

双不锈钢管约束海水海砂混凝土柱 轴压试验及承载力计算模型

郑开启^{1,2,3}, 周思源¹, 魏洋^{1,2}, 白学洋¹, 王天杰¹

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏省公路智能检测与低碳养护工程研究中心, 江苏 南京 210037; 3. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 目的 研究双不锈钢管约束海水海砂混凝土柱(DSTSCC)试件的轴压性能、破坏形态和轴压承载力计算模型, 为该类构件的轴压承载力计算提供试验和理论研究参考。方法 对24个DSTSCC试件进行轴压试验, 分析外管壁厚、芯管壁厚和芯管直径等参数对其破坏形态、应力-应变曲线和承载力的影响规律。结果 双不锈钢管约束试件的破坏形态以腰鼓型破坏为主; 由于不锈钢受拉本构无明显的屈服台阶, 可以持续地约束核心混凝土, 试件应力-应变曲线无明显的下降段, 表现出较好的延性特征; 随外管壁厚增大, 轴压承载力可提高6%~25%; 随芯管壁厚增大, 轴压承载力可提高3%~20%; 随芯管直径增大, 轴压承载力呈现为先提高后降低的趋势。结论 基于试验破坏机理分析和理论分析, 所建立DSTSCC试件的轴压承载力计算模型相较于既有承载力计算模型, 具有更好的适用性。

关键词 不锈钢管; 约束混凝土柱; 轴压性能; 轴压承载力

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

引用格式: 郑开启, 周思源, 魏洋, 等. 双不锈钢管约束海水海砂混凝土柱轴压试验及承载力计算模型[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 450-460. (ZHENG Kaiqi, ZHOU Siyuan, WEI Yang, et al. Axial compressive test and capacity model of seawater and sea-sand concrete columns confined by double-layered stainless steel tube[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(3): 450-460.)

Axial Compressive Test and Capacity Model of Seawater and Sea-sand Concrete Columns Confined by Double-Layered Stainless Steel Tube

ZHENG Kaiqi^{1,2,3}, ZHOU Siyuan¹, WEI Yang^{1,2}, BAI Xueyang¹, WANG Tianjie¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, 210037; 2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Highway Intelligent Detection and Low-carbon Maintenance, Nanjing Forestry

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108150); 江苏省重点研发计划项目(BE2020703); 中国博士后科学基金项目(2021M691606)

作者简介: 郑开启(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事组合结构方面研究。

University, Nanjing, China, 210037; 3. Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, 210096)

Abstract: The axial compression behavior, failure mode, and axial compression capacity model of seawater and sea-sand concrete columns confined by double-layered stainless steel tube (DSTSCC) are studied to provide experimental and theoretical basis for evaluating the axial compression behavior of such components. 24 DSTSCC specimens were subjected to axial compression tests, considering the influence of parameters such as outer tube thickness, core tube thickness, and core tube diameter on their failure mode, stress-strain curve and axial compression capacity. The test results indicate that: The main failure mode of the DSTSCC specimen is waist drum-shaped failure; As there is no obvious yield terrace in the tensile constitutive model of stainless steel, it can continuously restrain the core concrete, and the stress-strain curve of the specimen has no obvious descending part, showing good ductility characteristics; As the thickness of the outer tube increases, the axial compression capacity can be increased by 6% to 25%, and as the thickness of the core tube increases, the axial compression capacity can be increased by 3% to 20%; As the diameter of the core tube increases, the axial compression capacity shows a trend of first increasing and then decreasing; Based on the analysis of experimental failure mechanism and theoretical analysis, a formula for calculating the axial compression capacity of DSTSCC specimens was established. The validation results of experimental data show that the proposed formula has better applicability compared to other calculation models.

Key words: stainless steel tube; confined concrete column; axial compression behavior; axial compression capacity

海水海砂混凝土是近年来学者们基于海水、海砂的资源化利用理念提出的一种新型混凝土材料,在沿海和远洋岛礁建设中,可望替代河砂、淡水资源,具有广阔的发展前景^[1-2]。但是海水海砂中富含大量氯离子等腐蚀性元素,常规钢筋、钢管无法直接与之配合使用,限制了其应用范围^[3]。为此,学者们从研发钢筋阻锈剂^[4]、截面尺寸^[5]与结构组合形式^[6-7]等多方面开展了研究。考虑不锈钢表面钝化膜能较好地阻隔氯离子的侵蚀作用,不锈钢管可以作为一种可选的海水海砂混凝土柱约束增强材料。相对于普通素碳素钢^[8-9],在强度、延性等性能方面具有更优异的表现;相对于纯 FRP 约束混凝土柱,可以克服因 FRP 突然断裂而发生的脆性破坏^[10-13],进一步开展相关的试验和理论研究非常必要。

针对钢管约束混凝土柱轴压性能,研究发现钢管混凝土具有承载力高,塑性以及韧性好的特点^[14];基于极限平衡理论,研究者

发展了复合钢管混凝土柱的承载力计算模型^[15-18];已有研究表明^[19-20],相较于普通钢管,不锈钢管约束混凝土柱具有更好的承载能力及延性;不锈钢管对海水海砂混凝土柱和普通混凝土柱的约束效果同样可靠,没有显著差异^[21-23]。

为进一步研究不锈钢管约束下海水海砂混凝土柱的轴压性能和承载机理,笔者开展了 24 个双不锈钢管约束海水海砂混凝土 (DSTSCC) 柱试件的轴压性能试验,研究不锈钢管壁厚、管径等关键参数对试件破坏形态、应力-应变关系曲线以及轴压承载力的影响规律,并建立其轴压承载力模型,为 DSTSCC 柱的设计应用提供试验和理论参考依据。

