

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

王新玲 卫鑫 范建伟 朱俊涛

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

WANG Xinling, WEI Yaoxin, FAN Jianwei, ZHU Juntao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201225.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料弯曲性能试验

Experiment on bending performance of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire strand mesh

复合材料学报. 2021, 38(4): 1292–1301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200805.001>

高强箍筋约束超高性能混凝土柱轴压性能

Axial compression behavior of ultra-high performance concrete columns confined by high-strength stirrups

复合材料学报. 2020, 37(10): 2590–2601 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200203.002>

高强不锈钢绞线网与工程水泥基复合材料黏结锚固性能试验

Experiment on bonding and anchoring performance between high-strength stainless steel wire mesh and engineered cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(7): 1731–1742 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191010.001>

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>

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

Tensile stress-strain relationship of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire mesh

复合材料学报. 2020, 37(12): 3220–3228 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200428.002>

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>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

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



分享本文

王新玲¹, 卫鑫¹, 范建伟^{*2}, 朱俊涛¹

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 河南水利与环境职业学院, 郑州 450008)

摘要: 考虑混凝土强度、工程水泥基复合材料 (ECC) 强度和横向高强钢绞线配筋率等因素, 研究新型复合材料“高强钢绞线网/ECC 约束素混凝土” (以下简称 HSE 约束素混凝土) 的受压性能。HSE 约束素混凝土轴心受压试验显示, 达到最大荷载的 30% 左右时, 约束层 ECC 出现约为 0.01 mm 的竖向裂缝; 约为最大荷载的 85% 时, 表面最大裂缝宽度约为 0.07 mm; 达到最大荷载时, 最大裂缝宽度仅为 0.20 mm; 说明该新型复合材料具有很好的裂缝分散和控制能力。之后荷载缓慢下降至最大荷载 75% 左右, 第一根横向钢绞线断裂; 达到破坏时裂而不碎, 约束层和核心混凝土未发生黏结破坏, 完整性良好。HSE 约束素混凝土与素混凝土相比, 其开裂应力提高了 88%~116%; 轴心抗压强度提高了 21%~49%、轴心压应变增加了约 45%; 极限压应变提高了 106%~175%。ECC 强度和混凝土强度及横向钢绞线配筋率的提高, 均增大其开裂和最大荷载及极限压应变。

关键词: 高强钢绞线网/ECC; 约束素混凝土; 新型复合材料; 轴压性能; 试验研究

中图分类号: TU528.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)11-3904-08

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

WANG Xinling¹, WEI Yaoxin¹, FAN Jianwei^{*2}, ZHU Juntao¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: The compressive performance of new composite material “concrete confined with high-strength stainless steel stranded wire meshes/ECC” (hereinafter referred to as HSE confined concrete) was studied by considering the effects of parameters: concrete strength, strength of engineered cementitious composites (ECC) and reinforcement ratio of lateral high-strength stainless steel stranded wires. The axial compression test of HSE confined concrete shows that vertical cracks about 0.01 mm appears on ECC in constraint layer at about 30% of the peak load. When the applied load reaches about 85% and 100% of the peak load, the maximum crack width on the surfaces is about 0.07 mm, 0.20 mm, respectively. These phenomena show that the new composite material has excellent crack dispersion and crack-controlling ability. When the applied load decreases to 75% of the peak load, the first lateral steel stranded wires rupture for the first time. The HSE confined concrete specimens are cracked without breaking when completely destroyed, and maintain a good bond between the constraint layer and core concrete, which has a good integrity. Compared with the plain concrete column, the cracking stress, axial compressive strength, the axial compressive strain and ultimate compressive strain of HSE confined concrete are increased by 88%-116%, 21%-49%, 45%, 106%-175%, respectively. The increases of ECC strength, concrete strength grade and the reinforcement ratio

收稿日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-12-17; 网络首发时间: 2020-12-26 15:05:49

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201225.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51879243); 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501204); 国家自然科学基金-联合基金 (U1804137)

通信作者: 范建伟, 硕士, 讲师, 研究方向为土木工程新材料 E-mail: 3586970@qq.com

引用格式: 王新玲, 卫鑫, 范建伟, 等. 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 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3904-3911.

WANG Xinling, WEI Yaoxin, FAN Jianwei, et al. Experimental study on compressive performance of new composite material “concrete confined with high-strength steel stranded wire meshes/ECC” [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3904-3911(in Chinese).

of lateral steel stranded wires have improved the cracking load, peak load and ultimate compressive strain of HSE confined concrete.

