

FRP-ECC复合约束混凝土圆柱反复受压力学性能

惠迎新 王文炜 朱忠锋

Cyclic compression behavior of FRP-ECC confined concrete cylinder

HUI Yingxin, WANG Wenwei, ZHU Zhongfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220516.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验

Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites

复合材料学报. 2019, 36(8): 1957–1967 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181101.001>

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>

循环荷载作用下超高性能混凝土的轴拉力学性能及本构关系模型

Axial tensile mechanical properties and constitutive relation model of ultra-high performance concrete under cyclic loading

复合材料学报. 2021, 38(11): 3925–3938 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201218.002>

基于Griffith破坏准则的FRP约束未损伤混凝土和损伤混凝土的抗压强度统一模型

Unified strength model based on Griffith failure criterion for FRP-confined undamaged and damaged concrete

复合材料学报. 2020, 37(9): 2358–2366 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191223.002>

玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能

Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures

复合材料学报. 2018, 35(8): 2002–2013 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170926.002>

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>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220516.004

FRP-ECC 复合约束混凝土圆柱反复受压力学性能



分享本文

惠迎新^{1,4}, 王文炜², 朱忠锋^{*3}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 东南大学 交通学院, 南京 211189; 3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 深圳 518060; 4. 宁夏交通建设股份有限公司, 银川 750004)

摘要: 考虑核心柱混凝土强度等级、碳纤维增强树脂复合材料 (FRP) 网格层数、反复荷载形式等因素, 对 FRP 网格与工程水泥基复合材料 (ECC) 复合增强混凝土圆柱进行了轴向受压试验, 研究约束圆柱的承载力和变形能力。试验结果表明, 约束柱的破坏形态表现为 FRP 柔性网格断裂; 随着网格层数的增加, 约束柱的极限荷载和变形性能分别提高 2%~35% 和 77%~145%; 随着核心混凝土强度等级的提高, 复合约束柱的极限承载力提高幅度降低。此外, 根据试验结果并结合 FRP 约束混凝土的应力-应变关系模型, 本文针对 FRP-ECC 复合约束圆柱在反复荷载作用下提出了相应的强度模型和应力-应变关系包络线模型。分析结果表明, 模型所得轴向应力-轴向应变及轴向应力-环向应变关系曲线均与试验值吻合良好。

关键词: 反复荷载; FRP 网格; ECC; 约束圆柱; 应力-应变模型; 混凝土圆柱

中图分类号: TB528; TU599 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5586-13

Cyclic compression behavior of FRP-ECC confined concrete cylinder

HUI Yingxin^{1,4}, WANG Wenwei², ZHU Zhongfeng^{*3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Ningxia Communications Construction CO., LTD., Yinchuan 750004, China)

Abstract: Considering the strength grade of core concrete, reinforcement layer of fiber-reinforced polymer (FRP) textile, the axial compressive tests of concrete cylinders strengthened with FRP textile and engineered cementitious composites (ECC) were carried out to study the bearing capacity and deformation performance of the FRP-ECC confined cylinder. The test results show that the failure mode of most strengthened cylinders is the rupture of embedded FRP flexible textile. With the increase of reinforcement FRP textile layers, the strengthened columns' ultimate bearing capacity and deformation performance are improved by 2%-35% and 77%-145%, respectively. With the increase of the strength grade of the core concrete, the increase range of the ultimate bearing capacity is gradually reduced. In addition, according to the test results and the stress-strain model of FRP confined concrete, the corresponding strength model and envelope stress-strain models of FRP-ECC confined cylinder are given. The analysis results show that the stress-strain curves predicted by these models match well with test results.

Keywords: cyclic loading; FRP textile; ECC; confined cylinder; stress-strain model; concrete cylinder

近些年, 超高延性纤维增强水泥基复合材料, 又称工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC), 被用于混凝土构件加固、梁

柱节点及减震缓震构件中。其细骨料粒径很小 (通常小于 0.3 mm)、渗透性强, 水泥或粉煤灰掺量大可以满足与混凝土构件的有效粘结, 同时其

收稿日期: 2022-02-11; 修回日期: 2022-04-13; 录用日期: 2022-04-29; 网络首发时间: 2022-05-16 16:53:09

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220516.004>

基金项目: 国家自然科学基金 (52108230; 51878156); 宁夏自治区重点研发计划项目 (2020 BFG02005)

通信作者: 朱忠锋, 博士, 副研究员, 研究方向为纤维混凝土及 FRP 复合材料在桥梁结构中的研究与应用 E-mail: zhongfeng.zhu@szu.edu.cn

引用格式: 惠迎新, 王文炜, 朱忠锋. FRP-ECC 复合约束混凝土圆柱反复受压力学性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5586-5598.

HUI Yingxin, WANG Wenwei, ZHU Zhongfeng. Cyclic compression behavior of FRP-ECC confined concrete cylinder[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5586-5598(in Chinese).

内嵌耐久性好的聚乙烯醇 (Polyvinyl alcohol, PVA) 纤维能有效控制裂缝开展 (多点开裂且裂缝宽度很小, 通常最大裂缝在 $100\ \mu\text{m}$ 左右), 具有较高的抗拉延性和耗能能力^[1-24]。基于以上优点, 部分学者尝试采用浇筑 ECC、喷射 ECC、高强钢绞线或纤维增强复合材料 (Fiber reinforce polymer, FRP) 网格与 ECC 相结合 (FRP-ECC) 构成复合增强层^[25-30], 用于混凝土构件的增强与维修工程中, 且试验结果表明增强后柱^[31-34]、钢筋混凝土梁^[35-40]及砌体剪力墙^[41-42]的承载力及延性均有所提高。

但 FRP-ECC 复合材料相较于 FRP 或钢等材料其弹性模量要小的多^[28], 其对混凝土核心柱在反复荷载作用下的有效约束应力及增强后核心柱的极限承载力和变形能力尚未被充分研究。加之在地震作用下, 混凝土柱处于不同幅值的反复应力状态, 在此类应力条件下 FRP-ECC 复合层能否持续发挥作用仍未可知。

基于上述分析, 本文研究 FRP-ECC 复合约束混凝土圆柱在多种反复荷载作用下的受压力学性能, 为此类复合材料在抗震设计和增强中提供试验参考和理论依据。

1 试验

1.1 试验设计

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[43] 第 7 章、第 8 章及附录 C 针对混凝土圆柱体进行轴心抗压试验及反复受压力学性能试验。试件为直径 $\phi 150\ \text{mm}$ 、高 $300\ \text{mm}$ 的圆柱体。

试验考虑素混凝土抗压强度等级、复合增强层网格配置率及多重反复荷载工况等因素设计了 8 组共 24 个圆柱试件, 来分析 FRP-ECC 复合层约束核心素混凝土短柱的力学性能。其中, 增强层 ECC 厚度均为 $10\ \text{mm}$, 配合比如表 1 所示。反复加载方式及试验方案分别如图 1 和表 2 所示。表 2 中, C35 和 C55 等代表混凝土强度等级, 试件实测强度如表 3 所示。A 和 B 分别代表反复荷载下的两种工况, 其中, 多次同幅值完全加卸载 (工况 A) 研究加卸载次数对应力衰减的影响, 部分卸载和部分加载 (工况 B) 研究在此类条件下对混凝土累计损伤、残余塑性应变和应力衰减的影响, 以模拟不同振幅地震作用下 FRP-ECC 约束混凝土的力学响应; 1-3 代表 1 层~3 层网格。本次试验均采用碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 柔性网格和 ECC 对核心柱进行增强, 作者在文献 [28] 对 CFRP-ECC 厚度 $10\ \text{mm}$ 薄板进行了轴拉试验, 获得相应的轴拉应力-应变曲线如图 2 所示, 结果显示随着网格层数的增加, 复合材料的极限轴拉应力明显提高, 而且极限轴拉应变相对稳定且保持在 0.8% 左右, 可以为核心混凝土提供持续有效的约束作用。

表 1 工程水泥基复合材料 (ECC) 配合比

Table 1 Mix proportion of engineered cementitious composites (ECC)

							kg/m ³
Water	Cement	Sand	Water reducer	Fly ash	Fiber	Silica fume	
330	351	317	4.5	1 052	26	40	

