

钢纤维及预应力对 BTRC 板抗弯性能的影响

杜运兴^{1,2†}, 张忻颖², 周芬^{1,2}, 张蒙蒙²

(1. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:采用三点弯曲试验研究了玄武岩纤维编织网增强混凝土(BTRC)抗弯性能. 试验考虑了编织网层数、编织网上预拉力水平和钢纤维掺量 3 个影响因素. 试验结果表明:随着编织网层数的增加,BTRC 板的抗弯强度和韧性增大. 随编织网上预拉力水平的提高,BTRC 板的开裂应力和开裂后抗弯刚度均增大,极限挠度减小,而抗弯强度变化不明显. 钢纤维有助于提升 BTRC 板的开裂应力、抗弯强度和韧性;对编织网施加预拉力使钢纤维掺量对 BTRC 板的抗弯强度影响更显著. 编织网层数和钢纤维的增加使 BTRC 板上的裂缝形态更均匀细密,但对编织网施加预拉力使板上裂缝数目减少且裂缝间距增大.

关键词:玄武岩纤维编织网;BTRC 板;抗弯性能;编织网层数;预拉力;钢纤维

中图分类号:TU312

文献标志码:A

Effects of Steel Fibers and Prestress on Flexural Behavior of Basalt Textile Reinforced Concrete (BTRC) Plate

DU Yunxing^{1,2†}, ZHANG Xinying², ZHOU Fen^{1,2}, ZHANG Mengmeng²

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology

of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The three-point bending tests were conducted to investigate the effects of various textile layers, steel fibers volume contents and prestress levels on the flexural behavior of Basalt Textile Reinforced Concrete (BTRC) plates. With the increase of textile layers, the flexural strength and toughness of BTRC plate are improved. Prestress on the textiles improves the first crack stress and the post-cracking flexural stiffness, but decreases the ultimate deflection of BTRC plate, while no obvious change occurs for the flexural strength. Adding steel fibers in matrix is revealed to positively affect the first crack stress, flexural strength and toughness of BTRC plate, and the effect of steel fibers on the flexural strength is more prominent after applying prestress on the textiles. Moreover, the increase of textile layers and the presence of steel fibers contribute to the crack pattern characterized by more and finer cracks; however, prestress on the textile reduces the crack number and increases the crack spacing.

Key words: basalt textile; BTRC plate; flexural behavior; textile layers; prestress; steel fibers

* 收稿日期:2019-06-03

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2043), Natural Science Foundation of Hunan Province(2018JJ2043);长沙市科技计划重大专项资助项目(kq1703002, kq1804002, kq1902043), Major Project of Sci-Tech Plan of Changsha City(kq1703002, kq1804002, kq1902043);长沙市科技计划资助项目(kq1907101), Project of Sci-Tech Plan of Changsha City(kq1907101)

作者简介:杜运兴(1971—),男,河南平顶山人,湖南大学教授

† 通讯联系人, E-mail: duyunxing@hnu.edu.cn

纤维编织网增强混凝土 (TRC) 作为一种新型复合材料, 在建筑领域备受关注. TRC 结合了高性能混凝土和纤维编织网的优点, 具有承载力高、延性好、自重轻、耐久性好的特点^[1]. 同时, TRC 可根据建筑需要制作成各种形状, 具有较高的灵活性^[2]. 可见, TRC 作为受弯构件相比于传统混凝土材料更具潜力, 而充分了解 TRC 的抗弯性能有利于其在工程中的广泛应用^[3-5].

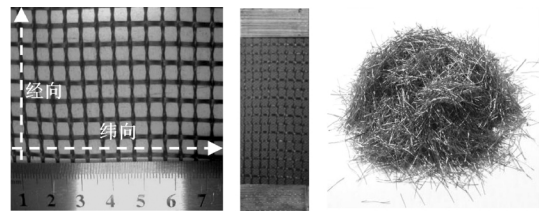
一些学者已对 TRC 板的抗弯性能进行了一定的试验研究, 表明短纤维有助于改善 TRC 受弯构件的抗弯承载力和裂缝形态, 预应力有助于延缓 TRC 受弯构件开裂. Li 等^[6]的研究发现, 在基体中掺入短切聚乙烯醇 (PVA) 纤维改善了基体的抗裂能力, 显著提高了试件的韧性, 增加了试件裂缝数目. 王激扬等^[7]的研究发现, 钢纤维提高了 TRC 板常温下的抗弯承载力和刚度, 而钢纤维的长径比对 TRC 板抗弯性能没有明显影响. 卜良桃等^[8]研究发现, 钢纤维可以显著改善水泥基体的性能, 使其具备高强度和良好的韧性及抗裂性能. Vilkner^[9]的研究发现, 预应力延缓了 TRC 板开裂, 提高了板开裂后的抗弯刚度和板的承载力, 但降低了板的延性.

