDST 试件,CFRP 能提供更好的约束效果。

2.4.3 内钢管屈服破坏 由于在试验过程中难以观测内钢管破坏过程,并且如果内钢管屈曲破坏先

于外钢管,CFDST 短柱的轴压承载能力损失高达 65%^[27]。为防止在外钢管屈曲之前内钢管发生局部屈曲,造成强度损失,设计时要保证内管有足够厚度。CFRP-CFDST 构件的应力平衡关系如图 9 所示,根据应力平衡, $\sigma_{\theta,o}$ 、 $\sigma_{\theta,i}$ 和 σ_r 的关系如式(2)、式(3)所示。

$$2\sigma_{\theta,i}t_i = \sigma_r D_i \quad (2)$$

$$2f_{cf}t_i + 2\sigma_{\theta,o}t_o = \sigma_r (D_o - 2t_o) \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\theta,o}$ 为外钢管环向应力; $\sigma_{\theta,i}$ 为内钢管环向应力; σ_r 为总围压应力。

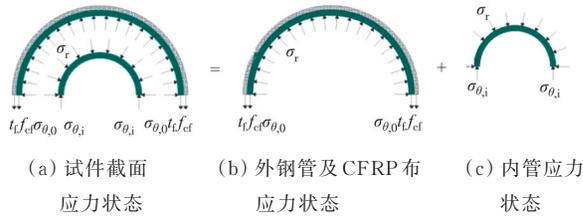


图9 试件各部分的应力状态

Fig. 9 Stress state of each part of the specimen

文献[24]给出了基于Kerr等^[28]和Sun等^[29]提出的钢管临界屈曲强度计算公式,见式(4)。

$$\sigma_{bk} = 2.27 \frac{4E_0 I}{D_i^2 t_i} \quad (4)$$

式中: E_0 为内钢管弹性模量; I 为内钢管截面惯性矩。为防止内钢管先发生局部屈曲,混凝土部分的围压应力 σ_r 要小于内钢管的临界屈曲强度 σ_{bk} ,联立式(3)、式(4)得出内管厚度应满足式(5)。

$$t_i \leq \sqrt{1.53 \frac{D_i^2}{(D_o - 2t_o) E_0} (f_{cf} t_i + f_o t_o)} \quad (5)$$

试件 C120×40-4 和 C120×60-4 所需 $t_{i,min} = 0.86$ mm,所以内管厚度取 4 mm 足以防止内管在外管之前发生局部屈曲。

3 CFRP-CFDST 试件极限承载力预测

文献[20]的CFRP约束系数如式(6)所示。

$$\xi_{CFRP, Wang} = \frac{A_{cf} f_{cf}}{A_c f_{ck}} \quad (6)$$

式中: A_{cf} 为CFRP的横截面积; f_{cf} 为CFRP抗拉强度; A_c 为混凝土横截面积; f_{ck} 为混凝土抗压强度, $f_{ck} = 0.67f_{cu}$ 。

图10所示为本文和参考文献试件 $\xi_{CFRP, Wang}$ 与极限承载力提升率 η 的关系。从图10可以看出, $\xi_{CFRP, Wang}$ 与极限承载力提升率 η 之间的关系较为离散,不能较好地反映CFRP约束与承载力提升的关系。这是由于 $\xi_{CFRP, Wang}$ 仅仅考虑了CFRP与混凝土之间的影响,而CFRP-CFDST试件由CFRP、内外钢管、混凝土组成。已有文献^[19]表明,外钢管的厚度对极限承载力提升率 η 有较大影响,因此,需要提出一个新的约束系数来反应CFRP约束CFDST短柱中CFRP与试件极限承载力提升率的关系。

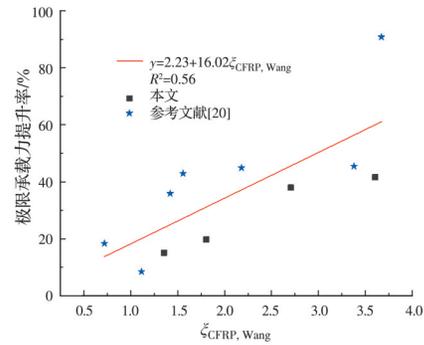


图10 极限承载力提升率与 $\xi_{CFRP, Wang}$ 的关系

Fig. 10 Relationship between ultimate bearing capacity improvement rate and $\xi_{CFRP, Wang}$

提出CFRP约束系数 ξ_{CFRP} ,如式(7)所示。

$$\xi_{CFRP} = \frac{A_{cf} f_{cf}}{A_c f_{ck} + A_o f_{yo} + A_i f_{yi}} \quad (7)$$

