

文章编号:1007-9629(2021)04-0736-06

纤维编织网增强 ECC 的拉伸和弯曲性能

李传秀¹, 尹世平^{1,2}, 赵俊伶¹

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 通过拉伸和四点弯曲试验,研究了纤维编织网的层数及种类、纤维编织网表面浸胶粘砂处理以及聚乙烯醇(PVA)纤维体积分数对纤维编织网增强工程水泥基复合材料(TRE)拉伸和弯曲性能的影响。结果表明:和单层网 TRE 试件相比,双层网 TRE 试件的极限拉应力提高了将近1倍,极限弯曲荷载从单层碳纤维-玻璃纤维编织网 TRE 试件的 0.73 kN 增大到 1.62 kN,极限拉应力和极限弯曲荷载明显提高,刚度增大;与碳纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件相比,玄武岩纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件的拉伸和弯曲性能均较低;将碳纤维-玻璃纤维混编网表面进行浸胶粘砂处理后,TRE 试件的极限拉应力和极限弯曲荷载均降低,但极限拉应变和极限挠度增大;当 PVA 纤维体积分数从 1.0% 增加到 2.0% 时,单层碳纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件的极限拉应力从 4.15 MPa 增至 7.05 MPa,弯曲开裂荷载从 0.08 kN 增至 0.21 kN,试件的拉伸和弯曲性能提高。

关键词: PVA 纤维; 纤维编织网增强 ECC; 拉伸性能; 弯曲性能

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.009

Tensile and Bending Properties of Textile Reinforced ECC

LI Chuanxiu¹, YIN Shiping^{1,2}, ZHAO Junling¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Through tensile and four-point bending tests, the effects of the layers and types of textile, the coating treatments of textile, and the volume content of polyvinyl alcohol(PVA) fibers on the tensile and bending properties of textile reinforced engineered cementitious composites(TRE) were studied. The test results show that, compared with the single-layer carbon fiber-glass fiber TRE specimens, the ultimate tensile stress of the double-layer TRE specimens becomes nearly double, the ultimate bending load increases from 0.73 kN to 1.62 kN, the ultimate tensile stress and ultimate bending load are significantly improved, and the rigidity is increased. Compared with carbon fiber-glass fiber TRE specimens, the tensile and bending properties of basalt fiber-glass fiber TRE specimens are lower. The ultimate tensile stress and ultimate bending load of the TRE specimens show a decreasing trend after the carbon fiber-glass fiber textile surface is impregnated by epoxy resin and covered with sand, but the ultimate tensile deformation and ultimate mid-span deflection increase. When the PVA fiber volume content is increased from 1.0% to 2.0%, the ultimate tensile stress of the single-layer carbon fiber-glass fiber TRE specimen increases from 4.15 MPa to 7.05 MPa, the bending cracking load increases from 0.08 kN to 0.21 kN, the tensile and bending properties of TRE specimens are improved.

Key words: PVA fiber; textile reinforced ECC; tensile property; bending property

收稿日期:2020-05-21; 修订日期:2020-07-03

基金项目:徐州市重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术领域)(KC18106)

第一作者:李传秀(1994—),女,山东济南人,中国矿业大学硕士生. E-mail:746408953@qq.com

通讯作者:尹世平(1978—),男,山东高密人,中国矿业大学教授,博士生导师,博士. E-mail:ysp2010@cumt.edu.cn

纤维编织网增强混凝土(TRC)是由纤维编织网和细粒混凝土组成的新型纤维复合材料,具有较高的强度、韧性、良好的耐腐蚀性、抗冻融性和抗渗性,能够有效提高结构的耐久性^[1],在海洋环境和结构加固领域具有广泛的应用前景。

目前关于 TRC 拉伸和弯曲性能的研究成果较多,通过对不同配网率、不同纤维编织网表面处理的试件进行拉伸试验研究表明^[2-3],适宜的配网率和纤维编织网表面处理可以提高基体与纤维编织网间的界面性能及 TRC 的抗拉性能;通过增加配网率和对纤维编织网进行表面处理均能增强 TRC 的抗弯性能^[4],但是纤维编织网与基体会出现脱黏现象,使纤维编织网的拉伸性能不能充分发挥。为了改善 TRC 材料的缺点,获得性能更加优异的材料,一些学者在 TRC 基体中加入短切纤维^[5],以期提高 TRC 的力学性能,但是改善效果具有局限性。