玄武岩纤维作为一种绿色环保材料, 在 TRC 领域具有广阔的应用前景^[10-11]. 目前对 TRC 抗弯性能的研究多为纤维种类、短纤维掺量、预应力水平、表面处理等单一影响因素. 本文将玄武岩纤维编织网作为筋材、精细混凝土作为基体, 采用三点弯曲试验, 研究了编织网层数、编织网上预拉力水平和钢纤维掺量对玄武岩纤维编织网混凝土 (BTRC) 板抗弯性能和裂缝形态的影响.

1 试验材料

1.1 玄武岩纤维编织网和钢纤维

试验中采用的玄武岩纤维编织网表面经苯丙乳液浸渍处理, 如图 1(a) 所示. 试件的承载力主要由经向纤维束提供, 因此制备了宽 40 mm、标距为 100 mm 的编织网条带 (图 1(b)) 以测试其经向纤维束的力学性能. 在条带两端粘贴铝片, 通过夹具将其夹持在 MTS C43.304 万能试验机上, 以 0.5 mm/min 的加载速率进行测试^[12]. 表 1 为玄武岩纤维编织网的材料参数, 图 2 给出了玄武岩纤维编织网条带的拉伸应力-应变曲线.



(a) 纤维编织网 (b) 编织网条带 (c) 钢纤维

图 1 玄武岩纤维编织网及钢纤维

Fig.1 Characteristics of basalt textile and steel fibers

表 1 玄武岩纤维编织网条带的材料参数

Tab.1 Properties of basalt textile strip

编织网类型	抗拉承载力/N	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	密度/(g·cm ⁻³)
13μ.264×2tex (经向)	1 729	884	45	2.18	2.7

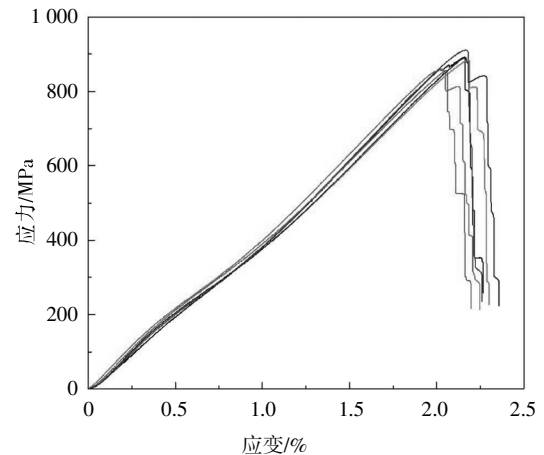


图 2 编织网条带的拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curves of basalt textile strips

试验采用表面镀铜的钢纤维, 其形态如图 1(c) 所示, 其力学及几何参数见表 2.

表 2 钢纤维的力学和几何参数

Tab.2 Mechanical properties and geometric characteristics of steel fibers

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	4-6	7.8	2 800	200

1.2 精细混凝土基体

试验中的基体采用具有较好流动性和自密实能力的精细混凝土. 预应力试件采用先张法制作, 在基体中加入硅灰使其具有较高的早期强度以减小预应力损失. 混凝土基体的配合比见表 3, 材料性能见表 4.

表3 混凝土基体的配合比

Tab.3 Fine-grained concrete matrix composition kg·m⁻³

P.O 42.5 水泥	粉煤灰	硅灰	砂 0~ 0.6 mm	砂 0.6~ 1.2 mm	减水剂	水	消泡剂
645	274.4	58.8	408	817	4	392	2.4

表4 混凝土基体的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of fine-grained concrete matrix

时间/d	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
7	40.72	4.20
28	52.20	5.26

2 试件制备及试验方法

2.1 试件的制备

为了减少试件的离散性,本试验中采用的尺寸为 280 mm (长)×50 mm (宽)×12 mm (厚)的 BTRC 试件是由尺寸为 300 mm (长)×180 mm (宽)×12 mm (厚)的大板切割而得,每种工况制备了 6 个试件. BTRC 试件内的编织网沿试件厚度对称布置,如图 3 示,采用具有特定厚度的钢条来控制试件保护层厚度和相邻编织网间距.试件的具体制作步骤如下:将编织网拉直并固定于张拉装置上,保证每层编织网的经向纤维束对齐;通过张拉装置对编织网施加预拉力,保持张拉状态 24 h 后,根据预拉力损失情况将编织网的预拉力重新加至预设预拉力值;将配好的基体浇筑到模板中,进行充分振捣后,抹平表面;对于预应力试件,5 d 后拆模,并将此时的预拉力值作为实际施加的预拉力值 F_{con} ,对于非预应力试件,2 d 后拆模;拆模后,板放置于标准养护室继续养护至 28 d;将养护完成的大板切割成标准试件;最后,为便于观察裂缝的开展,在试件受拉底面涂上白色涂料.

