

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022042523121964

文章编号: 1674-599X(2023)06-0057-09

引用格式: 姚佳良, 易旺, 张谭龙, 等. 改性废塑料纤维水泥稳定碎石性能与应用研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 57-65.

Citation: YAO Jialiang, YI Wang, ZHANG Tanlong. Experimental performance and application analysis of plastic waste fiber-reinforced cement-stabilized macadam[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 57-65.

改性废塑料纤维水泥稳定碎石性能与应用研究

姚佳良¹, 易旺¹, 张谭龙², 姚丁¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南路桥建设集团, 湖南 长沙 410018)

摘 要: 为研究掺入改性废塑料纤维材料的水泥稳定碎石混合料的力学性能及变形特性, 依托怀芷高速公路工程, 铺筑了试验路, 验证废旧塑料纤维应用于水泥稳定碎石基层的可行性, 提出废塑料纤维水泥稳定碎石混合料拌合工艺。研究表明: 掺入适量的改性废塑料纤维, 可以显著提升水泥稳定碎石材料的劈裂抗拉强度和弯拉强度。当掺入0.30%的改性废塑料纤维时, 7 d龄期的水泥稳定碎石的劈裂抗拉强度提高了71.4%, 弯拉强度提高了13.1%。掺入0.30%的改性废塑料纤维可有效降低水泥稳定碎石的干缩变形系数和温缩变形系数。通过调查铺筑的试验路发现, 芯样无侧限抗压强度合格, 废旧塑料纤维水泥稳定碎石基层的抗裂性能得到了显著提高。

关键词: 道路工程; 改性废塑料纤维; 水泥稳定碎石; 抗裂性能

中图分类号: TV42

文献标志码: A

Experimental performance and application analysis of plastic waste fiber-reinforced cement-stabilized macadam

YAO Jialiang¹, YI Wang¹, ZHANG Tanlong², YAO Ding¹

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Road and Bridge Construction Co., Ltd., Changsha 410018, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and deformation characteristics of cement stabilized aggregates mixed with modified waste plastic fiber materials, relying on the Huaizhi Expressway project, a test road was paved to verify the feasibility of waste plastic fibers applied to cement stabilized aggregates base layer, and to put forward the mixing process of cement stabilized aggregates mixed with waste plastic fibers. The test results show that the splitting tensile strength and bending tensile strength of cement stabilized aggregates can be significantly improved by mixing appropriate amount of modified waste plastic fibers. The split tensile strength of cement stabilized aggregates at the age of 7 d increased by 71.4% and the flexural tensile strength increased by 13.1% when 0.30% of modified waste plastic fibers were added. Adding 0.30% of modified waste plastic fiber can effectively reduce the dry shrinkage deformation coefficient and temperature shrinkage deformation coefficient of cement stabilized aggregates. The investigation of the paved test road showed that the core samples were qualified in terms of unconfined compressive strength, and the crack-resistant performance of the cement-stabilized crushed stone base layer with waste plastic fibers was significantly improved.

Key words: road engineering; plastic waste fiber; cement stabilized macadam; crack resistance

收稿日期: 2022-04-25

作者简介: 姚佳良(1964—), 男, 长沙理工大学教授。E-mail: yao26402@126.com

水泥稳定碎石基层具有原料来源广泛、力学性能较好等优点。在基层施工及服役过程中,水泥稳定碎石基层常出现大量开裂现象,如图1所示。基层开裂会反射到面层,严重影响路面结构的整体性和耐久性,造成较大的经济损失^[1-3]。



图1 水泥稳定碎石基层开裂现象

Fig. 1 The cracking of cement stabilized macadam base

国内外对纤维材料增强水泥稳定碎石混合料抗裂性能及其他性能的相关研究已有报道。ZHAO等^[4]通过室内压缩试验和劈裂试验,研究了聚乙烯醇纤维(polyvinyl alcohol fiber, PVA纤维)含量对水泥稳定碎石劈裂抗拉强度和抗压强度的影响。结果表明,添加PVA纤维显著提高了水泥稳定碎石的劈裂抗拉和抗压强度。ZHANG等^[5]使用四点加载法测量了水泥稳定碎石的抗弯强度和弯拉回弹模量,并发现聚丙烯纤维可以提高水泥稳定碎石的抗弯强度,降低水泥稳定碎石的弯拉回弹模量。LI等^[6-7]选用聚酯纤维(polyester fiber, PET纤维)、聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PP纤维)、聚丙烯腈纤维(polyacrylonitrile fiber, PAN纤维)和PVA纤维,制备了不同纤维类型增强的水泥稳定碎石混合料,研究了其力学性能。结果表明,纤维能够有效提高水泥稳定碎石混合物的抗压强度和劈裂强度,且PET、PP和PAN纤维的加入可以降低水泥稳定碎石混合的抗压回弹模量。