工程水泥基复合材料(ECC)使用短切纤维增强,且纤维体积分数不超过复合材料总体积的 2.5%,极限拉应变可稳定达到 3%以上,具有显著的应变硬化和多缝开裂特征^[6-7],展现出优良的韧性和耐久性。

为了结合 TRC 和 ECC 的优点,获得性能更加优异的材料,一些学者将纤维编织网与 ECC 复合,研究纤维编织网增强 ECC(TRE)的力学性能。Ben 等^[8]研究了 TRE 的拉伸性能和破坏机理,并与 TRC 进行对比分析,发现 ECC 能改善纤维编织网的增强效果,TRE 比传统 TRC 具有更好的裂缝控制能力和拉伸性能。徐世烺等^[9-10]将纤维编织网和 ECC 联合使用,发现对纤维编织网进行浸胶粘砂处理,能够提高纤维编织网与 ECC 基体的黏结性能;当聚乙烯醇(PVA)纤维体积分数仅提高 0.5%时,试件的力学性能、裂缝控制能力明显提高,试件破坏形态也有明显改善。

目前关于 TRE 基本力学性能的研究成果还偏少,研究参数较单一。因此,在课题组前期研究的基

础上,以极限拉应变超过 3%的 ECC 材料作为基体,制备了纤维编织网增强 ECC(TRE),研究了纤维编织网的层数及种类、表面浸胶粘砂处理以及 PVA 纤维体积分数对 TRE 拉伸和弯曲性能的影响。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用徐州中联水泥有限公司提供的 42.5R 级普通硅酸盐水泥;粉煤灰采用江苏铸本科技发展有限公司生产的 I 级粉煤灰;石英砂采用包头市富森环保科技有限公司生产的 0.051~0.106 mm 石英砂;减水剂采用 Sika 聚羧酸高性能减水剂,减水率 30%;增稠剂采用山东赫达股份有限公司生产的增稠剂,主要成分为羟丙甲基纤维素;PVA 纤维采用日本 Kuraray 公司生产的 K-II 可乐纶 PVA 纤维,其几何及力学参数如表 1 所示。

表 1 PVA 纤维的几何及力学参数
Table 1 Geometric and mechanical parameters of PVA fiber

Length/ mm	Diameter/ mm	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Density/ (g·cm ⁻³)
12	0.04	1 600	42	1.3

纤维编织网分别为表面未经处理的碳纤维-玻璃纤维混编网(C)和玄武岩纤维-玻璃纤维混编网(B)。考虑到过多的涂层会减少纤维束和砂浆的接触面积,降低界面的黏结性能^[11],因此试验中采用的第 3 种纤维编织网为:经过环氧树脂浸渍并粘砂处理过的碳纤维-玻璃纤维混编网(C-T,粘砂数量以细砂均匀分布在纤维束上为准^[9])。碳纤维-玻璃纤维混编网和玄武岩纤维-玻璃纤维混编网纬向分别为碳纤维束和玄武岩纤维束,径向均为耐碱玻璃纤维束。纬向是增强方向,径向起固定作用,网格间距为 10 mm,如图 1 所示。

纤维编织网的力学性能见表 2。

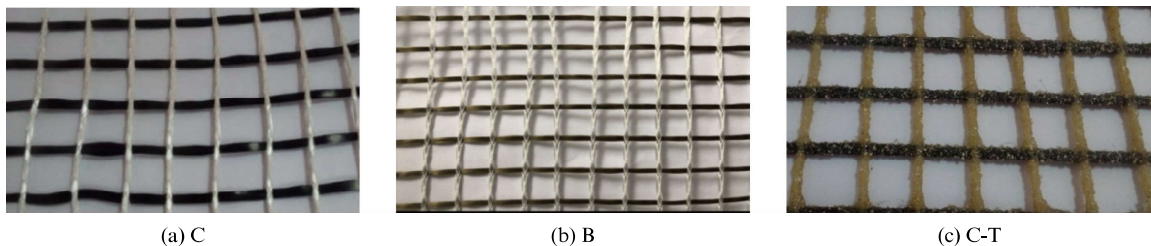


图 1 纤维编织网
Fig. 1 Textiles

表 2 纤维编织网的力学性能 Table 2 Mechanical properties of textiles					
Textile type	Number of filaments per bundle	Tensile strength of textile/MPa	Theoretical area/mm ²	Textile linear density/tex	Textile density/(g·cm ⁻³)
C	12 000	3 600	0.45	801	1.78
B	12 000	3 300	0.30	800	2.65