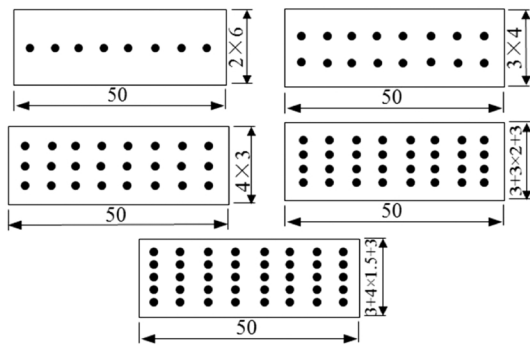


图3 不同编织网层数的 BTRC 试件横截面示意图(单位:mm)
Fig.3 Illustration of the cross section of the BTRC specimens with different textile layers(unit:mm)

2.2 试验方法

三点弯曲试验在 MTS C43.304 万能试验机上进行,加载示意图如图 4 所示.由位移控制加载,加载速率 0.5 mm/min.荷载 P 由力传感器测定,跨中挠度 f 由引伸计测定.试验过程中观测到的挠度和荷载受试件尺寸影响较大,因此通过弯曲应力和跨中挠度对比不同工况试件的抗弯性能,绘制弯曲应力-跨中挠度曲线(以下简称弯曲应力-挠度曲线).等效弯曲应力的计算采用式(1).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

式中: σ 表示弯曲应力; P 表示荷载; L 表示板跨; b 表示试件的宽度; h 表示试件的厚度.

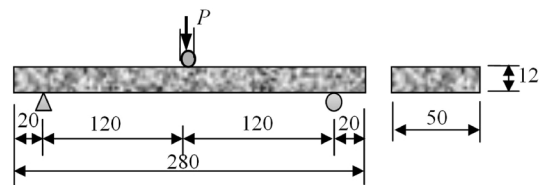


图4 三点弯曲试验示意图(单位:mm)
Fig.4 Diagram of three-point bending test (unit:mm)

2.3 试验工况

本试验以编织网层数为变量,研究 1~5 层 BTRC 板的抗弯性能.其中,3 层 BTRC 试件掺入 0.8%、1.6% 体积含量的钢纤维,研究钢纤维对 BTRC 板抗弯性能的影响;对 3 层 BTRC 试件编织网施加 20.7%、32.9% 的预拉力,对 4 层 BTRC 试件编织网施加 14.6%、18.9% 的预拉力,对 5 层 BTRC 试件编织网施加 14.1%、17.6% 的预拉力,研究编织网上预拉力水平对 BTRC 板抗弯性能的影响;还研究了钢纤维对预应力 BTRC 板抗弯性能的影响.

本文试件的编号规则如下:L 代表编织网层数,P 代表预拉力水平,S 代表钢纤维的体积掺量.其中预拉力水平是由实际施加的预拉力值(F_{con})与编织网本身抗拉承载力(F_t)的比值来衡量, F_t 为单层编织网的抗拉承载力与编织网层数的乘积.

3 试验结果与讨论

3.1 弯曲应力-挠度曲线

在拉伸荷载作用下,编织网条带的应力随应变线性增长,当编织网条带拉伸应变到达极限应变时发生脆性断裂,如图 2 所示.图 5 汇总了不同工况 BTRC 试件的弯曲应力-挠度曲线,可以看出曲线呈现典型的 4 个阶段.