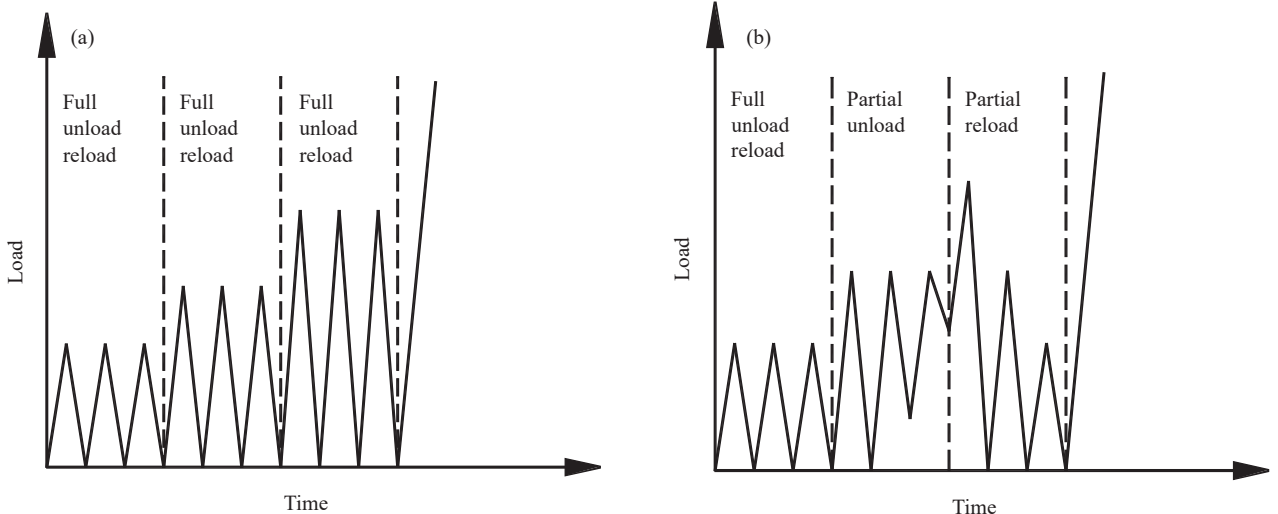


图 1 荷载形式

Fig. 1 Load schemes

表 2 试验方案

Table 2 Experimental program

Sample	Number in each group	CFRP layer	Thickness of ECC/mm
2CFRP-ECC-C35(A)	3	2	10
3CFRP-ECC-C35(A)	3	3	
1CFRP-ECC-C35(B)	3	1	
2CFRP-ECC-C35(B)	3	2	
3CFRP-ECC-C35(B)	3	3	
1CFRP-ECC-C55(B)	3	1	
2CFRP-ECC-C55(B)	3	2	
3CFRP-ECC-C55(B)	3	3	

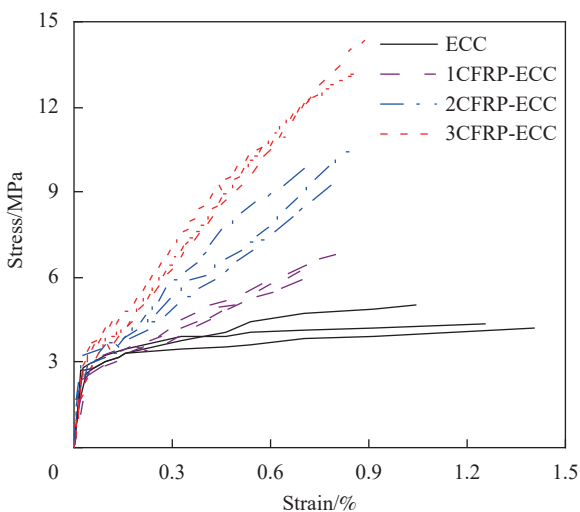
Notes: For the sample, the first number represents the layer of CFRP textile; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; CFRP-ECC—Strengthening CFRP-ECC composite layer; C35, C55—Strength grade of core concrete; A, B—Loading scheme.

表 3 素混凝土强度

Table 3 Compressive strength of plain concrete

ID	$\epsilon'_{co}/\%$	f'_{co}/MPa	Average		150 mm cube strength
			$\epsilon'_{co}/\%$	f'_{co}/MPa	
C35	0.35	25.75	0.32	28.74	36.38
	0.28	31.44			
	0.32	29.03			
C55	0.24	48.41	0.24	46.67	59.08
	0.28	44.61			
	0.21	46.99			
	0.21	46.99			

Notes: ϵ'_{co} , f'_{co} —Peak strain and stress of plain concrete; Conversion ratio between cylinder and cube is 0.79^[43].

图 2 CFRP-ECC 轴拉应力-应变曲线^[28]Fig. 2 Stress-strain curves of CFRP-ECC^[28]

1.2 试件制作

采用聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC) 圆管作为浇筑混凝土的模板。浇筑前, 沿高度方向在

PVC 管中部位置间隔 150 mm 左右钻两个孔。随后, 将长度为 30 mm、直径为 6 mm 的钢筋段穿入 PVC 管壁, 并保证钢筋在管内侧的长度为 20 mm 左右。待浇筑的混凝土硬化后, 钢筋便可自动嵌固在试件中, 管外侧钢筋可用于锚固 CFRP 网格的起始端 (图 3)。

CFRP-ECC 复合层增强混凝土圆柱的施工过程: (1) 将试件表面洒水浸湿, 避免涂抹 ECC 时由于混凝土吸水造成 ECC 水分丢失而过早丧失和易性 (图 3(b)); (2) 将预先制成的宽 25 mm、厚 10 mm 的聚酯棉圆环分别套在柱子的上、下端, 避免在相应部位施加复合约束层。这样施工的目的是考虑 CFRP-ECC 复合层仅起到环向约束的作用, 不承担竖向荷载。同时, 可以通过聚酯棉圆环的厚度控制涂抹 ECC 层的厚度; (3) 试件增强时, 首先在柱体表面涂抹一层厚度约 3 mm 的 ECC 底层, 然后将 CFRP 网格缠绕在柱体表面。对于多层 CFRP 网格, 采用边缠绕边涂抹 ECC 的方式, 直至网格缠绕完毕且 ECC 厚度达到预设厚度, 如图 3(c) 所示。缠绕网格时需将网格拉紧, 以保证网格能充分发挥作用。施工完成后的增强柱如图 3(d) 所示。

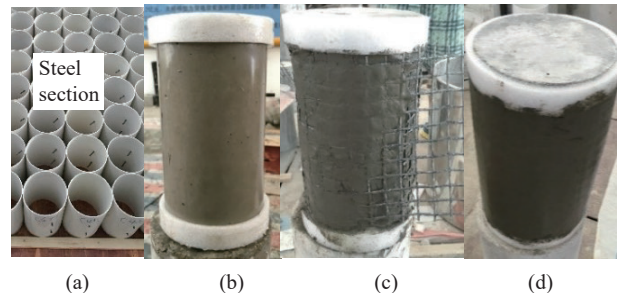


图 3 圆柱增强过程: (a) 模具; (b) 预处理; (c) 缠网格; (d) 增强柱

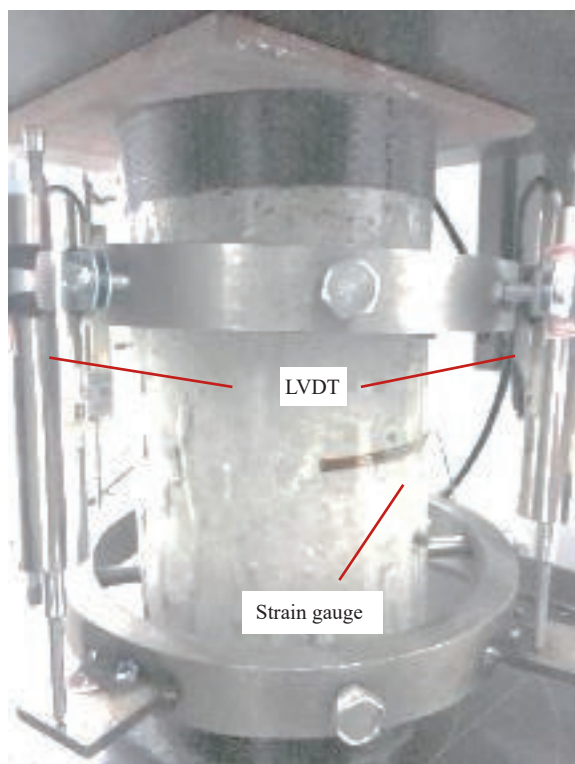
Fig. 3 Strengthening of cylinder: (a) Mould; (b) Pretreatment;

(c) Wrapping textile; (d) Strengthening cylinder

1.3 加载和采集装置

加载设备为三思纵横公司生产的 3 000 kN 电液伺服压力试验机。为防止试件两端首先破坏, 测试前对试件上、下端缠绕 3 层 CFRP 进行增强, 如图 4 所示。加载采用位移控制, 速率是 0.6 mm/min。