纤维可以控制或延缓水泥稳定碎石混合料的干缩和温缩。ZHAO等^[8]发现,掺入PVA纤维的水泥稳定碎石混合料的干缩率和温缩率均得到了显著改善。ZHANG等^[9]通过千分尺法和应变片法测定了PP纤维增强水泥稳定碎石的干缩系数和温缩系数。结果表明,当纤维体积分数不超过0.1%时,平均干缩系数和平均温缩系数均随着纤维体积分

数的增加而逐渐降低。

许多学者注意到,只有当纤维类型和掺量适宜,并且保证纤维在基体中分散良好时,纤维才能发挥出优秀的增强作用^[10-12]。YUAN等^[13]研究了PVA纤维分散性对水泥稳定碎石的影响,发现抗压强度和抗拉强度都与纤维的分散性成正比。然而,工程中使用的纤维,如PVA纤维,在生产过程中会产生污染,且成本高昂,影响了其推广和使用^[14]。

近年来,随着土木工程可持续发展理念的提出,学者对工程中使用的废旧材料和回收产品的研究有所增加^[15-18]。本研究所用的改性废塑料纤维是由废旧塑料制成的丝状纤维聚合物。该纤维主要由改性废塑料袋、废弃编织袋、电缆废胶等废旧塑料制品机械破碎而成。目前,关于改性废塑料纤维的应用研究较少。ANANDAN等^[19-20]验证了废旧塑料纤维对混凝土力学性能的增强作用。KHALID等^[21-22]研究了改性废塑料纤维对混凝土开裂行为的影响。结果表明,塑料纤维能显著提高材料的劈裂抗拉强度、抗弯强度,还可以提高混凝土的初裂强度和改善复合材料的开裂后行为。

本研究探讨在水泥稳定碎石中利用改性废塑料纤维的可行性,并结合湖南省交通科技项目“复合高分子材料改性半刚性基层的路用性能研究”,开展了不同纤维掺量的改性废塑料纤维水泥稳定碎石混合料的力学性能与变形性能研究。在湖南省怀化至芷江高速公路罗旧互通A匝道AK0+000~AK0+100段工程铺设了试验路,深入研究改性废塑料纤维掺入水泥稳定碎石基层的施工工艺及路用性能,为改性废塑料纤维在水泥稳定碎石基层中的应用与推广提供了参考。

1 废塑料纤维改性与配合比设计

1.1 原材料

选用湖南省南方水泥有限公司生产的强度等级为32.5 MPa的普通硅酸盐水泥,其主要技术指标见表1。

集料均选用玄武岩。其中,粗集料的堆积密度为1 510 kg/m³,压碎值为20.26%;细集料的堆积密度为1 562 kg/m³,细度模数为2.7。经检测,粗、细集料各项指标均符合相关技术指标要求。

表1 水泥主要技术指标试验结果

Table 1 The main technical indicators of cement

| 项目 | 细度/ % | 标准 稠度/ % | 凝结时间 | | 安定性 试验(雷 氏夹法) | 3 d抗折 强度/ MPa | 3 d抗压 强度/ MPa |
|----------|----------|----------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | 初凝时 间/min | 终凝时 间/min | | | |
| 测试 结果 | 1.8 | 25.8 | 312 | 421 | 合格 | 4.8 | 18.2 |
| 规范 要求 | ≤10.0 | — | ≥45 | ≤600 | 合格 | ≥3.5 | ≥15.0 |

废塑料纤维由长沙黄氏塑料粉碎加工厂生产,其主要组分包括多种塑料,如聚丙烯(polypropylene, PP)、高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)、低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)和聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等。纤维成品由废弃塑料袋、废旧编织袋、电缆废胶等废塑料经机械破碎而成^[23],丝状成品的长度大多为30 mm。其中,废塑料纤维中聚丙烯组分占总质量的90%以上,其他组分的塑料废料占比较少。本研究所用废塑料纤维形貌特征如图2所示。



图2 废塑料纤维形貌特征

Fig. 2 Morphological characteristics of waste plastic fibers

1.2 废塑料纤维改性研究

在回收与加工过程中,废旧塑料纤维材料表面容易受到污染,若直接使用,纤维与水泥之间的黏结表现较差^[24]。废塑料纤维密度较低,加水拌合,容易出现上浮现象,影响纤维在基体中的均匀分散。因此,本研究利用轻质碳酸钙对废塑料纤维进行了包覆改性^[25-26]。

具体的改性方法为:

- 1) 将废塑料纤维浸入沸水中除油。
- 2) 浸入由轻质碳酸钙、二甲苯、蒸馏水配置成的混合溶液中,进行包覆改性。
- 3) 经一定反应时间后,滤出废塑料纤维,并使