Keywords: high-strength stainless steel stranded wire meshes/ECC; confined concrete; new composite material; axial compression behavior; experimental research

混凝土虽然广泛应用于建筑结构中,但由于其抗拉强度低、韧性差等原因,在使用过程及地震等地质灾害中难以避免地遭受到损伤和破坏,因此建筑的加固修复及改造已经成为了目前的一大热点问题。工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 因具有应变硬化及多缝开裂、极限拉应变达 3% 以上等特性^[1-5],被逐渐用于修复和加固已有混凝土结构^[6]。但是单一的 ECC 仍然存在抗拉强度偏低的缺点。

因此,众多学者先后将纤维编织网、钢筋网等加入到 ECC 中形成新型增强 ECC 复合材料,使其力学性能进一步提高^[7-9],并用于结构加固。江佳斐等^[10]对纤维网格增强 ECC 加固混凝土圆柱的轴心受压性能进行了试验研究,结果表明,该加固方法可有效改善素混凝土脆性压溃破坏模式,提高峰值强度及受压延性。卜良桃等^[11-12]分别研究了钢筋网增强 ECC 约束钢筋混凝土方柱的轴心受压和偏心受压性能,结果表明,钢筋网增强 ECC 能有效约束核心混凝土柱;并建立了钢筋网增强 ECC 约束核心混凝土柱的承载力计算公式。王新玲等^[13]采用 ABAQUS 对纤维增强复合材料 (FRP) 网格增强 ECC 约束混凝土柱的受压性能进行了数值模拟,结果表明 FRP 网格增强 ECC 能够有效提高核心混凝土柱的承载能力和延性。AL-Gemeel 等^[14-15]研究了玄武岩纤维织物增强 ECC 约束混凝土方柱和圆柱的抗压性能,结果表明这种新型复合材料可以明显提高混凝土方柱和圆柱的承载能力和延性;另外,提出了纤维织物增强 ECC 约束混凝土圆柱的抗压强度计算公式。但是,普通钢筋作为增强材料时, ECC 的优越性能不能完全发挥,使用纤维编织网增强材料又降低了经济性。

高强钢绞线不仅强度高,且极限拉应变约为 3%,与 ECC 拉应变很接近。因此,朱俊涛等^[16]等研发了复合材料“高强不锈钢绞线网增强 ECC”,首先对高强不锈钢绞线网与 ECC 的粘结锚固性能进行了试验和理论研究,揭示了高强不锈钢绞线网和 ECC 的良好的粘结锚固性能。然后,对高强不锈钢绞线网增强 ECC 复合材料的受拉性能^[17]和

受弯性能^[18]进行研究,试验结果显示,在达到极限荷载的 85% 左右时,受拉试件最大裂缝宽度仅 0.2 mm 左右,受弯试件最大裂缝宽度仅 0.08 mm 左右,表明该新型复合材料具有良好的抗裂性能和裂缝分散能力。ECC 非常小的裂缝宽度可以保证普通高强钢绞线不出现锈蚀。由此,将价格较高的不锈钢绞线换成普通的高强钢绞线,提高其经济性。

基于朱俊涛等^[16]和王新玲等^[17-18]已有的研究成果,将高强钢绞线网/ECC 用于约束素混凝土、形成新型复合材料,研究其轴心受压性能,为高强钢绞线网/ECC 加固钢筋混凝土柱奠定基础。

1 试验

1.1 试件设计及加载测试

1.1.1 试件设计

本试验共设计了 3 组 8 个高强钢绞线网/ECC 约束素混凝土 (以下简称 HSE 约束素混凝土) 试件和 3 个素混凝土柱对比试件。其中,素混凝土柱的截面尺寸均为 200 mm×200 mm,高度均为 700 mm,分别考虑素混凝土强度等级及约束层 ECC 强度和横向钢绞线配筋率 (通过改变横向钢绞线的间距 s) 变化,如表 1 所示。高强钢绞线直径采用 2.4 mm; 3 种 ECC 的配合比基于前期的研究工作 (见文献 [2]),仅通过改变 ECC 水胶比及添加增稠剂来获取其不同的抗拉强度。

HSE 约束素混凝土如图 1 所示,为了保证约束层和核心混凝土有足够的粘结,先将混凝土表面凿毛、倒角 (拐角处打磨为半径约 15 mm 的圆角),在混凝土表面涂一层界面剂,然后绑扎高强钢绞线网,其中纵向钢绞线用膨胀螺栓固定,横向钢绞线用铝环连接,纵、横向钢绞线相交处用扎丝绑扎 (将横向钢绞线布置在外侧以便更好的发挥约束作用),最后分层支模板、浇筑 ECC; 详细加固步骤见混凝土结构加固设计规范 (GB 50367—2013)^[19]中的混凝土柱四面围箍加固。纵向钢绞线的布置,一方面与横向钢绞线形成钢绞线网,进而增强其整体刚度和工作性能,且对核心混凝土约束作用更均匀,另一方面可以调节 ECC 收缩和温度引起的初应力的影响。根据朱俊

