

FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴压性能

邵凌峰 魏洋 王高飞 张依睿 李国芬

Axial compression performance of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

SHAO Lingfeng, WEI Yang, WANG Gaofei, ZHANG Yirui, LI Guofen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240903.007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Experimental study on axial compression performance of CFRP-steel composite tube filled circular seawater sea-sand coral concrete columns

复合材料学报. 2022, 39(8): 3982-3993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210909.012>

钢管混凝土-FRP管海水海砂混凝土组合柱轴压模型

Model for stress-strain curves of concrete filled steel tube-seawater and sea sand concrete filled FRP tube composite columns under axial load

复合材料学报. 2022, 39(11): 5403-5414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.003>

FRP非均匀约束海水海砂混凝土方柱轴压性能

Axial compressive behavior of FRP nonuniformly wrapped seawater sea-sand concrete in square columns

复合材料学报. 2022, 39(6): 2801-2809 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210708.004>

新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验

Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns

复合材料学报. 2021, 38(9): 3084-3093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201117.001>

海水海砂混凝土中混杂碳-玄武岩纤维筋拉伸性能退化机制及寿命预测

Degradation mechanism of tensile properties and life prediction of hybrid carbon/basalt fiber reinforced polymer bars in seawater sea-sand concrete

复合材料学报. 2024, 41(7): 3677-3688 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231206.001>

GFRP筋的拉伸性能劣化对其与海水海砂混凝土粘结性能的影响

Effect of tensile performance degradation of GFRP bars on their bond performance with seawater sea-sand concrete

复合材料学报. 2023, 40(12): 6572-6582 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230523.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱
轴压性能

分享本文

邵凌峰, 魏洋*, 王高飞, 张依睿, 李国芳

(南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037)

摘要: 提出了一种纤维增强复合材料 (FRP)-镀锌波纹钢管 (CST)-海水海砂混凝土 (SSC) 柱的新型组合柱, 该结构由内侧海水海砂混凝土、中间波纹钢管、外侧纤维布组成。为了研究这种新型组合柱的轴压性能, 共制备了 14 个试件, 主要参数为纤维布层数 (0、1、2、3) 和类型 (玄武岩纤维增强复合材料 (BFRP)、碳纤维增强复合材料 (CFRP))。试验结果表明, FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的主要破坏模式为剪切破坏和局部屈曲破坏, 增加纤维布层数可提高其极限荷载、极限应变; 特殊的波纹结构使得钢管只提供环向约束而避免轴向荷载传递, 发挥具有类似于箍筋的约束作用。与无纤维布约束试件相比, BFRP 约束试件的极限荷载和极限应变分别增加了 13.9%~15.8% 和 16.2%~33.7%; CFRP 约束试件的极限荷载和极限应变分别增加了 19.6%~28% 和 14.5%~24.1%, 结合试验数据对现有 FRP-箍筋复合约束混凝土强度计算模型进行了评估。

关键词: 纤维增强复合材料 (FRP); 波纹钢管; 海水海砂混凝土; 单调轴压; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)06-3288-14

Axial compression performance of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater
sea-sand concrete columns

SHAO Lingfeng, WEI Yang*, WANG Gaofei, ZHANG Yirui, LI Guofen

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: A new combined column of fiber reinforced polymer (FRP)-galvanized corrugated steel tube (CST)-seawater sea-sand concrete (SSC) were proposed in this paper. The structure was composed of inner seawater sea sand concrete, intermediate corrugated steel tubes, and outer FRP sheet. To investigate the axial compression performance of this new combined column, a total of fourteen specimens were prepared, with the main parameters being the number of FRP layers (0, 1, 2, 3) and FRP types (Basalt fiber reinforced polymer (BFRP), Carbon fiber reinforced polymer (CFRP)). The test results show that the primary damage mode of the FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns is shear damage and local buckling damage, and increasing the number of FRP layers could improve the ultimate load and ultimate strain of the columns. The unique corrugated structure makes the steel tube only provide circumferential confinement and avoid axial load transfer, which plays a confinement role similar to a stirrup. Compared with the specimens without FRP confined, the ultimate load and ultimate strain of BFRP-confined specimens increase by 13.9%-15.8% and 16.2%-33.7%, respectively, and those of CFRP-confined specimens increase by 19.6%-28% and 14.5%-24.1%, respectively. The strength calculation model of the existing FRP-stirrup composite confined concrete is evaluated in conjunction with the test data. The existing FRP-stirrup composite confined concrete strength calculation model is evaluated in conjunction with the experimental data.

Keywords: fiber reinforced polymer (FRP); corrugated steel tube; seawater sea-sand concrete; axial compression; mechanical properties

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-07-10; 录用日期: 2024-08-21; 网络首发时间: 2024-09-04 11:15:41

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240903.007>

基金项目: 国家自然科学基金 (52378244); 江苏省自然科学基金 (BK20231293)

National Natural Science Foundation of China (52378244); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20231293)

通信作者: 魏洋, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型材料与新型结构 E-mail: wy78@njfu.edu.cn

引用格式: 邵凌峰, 魏洋, 王高飞, 等. FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴压性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 3288-3301.

SHAO Lingfeng, WEI Yang, WANG Gaofei, et al. Axial compression performance of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 3288-3301(in Chinese).

镀锌波纹钢管具有耐腐蚀性强、稳定性好、施工方便、免维护等优点,在工程结构中得到广泛应用^[1-6],波纹钢管是在普通碳素钢板表面镀锌后、通过机械波纹压制、翻边咬口、螺旋卷绕等工艺制成具有螺旋角的薄壁圆管^[7]。与普通钢管相比,波纹钢管经过冷弯成型工艺,屈服强度和平面刚度均有提升^[8],有效改善结构的局部稳定性和侧向承载能力^[9]。波纹钢管采用优质镀锌钢带制成,使用寿命约为50~100年,钢带表面镀锌层可以在恶劣环境中发生阳极反应来保护母材,使其不受氧化、腐蚀等影响,大大降低了定期维护的成本^[10];同时,波纹钢管自重轻,约是相同直径和长度普通钢管质量的1/10~1/15,具有良好的经济效益^[11]。

研究者对混凝土填充镀锌波纹钢管的轴压力学性能进行了系列相关研究。Wang等^[12]研究了波纹钢管混凝土短柱和普通钢管混凝土短柱的单调轴向压缩性能,结果表明,波纹钢管特殊的波纹构造与混凝土的机械咬合效果强、延性好,有效延缓结构屈曲现象发生,波纹钢管混凝土柱的力学性能优于普通钢管混凝土柱;Zou等^[13]提出了一种新型波纹钢管与方钢管混凝土短柱,结果表明,波纹钢板具有较高的侧向刚度,核心混凝土得到良好的约束;Fang等^[14-15]研究了内嵌结构钢波纹钢管混凝土短柱和波纹钢管混凝土短柱的单调轴向行为,结果表明,由于波纹钢管的环向紧致效应和竖向偏移效应,波纹钢管主要为混凝土提供环向约束而不承载轴向荷载,增强了结构的力学性能;Yang等^[16]研究发现波纹钢管混凝土结构在受压后期,波纹钢管会屈曲和失稳。

另外,随着海洋强国战略的推进,岛礁工程、海洋工程建设需求越来越大,淡水和河砂作为此类工程的主要原材料,从内陆大量运输会导致工程成本和时间增加,我国海水和海砂资源丰富且易开采,海水海砂混凝土的力学性能和普通淡水河砂混凝土相似^[17-18],利用海水和海砂作为岛礁工程、海洋工程用材料具有巨大的潜力和优势。但海水海砂混凝土的氯离子含量高,容易对钢材产生腐蚀,导致其耐久性不如普通混凝土。

纤维增强复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀性强等优点受到广泛的研究^[19-22],作为结构加固材料可有效提高结构的力学性能。利用