用丙酮溶剂对废塑料纤维进行洗涤、除杂。

4) 在温度设定为50℃的烘箱中进行烘干。

处理后的改性废塑料纤维分散能力与亲水能力得到提升,在基体中能够更好地发挥作用。改性前、后的废塑料纤维的分散情况如图3所示。



(a) 改性前



(b) 改性后

图3 废塑料纤维在水中的分散情况

Fig. 3 Dispersion of waste plastic fibers in water

参考《公路工程水泥混凝土用纤维》(JT/T 524—2019)相关规定,对改性完成后的废塑料纤维的相关技术指标进行测定,结果见表2。

表2 改性废塑料纤维的物理性质

Table 2 Physical properties of modified waste plastic fibers

| 项目 | 试验结果 | 技术要求 | 评定 |
|-------------------------|-------|-----------|----|
| 长度/mm | 30 | 12~40 | 合格 |
| 直径/(10 ⁻⁶ m) | 41.5 | 25.0~50.0 | 合格 |
| 抗拉强度/MPa | 512 | ≥450 | 合格 |
| 弹性模量/MPa | 3 600 | ≥3 000 | 合格 |
| 断裂伸长率/% | 28 | ≤40 | 合格 |
| 耐碱性能/% | 99.0 | ≥98.0 | 合格 |

1.3 配合比设计

由于高水泥剂量会加剧水泥稳定碎石基层的收缩开裂,因此本研究选定水泥掺量为3.5%。

集料级配参考《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF 20—2015)及相关研究进行设置,级配情况见表3。

表3 合成级配表

Table 3 Grading of aggregate

| 方孔筛尺寸/mm | 推荐级配范围 | 筛分试验通过率/% |
|----------|---------|-----------|
| 31.500 | 100 | 100.0 |
| 19.000 | 68 ~ 86 | 72.3 |
| 9.500 | 38 ~ 59 | 52.6 |
| 4.750 | 22 ~ 32 | 31.3 |
| 2.360 | 16 ~ 28 | 26.7 |
| 0.600 | 8 ~ 15 | 14.4 |
| 0.075 | 0 ~ 3 | 2.2 |

纤维掺量均以质量掺量计算。试验时,纤维的质量掺量,分别按水泥和集料总质量的0.15%、0.30%、0.45%、0.60%掺入。根据标准击实试验结果,按最佳含水量拌制混合料。标准击实试验与抗压强度试验结果见表4。

表4 标准击实与抗压强度试验结果

Table 4 Test results of standard compaction and compressive strength

| 纤维掺量/% | 最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 最佳含水量/ % | 7 d抗压强度/ MPa |
|--------|--|-------------|-----------------|
| 0.00 | 2.318 | 4.0 | 3.4 |
| 0.15 | 2.348 | 4.1 | 3.5 |
| 0.30 | 2.410 | 4.3 | 3.6 |
| 0.45 | 2.383 | 4.4 | 3.2 |
| 0.60 | 2.379 | 4.5 | 3.0 |

1.4 试验方案

参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规

程》(JTG E51—2009)进行改性废塑料纤维水泥稳定碎石的抗压回弹模量、间接抗拉强度、弯拉强度测试。抗压回弹模量试验采用顶面法,试件为直径150 mm×高150 mm的圆柱体;间接抗拉强度试验采用劈裂试验测定,试件为直径150 mm×高150 mm的圆柱体,加载速度控制在1 mm/min;弯拉强度试验采用三分点加压法,试件为150 mm×150 mm×550 mm梁式试件,加载速度控制在50 mm/min。所有试验均在YAW-2000B电液伺服万能压力试验机上进行。

干缩试验如图4所示,采用150 mm×150 mm×550 mm的梁式试件,在温度 20 ± 1 °C及相对湿度 $60\% \pm 5\%$ 的干缩室内进行。试验前,采用游标卡尺测定试件的初始长度,并称量试件的初始质量。试件长轴端面磨平后,用502胶将有机玻璃片粘结于长轴端面上。再在收缩仪上安放好试件,并将千分表固定在收缩仪上。第一周时,每天读取千分表的位移,并称量试件的质量。一周之后,记录数据改为2次/d,直至第一个月结束,之后都以整月为周期记录。



图4 干缩试验

Fig. 4 Drying shrinkage test

温缩试验示意图5所示,采用150 mm×150 mm×550 mm的梁式试件,待试件养护结束后,置于105 °C烘箱中烘干至试件质量恒定。使用游标卡尺准确测定试件长度,读数精确至小数点后两位。试验前,先用砂纸将试件底部抹平并贴上薄玻璃片,之后调节好收缩仪,将试件放置于收缩仪上,安装好千分表,并将读数清零,然后开始测试。温缩试验设定5个温度级别,每个温度级别相差10 °C,在设定温度级别下保温3 h,并在保温结束前的5 min读取千分表读数。