1.2 试验方案

以纤维编织网层数、种类、表面浸胶粘砂处理及 PVA 纤维体积分数 φ_{PVA} 为变量,研究 TRE 拉伸和弯曲性能,试件设计如表 3 所示.

表 3 试件设计 Table 3 Specimen design				
Specimen	Number of textile layer	Textile type	Coating treatments of textile	$\varphi_{\text{PVA}}/\%$
T1C-N2.0	1	C	No	2.0
T2C-N2.0	2	C	No	2.0
T1B-N2.0	1	B	No	2.0
T1C-Y2.0	1	C	Yes	2.0
T1C-N1.5	1	C	No	1.5
T1C-N1.0	1	C	No	1.0

1.3 试件制备

首先按表 4 所示配合比制备 ECC. 试件浇筑时先在试模内铺设 5 mm 厚的 ECC,然后将纤维编织网按纬向受力原则固定于模具上,最后浇筑 5 mm 厚的 ECC 保护层(四点弯曲试件的保护层厚度为 3 mm),双层网试件 2 层纤维编织网之间的 ECC 厚度为 5 mm. 养护 24 h 后拆模,标准养护 28 d 后对试件进行切割^[12],拉伸试验单层网试件尺寸为 400 mm×60 mm×10 mm,双层网试件尺寸为 400 mm×100 mm×15 mm. 四点弯曲试验单层网试件的尺寸为 400 mm×100 mm×8 mm,双层网试件尺寸为 400 mm×100 mm×13 mm.

表 4 ECC 配合比 Table 4 Mix proportion of ECC					
Cement	Fly ash	Quartz sand	Water	Water reducer	PVA fiber
379.0	885.0	455.0	366.0	17.4	26.0

1.4 测试方法

拉伸试验夹持端的长度为 100 mm,测量段的长度为 200 mm,对试件夹持端进行加固处理. 为减少试件因荷载偏心出现的应力集中,在钢板上下两侧均设置球铰. 采用 WDW300 试验机进行加载,采用量程为 10 mm 的位移传感器(LVDT)测量拉伸段的变形,采用 2T 荷载传感器测量荷载,采用 IMC 动态数据采集仪采集数据,试验加载速率为 0.2 mm/min.

四点弯曲试验采用 100 kN 的 CSS-44100 试验机进行加载,加载速率为 0.5 mm/min. 将 2T 荷载传感器和量程为 50 mm 的位移计连接到 GBD3816 静态应变测试分析系统上,测量试件的跨中荷载和挠度. 图 2 为四点弯曲试验加载示意图.

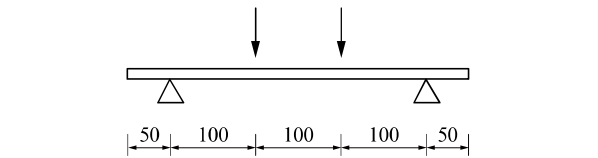


图 2 四点弯曲试验加载示意图
Fig. 2 Schematic of four-point test loading(size:mm)

测试结果均取 3 个试件有效数据的平均值.

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

拉伸试验中试件的破坏模式通常分为 3 种:夹持段发生破坏;测量段纤维编织网的断裂;测量段纤维编织网的滑移^[13]. 在本试验中:单层网 TRE 试件的破坏模式主要是测量段纤维编织网断裂破坏;少量试件由于拉伸试验荷载作用方向略偏离中心,出现应力集中现象,试件在夹持段发生破坏;试验使用的碳纤维-玻璃纤维混编网与 ECC 基体黏结性能良好,未出现纤维编织网滑移破坏现象;双层网 TRE 试件为加载端钢板与试件剥离破坏.