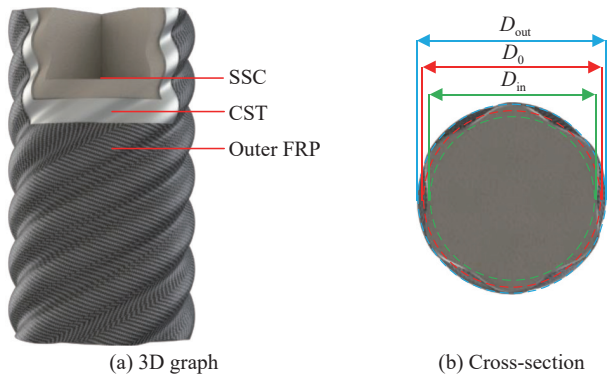
FRP优秀的耐久性能,在海洋环境中使用可隔离氯离子的侵蚀并延长结构的耐久性,近年来,众多学者研究探索了多种纤维布和海水海砂混凝土组合的结构形式,Miao等^[23]、Sun等^[24]和Zeng等^[25]发现内置FRP管的海水海砂混凝土柱的承载能力和耐久性得到显著提高,Chen等^[26]、Wei等^[27]和Zhang等^[28]发现外部包裹纤维布可显著提高海水海砂钢管混凝土柱的强度、延性和耐久性。FRP与海水海砂混凝土组合使用,可充分发挥多种材料优势性能,在海洋工程中具有较好的应用前景。

本文提出一种新型FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土结构,在波纹钢管内侧填充海水海砂混凝土,可以有效抑制波纹钢管向内屈曲;在波纹钢管外侧粘贴纤维布,可以有效提高结构的力学性能和耐久性。这种新型组合结构,利用FRP和波纹钢管表面镀锌层耐腐蚀性优越特性,抑制了氯离子对结构的腐蚀,同时波纹钢管自重轻,减少钢材的使用,经济效益良好。

1 试验概况

1.1 试验设计

图1为FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土结构示意图,结构由内向外依次为内侧海水海砂混凝土、中间波纹钢管和外侧纤维布组成。本试验共制备了14根试件,其中包括玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱试件6根;碳纤维增强复合材料(CFRP)-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱试件6根;镀锌波纹钢管海水海砂混凝土对比柱试件2根,具体参数见表1。



D_0 , D_{in} , D_{out} —Nominal, inner and outer diameters of the corrugated steel tube, respectively; SSC—Sea-sand concrete; CST—Corrugated steel tube

图1 纤维增强复合材料(FRP)-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱结构概念图

Fig. 1 Structural concept diagram of fiber reinforced polymer (FRP)-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

表 1 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱试件的具体参数

Table 1 Detailed parameters of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

Specimen	<i>H</i> /mm	<i>D</i> ₀ /mm	<i>t</i> ₀ /mm	<i>t</i> _t /mm	<i>N</i> _u /kN	<i>f</i> _{cu} /MPa	<i>ε</i> _{cu}	Outer FRP layer	FRP type
CST1.6-1	600	320	1.60	N/A	3 020.9	36.6	0.0041	N/A	N/A
CST1.6-2	600	320	1.60	N/A	3 051.1	37.0	0.0042	N/A	N/A
CST1.6-B1-1	600	320	1.60	0.167	3 483.2	42.5	0.0054	1	BFRP
CST1.6-B1-2	600	320	1.60	0.167	3 432.4	41.8	0.0057	1	BFRP
CST1.6-B2-1	600	320	1.60	0.334	3 908.2	47.9	0.0069	2	BFRP
CST1.6-B2-2	600	320	1.60	0.334	4 049.8	49.7	0.0069	2	BFRP
CST1.6-B3-1	600	320	1.60	0.501	4 475.9	56.0	0.0078	3	BFRP
CST1.6-B3-2	600	320	1.60	0.501	4 532.3	55.8	0.0080	3	BFRP
CST1.6-C1-1	600	320	1.60	0.167	3 582.8	43.7	0.0051	1	CFRP
CST1.6-C1-2	600	320	1.60	0.167	3 672.5	44.9	0.0052	1	CFRP
CST1.6-C2-1	600	320	1.60	0.334	4 744.2	58.5	0.0063	2	CFRP
CST1.6-C2-2	600	320	1.60	0.334	4 658.1	57.4	0.0061	2	CFRP
CST1.6-C3-1	600	320	1.60	0.501	5 604.3	69.4	0.0071	3	CFRP
CST1.6-C3-2	600	320	1.60	0.501	5 644.3	69.9	0.0071	3	CFRP

Notes: Specimens were numbered according to the different parameters of the specimens. CST represents the corrugated steel tube; 1.6 represents the thickness of the corrugated steel tube; B/C represents the types of FRP (Basalt fiber reinforced polymer (BFRP)/Carbon fiber reinforced polymer (CFRP)); Furthermore, the numbers 1, 2, 3 represents the number of FRP layers (1, 2, 3); The labels 1 and 2 were assigned to differentiate between two specimens with identical parameters; *H*—Height of all specimens; *D*₀—Nominal of the corrugated steel tube; *t*₀—Thickness of the CST; *t*_t—Thickness of the outer FRP; *N*_u—Ultimate load of specimen; *f*_{cu}—Ultimate stress of specimen; *ε*_{cu}—Ultimate strain of specimen; N/A—Not applicable.

所有试件波纹钢管壁厚 *t*₀ 为 1.6 mm，高度 *H* 均为 600 mm，公称直径 *D*₀ 均为 320 mm，计算如下式所示：

$$D_0 = \frac{D_{in} + D_{out}}{2}$$

(1)

式中，*D*_{in} 和 *D*_{out} 分别为镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的公称内径和公称外径。

图 2 为 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱试件的制备过程，包括 FRP-波纹钢复合管的制作^[29]、人工制备海水及浇筑海水海砂混凝土、试件养护。具体制作流程如下：(1) 按照需要使用的纤维布长度和波纹钢管高度裁剪备用；(2) 制备环氧树脂胶并均匀浸渍裁剪好的纤维布，并保留 200 mm 的环向搭接长度，随后用刮板反复涂压；(3) 将完全

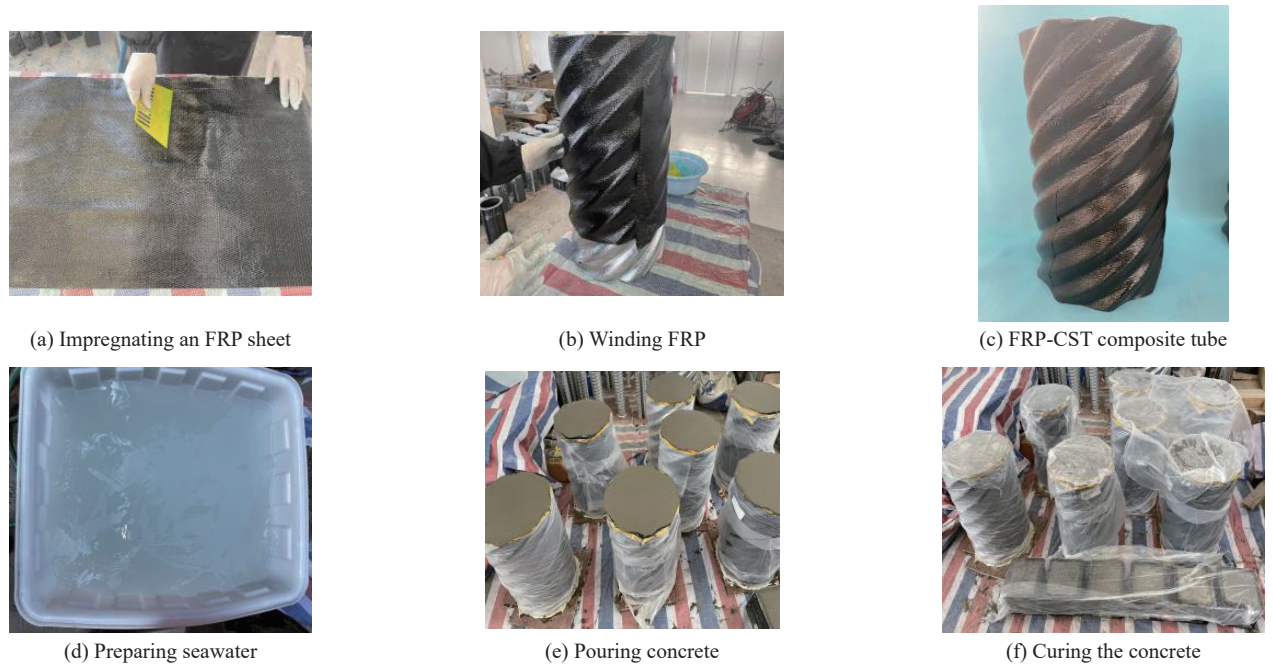


图 2 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的制备过程

Fig. 2 Manufacture process of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

