

碳纤维织物增强水泥基复合材料试验研究*

周芬[†], 刘玲玲, 杜运兴

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:采用轴向拉伸试验研究了碳纤维织物增强水泥基复合材料(TRC)的静力力学性能, 试验工况考虑了配网率、短切钢纤维以及碳纤维织物上的预拉力3个因素. 试验结果表明: 没有掺加短切钢纤维的薄板, 随着配网率的增加, 碳纤维织物利用率降低, 试验过程中纤维层与水泥基层逐渐分离, 最终薄板发生剥离破坏; 对碳纤维织物施加预拉力能使薄板的开裂应力提高, 从而提高TRC构件的正常使用寿命; 在薄板中掺入短切钢纤维有助于提高其界面性能, 进而使薄板抗拉强度、极限应变均得以提高; 与施加预拉力相比, 掺入短切钢纤维对薄板力学性能的改善更加显著; 对碳纤维织物施加预拉力的同时在薄板中掺入1%的短切钢纤维可显著提高碳纤维的利用率, 薄板破坏时碳纤维被完全拉断.

关键词: 织物增强水泥基复合材料; 碳纤维织物; 抗拉强度; 界面性能

中图分类号: TU528.572; TU375.2

文献标志码: A

Experimental Investigations on Carbon Textile Reinforced Cementitious Composites

ZHOU Fen[†], LIU Lingling, DU Yunxing

(1. Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Quasi-static uniaxial tensile behavior of carbon textile reinforced cementitious composites (TRC) was studied, and the factors of reinforcement ratio and short steel fibres and prestress were considered in the tests. The test results showed that the efficiency of carbon fibers decreased with the increase of textile ratio for the TRC plates without steel fibres during the tests, the textile layer and matrix layer were gradually separated, and debonding failure of TRC plates occurred ultimately. Applying prestress force to the textile can increase the initial cracking stress of TRC plates, and thus improved the normal service life of TRC components. Adding steel fibres in TRC plates was helpful to improve the interfacial properties, and thus both the tensile strength and ultimate strain of the plates were enhanced. Compared with the application of prestress to the textile, more pronounced enhancements of mechanical properties were achieved by the addition of steel fibres. Applying prestress to the textile and adding 1% of steel fibres in plates at the same time can significantly improve the efficiency of carbon fibers. Eventually, carbon fibers were completely broken when the plates were damaged.

* 收稿日期: 2016-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378199), National Natural Science Foundation of China(51378199); 长沙市科技计划项目(kq1701032), Project of Sci-Tech Plan of Changsha City (kq1701032)

作者简介: 周芬(1973—), 女, 湖北武汉人, 湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: zhoufen@hnu.edu.cn

Key words: textile reinforced cementitious composites; carbon textile; tensile strength; interfacial properties

织物增强水泥基复合材料(Textile Reinforced Cementitious Composites, 简称 TRC)是指将纤维织物与高性能水泥基体结合的一种新型复合材料。TRC 的优点是可以将传统水泥基体在拉伸荷载下单一裂缝的开裂模式转化为多条细密裂缝的开裂模式,具有非常显著的增强增韧特性和优良的耐久性。近年来,短纤维增强水泥基复合材料已得到广泛研究和应用^[1-3]。用高性能的短纤维(比如 PVA 纤维、PE 纤维、钢纤维等)增强水泥基体可生产出高耐久性的薄壁、轻质构件,但由于短切纤维在水泥基体中乱向随机分布,其纤维利用率较低。而在 TRC 结构中,纤维沿水泥基体中的应力主向连续布置,可有效地提高纤维利用率。由于 TRC 所采用的纤维材料(比如碳纤维、耐碱玻璃纤维、玄武岩纤维等)具有高耐腐蚀性,不受环境中氯离子和二氧化碳的影响,因而水泥基体保护层厚度可很薄。这些特性使得 TRC 可用于薄壁轻质结构、预制免拆除模板、预制夹芯板等^[4-5],还可用于已有结构的加固与修复^[6-8]。