在拉伸荷载的作用下,TRE 试件出现多重开裂模式. 试验开始时,试件表面没有裂缝出现,达到开裂应力后,试件出现第 1 条裂缝;PVA 纤维和纵向碳纤维的桥接作用可以改善应力传递,使得试件在拉伸方向的应力分布更加均匀;在达到极限荷载前,微裂缝不断在既有裂缝旁边出现,产生新裂缝;当试件的荷载接近极限荷载时,某一微裂缝逐渐发展为宏观裂缝,伴随着纤维编织网的断裂,试件失效.

表 5 为 TRE 试件拉伸性能测试结果. 图 3 为 TRE 试件拉伸应力-应变曲线.

表 5 TRE 试件拉伸性能测试结果 Table 5 Tensile test results of TRE specimens				
Specimen	Cracking tensile stress/MPa	Cracking tensile strain/%	Ultimate tensile stress/MPa	Ultimate tensile strain/%
T1C-N2.0	1.07	0.17	7.05	2.39
T2C-N2.0	2.42	0.22	13.15	2.70
T1B-N2.0	0.95	0.08	4.30	1.94
T1C-Y2.0	0.95	0.12	6.90	2.98
T1C-N1.5	1.70	0.12	6.35	2.08
T1C-N1.0	0.93	0.13	4.15	1.68

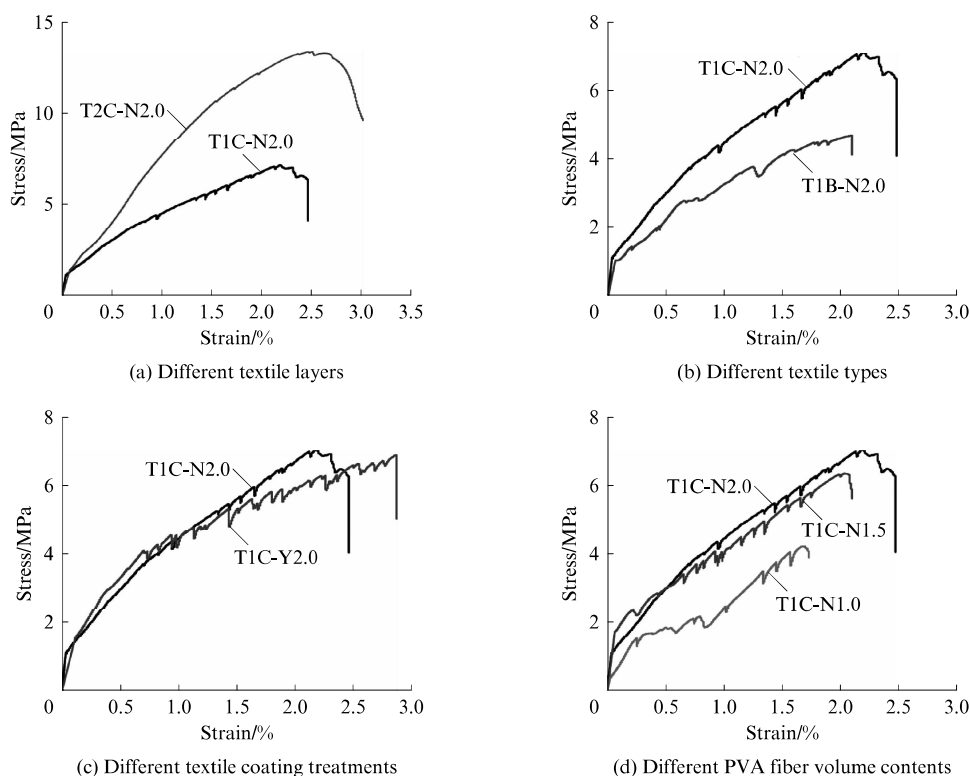


图3 TRE试件拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of TRE specimens

由图3(a)和表5可知,随着纤维编织网层数的增加,试件的开裂拉应力和极限拉应力均增加,极限拉应变增大.试件未开裂时,主要由ECC基体受拉.双层网TRE试件较单层网TRE试件开裂应力有较大的提高,但是并未达到单层网TRE试件的2倍.这是由于当试件承受拉伸荷载时,碳纤维束从外到内发生断裂,试件的破坏荷载不等于所有碳纤维束的总和^[14],同时双层网TRE试件在进行拉伸试验时,试件的加载端发生端部剥离破坏,纤维编织网没有拉断,利用率低.在开裂阶段,纤维编织网和ECC协同受力,双层网TRE试件的极限变形能力较好.

