

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202405272024101987

文章编号: 1674-599X(2024)05-0109-11

引用格式: 魏正红, 田港胜. 聚丙烯纤维增强水稳基层抗裂性能评价及微观机理[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 109-119.

Citation: WEI Zhenghong, TIAN Gangsheng. Evaluation of crack resistance and microscopic mechanism of polypropylene fiber reinforced cement-stabilized base[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 109-119.

聚丙烯纤维增强水稳基层抗裂性能评价及微观机理

魏正红¹, 田港胜²

(1. 四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610047; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为提升水泥稳定碎石基层的抗裂耐久性, 可在其中加入不同掺量的聚丙烯纤维。通过试验测试不同养护龄期下试件的劈裂抗拉强度, 确定了最佳聚丙烯纤维掺量; 采用宏观力学性能试验, 分析了聚丙烯纤维的掺入对试件抗压强度、劈裂抗拉强度、抗弯拉强度的影响; 对掺入和未掺入聚丙烯纤维的两组试件进行了半圆弯曲试验, 并利用数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术对加载过程进行了全时域监测对比, 得到其位移时间曲线。试验结果表明: 水稳碎石基层中聚丙烯纤维的最佳掺量为0.10%, 聚丙烯纤维的掺入能提升水稳基层的宏观力学性能, 延缓水稳基层裂缝的发展, 并通过应力传递降低水稳基层的应变集中及位移激增。

关键词: 水稳碎石; 抗裂; 数字图像相关; 聚丙烯纤维

中图分类号: U444

文献标志码: A

Evaluation of crack resistance and microscopic mechanism of polypropylene fiber reinforced cement-stabilized base

WEI Zhenghong¹, TIAN Gangsheng²

(1. Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To improve the crack resistance and durability of the cement-stabilized macadam base, different amounts of polypropylene fiber were added to it. First, the optimal polypropylene fiber content was determined by testing the splitting tensile strength of the specimen at different curing ages. Then, the effects of polypropylene fiber incorporation on compressive strength, splitting tensile strength, and flexural tensile strength were analyzed by macroscopic mechanical property tests. Finally, the semicircular bending test was carried out on two groups of specimens, and the digital image correlation (DIC) technique was used to monitor and compare the loading process in the full time domain. In this way, the displacement-time curves of the specimens were obtained. The test results show that the optimal content of polypropylene fiber in the cement-stabilized macadam base is 0.10%, and the incorporation of polypropylene fiber can improve the macroscopic mechanical properties of the cement-stabilized base, delay the development of cracks in the cement-stabilized base, and reduce the strain concentration and displacement surge through stress transmission.

Key words: cement-stabilized macadam; crack resistance; digital image correlation; polypropylene fiber

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 成都市技术创新研发项目(2021-YF05-01173-SN)

通信作者: 魏正红(1987—), 女, 工程师, 主要从事道路与桥梁工程方面的研究工作。E-mail: yuqiyang20242024@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

水泥稳定碎石基层具有良好的强度、刚度、稳定性和板体性,同时造价便宜,施工方便,是一种较为理想的基层材料^[1],被广泛运用于我国路面基层的建设中^[2-3]。但水泥稳定碎石基层在服役期受气候因素影响,容易产生收缩裂缝,且随着车辆交通荷载的增加,收缩裂缝会进一步扩展,最终上升到面层产生反射裂缝^[4-5],严重降低了道路使用质量。开裂问题逐渐成为了当前水泥稳定碎石基层面临的主要问题^[6]。因此,改善水泥稳定碎石基层的抗裂性能,提升其使用寿命,对推动我国公路发展具有重要意义。

近年来,为了提升水稳基层的抗裂性能从而延长沥青路面的服役年限,国内外许多学者对此进行了深入的研究。目前,主要采取加厚沥青混凝土面层、使用改性沥青、设置中间应力吸收层和基层微裂缝预处理等应对措施来延缓或减轻裂缝的产生^[7-9]。但加厚沥青混凝土面层容易导致其自身产生收缩裂缝及车辙^[10-11];使用改性沥青会使工程造价大幅度增加^[12];设置应力吸收层能在一定程度上防止反射裂缝的产生^[13],然而又存在中间层材料种类繁多、防裂效果不尽相同、中层参数设置方面缺乏相关的评价与应用标准等问题;基层微裂缝能形成细微网状裂缝阻隔断裂应力的传递^[14-15],但是使用振动压路机对基层进行微裂缝预处理的方式对微裂程度可控性不强,并且对施工工艺有较高要求。目前,亟需寻求一种兼具有效性、经济性和施工可操作性的处置措施来提升水稳基层的抗裂性能。

纤维通过在基体材料中发挥桥接作用,在裂缝处代替基体材料受拉^[16],可以起到增韧阻裂的效果,被广泛运用于复合材料的增强上^[17]。TAN等^[18]、WANG等^[19]通过试验及理论分析证明粘贴纤维增强复合材料能够提高钢筋混凝土梁的承载能力并延缓裂缝的出现和发展;SHENG等^[20]证明了采用碳纤维编织网和水泥基复合材料增强钢筋混凝土梁力学性能的高效性;SUN等^[21]研究了纤维长度对混凝土基本力学性能的影响,研究结果表明,长度为6 mm的玄武岩纤维对混凝土力学性能的提高幅度比长度为12 mm的玄武岩纤维的大。以上研究都证明了纤维对混凝土有增韧阻裂的作用,但关于聚丙烯纤维对水稳基层抗裂性能的影响尚缺乏系统的研究。聚丙烯纤维作为一种高性能的人造合成纤维,由聚丙烯聚合物制成,具有轻质、耐化学腐

蚀、不吸水等特点。而且,聚丙烯纤维自身具有较高的强度和韧性,可以在水稳基层中形成网状结构,有助于保持水稳基层内部的均匀性,减少开裂^[22]。因此,将聚丙烯纤维与水稳基层相结合,研究及评价聚丙烯纤维对水稳基层抗裂性能增强的效果非常必要。

目前,图像技术在交通、土建等多个领域发挥着重要作用^[23-24],数字图像相关(digital image correlation,DIC)技术便是其中一种重要的技术。数字图像相关技术具有全场非接触、适用范围广等优点,已成为一种有效的表面变形非接触测量方法,可实现变形区域位移的全时域量化分析。本文在水稳基层中加入聚丙烯纤维,通过宏观力学试验探究聚丙烯纤维对水稳基层力学性能的影响;并利用DIC技术对半圆弯曲试验进行全时域监测;最后利用扫描电子显微镜从微观角度对聚丙烯纤维的掺入在增强水稳基层抗裂、抗弯拉性能方面从机理上进行探究。