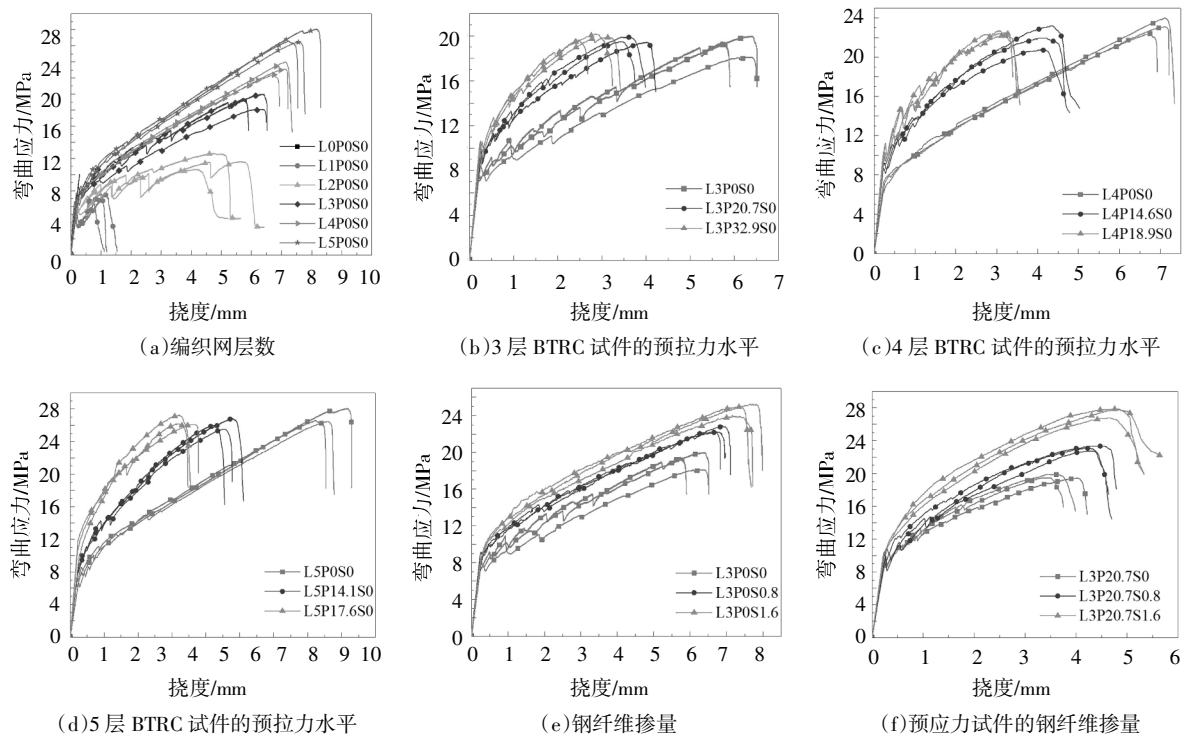


图 5 不同工况 BTRC 试件的弯曲应力-跨中挠度曲线
 Fig.5 Flexural stress versus mid-span deflection curves of BTRC specimens from different cases

阶段 I : 弯曲应力随挠度的增长线性增大, 此阶段 BTRC 试件未开裂, 荷载由基体和编织网共同承担. 当试件受拉区出现第 1 条裂缝时, 试件抗弯刚度突降, 阶段 I 结束.

阶段 II : BTRC 试件多缝开裂阶段, 此阶段试件受拉区不断出现新的裂缝, 弯曲应力-挠度曲线呈波浪状. 编织网层数和钢纤维增加使 BTRC 试件此阶段曲线变得平滑.

阶段 III : 应力强化阶段, 此阶段裂缝数目不再增加. 此阶段中 BTRC 试件受拉区的拉力主要由编织网承担, 因此试件的弯曲应力随挠度增大趋于线性增长. 此阶段曲线的斜率较阶段 I 有所减小, 但随编织网层数的增加和编织网上预应力水平的提高, 曲线斜率减小的幅度下降. 对于相同层数的 BTRC 试件, 编织网上施加预应力会缩短这个阶段的长度, 而钢纤维会增加这个阶段的长度.

阶段 IV : 破坏阶段, 主裂缝处的底层编织网拉应变达到极限拉应变而断裂, 试件破坏.

3.2 BTRC 的参数分析

基于三点弯曲试验得到了 BTRC 试件的抗弯性能参数包括: 开裂应力、开裂挠度、抗弯强度、极限挠度、弯曲韧性和裂缝数目, 相应的数据汇总于表 5.

3.2.1 编织网层数对 BTRC 抗弯性能的影响

从图 5(a) 可以发现, 试件 L0P0S0 达到开裂应力随即发生脆性破坏, 因此试件的抗弯强度等于其开裂应力. 试件 L1P0S0 开裂后, 并未呈现明显的应变硬化性能, 说明 1 层编织网对基体没有明显的增强效果. 2 层以上的 BTRC 试件开裂后表现出明显的应变硬化性能, 且随编织网层数的增加, 由于试件中参与抵抗试件截面弯矩的编织网增多, 试件的抗弯强度增大, 试件 L2P0S0、L3P0S0、L4P0S0 和 L5P0S0 的抗弯强度与 L0P0S0 相比, 分别提高了 35.8%、124.9%、171.5% 和 216.9%.

BTRC 试件开裂后的抗弯刚度较开裂前有所减小, 但随编织网层数的增加, 抗弯刚度减小的程度降低. 裂缝处的拉应力由编织网承担, 编织网层数的增加更好地控制试件同一应力水平下的变形. 同时, 编织网层数的增加更好地限制了裂缝的发展, 因此编织网层数的增加可提高试件开裂后的刚度.

结合表 5 和图 6, 试件 L2P0S0、L3P0S0、L4P0S0、L5P0S0 均表现出多缝开裂的特征. 随编织网层数增加, BTRC 试件受拉区的裂缝由平直形态转化为弯曲曲的形态, 裂缝数目增多, 裂缝间距减小, 表现为细而密的特点.