图3(b)为不同纤维编织网种类TRE试件的拉伸应力-应变曲线.由图3(b)和表5可知:玄武岩纤维-玻璃纤维混编网TRE试件的开裂拉应力、开裂拉应变、极限拉应力和极限拉应变均较低.这是由于玄武岩纤维-玻璃纤维混编网与ECC基体的界面黏结性能较低^[15],不能够充分发挥玄武岩纤维-玻璃纤维混编网的性能;另外,与碳纤维-玻璃纤维混编网相比,玄武岩纤维-玻璃纤维混编网自身的力学性能略差.

由图3(c)和表5可知:对纤维编织网表面进行浸胶粘砂处理,TRE试件极限拉应变提高较多,但极限抗拉应力略有降低.这是因为在试验过程中,当纤维编织网与ECC基体发生滑移时,可能在一定程

度上存在浸渍纤维网单丝被其表面所粘砂粒切断的情况.但是纤维编织网经过浸胶粘砂后,其与基体的黏结锚固性能得以提高,裂缝控制能力得以改善.从图3(c)还可以看出,与试件T1C-N2.0相比,纤维编织网表面浸胶粘砂处理的试件T1C-Y2.0的拉伸应力-应变曲线更加饱满,出现了应变硬化现象,变形能力得到较大提升.

图3(d)为不同PVA纤维体积分数TRE试件的拉伸应力-应变曲线.由图3(d)和表5可知,随着PVA纤维体积分数从1.0%增至2.0%,试件T1C-N2.0的极限拉应力从4.15 MPa增至7.05 MPa. PVA纤维在基体内乱向分布,起到了桥接与应力传递作用,抑制了裂缝的发展,随着应力的增加,TRE试件出现多缝开裂现象.且PVA纤维与织物相连,随机穿插、定位在纤维编织网表面及内部丝线之间,为周围的基体提供了更多的连接及锚固机会,改善了纤维编织网与基体的界面性能^[16],使纤维编织网的抗拉作用得以更加充分地发挥.当PVA纤维体积分数为2.0%时,TRE试件的拉伸应力-应变曲线发展稳定,拉伸力学性能与变形能力最好.

2.2 弯曲性能

在荷载的作用下,TRE试件展现出优异的弯曲

性能和多缝开裂能力. 与拉伸试件一样, 试验开始后, 随着荷载的增加, 试件产生微小变形, 达到开裂荷载后, 产生第1条裂缝, 随着荷载继续增加, 试件产生多条细而密的裂缝, 直到荷载到达峰值荷载, 试件失效. 图4为TRE试件典型破坏形态. 图5为TRE试件弯曲荷载-挠度曲线. 表6为TRE试件弯曲性能测试结果.

