



## FRP非均匀约束海水海砂混凝土方柱轴压性能

杨俊龙 王吉忠 卢世伟 张丽华 王子茹

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

YANG Junlong, WANG Jizhong, LU Shiwei, ZHANG Lihua, WANG Ziru

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210708.004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 圆角半径对碳纤维增强聚合物复合材料布约束型钢混凝土矩形短柱轴压性能的影响

Effect of corner radius on axial compressive performance of steel reinforced concrete rectangular short columns confined by carbon fiber reinforced polymer composite

复合材料学报. 2020, 37(4): 775–785 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190627.001>

#### 玄武岩纤维布约束高温损伤混凝土方柱轴压力学性能试验

Axial compressive behavior of post-heated square concrete columns wrapped by BFRP sheets: An experimental investigation

复合材料学报. 2019, 36(2): 469–481 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180611.001>

#### 硫酸盐环境中CFRP约束劣化混凝土柱的力学性能

Mechanical properties of CFRP confined pre-damaged concrete columns in sulfate environment

复合材料学报. 2021, 38(3): 966–978 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.002>

#### 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

Models for predicting axial compression behavior of fiber reinforced polymer-steel composite circular tube confined concrete

复合材料学报. 2019, 36(10): 2478–2485 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181218.001>

#### 新型复合材料“高强钢绞线网/ECC约束素混凝土”受压性能试验研究

Experimental study on compressive performance of new composite material “concrete confined with high-strength steel stranded wire meshes/ECC”

复合材料学报. 2021, 38(11): 3904–3911 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201225.002>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210708.004

# FRP 非均匀约束海水海砂混凝土方柱 轴压性能



分享本文

杨俊龙, 王吉忠\*, 卢世伟, 张丽华, 王子茹

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

**摘要:** 为扩大纤维增强树脂复合材料(FRP)-海水海砂混凝土(SSC)组合结构的应用范围, 改善FRP约束海水海砂混凝土柱脆性破坏特性, 对碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)非均匀约束海水海砂混凝土方柱的轴压性能进行了研究。试验结果表明: 由于CFRP非均匀约束试件中沿高度方向CFRP厚度并不相等, 因而整个破坏过程具有明显的预兆, 故脆性行为得到明显改善。相比于相同体积率下的全包裹和条带约束试件, 其具有更优越的力学性能, 尤其是在净距比较小的情况下。随着外部CFRP条带净距的下降和层数的增加, 试件的极限强度和变形能力显著提高。具体而言, 由于FRP条带净距的降低导致试件的极限强度增幅在5.4%~18.5%不等, 而在净距比固定状态下, 当外部条带层数增大1倍后, 极限强度与应变的最大增幅分别为15.8%和21.8%。最后基于试验数据, 对现有部分代表性应力-应变模型对于非均匀约束混凝土的适用性进行了讨论, 并给出了所有模型对于试件极限状态的预测精度与误差大小。

**关键词:** 纤维增强树脂复合材料; 非均匀约束; 约束混凝土; 海水海砂混凝土; 应力-应变模型

中图分类号: TU398+.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)06-2801-09

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

YANG Junlong, WANG Jizhong\*, LU Shiwei, ZHANG Lihua, WANG Ziru

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To facilitate the practical application of fiber-reinforced polymer (FRP) strengthened seawater sea-sand concrete (SSC) structures in marine infrastructures and alleviate the brittleness of abrupt failure of FRP confined SSC columns, the mechanical performance of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) nonuniformly wrapped square SSC columns under axial compression was explored. Test results show that the failure pattern of nonuniformly CFRP confined square SSC columns exhibits less brittle since the rupture of thinner CFRP band between two adjacent strips can provide a warning sign due to the inequivalent number of CFRP layers at different locations along the height of the specimens. Compared to the specimens uniformly wrapped with CFRP sheets and strips under the same volumetric ratio of CFRP, CFRP nonuniformly wrapped SSC columns possess superior mechanical properties, especially for the specimens with a smaller clear spacing. Besides, with the decrease of clear spacing ratio and the increment of the thickness of external CFRP strips, the ultimate strengths and strains of confined specimens increase obviously. In specific, the enhancement of ultimate strengths ranges from 5.4%-18.5% as the decreasing of clear spacing ratio. Moreover, under the same clear spacing ratio, the maximum ultimate strength improvement and strain improvement are equal to 15.8% and 21.8% respectively when the thickness of external CFRP strips doubles. Finally, several representative stress-strain models were selected to examine their validity in predicting the ultimate conditions of FRP nonuniformly wrapped concrete and the accuracy and reliability of each model were

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-06-26; 录用日期: 2021-06-30; 网络首发时间: 2021-07-08 16:33:13

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210708.004>

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(DUT20JC02)

通信作者: 王吉忠, 博士, 教授, 研究方向为FRP-混凝土组合结构 E-mail: [wangjz@dlut.edu.cn](mailto:wangjz@dlut.edu.cn)

引用格式: 杨俊龙, 王吉忠, 卢世伟, 等. FRP 非均匀约束海水海砂混凝土方柱轴压性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2801-2809.

YANG Junlong, WANG Jizhong, LU Shiwei, et al. Axial compressive behavior of FRP nonuniformly wrapped seawater sea-sand concrete in square columns[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2801-2809(in Chinese).

also assessed.

**Keywords:** FRP; nonuniform confinement; confined concrete; seawater sea-sand concrete; stress-strain model

近年来，随着海洋工程的大规模建设与传统建筑资源的过度开发，关于海水海砂混凝土 (Seawater sea-sand concrete, SSC) 的研究受到了国内外的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。合理地开发、利用丰富的海水和海砂资源来拌制混凝土，一方面能够缓解对于传统淡水和河砂资源的开发压力，做到真正的就地取材，同时还能够节省大量的运输成本，有效缩短项目工期，因而具有十分重要的经济价值和现实意义。但海水与海砂中的大量氯离子将显著加速钢材的锈蚀，故需要采取适当的措施来减缓或消除锈蚀问题<sup>[3]</sup>。