1 试验

1.1 试件设计

DSTSCC 试件共由四层结构组成,由外到内分别是不锈钢外管、夹层海水海砂混凝土、不锈钢芯管及核心海水海砂混凝土(见

图1)。试件的不锈钢外管直径、高度和高径比分别为159 mm、477 mm和3。主要参数包括不锈钢外管厚度(4.5 mm和6.0 mm)、不锈钢芯管厚度(3.0 mm和5.0 mm)和不锈钢芯管直径(76 mm、89 mm和108 mm)等。根据外管壁厚分为S45和S60两组,每种参数组合制作2个重复试件,详细设计参数见表1。

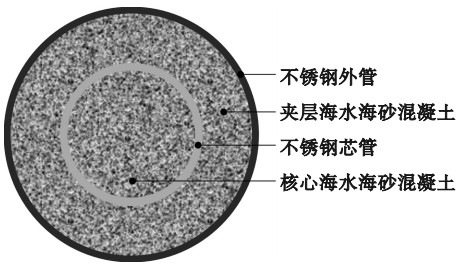


图1 DSTSCC 结构组成

Fig. 1 The structural composition of DSTSCC

表1 试件设计参数

Table 1 The design parameters of specimens

试件分组	试件编号	外管壁厚/	芯管直径/	芯管壁厚/	外管强度/	芯管强度/	混凝土强度/	轴压承载
		mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa	力/kN
S45	S45C30D76-1	4.5	76	3.0	305.2	257.2	34.9	1 708.57
	S45C30D76-2	4.5	76	3.0	305.2	257.2	34.9	1 737.28
	S45C50D76-1	4.5	76	5.0	305.2	316.3	34.9	2 108.51
	S45C50D76-2	4.5	76	5.0	305.2	316.3	34.9	2 016.50
	S45C30D89-1	4.5	89	3.0	305.2	257.2	34.9	2 021.00
	S45C30D89-2	4.5	89	3.0	305.2	257.2	34.9	2 062.37
	S45C50D89-1	4.5	89	5.0	305.2	316.3	34.9	2 262.94
	S45C50D89-2	4.5	89	5.0	305.2	316.3	34.9	2 230.03
	S45C30D108-1	4.5	108	3.0	305.2	257.2	34.9	2 035.43
	S45C30D108-2	4.5	108	3.0	305.2	257.2	34.9	1 941.07
	S45C50D108-1	4.5	108	5.0	305.2	316.3	34.9	2 179.84
	S45C50D108-2	4.5	108	5.0	305.2	316.3	34.9	2 024.55
S60	S60C30D76-1	6.0	76	3.0	281.5	257.2	34.9	2 151.53
	S60C30D76-2	6.0	76	3.0	281.5	257.2	34.9	2 140.49
	S60C50D76-1	6.0	76	5.0	281.5	316.3	34.9	2 272.06
	S60C50D76-2	6.0	76	5.0	281.5	316.3	34.9	2 166.45
	S60C30D89-1	6.0	89	3.0	281.5	257.2	34.9	2 257.21
	S60C30D89-2	6.0	89	3.0	281.5	257.2	34.9	2 271.11
	S60C50D89-1	6.0	89	5.0	281.5	316.3	34.9	2 376.27
	S60C50D89-2	6.0	89	5.0	281.5	316.3	34.9	2 391.91
	S60C30D108-1	6.0	108	3.0	281.5	257.2	34.9	2 232.01
	S60C30D108-2	6.0	108	3.0	281.5	257.2	34.9	2 250.62
	S60C50D108-1	6.0	108	5.0	281.5	316.3	34.9	2 269.72
	S60C50D108-2	6.0	108	5.0	281.5	316.3	34.9	2 330.89

注:“S”表示不锈钢外管,“C”表示不锈钢芯管,“D”表示不锈钢芯管直径;以试件 S45C30D76-2 为例,表示不锈钢外管厚度 4.5 mm,不锈钢芯管厚度 3.0 mm,不锈钢芯管直径 76 mm,“-2”表示重复试件 2。

1.2 材性试验数据

试验采用的海水海砂混凝土,由水泥、人工配制海水、天然海砂和机制碎石配制,配合比为1:0.486:1.516:3.012。人工配制海水的主要组分配比见表2;天然海砂主要组分质量分数分别为:SiO₂(95.26%)、Al₂O₃

(3.00%)、K₂O(1.04%)、Na₂O(0.38%)、MgO(0.32%)、CaO(0.20%)和Fe₂O₃(0.114%);机制碎石的最大粒径不超过20 mm。海水海砂混凝土的圆柱体抗压强度平均值为34.9 MPa。

Table 2 The chemical composition of artificial seawater							%o
w(KCl)	w(NaCl)	w(CaCl ₂)	w(MgCl ₂)	w(Na ₂ SO ₄)	w(NaHCO ₃)	w(KBr)	
0. 695	24. 53	1. 16	5. 2	4. 09	0. 201	0. 101	

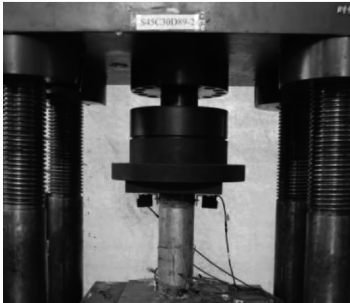
所使用不锈钢管均为同一批次 304 不锈钢管,每种厚度制备 3 个标准拉伸试件,测量其屈服强度。由于不锈钢没有明显的屈服阶段,故取 0. 02% 的残余变形值为其屈服强度,厚度 3. 0 mm、4. 5 mm、5. 0 mm 和 6. 0 mm 的不锈钢管平均屈服强度分别为 257. 2 MPa、305. 2 MPa、316. 3 MPa 和 281. 5 MPa。