在 TRC 构件的推广和应用过程中,其力学性能的试验研究十分必要,可为理论研究、数值模拟、设计提供依据。纤维织物与水泥基体之间的界面性能是 TRC 能否发挥其力学性能的关键。Dvorkin 等^[9]通过碳纤维织物的拔出试验发现,碳纤维织物是否浸胶对纤维与水泥基体之间的界面性能影响较大。碳纤维织物浸胶与不浸胶相比能够明显提高纤维与水泥基体之间的界面性能。尹世平等^[10]研究表明,纤维织物经环氧树脂浸渍并表面粘砂、纤维织物上挂 U 形钩都可提高纤维织物与水泥基体的界面性能。Rambo 等^[11]研究了布置 1 层、3 层、5 层玄武岩织物的 TRC 薄板的轴拉性能,研究表明,布置 3 层或 5 层织物的试件具有典型 TRC 应力-应变曲线,即三阶段的应变强化特性。Barhum 和 Mechtcherine^[12]通过对掺入短切碳纤维和玻璃纤维的 TRC 板进行单轴拉伸试验发现,掺入短纤维能使 TRC 板的初裂应力和抗拉强度得到提高,且掺入碳纤维比掺入玻璃纤维提高明显。掺入短纤维的 TRC 板还改善了裂缝状态。Reinhardt 等^[13]通过对 TRC 板进行四点弯曲试验发现,对环氧树脂浸渍处理的碳纤维织物施加预拉力能使 TRC 板的开

裂应力和极限弯拉强度得到提高。

目前,国内外学者对于 TRC 板的力学特性做了大量的试验研究,但对于掺入不同含量短切钢纤维的 TRC 板及对织物施加预拉力的 TRC 板的试验研究较少,尚未见将钢纤维掺入到预应力 TRC 板的相关试验研究。

1 材料和试验方法

1.1 纤维织物

本文试验采用经环氧树脂浸渍的碳纤维织物作为增强材料,网格尺寸 5 mm×5mm,环氧树脂浸渍后的碳纤维织物如图 1 所示,其增强作用主要由经向纤维束承担。本文测试从纤维织物上截取的单根经向碳纤维束的力学性能,见表 1。纤维束的横截面积为 0.218 mm²,通过其线密度除以体密度得到。纤维束的抗拉强度、极限应变、弹性模量通过 MTS 万能试验机准静态试验测得,纤维束试件的标距为 100 mm,拉伸速率设定为 2.5 mm/min,采用 1 kN 力传感器,数据采集频率为 20 Hz^[14-15]。试验还测得了 40 mm 宽的织物条带的极限抗拉承载能力为 4 kN,抗拉强度为 2 293.58 MPa。

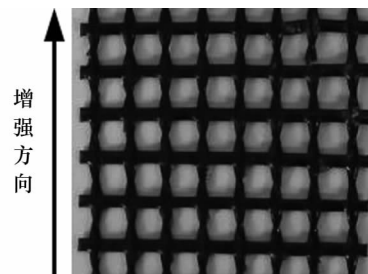


图 1 碳纤维织物

Fig.1 Carbon textile

表 1 碳纤维束力学性能

Tab.1 Mechanical properties of carbon yarns

类型	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	极限应变 /%	密度/ (g·cm ⁻³)	横截面积 /mm ²
6K	2 290	230	1	1.8	0.218

1.2 钢纤维

钢纤维具有高抗拉强度、高弹性模量、在混凝土中不会结球、能够均匀分布等优点。本文采用镀铜微丝钢纤维,表 2 为试验所采用的短切钢纤维的力

学及几何特征参数,钢纤维形态如图2所示.钢纤维的密度由质量除以体积得到,钢纤维的体积则由排水法测得.