1 原材料及成型试件

1.1 原材料

本研究选用诸城市九七建材有限公司生产的标号为42.5的普通硅酸盐水泥,其各项指标检测结果见表1。试验所用石灰岩集料粒径共分为4档,分别为19~31.5 mm、9.5~<19 mm、4.75~<9.5 mm和0~<4.75 mm,经检测各项技术指标符合规范要求。选用的聚丙烯纤维为银白色,直径约为18 mm,其技术指标见表2。

表1 水泥技术性能检测结果

Table 1 Technical performance test results of cement

比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	安定 性	初凝 时间/ min	终凝 时间/ min	$w(\text{MgO})$ / %	$w(\text{S}_2\text{O}_3)$ / %	28 d抗 折强度/ MPa	28 d抗 压强度/ MPa
339	合格	364	452	≤ 5.0	≤ 3.5	7.7	40.0

表2 聚丙烯纤维技术指标

Table 2 Technical indicators of polypropylene fiber

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/MPa	直径/ mm	长度/ mm	极限延 伸率/%
0.91	169	360	$\geq 4\,000$	18	12	≥ 20

1.2 配合比设计

根据4档集料的筛分结果,采用《公路路面基层

施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中C-B-3骨架密实级配中值为目标级配,见表3。为了更好地模拟现场振动压路机的效果,在室内采用振动击实试验确定了最佳水泥掺量为4%,混合料最佳含水率为4.2%,最大干密度为2.441 g/cm³。由于纤维的掺量对水泥稳定碎石混合料的最佳含水率与最大干密度影响不大,因此本文未进行不同纤维掺量下水稳碎石混合料的振动击实试验。

表3 骨架密实级配中值

Table 3 Median value of dense gradation of skeleton

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
31.5	100.0	2.36	22.0
19	77.0	0.6	11.5
9.5	48.0	0.075	1.5
4.75	27.0		

1.3 试件成型

将水泥与骨料拌合均匀,分别加入体积分数为0.00%、0.06%、0.08%、0.10%、0.12%、0.14%和0.16%的聚丙烯纤维,再加入质量占骨料质量4.20%的水,拌合均匀后分别装入直径为150 mm的圆柱体模具和尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的立方体模具中。圆柱体试件采用振动压实成型机进行振动成型,梁试件采用压力机进行静载压实,试件成型流程如图1所示。

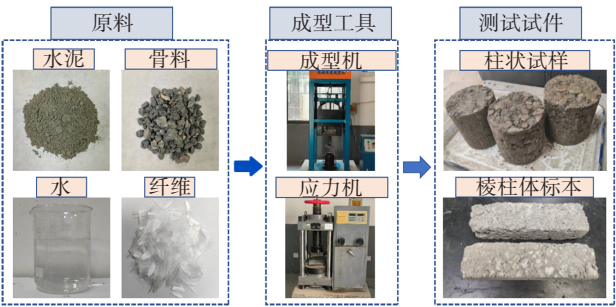


图1 试件成型流程图

Fig. 1 Specimen forming flow chart

2 试验方法

2.1 宏观力学性能试验

2.1.1 劈裂抗拉强度测试

利用UTM万能试验机进行劈裂抗拉试验,设置变形加载速率为1 mm/min,测定不同聚丙烯纤维掺量(0.00%、0.06%、0.08%、0.10%、0.12%、0.14%、0.16%)和不同养护时间(7、14、28 d)情况下水泥稳

定碎石圆柱试件劈裂抗拉强度。每组试验设置5个平行试件,对比分析得出最佳纤维掺量。

2.1.2 抗压强度及抗弯折测试

利用压力试验机,测试未掺入聚丙烯纤维和掺入聚丙烯纤维的水泥稳定碎石圆柱体试件7、14、28、60、90 d无侧限抗压强度及抗弯折强度。每组试验设置5个平行试件,通过分析对比,得出聚丙烯纤维的掺入对水稳基层抗压及抗弯折性能的影响。

2.2 基于DIC技术的应变位移测试

2.2.1 DIC技术

DIC技术能根据物体变形前后的灰度照片,利用相关算法识别散斑图像的相应位置,通过计算样本子区域与变形后目标子区域的相关系数获得移位信息,实现全场位移计算。子区域变形前后相关系数计算公式如下:

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} \times \frac{\sum_{x'=-M}^M \sum_{y'=-M}^M [g(x', y') - g_m]}{\sqrt{\sum_{x'=-M}^M \sum_{y'=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}} \quad (1)$$

$$f_m = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)]^2}{(2M+1)^2} \quad (2a)$$

$$g_m = \frac{\sum_{x'=-M}^M \sum_{y'=-M}^M [g(x', y')]^2}{(2M+1)^2} \quad (2b)$$

式中: C 为相关系数,取值范围为0~1; $f(x, y)$ 与 $g(x', y')$ 分别表示变形前后子区域的坐标灰度值; f_m 与 g_m 分别表示变形前后全局平均值; M 表示局部位移场中每个数据点的局部坐标。

2.2.2 试验细节

首先将未掺入聚丙烯纤维和掺入聚丙烯纤维的水泥稳定碎石圆柱体试件用水刀切割成厚度为50 mm、直径为150 mm的半圆柱体试件;然后在半圆柱体圆心处切割出深度为15 mm的预切缝;最后喷漆,并在试件表面进行散斑处理,完成试件的制作。在基于DIC技术的应变位移测试系统(图2)中,将水泥稳定碎石试件放置在UTM试验机上,设置加载速率为1 mm/min,利用高速相机对加载过程进行全程监测,每组试验设置3个平行试件。

2.2.3 图像后处理技术

将试验过程监测图片导入GOM Correlate软件,首先对试件长度进行标定,然后在试件下边缘进行

目标点选取,试件目标点选取如图3所示。GOM Correlate 系统将对试件的加载全过程进行分析计算,得到试件表面的应变场与位移场。

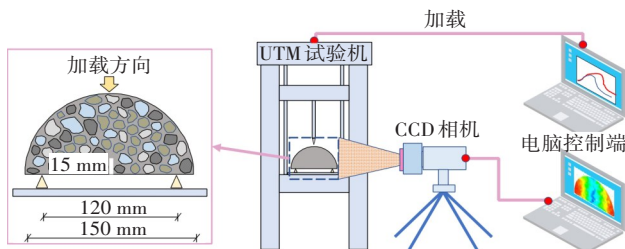


图2 应变位移测试系统

Fig. 2 Strain and displacement testing system

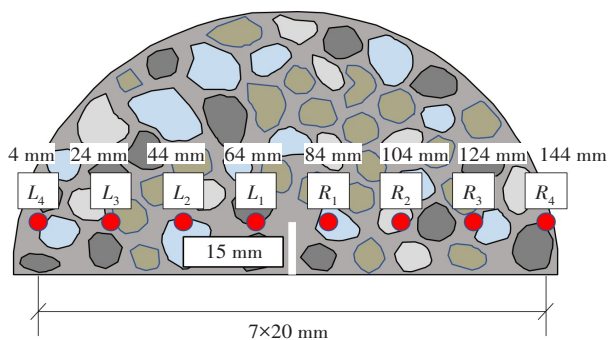


图3 目标点选取

Fig. 3 Target point selection

2.3 微观形貌测试

扫描电子显微镜基于二极管的固态检测器可以在指定的加速电压下获得微观图像。本试验利用扫描电子显微镜对聚丙烯纤维及纤维-水泥界面进行观察,从微观角度对纤维在基体材料中的增韧阻裂作用进行阐释。本试验选择的扫描电子显微镜型号为 Zeiss Sigma 300,加速电压为 0.3 ~ 30.0 kV,放大倍数为 8 000 ~ 10 000,工作距离为 10 mm。