1.3 试件加载测量装置及加载方案

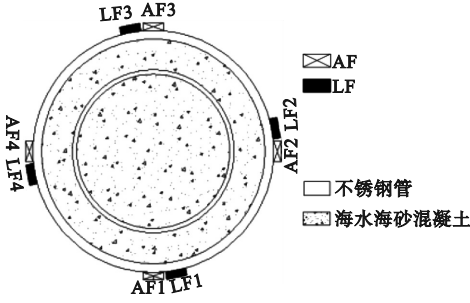
试件通过 5 000 kN 长柱试验机进行轴

向加载测试。在试件两侧对称布置激光位移计,用以测量混凝土柱的轴向变形,并在试件四周对称布置 4 组纵向、横向应变片组,用以分别测量试件纵向、横向应变。

试件轴向应变在弹性阶段采用纵向应变片(AF)数据,应变片损坏后采用激光位移计测量的整体轴向变形换算轴向应变;环向应变直接采用横向应变片(LF)的数据。加载装置和测量布置如图 2 所示。



(a)加载装置



(b)应变片布置

图 2 试验加载及测量布置

Fig. 2 The test setup and measuring arrangement

先进行预加载,预加载轴压力加载至 100 kN,循环加卸载三次,消除设备间隙。正式加载采用变形控制,加载速率设定 0. 3 mm/min,加载至试件发生明显的破坏或试件轴向变形量超过试件高度 5% (25 mm) 时停止加载。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试件的典型破坏形态如图 3 所示。在加载初期,不锈钢管和混凝土协同受力,没有明显形状变化;随着荷载增加,由于泊松效应,海水海砂混凝土变形比不锈钢变形大,不锈钢芯管和外管开始对混凝土产生环向约束效

应,混凝土处于三向受压状态,抗压强度和延性均得到显著提升;当荷载进一步增大,不锈钢管环向和竖向应变均超过了屈服应变,在远离端部约束的试件中部随机位置发生鼓曲屈曲;由于不锈钢延性较好,试件在停止加载时没有产生明显的强度降低和破坏,但在加载后期出现了部分偏压倾斜(见图 3(d))。

由于不锈钢芯管的增强作用,双不锈钢管约束试件没有观测到试件发生剪切破坏的情况,而是仅发生了鼓曲破坏,这与单不锈钢约束试件有一定的不同。另外,S45 组试件的鼓曲变形整体要大于 S60 组试件的鼓曲变形,较大壁厚的 S60 组试件最终破坏时鼓曲较小,表现出更好的承载性能。



图 3 典型试件破坏形态

Fig. 3 The typical failure modes of specimen

2.2 应力-应变关系曲线

试验中测得典型试件的应力-应变关系曲线,如图 4 所示。图中,试件轴压应力 $f =$

N/A_{sc} , N 为试件所承受的轴压荷载, A_{sc} 为试件全截面面积;应变正值表示轴向应变,负值表示环向应变。

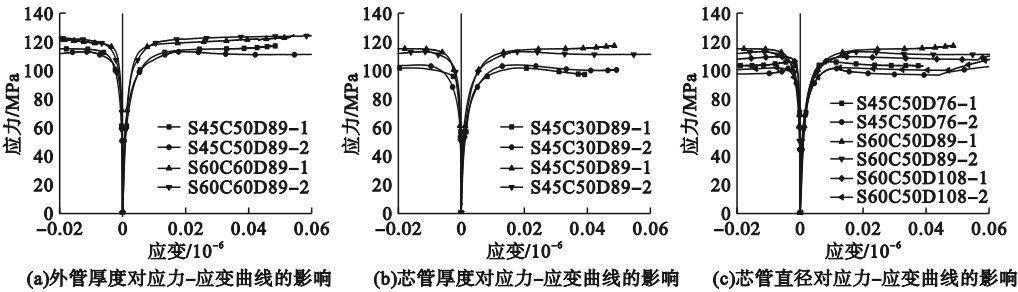


图 4 典型试件应力-应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of typical specimens

由图 4 可知,相较于 CFRP 约束混凝土柱,双层不锈钢混凝土柱有更好的延性,当荷载达到最大值后,有很长一段平台阶段,加载至 5% 轴向变形时,曲线均未出现明显陡降。

应力-应变曲线的发展可大致分为弹性段、弹塑性段和屈服后平台段等三个阶段。曲线屈服后平台段的曲线走势与不锈钢管约束的强度相关,大致可以分为三种类型:曲线上升、曲线水平以及曲线下降。相对薄的钢管组合(S45 组)下的曲线存在下降趋势,当随外管壁厚增加(S60 组),外管约束系数增强,下降趋势逐渐转为水平或上升,这与江韩^[17]描述的模型一致。但随着芯管直径增大,不锈钢管的约束提升效应呈现先提高后下降的趋势。

2.3 轴压承载力分析

2.3.1 等效轴向抗压强度

所有试件的试验轴压承载力列于表 1。为评价双不锈钢管约束试件强度提升效果,定义试件等效轴向抗压强度 $f_{scy} = N_u/A_{sc}$, N_u 为试件轴向承载力;各试件的等效轴向抗压强度如图 5 所示。随着外管厚度、芯管厚度的增加, f_{scy} 均有一定程度提升;随芯管直径增大, f_{scy} 呈现先提升后下降的趋势。