鉴于纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 具有较优越的耐腐蚀性，且同时兼具高强重比，易于施工等特性，故近年来被广泛用于结构工程中<sup>[4-6]</sup>。因此若将 FRP 替代钢材作为增强材料与海水海砂混凝土相结合，形成 FRP-SSC 组合结构，便可从源头上消除钢材锈蚀的问题<sup>[7]</sup>。由于将 FRP 作为横向约束布置在柱的环向能够大幅度提高构件的极限强度与变形能力，故有关 FRP 约束 SSC 柱的研究吸引了大量学者的关注<sup>[8-12]</sup>。Chen 等<sup>[8]</sup> 和 Zeng 等<sup>[9]</sup> 分别对碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 及聚对苯二甲酸乙二醇酯-纤维增强树脂复合材料 (PET-FRP) 约束 SSC 柱的轴压性能展开了相应的试验研究，发现海水或(/和)海砂的引入对 FRP 约束 SSC 柱的短期力学性能几乎没有影响。而 Yang 等<sup>[10]</sup> 首次探究了 CFRP 条带约束 SSC 柱的力学行为，发现 CFRP 条带约束形式下也存在类似的结论，且刚度与净距比是影响试件应力-应变行为最重要的因素。

但在上述研究中，所有试件均为传统的全包裹或条带约束，故破坏呈现出较明显的脆性特征。为改善这一行为，使最终破坏具有一定的预兆，Pham 等<sup>[13]</sup> 提出了非均匀约束的概念，即非均匀约束可以视为传统的全包约束与条带约束的叠加模式，其中全包 FRP 布置在底层，FRP 条带在外侧。为方便后续讨论，本文将外部条带所在的部分称为主纤维条带，而相邻两个主纤维条带之间的部分称为次纤维条带，故沿高度方向，主纤维条带处的纤维总厚度要大于次纤维条带处，因此可以预测，次纤维条带将先于主纤维条带破坏，从而使破坏呈现出较明显的预兆。但目前此类研

究仅局限于普通混凝土，并只考虑了主纤维条带与次纤维条带宽度相同且二者的数值均较小的特殊情况，故 Yang 等<sup>[14]</sup> 前期考察了不同净距比对 CFRP 非均匀约束 SSC 圆柱轴压性能的影响，结果表明，采用非均匀约束能够更加充分地发挥出 FRP 的材料性能，且主纤维条带间净距对于试件的应力-应变行为有重要影响。而 Li 等<sup>[15]</sup> 则利用数字图像相关 (Digital image correlation, DIC) 技术明确了倒角半径对 CFRP 约束 SSC 柱环向应变分布均匀性的影响，因此可以预见，在 FRP 非均匀约束方形 SSC 试件中，综合考虑竖向与横向的“非均匀性”，其受力行为将变得更加复杂。然而，目前并未有学者对此进行系统的研究。

为此，本文将以 CFRP 非均匀约束 SSC 方柱为对象，着重探究其在轴向受压状态下的力学行为，详细考察各个试验因素对破坏模式，轴向应力-应变行为及极限状态的影响，同时基于试验数据验证现有应力-应变模型对于非均匀约束混凝土的适用性，并给出相应的设计建议。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

设计并制作了 20 个边长 150 mm，高 300 mm 的 CFRP 非均匀约束 SSC 方柱进行轴压试验。为减小角部曲率不连续性对试件力学性能的影响，所有试件角部均进行了倒角处理，倒角半径  $r_c$  为 20 mm。试件相关信息详见表 1。可以发现，试件按照外部 CFRP 条带层数  $n_p$  的不同被分为了两组，每组共计 10 个试件，对应 5 种不同的条带净距比  $s/b$ ，如图 1 所示，分别为 0.2、0.4、0.5、0.6 和 0.7，而为减小试验数据的离散性，在特定的试验参数下，共制作了两个完全相同的试件。

所有试件均在浇筑完混凝土 2 天后拆模，并在标准环境下养护 28 天后，用传统的湿法工艺进行外部 CFRP 布的粘贴，无论是底层 CFRP 布还是外部 CFRP 条带，其纤维的主要方向均沿环向布置。为避免约束柱出现由于 CFRP 布脱粘导致的预先破坏，在粘贴达到规定的层数后，另附 150 mm 的重叠搭接区域。待 CFRP 布粘贴完毕后，在实验室环境下继续养护直至试验开始。

为便于后续讨论，每个试件均指定一个编号，其命名方式则是由字母与数字构成，如表 1 所示。

表 1 碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)非均匀约束海水砂混凝土(SSC)件参数和试验结果

Table 1 Details and test results of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) nonuniformly wrapped seawater sea-sand concrete (SSC) specimens

Group	Specimen ID	<i>w/mm</i>	<i>s/mm</i>	<i>s/b</i>	<i>n<sub>p</sub>/ply</i>	Test results						
						<i>f<sub>cc</sub>/MPa</i>	<i>f<sub>cc</sub>/f<sub>co</sub></i>	<i>f<sub>cu</sub>/MPa</i>	<i>f<sub>cu</sub>/f<sub>co</sub></i>	<i>ε<sub>cu</sub>/%</i>	<i>ε<sub>cu</sub>/ε<sub>co</sub></i>	
1	C(W3A2F)S-1	30	105	0.7	2	47.4	1.31	42.6	1.17	1.21	6.05	1.08
	C(W3A2F)S-2	30	105	0.7		49.2	1.36	43.7	1.20	1.39	6.93	1.17
	C(W4A2F)S-1	40	90	0.6		51.3	1.41	45.8	1.26	1.49	7.46	1.19
	C(W4A2F)S-2	40	90	0.6		50.7	1.40	45.1	1.24	1.37	6.83	1.20
	C(W5A2F)S-1	50	75	0.5		52.6	1.45	49.5	1.36	1.57	7.86	1.25
	C(W5A2F)S-2	50	75	0.5		51.9	1.43	46.9	1.29	1.43	7.14	1.02
	C(W6A2F)S-1	60	60	0.4		52.7	1.45	50.5	1.39	1.87	9.37	1.20
	C(W6A2F)S-2	60	60	0.4		51.8	1.43	48.8	1.34	1.72	8.62	1.15
	C(W3B2F)S-1	30	30	0.2		52.4	1.44	50.4	1.39	1.97	9.83	1.28
	C(W3B2F)S-2	30	30	0.2		53.0	1.46	51.9	1.43	2.03	10.15	1.30
2	C(W3A4F)S-1	30	105	0.7	4	50.5	1.39	50.5	1.39	1.62	8.08	1.11
	C(W3A4F)S-2	30	105	0.7		49.0	1.35	49.0	1.35	1.45	7.27	0.92
	C(W4A4F)S-1	40	90	0.6		51.7	1.43	51.7	1.43	1.62	8.12	1.22
	C(W4A4F)S-2	40	90	0.6		53.6	1.48	53.6	1.48	1.44	7.22	1.13
	C(W5A4F)S-1	50	75	0.5		53.0	1.46	53.0	1.46	1.74	8.69	1.16
	C(W5A4F)S-2	50	75	0.5		55.1	1.52	55.1	1.52	1.92	9.59	1.17
	C(W6A4F)S-1	60	60	0.4		58.0	1.60	58.0	1.60	2.23	11.16	1.21
	C(W6A4F)S-2	60	60	0.4		56.8	1.56	56.8	1.56	1.91	9.55	1.15
	C(W3B4F)S-1	30	30	0.2		59.2	1.63	59.2	1.63	2.17	10.87	1.26
	C(W3B4F)S-2	30	30	0.2		58.7	1.62	58.7	1.62	2.54	12.71	1.23