3 结果与分析

3.1 宏观力学性能

3.1.1 劈裂抗拉强度测试结果

根据 UTM 试验机的试验结果,得出不同聚丙烯纤维掺量和不同养护时间下试件的劈裂抗拉强度,如图4所示。由图4可知,随着龄期的增长,聚丙烯纤维水泥稳定碎石混合料劈裂抗拉强度也得到了提高。当纤维掺量由 0.00% 增加到 0.10% 时,水泥稳定碎石混合料的劈裂抗拉强度随之提高,固化时间为 7、14 与 28 d 的劈裂强度分别提高了 19.7%、21.9% 和 20.5%。当纤维掺量超过 0.10% 时,水泥稳定碎石混合料的劈裂抗拉强度提升不明显。

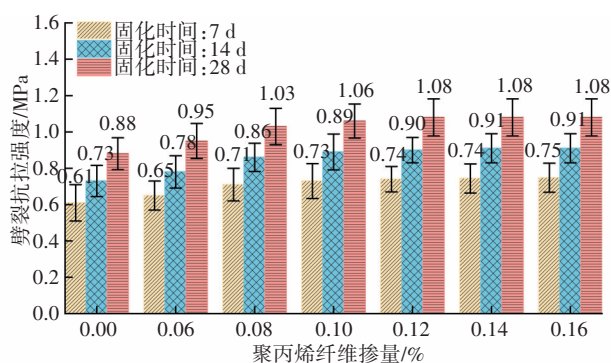


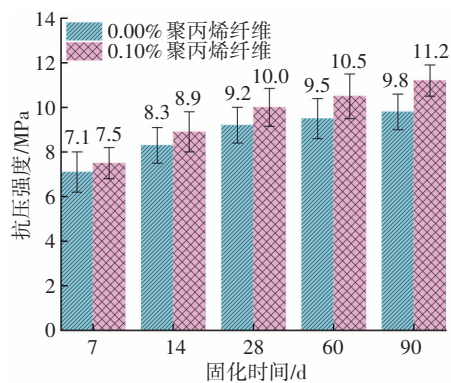
图4 劈裂抗拉强度测试结果

Fig. 4 Splitting tensile strength test results

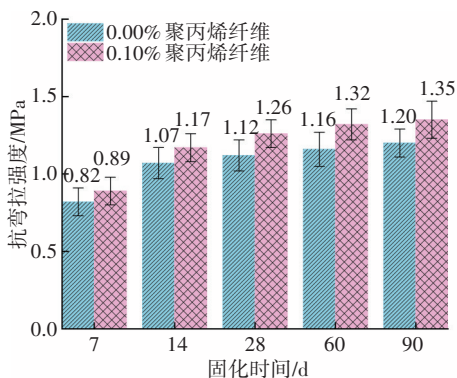
分析认为:随着养护的进行,水泥水化作用的持续使得水化硅酸钙的强度更高,纤维与骨料之间的黏结作用不断提升;聚丙烯纤维有桥接作用,纤维能在抑制裂缝发展的同时代替水泥稳定碎石混合料受拉,从而提升水泥稳定碎石混合料的抗拉强度。综合以上分析,亦考虑到实际工程的经济性,确定聚丙烯纤维最佳掺量为 0.10%。

3.1.2 无侧限抗压强度测试结果

对不同养护时间下掺入 0.10% 聚丙烯纤维与不掺入聚丙烯纤维的水泥稳定碎石试件的抗压强度及抗弯拉强度进行测试,结果如图5所示。



(a) 抗压强度



(b) 抗弯拉强度

图5 力学强度测试结果

Fig. 5 Mechanical strength test results

由图5可知,聚丙烯纤维的掺入对水泥稳定碎石试件的抗压强度及抗弯拉强度均有提升作用。养护时间为7、14、28、60、90 d的水泥稳定碎石试件的抗压强度相对于未掺入聚丙烯纤维的水泥稳定碎石试件分别提升了5.6%、7.2%、8.7%、10.5%、14.3%,抗弯拉强度分别提升了8.5%、9.3%、12.5%、13.8%、12.5%。通过两组数据对比还可以发现,纤维的掺入对试件抗弯拉强度的提升效果好于抗压强度的提升效果。另外,随着水化反应的进行,纤维的掺入对水泥稳定碎石混合料力学性能的提升效果更好。以上分析表明:纤维能在水泥稳定碎石混合料中杂散分布,对其有支撑作用,在一定程度上提升了水泥稳定碎石混合料的抗压强度;并且由于纤维的桥接作用主要是代替受拉,因此掺入聚丙烯纤维后水泥稳定碎石混合料抗弯拉强度的提升幅度更大。

3.2 应变位移测试结果

3.2.1 试件断裂过程结果分析

试件破坏分为两个阶段:第一阶段为微观裂缝的萌生阶段,在此阶段随着荷载的施加试件内部细微裂纹逐渐产生,但未完全集成,荷载亦未到达试件的承载能力极限;第二阶段为宏观裂缝扩展阶段,微观裂纹集成后生成宏观裂纹,在裂缝尖端产生应力集中,孕育能量,形成断裂过程区,造成试件局部应变激增。断裂区迅速推移,导致宏观裂缝产生后便迅速扩展,试件有效承载面积减小,由于水泥稳定碎石混合料是脆性材料,试件破坏迅速。

根据UTM试验得到的荷载-时间曲线,找到峰值荷载对应的时间 T 。利用DIC技术及GOM Correlate系统对加载过程中试件的表面应变场进行分析,得到 $0.8T$ 、 $1.0T$ 和 $1.1T$ 时刻试件表面主应变场及次应变场云图,如图6所示。