涛等^[16] 已研究的成果，在保证高强钢绞线网和 ECC 满足粘结锚固要求的条件下，取最小的 ECC 厚度 25 mm。

表 1 高强钢绞线网/工程水泥基复合材料 (ECC) 约束素混凝土 (HSE 约束素混凝土) 试件参数设置

Table 1 Parameters of test concrete confined with high-strength stainless steel stranded wire meshes/engineered cementitious composites (ECC) (HSE confined concrete) specimens				
Group	Number	Water-binder ratio of ECC	s/mm	ρ_w /%
A	C30-E1-S50	0.25	50	0.18
	C30-E2-S50	0.25 (Thickener)	50	0.18
	C30-E3-S50	0.28	50	0.18
B	C30-E1-S70	0.25	70	0.13
	C30-E1-S50	0.25	50	0.18
	C30-E1-S30	0.25	30	0.30
C	C35-E1-S50	0.25	50	0.18
	C40-E1-S50	0.25	50	0.18
D	C30-E0-S0	—	—	—
	C35-E0-S0	—	—	—
	C40-E0-S0	—	—	—

Notes: s—Spacing of lateral steel stranded wires; ρ_w —Reinforcement ratio of lateral steel stranded wires.



图 1 HSE 约束素混凝土试件
Fig. 1 HSE confined concrete specimens

1.1.2 试验加载及测试

HSE 约束素混凝土的轴心受压试验在 500 吨压力试验机上进行，试件加载装置如图 2 所示。ECC 表面中部粘贴的“T”型横、纵应变片分别测量 ECC 中部横、纵方向的应变；分布在试件两端的位移计测量试件位移。



图 2 HSE 约束素混凝土试件加载装置
Fig. 2 Loading of HSE confined concrete specimens specimens

1.2 材料性能试验

浇筑混凝土及 ECC 时，预留伴随了 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土试块、70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的 ECC 受压立方体受压试块、15 mm×40 mm×280 mm 的 ECC 薄板受拉试块及高强钢绞线。在进行轴心受压试验之前，首先对试验所用混凝土、ECC 及高强钢绞线进行材料性能的测定。

混凝土立方体抗压强度试验值如表 2 所示；ECC 材料性能试验结果见表 3，本试验 ECC 典型受拉应力-应变曲线如图 3 所示，具有明显的应变硬化特征。高强钢绞线经拉伸试验测得极限拉抗强度为 1 498.70 MPa，弹性模量为 120.38 GPa，极限最大拉应变为 0.028。

2 试验现象及机制分析

2.1 素混凝土 (D 组) 轴压试验

素混凝土试件受压时，当荷载达到最大荷载

表 2 混凝土立方体抗压试验结果

Table 2 Test results of concrete cubes under compression			
Strength grade of concrete	f_{cu}/MPa	f_{co}/MPa	$E_c/10^4\text{MPa}$
C30	33.5	22.4	3.0
C35	38.2	25.5	3.15
C40	42.9	28.6	3.25

Notes: f_{cu} —Average values of cube compressive strength; f_{co} —Axial compressive strength; E_c —Elastic modulus.

表 3 ECC 抗压和抗拉试验结果

Table 3 Test results of ECC under compression or tensile				
Group	$f_{m,cu}/\text{MPa}$	$E_e/10^4\text{MPa}$	$f_{m,t}/\text{MPa}$	Ultimate tensile strain/%
C30-E1-S50	38.8	1.71	4.52	2.58
C30-E2-S50	35.5	1.45	4.01	3.05
C30-E3-S50	33.5	1.27	3.34	3.01
C30-E1-S70	37.5	1.40	4.59	2.47
C30-E1-S50	37.1	1.38	4.63	2.47
C30-E1-S30	37.6	1.41	4.65	2.47
C35-E1-S50	38.1	1.53	4.72	2.59
C40-E1-S50	38.9	1.52	4.70	2.69

Notes: $f_{m,cu}$ —Compressive strength of ECC; E_e —Elastic modulus; $f_{m,t}$ —Tensile strength.

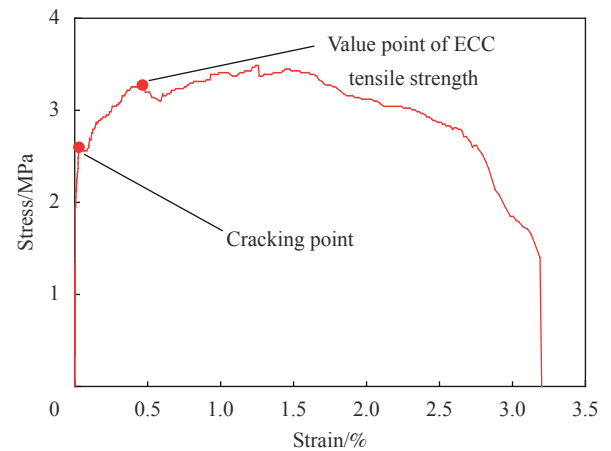


图 3 ECC 试验典型受拉应力-应变曲线
Fig. 3 Typical tensile stress-strain curve of ECC

的 75% 左右时，试件沿竖向形成贯通裂缝，裂缝宽度约为 1 mm；荷载继续增加至最大荷载，一声巨响、素混凝土被压碎，承载力急剧下降接近 0。明显的脆性破坏形态如图 4 所示。