在试件中部的 CFRP-ECC 复合层表面粘贴环向应变片测量环向应变; 在对应的另一侧粘贴竖向应变片测量轴向应变。在试件的两侧布置位移传感器 (Linear variable differential transformer, LVDT), 位移传感器通过特制的环向装置固定。



LVDT—Linear variable differential transformer

图4 试验测试装置

Fig. 4 Test setup

所有实测数据通过泰斯特 TST3827E-16 动静态应变仪进行采集。

2 结果与分析

2.1 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱破坏形态

试验柱发生了两种破坏形式,即混凝土剪切破坏和 CFRP-ECC 复合层断裂破坏。对比柱试件由于剪切作用的影响,在柱体中部产生一条明显的主斜裂缝,如图 5(a)所示。对于 CFRP-ECC 复合层约束柱,试验结果未发现 FRP 网格层数对约束柱的破坏形态有本质影响。初步分析认为由于试验中采用柔性网格,竖向网格对受力影响较小,且复合层轴拉试验显示网格层数对极限应变和破坏形态基本没有影响,因此对约束柱破坏形态影响较小。当荷载较小,未达到 ECC 的开裂强度时,没有出现裂缝。随着荷载继续增加,超过了 ECC 的开裂强度,试件表面出现多条微裂缝。荷载进一步增大,核心混凝土柱的环向变形增大,试件中部明显外鼓,复合约束层的裂缝明显增多。当试件达到极限承载力时,在试件中部位置附近形成主裂缝,如图 5(b)和图 5(c)所示。有一点需要注意的是,某些试件表面出现了斜裂缝或横向裂

缝,分析认为是由于试件外鼓使复合层在承受环向拉力的同时,还承受竖向变形造成的竖向应力,在多种应力条件下出现了剪切斜裂缝或横向裂缝。最终,如图 5(d)所示,观察主裂缝处的 CFRP 网格,可以看到环向网格已经发生断裂。

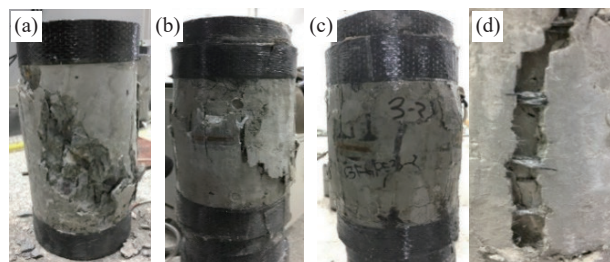


图5 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱破坏形态: (a) 无约束柱; (b) 2 层增强; (c) 3 层增强; (d) 主裂缝

Fig. 5 Failure mode of CFRP-ECC confined column: (a) Unconfined column; (b) 2 layers strengthening; (c) 3 layers strengthening; (d) Main crack

2.2 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱试验曲线

图 6 和图 7 给出了各组试件的荷载-位移曲线和应力-应变关系曲线,图 7 中 ε_c 表示轴向受压应变(以正值表示), ε_1 表示环向拉应变(以负值表示)。可以看出,约束柱的轴向应力与轴向应变的关系大致分为 3 个阶段:弹性段、强化段和软化段。对于 C35 混凝土的约束柱,应力-轴向应变关系曲线有显著的强化段直至峰值应力。然而,对于 C55 混凝土的约束柱,强化段并不显著。同时可以看出,随着 CFRP 网格层数的增加,强化段和下降段的范围均有所增大。对于环向应变,试件达到峰值应力进入强化和下降段后,曲线均有明显的水平发展阶段直至破坏,环向应变增大,说明复合层可以持续提供环向约束。

反复荷载作用下,如图 7 所示:对于荷载工况 A,在同一卸载位移处,试件经历了 3 次完全卸载-再加载过程,此过程中残余塑性应变随着加载次数的增加略有增加,但程度很小,同时其承载力削弱程度仅第一次程度较大,后面两次加载卸载过程并不会继续产生大幅度承载力削弱;对于荷载工况 B,当进入部分卸载工况时,其卸载时产生的残余塑性应变有所增加。当进入部分再加载工况时,由于其此时未经历再一次的完全再加载过程,其卸载后的残余塑性应变与第一次完全卸载时相同。

2.3 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱极限状态

表 4 列出了未约束柱和约束柱的峰值应力和

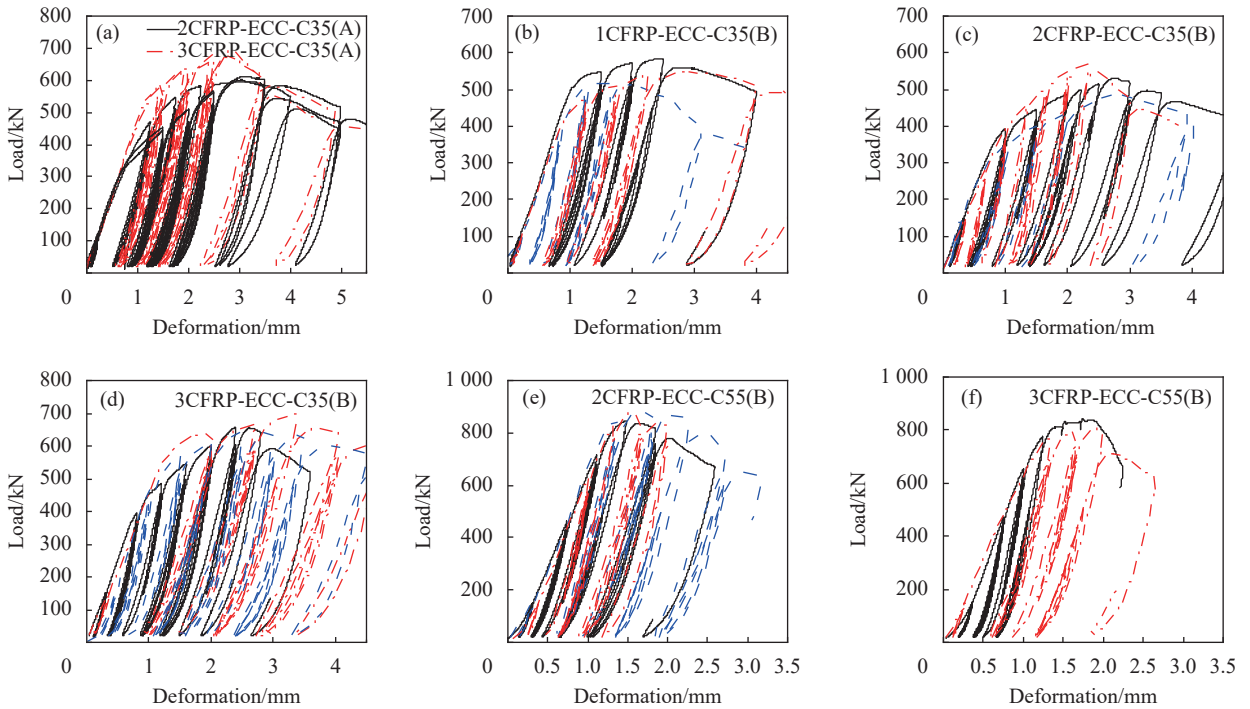


图6 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-deformation curves of CFRP-ECC confined column