2.3.2 不锈钢外管厚度影响分析

外管厚度对试件轴压性能影响如图 6 所示。由图 6 可知,不锈钢外管厚度与轴压承载力提升比(N_u/N_0)呈现正相关关系。外管厚度由 4.5 mm 提升至 6.0 mm 时,其荷载能力提高了 6.0% ~ 24.5%。不锈钢外管厚度增加,对于小直径芯管(75 mm)提升最为显著,

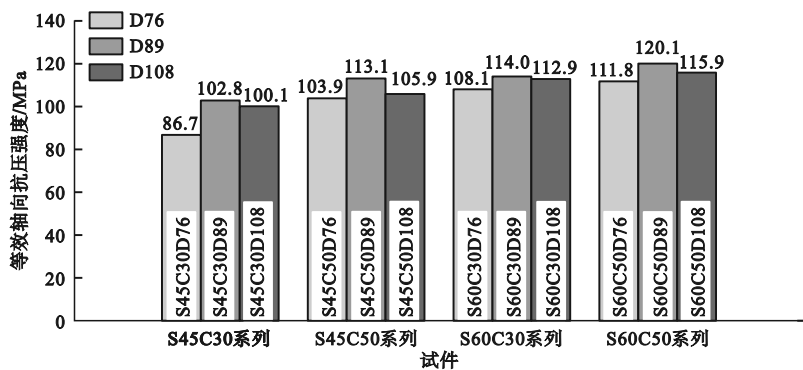


图5 试件等效轴向抗压强度

Fig. 5 The equivalent axial compressive strength of specimens

最大提升了 24.5%，相较于其他因素，不锈钢外管厚度对轴压承载力的提升幅度最大。

5 mm时,其对核心海水海砂混凝土的约束效应明显增强,承载力也有较大幅度提升。对于 S45 组,芯管直径为 76 mm、89 mm 以及 108 mm 的试件的承载力由于芯管壁厚的提高分别增长了 19.8%、10.9%、5.6%。对于 S60 组,芯管直径为 76 mm、89 mm 以及 108 mm 的试件的承载力分别由于芯管壁厚的提升增长了 3.3%、5.2%、2.6%。可以看出,随外管壁厚增大,外管约束贡献比例增大,芯管壁厚增大带来的强度提高效应有所减弱。

2.3.4 不锈钢芯管直径影响分析

芯管直径对试件轴压性能影响如图 8 所示。芯管直径由 76 mm 提升至 89 mm 时,试件的承载能力普遍上升,提升幅度在 5.5% ~ 18.6%。然而,当芯管直径由 89 mm 提升至 108 mm 时,其试件的承载能力反而出现了不同程度的下降(-1.0% ~ -6.4%)。

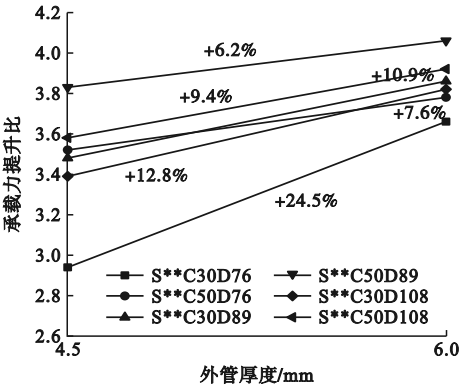


图6 外管厚度影响

Fig. 6 The influence of outer tube thickness

2.3.3 不锈钢芯管厚度影响分析

芯管厚度对试件轴压性能影响如图 7 所示。

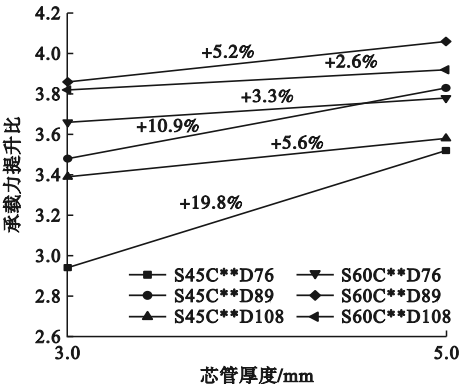


图7 芯管厚度影响

Fig. 7 The influence of core tube thickness

当不锈钢芯管的壁厚由 3 mm 增加到

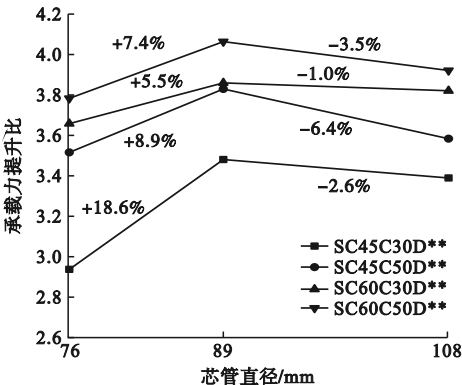


图8 芯管直径影响

Fig. 8 The influence of core tube diameter

随芯管直径增大,承载能力先升后降的可能原因包括:一方面,由于芯管直径的增大,受双管约束区域面积增大,但芯管对该区域的约束效果减弱,当增大约束区域带来的承载力提升小于约束效果减弱引起的承载力下降时,试件整体承载力下降;另一方面,对应芯管直径为 108 mm,当外管壁厚分别为 4.5 mm 和 6 mm 时,夹层混凝土的宽度分别仅有 21 mm 和 19.5 mm。夹层混凝土的宽度过小,部分粗骨料占据了大部分夹层空间,导致浇筑不密实,进而降低了试件整体承载力。因此,实际工程中建议控制夹层混凝土以及核心混凝土的面积比,以达到最优承载能力。