表2 钢纤维参数

Tab.2 The properties of steel fibres

直径 /mm	长度 /mm	密度 /(g·cm ⁻³)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
0.18~0.23	12~15	8.5	2 850	200



图2 钢纤维

Fig.2 Steel fibres

1.3 水泥基体

织物增强水泥基复合材料的基体必须具有高流动性、不离析的自密实能力.为满足上述条件并确保水泥基体能够渗透织物,本文所用水泥基体骨料的最大粒径不超过2 mm.本试验部分工况需对织物施加预拉力,基体还必须具有较高的早期强度.为此,专门配制了高性能水泥基体,其配合比见表3.制作40 mm×40 mm×160 mm的试件测试水泥基体的抗折性能,先采用水泥电动抗折试验机进行抗折试验,匀速加载直至试件断裂;再用抗折试验剩下的残块测试水泥基体的抗压性能,试件尺寸为40 mm×40 mm×40 mm.试验分别测得水泥基体龄期为7 d和28 d的力学性能:抗折强度分别为11.5 MPa和12.3 MPa,抗压强度分别为62.5 MPa和76.7 MPa.证明了按照本文配合比制备的水泥基体满足较高早期强度的要求.

表3 基体水泥基配合比

Tab.3 The mixture of concrete

配合比/(kg·m ⁻³)						
P. II52.5 水泥	粉煤灰	硅灰	矿灰	0~2 mm 砂	超塑化剂	水
800	100	50	50	1200	2.0	286

1.4 试验方案

本次试验分别以配网率、钢纤维体积分数、织物的预拉力为变量,考察这些因素对碳纤维TRC薄板力学性能的影响.具体试验方案如下:分别铺设1层织物和2层织物,探讨不同配网率下的薄板力学性能;铺设1层织物时考虑掺入不同体积分数

(0%,0.5%,1%,2%)的钢纤维、施加不同水平(10%和20%)预拉力对薄板力学性能的影响;并研究了对纤维织物施加预拉力的同时掺入1%体积分数的钢纤维对薄板力学性能的改善情况.本文采用的编号含义如下:以P20C1S1为例,P20代表施加的预拉力为纤维织物极限抗拉承载力的20%,C1代表铺设1层碳纤维织物,S1代表掺入钢纤维的体积分数为1%.

1.5 试件制备

本试验所有工况均先将碳纤维织物固定在相应位置上并绷紧(织物在板材中均匀布置),再将水泥基体直接浇筑在织物上,并用平板式震动器震动水泥基体40 s,最后抹平表面.制作预拉力工况的板材时,先将织物预张拉1 d再浇筑水泥基体,可有效避免织物松弛带来的预拉力损失;室温下洒水养护4 d后拆模,随后将板材放置在标准养护室中养护至28 d,而非预拉力工况的板材浇筑完成1 d后即可拆模.试件由大板切割而成,试验前用切割机锯出所用试件,所有试件的尺寸为240 mm×40 mm×10 mm(长×宽×高),同样工况的试件至少保证有6个.铺设1层织物时,试件40 mm宽度内布置了8根碳纤维束,配网率为0.4%,铺设2层织物时,配网率为0.8%.本试验在制作掺加钢纤维工况的板材时,将部分钢纤维竖向或斜向插入织物的网格孔洞中(见图3),剩余部分钢纤维与水泥基体充分混合(见图4).

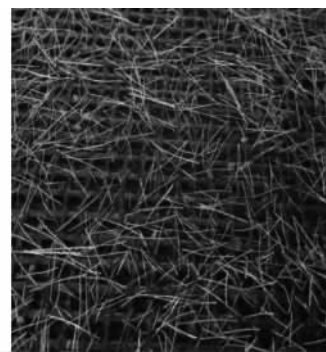
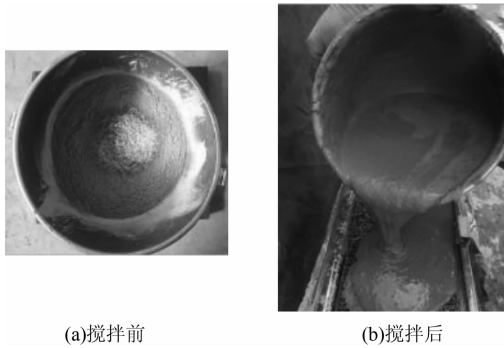


