

聚丙烯纤维对高寒地区水稳基层冷再生混合料性能的影响

刘纪¹, 黄丽平², 李秀君¹, 邵晗¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 河南交通技师学院, 驻马店 463000)

摘要: 为了改善高寒地区水泥稳定冷再生混合料的抗冻和抗干缩性能, 提高水泥稳定冷再生技术在市政道路中的应用效果。研究了聚丙烯纤维对水泥稳定冷再生混合料的低温抗冻性、抗干缩开裂能力、抗拉和抗压强度性能的影响。聚丙烯纤维在水泥稳定碎石中起到加筋作用, 增强了水泥稳定冷再生混合料的强度、韧性和抗裂性。综合分析得出在标准养护条件下, 振动成型法成型的水泥稳定再生混合料的聚丙烯纤维最佳掺量为 0.9 kg/m^3 , 最佳纤维长度为 12 mm 。结合包头等高寒地区全年的气候情况, 设计了具有代表性的不同养护条件, 研究高寒地区环境对聚丙烯纤维水泥稳定冷再生混合料性能的影响。聚丙烯纤维水泥稳定冷再生混合料在恶劣养护条件下仍能保持较高的力学性能, 在确保混合料抗压强度、抗拉强度、抗冻性满足规范要求的情况下, 聚丙烯纤维的加入可以减少 0.5% 的水泥用量。聚丙烯纤维水泥稳定冷再生混合料有效地解决了高寒地区低温、低湿度和昼夜温差大导致水泥稳定冷再生基层易发生的强度不足和开裂等病害, 延长了冬季可施工时间。

关键词: 路面工程; 水泥稳定冷再生技术; 高寒地区; 聚丙烯纤维

中图分类号: U 419.92 文献标志码: A

Effect of polypropylene fiber on properties of cold recycled mixture of water stabilized base course in alpine region

LIU Ji¹, HUANG Liping², LI Xiujun¹, SHAO Han¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Henan Institute of Traffic Technicians, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to improve the frost resistance and dry shrinkage resistance of cement stabilized cold recycling mixture in alpine region, and improve the application of cement stable cold recycling technology in municipal roads, the low temperature frost resistance, dry shrinkage cracking resistance, tensile and compressive strength properties of polypropylene fiber for cement stabilized cold recycled mixture were studied. It is concluded that polypropylene fiber plays a reinforcing role in cement stabilized macadam. This improves the strength, toughness and crack resistance of the cement stabilized concrete matrix. Comprehensive analysis shows that under the standard curing conditions, the optimal content of polypropylene fiber in cement stabilized recycled mixture formed by vibration molding method is 0.9 kg/m^3 , and the optimal fiber length is 12 mm . Combined with the annual climate of

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 住房城乡建设部 2018 年科学技术项目计划 (2018-K9-062)

第一作者: 刘纪 (1977-), 男, 硕士研究生。研究方向: 道路材料。E-mail: 240919618@qq.com

Baotou and other alpine regions, the representative different curing conditions were designed to study the influence of high cold area on the performance of polypropylene fiber cement stabilized cold recycled mixture. It is concluded that the addition of polypropylene fiber can reduce 0.5% of the cement consumption and the polypropylene fiber cement can stabilize the cold recycling performance when the compressive strength, tensile strength and frost resistance of the mixture are ensured. The problems of insufficient strength and cracking of cement stabilized cold recycled base which are resulted from low temperature, low humidity and large temperature difference between day and night in high and cold regions are solved. The construction time in winter is prolonged.

Keywords: *pavement engineering; cement stabilized cold recycling technology; alpine region; polypropylene fiber*

水泥稳定就地冷再生基层技术具有投入低、消耗低、效率高、质量高及节能降耗等优点, 是一种就地对旧沥青路面结合新集料修复、整合、翻新的新型施工工艺^[1]。

高纬度寒冷地区具有冬季时间长、气温低及湿度低等气候特点^[2], 在持续低温、冻融循环和低湿度的作用下, 水泥稳定冷再生基层易出现干缩裂缝、冻融破坏、强度下降及承载力降低等现象, 最终导致再生路面出现各类早期病害^[3-4]。针对低温、低湿度养护条件下水泥稳定冷再生类材料性能的研究较少。

目前添加外掺剂是提高水稳材料性能的有效方法, 主要包括粉状类和纤维类外掺剂。常见的粉状类外掺剂有橡胶粉、可再分散乳胶粉、羟丙基甲基纤维素醚等^[5-7], 虽然粉状类外掺剂可有效改善水稳材料的抗干缩性能, 但均会因降低混合料的密度而削弱其强度^[8]。传统的纤维类外掺剂如石棉、纤维等, 因其添加方便、质地轻巧等优点被广泛用于增强水稳材料性能, 但石棉对环境和人体健康存在一定危害。近些年, 高强高模、耐高温、耐腐蚀的有机聚合物纤维如聚乙烯醇纤维 (polyvinyl alcohol, 简称为 PVA)、聚丙烯纤维 (polypropylene, 简称为 PP) 等被逐步用于增强水泥混凝土的强度和抗裂性能^[9-11]。彭兴国等^[12]研究了水泥掺量和 PVA 纤维掺量对水泥稳定碎石力学性能和抗裂性能的影响。Fonseca 等^[13]评估了黄麻纤维和微/纳米纤维 (亚微米元素) 在挤压纤维-水泥复合材料中的增强性能。Dos Santos 等^[14]提出利用碳酸水加速碳酸化来修改胶凝基质的微观结构, 并得出碳酸水可改善纤维-水泥复合材料的水化性能, 还可用于纤维-水泥复合材料中。徐建成^[15]分析了扬州市政道路中掺入聚丙烯纤维水泥稳定