式中: A_{cf} 为CFRP的横截面积; f_{cf} 为CFRP抗拉强度; A_c 为混凝土横截面积; f_{ck} 为混凝土抗压强度, $f_{ck} = 0.67f_{cu}$; A_o 为外钢管横截面积; f_{yo} 为外钢管屈服强度; A_i 为内钢管横截面积; f_{yi} 为内钢管屈服强度。

相比Wang等^[30]提出的约束系数 $\xi_{CFRP, Wang}$,笔者提出的CFRP约束系数 ξ_{CFRP} 还考虑了CFDST短柱内外钢管的影响。图11显示了本文和文献[20]中CFRP约束系数与极限承载力增长率的关系。比较图10和图11,图10中的数据点较为离散,相关性系数仅为0.56,本文所提出的约束系数 ξ_{CFRP} 能较好地反映CFRP与试件极限承载能力之间的关系, ξ_{CFRP} 与极限承载力提升率近似呈线性关系,经过线性拟合的图形如图11所示,其中相关性系数为0.94。因此,基于线性回归,CFRP约束CFDST短柱的轴压极限承载力可由式(8)计算得到。

$$N_u = (1 + 0.33\xi_{CFRP}) N_0 \quad (8)$$

$$N_0 = (1.212 + B\theta + C\theta^2) A_{sc} f_{ck} + A_{si} f_{yi} \quad (9)$$

式中: N_0 为轴心受压强度承载力设计值; A_{sc} 为外钢管与混凝土的横截面积之和; f_{ck} 为混凝土的抗压强度设计值; B 和 C 为截面形状对套箍效应的影响系数; θ 为套箍系数, $\theta = \alpha_{sc} f_{yo} / f_{ck}$,其中 α_{sc} 为含钢率, $\alpha_{sc} = A_{so} / A_c$; f_{yo} 为外钢管屈服强度; A_{so} 为外钢管横截面积; A_c 为混凝土横截面积。

按照GB 50936^[22]计算CFDST短柱的轴压承载力 N_0 ,见式(9),防止内钢管在外钢管之前发生局部屈曲的最小厚度 $t_{i,min} = 0.86$ mm,远小于采用的钢管厚度4 mm,为了使公式预测结果偏于安全,式(9)中的 $A_{si} f_{yi}$ 以折减系数0.85,得到式(10)。

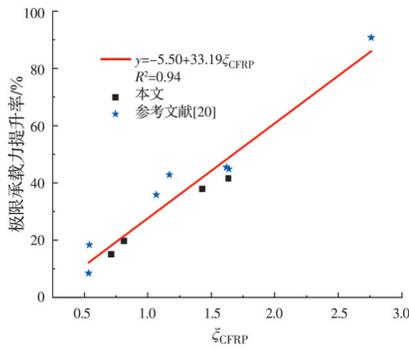


图11 极限承载力提升率与 ξ_{CFRP} 的关系

Fig. 11 Relationship between ultimate bearing capacity improvement rate and ξ_{CFRP}

$$N_{CFDST} = (1.212 + B\theta + C\theta^2) A_{sc} f_{ck} + 0.85A_{si} f_{yi} \quad (10)$$

CFRP约束CFDST短柱的轴压极限承载力可由式(11)计算得到。

$$N_u = (1 + 0.33\xi_{CFRP}) N_{CFDST} \quad (11)$$

由式(11)计算的预测承载力 N_{uc} 与试验测量值 N_{uc} 的比值见表1。 N_{uc}/N_{uc} 的均值为1.02,标准差为0.042,表明式(11)能够准确地预测CFRP约束CFDST短柱的极限承载能力。

4 结论

对CFDST短柱和CFRP约束CFDST短柱的轴压性能进行试验研究,给出了CFRP-CFDST试件的典型破坏模式、荷载-位移曲线和荷载-应变曲线,研究了混凝土强度等级、CFRP层数等参数对试件轴压性能的影响,并提出CFRP约束CFDST短柱轴压承载力预测公式。得到以下结论:

1) CFDST试件的破坏模式是外钢管在中部高度和端部向外产生局部屈曲,内钢管在中部高度向内部产生局部屈曲。CFDST试件的荷载超过极限荷载后,试件的承载力在短暂下降后开始缓慢上升,最后趋于平缓。

2) 因为CFRP在中部高度处突然断裂,导致CFRP-CFDST试件承载力骤降而宣告失效;当CFRP完全断裂后,CFRP-CFDST试件的承载力再次缓慢地提升;且CFRP层数越多的试件,其极限承载力和对应的轴向位移越大,表明CFRP在提高试件承载力的同时也提高了试件的变形能力。

3) 由于CFRP的约束作用,相比于CFDST试件,CFRP-CFDST试件的承载力有显著提高。且相较于混凝土等级较高的试件,混凝土强度等级低的试件CFRP约束效果更好,承载力提升更多。