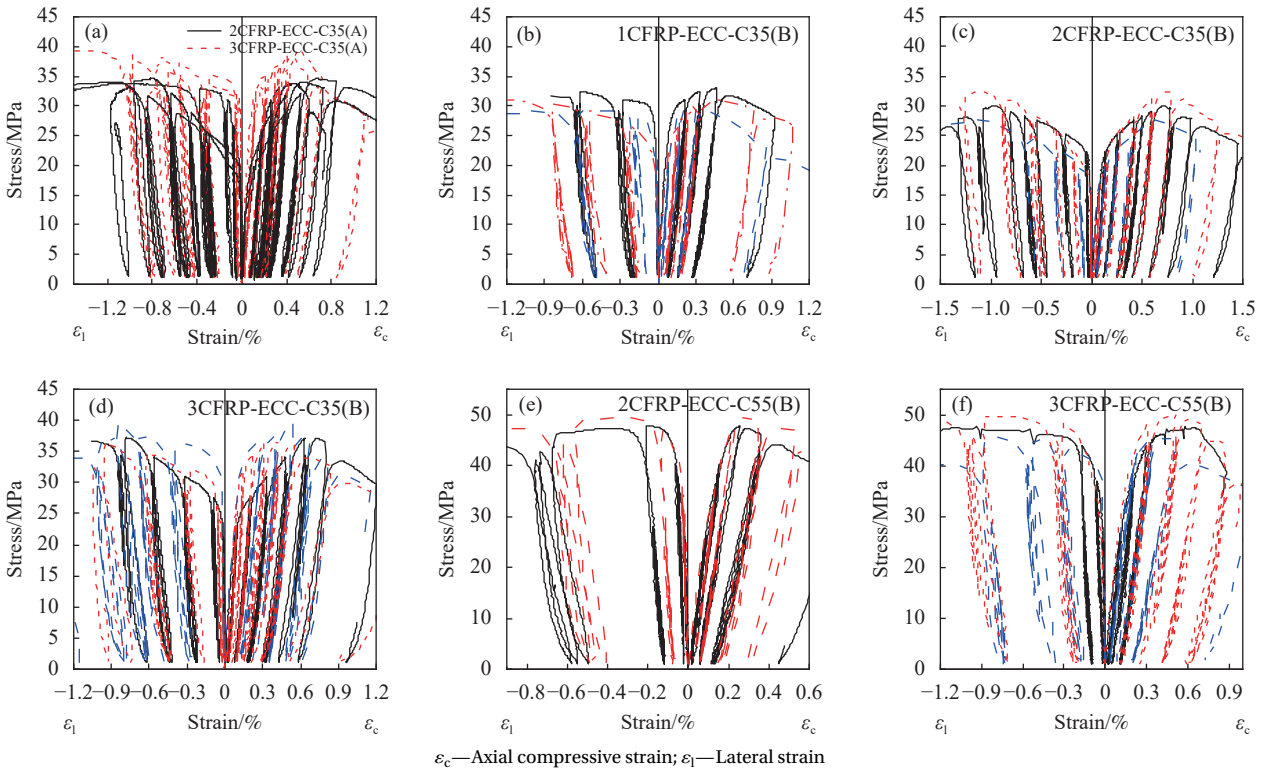


图7 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of CFRP-ECC confined column

峰值应变的比较结果。对于 C35 系列圆柱，在荷载工况 A 下，2 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 19% 和 83%；3 层 FRP

网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 35% 和 145%。在荷载工况 B 下，1 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高

表 4 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱试验数据
Table 4 Test results of CFRP-ECC confined columns

Sample	$\varepsilon_1/\%$	$\varepsilon_{cc}/\%$	f'_{cc}/MPa	Average			$\varepsilon_{cc}/\varepsilon'_{co}$	f'_{cc}/f'_{co}
				$\varepsilon_1/\%$	$\varepsilon_{cc}/\%$	f'_{cc}/MPa		
1CFRP-ECC-C35(B)-1	1.06	0.70	33.1					
1CFRP-ECC-C35(B)-2	1.01	0.39	29.1	1.07	0.56	31.1	1.77	1.08
1CFRP-ECC-C35(B)-3	1.13	0.60	31.0					
2CFRP-ECC-C35(B)-1	0.96	0.71	30.1					
2CFRP-ECC-C35(B)-2	1.16	0.63	32.3	1.06	0.67	31.2	2.12	1.09
3CFRP-ECC-C35(B)-1	0.78	0.73	37.2					
3CFRP-ECC-C35(B)-2	0.95	0.60	36.4	0.86	0.76	37.7	2.40	1.31
3CFRP-ECC-C35(B)-3	0.85	0.95	39.5					
2CFRP-ECC-C55(B)-1	-	0.25	47.8					
2CFRP-ECC-C55(B)-2	1.15	0.67	49.8	0.97	0.46	49.1	1.89	1.05
2CFRP-ECC-C55(B)-3	0.78	0.46	49.6					
3CFRP-ECC-C55(B)-1	0.88	0.51	47.3					
3CFRP-ECC-C55(B)-2	-	0.29	45.4	0.88	0.51	47.5	2.10	1.02
3CFRP-ECC-C55(B)-3	0.88	0.51	49.8					
2CFRP-ECC-C35(A)-1	0.80	0.70	34.6					
2CFRP-ECC-C35(A)-2	1.09	0.56	34.1	1.01	0.58	34.1	1.83	1.19
2CFRP-ECC-C35(A)-3	1.15	0.48	33.8					
3CFRP-ECC-C35(A)-1	0.71	0.79	38.1					
3CFRP-ECC-C35(A)-2	1.30	0.76	39.3	1.01	0.78	38.7	2.45	1.35

Notes: ε_{cc} and f'_{cc} —Ultimate axial strain and ultimate strength of confined cylinders.

8% 和 77%; 2 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 9% 和 112%; 3 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 31% 和 140%。对于 C55 圆柱, 在荷载工况 B 下, 2 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 5% 和 89%; 3 层 FRP 网格复合 ECC 约束柱的峰值应力和压应变分别提高 2% 和 110%。对比文献 [33] 中单调荷载作用下极限强度和极限应变结果发现, 反复荷载作用下约束柱的极限应力略有下降, 但极限应变有所提高。这与 FRP 约束柱略有不同, 初步分析认为, 多次反复荷载造成的累计损伤使约束柱的极限强度略有下降。同时, 在多次反复荷载过程中, 约束柱发生内力重分布, FRP-ECC 复合层受力更加均匀, 从而产生更多微裂缝, 使环向应变增大, 从而使约束柱整体的延性略有提高。这点也可以通过对比分析表 4 和图 2 结果进行验证。

3 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱包络线模型

3.1 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱包络线应力-应变关系

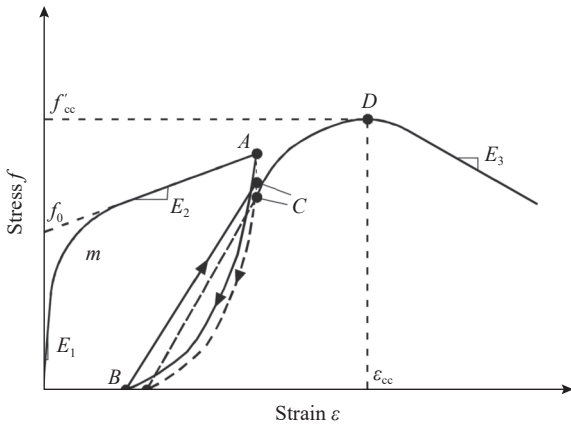
Zhou 课题组 [44-45] 和 Li 课题组 [46-47] 提出的四参数连续函数已被证明能够有效预测不同约束条件

下 FRP 约束混凝土应力-应变关系:

$$f_c = \left[(m-1)f_0 e^{-\frac{E_1 \varepsilon_c}{m f_0}} + f_0 + E_2 \varepsilon_c \right] \left(1 - e^{-\frac{E_1 \varepsilon_c}{m f_0}} \right) \quad (1)$$

式中: E_1 和 E_2 为曲线初始弹性模量和二阶段 (强化或软化) 曲线切线模量, 其中 $E_1 = 4730 \sqrt{f'_{co}}$ [48]; f_0 为二阶段切线模量与应力轴的交点应力; m 为曲线由一阶段转换至二阶段时的曲率控制参数, 对于传统 FRP 约束混凝土, m 通常取 0.56 [49]。具体参数与应力-应变曲线关系可参考图 8。

考虑到 FRP 约束混凝土的极限状态通常对应 FRP 断裂时的应力-应变, 随后其应力表现为下降 (图 8 中曲线峰值点 D 后阶段)。而 FRP-ECC 约束混凝土的应力-应变曲线峰值为 FRP-ECC 复合层初始断裂时, 随后的曲线下降是由于约束应力的逐渐减少导致, 且此时环向约束应力不均匀且无法量化。这点与弱约束条件下 FRP 约束混凝土应力-应变曲线峰值后软化不同。因此, 本文采用式 (1) 来预测 FRP-ECC 约束混凝土峰值前应力-应变曲线, 峰值后曲线采用线性函数计算。同时, 由图 2 可知, CFRP-ECC 的极限拉应变 $\varepsilon_{tu} = 0.52\varepsilon_{fu} = 0.77\%$ (ε_{fu} 是 CFRP 网格的极限应变)。而表 4 结果显示, 在反复荷载作用下, 约束柱的峰值环向应变略大于 ε_{tu} 。结合约束柱的破坏形态均表现为主



A, B, C, D—Reference points; E_1, E_2, E_3 —Slope at each stage of the curve; m —Curvature parameter; f'_{cc} and ϵ'_{cc} —Ultimate strength and strain; f_0 —Intercept stress