浸渍环氧树脂胶水的连续单向纤维布沿着水平方向固定在波纹钢管一端,并紧贴在波纹钢管表面,随后用手沿着波纹方向反复涂压排出纤维布和钢管之间的气泡,包裹多层纤维布之前,需在前一层表面纤维布表面均匀涂抹一层薄薄环氧树脂胶水,随后用手反复涂压排出纤维布之间的气泡;(4)待环氧树脂胶固化后形成FRP-波纹钢复合管,将其固定在底模板上并用塑料薄膜包裹复合管表面;(5)按照设计配合比配制海水及海水海砂混凝土,分多次装入复合管内并不断振捣,用抹刀抹平试件表面;(6)将试件放在室内并用塑料薄膜覆盖试件表面,养护前期每天喷海水养护,养护至少28d后拆除底模板。

为了准确识别每个试件,对不同参数试件进行编号,为了减小试验误差,相同参数试件制备了两个,以“-1”和“-2”区分。试件具体命名规则如下:“CST1.6”表示1.6mm厚度的波纹钢管;其后字母“B/C”表示波纹钢管外壁粘贴纤维布类型,字母“B”表示“BFRP”,字母“C”表示“CFRP”;此外,字母“B/C”后的数字“1”、“2”和“3”分别表示波纹钢管外壁粘贴1层、2层和3层纤维布;最后标注“-1”和“-2”区分两个相同试验参数试件。以“CST1.6-B2-1”为例,该试件表示壁厚1.6mm波纹钢管外壁粘贴2层BFRP在相同试验参数下1号试件;“CST1.6-2”

表示壁厚1.6mm波纹钢管约束海水海砂混凝土柱2号试件。

试验所用的波纹钢管同一批次制作,具体制作过程为普通碳素结构钢带表面热浸镀锌后,经过机械压波、锁缝咬合、螺旋卷管、激光切割后形成具有一定螺旋角度和不规则波纹截面的圆管。锁缝咬合钢带相邻边缘折转扣合,并彼此压紧,锁缝的最小搭接长度、预留偏置、间隙和最小侧向接缝强度应符合规范要求^[30-31]:折叠部分宽度不应小于钢带厚度的8倍,且不应小于2.5mm;相邻折叠钢带留出的偏置距离从接触点开始不应小于钢带厚度;在折叠钢带内部,间隙不超过钢带壁厚的1.5倍,且不得小于壁厚的一半;壁厚1.6mm波纹钢管锁缝的最小抗拉强度为65MPa。波纹钢管的几何结构见图3,波纹钢管的截面尺寸见表2,波纹钢管经过螺旋卷管后形成具有螺旋角 θ 的圆管,计算如下式所示:

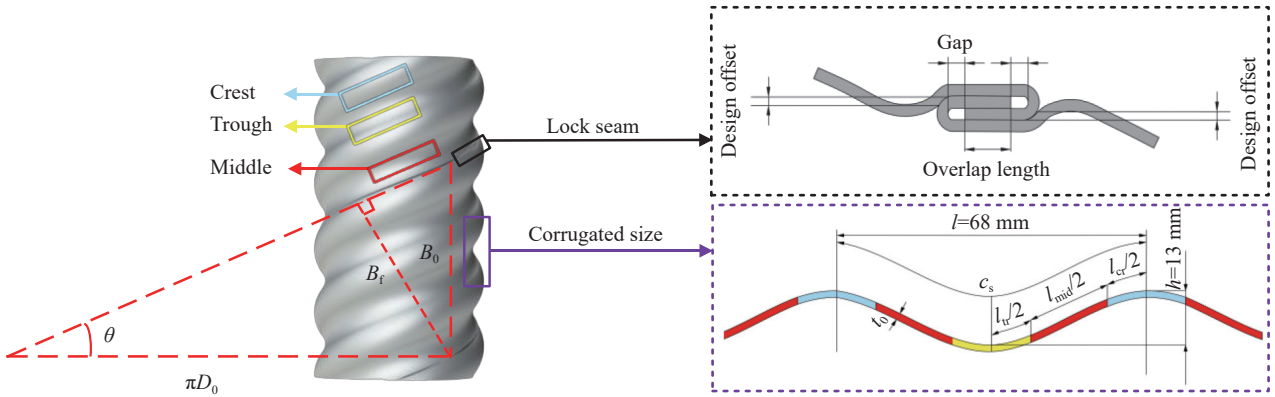
$$\theta = \arcsin \frac{B_f}{\pi D_0}$$

(2)

式中: B_f 为压制波纹板前镀锌钢板的宽度,为630mm; D_0 为波纹钢管的公称直径; θ 为波纹钢管螺旋角, θ 为 38.8° 。

1.2 材料性能

本实验使用的原状海砂取至河北秦皇岛市,直径为0.15~0.28mm,海水根据ASTM D1141-98^[32]



B_f —Width of galvanized steel sheet before pressing corrugated sheets; B_0 —Width of spirally coiled sheet; θ —Helical angle of the CST; h —Corrugation height; l —Corrugation length; l_{cr} , l_{mid} , l_{tr} —Length for the crest, middle, and trough of the CST; c_s —Ripple length corresponding to one ripple period

图3 波纹钢管几何结构

Fig. 3 Geometry of corrugated steel tube

表2 波纹钢管截面尺寸

Table 2 Section size of corrugated steel tube

$l \times h / (\text{mm} \times \text{mm})$	l_{cr} / mm	l_{mid} / mm	l_{tr} / mm	c_s / mm	$\lambda_{cr} / \%$	$\lambda_{mid} / \%$	$\lambda_{tr} / \%$
68×13	17.25	35.91	17.25	70.41	24.5	51.0	24.5

Notes: λ_{cr} —Length coefficient of the crest; λ_{mid} —Length coefficient of the middle; λ_{tr} —Length coefficient of the trough.

配制，化学试剂具体含量见表3；海水海砂混凝土配合比为水泥：海砂：海水：粗骨料=1：1.52：0.49：3.01；根据 JGJ 55—2011^[33] 同一批次浇筑 3 个直径 150 mm、高度 300 mm 的标准海水海砂圆柱体试件，测其平均抗压强度 f_{co} 和平均峰值应变 ε_{co} 分别为 30.8 MPa 和 0.0019；根据 GB/T 3354—2014^[34] 同一批次分别制作 5 个 BFRP 和 CFRP 标准拉伸试件并进行拉伸试验，BFRP 极限拉伸强度 f_t 为 1 950.8 MPa，极限拉伸应变 ε_f 为 0.0236；CFRP 极限拉伸强度 f_t 为 3 475.9 MPa，极限拉伸应变 ε_f 为 0.0129；根据厂家提供环氧树脂胶的拉伸强度为 67.7 MPa，弹性模量为 2.9 GPa，拉伸极限应变为 0.029；根据 GB/T 228.1—2010^[35] 和 GB/T 34567—2017^[36] 在波纹钢管波峰、波中和波谷处同一批次分别制作 3 个标准拉伸试件并进行拉伸试验，波峰、波中和波谷处的屈服强度分别为 326.5 MPa、300.7 MPa 和 357.8 MPa，波纹钢管的平均屈服强度 f_{ya} 为 321.1 MPa，其计算如下式所示：

$$f_{ya} = \lambda_{cr} f_{y,cr} + \lambda_{mid} f_{y,mid} + \lambda_{tr} f_{y,tr}$$
 (3)

式中： λ_{cr} 、 λ_{mid} 和 λ_{tr} 分别为一个波纹周期内波峰、波中和波谷的长度系数； $f_{y,cr}$ 、 $f_{y,mid}$ 和 $f_{y,tr}$ 分别为波纹钢管波峰、波中和波谷处的屈服强度。