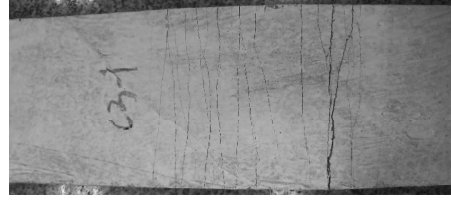


图4 TRE试件典型破坏形态
Fig. 4 Typical failure mode of TRE specimen

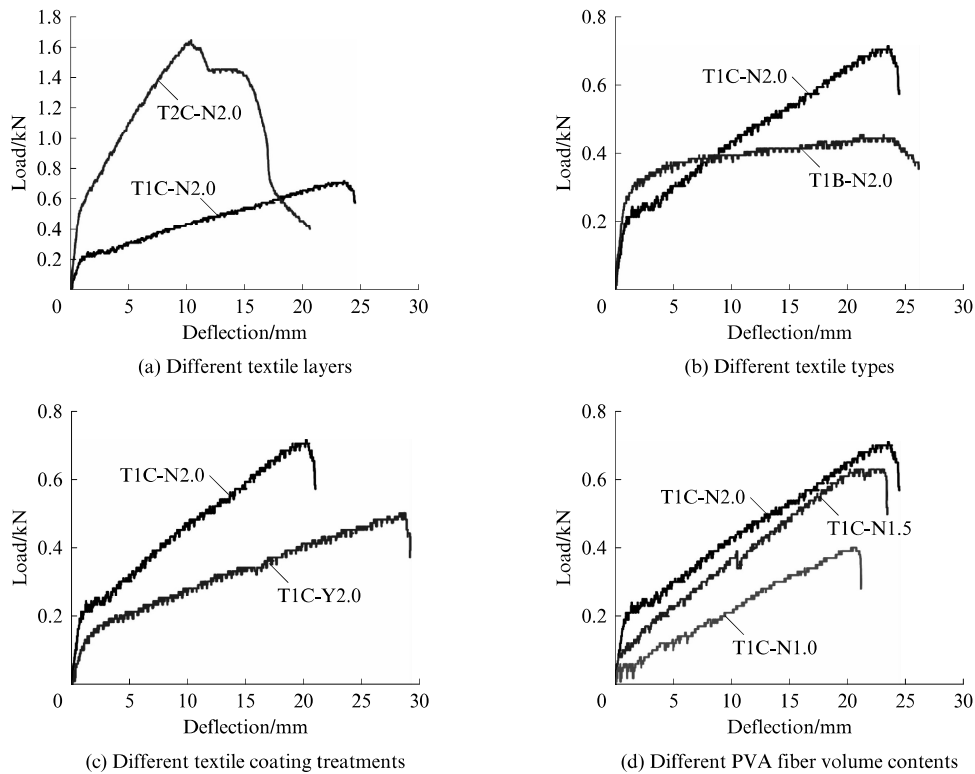


图5 TRE试件弯曲荷载-挠度曲线
Fig. 5 Bending load-deflection curves of TRE specimens

表6 TRE试件弯曲性能测试结果
Table 6 Bending test results of TRE specimens

Specimen	Initial crack load/kN	Deflection of initial crack/mm	Ultimate bending load/kN	Ultimate deflection/mm
T1C-N2.0	0.21	1.03	0.73	24.18
T2C-N2.0	0.53	0.73	1.62	11.32
T1B-N2.0	0.27	0.97	0.46	22.60
T1C-Y2.0	0.16	1.99	0.53	30.67
T1C-N1.5	0.16	1.26	0.70	23.67
T1C-N1.0	0.08	0.48	0.41	20.71

由图5(a)和表6可知:在单层网TRE试件刚开始加载时,弯曲荷载-挠度曲线呈线性;随着荷载达到初裂值,第1条裂缝出现,荷载经过多次降低又继续增大后达到峰值荷载,试件破坏失效;随着纤维编织网层数的增加,试件的极限弯曲荷载从0.73 kN增至1.62 kN,且刚度变大,极限挠度变小,变形能

力降低.

由不同纤维编织网种类TRE试件的弯曲荷载-挠度曲线(图5(b))可知,与碳纤维-玻璃纤维混编网TRE试件相比,玄武岩纤维-玻璃纤维混编网TRE试件的极限弯曲荷载和挠度均较小.这是由于玄武岩纤维-玻璃纤维混编网与ECC基体的界面黏结性能较差,协同受力能力降低,并且玄武岩纤维-玻璃纤维混编网本身的力学性能也低于碳纤维-玻璃纤维混编网.这与拉伸试验的结果一致.

由图5(c)和表6可知,纤维编织网表面的浸胶粘砂处理,提高了编织网和基体的黏结锚固性能和TRE试件的变形能力,但是由于存在浸渍纤维网单丝被其表面所粘砂粒切断的可能性,因此试件极限弯曲荷载降低.

由图5(d)和表6可知,随着PVA纤维体积分数的增加,试件的开裂荷载增至0.21 kN,极限弯曲

荷载增至 0.73 kN,韧性也提高。当 PVA 纤维体积分数为 1.0% 时,试件的弯曲性能最差,当 PVA 纤维体积分数增加到 2.0% 后,纤维的桥接与应力传递作用增强,抑制了裂缝的发展,同时纤维编织网与 ECC 基体的界面黏结性能改善,试件的承载力提高,弯曲性能得到改善。