加载速率设置为1 mm/min,由加载时间可计算

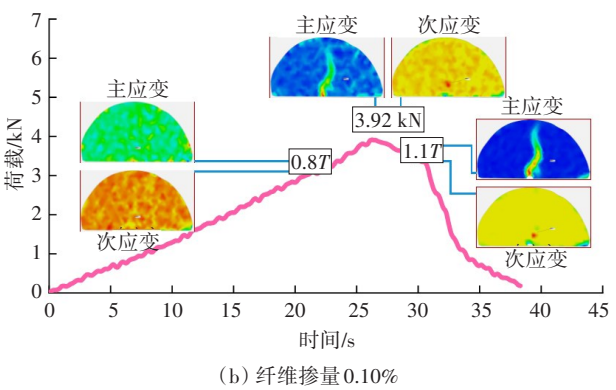
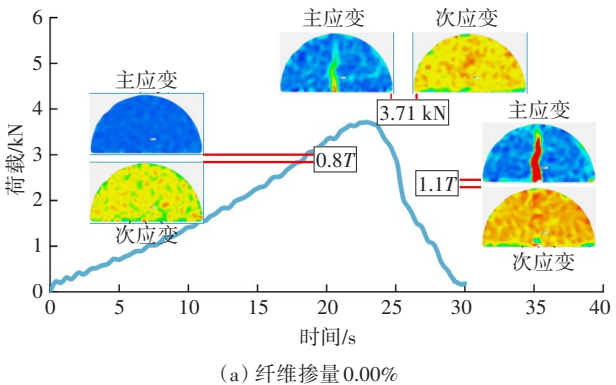


图6 荷载曲线及应变云图

Fig. 6 Load curve and strain cloud diagram

出试件的加载位移,位移与荷载所围面积即为断裂功。计算了3组平行试件不同阶段的断裂功及总断裂功,结果见表4。

表4 不同阶段试件断裂功

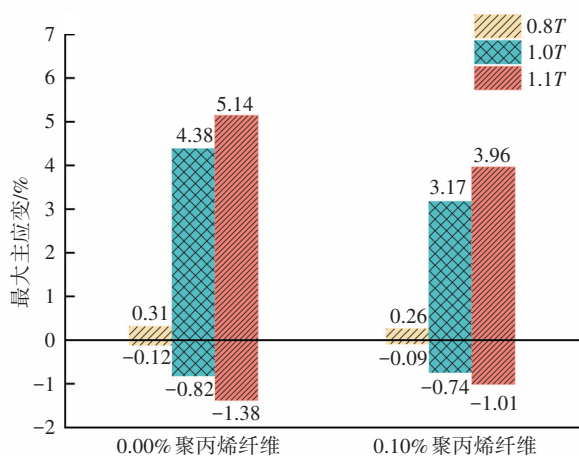
Table 4 Fracture work of specimens at different stages

试件	纤维掺量/%	断裂功/J		
		第一阶段	第二阶段	整个阶段
试件 I	0.00	0.68	0.21	0.89
试件 II		0.62	0.24	0.86
试件 III		0.72	0.24	0.96
平均值		0.67	0.23	0.90
试件 I	0.10	0.81	0.41	1.22
试件 II		0.90	0.32	1.22
试件 III		0.80	0.35	1.15
平均值		0.84	0.36	1.20

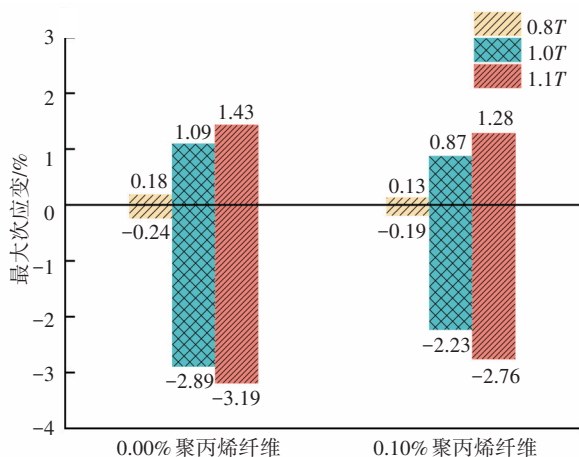
由表4可知,纤维的掺入使试件各阶段的断裂功均有提高。对比未掺入聚丙烯纤维的试件的平均断裂功,第一阶段掺入聚丙烯纤维的试件的平均断裂功提升了25.4%;第二阶段试件的平均断裂功提升了56.5%;整个阶段试件的平均断裂功提升了33.3%。因此,可以认为纤维对裂缝发展的全过程均有阻裂作用,尤其是第二阶段在抑制水稳基层裂缝扩展上效果更显著。

根据应变云图,在裂缝萌生阶段试件表面未发生明显应变集中。到达峰值荷载时,预切缝处产生应变集中,未掺入纤维的试件峰值荷载为3.71 kN,历时22.93 s;掺入纤维的试件峰值荷载为3.92 kN,历时26.29 s。因此,可以认为纤维的加入能提升水稳基层的承载力,延迟水稳基层开裂的时间。

对不同时刻试件表面的最大主应变和次应变进行对比,结果如图7所示。



(a) 试件表面最大主应变



(b) 试件表面最大次应变

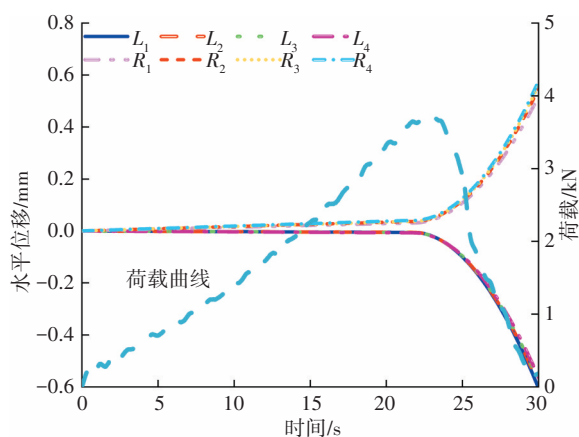
图7 试件表面最大应变

Fig. 7 Maximum strain on specimen surface

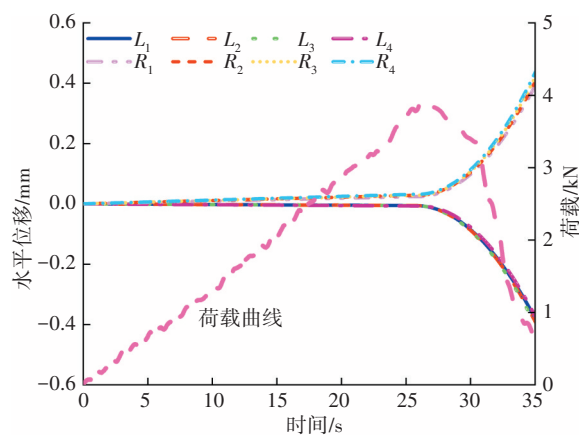
由图7可知,在0.8T时,试件未出现宏观裂缝,表面最大主应变和最大次应变很小,说明此阶段无应变集中产生。当到达峰值荷载时,试件表面最大应变激增,预切缝处形成断裂过程区,试件局部变形增大。超过峰值荷载后,试件表面的应变仍有一定上升。另外可以看出,相比于未掺入聚丙烯纤维的试件,掺入聚丙烯纤维的试件各个时刻对应的最大主应变和最大次应变均有一定程度的降低,说明掺入水泥稳定碎石混合料中的纤维能够传递应力,将断裂过程区的应力分散至其他区域,从而缓解了应变的集中以及裂缝尖端的急剧推移。