表5 不同工况 BTRC 试件弯曲试验结果

Tab.5 Summary of the flexural behaviors of BTRC specimens

试件	开裂应力/MPa	开裂挠度/mm	抗弯强度/MPa	极限挠度/mm	弯曲韧性/(N·m)	裂缝数目
L0POS0	8.53(1.34)	0.23(0.06)	—	—	0.021(0.008)	1.0(0)
L1POS0	6.98(0.51)	0.17(0.03)	7.29(0.29)	0.94(0.19)	0.124(0.023)	2.3(0.4)
L2POS0	7.07(0.35)	0.21(0.01)	11.58(0.79)	4.96(0.62)	1.028(0.118)	5.3(0.4)
L3POS0	7.63(0.51)	0.22(0.02)	19.18(0.78)	6.13(0.31)	1.746(0.087)	6.7(1.2)
L3POS0.8	8.74(0.41)	0.27(0.01)	22.45(0.29)	6.79(0.08)	2.301(0.063)	8.7(1.6)
L3POS1.6	9.66(0.37)	0.26(0.01)	25.12(0.11)	7.70(0.16)	2.877(0.105)	9.3(1.7)
L3P20.7S0	9.31(0.39)	0.25(0.02)	19.58(0.20)	3.70(0.23)	1.209(0.060)	5.0(0.8)
L3P20.7S0.8	10.03(0.37)	0.26(0.02)	23.13(0.25)	4.38(0.11)	1.766(0.056)	6.3(0.5)
L3P20.7S1.6	10.91(0.06)	0.23(0.01)	27.48(0.50)	4.78(0.08)	2.327(0.121)	7.6(0.5)
L3P32.9S0	10.57(0.05)	0.27(0.02)	19.98(0.14)	2.93(0.19)	0.971(0.056)	3.6(0.9)
L4POS0	6.85(0.45)	0.24(0.01)	23.16(0.65)	6.98(0.19)	2.405(0.262)	8.0(1.4)
L4P14.6S0	8.97(0.26)	0.24(0.01)	21.95(0.52)	4.21(0.09)	1.640(0.085)	4.6(1.2)
L4P18.9S0	10.62(0.42)	0.26(0.02)	22.42(0.20)	3.18(0.06)	1.213(0.033)	3.3(1.2)
L5POS0	6.95(0.17)	0.22(0.02)	27.03(0.73)	7.67(0.39)	2.778(0.313)	10.7(1.7)
L5P14.1S0	8.87(0.31)	0.26(0.02)	26.10(0.55)	4.52(0.20)	1.820(0.118)	5.7(0.5)
L5P17.6S0	10.59(0.32)	0.24(0.03)	26.48(0.49)	3.32(0.19)	1.461(0.075)	4.3(0.5)

注:表中数值表示平均值,括号中数值表示标准差.

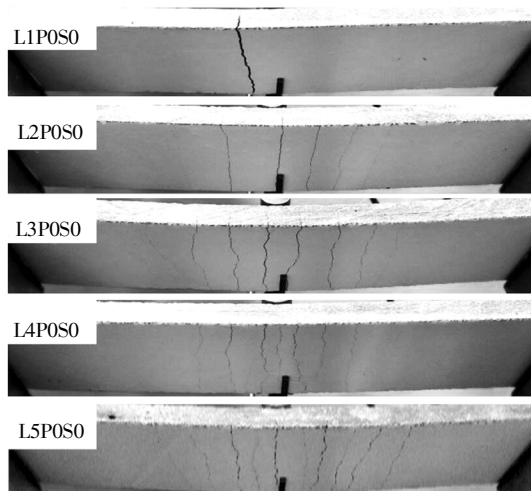


图6 不同编织网层数 BTRC 试件的裂缝形态

Fig.6 Crack patterns of BTRC specimens with different textile layers

韧性表征试件破坏过程中吸收能量的能力,是纤维增强水泥基复合材料的一项重要指标.韧性的提高,有助于增进复合材料的抗冲击与抗疲劳等性能.采用 BTRC 试件荷载-挠度曲线下的面积计算弯

曲韧性. 编织网层数从 1 层增加到 5 层,试件韧性从 0.124 N·m 增大到 2.778 N·m. 产生这种现象的原因有 2 个:其一,随编织网层数的增加,试件开裂后编织网对试件承载力的贡献会增大;其二,编织网层数增加使试件上裂缝数目增多,更多细密裂缝的形成需消耗更多的能量.

3.2.2 编织网上预拉力水平对 BTRC 抗弯性能的影响

为了便于对比编织网上预拉力对 BTRC 试件抗弯性能的影响,将数据归一化处理并汇总于图 7. 结合表 5 和图 7 可以看出,对编织网施加预拉力可以提高 BTRC 试件的开裂应力,且预拉力水平越高,试件的开裂应力越大,对于 3 层编织网 BTRC 试件,试件 L3P20.7S0 和 L3P32.9S0 的开裂应力较 L3POS0 分别提高了 22.0%和 38.5%;对于 4 层编织网 BTRC 试件,试件 L4P14.6S0 和 L4P18.9S0 的开裂应力较 L4POS0 分别提高了 30.9%和 55.0%;对于 5 层编织网 BTRC 试件,试件 L5P14.1S0 和 L5P17.6S0 的开裂应力较 L5POS0 分别提高了 27.6%、52.4%. 编织网的预拉力释放后,预拉力通过编织网的经向纤维束与

基体间的粘结传递到了基体横截面上,从而使基体上有了预压力.在荷载作用下,BTRC 试件底部开裂所受拉力要先抵消基体的预压力,然后继续增加直至达到基体的开裂荷载.