图8 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱应力-应变关系

Fig. 8 Stress-strain relationship of CFRP-ECC confined column

裂缝处 FRP 网格断裂，为方便计算并预留一定安全空间，本文认为约束柱的峰值环向应变与 CFRP-ECC 轴拉试验所得极限应变 ϵ_{tu} 相同，并应用于 3.2 节的模型推导，具体分析如下文。

3.2 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱曲线四参数

如 3.1 节所述，为确定 FRP-ECC 应力-应变全曲线模型，需要确定式 (1) 中的 4 个参数 (E_1 、 E_2 、 f_0 和 m) 及峰值后软化段的斜率 E_3 。目前， E_1 和 m 已经确定，需要确定其他 3 个参数，且关键点在于确定峰值应力/应变和截距应力 f_0 。

3.2.1 峰值应力和应变

文献 [33] 将目前常用的 FRP 约束混凝土峰值强度和应变模型的预测结果与单调荷载作用 CFRP-

ECC 复合约束柱的试验结果进行对比分析发现，已有模型对于复合约束柱的极限强度预测结果较好，但离散性偏大，对于复合约束柱的极限应变拟合结果无论是均值还是离散性均偏大。

在此基础上，文献 [33] 建立了适用于 CFRP-ECC 复合约束柱在单调荷载作用下的极限强度模型，如下式所示：

$$\begin{cases} f'_{cc} = f'_{co} + 72f_1E_{FRC}\epsilon_{FRC}/f'_{co} \\ \epsilon'_{cc} = \epsilon'_{co} + 1.38(f_1/f'_{co})^{2.12} \end{cases} \quad (2)$$

式中： f'_{co} 和 ϵ'_{co} 分别为未约束柱的极限应力和应变； E_{FRC} 和 $\epsilon_{FRC} = 0.00015$ 为复合层弹性阶段的模量和应变。

由图 9 可知，影响单调和反复荷载作用下极限应力/应变发展趋势的因素一致。相较于单调荷载作用下的结果，反复荷载作用下约束柱的极限应力偏小，极限应变偏大。采用下式计算针对反复荷载作用下的试验结果。如表 5 所示，模型预测结果与试验结果拟合较好：

$$\begin{cases} f'_{cc} = 0.95f'_{co} + 72f_1E_{FRC}\epsilon_{FRC}/f'_{co} \\ \epsilon'_{cc} = \epsilon'_{co} + 0.07f_1/f'_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中： f'_{cc} 和 ϵ'_{cc} 分别为复合约束柱的极限应力和应变； $f_1 = \sigma_f(\epsilon_{tu})t_f/R$ 是复合层的极限约束应力； $\sigma_f(\epsilon_{tu})$ 是复合层在环向应变 ϵ_{tu} 时的应力，详细计算过程参考文献 [28]； t_f 是复合层厚度； R 是核心柱半径。

3.2.2 截距应力 f_0 和二阶段曲线斜率 E_2

由图 7 及文献 [33] 可知，应力-应变曲线由弹

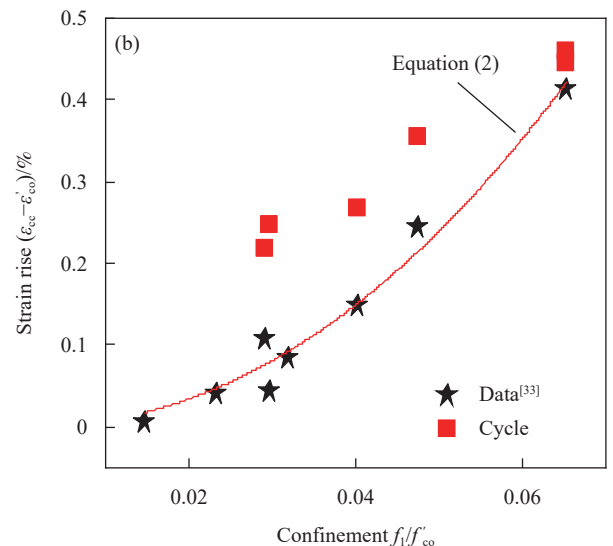
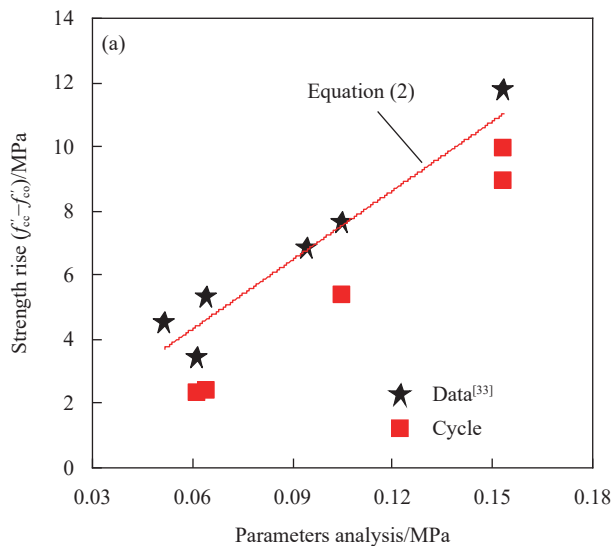


图9 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱极限应力/应变分析

Fig. 9 Analysis of CFRP-ECC confined cylinders' ultimate stress/strain

表 5 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱模型和试验结果对比
Table 5 Comparison of model and test results of CFRP-ECC confined cylinders

Sample	Test		Prediction		Prediction/Test	
	$\varepsilon_{cc}/\%$	f'_{cc}/MPa	$\varepsilon_{cc}/\%$	f'_{cc}/MPa	ε_{cc}	f'_{cc}
1CFRP-ECC-C35(B)	0.56	31.06	0.53	31.72	0.94	1.02
2CFRP-ECC-C35(B)	0.67	31.19	0.65	34.84	0.97	1.12
3CFRP-ECC-C35(B)	0.76	37.68	0.78	38.33	1.03	1.02
2CFRP-ECC-C55(B)	0.46	49.07	0.45	48.98	0.98	1.00
3CFRP-ECC-C55(B)	0.51	47.50	0.53	51.13	1.04	1.08
2CFRP-ECC-C35(A)	0.58	34.13	0.65	34.84	1.13	1.02
3CFRP-ECC-C35(A)	0.78	38.70	0.78	38.33	1.01	0.99
Mean					1.01	1.04
SD					0.06	0.03
CV					0.055	0.034

Notes: Mean—Average value; SD—Standard deviation; CV—Coefficient of variation.

性阶段过渡到强化段时的拐点应力与复合层中网格层数有关。同时随着核心素混凝土强度的提高, f_0 也有明显提高。因此, 本文对 $f'_{co} - f_i - f_0$ 的关系进行了数据拟合分析, 采用下式对 f_0 进行预测。

$$f_0 = 0.9f'_{co} + 5.94f_i - 8.7 \quad (4)$$

如图 10(b) 所示, 模型预测值和试验值吻合较好。进而, 可根据极限点和截距点关系获得

$$E_2 = (f'_{cc} - f_0) / \varepsilon_{cc}$$

3.2.3 峰值后曲线斜率 E_3

由图 7 及图 11(a) 分析数据可知, 峰值后曲线斜率与核心混凝土强度 f'_{co} 及约束应力 f_i 有关。本文采用拟合公式对其进行计算, 如下:

$$E_3 = 563.3 - 18.81f'_{co} - 727.3f_i \quad (5)$$

预测值和试验值的对比结果如图 11(b) 所示。考虑到混凝土特性及数据离散性, 本文认为结果在可接受范围内。进而峰值后应力-应变曲线可通过下式计算得到:

$$f_c = f'_{cc} + E_3(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (6)$$

3.3 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱轴向应变-环向应变关系

在确定轴向应力-应变关系曲线后, 为确定环向应力-应变曲线, 仍需要进行轴向-环向应变关系分析。目前, 文献 [50-51] 均认为 ε_c 与 $(1 + 8\sigma_1 / f'_{co})$ 有关。文献 [33] 在对比分析后得出 CFRP-ECC 复合材料的开裂应力和极限应变影响两者的关系曲