3 轴压承载力计算模型

3.1 约束机理与模型建立

海水海砂混凝土与双不锈钢管共同承受轴向荷载,DSTSCC 试件的轴向受压承载力主要由四部分构成,即夹层混凝土轴压承载力($N_1 = A_{c1}f_c$),核心混凝土轴压承载力($N_2 = A_{c2}f_c$),不锈钢外管的约束作用及其轴压承载力($N_3 = k_1A_{s1}f_{y1}$),不锈钢芯管的约束作用及其轴压承载力($N_4 = k_2A_{s2}f_{y2}$),其中 A_{c1} 和 A_{c2} 分别为夹层海水海砂混凝土面积和核心区海水海砂混凝土面积; A_{s1} 和 A_{s2} 分别为不锈钢外管和芯管的横截面面积; f_c 为海水海砂混凝土的强度。

对于不锈钢管的约束作用,建立图 9 所示的 DSTSCC 试件约束增强受力示意图。不锈钢管外管和芯管在承受轴向荷载的同时,还为海水海砂混凝土提供环向约束作用,

分别对应环向拉应力 f_1 和 f_2 。

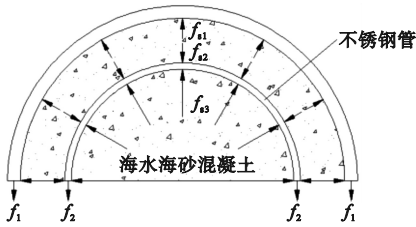


图 9 DSTSCC 受力简图

Fig. 9 The force diagram of DSTSCC

将 DSTSCC 试件四部分承载力进行叠加可得,得到 DSTSCC 试件轴压承载力公式:

$$N_u = (1 + k_1\zeta_1)(A_{c1} + A_{c2})f_c + k_2\zeta_2A_{c2}f_c. \quad (1)$$

式中: N_u 为试件的轴向承载力; k_1 和 k_2 分别为不锈钢外管和芯管的约束提高系数,为待定常数; ζ_1 和 ζ_2 分别为不锈钢外管和芯管的约束系数, $\zeta_1 = A_{s1}f_{y1}/(A_{c1}f_c + A_{c2}f_c)$, $\zeta_2 = A_{s2}f_{y2}/(A_{c2}f_c)$ 。

为了进一步确定两个约束提高系数的取值,参考既有文献对钢管混凝土柱^[15,24-25]、FRP 管约束混凝土柱^[26]、FRP 钢复合管混凝土柱^[9,28]等轴压承载力公式系数的确定方法,选取了搜集文献[18-19,25,28-31]中 118 根约束混凝土柱试件的试验结果,统计回归得到式(1)中系数 $k_1 = 1.33$, $k_2 = 1.42$ 。带入式(1),得到 DSTSCC 试件轴压承载力公式:

$$N_u = (1 + 1.33\zeta_1)(A_{c1} + A_{c2})f_c + 1.42\zeta_2A_{c2}f_c. \quad (2)$$

3.2 既有轴压承载力公式

目前,对于钢管约束混凝土柱的计算模型研究较多,代表性的复合管约束混凝土柱的轴压承载力公式总结于表 3。

表 3 既有公式总结

Table 3 Summary of the caculation formulas

公式来源	计算公式	适用约束形式
文献[32]	$N_u = 0.9A_{sc}f_{scy}$	钢管
文献[15]	$N_u = A_{c1}f_{c1}^* + A_{c2}(f_{c2}^* - f_{c1}^*)$	复合钢管
文献[25]	$N_u = k_s(f_c(A_{c1} + A_{c2}) + f_{y1}A_{s1} + f_{y2}A_{s2})$	复合钢管
文献[11]	$N_u = (1 + 1.8\zeta_1 + 1.15\zeta_2)A_{sc}f_c$	FRP 钢管复合
文献[27]	$N_u = (1 + 0.42\zeta_2/\zeta_1)[1.27FA_s + 0.85f_c(A_{c1} + A_{c2})]$	FRP 不锈钢管复合

表3中, f_{scy} 为约束混凝土柱的组合强度; f_c 为混凝土的强度; f_{y1} 为外管强度; f_{y2} 为芯管强度; f_{c1}^*, f_{c2}^* 分别为夹层和核心混凝土的轴向抗压强度; $F = \min(f_y, 0.7f_u)$; f_y 为复合钢管屈服强度; f_u 为复合钢管抗拉强度; A_{sc} 为总截面面积,由外管面积 A_{s1} ,夹层混凝土面积 A_{c1} ,芯管面积 A_{s2} 以及核心混凝土面积 A_{c2} 组成; ζ_1 为外管约束系数; ζ_2 为内管约束

系数; k_s 为强度修正系数; N_u 为约束混凝土柱轴压承载力。

3.3 试验验证与公式评价

针对笔者测试的24个DSTSCC试件,分别采用文献[32]、文献[15]、文献[25]、文献[11]、文献[27]和文中式(2)计算其轴压承载力预测值 $N_{u1}^{[32]}$ 、 $N_{u2}^{[15]}$ 、 $N_{u3}^{[25]}$ 、 $N_{u4}^{[11]}$ 、 $N_{u5}^{[27]}$ 、 N_u ,结果列于表4。