2.2 HSE 约束素混凝土 (A 组~C 组) 试验

在轴向压力作用下，各阶段典型裂缝及破坏形态如图 5 所示。当荷载达到最大荷载的 30% 左右时，试件在柱中间部位出现 1 条，宽约为 0.01 mm 的竖向裂缝 (图 5(a))；继续增加荷载至最大荷载



(a) At cracking load (b) At 75% of peak load (c) At peak load

图 4 D 组素混凝土试件裂缝及破坏形态

Fig. 4 Cracks and failure patterns of plain concrete specimens of group D

的 85% 左右时，最大裂缝宽度约为 0.07 mm；当荷载达到最大荷载时，最大裂缝宽度约为 0.2 mm (图 5(b))；随后荷载开始缓慢下降，裂缝变宽速度明显增加。当荷载下降至最大荷载的 73%~75% 时，可以听到首根横向钢绞线被拉断的声音，此时裂缝最大宽度已达到 0.80 mm (图 5(c))；之后，随着荷载缓慢下降，横向钢绞线逐根拉断，荷载下降至最大荷载 20% 时，停止试验 (图 5(d))。此时，试件表面依然裂而不碎，保持良好的完整性。

2.3 HSE 约束素混凝土裂缝和破坏性能

HSE 约束素混凝土在轴压作用下，表现出明显的多缝开裂特征及良好的裂缝控制能力。当荷载达到最大荷载的 85% 时，最大裂缝宽度仅为 0.07 mm，远远小于规范 GB 50010—2010^[20] 正常使用极限状态的最大裂缝宽度要求；荷载增加至最大荷载时，最大裂缝宽度仅为 0.20 mm，满足规范 GB 50010—2010^[20] 中正常使用极限状态裂缝宽度要求，说明本文研究的新型复合材料“高强钢绞线网/ECC 约束素混凝土”具有良好的抗裂和耐久性能。当荷载约下降至最大荷载的 75% 时，各试件横向钢绞线开始逐根断裂，主裂缝达到 0.80 mm、旁伴有大量细小裂缝。但是试件表面裂而不碎，约束层和核心混凝土之间始终共同受力、未发生黏结破坏，因此，HSE 约束素混凝土轴心受压表现为明显的延性破坏。

3 试验结果及机制分析

3.1 试验结果

3.1.1 开裂荷载

表 4 为各试件的开裂荷载、最大荷载及相应应变等主要试验结果。可以看出，随着 ECC 强度、横向钢绞线配筋率及核心混凝土强度等级增大，HSE 约束素混凝土的开裂荷载均有所提高。分析变化规律，因为 ECC 强度变化较小，所以开裂荷

载增加量亦较小；核心混凝土强度越高，弹性模量越大，纵向压应变和横向拉应变越小，HSE 约

束素混凝土开裂荷载越大。横向钢绞线间距变化对开裂荷载影响较小。

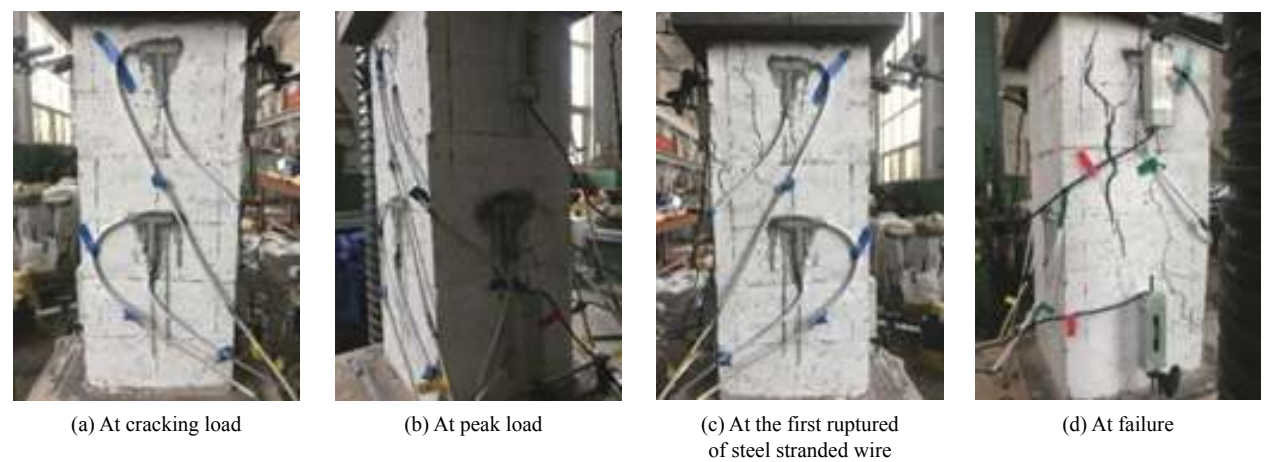


图 5 HSE 约束素混凝土试件裂缝及破坏形态
Fig. 5 Cracks and failure patterns of HSE confined concrete column specimens