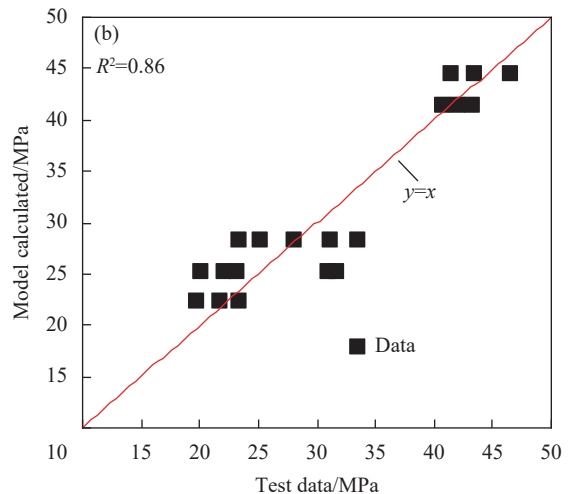
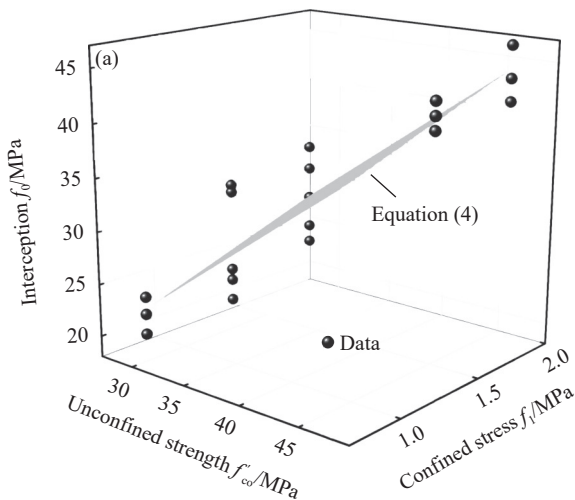


图 10 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱截距应力及模型-试验对比

Fig. 10 Intercept stress of CFRP-ECC confined cylinders and model-test comparison

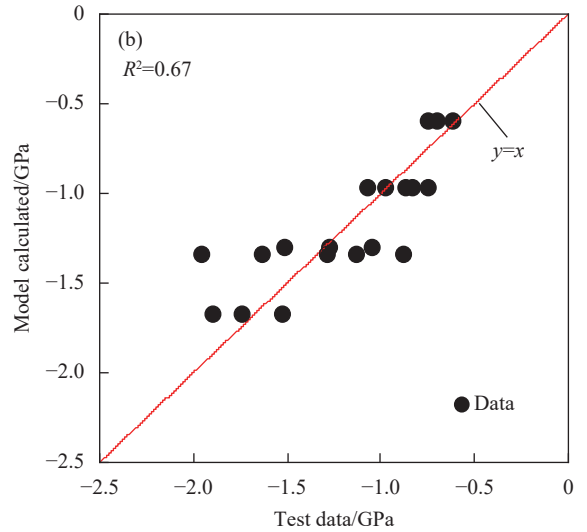
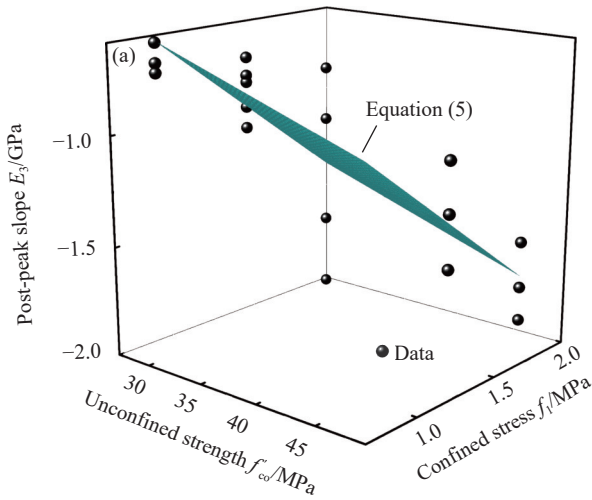


图 11 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱峰值后曲线斜率发展规律及模型-试验对比

Fig. 11 Relationship of post-peak curve slope of CFRP-ECC confined cylinders and model-test comparison

线，并建立了相应的模型。本文在上述文献的基础上，对反复荷载作用下轴向应变和环向应变的关系进行拟合分析：

$$\epsilon_c = 0.007 \frac{f'_{co}}{E_{FRC} \epsilon_{FRC}} \frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{tu}} \left(1 + 8 \frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right) \epsilon_1^{0.59} \quad (7)$$

式中： ϵ_1 为复合层环向应变； $\sigma_1 = \sigma_f(\epsilon_1)t_f/R$ 是应变为 ϵ_1 时的复合层为核心柱提供的约束应力； $\sigma_f(\epsilon_1)$ 是应变为 ϵ_1 时复合层的拉应力，详细计算过程参考文献 [28]，结果如图 12 所示。

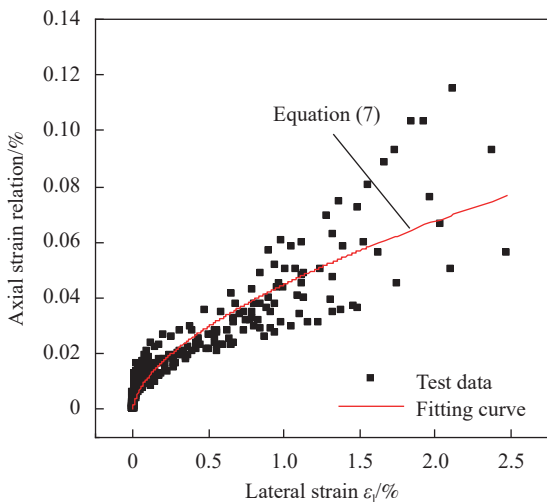


图 12 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱轴向-环向应变关系

Fig. 12 Axial-lateral strain relationship of CFRP-ECC confined cylinders

3.4 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱残余应力和塑性应变

图 8 描述了反复荷载作用下卸载点 (A 点) 应力与再加载到相同应变时 (C 点，下文均称为参考

点) 应力的关系及卸载点应变与残余应变 (B 点) 的关系。本文采用以下两式描述它们的关系：

$$\sigma_{ref,n} = \phi_n \sigma_{un} \quad (8)$$

$$\epsilon_{pl} = \mu \epsilon_{un} \quad (9)$$

式中： σ_{un} 和 ϵ_{un} 分别为卸载点应力和应变； $\sigma_{ref,n}$ 为第 n 次加载到参考点的应力； ϕ_n 为应力衰减系数； ϵ_{pl} 为残余应变； μ 为残余应变和卸载点应变的相关系数。

图 13 显示卸载点应力与参考点应力基本呈线性关系。图 13(a) 可知第一次完全加卸载后，应力衰减系数为 0.90，该值与文献 [46, 52] 中报道的 FRP 约束混凝土一致。同时，随着加载次数的增加，衰减系数 ϕ_n 在不断减小。

对于残余应变，图 7 显示多次反复荷载作用下残余应变并无本质变化，因此图 14 仅列出了第一次完全卸载后残余应变与卸载点应变关系。由图 14 可知，卸载点应变大于 0.15% 时，其与残余塑性应变呈线性关系，相关系数 μ 为 0.85。

3.5 模型-试验对比

结合式 (1)-(7) 计算所得的应力-应变曲线包络线与试验对比结果如图 15 所示。可知，在不同核心混凝土强度和约束刚度作用下，模型计算所得的轴向应变-应力曲线及环向应变-应力曲线包络线均与试验值拟合良好。