碎石材料的应用情况, 研究结果证实了该方法具有很大的实际工程意义。白云^[16]考虑到水泥稳定碎石材料易产生裂缝病害等问题, 通过在水泥稳定碎石中掺纤维的方式改善水泥稳定碎石的路用性能, 改善其抗裂性。张虹^[17]以不同纤维长度和掺量进行掺加聚丙烯纤维的水泥稳定碎石正交试验测试了水泥稳定碎石的基本力学性能, 这表明掺加聚丙烯纤维水泥稳定碎石具有较好的柔性和良好的抗收缩能力, 其应用前景良好。陈玉宏等^[18]为了改善再生基层材料路用性能, 选取不同水镁石纤维, 评价其对再生基层材料的路用性能影响, 结果显示水镁石纤维可以显著提高路用性能, 降低收缩效应。综上可以看出, 对于纤维类外掺剂的研究主要集中在纤维增强理论、纤维对水泥稳定碎石或水泥混凝土强度及抗裂性的改善研究方面, 而针对水泥稳定冷再生混合料的研究较少。

为了改善高寒地区水泥稳定冷再生混合料性能抗冻、抗干缩性能、早期强度不足, 以及高寒地区气候恶劣所导致的冬季可施工时间短、工期长等问题。本文研究聚丙烯纤维水泥稳定冷再生混合料性能, 确保在恶劣环境下仍能满足规范要求, 从而延长冬季可施工时间, 缩短工期, 为聚丙烯纤维在高寒地区市政道路水泥稳定冷再生工程中的应用提供经验。

1 试验材料

1.1 矿料级配

矿料级配决定水泥稳定冷再生混合料内部骨架颗粒结构的类型和强度, 对混合料的力学性能起重要作用。现场采集的铣刨料级配不满足规范要求, 因此, 通过试配使其满足规范要求。最终

按 19.5~31.5 mm(粒径)碎石 : 4.75~19.5 cm(粒径)碎石 : 0~4.75 mm(粒径)石屑 : 铣刨料的质量比为 15% : 15% : 2% : 68% 确定冷再生混合料的矿料级配, 再生集料的级配如表 1 所示。

表 1 再生混合料的合成级配
Tab.1 Composite gradation of recycled mixture

筛孔尺寸/mm	通过率/%	级配上限	级配下限
31.50	100.0	100	100
26.50	95.1	100	90
19.00	79.2	87	73
9.50	48.8	66	47
4.75	36.5	50	30
2.36	29.8	36	19
0.60	16.7	19	8
0.075	2.8	7	2

1.2 水泥

选择标号为 P·O42.5 的普通硅酸盐水泥作为原材料, 根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420-2020)^[19] 的要求, 对该水泥的相关技术指标进行了检验, 测定的结果如表 2 所示。

表 2 水泥主要性能指标
Tab.2 Main performance indexes of cement

检测项目	单位	检测值	技术要求	评定	试验方法
细度	<80 μm	%	3.6	≤10	合格 T0502
	比表面积	m ² /kg	440	≥300	合格 T0504
凝结时间	初凝	min	236	≥180	合格 T0505
	终凝	min	370	<600	合格 T0505
安定性	雷氏夹法	mm	1.1	≤5	合格 T0505
抗压强度	3 d	MPa	24.5	≥17.0	合格 T0506
	28 d	MPa	45.3	≥42.5	合格 T0506

1.3 聚丙烯纤维

选用河北石家庄某厂生产的聚丙烯单丝纤维, 其外观为白色单丝状, 如图 1 所示。聚丙烯单丝纤维的性能参数如表 3 所示。



图 1 聚丙烯纤维

Fig. 1 Polypropylene fiber

2 聚丙烯纤维对混合料性能的影响

2.1 试验方案设计

现研究聚丙烯纤维掺量对水泥稳定类混合料性能的影响, 聚丙烯纤维掺量(纤维质量/混合料体积)分别为 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 0 kg/m³, 聚丙烯长度分别为 6, 9, 12, 15, 18 mm。研究水泥稳定冷再生混合料的低温抗冻性、抗干缩开裂能力、抗拉强度、抗压强度。参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)^[20] 要求, 采用振动成型法成型制作 Φ150 mm×150 mm 水泥稳定冷再生混合料圆柱体试件并标准养生 7 d(温度(20±2)℃, 湿度≥95%)来表征混合料抗压性能; 制作 Φ150 mm×150 mm 水泥稳定冷再生混合料圆柱体试件并标准养生 28 d, 检测试件劈裂强度用以表征混合料抗拉性能; 采用振动成型法制作 Φ150 mm×150 mm 水泥稳定冷再生混合料圆柱体试件并标准养生 28 d 进行冻融循环, 检测试件 28 d 冻融前、后无侧限抗压强度, 选用冻融循环后试件抗压强度残余比(BDR)表征混合料的抗冻性能; 采用振动成型法制作 100 mm×100 mm×400 mm 水泥稳定冷再生混合料梁式试件并标准养生 28 d, 检测试件干缩系数用以表征混合料的抗干缩开裂性能。综合分析各项指标, 得出纤维的最佳掺配方式。