Notes: In specimen ID: C—CFRP; W3, W4, W5, W6—Width of CFRP are 30 mm, 40 mm, 50 mm and 60 mm, respectively; A, B—CFRP number are 3 and 5, respectively; 2, 4—Layer number of CFRP; F—Bottom is wrapped with CFRP; S—SSC; 1, 2—Specimen number.  $f_{co}$ —Compressive strength of unconfined concrete; *w*, *s*—Width and clear spacing of primary strips, respectively; *b*—Width of section edge; *n<sub>p</sub>*—Number of layers of external CFRP strips; *f<sub>cc</sub>*—Peak strength of confined concrete; *f<sub>cu</sub>*,  $\varepsilon_{cu}$ —Ultimate strength and corresponding strain of confined concrete, respectively;  $\varepsilon_{h,rup}$ —Hoop rupture strain of primary strips at the midheight outside the overlapping zone.

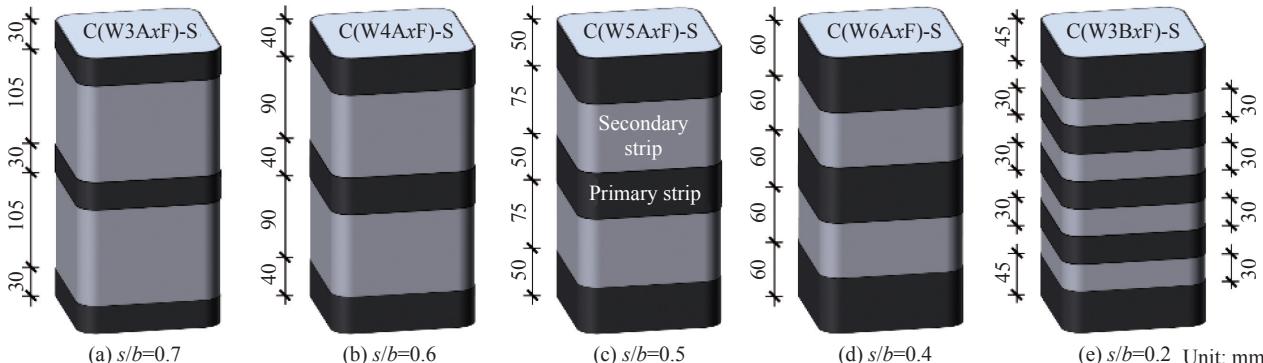


图 1 CFRP 非均匀约束 SSC 试件加固方案

Fig. 1 Nonuniform wrapping schemes of CFRP nonuniformly wrapped SSC tested specimens

第一个字母 C 表示外部约束材料为 CFRP，中部括号内第一个字母和其后的数字表示外部 CFRP 条带的宽度，即 W3、W4、W5、W6 分别代表 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 宽的外部条带，第二个字母表示条带个数 (A 表示 3 个 CFRP 条带，B 表示 5 个 CFRP 条带)，其后的数字表示条带层数，后续的字母 F 则表示底部的一层全包 CFRP，括号外则用字母 S 表示内部材料为 SSC。最后，连字

符后的数字则用来区分两个相同的试件。

## 1.2 材料性能

本文使用的原样海水与海砂材料性质及海水海砂混凝土的配合比详见 Yang 等<sup>[16]</sup>前期的研究。试验时对 3 个非约束棱柱体试件进行了测试，经测得平均抗压强度  $f_{co}$  与其对应的应变  $\varepsilon_{co}$  分别为 36.3 MPa 和 0.002。为能够准确获得 CFRP 的材料性能，按照 ASTM D3039/D3039M<sup>[17]</sup> 中的相关规定

对标准尺寸试样进行了拉伸性能测试，试验结果详见文献 [16]。

### 1.3 试验装置与测点布置

图 2 详细展示了本文所采用的试验装置。所有试件均在大连理工大学结构试验室 10 000 kN 液压伺服试验机上进行。试件下方的荷载传感器用于实时测量荷载，试件上部球铰能够通过微小的转动有效减小偶然偏心的影响。试验采用位移加载模式进行单调加载直至破坏，加载速率为 0.5 mm/min。

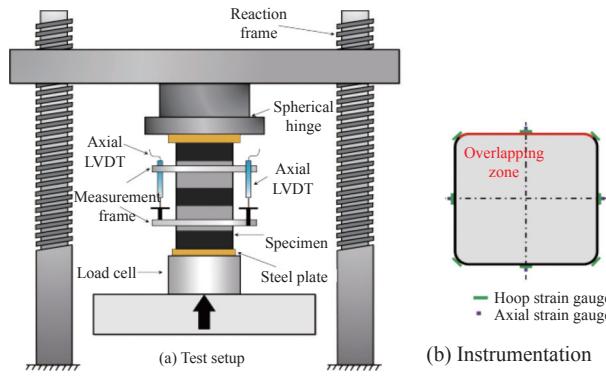


图 2 加载装置与测点布置

Fig. 2 Test setup and instrumentations

为能够准确得到试件的轴向变形，共利用 2 个位移计 (量程 50 mm) 和 4 个竖向应变片 (标距 20 mm) 监测试件在整个加载过程中的轴向位移与应变。除此之外，还在试件中部条带上沿周向布置了 8 个标距为 20 mm 的环向应变片，其中 3 个位于 CFRP 搭接区内，应变片位置具体详见图 2。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 CFRP 非均匀约束 SSC 破坏模式