图5 温缩试验

Fig. 5 Temperature shrinkage test

2 试验结果与分析

2.1 力学试验结果

2.1.1 抗压回弹模量

路面基层的抗压回弹模量过高会增加面层的竖向剪应力,导致面层更容易开裂^[27]。在设计时,过高的抗压回弹模量会导致基层设计厚度的减小,使得裂缝容易向上发展,形成反射裂缝。根据抗压回弹模量试验的结果,获得了不同试验龄期的抗压回弹模量与改性废塑料纤维掺量之间的关系曲线,如图6所示。

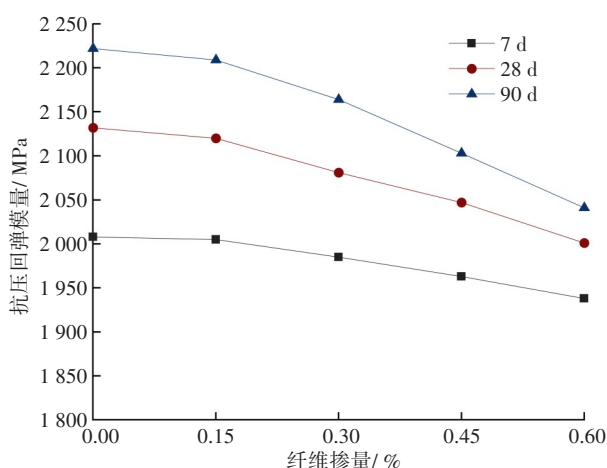


图6 纤维掺量对抗压回弹模量的影响

Fig. 6 Effect of fiber content on the compression modulus of resilience

从图6可以看出,随着改性废塑料纤维掺量的增加,水泥稳定碎石材料的抗压回弹模量值呈下降趋势。当纤维掺量为0.6%时,养护龄期分别为7、28、90 d的掺改性废塑料纤维水泥稳定碎石混合料

的抗压回弹模量与不掺纤维的水泥稳定碎石混合料的相比,分别降低了3.50%、6.10%、8.10%。这表明掺入改性废塑料纤维能在一定程度上降低抗压回弹模量,提高抗变形能力。特别是当纤维掺量超过0.15%时,这种改善效果更加显著。

2.1.2 劈裂抗拉强度

不同试验龄期的劈裂抗拉强度与改性废塑料纤维掺量的关系曲线如图7所示。

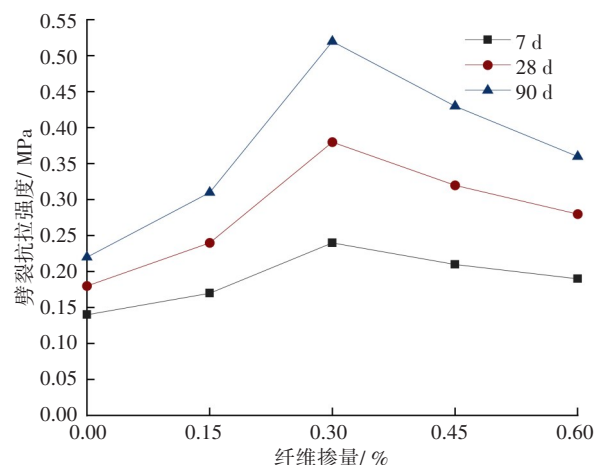


图7 纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

Fig. 7 Effect of fiber content on splitting strength

从图7可以看出,随着纤维含量的增加,水泥稳定碎石材料的劈裂抗拉强度随纤维含量的增加而显著增加,而当改性废塑料纤维含量超过0.3%时,劈裂抗拉强度逐渐下降。在试验中,当纤维掺量为0.30%且试验龄期为90 d时,测得的峰值劈裂抗拉强度为0.52 MPa,较试验龄期为90 d的普通水泥稳定碎石的提高了136.3%。改性废塑料纤维的加入有助于增强水泥稳定碎石材料的早期抗拉性能。与7 d试验龄期的普通水泥稳定碎石混合料相比,试样掺量为0.15%和0.30%的劈裂强度分别增加了21.4%和71.4%。

因此,改性废塑料纤维对水泥稳定碎石材料的抗拉性能具有显著的增强效果。当掺量达到0.30%时,增强效果最为显著。超过0.30%后,由于纤维分散性的降低,劈裂抗拉强度可能随着纤维掺量的增加有所下降。改性废塑料纤维与水泥稳定碎石基体间具有优良的黏接性能,且改性废塑料纤维具有较长的纤维长度,纤维与基体间的黏结力和机械啮合力使水泥稳定碎石能够获得较高的劈裂抗拉强度。