图3 钢纤维插入碳纤维织物的网格中

Fig.3 The mesh of the carbon textile with steel fibres plunged

1.6 试验方法

试验在MTS万能试验机(C43.304)上进行,试验装置如图5所示.采用由位移控制的加载,速率为0.5 mm/min.拉伸试件标距为100 mm,采用引伸计测量标距内的位移,采用力传感器测量拉力,拉力和标距内位移由试验机同时采集.在试件两端



(a)搅拌前 (b)搅拌后

图 4 钢纤维与水泥基体混合

Fig.4 The mixture of steel fibers and matrix

用环氧树脂胶粘贴铝片,同一端 2 块铝片保持平行且孔洞对中,如图 6 所示. 为避免偏心带来的附加弯矩,本试验设计了带有 5 个球铰的特定夹具,以防止偏心. 为便于观察裂缝的开展,在试件表面涂 1 层很薄的白色涂料,试验过程中产生的裂缝由照相机每隔 15 s 记录一次.

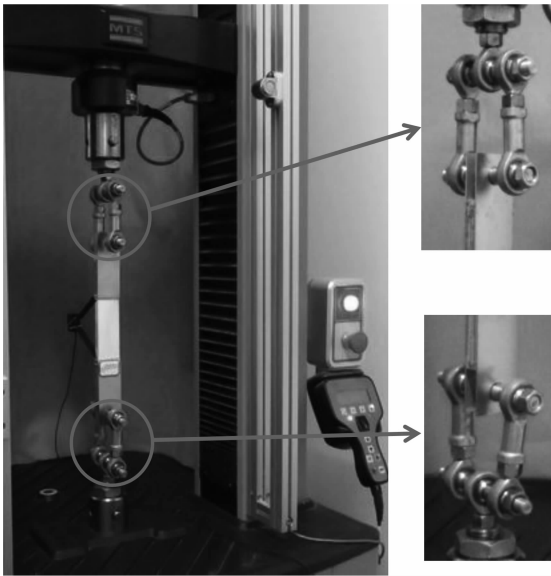


图 5 轴向拉伸试验装置

Fig.5 Setup of the uniaxial tensile test

2 试验结果及分析

2.1 配网率对织物增强水泥基薄板轴向拉伸性能的影响

图 7 给出了素水泥基板和配网率为 0.4% 和 0.8% 的 TRC 板的轴向拉伸应力-应变曲线. 从图中可看出,素水泥基板在开裂破坏过程中其荷载与变形呈线性增加,出现裂缝时,试件即发生脆性破坏,荷载瞬间下降. TRC 试件开裂前,荷载与挠度均近

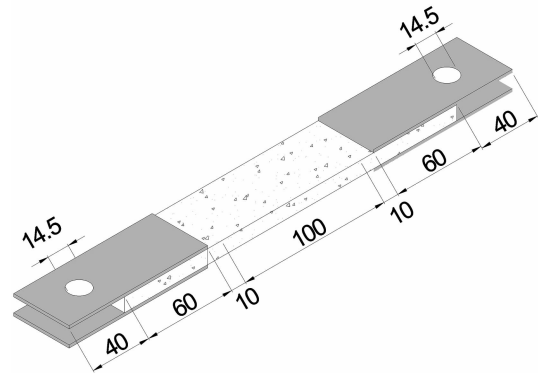


图 6 试件的几何尺寸(单位:mm)

Fig.6 The geometry of the specimen (unit:mm)

似呈线性增加,试件开裂后,荷载骤减,然后继续增加,经过数个转折点后,上升到峰值,试件破坏.

从图 7 和表 4 中可看出板材的极限承载能力随着配网率的增大而增大. 配网率为 0.4% 时,板材抗拉强度均值为 6.04 MPa,极限承载能力比素水泥基板提高了 47.3%,碳纤维的利用率 k 为 60.4%;配网率增大 1 倍时,板材抗拉强度均值为 9.88 MPa,极限承载能力比素水泥基板提高了 141%,但碳纤维织物的利用率 k 仅为 49.4%. 随着配网率的增加,碳纤维的利用率降低,试件破坏时碳纤维织物并没有被拉断. 试件 P0C1S0 和 P0C2S0 的破坏都是由于织物与水泥基之间发生了剥离. 基于本次试验结果,仅考虑织物利用率的 TRC 薄板在单轴拉伸时的极限承载力 F_u 为: $F_u = k \times A_f \times \sigma_f$, 其中 k 为织物利用率, A_f 为计算截面内纤维束的横截面积, σ_f 为单根纤维束的抗拉强度.