加载初期，所有试件并未出现明显的变化，而在试件轴向应力达到非约束混凝土强度之后，随着轴向变形的增加，试件开始出现较明显的横向变形，外部 CFRP 开始逐渐发挥作用，当荷载接近极限荷载时，试件表面 CFRP 间断性地发出较明显的响声，紧接着试件中部附近的次纤维条带处首先发生了撕裂，且破坏位置均在角部附近。但由于试件中部的主纤维条带厚度较大，故整个试件仍能够承担一定的轴向荷载，从而使整个破坏过程并不会像传统 CFRP 全包约束混凝土柱那样较突然。最终，伴随着一声巨响，试件中部的 CFRP 条带发生断裂，试件破坏。上述破坏过程充分体现了采用非均匀约束的优势，即，由于外

部 CFRP 条带的存在，使构件能够在最终剧烈破坏之前，展现出一定的预兆，以减少因突然的脆性破坏而造成的损失。

图 3 列举了部分代表性试件的破坏模式。可以发现，不论试件外部 CFRP 条带的净距比和厚度如何，试件最终的破坏模式十分相似，破坏位置均发生在搭接区以外的角部区域。仔细观察发现，随着净距比的减小，破坏位置更加集中在试件中部区域，这是由于一方面，随着条带之间净距的减小，次纤维条带的宽度随之下降，故最终可能发生破坏的 CFRP 面积更小，更重要的是，随着条带净距比的减小，相邻条带之间的“拱效应”<sup>[18]</sup> 逐渐受到抑制，因而导致主、次纤维条带处所产生的横向膨胀的均匀性差异显著下降，从而导致其破坏较集中地出现在中部。除此之外，可以发现，外部 CFRP 条带层数增大 1 倍后，无论净距比如何，所有试件的破坏区域均变得更大，故表明，环向约束应力的增加会使最终的破坏变得更加剧烈。



(a) C(W3A2F)S-2 (b) C(W3A4F)S-2 (c) C(W3B2F)S-2 (d) C(W3B4F)S-2

图 3 CFRP 非均匀约束 SSC 试件破坏模式

Fig. 3 Failure modes of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens

### 2.2 CFRP 非均匀约束 SSC 轴向应力-应变曲线

图 4 为所有试件的轴向应力-轴向应变曲线。可以发现，对于组 1 中的试件，加载初期，由于试件整体轴向变形较小，应力-应变关系呈现出较明显的线性行为，而随着轴向变形的增加，外部 CFRP 约束开始逐渐发挥作用，使试件在达到峰值应力之前出现了一段过渡段，而峰后则呈现出软化趋势，从而表明现有约束形式无法对核心混凝土提供充分的约束，但随着外部 CFRP 条带净距的减小，峰后应力的下降速度明显减缓，这说明净距比的减小直接导致了 CFRP 刚度增加，从而改善了试件的峰后行为。另外值得注意的是，所有试件的峰值强度均要高于非约束混凝土强度，这是由于外部 CFRP 条带的存在，使外部约束沿高度方向呈现出明显的非均匀性，故导致转折段较长，从而提高了峰值点的轴向应力与相应的应

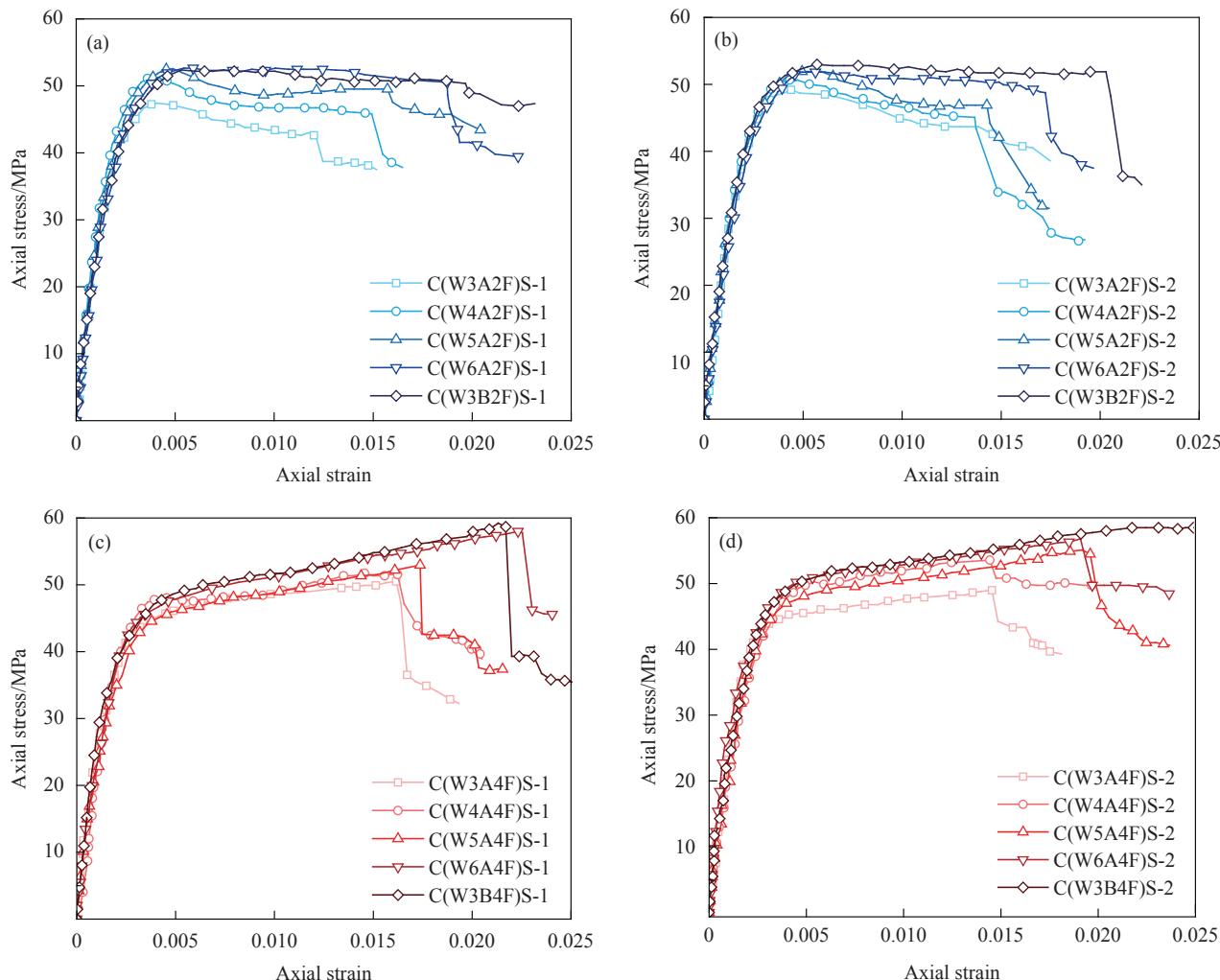


图 4 CFRP 非均匀约束 SSC 试件轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Axial stress-axial strain curves of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens

变。而当外部 CFRP 条带的体积率增大 1 倍后, 所有试件的应力-应变行为直接转化为由一过渡段连接的双线性行为, 表明试件整体的纤维体积率能够满足最小约束数量的需求, 同样, 第二线性段的斜率也与外部 CFRP 条带的净距比相关。

为方便后续讨论, 按照 Wei 等<sup>[19]</sup>的建议, 将试件次纤维条带开始断裂的时刻定义为极限状态, 对应的强度和应变分别为极限强度与极限应变。可以发现, 绝大多数试件的应力-应变曲线在达到极限状态后便呈现明显的阶梯形下降, 这是因为试件达到极限荷载后, 次纤维条带出现断裂, 所以导致承载力出现骤降, 但由于试件中部 CFRP 主纤维条带还未断裂, 故试件仍能够继续承担荷载, 最终中部 CFRP 条带断裂, 试件破坏, 这与上一节中的破坏模式是一致的。表 1 给出了主要的试验结果, 整体来看, 外部 CFRP 条带层数及

其净距比对于试件的极限应力和极限应变有着重要影响, 组 1 中试件极限强度与非约束混凝土强度的比值随着净距比的减小在 1.17~1.43 之间波动, 而名义极限应变则在 6.05~10.15 之间变化, 而组 2 试件的名义极限强度与极限应变则增加至 1.35~1.63 与 7.22~12.71。接下来将详细讨论各试验参数(净距比、CFRP 层数和加固形式)对试件应力-应变曲线及极限状态等结果的影响。

### 2.3 约束形式对 CFRP 非均匀约束 SSC 柱轴压性能影响

为减小试验误差的影响, 后续对极限状态的讨论将采用两试件的平均值进行描述。图 5 为相同纤维体积率下, 不同约束形式试件的极限状态和应力-应变曲线的变化情况。值得注意的是, 图中全包约束试件 F2、条带约束试件 W6A4 和 W3B4 均来自 Yang 等<sup>[16]</sup>的研究结果。

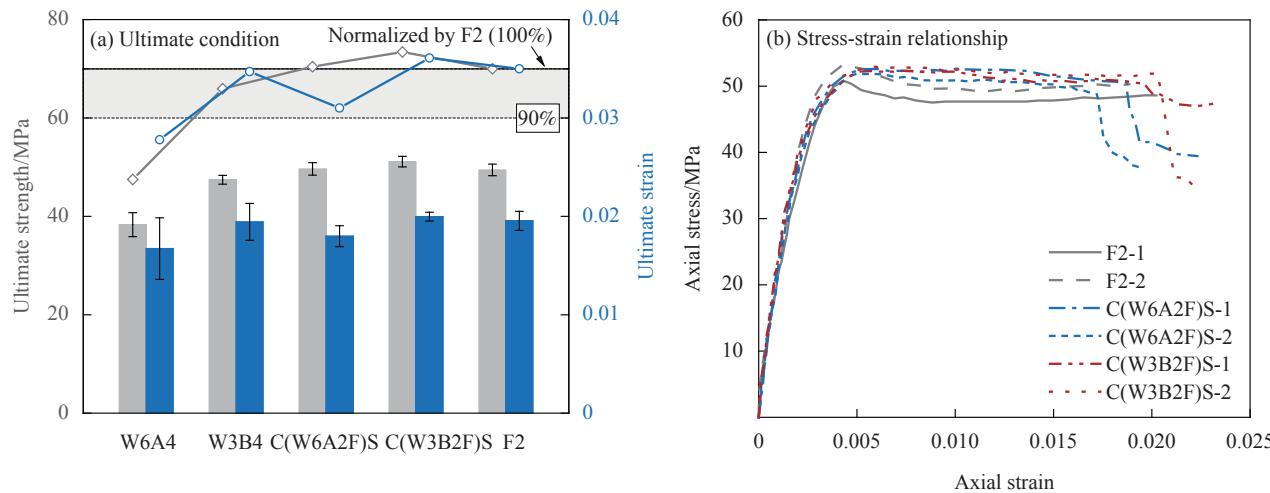


图 5 不同约束形式下 CFRP 非均匀约束 SSC 试件试验结果对比

Fig. 5 Comparison of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens under different wrapping schemes

可以发现，对于方形试件而言，净距较小的非均匀约束的约束效果要优于其他两种约束形式。具体来看，试件 C(W6A2F)S、C(W3B2F)S 的极限强度分别是全包约束试件 F2 的 100.4%、103.4%，而相应极限应变则是 F2 的 92.0%、102.2%，而相比于 W6A4 和 W3B4，非均匀约束试件的极限强度分别增大了 29.6% 和 7.8%，极限应变分别增大了 7.5% 和 2.8%，故表明，在相同纤维体积率下，将少量 CFRP 布置在条带约束柱的间距处能够提高试件的力学性能。更重要的是，通过图 5(b)可以发现，采用非均匀约束形式还能够改善试件的峰后行为，有效提高试件的变形能力，且由于底层 CFRP 布的存在，使最终的破坏具有层次性，次纤维条带的断裂能够为最终的剧烈破坏提供一定的预兆，因而改善了传统 FRP 约束试件的脆性破坏特征。