2.1.3 弯拉强度

基于抗压回弹模量和劈裂抗拉强度的力学试验结果,开展弯拉强度试验。根据弯拉强度试验结果,总结出了不同龄期的水泥稳定碎石弯拉强度与改性废塑料纤维掺量之间的关系曲线,如图8所示。

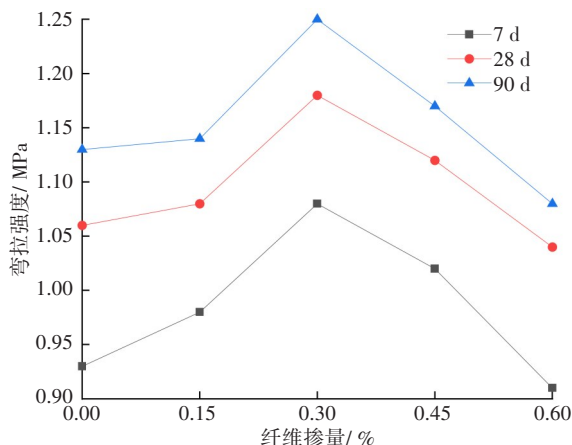


图8 纤维掺量对弯拉强度的影响

Fig. 8 Effect of fiber content on flexural-tensile strength

从图8可以看出,水泥稳定碎石混合料的弯拉强度会随着纤维掺量的增加先上升后下降。当改性废塑料纤维的掺量为0.6%时,水泥稳定碎石的弯拉强度相较于没有掺加纤维的水泥稳定碎石有所降低。这是因为纤维含量过高,影响了其分散均匀性。当纤维掺量过高时,纤维之间出现聚集、重叠等情况,影响其分散的均匀性,产生薄弱面,降低了混合料的弯拉强度。当纤维掺量为0.3%时,相比于未掺加改性废塑料纤维的普通水泥稳定碎石,在7、28、90 d试验龄期下,水泥稳定碎石混合料弯拉强度分别提高了16.1%、11.3%、10.6%。

2.2 变形性能试验

2.2.1 干缩试验

干缩性能试验结果如图9所示。

从图9可以看出,相同养护龄期时,当改性废塑料纤维掺量少于0.3%时,水泥稳定碎石材料的干缩系数随着纤维掺入量的增加而降低。但当纤维掺入量继续增加时,试件的干缩系数会上升。特别是当纤维掺量超过0.45%时,试件的干缩系数开始显著增加。这是因为当纤维掺量过高时,纤维会覆盖在集料表面,破坏水泥稳定碎石材料,并占用其结构空间,导致水泥稳定碎石材料在体积收缩应力的作用下收缩变形增大。此外,掺入适量纤维的废纤

维水泥稳定碎石材料与未掺纤维的普通水泥稳定碎石相比,其抵抗干缩的能力会显著提升。对于不同养护龄期下的试件,干缩系数随纤维掺量的变化趋势是大致相同的。在本试验中,纤维质量掺量为0.3%的废纤维水泥稳定碎石具有最小的干缩系数,试验龄期为7 d时,其干缩系数比普通水泥稳定碎石的降低了10.7%。

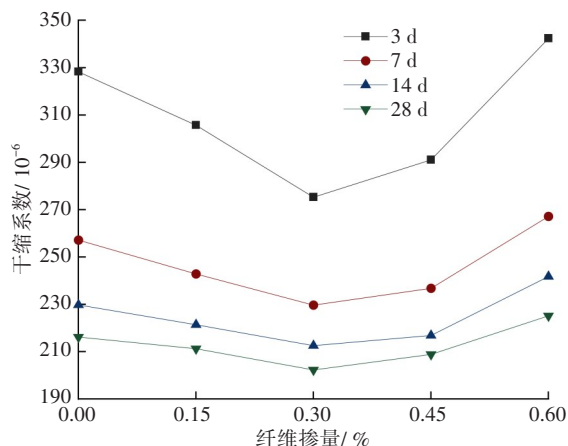


图9 纤维掺量对干缩系数的影响

Fig. 9 Effect of fiber content on drying shrinkage coefficient

2.2.2 温缩试验

温缩性能试验结果如图10所示。

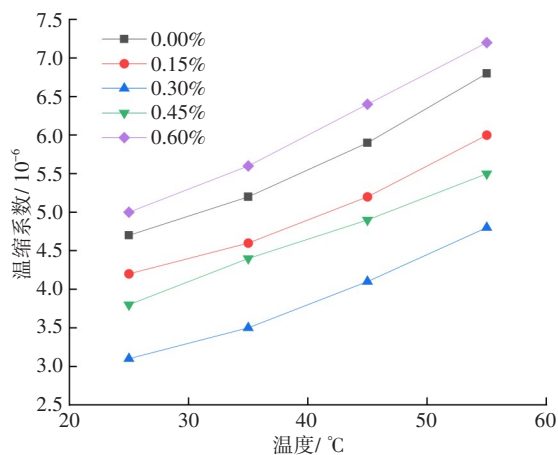


图10 纤维掺量对温缩系数的影响

Fig. 10 Effect of fiber content on temperature shrinkage coefficient

从图10可以看出,掺改性废塑料纤维水泥稳定碎石或普通水泥稳定碎石,在高温段与低温段的温缩系数变化趋势一致。随着试验温度的上升,试件的温缩系数也随之增大。改性废塑料纤维对改善