3 结论

(1)与单层网 TRE 试件相比,双层网 TRE 试件的承载能力更高,极限拉应变更大,但极限挠度较小。

(2)与玄武岩纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件相比,碳纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件的极限拉应力和极限弯曲荷载更高,极限拉应变和极限挠度更大。总体而言,碳纤维-玻璃纤维混编网 TRE 试件拉伸和弯曲性能更好。

(3)将碳纤维-玻璃纤维混编网表面进行浸胶粘砂处理后,ECC 基体与纤维编织网的界面黏结性能提高,TRE 试件极限拉应变和极限挠度增加。

(4)随着 PVA 纤维体积分数的增加,TRE 试件的力学性能得到了改善。PVA 纤维起到了桥接与应力传递作用,抑制了裂缝的发展,同时也改善了纤维编织网与 ECC 基体的界面黏结性能,试件极限拉应力和极限弯曲荷载变大,极限拉应变和极限挠度提高。

参考文献:

- [1] 李赫,徐世琅.纤维编织网增强混凝土(TRC)的基体开发和优化[J].水力发电学报,2006,25(3):72-76.
LI He, XU Shilang. Development and optimization of cementitious matrices for textile reinforced concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(3): 72-76. (in Chinese)
- [2] 周芬,刘玲玲,杜运兴.碳纤维织物增强水泥基复合材料试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(11):66-72.
ZHOU Fen, LIU Lingling, DU Yunxing. Experimental investigations on carbon textile reinforced cementitious composites[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(11): 66-72. (in Chinese)
- [3] BARHUM R, MECHTCHERINE V, CURBACH M. Influence of short dispersed and short integral glass fibers on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete[J]. Materials and Structure, 2013, 46(4): 557-572.
- [4] YIN S P, XU S L, LI H D. Improved mechanical properties of textile reinforced concrete thin plate[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2013, 28(1): 92-98.
- [5] DUY X, ZHANG M M, ZHOU F, et al. Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 88-100.
- [6] MA H, QIAN S Z, ZHANG Z G, et al. Tailoring engineered cementitious composites with local ingredients[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 584-595.
- [7] LI V C. On engineered cementitious composites(ECC)-A review of the material and its applications[C] // 中国混凝土与水泥制品协会纤维混凝土工程材料 2012 高峰论坛. 北京: 中国混凝土与水泥制品协会, 2013: 43-58.
LI V C. On engineered cementitious composites(ECC)-A review of the material and its applications[C] // 2012 Summit Forum on Fiber Reinforced Concrete Engineering Materials of China Concrete and Cement Products Association. Beijing: China Concrete and Cement Products Association, 2013: 43-58.
- [8] 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, 2019, 156: 185-200.
- [9] 徐世琅,李庆华,李贺东.碳纤维编织网增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(12):69-76.
XU Shilang, LI Qinghua, LI Hedong. An experimental study on the flexural properties of carbon textile reinforced ECC [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(12): 69-76. (in Chinese)
- [10] LI Q H, XU S L. Experimental research on mechanical performance of hybrid fiber reinforced cementitious composites with polyvinyl alcohol short fiber and carbon textile[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(1): 5-28.
- [11] DONNINI J, CORINALDESI V, NANNI A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments[J]. Composites part B: Engineering, 2016 (88): 220-228.
- [12] 尹世平,王波,强东峰,等.氯盐干湿循环下纤维编织网增强混凝土力学性能[J].建筑材料学报,2016,19(4):752-757.
YIN Shiping, WANG Bo, QIANG Dongfeng, et al. Mechanical performance of textile reinforced concrete under chloride salt dry-wet cycle[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 752-757. (in Chinese)
- [13] DENG M K, DONG Z F, ZHANG C. Experimental investigation on tensile behavior of carbon textile reinforced mortar (TRM) added with short polyvinyl alcohol(PVA) fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117801.
- [14] CAROZZI F G, COLOMBI P, FAVA G, et al. A cohesive interface crack model for the matrix-textile debonding in FRCM composites[J]. Composite Structures, 2016(143): 230-241.
- [15] 戴清如,沈玲华,徐世琅,等.纤维编织网增强混凝土基本力学性能试验研究[J].水力学报,2012,43(增刊1):59-69.
DAI Qingru, SHEN Linghua, XU Shilang, et al. Mechanical properties research of textile reinforced concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(Suppl 1): 59-69. (in Chinese)
- [16] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 92: 56-71.