试件的破坏模式与图 7 的曲线相符,试件 P0C1S0 和 P0C2S0 的应力-应变曲线表现出了双线性特征,没有明显的强化阶段,可见剥离破坏时,TRC 试件的增强特性和变形能力都没有充分发挥.

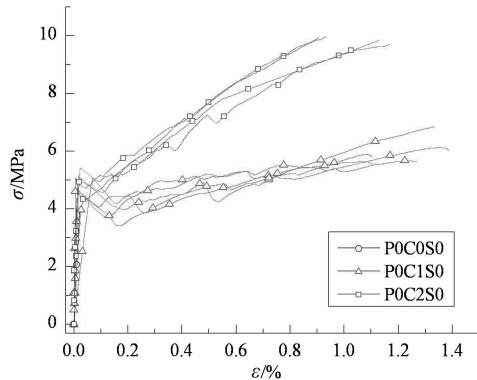
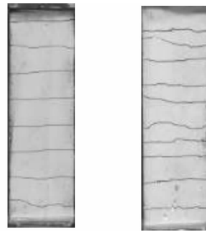


图 7 不同配网率 TRC 试件的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of the TRC specimens with different reinforcement ratios

图8所示为试验过程中拍摄的TRC试件P0C1S0和P0C2S0的开裂情况,从中可清楚地观察到TRC试件在拉伸荷载作用下产生了多条分布均匀的细密裂缝.随着配网率的增大,裂缝数量增多,同时裂缝间距减小.



(a) P0C1S0 (b) P0C2S0

图8 TRC试件的开裂状况

Fig.8 Cracking states in TRC specimens

试件P0C1S0和P0C2S0破坏时,碳纤维没有被拉断,造成了碳纤维的浪费,在一定程度上此种TRC板材的经济性能较差,因此应采取措施提高碳纤维织物与基体水泥基之间的界面性能,进而提高碳纤维织物的利用率.

2.2 钢纤维对织物增强水泥基薄板轴向拉伸性能的影响

图9和表4显示了钢纤维体积分数对TRC薄板轴向拉伸性能的影响.由图9可知,掺加钢纤维对试件的承载力和变形能力均有不同程度的改善.短切钢纤维作为次要增强筋,在基体中乱向随机分布,能与基体形成良好黏结,界面性能的增加主要归因于穿插在织物网格孔洞中钢纤维的“销栓作用”.掺加钢纤维提高了基体的抗裂能力,从而进一步提高了试件的承载能力,表现在曲线上为开裂应力大,开裂后刚度降低小,曲线震荡幅度小,极限承载力高.

P0C1S0.5, P0C1S1和P0C1S2较P0C1S0极限承载能力分别提高了44.2%, 60.8%和98.5%;初裂应力也随着钢纤维体积分数的增大而增大. P0C1S0.5, P0C1S1和P0C1S2较P0C1S0初裂应力分别提高了4.7%, 20.4%和40%,变形能力分别提高了32%, 42.6%和54.9%,表明在本试验掺量范围内,钢纤维体积分数越高越有益于改善TRC板的轴拉性能.随着钢纤维掺量的增多,曲线波动的次数和幅度越来越小,表明界面性能得以不断改善.钢纤维在裂缝间的桥接作用显著,可显著提高板材的延性,极限应变可达到1.89%.

图10展示了试件P0C1S0, P0C1S0.5, P0C1S1和P0C1S2在试验过程中的开裂情况.从图中可看

出掺加钢纤维之后微裂缝明显增多,一条主裂缝可延伸出多条微裂缝.裂缝开展模式也由较为平直的通长裂缝转变为含多条不通长裂缝.这是由于短切钢纤维在水泥基基体中随机乱向分布,形成对微观及宏观裂缝扩展的阻力,改变了裂缝的发展方向.