表4 承载力预测值对比
Table 4 Comparison of the predicted axial capacity

试件编号	N_{exp}	$N_{u1}^{[32]}$	$N_{u2}^{[15]}$	$N_{u3}^{[25]}$	$N_{u4}^{[11]}$	$N_{u5}^{[27]}$	N_u
S45C30D76-1	1 708. 57	1 608. 56	1 724. 78	1 608. 25	2 690. 68	1944. 30	1 730. 60
S45C30D76-2	1 737. 28						
S45C50D76-1	2 108. 51	1 749. 20	1 923. 57	1 788. 41	3 740. 89	1 984. 67	1 965. 33
S45C50D76-2	2 016. 50						
S45C30D89-1	2 021. 00	1 633. 40	1 675. 21	1 638. 75	2 535. 45	2 068. 53	1 771. 07
S45C30D89-2	2 062. 37						
S45C50D89-1	2 262. 94	1 790. 89	1 912. 93	1 852. 75	3 371. 71	2 117. 88	2 049. 92
S45C50D89-2	2 230. 03						
S45C30D108-1	2 035. 43	1 668. 12	1 566. 89	1 683. 32	2 379. 67	2 259. 75	1 830. 22
S45C30D108-2	1 941. 07						
S45C50D108-1	2 179. 84	1 843. 42	1 858. 25	1 946. 79	3 012. 69	2 322. 23	2 173. 55
S45C50D108-2	2 024. 55						
S60C30D76-1	2 151. 53	1 709. 20	1 865. 23	1 751. 85	2 890. 66	2 287. 52	1 899. 33
S60C30D76-2	2 140. 49						
S60C50D76-1	2 272. 06	1 821. 15	2 062. 02	1 932. 87	3 894. 89	2 237. 61	2 134. 05
S60C50D76-2	2 166. 45						
S60C30D89-1	2 257. 21	1 729. 50	1 809. 89	1 782. 50	2 741. 42	2 450. 89	1 939. 80
S60C30D89-2	2 271. 11						
S60C50D89-1	2 376. 27	1 850. 63	2 044. 52	1 997. 52	3 540. 17	2 393. 75	2 218. 64
S60C50D89-2	2 391. 91						
S60C30D108-1	2 232. 01	1 757. 09	1 690. 48	1 827. 28	2 591. 58	2 701. 90	1 988. 95
S60C30D108-2	2 250. 62						
S60C50D108-1	2 269. 72	1 883. 15	1 976. 72	2 092. 01	3 195. 08	2 634. 21	2 342. 28
S60C50D108-2	2 330. 89						

分别计算试验值 N_{exp} 与各公式预测值之比的平均值(AV)、标准差(SD)和变异系数(CV)等指标。文献[32]、文献[15]、文献[25]、文献[11]、文献[27]以及文中式(2)

的 AV 指数依次为1.221、1.166、1.176、0.762、0.943、1.070; SD 指数依次为0.068、0.090、0.066、0.149、0.071、0.066; CV 指数依次为5.5%、7.7%、5.6%、13.8%、7.5%、

6.2%。图10进一步比较了各公式预测结果与试验结果的离散程度,对于S45系列和

S60系列两组数据,各公式预测离散性没有表现出明显的差异。

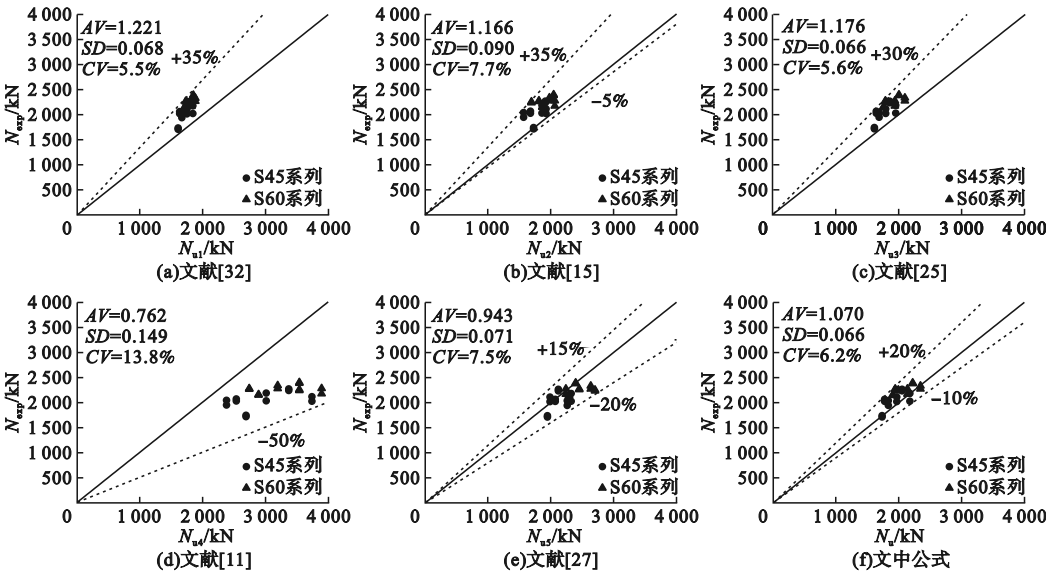


图10 轴压承载力预测结果对比

Fig. 10 Comparison of the predicted results with different formulas

文献[32]中公式的AV值为1.221,理论预测结果最保守,主要原因是模型公式对双重约束效应考虑不足。文献[15]和文献[25]中公式的AV值分别为1.166和1.176,两公式考虑了双重约束的影响,但低估了不锈钢管屈服后约束能力,结果偏于保守。