#### 2.4 净距比对 CFRP 非均匀约束 SSC 柱轴压性能的影响

根据表 1 中的试验结果，现将净距比对非均匀约束试件极限状态的影响绘制于图 6 中。可以看出，随着净距比的增加，无论组 1 还是组 2 中的试件，其极限强度与极限应变均出现明显降低，组 1 中试件 C(W6A2F)S、C(W5A2F)S、C(W4A2F)S 和 C(W3A2F)S 的极限强度相较于 C(W3B2F)S 分别降低了 2.9%、5.7%、11.1% 和 15.6%，而当外部 CFRP 条带厚度增大一倍后，试件的极限强度相较于 C(W3B4F)S 同样减小 2.6%~15.6% 不等。另一方面，组 1 中试件的极限应变相较于 C(W3B2F)S 分别降低了 10.0%、24.9%、28.5% 与 35.1%，而组 2 中试

件的极限应变相较于 C(W3B4F)S 则减小了 12.2%~35.0%。造成这一现象的原因是由于净距比的增加，导致试件整体的纤维体积率直接降低，从而减小了约束效应，更重要的是，过大的条带净距将加剧沿高度方向横向变形的不均匀性，故间接削弱了外部 CFRP 对核心混凝土的约束效果。因此，为能够充分改善试件的力学行为，采用净距更小的外部 CFRP 条带进行非均匀约束更加合理。

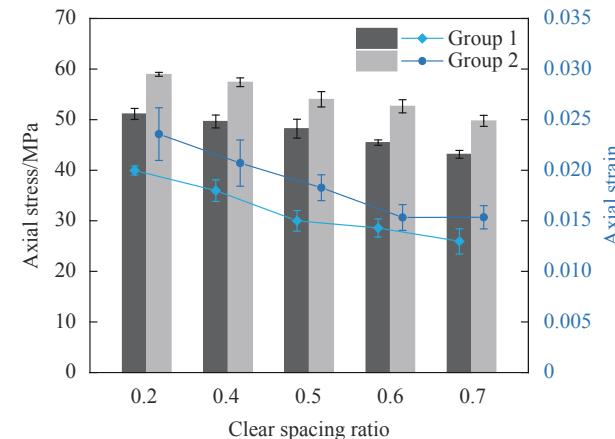


图 6 不同净距比下 CFRP 非均匀约束 SSC 试件极限状态对比

Fig. 6 Comparison of ultimate conditions of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens under different clear spacing ratios

#### 2.5 CFRP 体积率对 CFRP 非均匀约束 SSC 柱轴压性能的影响

根据图 4 可知，当外部 CFRP 层数增大 1 倍后，所有试件的应力-应变行为均由之前的峰后下降型转换为了双线性强化型。通过图 6 可以发现，在相同约束形式下，增加外部 CFRP 条带的厚度同

样能够提高约束效率, 进而改善试件的极限强度与变形。具体来看, 当外部 CFRP 条带层数增大 1 倍后, 不论净距比如何变化, 试件的极限强度均增加了 15% 左右, 而极限应变则随着净距比的降低分别增加了 18.1%、7.0%、21.8%、15.3% 和 17.8%, 考虑到极限应变的变异系数要大于极限强度, 故可以认为对于 CFRP 非均匀约束方形试件而言, 依靠外部更多的条带层数所产生的极限强度与应变增量对于净距比的变化并不敏感。但上述这一结果仅仅是基于本文中的试验结果得到, 而为了获得具有更加普遍性的规律, 仍需后续大量的试验研究。

### 3 CFRP 非均匀约束 SSC 极限状态预测

目前, 尽管关于 FRP 约束混凝土的研究已较充分, 并已建立了大量理论模型, 但绝大多数模型均是针对传统的 FRP 全包约束混凝土提出, 并未考虑过外部 FRP 约束形式的影响, 而对于 FRP 非均匀约束形式的讨论则更少, 故在此背景下, 本节将重点讨论约束形式对现有应力-应变模型预测精度的影响。

首先, 为能够准确描述非均匀约束混凝土中约束应力的计算方法, Yang 等<sup>[14]</sup> 在前期的研究中提出了“非均匀约束系数”  $k_n$  的概念, 并将其考虑在了有效约束应力  $f_{l,a}$  的计算中, 如下所示:

$$f_{l,a} = f_{l,a}^F + f_{l,a}^P = \frac{2E_{frp}t_F}{D}\varepsilon_{h,rup} + k_n \frac{2E_{frp}t_P w}{D(w+s)}\varepsilon_{h,rup} \quad (1)$$

$$k_n = \left[ 1 - \frac{1}{2D}s(1-\alpha) + \frac{2t_F}{D} \right]^2 \leq 1 \quad (2)$$

其中:  $f_{l,a}^F$  和  $f_{l,a}^P$  分别为底层 FRP 布和外部 FRP 条带提供的有效约束应力;  $D$  为截面的等效直径;  $E_{frp}$  为 FRP 的弹性模量;  $t_F$  和  $t_P$  分别为底层 FRP 布和外部 FRP 条带的厚度;  $w$  和  $s$  分别为 FRP 条带的宽度与净距;  $\varepsilon_{h,rup}$  为 FRP 的断裂应变;  $\alpha$  为计算系数。

对于方形截面而言, 由于截面曲率变化的不连续性, 使约束应力沿整个截面的分布并不均匀, 角部约束应力明显大于截面中部的相应值, 故相关学者提出了多种方式来考虑约束应力沿截面分布的不均匀性<sup>[20]</sup>, 最常见的是采用以下 2 个系数(即  $k_{s1}$  和  $k_{s2}$ )对约束应力进行折减。为方便后续表述, 下文均简称为“形状系数”:

$$k_{s1} = 1 - \frac{2(b-2r_c)^2}{3[b^2-(4-\pi)r_c^2]} \quad (3)$$

$$k_{s2} = \frac{2r_c}{b} \quad (4)$$

其中,  $b$  和  $r_c$  分别为截面边长和倒角半径。

由于目前关于非均匀约束混凝土柱的研究大多针对的是圆形截面, 仅 Mai 等<sup>[21]</sup> 讨论了非均匀约束在方形截面中的应用, 但其并未提出适用于方形截面 FRP 非均匀约束混凝土的应力-应变预测模型。为了解决这一问题, 将上述“非均匀约束系数”和“形状系数”引入部分现有模型中, 以考察这些模型对于方形截面非均匀约束混凝土的适用性。本文列举了 Triantafillou 等<sup>[22]</sup>、Lam 等<sup>[20]</sup>、Harajli 等<sup>[23]</sup>、Youssef 等<sup>[24]</sup>、Wei 等<sup>[19]</sup>、Lim 等<sup>[25]</sup>、Guo 等<sup>[26]</sup> 和 Yang 等<sup>[16]</sup> 8 个代表性的设计模型, 有关各个模型的具体形式详见原文。