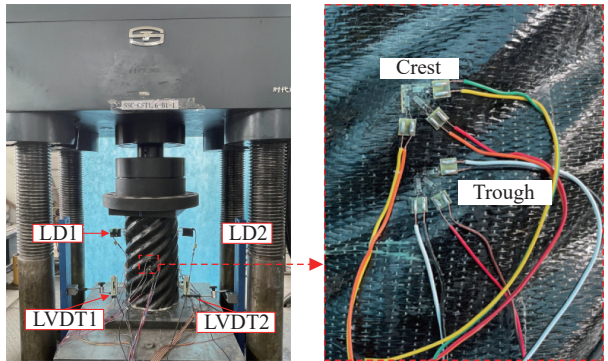
表 3 人工海水化学掺比 (g/kg)

	Table 3 Chemical admixture ratio of artificial seawater (g/kg)						
	KCl	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	KBr
Reagent content	0.695	24.53	1.16	5.2	4.09	0.201	0.101

1.3 试验加载及测量装置

本文采用 YAW-10000 微机控制电液伺服多功能试验机 (长春试验机有限公司) 进行加载，同时采用 TDS-540 数据采集仪 (日本东京测器研究所 (TML)) 以相同频率采集试验过程中位移和应变等数据。试件两侧对称布置两个普通电测位移计 (LVTD1/LVTD2 (溧阳市仪表厂)) 和两个激光位移计 (LD1/LD2 (光子 (深圳) 精密科技有限公司))，用于收集试件 600 mm 和 340 mm 高度范围内的轴向位移，由于试件表面应力分布不均匀，在每个试件中间位置沿圆周方向波峰和波谷处对称粘贴 8 个三向 45° 电阻应变花。在正式加载之前，对每个试件进行 3 次预加载，预加载采用力控制，加载荷载为极限荷载的 10%，正式加载采用位移控制，

加载速率为 0.3 mm/min，在荷载-位移曲线进入残余阶段后，采用 0.5 mm/min 加载速率，最终试件变形达到 25 mm 或超出位移计量程停止试验。加载装置及测量装置如图 4 所示。



LD1, LD2—Two laser displacement meter; LVDT1, LVDT2—Two linear variable displacement transducers

图 4 试验加载及测量装置

Fig. 4 Test loading and measuring device

2 试验结果与分析

2.1 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴压试验现象及破坏形态

图 5 为镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱典型试件 (CST1.6-2) 破坏形态。加载初期，试件处于弹性阶段无明显变化；随着轴向荷载增加，试件进入弹塑性阶段，混凝土产生横向膨胀，出现轻微开裂声；加载至极限荷载附近，外部波纹钢管锁缝达到极限抗拉强度，锁缝不断张开并沿着波纹方向滑移；随着横向变形增加，试件承载力下降，试件中部出现明显的波纹褶皱；随着轴向变形增大，锁缝不断沿着波纹方向滑移及张开，且波纹褶皱由试件中部向上下延伸，加载至试验结束，波纹钢管表面波纹褶皱数量增加，试件最终破坏形态为局部屈曲破坏。

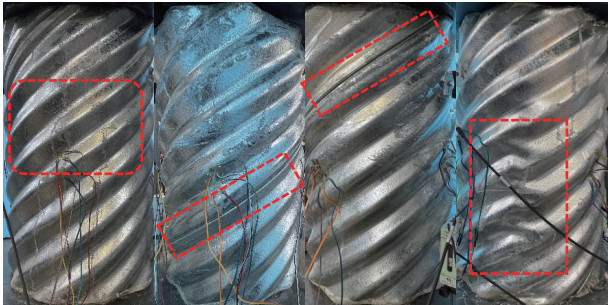


图 5 镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的破坏形态

Fig. 5 Failure modes of galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

图 6 为 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱典型试件破坏形态。加载初期,试件处于弹性阶段无明显变化;随着轴向荷载增加,试件进入弹塑性阶段,波纹钢管屈服后,表面环氧树脂胶水出现轻微胶裂声;继续加载,混凝土产生横向膨胀,外侧纤维布开始发挥环向约束作用,波谷处纤维布绷直并泛出白色编织线;加载至极限荷载时,试件中部纤维布炸裂,CFRP 呈现条带状炸裂,BFRP 呈现丝带状炸裂,随着横向变形增加,纤维布炸裂位置由试件中部向上下延伸,CFRP 断裂过程比 BFRP 更剧烈、BFRP 断裂持续时间比 CFRP 更长,纤维布层数越多,纤维布断裂破坏程度越剧烈;加载至试验结束时,将外部纤维布剥开,发现纤维布断裂处波纹钢管出现特殊的波纹褶皱,波纹钢管锁缝不断沿着波纹方向张开及滑移,波纹钢管屈曲程度小于纯波纹钢管约束的试件,试件最终破坏形态为局部屈曲破坏。

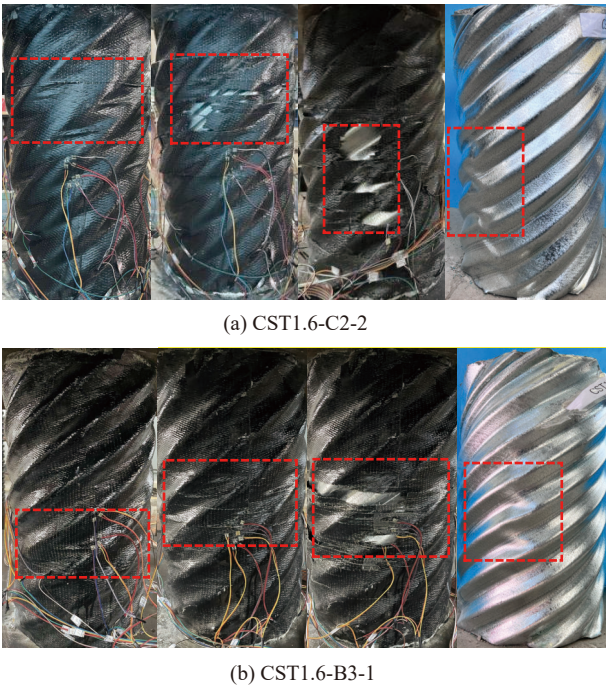


图 6 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的破坏形态
Fig. 6 Failure modes of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

2.2 核心混凝土破坏形态分析

图 7 为典型试件核心混凝土破坏形态。剥开外侧波纹钢管,发现核心混凝土与波纹钢管紧密结合,独特的波纹构造提升了波纹钢管和核心混凝土之间的粘结强度,镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱核心混凝土沿锁缝方向分离,形成独特的

螺旋状剪切破坏面、波峰处核心混凝土出现多条纵向微裂缝,波峰处核心混凝土开裂主要原因是试件在受压过程中,波纹钢管波峰内侧纵向受压,核心混凝土与波纹钢管不断挤紧。FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱核心混凝土沿着锁缝方向轻微剪切破坏,核心混凝土几乎不分离、波峰处核心混凝土纵向裂缝宽度不断扩展,剪切破坏风险降低主要原因是外侧纤维布为核心混凝土提供更多的环向约束力,有效降低了剪切破坏风险;波峰处裂缝发展的主要原因是纤维布有效抑制了波纹钢管纵向受压,应力传递到波峰区域核心混凝土内部,导致应力集中,加剧了裂缝宽度的扩展。