4) 通过分析试件的应力状态,得到了防止内钢

管先于外钢管屈曲破坏的最小钢管壁厚,可为CFRP约束CFDST短柱的设计提供参考。结合CFDST与CFRP-CFDST试件的承载力预测公式,运用叠加法得到CFDST和CFRP-CFDST试件的承载力预测通用公式。利用该公式算得本次试验中CFDST和CFRP-CFDST试件的极限承载力与实测值吻合较好。

参考文献

- [1] 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.
- [2] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228.
- [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.
HAN L H. Concrete filled steel tubular structures: Theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [4] LIANG Q Q. Nonlinear analysis of circular double-skin concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. Engineering Structures, 2017, 131: 639-650.
- [5] ZHANG Y R, WEI Y, ZHAO K, et al. Analytical model of concrete-filled FRP-steel composite tube columns under cyclic axial compression [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 139: 106414.
- [6] ZHANG Y B, HAN L H, LI W. Analytical behaviour of tapered CFDST stub columns under axially partial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 139: 302-314.
- [7] ELCHALAKANI M, ZHAO X L, GRZEBIETA R. Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2002, 40(5): 415-441.
- [8] UENAKA K. CFDST stub columns having outer circular and inner square sections under compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 1-7.
- [9] ESSOPJEE Y, DUNDU M. Performance of concrete-filled double-skin circular tubes in compression [J]. Composite Structures, 2015, 133: 1276-1283.

- [10] TAO Z, HAN L H. Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(7): 631-646.
- [11] WANG F C, HAN L H, LI W. Analytical behavior of CFDST stub columns with external stainless steel tubes under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 127: 756-768.
- [12] HSIAO P C, KAZUHIRO HAYASHI K, NISHI R, et al. Investigation of concrete-filled double-skin steel tubular columns with ultrahigh-strength steel [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(7): 04014166.
- [13] LI W, CAI Y X. Performance of CFDST stub columns using high-strength steel subjected to axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 141: 411-422.
- [14] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展 [J]. *工业建筑*, 2005, 35(8): 20-25, 34.
ZHENG Y, YE L P, YUE Q R. Progress in research on steel structures strengthened with FRP [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(8): 20-25, 34. (in Chinese)
- [15] 王庆利, 王金鱼, 张永丹. CFRP-钢管砼轴压短柱受力性能分析 [J]. *工程力学*, 2006, 23(8): 102-105, 149.
WANG Q L, WANG J Y, ZHANG Y D. Mechanical property analysis on axially compressed concrete filled circular cfrp-steel tube stub columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(8): 102-105, 149. (in Chinese)
- [16] 王庆利. CFRP-钢管混凝土 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
WANG Q L. Concrete filled circular CFRP-steel tube [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [17] 唐红元, 周祥, 黄靖翔, 等. CFRP 与不锈钢界面黏结性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(12): 185-193.
TANG H Y, ZHOU X, HUANG J X, et al. Experimental study on bond behavior of CFRP-to-stainless steel interface [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(12): 185-193. (in Chinese)
- [18] 唐红元, 许龙, 马梦淋, 等. 外贴碳纤维复材加固不锈钢方管短柱轴心受压试验研究 [J]. *工业建筑*, 2018, 48(7): 180-187.
TANG H Y, XU L, MA M L, et al. Experimental study on short stainless steel square tube strengthened with CFRP sheets under axial compression [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(7): 180-187. (in Chinese)
- [19] TANG H Y, CHEN J L, FAN L Y, et al. Experimental investigation of FRP-confined concrete-filled stainless steel tube stub columns under axial compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 146: 106483.
- [20] WANG J, LIU W Q, ZHOU D, et al. Mechanical behaviour of concrete filled double skin steel tubular stub columns confined by FRP under axial compression [J]. *Steel and Composite Structures*, 2014, 17(4): 431-452.
- [21] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [22] TAO Z, HAN L H, ZHAO X L. Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(8): 1129-1158.
- [23] LI W, REN Q X, HAN L H, et al. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 57: 37-48.
- [24] HU Y M, YU T, TENG J G. FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(5): 850-860.
- [25] YAN X F, ZHAO Y G. Compressive strength of axially loaded circular concrete-filled double-skin steel tubular short columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 170: 106114.
- [26] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [27] EKMEKYAPAR T, GHANIM HASAN H. The influence of the inner steel tube on the compression behaviour of the concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns [J]. *Marine Structures*, 2019, 66: 197-212.
- [28] KERR A D, SOIFER M T. The linearization of the prebuckling state and its effect on the determined instability loads [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1969, 36(4): 775-83.
- [29] SUN S M, NATORI M C. Numerical solution of large deformation problems involving stability and unilateral constraints [J]. *Computers & Structures*, 1996, 58(6): 1245-1260.