水泥稳定碎石材料的温缩现象具有积极作用。当试验温度为50~60℃时,相比于普通水泥稳定碎石的温缩系数,掺入0.30%改性废塑料纤维的水泥稳定碎石温缩系数下降了29.4%,而掺入0.45%改性废塑料纤维的水泥稳定碎石温缩系数下降了19.1%。

3 纤维增强机理与应用研究

3.1 机理分析

改性废塑料纤维与其他工业纤维相比,具有更大的直径和良好的强度。当遇到开裂时,能够吸收更多的断裂能。当受拉时,纤维的桥接作用缓和了裂缝尖端应力的集中程度。同时,改性废塑料纤维表面覆盖的轻质碳酸钙微粒,在水解时生成羟基,提高了废塑料纤维的亲水性,使得水泥颗粒更容易在纤维表面水化凝结。纤维与基体之间形成了更加致密的结构,从而产生较大的黏结力和机械啮合力,改善了材料的力学性能。

改性废塑料纤维的密度较低,因此在材料中占据较大的体积含量。如果按0.30%的质量掺量计算,每立方米水泥稳定碎石材料中可掺入7.17 kg的废塑料纤维。在这种掺量下,水泥稳定碎石材料中足有数千万根废塑料纤维。这些纤维在基体中充分发挥了阻裂效应,有效抑制了材料因干缩、外力作用产生的微裂纹的扩展。

3.2 试验路拌和工艺及强度与抗裂性统计

3.2.1 拌和工艺流程

为了改善纤维在混合料中的分散程度,提高纤维水泥稳定碎石材料的力学性能。参考相关文献的研究成果^[28-30],结合本工程纤维的特性和现有技术,制定了如图11所示的工艺流程。

3.2.2 试验路芯样抗压强度

为验证改性废塑料纤维用于水泥稳定碎石基层的可行性,在湖南省怀化至芷江高速公路的罗旧互通A匝道AK0+000~AK0+100段铺设了试验路。该路面结构为:4 cm SMA-13+6 cm AC-20+56 cm 改性废塑料纤维水泥稳定碎石基层。在改性废塑料纤维的掺量为0.3%,水泥剂量在3.5%的基础上,增加0.3%的水泥剂量。通过击实试验,测得改性废塑料纤维水泥稳定碎石的最佳含水量为4.3%,最大干

密度为2.33 g/cm³。

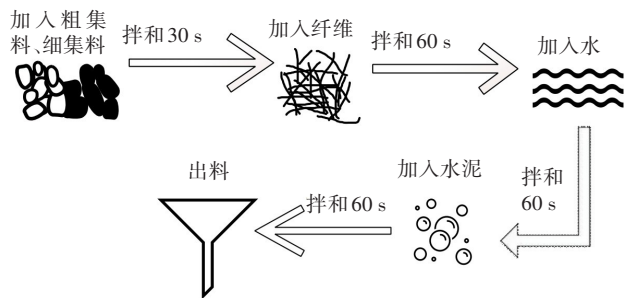


图11 混合料拌和流程示意

Fig. 11 The mixing process of the mixture

试验从试验路段与普通路段的基层中钻取了芯样,其强度测试结果见表5。

表5 基层钻芯取样抗压强度

Table 5 Compressive strength of base layer core samples

| 纤维掺量为0.3% | | 纤维掺量为0.0% | |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 检测桩号 | 抗压强度/MPa | 检测桩号 | 抗压强度/MPa |
| AK0+015 | 5.2 | AK0+215 | 5.0 |
| AK0+022 | 5.0 | AK0+222 | 4.3 |
| AK0+037 | 4.8 | AK0+237 | 4.6 |
| AK0+065 | 4.9 | AK0+265 | 4.1 |
| AK0+074 | 4.7 | 7AK0+274 | 4.7 |
| AK0+086 | 5.1 | AK0+286 | 4.7 |

试验所取芯样的平均强度 \bar{R} 应满足要求:

$$\bar{R} \geq \frac{R_d}{1 - Z_\alpha C_v} \quad (1)$$

式中: R_d 为设计抗压强度,MPa;