4 结论

(1) 随着碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 网格增强工程水泥基

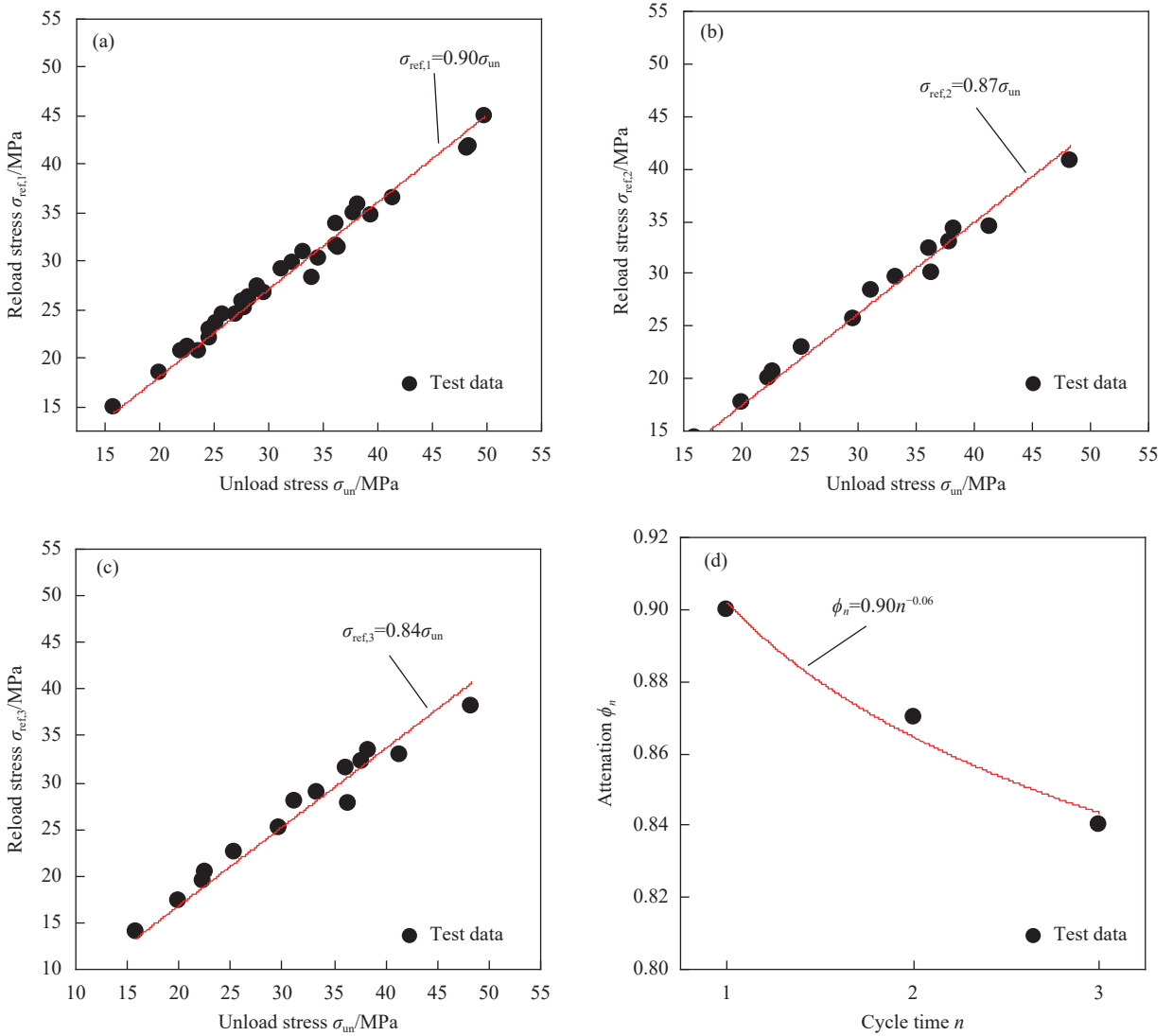


图 13 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱再加载应力与初始卸载点应力关系

Fig. 13 Initial unload stress vs reloaded stress of CFRP-ECC confined cylinders

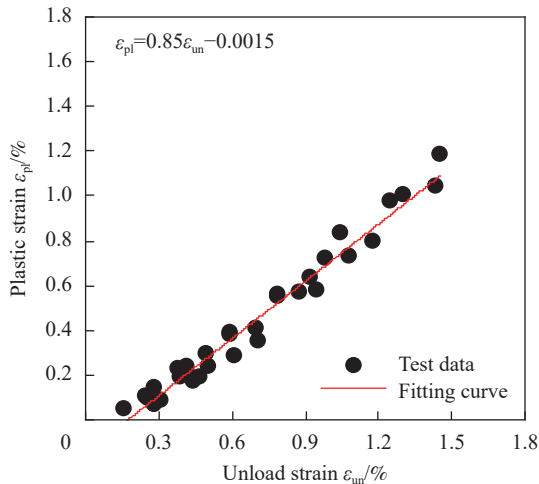


图 14 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱残余应变与初始卸载点应变关系

Fig. 14 Initial unload strain vs residual plastic strain of CFRP-ECC confined cylinders

复合材料(Engineered cementitious composites, ECC)复合层中网格层数增加,对 C35 强度等级的混凝土而言,约束柱的承载力和峰值压应变均有大幅度增加;对 C55 强度等级的混凝土而言,约束柱的承载力和峰值压应变提高有限。

(2) 相对于单调荷载下,反复荷载作用下的 CFRP-ECC 约束柱的峰值抗压强度略有降低,但其变形能力有较大幅度提高。随着重复加载次数的增加,再加载到与卸载点相同应变时的应力衰减系数逐渐减小。同时残余应变与卸载点应变线性相关。

(3) Zhou 和 Wu 的模型^[44]仍可以用于计算 CFRP-ECC 约束混凝土应力-应变曲线。基于此,本文提出的应力-应变关系模型能有效预测 CFRP-

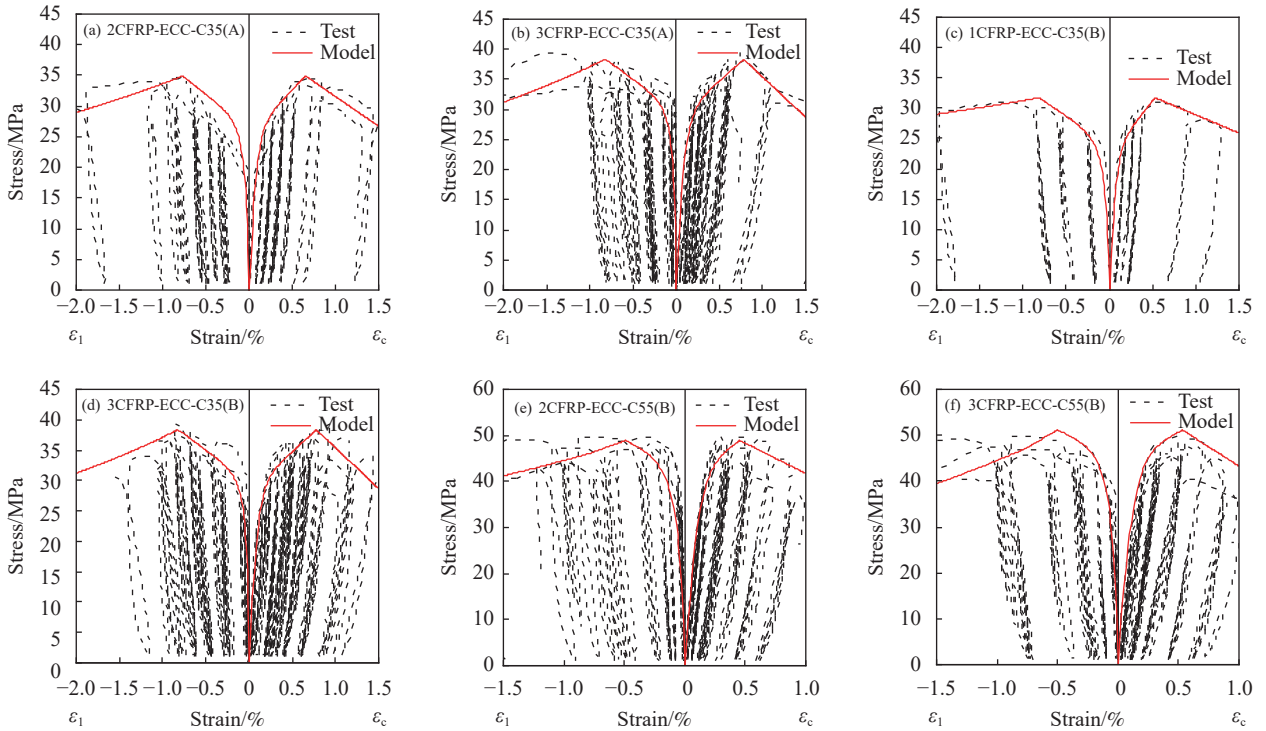


图 15 CFRP-ECC 复合约束混凝土圆柱应力-应变关系对比

Fig. 15 Comparison of stress-strain curves of CFRP-ECC confined cylinders

ECC 复合约束柱的峰值压应力、轴向应力-轴向应变及轴向应力-环向应变曲线。

参考文献:

- [1] TAEIJSTEN B, BLANKSVAERD T. Mineral-based bonding of carbon FRP to strengthen concrete structures[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(2): 120-128.
- [2] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers[J]. *Construction Building Materials*, 2018, 158: 217-227.
- [3] POURFALAH S. Behaviour of engineered cementitious composites and hybrid engineered cementitious composites at high temperatures[J]. *Construction Building Materials*, 2018, 158(15): 921-937.
- [4] ZHOU Y W, XI B, YU K Q, et al. Mechanical properties of hybrid ultra-high performance engineered cementitious composites incorporating steel and polyethylene fibers[J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(8): 1448.
- [5] ZHOU Y, ZHENG Y, SUI L, et al. Behavior and modeling of FRP-confined ultra-lightweight cement composites under monotonic axial compression[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 289-302.
- [6] 徐世焱, 蔡新华. 超高韧性水泥基复合材料碳化与渗透性能试验研究[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(3): 177-183.
- [7] MA H, ZHANG Z G. Paving an engineered cementitious composite (ECC) overlay on concrete airfield pavement for reflective cracking resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 119048.
- [8] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Static and fatigue push-out tests of short headed shear studs embedded in engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 29-38.
- [9] LIU H Z, ZHANG Q, LI V, et al. Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 171-181.
- [10] QIU J S, YANG E H. Micromechanics-based investigation of fatigue deterioration of engineered cementitious composite (ECC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 95: 65-74.
- [11] SINGH M, SAINI B, CHALAK H D. Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC)—A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 26: 100851.
- [12] ZHANG D, YU J, WU H, et al. Discontinuous microfibers as intrinsic reinforcement for ductile engineered cementi-

XU Shilang, CAI Xinhua. Experimental studies on permeability and carbonation properties of ultra high toughness cementitious composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(3): 177-183(in Chinese).