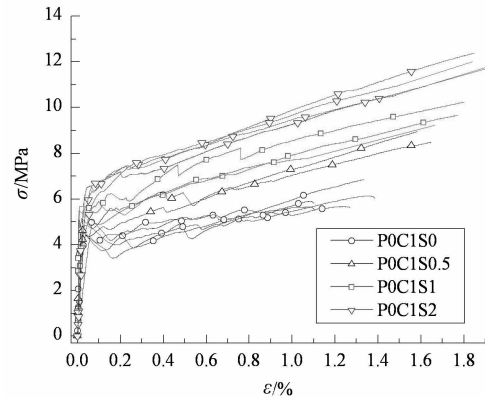
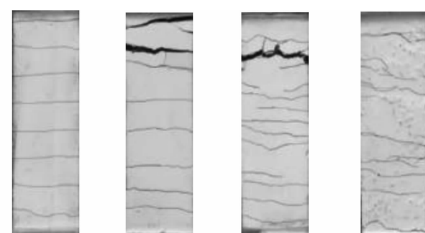


图9 掺入不同体积分数钢纤维TRC试件的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of the TRC specimens with short steel fibres by varying volume fractions

表4 不同钢纤维体积分数对应的TRC薄板力学性能
Tab.4 Mechanical characteristic of TRC plates with different volume fractions of steel fibres

碳纤维织物 层数	钢纤维体积 分数/%	均值(标准差)		
		初裂应力 /MPa	抗拉强度 /MPa	极限应变 /%
1	0	4.66(0.30)	6.04(0.49)	1.22(0.13)
1	0.5	4.88(0.10)	8.71(0.32)	1.61(0.04)
1	1	5.61(0.11)	9.71(0.51)	1.74(0.07)
1	2	6.43(0.11)	11.99(0.28)	1.89(0.05)
2	0	4.95(0.36)	9.88(0.12)	1.03(0.13)



(a)P0C1S0 (b)P0C1S0.5 (c)P0C1S1 (d)P0C1S2

图10 掺加不同体积分数钢纤维TRC试件开裂状况

Fig.10 Cracking states in TRC specimens with different volume fractions of steel fibres

另外,图11还对TRC试件的抗拉强度随钢纤维体积分数的变化趋势进行了曲线拟合,并给出了拟合方程,以便于工程应用.

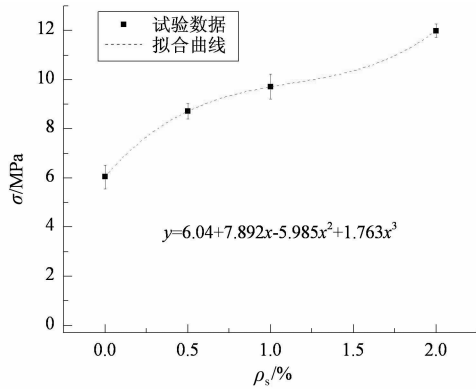


图 11 钢纤维体积分数对 TRC 试件抗拉强度的影响

Fig.11 Steel fibres volume fraction effect on tensile strength of TRC specimens

2.3 预拉力对织物增强水泥基薄板轴向拉伸性能的影响

图 12 和表 5 给出了预拉力 TRC 板的轴拉试验结果,由图 12(a)可知,对织物施加预拉力能够提高板材的开裂应力和抗拉强度;随着预拉力值的增加,试件的力学性能均有所提高,但提高幅度较小.其中,试件 P20C1S0 较 P0C1S0 的初裂应力仅提高了 25.7%,抗拉强度仅提高了 30.5%. 由图 12(b)可知,在对织物施加预张力的同时参加 1% 钢纤维对试件力学性能(开裂应力、承载能力、变形能力)有大幅改善.其中,P20C1S1 较 P0C1S0 的试件初裂应力提高了 51.5%,抗拉强度提高了 114%,变形能力提高了 57.4%.