3.2.2 试件表面水平方向位移场结果分析

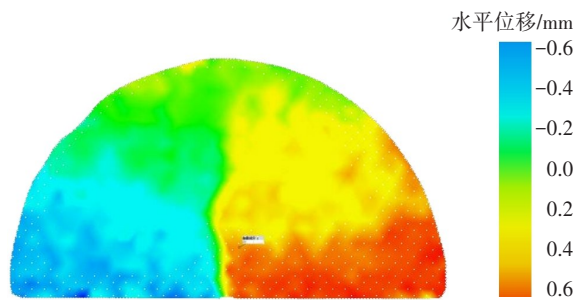
定义向左移动为正方向,根据应变位移测试系统和GOM Correlate系统对试件加载过程中表面水平方向位移场的测试和分析,得到试件目标点水平方向的位移时间曲线,如图8所示。



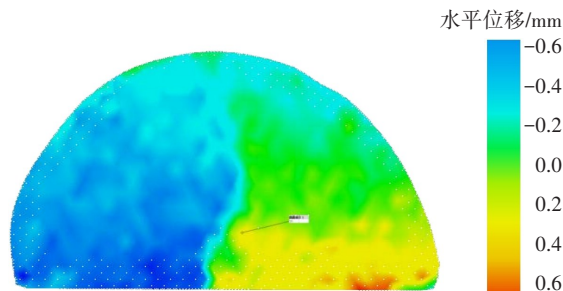
(a) 纤维掺量0.00%的试件水平位移时间曲线



(b) 纤维掺量0.10%的试件水平位移时间曲线



(c) 纤维掺量0.00%的试件水平位移云图



(d) 纤维掺量0.10%的试件水平位移云图

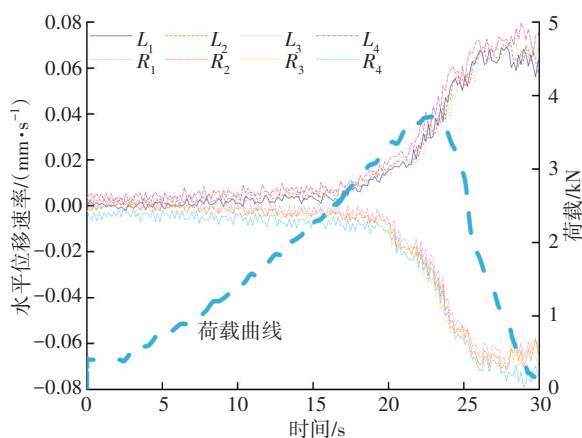
图8 试件目标点水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of specimen target point

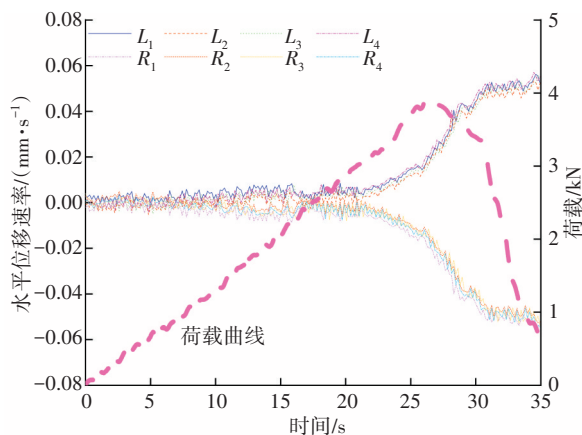
由图8可知,加载过程中试件预切缝左边的点

向左移动,预切缝右边的点向右移动。在达到峰值荷载之前,试件左右两边的目标点水平位移差很小。达到峰值荷载后,左右两边的目标点水平位移差迅速增大。掺加了聚丙烯纤维的试件在 26.29 s 左右开始出现明显位移,比未掺加纤维的试件出现明显位移的时间延迟了 3.36 s。当试件完成加载后,掺加了聚丙烯纤维的试件左右目标点的位移差约为 1.0 mm,未掺加聚丙烯纤维的试件左右目标点的位移差约为 1.2 mm,可以认为纤维的掺入对试件表面的位移有抑制作用。

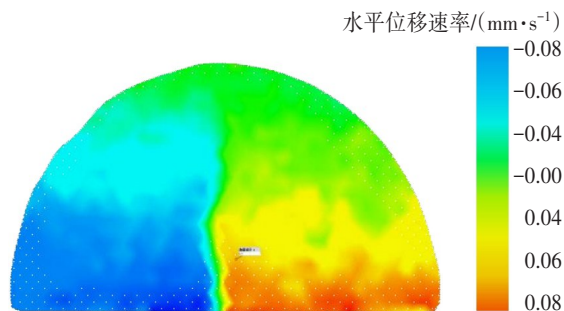
试件目标点水平位移速率时间曲线如图 9 所示。由图 9 可知,在初始加载荷载时,试件目标点的位移速率几乎为 0;在裂缝即将扩展时,试件目标点的位移速率开始增大;在试件即将破坏时,目标点位移速率增幅变慢,并达到极值。对比不同纤维掺量的两图可知,试件破坏时未掺入聚丙烯纤维试件目标点的水平位移速率大小约为 0.07 mm/s,掺入聚丙烯纤维试件目标点的水平位移速率大小约为 0.05 mm/s。