文献[11]和文献[27]中公式AV指标分别为0.762和0.943,计算结果偏于不安全。其中文献[11]公式预测结果普遍高估了其承载力,且安全度最低、离散性最大,说明该公式不适用于DSTSCC柱的轴压承载力预测。文献[27]是基于FRP不锈钢复合约束柱回归得到的承载力公式,同样存在适用性问题,且公式偏于不安全。

式(2)的AV值为1.072,试验值与预测结果之比,最大正误差为14.6%,最大负误差为-7.4%,变异系数为0.062,表明文中式(2)的预测精度和预测稳定性较好,能够更合理地反应DSTSCC试件的受力特性。

笔者从海水海砂混凝土柱构件的耐久性和承载力能力提高的角度,提出了双不锈钢管约束海水海砂柱试件,但并没有考虑在海

水中腐蚀性离子作用下约束柱的长期受力性能,其短期轴压性能和轴压承载力计算公式与采用普通混凝土的双不锈钢约束柱具有相似性^[21]。此外,考虑海水海砂混凝土中存在较多的腐蚀性离子,笔者建议进一步从以下两个方面提升双不锈钢管约束海水海砂柱的耐久性能:①如需配置纵筋,可考虑采用耐腐蚀性强的FRP筋或采取添加阻锈剂等措施;②在滨海环境,可以考虑与FRP材料形成复合管约束柱,减少海水海砂腐蚀性离子的内外侵蚀。

4 结 论

(1)DSTSCC试件的轴压破坏均为腰鼓型破坏,弹性受力阶段的内力按轴向刚度分配,进一步受荷,不锈钢管约束效应逐渐发挥,且当不锈钢管屈服后,不锈钢管对混凝土的约束效应仍可以继续发挥,体现出较好的延性受力特征。

(2)DSTSCC柱应力应变曲线大致分为弹性、弹塑性以及屈服后平台阶段;曲线的最终走势与外管的约束能力有关;随着不锈钢

管约束系数的增大,屈服后平台段由缓慢下降趋势逐渐转为水平趋势,进一步转为上升趋势。

(3)随不锈钢管外管、芯管厚度的增大,试件的轴压承载力均得到明显提升;但随不锈钢芯管直径的增大,轴压承载力呈现出先上升后下降的趋势,主要是由于芯管直径的增大,使得不锈钢外管和芯管夹层混凝土浇筑不密实,降低了试件强度。

(4)笔者建立的计算模型能够较好地预测 DSTSCC 柱试件的轴压承载力,相较于现有模型,具有更好的预测精度和预测稳定性。

参考文献

- [1] 李田雨,张玉梅,刘小艳,等.海水海砂高性能海工混凝土力学及早期工作性研究[J].混凝土,2019(11):1-5.
(LI Tianyu, ZHANG Yumei, LIU Xiaoyan, et al. Research on the preparation and durability of brine marine sand high performance concrete [J]. Concrete, 2019(11):1-5.)
- [2] GUO M H, HU B, XING F, et al. Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis [J]. Construction and building materials, 2020, 234: 117339-117351.
- [3] NEVILLE A. Chloride attack of reinforced concrete: an overview [J]. Materials and structures, 1995, 28(2):63-70.
- [4] 张航,陈国福,宋开伟,等.适用于海水海砂混凝土阻锈剂的作用机理[J].材料导报,2014, 28(20):116-121.
(ZHANG Hang, CHEN Guofu, SONG Kaiwei, et al. The mechanism action of corrosion inhibitor for concrete based on seawater and sea sands [J]. Materials reports, 2014, 28(20):116-121.)
- [5] ZHAO Z, WEI Y, WANG G, et al. Axial compression performance of square UHPC-filled stainless-steel tubular columns [J]. Construction and building materials, 2023, 408: 133622.
- [6] 冯鹏,王杰,张泉,等. FRP 与海砂混凝土组合应用的发展与创新[J].玻璃钢/复合材料, 2014(12):13-18.
(FENG Peng, WANG Jie, ZHANG Xiao, et al. Development and innovation on combining FRP and sea sand concrete for structures [J]. Composites science and engineering, 2014(12):13-18.)
- [7] WANG G F, WEI Y, ZHANG Y R, et al. Experimental behavior of concrete-filled double-skin tubular columns with outer galvanized corrugated steel tubes under axial compression [J]. Engineering structures, 2023, 295:116856.
- [8] 王高飞,魏洋,缪坤廷,等.圆形 CFRP-钢复合管海水海砂珊瑚混凝土柱轴压性能试验研究[J].复合材料学报,2022,39(8):3982-3993.
(WANG Gaofei, WEI Yang, MIAO Kunting, et al. Experimental study on axial compression performance of CFRP-steel composite tube filled circular seawater sea-sand coral concrete columns [J]. Acta materiae compositae sinica, 2022, 39(8):3982-3993.)
- [9] 张依睿,魏洋,柏佳文,等.纤维增强聚合物复合材料-钢复合圆管约束混凝土轴压性能预测模型[J].复合材料学报,2019,36(10):2478-2485.
(ZHANG Yirui, WEI Yang, BAI Jiawen, et al. Models for predicting axial compression behavior of fiber reinforced polymer-steel composite circular tube confined concrete [J]. Acta materiae compositae sinica, 2019, 36(10):2478-2485.)
- [10] DING F X, LU D, BAI Y, et al. Behaviour of CFRP-confined concrete-filled circular steel tube stub columns under axial loading [J]. Thin-walled structures, 2018, 125:107-118.
- [11] LU Y Y, LI N, LI S. Behavior of FRP-confined concrete-filled steel tube columns [J]. Polymers, 2014, 6(5):1333-1349.
- [12] HUANG Z, ZHENG K Q, WEI Y, et al. Compressive performance of SWSSC-filled CFRP-stainless steel composite tube columns [J]. Construction and building materials, 2023, 385:131471.
- [13] HUANG Z, ZHENG K Q, WEI Y, et al. Axial compressive behavior of SWSSC-filled stainless steel tube columns with in-built CFRP or stainless steel tubes [J]. Journal of building engineering, 2023, 72:106543.
- [14] 韩林海.钢管混凝土结构的特点及发展[J].工业建筑,1998(10):1-5.
(HAN Linhai. Characters and development of concrete filled steel tubes [J]. Industrial construction, 1998(10):1-5.)
- [15] 蔡绍怀,焦占拴.复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J].建筑结构学报,1997(6):20-25.
(CAI Shaohuai, JIAO Zhanshuan. Behavior and ultimate load analysis of multibarrel tube-confined concrete columns [J]. Journal of building structures, 1997(6):20-25.)
- [16] 张春梅,阴毅,周云.影响钢管混凝土柱轴压承载力的因素分析[J].工业建筑,2004(10):66-68.
(ZHANG Chunmei, YIN Yi, ZHOU Yun. Analysis of factors influencing axial compressive bearing capacity of concrete filled steel tube column [J]. Industrial buildings, 2004(10):66-68.)
- [17] 江韩,储良成,左江,等.轴心受压双钢管混凝土短柱正截面受压承载力理论分析及试验研