表 4 HSE 约束素混凝土主要试验结果
Table 4 Main test results of HSE confined concrete

Group number	$f_{m,t}/\text{MPa}$	P_{cr}/kN	P_u/kN	P_{cr}/P_u	ε_{ec0}	P_s/kN	P_s/P_0	ε_{ecu}	f_{ec0}/MPa
C30-E1-S50	4.52	500	1 586	0.32	0.0034	1 157	0.73	0.0076	30.47
C30-E2-S50	4.04	480	1 542	0.31	0.0032	1 156	0.75	0.0074	31.15
C30-E3-S50	3.34	470	1 498	0.32	0.0033	1 168	0.78	0.0073	28.21
C30-E1-S70	4.59	500	1 510	0.33	0.0032	1 144	0.76	0.0068	29.91
C30-E1-S50	4.63	510	1 591	0.32	0.0034	1 178	0.74	0.0078	31.61
C30-E1-S30	4.65	530	1 660	0.32	0.0032	1 260	0.75	0.0091	34.66
C35-E1-S50	4.72	540	1 752	0.31	0.0033	1 340	0.76	0.0076	34.42
C40-E1-S50	4.70	580	1926	0.33	0.0032	1 466	0.76	0.0078	38.14
C30-E0-S0	—	250	930	0.27	0.0022	—	—	—	23.25
C35-E0-S0	—	275	1 056	0.26	0.0023	—	—	—	26.40
C40-E0-S0	—	300	1 147	0.26	0.0022	—	—	—	28.68

Notes: P_{cr} —Cracking load of specimens; P_u —Peak load; ε_{ec0} —Compressive strain corresponding to peak load (axial compressive strain); P_s —Load at the first rupture of the lateral steel stranded wires; ε_{ecu} —Strain at the first rupture of the lateral steel stranded wires (ultimate compressive strain); f_{ec0} —Peak load (axial compressive strength).

3.1.2 最大荷载

表 4 中各组试验结果显示，随着 ECC 强度提高、横向钢绞线配筋率的增加和核心混凝土强度的提高，HSE 约束素混凝土的最大荷载均增大，但是幅度不同，其中核心混凝土强度提高对最大荷载增加幅度最大；横向钢绞线配筋率和 ECC 强度变化的影响较小。分析原因，钢绞线网是人工缠绕，未采用设备拉紧横向钢绞线，达到最大荷载时，测出的受压试件横向拉应变仅为 0.8%，远未达到横向钢绞线横向的极限拉应变 3%，尚未充分发挥其约束作用，因此对最大荷载提高有限。HSE 约束素混凝土开裂荷载约为最大荷载的 32%，

大于素混凝土开裂荷载与最大荷载的比值 25%，进一步说明本文研究的新型复合材料的优越性。

3.1.3 最大荷载对应压应变(轴心压应变)

分析表 4 中各组试验结果发现，HSE 约束素混凝土的最大荷载对应压应变称为轴心压应变、本试验为 0.003 2~0.003 4，各因素的影响均很小，相比素混凝土轴心压应变(0.002 2)提升了约 45%。

3.2 HSE 约束素混凝土受压应力

为了分析该新型复合材料受力状态，将试验荷载换算成截面等效压应力。根据混凝土结构基本理论，HSE 约束素混凝土总轴向压力由约束层 ECC 及核心混凝土共同承担(忽略纵向高强钢绞

线受压作用)。因此, 将 HSE 约束素混凝土的轴向压力按照抗压刚度分配, 用来反映整个截面的等效效应, 由此推导出 HSE 约束素混凝土等效受压应力 σ 表达式如下式所示:

$$\sigma = \frac{P}{E_e A_e / E_c + A_c} \tag{1}$$

式中: P 为 HSE 约束素混凝土竖向荷载; E_e 、 E_c 分别为约束层 ECC 弹性模量及核心混凝土弹性模量, 取值见表 2 和表 3, A_e 、 A_c 分别为约束层 ECC 截面面积及核心混凝土倒角后的截面面积。素混凝土压应力为轴向荷载与其横截面面积比值, 且最大荷载对应的压应力即为素混凝土轴心抗压强度。按式 (1) 计算所有试件各级荷载对应的等效压应力, 其中最大荷载对应的压应力即 HSE 约束素混凝土轴心抗压强度 f_{eco} 列入表 4。