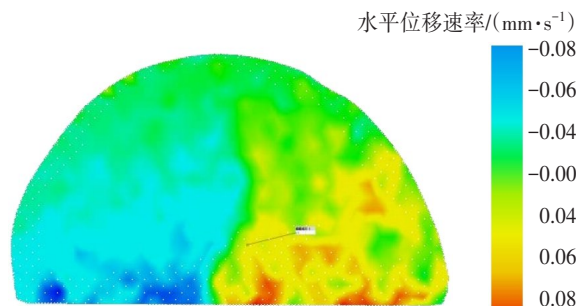
(a) 纤维掺量 0.00% 的试件水平位移速率时间曲线



(b) 纤维掺量 0.10% 的试件水平位移速率时间曲线



(c) 纤维掺量 0.00% 的试件水平位移速率云图



(d) 纤维掺量 0.10% 的试件水平位移速率云图

图 9 试件目标点水平位移速率

Fig. 9 Horizontal displacement rate of specimen target point

3.2.3 试件表面竖直方向位移场结果分析

定义向下为正方向,根据应变位移测试系统和 GOM Correlate 系统对试件加载过程中表面竖直方向位移场的测试和分析,得到试件目标点竖直方向的位移时间曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,加载过程中试件下支承范围内的点(L_1 、 R_1 、 L_2 、 R_2 、 L_3 、 R_3)向下移动,下支承范围外的点(L_4 、 R_4)向上移动。未掺入聚丙烯纤维的试件左右两边目标点的位移大小略有差异,可能是由左右支撑摩擦力不等才导致滑移不均的。比较破坏时试件目标点的最大位移,未掺入聚丙烯纤维的试件上位移最大的目标点为 L_1 ,最大位移约为 0.60 mm;掺入聚丙烯纤维的试件上位移最大的目标点为 R_1 ,最大位移约为 0.54 mm。可以认为聚丙烯纤维的掺入能在一定程度上减小试件受荷时的竖向位移。

试件目标点竖直方向位移速率时间曲线如图 11 所示。由图 11 可知,加载过程中试件下支承范围内的点(L_1 、 R_1 、 L_2 、 R_2 、 L_3 、 R_3)位移速率为正,下支承范围外的点(L_4 、 R_4)位移速率为负。试件破坏时,未掺入聚丙烯纤维的试件最大竖向位移速率约为 0.080 mm/s,掺入聚丙烯纤维的试件最大竖向位移速率约为 0.055 mm/s。

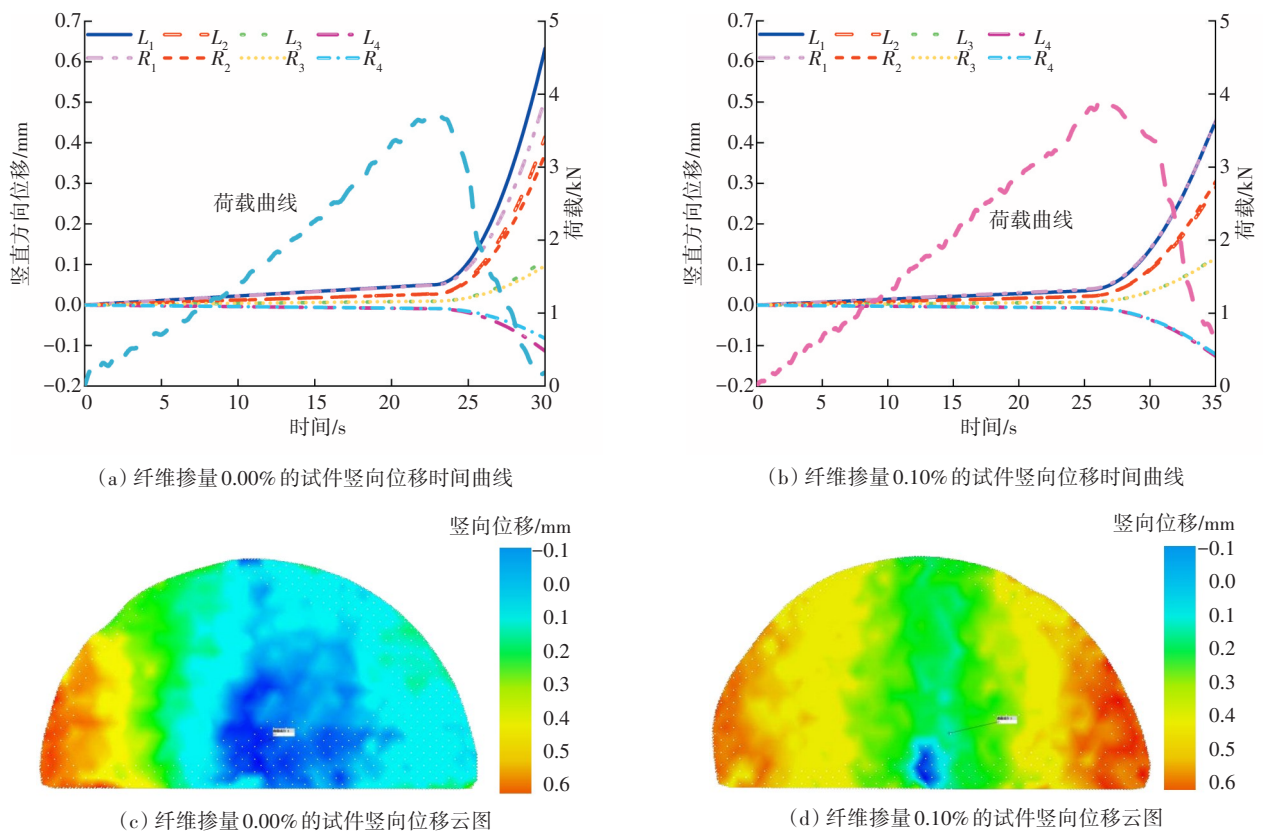


图10 试件目标点竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of specimen target point