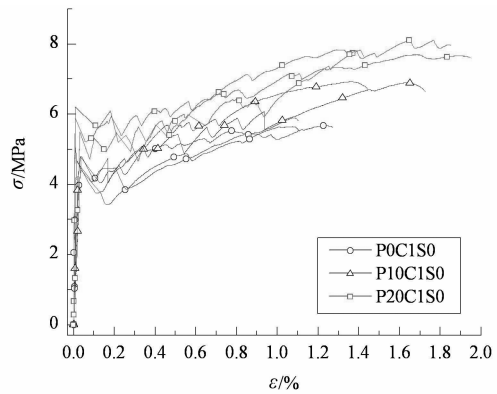
表 5 钢纤维体积分数为 0%和 1%对应的预拉力 TRC 薄板的力学性能

Tab. 5 Mechanical performance of prestressed TRC plates without and with the addition of 1.0% by volume of steel fibres

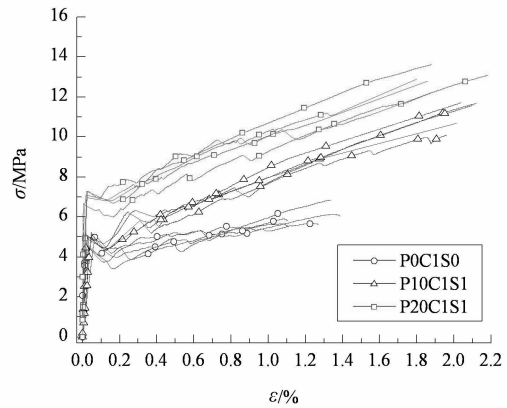
碳纤维 织物 层数	预拉力 水平 /%	钢纤维 体积分 数/%	均值(标准差)		
			初裂应力 /MPa	抗拉强度 /MPa	极限应 变/%
1	0	0	4.66(0.30)	6.04(0.49)	1.22(0.13)
1	10	0	4.80(0.002)	6.61(0.44)	1.45(0.10)
1	20	0	5.86(0.36)	7.88(0.20)	1.58(0.25)
1	10	1	5.06(0.13)	11.15(0.72)	2.04(0.07)
1	20	1	7.06(0.25)	12.92(0.51)	1.92(0.15)

预拉力 TRC 板开裂应力的提高归因于释放预拉力使得基体水泥基具有初始压应力,预拉力试件开裂需先抵消这部分初始压应力;而抗拉强度得以提高的原因,一方面是预拉力的施加提高了织物与基体之间的界面性能,另一方面是织物受拉绷直,在制板过程中织物的位置受振捣的影响小,减少了

织物位置偏差带来的初始缺陷.由表 4 和表 5 综合比较可知,掺入短切钢纤维对极限荷载的提高比施加预拉力更加显著.



(a) 布设 1 层碳纤维织物,不掺加钢纤维



(b) 布设 1 层碳纤维织物,掺加 1% 钢纤维

图 12 预拉力 TRC 试件的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of the prestressed TRC specimens

图 13 给出了预拉力试件的极限破坏形式,试件 P10C1S0 和 P20C1S0 虽然对织物施加了预拉力,可在一定程度上改善织物与水泥基的协同受力能力,但所有试件仍发生剥离破坏.试件 P10C1S1 和 P20C1S1 破坏时碳纤维被完全拉断,碳纤维利用率达到 100%.表明在对织物施加预拉力的同时掺加 1% 钢纤维可更好地改善织物与水泥基之间的界面性能,发挥碳纤维 TRC 板优异的力学性能.

3 结论

本文对碳纤维织物增强水泥基薄板进行轴向拉伸试验,探讨配网率、掺入短切钢纤维以及预拉力对 TRC 薄板力学性能、裂缝开展模式以及破坏模式的影响.通过本文研究可得到如下结论:

1)随着配网率的增加,碳纤维织物增强水泥基

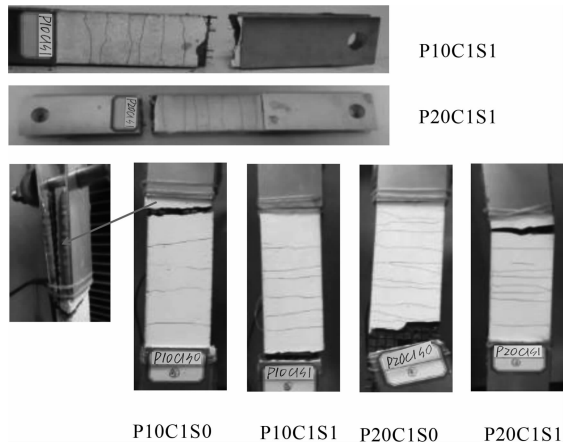


图13 预拉力 TRC 试件的破坏模式

Fig.13 Failure modes of the prestressed TRC specimens

薄板的极限承载力提高,标距内裂缝条数增多,纤维利用率降低.

2)对碳纤维织物施加预拉力、掺入短切钢纤维都能使薄板的开裂应力、抗拉强度得以提高,且掺入短切钢纤维对抗拉强度的提高比施加预拉力更加显著.在本文试验范围内,钢纤维体积分数越大、施加的预拉力越大对薄板轴向拉伸力学性能的改善越明显.

3)对碳纤维织物施加预拉力的同时掺入1%短切钢纤维,可显著改善碳纤维织物与基体水泥基之间的界面黏结性能,使薄板的破坏形式由剥离破坏转变为碳纤维完全拉断的破坏形式.

参考文献

- [1] QUDAH S, MAALEJ M. Application of engineered cementitious composites (ECC) in interior beam-column connections for enhanced seismic resistance[J]. *Engineering Structures*, 2014, 69(9): 235-245.
- [2] ZHANG R, MATSUMOTO K, HIRATA T, *et al.* Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 146-156.
- [3] ARUNDHATHY S, VASUGI V. Engineered cementitious composites for sustainable construction[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 692: 17-26.
- [4] GOPINATH S, KUMAR V R, SHETH H A, *et al.* Pre-fabricated sandwich panels using cold-formed steel and textile reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 64(30): 54-59.
- [5] TRIANTAFILLOU T, PAPANICOLAOU C. Innovative applications of textile-based composites in strengthening and seismic retrofitting as well as in the prefabrication of new structures[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 639/640(1): 26-41.
- [6] CORRADI M, BORRI A, CASTORI G, *et al.* Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids[J]. *Composites B*, 2014, 64: 33-42.
- [7] PELLEGRINO C, D'ANTINO T. Experimental behaviour of existing precast prestressed reinforced concrete elements strengthened with cementitious composites[J]. *Composites B*, 2013, 55: 31-40.
- [8] ESCRIG C, GIL L, BERNAT-MASO E, *et al.* Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 83: 248-260.
- [9] DVORKIN D, POURSAEE A, PELED A, *et al.* Influence of bundle coating on the tensile behavior, bonding, cracking and fluid transport of fabric cement-based composites[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2013, 42(9): 9-19.
- [10] 尹世平, 徐世焯. 提高纤维编织网保护层水泥基抗剥离能力的有效方法[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(4): 468-473.
YIN Shipping, XU Shilang. Effective method to improve anti-flaking capacity of cover concrete to textile [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(4): 468-473. (In Chinese)
- [11] RAMBOD A S, SILVA F D A, FILHO R D T, *et al.* Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete [J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 24-33.
- [12] 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.
- [13] REINHARDT H W, KRÜGER M, GROBE C U. Concrete prestressed with textile fabric [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 231-239.
- [14] 朱德举, 欧云福, 徐新华. 玻璃纤维束拉伸力学性能影响参数试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2017, 44(1): 118-124.
ZHU D J, OU Y F, XU X H. Experimental study of parameters affecting the tensile mechanical properties of glass fiber bundle [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2017, 44(1): 118-124. (In Chinese)
- [15] 朱德举, 张晓彤, 张怀安, 等. 不同应变率和温度下 AFRP 力学性能试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2017, 44(7): 187-193.
ZHU D J, ZHANG X T, ZHANG H A, *et al.* Experimental study of the mechanical properties of AFRP under different strain rates and temperatures [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2017, 44(7): 187-193. (In Chinese)