C_v 为试验结果的偏差系数(以小数计);

Z_α 为标准正态分布表中随保证率而变的系数,高速公路取1.645。

掺改性纤维路段与普通路段的抗压平均强度分别为4.95、4.57 MPa。由式(1)计算可得容许的平均抗压强度,分别为3.20、3.39 MPa。由此可见,两种路段的强度均满足要求,但掺改性废塑料纤维路段的抗压强度是略弱于普通路段的。

3.2.3 试验路基层裂缝调查

在施工结束后,采用了与普通水泥稳定碎石基层相同的养护方式。养护14 d后,调查试验路的裂缝数量。调查结果见表6。

表6 基层裂缝统计数据表

Table 6 Statistical data table for base layer cracks

| 试验路桩号 | 纤维掺量/% | 裂缝数目/条 | 平均缝距/m | 非贯通裂缝/条 | 贯通裂缝/条 |
|-------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| AK0+000 ~ AK0+100 | 0.3 | 2 | 50.0 | 2 | 0 |
| AK0+200 ~ AK0+300 | 0.0 | 8 | 12.5 | 3 | 5 |

由表6可知,改性废塑料纤维水泥稳定碎石基层的裂缝数量较普通水泥稳定碎石要少,而普通水泥稳定碎石基层则出现了较多的贯通裂缝。这表明改性废塑料纤维对提高稳定碎石材料的抗裂性能具有积极作用。

4 结论

1) 改性废塑料纤维的最佳掺量为0.3%。添加改性废塑料纤维可以提高水泥稳定碎石基层的抗裂性能。

2) 随着纤维掺量的增加,改性废塑料纤维水泥稳定碎石材料的劈裂抗拉强度和弯拉强度呈先增大,后减小的趋势。但废纤维增强水泥稳定碎石混合料的抗压回弹模量随着改性废塑料纤维掺量的增加而降低。

3) 水泥稳定碎石的干缩系数和温缩系数会随着改性废塑料纤维掺量的增加而减小。但纤维含量超过0.30%后,干缩系数和温缩系数均随着纤维掺量的增加而增大。特别是当纤维掺量超过0.45%后,随着掺量的增加,掺改性废塑料纤维水泥稳定碎石材料的干缩系数和温缩系数均大幅度增长。

参考文献(References):

[1] 李彩霞. 聚乙烯醇纤维增强水泥稳定碎石材料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 19-22, 49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.01.004.
LI Caixia. Reinforcing performance of cement-stabilized aggregate mixture by polyvinyl alcohol (PVA) fiber[J].

Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 19-22, 49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.01.004.

[2] 何昌轩. 骨架密实结构水泥稳定碎石性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(4): 6-11. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.04.005.

HE Changxuan. Research on performance test for cement stabilized aggregate composed of skeleton dense structure [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(4): 6-11. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.04.005.

[3] 刘新海, 彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.

LIU Xinhai, PENG Xiaolin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.

[4] ZHAO C H, LIANG N X, ZHU X L, et al. Fiber-reinforced cement-stabilized macadam with various polyvinyl alcohol fiber contents and lengths[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(11): 2-4. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003383.

[5] ZHANG P, LI Q F, WEI H A. Investigation of flexural properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12): 1282-1287. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000137.

[6] LI Q H, LIU L L, LI Y S, et al. Effect of fiber on mechanical properties of cement stabilized macadam mixture [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2044(1): 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/2044/1/012045.

[7] AL-HADITHI A I, NOAMAN A T, MOSLEH W K. Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) [J]. Composite Structures, 2019, 224: 111021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111021.

[8] ZHAO Y, YANG X A, ZHANG Q Y, et al. Crack resistance and mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cement-stabilized macadam base [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-15.