结合表 5 和图 7 可得,随编织网上预拉力水平的提高,BTRC 试件的极限挠度减小.预应力 BTRC 试件的编织网在加载前已存在一定的初始拉应变 ε_0 ,而编织网的最大拉应变为一个定值 ε_m ,则在加载过程中底层编织网拉应变的增量最大为 $(\varepsilon_m - \varepsilon_0)$,这就说明对编织网施加的预拉力水平越大,它在试件加载过程中的拉伸变形增量就越小,从而使试件变形的能力降低.试件 L3P32.9S0、L4P18.9S0 和 L5P17.6S0 的极限挠度分别较试件 L3P0S0、L4P0S0 和 L5P0S0 下降了 52.2%、54.4% 和 56.7%.对编织网施加预拉力造成 BTRC 试件受拉区裂缝减少,裂缝间距相应增大,如图 8 所示.由于对编织网施加预拉力大大减小了试件的极限挠度,但对试件的抗弯强度没有明显的影响,因此试件的韧性显著下降,如图 7 所示.

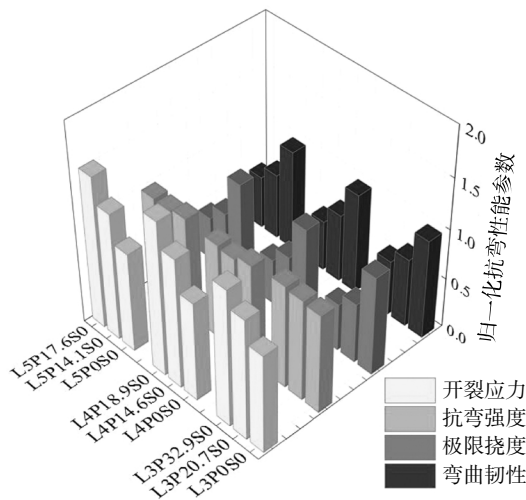


图 7 不同预拉力水平 BTRC 试件的归一化抗弯性能参数
Fig.7 Normalized flexural properties of BTRC with different prestress levels

此外,BTRC 试件弯曲应力-挠度曲线阶段 III 的斜率较阶段 I 有所减小,但随编织网上预拉力水平提高,曲线斜率减小的幅度下降,说明对编织网施加预拉力提高了 BTRC 试件开裂后的刚度.预应力 BTRC 试件底层编织网在加载过程中拉伸变形增量减小,则裂缝宽度受到限制,从而开裂截面的抗弯刚度增大;同时,释放编织网上的预拉力后,经向纤维束由于泊松比效应会沿轴向回缩沿径向扩大,因此经向纤维束与基体间产生挤压,编织网与基体间的

摩擦力提高,进而提高编织网与基体间的界面粘结力,使试件在荷载作用下整体性更好,从而开裂截面的抗弯刚度增大.

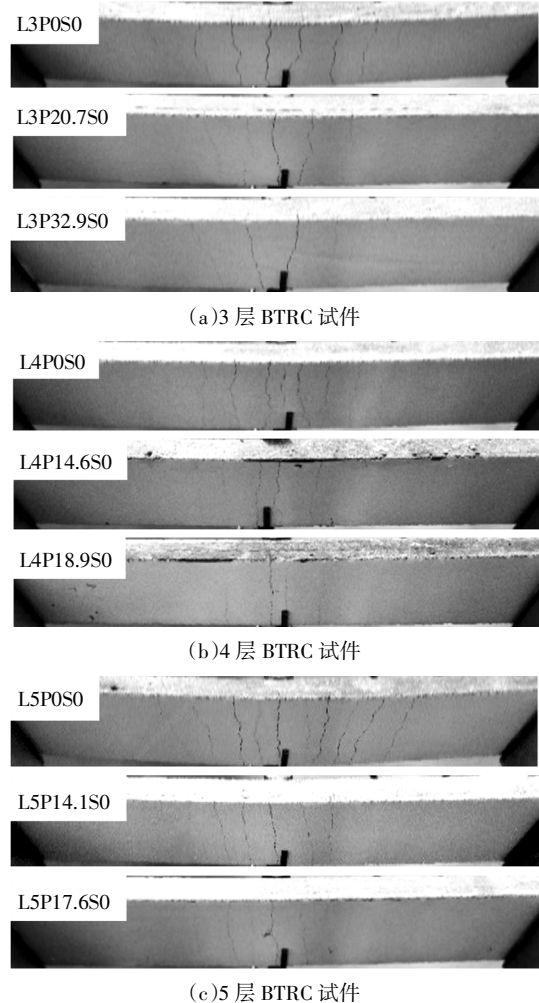


图 8 不同预拉力水平下 BTRC 试件的裂缝形态
Fig.8 Crack patterns of BTRC specimens with different prestress levels