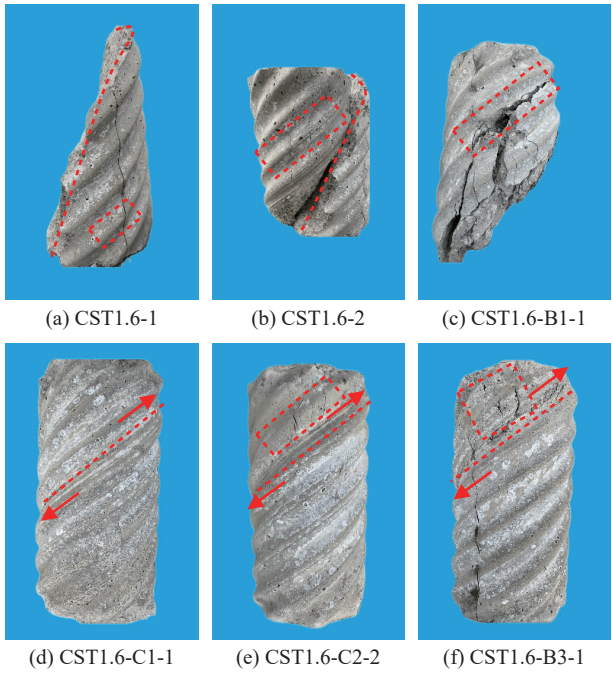


图 7 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的核心混凝土破坏形态
Fig. 7 Failure modes of core concrete of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

2.3 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴向荷载-位移曲线

图 8 为 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴向荷载-位移曲线,其中纵坐标轴向荷载由试验机测得,横坐标位移由位移计测得。曲线弹性阶段横坐标位移由激光位移计测得数据换算而成,弹性阶段后由普通电测位移计测得数据。试件加载初期,处于弹性阶段,曲线呈线性增长,波纹钢管对核心混凝土产生较低的约束作用,纤维布层数对试件初始刚度影响较小;随着轴向荷载增加,进入弹塑性阶段,曲线斜率降低,轴向荷载

增加速率降低,纤维布和波纹钢管对核心混凝土由被动约束转变为主动约束,约束力与核心混凝土的膨胀变形正相关;加载至极限荷载,大部分试件中部纤维布断裂,曲线进入非线性递减阶段,CFRP约束试件的曲线呈现阶梯状下降且持续时间较短,BFRP约束试件的曲线呈现连续下降且持续时间较长,纤维布层数越多曲线下降幅度越大;

随着轴向变形的增加,纤维布失去约束作用,进入残余阶段,曲线保持稳定,波纹钢管提供恒定的约束力,试件表现出较好的延性,纤维布层数越多,试件的残余承载能力越大,由于CFRP约束的试件表面纤维布几乎完全断裂,而BFRP约束试件表面纤维布断裂破坏程度小于CFRP约束试件,其残余承载力大于CFRP约束试件。

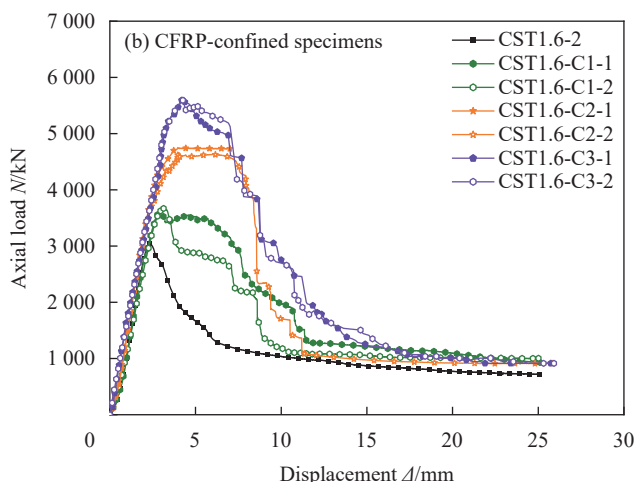
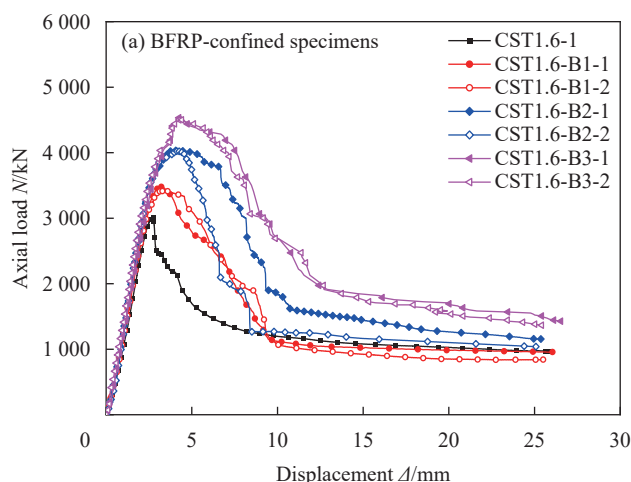


图8 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的轴向荷载-位移关系曲线

Fig. 8 Axial load-displacement curves of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

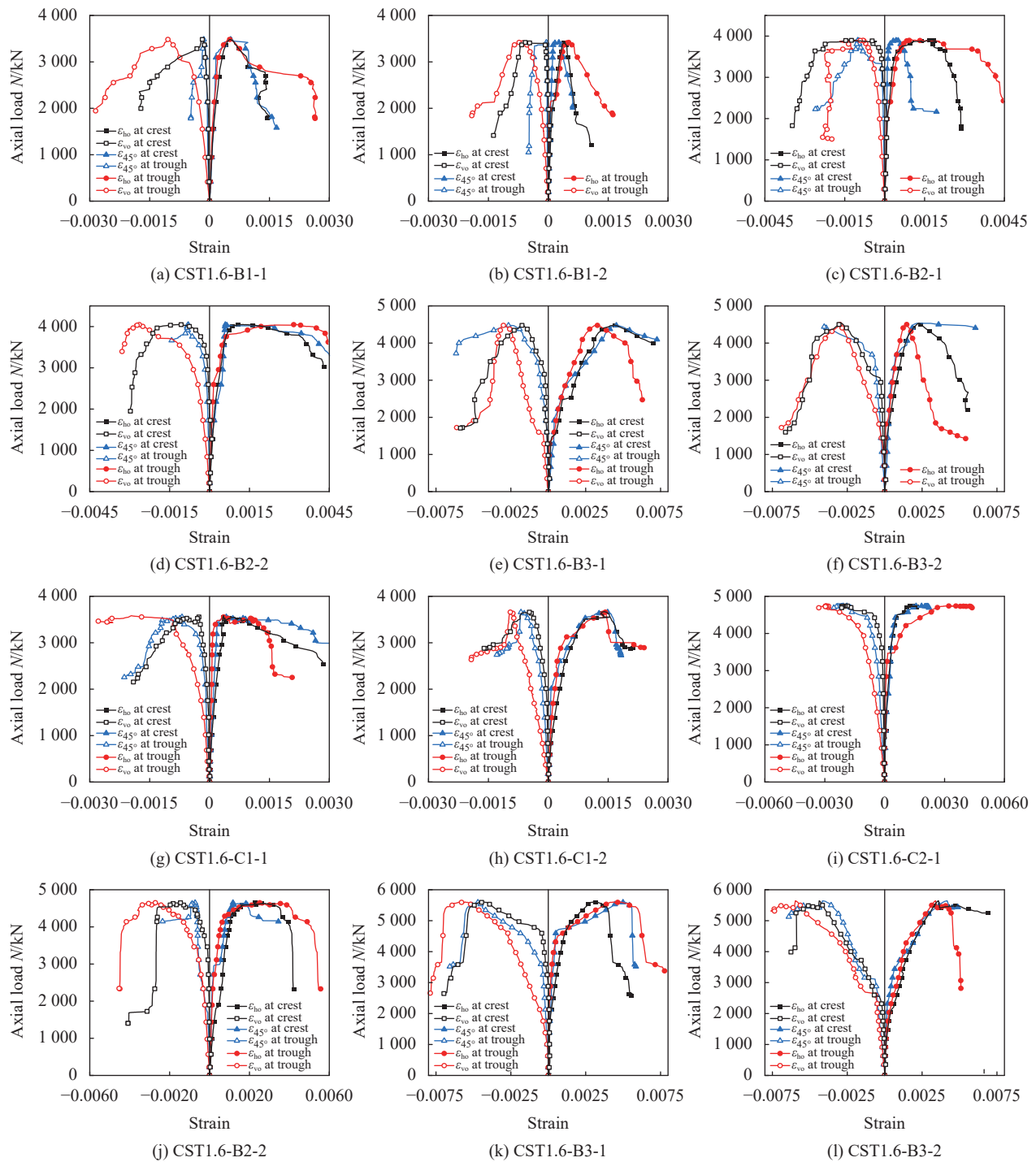
2.4 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴向荷载-应变曲线