图 6 为 HSE 约束素混凝土 (C40-E1-S50) 和相同混凝土强度等级的素混凝土 (C40-E0-S0) 等效压应力-应变曲线。分析 C40-E1-S50 曲线可知, 加载初期曲线处于线弹性阶段, 与 C40-E0-S0 曲线几乎重合, 说明该阶段约束层对核心混凝土的约束作用很小。ECC 开裂后, 试件表面出现很多细小裂缝, 但由于裂缝处的纤维尚未被拉出或拔断, 仍继续承受拉力, 因此曲线在开裂应力状态下未出现明显的转折点。应力达到最大应力的 85% 左右时, 曲线出现明显弯曲并持续至最大应力。加载至最大应力时钢绞线尚未拉断, 该应力即为 HSE 约束素混凝土的抗压强度, 试件未表现出明显的破坏特征, 随后压应力开始缓慢下降、而压应变迅速增加, 说明约束层对核心混凝土的约束作用明显, 表现出良好的延性及变形能力, 当应力下

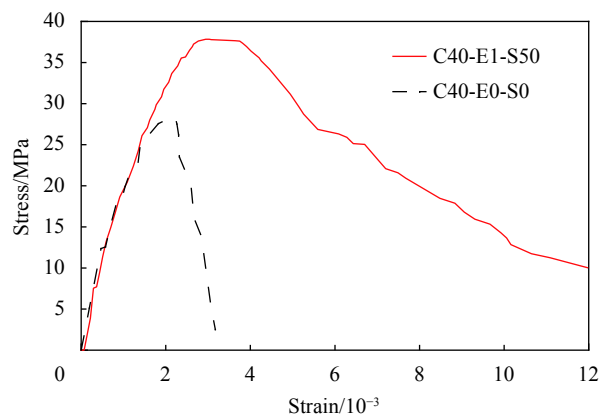


图 6 HSE 约束素混凝土试件等效压应力-压应变曲线

Fig. 6 Compressive stress-strain curves of HSE confined concrete specimens under compression

降至最大应力的 75% 左右时, 首根横向钢绞线断裂, 曲线出现明显的反弯点, 由此将该点定义为 HSE 约束素混凝土轴心受压的极限点, 对应的压应变为极限压应变, C40-E1-S50 极限压应变为 0.0078。

比较 C40-E1-S50 和 C40-E0-S0 试验得到轴心抗压强度值, C40-E1-S50 的轴心抗压强度约 38.1 MPa, 较其素混凝土轴心抗压强度 28.7 MPa 提高了 33%。

综合分析表 4, HSE 约束素混凝土和素混凝土受压相比: 开裂应力提高了 88%~116%; 最大压应力提高了 21%~49%; 轴心压应变增加了 45%; 极限压应变达到 0.0068~0.0091, 提高 106%~175%, 约束作用明显。

3.3 HSE 约束素混凝土受压性能影响参数

3.3.1 ECC 强度的影响

图 7 为随 ECC 强度变化 (A 组, C30-E1-S50~C30-E3-S50) 试件的开裂应力、抗压强度变化曲线和柱状图。可以看出, ECC 强度增大对试件的开裂应力和抗压强度影响很小。分析原因, ECC 强度提高, 开裂荷载和最大荷载均增加, 而同时试验所测的 ECC 受压弹性模量也随之增大^[21-22], 导致按式 (1) 计算的等效压应力值变化很小。

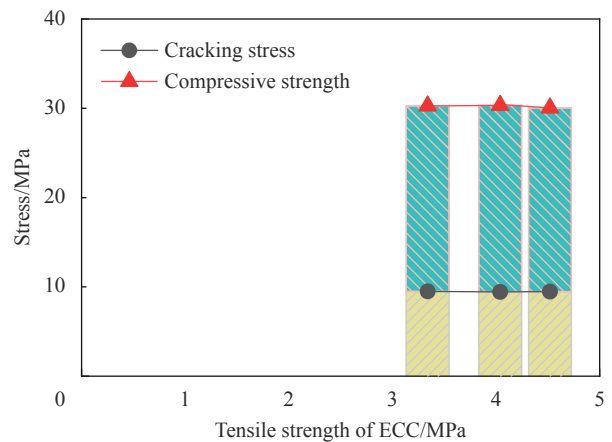


图 7 HSE 约束素混凝土应力-ECC 强度的关系

Fig. 7 Stress of HSE confined concrete versus tensile strength of ECC

3.3.2 核心混凝土强度等级的影响

试件 C30-E1-S50、C35-E1-S50、C40-E1-S50 的开裂应力、抗压强度随核心混凝土强度等级提高的变化如图 8 所示。可以看出, 开裂应力、抗压强度随混凝土强度等级提高而增大, 且混凝土强度等级越高开裂应力增加越明显; 而抗压强度增长与混凝土强度等级近似为线性关系, 提高幅度明显大于开裂荷载。