根据相关文献可知, 内部混凝土的类型(普通混凝土/海水砂混凝土)对于 FRP 约束混凝土的轴向性能影响并不大<sup>[9]</sup>, 故接下来将利用上述模型对本文中的非均匀约束方形试件的极限状态进行验证, 并采用平均绝对误差(AAE)、标准差(SD)及平均值(AVE)定量地评价各个模型的预测效果, 相关模型的预测结果详见图 7 和图 8。

图 7 和图 8 表明, 对于极限强度而言, Lim 等<sup>[25]</sup>、Wei 等<sup>[19]</sup> 和 Yang 等<sup>[16]</sup> 均可以给出较准确的预测, 这是因为前两个模型是基于大量试验数据回归得到, 所以此类模型的适用性更强, 而 Yang 等<sup>[16]</sup> 则在模型中的约束刚度比  $\rho_K$  中考虑了条带约束对于纤维体积率和纵向约束非均匀性的影响, 因此将式(2)中的“非均匀约束系数”直接引入模型后能够得到较准确的预测结果, 而 Triantafillou 等<sup>[22]</sup> 和 Youssef 等<sup>[24]</sup> 却分别过高估和低估了非均匀约束方柱的极限强度, 其余模型则表现相似。另一方面, 所有模型对于极限变形的预测精度则明显下降, Wei 等<sup>[19]</sup>、Lam 等<sup>[20]</sup> 和 Harajli 等<sup>[23]</sup> 显著低估了非均匀约束试件的变形能力, 而 Lim 等<sup>[25]</sup> 的预测误差虽然要小于 Wei 等<sup>[19]</sup> 的, 但预测结果过于离散, 并不是十分可靠, 反观 Yang 等<sup>[16]</sup> 模型, 虽然预测结果与 Guo 等<sup>[26]</sup> 的较接近, 但其能够同时对极限强度和极限变形做出合理预测, 故综上所述, 在所挑选的 8 个代表性模型中, Yang 等<sup>[16]</sup> 模型具有最好的预测效果, 紧接着是 Lim 等<sup>[25]</sup> 模型和 Guo 等<sup>[26]</sup> 模型。鉴于目前关于非均匀约束模式的研究并不多, 相关试验数据亦十分匮乏, 故为能够得到具有更高精度的应力-应变模型, 仍需要开展大量的试验研究与理论分析。

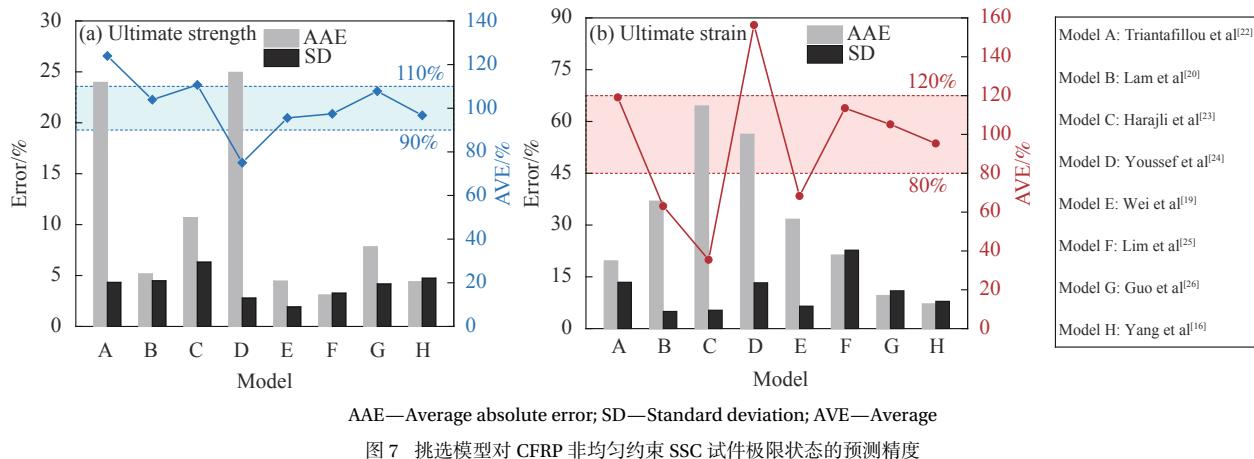


图 7 挑选模型对 CFRP 非均匀约束 SSC 试件极限状态的预测精度

Fig. 7 Predicted accuracy of selected models in calculating ultimate conditions of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens

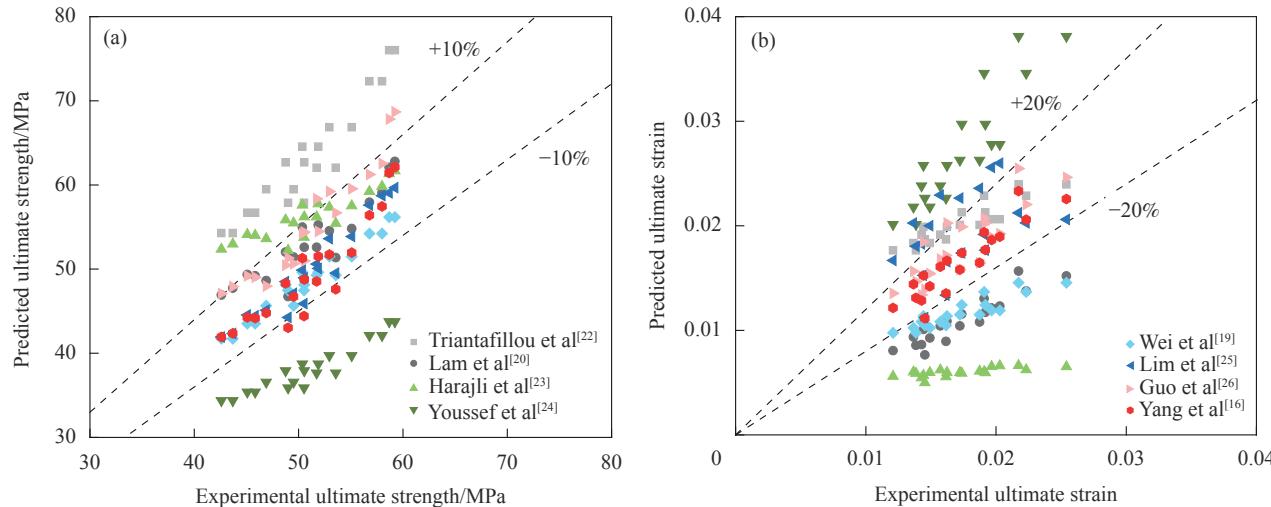


图 8 各模型对 CFRP 非均匀约束 SSC 试件极限状态预测值与试验值对比

Fig. 8 Comparison of ultimate conditions between test results and theoretical predictions of CFRP nonuniformly wrapped SSC specimens