- DOI: 10.1155/2020/6564076.
- [9] ZHANG P, LI Q F. Experimental study on shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29 (12) : 1851-1860. DOI: 10.1177/0731684409337336.
- [10] MOHAMMED A A, RAHIM A A F. Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118350. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118350.
- [11] MEZA A, SIDDIQUE S. Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 286-291. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081.
- [12] PENG Q M, CHEN B W, LU Q, et al. Effect of steel-waste PET hybrid fiber on properties of recycled aggregate concrete based on response surface methodology [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 132448. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132448.
- [13] YUAN L Q, LIANG N X, ZHAO C H. Analysis on influence of the dispersion degree of PVA fibers on pavement performance of cement-stabilized macadam [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1-11. DOI: 10.1155/2019/5127015.
- [14] JAIN A, SIDDIQUE S, GUPTA T, et al. Utilization of shredded waste plastic bags to improve impact and abrasion resistance of concrete [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 22(1): 337-362. DOI: 10.1007/s10668-018-0204-1.
- [15] 李曙龙. 水泥稳定砖砟再生集料路用性能试验研究 [J]. *公路与汽运*, 2021(1): 91-94.
- LI Shulong. Experimental study on road performance of cement stabilized brick concrete recycled aggregate [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2021(1): 91-94.
- [16] RANJAN N, BANERJEE S, NAYAK S, et al. Efficacy of waste plastic towards enhancement of shear and flexure carrying capacity of masonry structures [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132669. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132669.
- [17] MOHAN H T, JAYANARAYANAN K, MINI K M. Recent trends in utilization of plastics waste composites as construction materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121520. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121520.
- [18] AKBAR A, LIEW K M. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123001. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123001.
- [19] ANANDAN S, ALSUBIH M. Mechanical strength characterization of plastic fiber reinforced cement concrete composites [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (2): 852. DOI: 10.3390/app11020852.
- [20] SETIAWAN A A, PHILIP F J, PERMANASARI E. Mechanical properties of waste plastic banner fiber reinforced concrete [J]. *Jurnal Teknologi*, 2018, 80(5): 113. DOI: 10.11113/jt.v80.11365.
- [21] KHALID F S, IRWAN J M, WAN IBRAHIM M H, et al. Performance of plastic wastes in fiber-reinforced concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183: 451-464. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.122.
- [22] MEDDAH M S, BENCHEIKH M. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (10) : 3196-3205. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017.
- [23] KHALID M Y, ARIF Z U, AHMED W, et al. Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, 31: e00382. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00382.
- [24] BAHJI S, OMARY S, FEUGEAS F, et al. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste : a review [J]. *Waste Management*, 2020, 113: 157-175. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [25] FARAJ R H, HAMA ALI H F, SHERWANI A F H, et al. Use of recycled plastic in self-compacting concrete: a comprehensive review on fresh and mechanical properties [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30: 101283. DOI: 10.1016/j.job.2020.101283.
- [26] FOTI D. Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete [M]//*Use of Recycled Plastics in Eco-*

- Engineering (Volume II) Beijing, 2009: 172-176.
- [17] 方根深, 杨咏昕, 葛耀君, 等. 半开口分离双箱梁涡振性能及其气动控制措施研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 74-82. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.009.
- FANG Genshen, YANG Yongxin, GE Yaojun, et al. Vortex-induced vibration performance and aerodynamic countermeasures of semi-open separated twin-box deck [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 74-82. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.009.
- [18] 程怡, 周锐, 杨咏昕, 等. 中央稳定板对分体箱梁桥梁的涡振控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 617-626. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.004.
- CHENG Yi, ZHOU Rui, YANG Yongxin, et al. Vortex-induced vibration control for twin box girder bridges with vertical central stabilizers [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 617-626. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.004.
- [19] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [20] 龙俊贤, 李前名, 任达程, 等. 上跨铁路桥梁主梁涡振性能及抑振措施研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 148-153. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.029.
- LONG Junxian, LI Qianming, REN Dacheng, et al. Study on vortex vibration performance and vibration suppression measures of the main girder uncrossing a railway bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 148-153. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.029.
- [21] 葛耀君, 赵林, 许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 1-18. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.
- GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 1-18. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.
- [22] 胡传新, 赵林, 周志勇, 等. 流线型闭口箱梁抑流板抑制涡振机理研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(1): 1-11. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2020.01.001.
- HU Chuanxin, ZHAO Lin, ZHOU Zhiyong, et al. Suppressing mechanism of spoilers on vortex-induced vibrations around a streamlined closed-box girder based on characteristics of aerodynamics forces and flow field [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(1): 1-11. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2020.01.001.
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 李脉; 英文编辑: 刘至真)

(上接第65页)

- efficient Concrete. Amsterdam: Elsevier, 2019: 387-410. DOI: 10.1016/b978-0-08-102676-2.00018-9.
- [27] MAŁEK M, JACKOWSKI M, ŁASICA W, et al. Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement [J]. Materials, 2020, 13(8): 1827. DOI: 10.3390/ma13081827.
- [28] 韦小碧, 顾佩, 柳志军, 等. 纤维水泥稳定碎石室内拌和工艺试验研究[J]. 公路, 2017, 62(11): 19-24.
- WEI Xiaobi, GU Pei, LIU Zhijun, et al. Experimental study on mixing process of fiber cement stabilized macadam[J]. Highway, 2017, 62(11): 19-24.
- [29] CHAUHAN V, KÄRKI T, VARIS J. Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques [J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2022, 35(8): 1169-1209. DOI: 10.1177/0892705719889095.
- [30] DA SILVA T R, DE AZEVEDO A R G, CECCHIN D, et al. Application of plastic wastes in construction materials: a review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives[J]. Materials, 2021, 14(13): 3549. DOI: 10.3390/ma14133549.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 杜雪明)