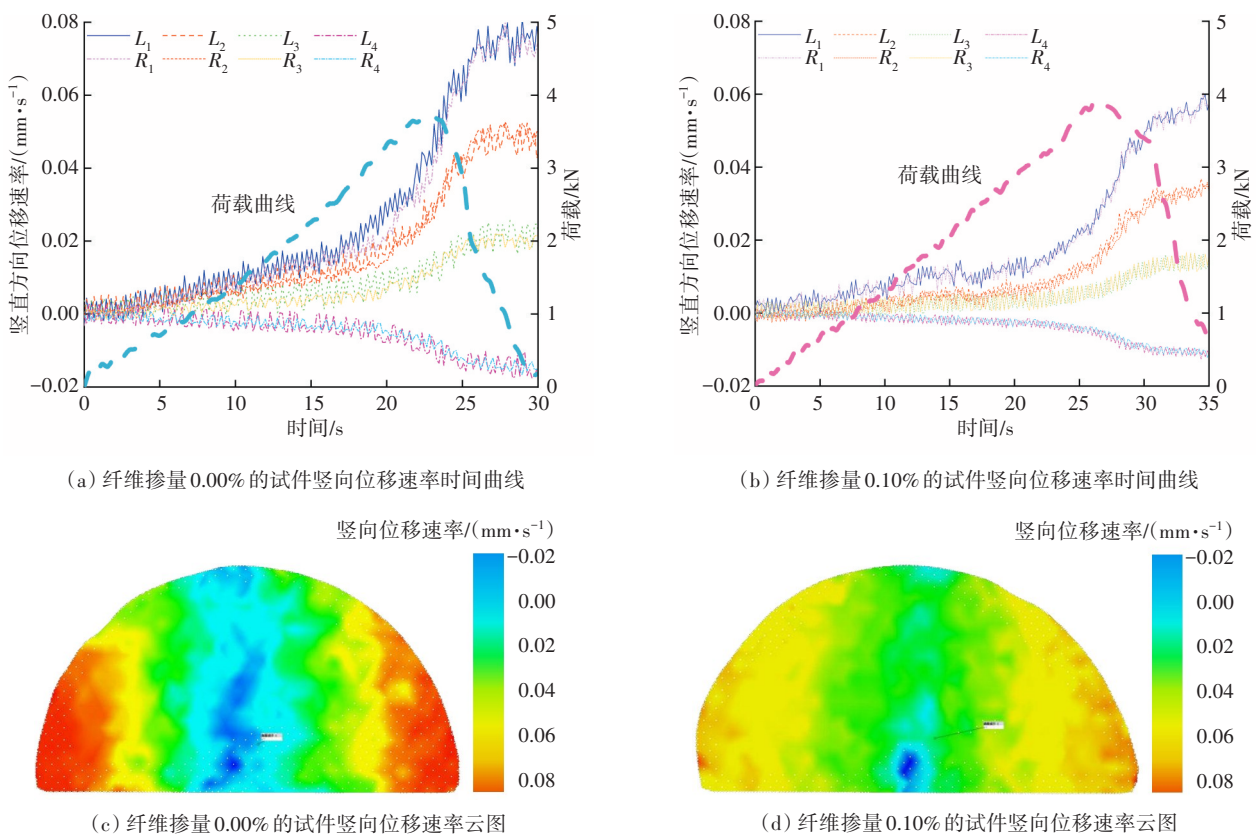
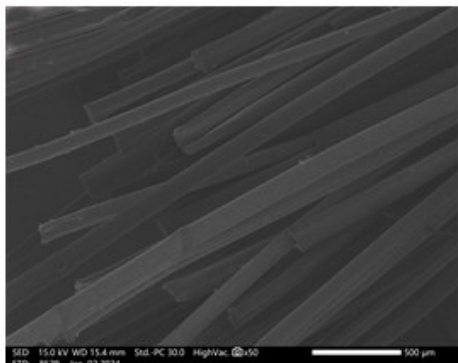


图11 试件目标点竖向位移速率

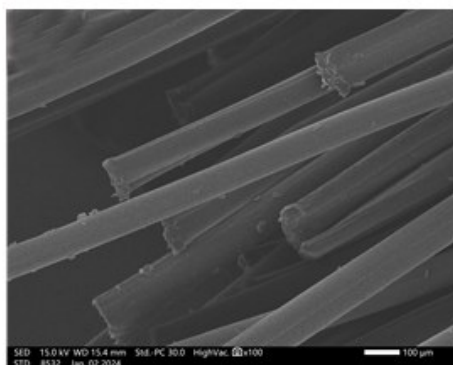
Fig. 11 Vertical displacement rate of specimen target point

3.3 微观机理分析

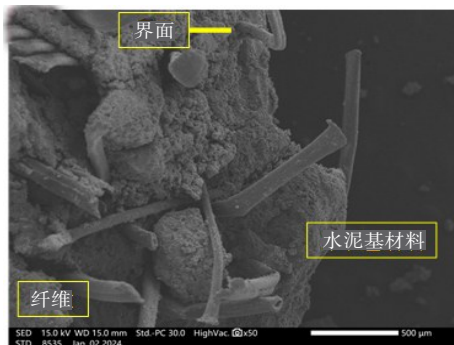
利用扫描电子显微镜对纤维增强水泥稳定碎石混合物进行测试,得到其微观形貌,如图12所示。



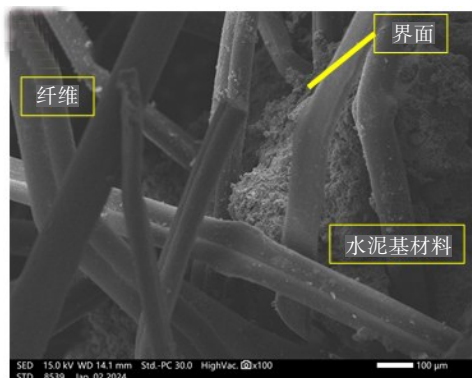
(a) 聚丙烯纤维放大50倍



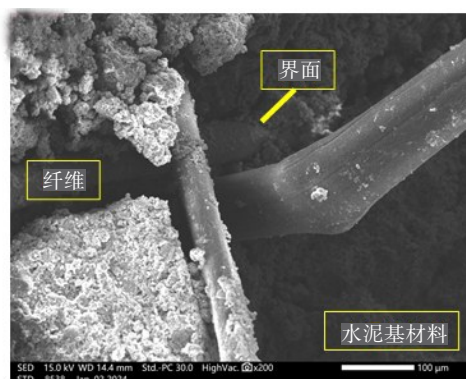
(b) 聚丙烯纤维放大100倍



(c) 聚丙烯纤维锚固



(d) 聚丙烯纤维桥接



(e) 聚丙烯纤维阻裂

图12 纤维-基体微观形貌

Fig. 12 Fiber-matrix micromorphology

由图12可以看到,纤维在水泥基材料中杂散分布,与水泥基材料之间的界面完整,且界面无明显缺陷。当裂缝产生时,纤维杂散分布形成的空间结构起到桥接阻裂的作用,一方面能抑制微观裂缝的萌生,另一方面,在裂缝已经形成的区域能代替水泥稳定碎石混合物受拉,延缓现有裂缝的扩展。

纤维能够在水泥稳定碎石混合物中起到传导作用。水泥稳定碎石混合物内部有大量缺陷,在荷载作用下在这些缺陷处会出现应力集中,当应力达到材料强度极限时会导致材料的迅速破坏。纤维的掺入使集中的应力得到传输,从而降低了荷载作用下水稳基层破坏的概率。

4 结论

本文在水稳基层中掺入聚丙烯纤维,对其宏观力学性能进行了测试,并利用基于DIC的全场应变位移试验系统对加载时的试件表面应变场和位移场进行了全时域监测,最后利用电子显微镜对纤维增强水泥稳定碎石混合物的抗裂性能从微观机理上进行阐释,结论如下:

1) 掺入聚丙烯纤维可以有效提高水泥稳定碎石基层的劈裂抗拉强度及抗弯拉强度,并且对提高抗压强度也有一定作用。经综合考虑,确定了聚丙烯纤维的最佳掺量为0.10%。

2) 聚丙烯纤维的掺入可延迟荷载作用下试件表面裂缝产生的时间,并且可在一定程度上提高水稳基层的承载力,掺入聚丙烯纤维的水稳基层试件的表面最大主应变和最大次应变在数值上更小。