图9为FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴向荷载-应变曲线,其中纵坐标轴向荷载由试验机测得,横坐标应变由电阻应变花测得。施加荷载时,外侧纤维布产生环向拉伸应变 ε_{ho} 和垂直压缩应变 ε_{vo} ,环向拉伸应变和垂直压缩应变和通过粘贴在试件中部沿圆周方向的4个横向和纵向电阻应变花实测数据的平均值, ε_{45° 表示 45° 斜角的应变,在大部分试件中, ε_{45° 小于 ε_{ho} 和 ε_{vo} ,在轴向压缩作用下,波纹钢管特殊的波纹构造,导致波峰和波谷处应变分布不均匀。在弹性阶段,曲线呈线性增长,波峰处的 ε_{ho} 增速始终大于波谷处,波谷处 ε_{vo} 应变增速始终大于波峰处;在弹塑性阶段,核心混凝土不断膨胀,纤维布和波纹钢管的约束作用被激活,波峰和波谷处的环向拉伸应变快速增加,接近极限荷载的时候, ε_{vo} 由波谷向波峰递减, ε_{ho} 由波谷向波峰递增。例如,在CST1.6-B1-1中,波峰处 ε_{ho} 为 ε_{vo} 的1.8倍,波谷处 ε_{vo} 为 ε_{ho} 的1.9倍;在CST1.6-C1-1中,波峰处 ε_{ho} 为 ε_{vo} 的1.5倍,波谷处 ε_{vo} 为 ε_{ho} 的2.4倍;

在极限荷载后,曲线进入非线性递减阶段,波纹钢管和核心混凝土的摩擦力和粘结力不足,波纹钢管沿着锁缝处错位移动,荷载应变显著降低。

2.5 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土参数对比分析

图10为纤维布层数(0、1、2、3)和纤维布类型(BFRP、CFRP)参数变化对FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱极限荷载和极限应变的影响,其中横坐标为波纹钢管外侧包裹的纤维布层数,左侧纵坐标为波纹钢管轴压过程中的极限荷载 N_u 和极限应变 ε_{cu} ,当纤维布首次断裂时对应的最大荷载定义为 N_u , ε_{cu} 为极限荷载处对应轴向位移与试件高度的比值,右侧纵坐标为极限荷载和极限应变的提升比。在纤维布层数相同的条件下,外侧包裹1、2、3层CFRP较BFRP约束试件的极限荷载分别提高了4.9%、18.1%和24.9%,外侧包裹1、2、3层BFRP较CFRP约束试件的极限应变分别提高了7.8%、11.3%和11.3%,由于纤维布材料不同的力学性能,BFRP极限拉伸强度 f_f 为1950.8 MPa,极限拉伸应变 ε_f 为0.0236;CFRP极限拉伸强度 f_f 为3475.9 MPa,极限拉伸应变 ε_f 为



ε_{ho} —The average circumferential tensile strain; ε_{vo} —The average vertical strain

图9 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的轴向荷载-应变关系曲线

Fig. 9 Axial load-strain curves of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

0.0129, CFRP 材料在延缓波纹钢管屈曲及核心混凝土开裂方面表现出显著的优势,有效提高了试件的极限承载能力;BFRP 材料在增强试件变形能力方面表现出显著优势,有效提高了试件的延性。在纤维布类型相同的条件下,外侧包裹1层

BFRP 和 CFRP 的试件较 0 层试件的极限荷载和极限应变分别提升了 13.9%、33.7% 和 21%、24.1%,外侧包裹 2 层 BFRP 和 CFRP 的试件较 1 层试件的极限荷载和极限应变分别提升了 15.8%、24.3% 和 28%、20.4%,外侧包裹 3 层 BFRP 和 CFRP 的试件

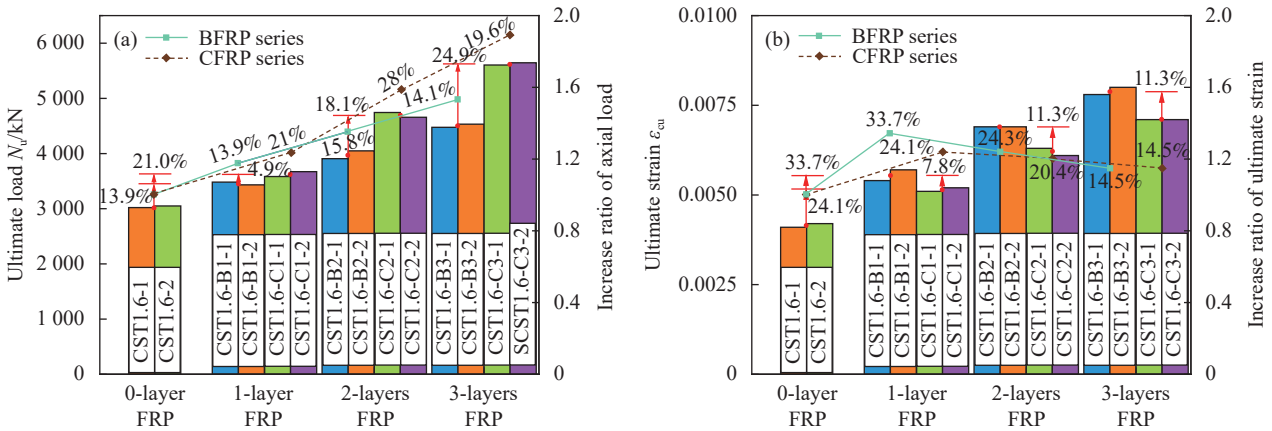


图 10 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的轴压试验结果参数化分析

Fig. 10 Parametric analysis of axial compression test results of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

较 2 层试件的极限荷载和极限应变分别提升了 14.1%、14.5% 和 19.6%、14.5%，纤维布层数的增加，试件极限荷载提升呈线性增长，但纤维布层数越多，试件极限应变提升幅度降低，包裹两层 CFRP 对试件的极限荷载提升最为明显，而包裹一层 BFRP 显著提升了试件的变形能力。因此，本文建议在波纹钢管外侧设置一层或两层纤维布，可以获得理想的极限承载能力和变形能力。

3 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的计算模型

3.1 主要参数

FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱截面为复杂的波纹截面，计算复杂，且波纹钢管和外侧纤维布对核心混凝土的约束效果和圆形 FRP-钢复合管约束混凝土柱结构有所不同，为了简化设计，采用 Wang 等^[12]提出等效转换的方法，将单波纹周期不规则的波纹截面等效为圆形截面，如图 11 所示，等效前后的含钢率 (α_s) 和含纤维率 (α_f) 保持不变，考虑波纹放大系数 (η_c) 对含钢率和含纤维率的影响，计算波纹钢管 (t_s') 和 FRP (t_f') 的等效厚度：

$$\eta_c = 1 + \left(\frac{\pi h}{2l} \right)^2 \approx \frac{c_s}{l} \quad (4)$$

$$t_s' = \eta_c t_s \quad (5)$$

$$t_f' = \eta_c t_f \quad (6)$$

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_c} = \frac{4t_s'(D_0 - t_s')}{(D_0 - 2t_s')^2} \quad (7)$$

$$\alpha_f = \frac{A_f}{A_c} = \frac{4t_f'(D_0 + t_f')}{(D_0 - 2t_s')^2} \quad (8)$$