3.2.3 钢纤维掺量对 BTRC 抗弯性能的影响

由表 5 可知,钢纤维掺量的增加可以提高 BTRC 试件的开裂应力和抗弯强度,且钢纤维对抗弯强度的影响更显著.对于非预应力 BTRC 试件,L3P0S0.8 和 L3P0S1.6 的开裂应力和抗弯强度较 L3P0S0 分别提高了 14.5%、26.6% 和 17.0%、31.0%;对于预应力 BTRC 试件,L3P20.7S0.8 和 L3P20.7S1.6 的开裂应力和抗弯强度较 L3P20.7S0 分别提高了 7.7%、17.2% 和 18.1%、40.3%.在基体中的钢纤维改善了基体的抗裂能力,从而提高了试件的开裂应力;跨接在宏观裂缝处的钢纤维发挥桥联作用,将拉应力传递给裂缝两侧的基体,裂缝扩展需要额外克服钢纤维与基体间的粘结力,同时,插入网格孔中的钢纤维发挥锚固作

用,增强编织网与基体间的界面性能,从而提高了试件抗弯强度.然而,试件开裂前应力水平较低,钢纤维限制微观裂缝扩展成宏观裂缝的过程中传递的拉应力较小;开裂后,试件承受的荷载逐渐增大,宏观裂缝处钢纤维上的拉应力也不断增大直至锚固段脱粘拔出,因此钢纤维对抗弯强度的贡献比开裂应力大.

为了便于对比钢纤维对非预应力和预应力 BTRC 试件抗弯性能的影响,将数据进行归一化处理,并汇总于图 9.结合表 5 和图 9 可以发现,对编织网施加预拉力使钢纤维对开裂应力的提高程度降低,由于编织网上的预拉力是提高开裂应力的主要因素,因此钢纤维对开裂应力的提升效果不明显.此外,钢纤维掺量对预应力试件抗弯强度的影响比非预应力试件显著,一方面是因为编织网上预拉力使基体中产生预压应力,能够一定程度上消除钢纤维与基体间的初始间隙,进而增大了钢纤维与基体间的界面摩擦力,更好地发挥了钢纤维的作用;另一方面是因为钢纤维增强的基体更好地约束经向纤维束放张后的径向扩大,进一步提高了编织网与基体间的界面性能.

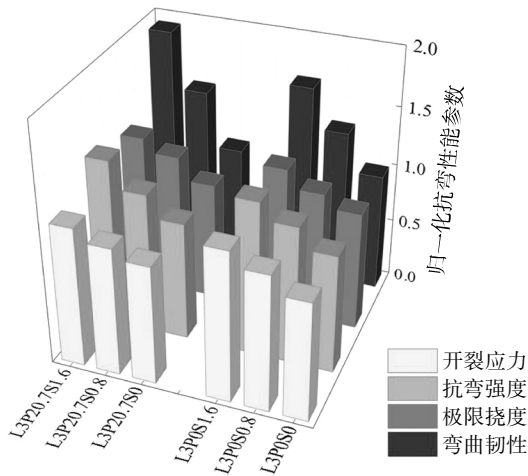


图 9 不同钢纤维掺量下 BTRC 试件的归一化抗弯性能参数
Fig.9 Normalized flexural properties of BTRC with different volume contents of steel fibers

随着钢纤维掺量的增加,试件底部的裂缝形态变得更曲折且不贯通,如图 10 所示,这是由于钢纤维在基体中随机乱向分布阻碍了微观及宏观裂缝的扩展,促使裂缝发展方向发生改变.由表 5 和图 9 可发现,随着钢纤维掺量的增加,试件的极限挠度增大,试件 L3POS0.8 和 L3POS1.6 的极限挠度与 L3POS0 相比,分别提高了 10.8%、25.6%;L3P20.7S0.8 和

L3P20.7S1.6 的极限挠度比 L3P20.7S0 分别提高了 18.4%、29.2%.而试件裂缝总宽度等于开裂区段内编织网的伸长量减去基体的伸长量,因此极限挠度增大使受拉底部裂缝的总宽度增大.同时,基体中的钢纤维阻碍裂缝向受压区发展,裂缝处的钢纤维发挥桥联作用限制了裂缝宽度的增大,从而使裂缝数目增加,裂缝间距减小,表现为细密的裂缝形态.

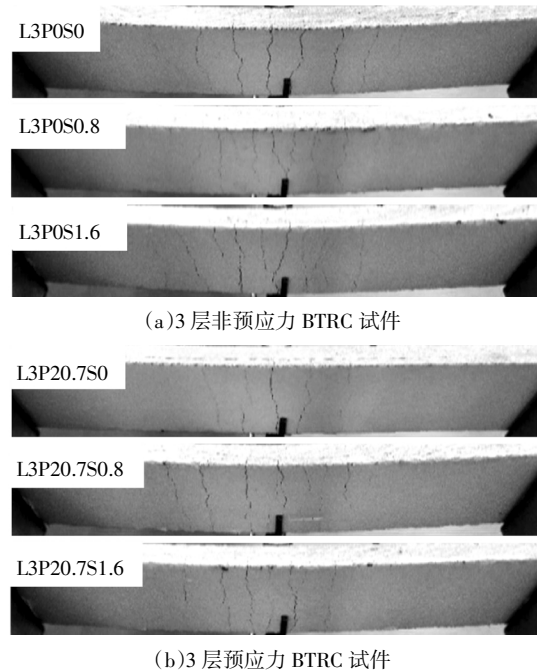


图 10 不同钢纤维掺量下 BTRC 试件的裂缝形态
Fig.10 Crack patterns of BTRC specimens with different volume contents of steel fibers