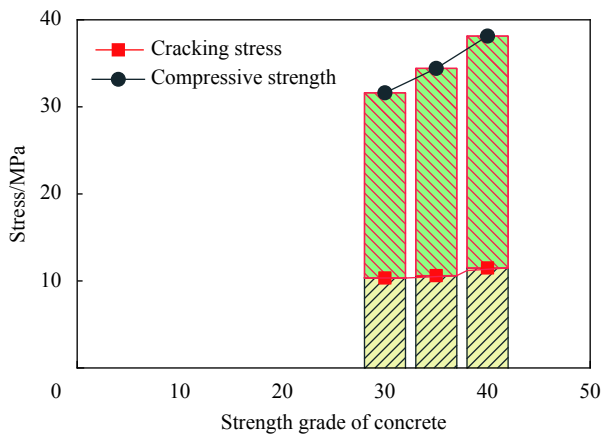


图 8 HSE 约束素混凝土应力-混凝土强度等级的关系
Fig. 8 Stress of HSE confined concrete versus strength grade of concrete

3.3.3 横向钢绞线配筋率的影响

图 9 为试件 C30-E1-S70~C30-E3-S30(B 组) 的开裂应力、抗压强度随横向钢绞线配筋率增加而变化的曲线和柱状图。可以看出，开裂应力随横向钢绞线配筋率增加较少；抗压强度随横向钢绞线配筋率增加有较明显的增大、且近似成线性关系。其原因主要是本文研究的横向钢绞线对核心混凝土的约束属于被动约束，只有在混凝土的横向应变较大时才起明显的作用，因此，达到抗压强度状态时，横向钢绞线的约束作用明显大于开裂状态。

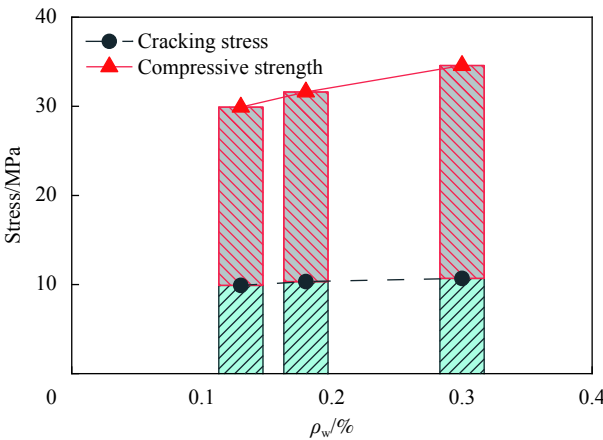


图 9 HSE 约束素混凝土应力-横向钢绞线配筋率 (ρ_w) 的关系
Fig. 9 Stress of HSE confined concrete versus reinforcement ratio of lateral steel stranded wires (ρ_w)

图 10 为随着横向钢绞线配筋率增大，试件极限压应变的变化 (C30-E1-S70~C30-E3-S30)。可以看出，随着横向钢绞线配筋率增加，达到极限状态 (首根钢绞线拉断) 时的压应变明显增加，从 0.13% 依次增长至 0.18%、0.30% 时，极限压应变增幅分别为 14.7%、33.8%。

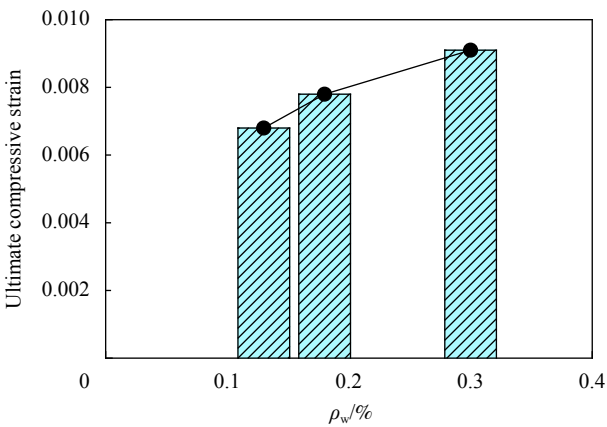


图 10 HSE 约束素混凝土极限压应变-横向钢绞线配筋率的关系
Fig. 10 Ultimate compressive strain of HSE confined concrete versus the reinforcement ratio of lateral steel stranded wires

4 结论

通过新型复合材料“高强钢绞线网/工程水泥基复合材料 (ECC) 约束素混凝土” (HSE 约束素混凝土) 轴心受压试验，得出主要结论：

(1) 高强钢绞线网/ECC 能有效约束核心混凝土。达到最大轴心受压荷载时，最大裂缝宽度为 0.20 mm，满足混凝土设计规范 GB 50010—2010^[20] 中正常使用极限状态裂缝宽度要求，表现出良好的裂缝控制能力。达到完全破坏时裂而不碎；约束层和核心混凝土具有良好的粘结性能。

(2) 提高 ECC 强度、横向钢绞线配筋率和核心混凝土强度等级，HSE 约束素混凝土的开裂荷载和最大荷载均增大，轴心压应变基本不变；横向钢绞线配筋率的增加使极限压应变明显增大。