## 4 结论

(1) 采用非均匀约束形式能够显著改善传统碳纤维增强复合材料(CFRP)约束混凝土脆性破坏的特征,使破坏具有一定的预兆性,而随着外部CFRP条带净距比的减小和层数的增加,最终的破坏变得更加剧烈,且多集中在试件中部搭接区外的角部区域。

(2) 由于 CFRP 约束应力沿高度方形分布的不均匀性,导致约束混凝土的应力-应变曲线呈现出较明显的过渡段,且当外部 CFRP 条带厚度增大一倍后,所有试件的峰后行为均由软化型转变为强化型。而与相同体积率下的全包约束和条带约束试件相比,净距比较小(0.2)的非均匀约束形式具有更高的约束效率。

(3) 外部 CFRP 条带净距比和约束刚度对于 CFRP 非均匀约束试件的极限状态具有重要影响,

随着净距比的下降,组 1 和组 2 中试件的极限强度和极限应变均有明显增加,其中极限应变最大增量分别为 53.8% 和 53.5%,而在相同净距比下,当外部 CFRP 条带约束刚度增大一倍后,相应极限强度和极限应变的最大增量为 15.8% 和 21.8%。

(4) 将“非均匀约束系数”和“形状系数”引入至现有的 8 个具有代表性的纤维增强树脂复合材料(FRP)约束混凝土设计模型中,结果发现,Yang 等<sup>[16]</sup>模型具有最好的预测效果。但由于目前有关 FRP 非均匀约束混凝土方柱轴压性能的试验数据十分匮乏,故仍需要开展大量的试验研究与理论分析,以提出更加精确和合理的应力-应变关系模型。

## 参考文献:

- ical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(14): 3100-3120.
- [2] 卢予奇, 赵羽习. 海砂颗粒形态评价与海拌混凝土性能研究[J]. *海洋工程*, 2020, 38(6): 124-130.
- LU Y Q, ZHAO Y X. Morphological evaluation of sea sand particles and basic properties of marine-mixed concrete[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(6): 124-130(in Chinese).
- [3] XIAO J, QIANG C, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1101-1111.
- [4] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(12): 1-11.
- TENG J G. New-material hybrid structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(12): 1-11(in Chinese).
- [5] 张家玮, 邵利君, 刘生纬, 等. 硫酸盐环境中CFRP约束劣化混凝土柱的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(3): 996-978.
- ZHANG J W, SHAO L J, LIU S W, et al. Mechanical properties of CFRP confined pre-damaged concrete columns in sulfate environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(3): 996-978(in Chinese).
- [6] 王桢, 亢景付, 王堃, 等. CFRP锚钉锚固长度对FRP加固混凝土构件拉拔性能影响的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(4): 1365-1370.
- WANG Z, KANG J F, WANG K, et al. Experimental investigation on the pullout properties of concrete structures strengthened by FRP influenced by anchorage depth[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(4): 1365-1370(in Chinese).
- [7] 冯鹏, 王杰, 张枭, 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 P, WANG J, ZHANG X, et al. Development and innovation on combining FRP and sea sand concrete for structures[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014, 12: 13-18(in Chinese).
- [8] CHEN G, LIU P, JIANG T, et al. Effects of natural seawater and sea sand on the compressive behaviour of unconfined and carbon fibre-reinforced polymer-confined concrete[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(14): 3102-3116.
- [9] 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.
- [10] YANG J, WANG J, WANG Z. Axial compressive behavior of partially CFRP confined seawater sea-sand concrete in circular columns-Part I: Experimental study[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112373.
- [11] 柏佳文, 魏洋, 张依睿, 等. 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[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 3084-3093.
- BAI J W, WEI Y, ZHANG Y R, et al. Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 3084-3093(in Chinese).
- [12] LI Y L, ZHAO X L, RAMAN R S. Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 977-993.
- [13] PHAM T M, HADI M N S, YOUSSEF J. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(6): 04015015.
- [14] YANG J L, WANG J, WANG Z. Behavior and modeling of CFRP nonuniformly wrapped circular seawater sea-sand concrete (SSC) columns under axial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123887.
- [15] LI P, YANG T, ZENG Q, et al. Axial stress-strain behavior of carbon FRP-confined seawater sea-sand recycled aggregate concrete square columns with different corner radii[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113589.
- [16] YANG J, LU S, WANG J, et al. Behavior of CFRP partially wrapped square seawater sea-sand concrete columns under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111119.
- [17] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M[S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.
- [18] SHEIKH S, UZUMERI S. Strength and ductility of tied concrete columns[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(5): 1079-1102.
- [19] WEI Y Y, WU Y F. Unified stress-strain model of concrete for FRP-confined columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1): 381-392.
- [20] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2003, 22(13): 1149-1186.
- [21] MAI A D, SHEIKH M N, YAMAKADO K, et al. Nonuniform CFRP wrapping to prevent sudden failure of FRP confined square RC columns[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(6): 04020063.
- [22] TRIANTAFILLOU T, MATTHYS S, AUDENAERT K. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures[M]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2001.
- [23] HARAJLI M H, HANTOUCH E, SOUDKI K. Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(5): 672-682.
- [24] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(5): 614-628.
- [25] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Design model for FRP-confined normal-and high-strength concrete square and rectangular columns[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2014, 66(20): 1020-1035.
- [26] GUO Y C, XIAO S H, LUO J W, et al. Confined concrete in fiber-reinforced polymer partially wrapped square columns: Axial compressive behavior and strain distributions by a particle image velocimetry sensing technique[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4418.