3) 聚丙烯纤维的掺入能抑制荷载作用下微观

裂缝的萌生,亦可在裂缝产生后发挥桥接作用,代替水泥稳定碎石混合料基体材料受拉,从而延缓宏观裂缝的扩展。

4) 聚丙烯纤维的掺入能降低试件的位移速率,减小试件的位移。通过比较可知,聚丙烯纤维的掺入使得水泥稳定碎石混合料试件破坏时的表面位移降低了20%左右,同时推迟了试件破坏的时间。

参考文献(References):

- [1] XUAN D X, HOUBEN L J M, MOLENAAR A A A, et al. Mechanical properties of cement-treated aggregate material: a review[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 496-502. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.055.
- [2] ZHENG Y X, ZHANG P, CAI Y C, et al. Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 312-334. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.11.115.
- [3] SUN Y, LI L H. Strength assessment and mechanism analysis of cement stabilized reclaimed lime-fly ash macadam [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 118-129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.139.
- [4] CHO Y H, LEE K W, RYU S W. Development of cement-treated base material for reducing shrinkage cracks [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1952 (1): 134-143. DOI: 10.1177/0361198106195200115.
- [5] BENTUR A, KOVLER K. Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems [J]. *Materials and Structures*, 2003, 36(3): 183-190. DOI: 10.1007/BF02479556.
- [6] MAALOUF M, KHOURY N, LAGUROS J G, et al. Support vector regression to predict the performance of stabilized aggregate bases subject to wet-dry cycles [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36 (6): 675-696. DOI: 10.1002/nag.1023.
- [7] 苗英豪, 赵恩强, 王书云, 等. 土工织物延缓沥青路面疲劳型反射裂缝的有限元分析[J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(6): 790-795.
MIAO Yinghao, ZHAO Enqiang, WANG Shuyun, et al. FEM analysis of mitigating fatigue-induced reflective cracking in asphalt pavements using geotextiles [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35 (6): 790-795.
- [8] REN R B, LI H, WANG Z R. Analysis of semi-rigid asphalt pavement with flexible base as a sandwich layer [C]// *GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009: 155-162.
- [9] 谭忆秋, 石昆磊, 李丽敏, 等. 高黏性沥青应力吸收层防治反射裂缝研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40 (2): 241-245. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234. 2008. 02.017.
TAN Yiqiu, SHI Kunlei, LI Limin, et al. Prevention of reflective cracks with high viscous asphalt stress absorbing layer [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40 (2): 241-245. DOI: 10.3321/j.issn: 0367-6234.2008.02.017.
- [10] 张肖宁. 基于X-ray CT的沥青混合料计算机辅助设计技术的研究进展[J]. *交通科学与工程*, 2010, 26(2): 1-8. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2010.02.009.
ZHANG Xiaoning. Advances in computer aided design of asphalt mixtures based on X-ray CT [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2010, 26(2): 1-8. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2010.02.009.
- [11] HADDOCK J E, HAND A J T, FANG H B, et al. Determining layer contributions to rutting by surface profile analysis [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 131 (2): 131-139. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947x(2005)131: 2(131).
- [12] AGUIRRE M A, HASSAN M M, SHIRZAD S, et al. Laboratory testing of self-healing fibers in asphalt mixtures prepared with recycled materials [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673 (4): 513-523. DOI: 10.1177/0361198119836978.
- [13] QIAN S Z, LI V C, ZHANG H, et al. Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35 (1): 78-88. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.012.
- [14] CARRET J C, LAMOTHE S, HOUNKPONOU S E, et al. Effects of pre-cracking on the early-age mechanical properties of a cement-treated base material mixed and tested in laboratory [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124488. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124488.
- [15] CHEN X Q, YUAN J W, DONG Q, et al. Meso-scale cracking behavior of Cement Treated Base material [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117823. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117823.
- [16] HILLES M M, ZIARA M M. Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber [J]. *Engineering Science and Technology*, 2019, 22 (3): 920-928. DOI: 10.1016/j.jestech.2019.01.003.
- [17] WANG X Z, HE J, MOSALLAM A S, et al. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC) [J]. *Advances in Materials Science and*

- Engineering, 2019, 2019: 7520549. DOI: 10.1155/2019/7520549.
- [18] TAN K H, SAHA M K. Cracking characteristics of RC beams strengthened with FRP system [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12 (5): 513-521. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12: 5(513).
- [19] WANG W W, LI G. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43 (6): 1372-1387. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076.
- [20] SHENG J, YIN S P, YUE J H, et al. Bending performance of ECC-RC composite beam reinforced with textile [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123079. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2021. 123079.
- [21] SUN X J, GAO Z, CAO P, et al. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 58-72. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018.
- [22] 关宏信, 于凯辉, 徐英杰, 等. 不同纤维及沥青复合改性BK-10混合料路用性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20 (5): 76-83. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220401003.
- GUAN Hongxin, YU Kaihui, XU Yingjie, et al. Pavement performance of BK-10 mixtures modified with different fibers and asphalts [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20 (5): 76-83. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220401003.
- [23] 曹宇, 何赏璐, 陈新. 面向人车路环境的视频检测技术应用研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 98-109. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907003.
- CAO Yu, HE Shanglu, CHEN Xin. Human-vehicle-road-environment-oriented study on the application of video detection technology [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(3): 98-109. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907003.
- [24] 刘龙武, 龚德峰, 李俊, 等. 基于静态图像法的镍铁渣粒度分析及剪切试验[J]. 交通科学与工程, 2020, 36 (2): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u. 2020. 02.001.
- LIU Longwu, GONG Defeng, LI Jun, et al. Particle size analysis and shear test of ferronickel slag based on the static image method [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (2): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.001.

(责任编辑:熊怡)

(上接第108页)

- tunnels in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 40-51. DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001.
- [8] 张妞, 刘辉, 刘昶, 等. 非对称连拱隧道非对称中隔墙施工力学行为研究[J]. 公路, 2022, 67(3): 343-349. ZHANG Niu, LIU Hui, LIU Chang, et al. Research on mechanical behavior of asymmetric middle wall in asymmetric multi-arch tunnels [J]. Highway, 2022, 67 (3): 343-349.
- [9] 李鸿博, 郭小红. 公路连拱隧道土压力荷载的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3429-3434. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.11.012.
- LI Hongbo, GUO Xiaohong. Research on calculation methods of earth pressure on multi-arch tunnel for highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3429-3434. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.11.012.
- [10] 刘昶, 刘辉, 邓小钊, 等. 偏压连拱隧道非对称中隔墙施工力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (3): 50-57, 77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.008.
- LIU Chang, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Study on construction mechanical characteristics of unsymmetrical middle wall in biased double-arch tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 50-57, 77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.008.

(责任编辑:熊怡)