此外,钢纤维提高了 BTRC 试件的韧性,试件 L3POS0.8 和 L3POS1.6 较 L3POS0 分别提高了 31.8% 和 64.8%;L3P20.7S0.8 和 L3P20.7S1.6 较 L3P20.7S0 分别提高了 46.1% 和 92.5%.由于钢纤维的抗拉强度较高,在荷载作用下跨越在裂缝处的钢纤维不会被拉断,而是随着裂缝宽度的增大被缓慢拔出,此过程需消耗一部分的能量;掺入钢纤维使试件裂缝形态更细密,更多裂缝的形成需要消耗更多的能量;裂缝从受拉区向受压区扩展过程中由一支分叉成多支,使开裂表面积增加,消耗更多的能量.

4 结论

本文通过三点弯曲试验,研究了不同的编织网层数、预拉力水平以及钢纤维掺量对 BTRC 板抗弯性能的影响,得到以下结论:

1) 当编织网层数为 2 层以上时,BTRC 试件表现

出多缝开裂的特征.随着编织网层数的增加,BTRC 试件的抗弯强度、韧性显著提高,且开裂后抗弯刚度相对开裂前减小的程度降低,其中5层 BTRC 试件抗弯强度较素混凝土板提高了 216.9%.

2)对编织网施加预拉力,提高了 BTRC 试件的开裂应力和开裂后的抗弯刚度,对4层和5层 BTRC 试件中编织网分别施加 18.9%和 17.6%的预拉力水平使试件的开裂应力提高了 55.0%和 52.4%.但提高编织网的预拉力水平对试件的抗弯强度没有明显影响,且严重降低 BTRC 试件的极限挠度和韧性,因此需要合理控制预拉力的大小.

3)钢纤维可以提高 BTRC 试件的开裂应力和抗弯强度;对编织网施加预拉力使钢纤维对开裂应力提高程度降低;对比非预应力试件,钢纤维掺量对预应力试件抗弯强度的影响更显著.同时,钢纤维改善了试件的裂缝形态,使裂缝分布更细密均匀.因此,对编织网施加合适大小的预拉力的同时,掺入钢纤维可以使 BTRC 板获得更好的抗弯性能,对3层 BTRC 板中编织网施加 20.7%的预拉力,同时掺入 1.6%掺量的钢纤维,可以使试件的开裂应力和抗弯强度提高 43.0%和 43.3%.

参考文献

- [1] MESTICOU Z, BUI L, JUNES A, *et al.* Experimental investigation of tensile fatigue behaviour of Textile-Reinforced Concrete (TRC): Effect of fatigue load and strain rate [J]. *Composite Structures*, 2016, 160: 1136—1146.
- [2] 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.
- [3] 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: 54—59.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王激扬, 沈玲华, 徐世焯. 钢纤维 TRC 薄板的常温及高温后弯曲力学性能 [J]. *工程力学*, 2016, 33(增刊): 6—10.
WANG J Y, SHEN L H, XU S L. Bending behavior of TRC thin-plates with short steel fibers at room temperature and after high temperature [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(S): 6—10. (In Chinese)
- [8] 卜良桃, 鲁晨, 朱健. 水泥钢纤维砂浆钢筋网加固矩形 RC 偏压柱试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(3): 15—20.
BU L T, LU C, ZHU J. Experimental study of RC columns strengthened with steel fiber cement mortar with mesh reinforcement under eccentric loading [J]. *Journal of Hunan University (Nature Sciences)*, 2013, 40(3): 15—20. (In Chinese)
- [9] VILKNER G. Glass concrete thin sheets reinforced with prestressed aramid fabrics [D]. New York: Graduate School of Arts and Sciences, Columbia University, 2003: 61—84.
- [10] HIGH C, SELIEM H M, EL-SAFY A, *et al.* Use of basalt fibers for concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 37—46.
- [11] BHAT T, CHEVALI V, LIU X, *et al.* Fire structural resistance of basalt fibre composite [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 71: 107—115.
- [12] 朱德举, 高炎鑫, 李高升, 等. 玄武岩织物增强水泥基复合材料拉伸力学性能 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(9): 43—51.
ZHU D J, GAO Y X, LI G S, *et al.* Tensile mechanical properties of basalt fabric reinforced cementitious matrix composite [J]. *Journal of Hunan University (Nature Sciences)*, 2018, 45(9): 43—51. (In Chinese)