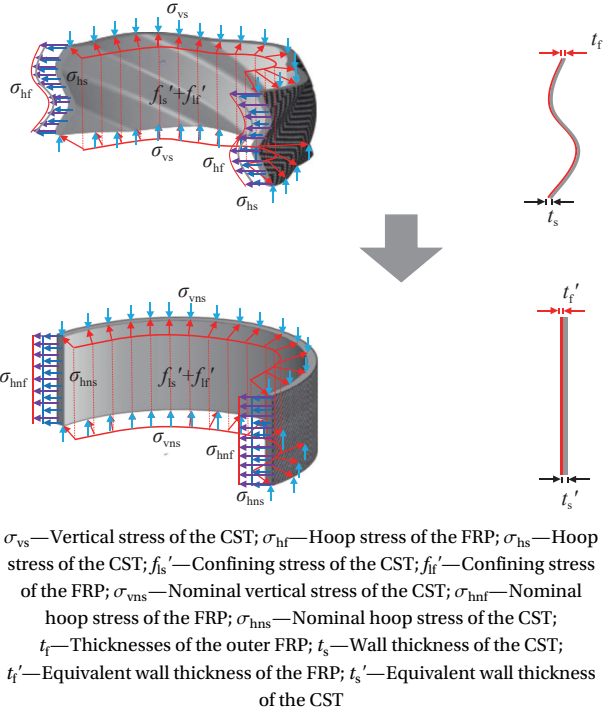


图 11 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土受力等效转化

Fig. 11 Equivalent conversion of the force of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns

其中： h 为波纹高度； l 为波纹长度； c_s 为单波纹周期波纹长度； A_s 为波纹钢管横截面积； A_c 为核心混凝土截面面积。

波纹钢管的环向约束应力 (σ_{hs}) 和轴向应力 (σ_{vs}) 沿厚度和柱高方向分布不均匀，在轴压作用下，外侧波纹钢管的环向应力沿着柱高方向近似余弦分布，Fang 等^[37]基于试验监测和有限元分析模拟，将单波纹周期波纹钢管的环向约束应力 (σ_{vs}) 和轴向应力 (σ_{hs}) 沿柱高方向投影到水平面

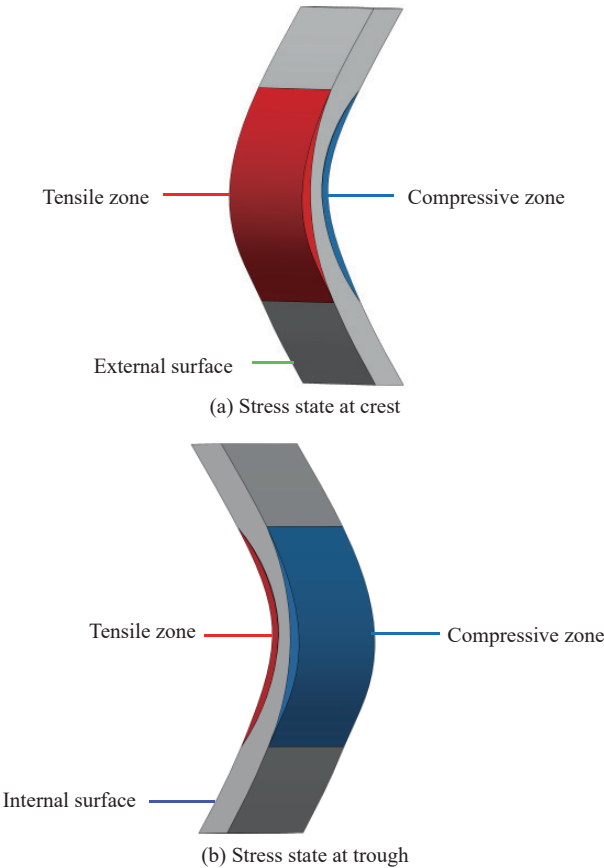


图 13 波纹钢管不同区域应力状态

Fig. 13 Stress state in different zones of corrugated steel tube

$$A_{AE} = \sum \frac{|Expe. - Theo. |}{|Expe. |} \Big/ n \tag{21}$$

式中：Expe.为试验值；Theo.为理论计算值；*n* 为试件总数。

图 14 为试件极限应力的模型理论计算值与试验值之间的对比结果。横坐标为极限应力试

验值与素混凝土圆柱体柱抗压强度 *f*_{co} 的比值，纵坐标为极限应力计算值与素混凝土圆柱体柱抗压强度 *f*_{co} 的比值。如表 5 所示，Issa et al.模型^[40]、Chastre et al.模型^[41]、Hu et al.模型^[42]、和 Miao et al.模型^[43] 的平均值分别为 1.119、1.053、1.102 和 1.194，且平均绝对误差较大，过多考虑了内部箍筋和 FRP 的环向约束作用，大部分数据位于理想线上方，试验数据预测均偏差较大；反观，Ilki et al.模型^[39] 评估结果较为精确，*A*_V、*S*_D 和 *A*_{AE} 分别为 0.959、0.034 和 4.8%，试验值和计算值误差较小，充分考虑了 FRP 和内部箍筋的有效环向约束力，且考虑 FRP 粘合表面不同曲率和 FRP 约束效率系数的影响，模型精确合理，适用于本文极限应力计算。

4 结论

(1) 新型纤维增强复合材料 (FRP)-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱主要破坏模式为局部屈曲破坏和剪切破坏，纤维布有效降低了核心混凝土剪切破坏风险和屈曲范围，且抑制了波纹钢管纵向受压，应力不断传递至核心混凝土波峰区域，波峰处混凝土纵向裂缝不断发展。

(2) FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的荷载-位移曲线中纤维布层数对初始刚度影响较小，纤维布层数相同，玄武岩纤维增强复合材料 (BFRP) 约束试件较碳纤维增强复合材料 (CFRP) 约束试件极限应变提高 7.8%~11.3%；CFRP 约束试件较 BFRP 约束试件极限荷载提高 4.9%~24.9%。随着纤维布层数增加，试件极限荷载和极限应变显著增强，极限荷载最大提高 33.7%，极限应变最

表 4 FRP-箍筋约束混凝土柱的强度计算模型

Table 4 Strength calculation models of FRP-stirrup confined concrete columns

Model source	Calculation formula
Ilki et al. (2008) ^[39]	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2.54 \frac{f_{lf}}{f_{co}} + 4.54 \frac{f_{ls}}{f_{co}}$
Issa et al. (2009) ^[40]	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.4 \frac{f_{ls} + f_{lf}}{f_{co}}$
Chastre et al. (2010) ^[41]	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \frac{f_{lf}}{f_{co}} + \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{ls}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{ls}}{f_{co}} - 2.254 \right)$
Hu et al. (2014) ^[42]	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = \frac{1.5 + D/H}{2} + 5.29 \frac{f_{ls} + 0.6 f_{lf}}{f_{co}}$
Miao et al. (2021) ^[43]	$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 0.75 + 2.7 (1 + \gamma) \left(\frac{f_{lf}}{f_{co}} \right)^{0.9} + 4.1 \frac{f_{ls}}{f_{co}} \cdot \frac{A_c}{A_g}$
	$\gamma = 1.03$

Notes: *f*_{cu}—Ultimate stress of specimen; *f*_{co}—Peak stress of unconfined concrete; *f*_{ls}—Lateral confining stress exerted by the stirrup; *f*_{lf}—Later confining stress exerted by FRP; *D*—Diameter of the column; *H*—Height of the column; *A*_c—Area of the core concrete; *A*_g—Area of the total specimen area; *γ*—Correction coefficients.

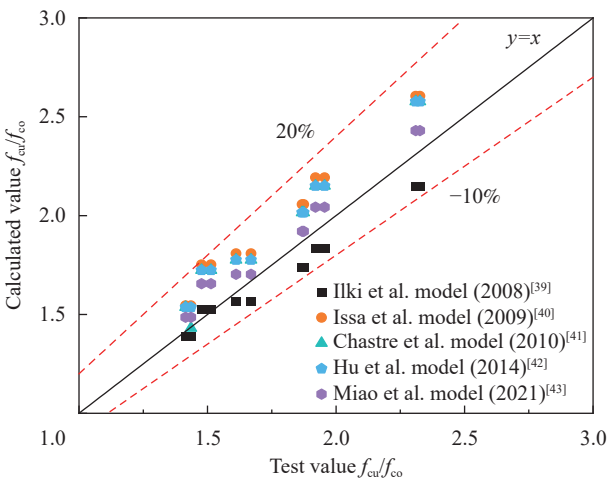


图 14 各模型对 FRP-镀锌波纹钢管混凝土柱计算值与试验值对比
Fig. 14 Comparison between the calculated values and the experimental values of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns by different models

表 5 FRP-箍筋约束混凝土柱的强度计算模型评估
Table 5 Evaluation of strength calculation models of FRP-hoop confined concrete columns

Model source	A_V	S_D	$A_{AE}/\%$
Ilki et al. (2008) ^[39]	0.959	0.034	4.8
Issa et al. (2009) ^[40]	1.119	0.031	11.9
Chastre et al. (2010) ^[41]	1.053	0.028	5.3
Hu et al. (2014) ^[42]	1.102	0.029	10.2
Miao et al. (2021) ^[43]	1.194	0.113	19.5

Notes: A_V —Average value; S_D —Standard deviation; A_{AE} —Average absolute error.