- tious composites(ECC)[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2020, 184: 107741.
- [13] 刘少龙. 级配复合水泥基 ECC 的设计制备及其微观力学与拉伸行为的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
LIU Shaolong. On the design and preparation, microstructure and tensile behaviors of gap-graded cement-based engineered cementitious composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020(in Chinese).
- [14] 徐世焯, 刘向. 超高韧性水泥基复合材料疲劳损伤模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 1-8.
XU Shilang, LIU Wen. Fatigue damage model test of ultra-high toughness cementitious composites[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(6): 1-8(in Chinese).
- [15] CHEN Y, YAO J, LU Z, et al. Experimental study on the shrinkage reduction of high strength strain-hardening cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103416.
- [16] DING Y, YU J T, YU K Q, et al. Basic mechanical properties of ultra-high ductility cementitious composites: From 40 MPa to 120 MPa[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 634-645.
- [17] DING Y, YU K Q, YU J T, et al. Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 177: 102-115.
- [18] GUO M H, ZHONG Q L, ZHOU Y W, et al. Influence of flexural loading and chloride exposure on the fatigue behavior of high-performance lightweight engineered cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118512.
- [19] HUANG B T, LI Q H, XU S L, et al. Fatigue deformation behavior and fiber failure mechanism of ultra-high toughness cementitious composites in compression[J]. *Materials & Design*, 2018, 157: 457-468.
- [20] LI X, ZHOU X, TIAN Y, et al. A modified cyclic constitutive model for engineered cementitious composites[J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 398-411.
- [21] ZHANG Z G, YANG F, LIU J C, et al. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020: 137: 106200.
- [22] TIAN J, WU X, ZHENG Y, et al. Investigation of damage behaviors of ECC-to-concrete interface and damage prediction model under salt freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 238-249.
- [23] TIAN J, WU X, ZHENG Y, et al. Investigation of interface shear properties and mechanical model between ECC and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 12-27.
- [24] BOSHOFF W P, NIEUWOUDT P D. Tensile crack widths of strain hardening cement-based composites[C]//2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2-Rio). Rio de Brazil: RILEM Publications SARL, 2011: 199-206.
- [25] 朱忠锋, 王文炜. 玄武岩格栅增强水泥基复合材料单轴拉伸力学性能试验及本构关系模型[J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2367-2374.
ZHU Zhongfeng, WANG Wenwei. Experiment on the uniaxial tensile mechanical behavior of basalt grid reinforced engineered cementitious composites and its constitutive model[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(10): 2367-2374(in Chinese).
- [26] CHEN C, CAI H Y, LI J J, et al. One-dimensional extended FEM based approach for predicting the tensile behavior of SHCC-FRP composites[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 225: 106775.
- [27] 朱忠锋, 王文炜, 郑宇宙, 等. 基于非接触式观测技术的FRP/ECC复合材料反复受拉本构关系模型[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 36-45, 55.
ZHU Zhongfeng, WANG Wenwei, ZHENG Yuzhou, et al. The constitutive model of FRP/ECC composite materials under uniaxial cyclic tensile loading based on the digital image correlation technique[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(10): 36-45, 55(in Chinese).
- [28] ZHU Z F, WANG W W, HARRIES K A, et al. Uniaxial tensile stress-strain behavior of carbon-fiber grid-reinforced engineered cementitious composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(6): 04018057.
- [29] 王新玲, 杨广华, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料受拉应力-应变关系[J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3220-3228.
WANG Xinling, YANG Guanghua, QIAN Wenwen, et al. Tensile stress-strain relationship of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire mesh[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 3220-3228(in Chinese).
- [30] 夏立鹏, 张黎飞, 郑愚. CFRP增强工程水泥基复合材料桥面连接板的结构和性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 848-859.
XIA Lipeng, ZHANG Lifei, ZHENG Yu. Structural performance of CFRP reinforced ECC link slabs in jointless bridge decks[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 848-859(in Chinese).
- [31] 朱忠锋, 王文炜. FRP编织网/ECC复合加固钢筋混凝土圆柱力学性能的试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 1082-1087.
ZHU Zhongfeng, WANG Wenwei. Experimental study on mechanical behaviour of circular reinforced concrete columns strengthened with FRP textile and ECC[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*,

- 2016, 46(5): 1082-1087(in Chinese).
- [32] YUAN F, CHEN M C, PAN J L. Experimental study on seismic behaviours of hybrid FRP-steel-reinforced ECC-concrete composite columns[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107272.
- [33] ZHU Z F, WANG W W, HUI Y X, et al. Mechanical behavior of concrete columns confined with CFRP grid-reinforced engineered cementitious composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2022, 26(1): 4021060.
- [34] 江佳斐, 隋凯. 纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1957-1967.
- JIANG Jiafei, SUI Kai. Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by extile reinforced engineering cement composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1957-1967(in Chinese).
- [35] HUANG B T, LI Q H, XU S L, et al. Development of reinforced ultra-high toughness cementitious composite permanent formwork: Experimental study and digital image correlation analysis[J]. *Composite Structures*, 2017, 180: 892-903.
- [36] ZHENG Y Z, WANG W W, BRIGHAM J C. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC[J]. *Construction Building Materials*, 2016, 115(15): 424-437.
- [37] ZHENG Y Z, WANG W W, MOSALAM K M, et al. Mechanical behavior of ultra-high toughness cementitious composite strengthened with fiber reinforced polymer grid[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 1-10.
- [38] HU B, ZHOU Y W, XING F, et al. Experimental and theoretical investigation on the hybrid CFRP-ECC flexural strengthening of RC beams with corroded longitudinal reinforcement[J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109717.
- [39] QIN F J, ZHANG Z G, YIN Z W, et al. Use of high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) to enhance the flexural performance of reinforced concrete beams[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101746.
- [40] YUAN F, CHEN M C, PAN J L. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with high-strength steel wire and engineered cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119284.
- [41] LIN Y W, WOTHERSPOON L, SCOTT A, et al. In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallets using ECC shotcrete[J]. *Engineering Structures*, 2014, 66(5): 57-65.
- [42] DENG M K, DONG Z F, MA P. Cyclic loading tests of flexural-failure dominant URM walls strengthened with engineered cementitious composite[J]. *Engineering Structures*, 2019, 194: 173-182.
- [43] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Publishing Press, 2003(in Chinese).
- [44] ZHOU Y W, WU Y F. General model for constitutive relationships of concrete and its composite structures[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 580-592.
- [45] ZHOU Y, LIU X, XING F, et al. Axial compressive behavior of FRP-confined lightweight aggregate concrete: An experimental study and stress-strain relation model[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 119: 1-15.
- [46] LI P D, WU Y F, ZHOU Y W, et al. Stress-strain model for FRP-confined concrete subject to arbitrary load path[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 163: 9-25.
- [47] LI P D, SUI L L, XING F, et al. Stress-strain relation of FRP-confined predamaged concrete prisms with square sections of different corner radii subjected to monotonic axial compression[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(2): 04019001.
- [48] LAM L, TENG J. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns[J]. *Journal of Reinforced Plastics Composites in Construction*, 2003, 22(13): 1149-1186.
- [49] WU Y F, YUN Y C, WEI Y Y, et al. Effect of predamage on the stress-strain relationship of confined concrete under monotonic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(12): 04014093.
- [50] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical model for fiber-reinforced polymer-confined concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(2): 201-210.
- [51] DAI J, BAI Y, TENG J G. Behavior and modeling of concrete confined with FRP composites of large deformability[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(6): 963-973.
- [52] SHAO Y, ZHU Z, MIRMIRAN A. Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 959-968.