(3) HSE 约束素混凝土和素混凝土相比，其开裂应力提高了 88%~116%，轴心抗压强度提高了 21%~49%，轴心压应变增大了约 45%，极限压应变增大了 106%~175%，表现出优越的变形性能。

(4) ECC 强度对 HSE 约束素混凝土的开裂应力和抗压强度影响很小；而增大横向钢绞线配筋率和核心混凝土强度等级，其开裂应力稍增加、但抗压强度明显增大。

参考文献：

[1] 徐世煌, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 45-60(in Chinese).
[2] 刘伟康. ECC 受压和受拉性能及本构模型研究[D]. 郑州: 郑州

- 大学, 2018.
- LIU Weikang. Study on the compression and tensile properties and the constitutive model of ECC[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018(in Chinese).
- [3] SAID S H, RAZAK H A, OTHMAN I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 176-188.
- [4] Li V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [5] 李悦, 朱金才, 吴玉生. 纤维对水泥基材料力学性能的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 57-61.
- LI Rui, ZHU Jincai, WU Yusheng. Effect of fiber on mechanical property of cementitious composite[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2017, 45(11): 57-61(in Chinese).
- [6] 张富文, 李向民, 王卓琳, 等. 纤维增强水泥基复合材料加固震损RC框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 61-69.
- ZHANG Fuwen, LI Xiangming, WANG Zhuolin, et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake-damaged RC frame strengthened by ECC[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 61-69(in Chinese).
- [7] LI B B, XIONG H B, JIANG J F, et al. Tensile behavior of basalt textile grid reinforced engineering cementitious composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 156(1): 185-200.
- [8] ZHENG Y, ZHANG L F, XIA L P. Investigation of the behaviour of flexible and ductile ECC link slab reinforced with FRP[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166(3): 694-711.
- [9] AL-GEMEEL A N, ZHUGR Y, YOUSSEF O. Experimental investigation of basalt textile reinforced engineered cementitious composite under apparent hoop tensile loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 23(5): 270-279.
- [10] 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 on compressive performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1957-1967(in Chinese).
- [11] 卜良桃, 李易越, 袁超, 等. PVA-ECC加固RC方柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 97-102.
- BU Liangtao, LI Yiyue, YUAN Chao, et al. Experimental study on bearing capacity of PVA-ECC reinforced concrete square columns subjected to axial load[J]. *Building Structure*, 2012, 42(7): 97-102(in Chinese).
- [12] 卜良桃, 袁超, 鲁晨, 等. 聚乙烯醇纤维水泥砂浆钢筋网加固RC柱偏压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(8): 82-88.
- BU Liangtao, YUAN Chao, LU Chen, et al. Study on bearing capacity of PVA-ECC steel mesh reinforced concrete column subjected to eccentric load[J]. *Building Structure*, 2013, 43(8): 82-88(in Chinese).
- [13] 王新玲, 苏会晓, 李可, 等. FRP网格增强ECC加固素混凝土柱受压性能数值分析[J]. 建筑科学, 2018, 34(3): 22-29.
- WANG Xinling, SU Huixiao, LI Ke, et al. Numerical analysis of compressive performance of plain concrete columns strengthened with FRP-Grid and ECC[J]. *Building Science*, 2018, 34(3): 22-29(in Chinese).
- [14] AL-GEMEEL A N, ZHUGR Y. Experimental investigation of textile reinforced engineered cementitious composite (ECC) for square concrete column confinement[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174(6): 594-602.
- [15] AL-GEMEEL A N, ZHUGR Y. Using textile reinforced engineered cementitious composite for concrete columns confinement[J]. *Composite Structures*, 2019, 210(2): 695-706.
- [16] 朱俊涛, 张凯, 王新玲, 等. 高强不锈钢绞线网与ECC黏结-滑移关系模型[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 83-92.
- ZHU Juntao, ZHANG Kai, WANG Xinling, et al. Bond-slip relational model between high-strength stainless steel wire mesh and ECC[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(4): 83-92(in Chinese).
- [17] 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): 3321-3329.
- 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 Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 3321-3329(in Chinese).
- [18] 王新玲, 罗鹏程, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料薄板受弯承载力研究[J/OL]. 建筑结构学报: 2020. 0155.
- WANG Xinling, LUO Pengcheng, QIAN Wenwen, et al. Study on flexural bearing capacity of high strength stainless steel wire strand mesh reinforced ECC thin plate[J/OL]. *Journal of Building Structures*: 1-9[2020-10-07](in Chinese). 2020. 0155.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of strengthening concrete structures: GB 50367—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013(in Chinese).
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015(in Chinese).
- [21] XU S L, CAI X R. Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultra high toughness cementitious composites[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(10): 1067-1077.
- [22] 白亮, 周枫, 谢鹏飞, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 108-113.
- BAI Liang, ZHOU Fen, XIE Pengfei, et al. Experimental research on mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(6): 108-113(in Chinese).