大提高 28%。

(3) FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱的荷载-应变曲线弹性阶段波峰处的环向拉伸应变 ε_{ho} 增速始终大于波谷处，波谷处的垂直压缩应变 ε_{vo} 增速始终大于波峰处；45°斜角的应变 ε_{45° 介于 ε_{ho} 和 ε_{vo} 之间。在接近极限荷载时，波峰处的 ε_{ho} 超过 ε_{vo} ，波谷处的 ε_{vo} 大于 ε_{ho} 。

(4) 归因于波纹钢管轴向刚度低、壁薄、特殊的波纹构造，波纹钢管在压力作用下几乎不传递轴向荷载，主要为核心混凝土提供环向约束，发挥类似于箍筋的约束作用，通过对多个典型 FRP-箍筋复合约束混凝土柱的准确性和适用性进行评估发现，Ilki et al.模型^[39] 精确合理，适用于本文 FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱极限应力计算。

参考文献:

[1] 陈文尹. 大直径镀锌金属波纹钢管在装配式接口中的运用 [J]. 工程与建设, 2021, 35(2): 379-382.

CHEN Wenyin. Application of large diameter galvanized corrugated steel pipe in prefabricated joints [J]. Engineering and Construction, 2021, 35(2): 379-382(in Chinese).

[2] DING W, HUANG X, LI S, et al. Flexural stiffness characterization of the corrugated steel-concrete composite structure for tunnel projects [J]. Underground Space, 2023, 12: 18-30.

[3] 李珊. 寒区桥涵工程中金属波纹钢管材料性能试验研究 [J]. 青海交通科技, 2022, 34(3): 151-158.

LI Shan. Experimental study on material properties of metal bellows for bridge and culvert engineering in cold regions [J]. Qinghai Traffic Detection, 2022, 34(3): 151-158(in Chinese).

[4] 路腾飞, 张琦悦. 楼体建筑中金属波纹钢管被冲击下的热温度场模拟 [J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(4): 113-117.

LU Tengfei, ZHANG Qiyue. Thermal temperature field simulation of metal bellows under impact in buildings [J]. Ordnance Materila Science and Engineering, 2023, 46(4): 113-117(in Chinese).

[5] XU P, WEI Y, YANG Y, et al. Application of fabricated corrugated steel plate in subway tunnel supporting structure [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01323.

[6] ZHANG Y, LIU B, MENG L. Structural behavior and soil arching state of underground corrugated steel utility tunnel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 203: 107798.

[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] 中国国家标准化管理委员会. 冷弯波纹钢管: GB/T 34567—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Cold curved corrugated steel tube: GB/T 34567—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(in Chinese).

[9] FANG Y, WANG Y, ELCHALAKANI M, et al. Experimental investigation on concrete-filled corrugated steel tubular column under constant axial load and cyclic load [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113245.

[10] ROBERTS B C. Durability guide for corrugated steel pipe[M]//WRPMD'99: Preparing for the 21st Century. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2004: 1-8.

[11] ISLAM M R, ALMASUD M A. Numerical analysis of a corrugated metal pipe: A case study [J]. International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul, 2011, 2(1): 250-258.

[12] WANG Y, YANG L, YANG H, et al. Behaviour of concrete-

- filled corrugated steel tubes under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 475-495.
- [13] ZOU Y, WANG L, SUN Z, et al. Experimental and numerical studies of concrete-filled corrugated steel tubular column under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2023, 276: 114813.
- [14] FANG Y, LIU C, YANG H, et al. Axial behaviour of concrete-filled corrugated steel tubular column embedded with structural steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 170: 106064.
- [15] FANG Y, WANG Y, YANG H, 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.
- [16] YANG L, WANG Y, 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: 111009.
- [17] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(2): 16-22.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea sand recycled concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2018, 35(2): 16-22(in Chinese).
- [18] 秦斌. 海水海砂混凝土基本力学性能研究[J]. *混凝土*, 2019(2): 90-91.
QIN Bin. Basic mechanical properties of seawater and sea sand concrete[J]. *Concrete*, 2019(2): 90-91(in Chinese).
- [19] HENSHER D A. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: Properties and applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 25-52.
- [20] NWANKWO C O, MAHACHI J, OLUKANNI D O, et al. Natural fibres and biopolymers in FRP composites for strengthening concrete structures: A mixed review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 363: 129661.
- [21] SONNENSCHN E R, GAJDOSOVA K, HOLLY I. FRP composites and their using in the construction of bridges[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 161: 477-482.
- [22] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: A state-of-the-art review[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings*, 2003, 156(1): 51-62.
- [23] MIAO K, WEI Y, DONG F, et al. Experimental study on concrete-filled steel tube columns with inner distributed seawater and sea sand concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes under axial compression[J]. *Composite Structures*, 2023, 320: 117181.
- [24] SUN J, DING Z, WEI Y, et al. Compressive behavior of GFRP tube filled with structural polypropylene fiber reinforced seawater coral aggregates concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: 125372.
- [25] ZENG J J, GAO W Y, DUAN Z J, et al. Axial compressive behavior of polyethylene terephthalate/carbon FRP-confined seawater sea-sand concrete in circular columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117383.
- [26] CHEN Z, PANG Y, XU R, et al. Mechanical performance of ocean concrete-filled circular CFRP-steel tube columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 198: 107514.
- [27] WEI Y, BAI J, ZHANG Y, et al. Compressive performance of high-strength seawater and sea sand concrete-filled circular FRP-steel composite tube columns[J]. *Engineering Structures*, 2021, 240: 112357.
- [28] ZHANG Y, WEI Y, LI B, et al. A novel seawater and sea sand concrete-filled CFRP-carbon steel composite tube column: Seismic behavior and finite element analysis[J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114872.
- [29] CHOU C C, LEE C S, WU K Y, et al. Development and validation of a FRP-wrapped spiral corrugated tube for seismic performance of circular concrete columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170: 498-511.
- [30] 余顺新, 卢傲. 波纹钢埋置式结构设计施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014: 111-112.
YU Shunxin, LU Ao. Design and construction manual for corrugated steel embedded structures[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014: 111-112(in Chinese).
- [31] FANG Y, GAI W, YANG H, et al. Modelling and lock-seam effects on compressive behaviour of concrete-filled helical corrugated steel tubes[J]. *Structures*, 2023, 58: 105321.
- [32] American Society for Testing and Materials. Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese).
- [34] 中国国家标准化管理委员会. 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法: GB/T 3354—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials: GB/T 3354—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014(in

Chinese).

[35] 中国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—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).

[36] 中国国家标准化管理委员会. 冷弯波纹钢管: GB/T 34567—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Cold-formed corrugated steel pipes: GB/T 34567—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(in Chinese).

[37] FANG Y, WANG Y, YANG L, 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.

[38] WANG Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 192-212.

[39] ILKI A, PEKER O, KARAMUK E, et al. FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(2): 169-188.

[40] ISSA M A, ALROUSAN R Z, ISSA M A. Experimental and parametric study of circular short columns confined with CFRP composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(2): 135-147.

[41] CHASTRE C, SILVA M A G. Monotonic axial behavior and modelling of RC circular columns confined with CFRP[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(8): 2268-2277.

[42] HU H, SERACINO R. Analytical model for FRP-and-steel-confined circular concrete columns in compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(3): A4013012.

[43] MIAO K, WEI Y, ZHANG X, et al. Performance of circular concrete-filled FRP-grooved steel composite tube columns under axial compression[J]. *Polymers*, 2021, 13(21): 3638.