- 究[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 96-105.
(JIANG Han, CHU Liangcheng, ZUO Jiang, et al. Theoretical analysis and experimental study on normal cross-section load carrying capacity for concrete-filled double steel tubular short columns subjected to axial compression load [J]. Journal of building structures, 2008(4): 96-105.)
- [18] 方小丹, 林斯嘉. 复式钢管高强混凝土柱轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 236-245.
(FANG Xiaodan, LIN Sijia. Axial compressive test of columns with multi barrel tube-confined high performance concrete [J]. Journal of building structures, 2014, 35(4): 236-245.)
- [19] 唐红元, 范璐瑶, 赵鑫, 等. 圆不锈钢管混凝土短柱轴压承载力模型研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 10-20.
(TANG Hongyuan, FANG Luyao, ZHAO Xin, et al. Bearing capacity model of circular concrete-filled stainless steel stub columns under uniaxial compression [J]. Advanced engineering sciences, 2020, 52(3): 10-20.)
- [20] 廖飞宇. 圆不锈钢管混凝土轴压力学性能的有限元分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2009, 38(6): 659-662.
(LIAO Feiyu. Finite element analysis for circular concrete-filled stainless steel tubular column under axial compression [J]. Journal of Fujian agriculture and forestry university (natural science edition), 2009, 38(6): 659-662.)
- [21] LIAO F Y, HOU C, ZHANG W J, et al. Experimental investigation on sea sand concrete-filled stainless steel tubular stub columns [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 155: 46-51.
- [22] LI Y L, ZHAO X L, SINGH R K, et al. Axial compression tests on seawater and sea sand concrete-filled double-skin stainless steel circular tubes [J]. Engineering structures, 2018, 176: 426-438.
- [23] 杨志坚, 韩嘉明, 杨军彩, 等. 空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 429-438.
(YANG Zhijian, HAN Jianming, YANG Juncai, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 429-438.)
- [24] 路林翰, 任庆新, 张天贺, 等. 圆钢管废弃钢渣混凝土短柱轴压承载力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(3): 428-436.
(LU Linhan, REN Qingxin, ZHANG Tianhe, et al. Ultimate strength calculation of circular waste steel slag concrete-filled steeltube stub columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39(3): 428-436.)
- [25] ZHENG Y Q, TAO Z. Compressive strength and stiffness of concrete-filled double-tube columns [J]. Thin-walled structures, 2019, 134: 174-188.
- [26] 吴刚, 吕志涛. FRP约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003(5): 1-9.
(WU Gang, LYU Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response [J]. Journal of building structures, 2003(5): 1-9.)
- [27] 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.
- [28] WEI Y, ZHU C, MIAO K T, et al. Compressive performance of concrete-filled steel tube columns with in-built seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes [J]. Construction and building materials, 2022, 317: 125933.
- [29] 代鹏, 杨璐, 卫璇, 等. 不锈钢管混凝土短柱轴压承载力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(增刊1): 298-305.
(DAI Peng, YANG Lu, WEI Xuan, et al. Experimental studies on the behavior and capacity of concrete filled stainless steel tube short columns [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(S1): 298-305.)
- [30] 叶斌, 张旭东, 乔崎云. 复式不锈钢管混凝土轴压试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27): 193-197.
(YE Bin, ZHANG Xudong, QIAO Qiyun. Axial compressive experimental study on concreted-filled duplex stainless steel tubular columns [J]. Science technology and engineering, 2018, 18(27): 193-197.)
- [31] CHANG X, RU Z L, ZHOU W, et al. Study on concrete-filled stainless steel-carbon steel tubular (CFSCST) stub columns under compression [J]. Thin-walled structures, 2013, 63: 125-133.
- [32] 哈尔滨工业大学, 中国建筑科学研究院. 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.
(Harbin Institute of Technology, China Academy of Building Sciences. Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)