2.2 试验结果及分析

a. 无侧限抗压强度(抗压性能)。

表 3 聚丙烯单丝纤维主要技术指标

Tab.3 Main technical indexes of polypropylene monofilament fiber

密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	熔点/℃	燃点/℃	直径/μm	热膨胀系数×10 ⁻⁷ /℃	酸溶解性	碱溶解性
0.91	>458	>3.5	165~175	590	18~48	5.8~10.2	<28	<28

图2为不同纤维长度和掺量下混合料无侧限抗压强度的试验结果,由图2可知,掺加聚丙烯纤维后,混合料无侧限抗压强度有不同程度的提高,均高于规范的要求,长度为12 mm、掺量为 1.5 kg/m^3 时,无侧限抗压强度最大,比未掺加纤维时提高了23.6%。对于相同的纤维长度,聚丙烯纤维掺量低于 0.9 kg/m^3 时,随着掺量的增加,混合料抗压性能均有明显提高;聚丙烯纤维掺量高于 0.9 kg/m^3 时,混合料抗压性能逐渐趋于平稳。对于同一纤维掺量,随着聚丙烯纤维长度的增大,混合料抗压性能均呈现先增大后减小,当纤维长度为12 mm时出现最大值。

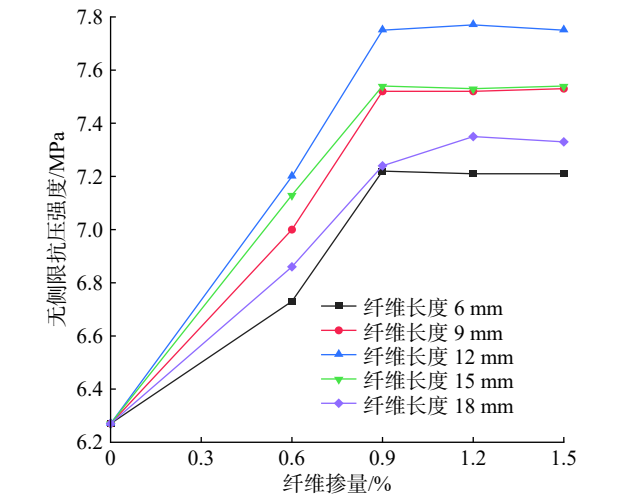


图2 不同掺加方式下无侧限抗压强度

Fig.2 Unconfined compressive strength under different mixing methods

纤维长度为12 mm时,随着掺量的增加,无侧限抗压强度逐渐上升,在掺量大于 0.9 kg/m^3 时逐渐趋于平稳。为了探究原因,通过扫描电子显微镜对纤维长度12 mm时不同掺量的聚丙烯纤维混合料的微观形貌进行观察。可以看出,在混合料中掺入聚丙烯纤维后,增加了混合料中各组成材料的粘结性能,从而提高了无侧限抗压强度。由图3可知,掺量过高时束状纤维的均匀性和分散性差,从而影响了抗压强度的提高。当纤维长度较短时,由于与基体的粘结长度较短,握裹力较小,纤维易被拔出;随着纤维长度逐渐增大,纤维与基体的粘结面增多,握裹力也随之增强;但当纤维长度过长时,握裹力大于纤维极限拉应力,混合料的破坏模式由纤维被拔出变成纤维被拉断,混合料强度取决于纤维极限拉应力,与握裹面积的相关性小,且当纤维长度过长时,束状

单丝纤维会形成团状结构,不能很好地在混合料内发挥联结作用,影响了混合料的强度^[21]。

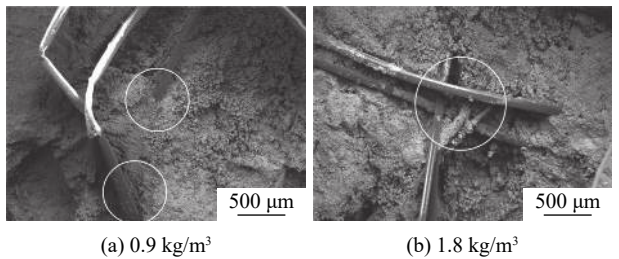


图3 不同掺量聚丙烯纤维混合料微观图

Fig.3 Microstructure of polypropylene fiber mixture with different contents

b. 劈裂强度(抗拉性能)。

由图4可知,掺加聚丙烯纤维后,混合料劈裂强度均有不同程度的提高,长度为12 mm、掺量为 0.9 kg/m^3 时,劈裂强度最大,比未掺加纤维时提高了33.8%。对于相同的纤维长度,随着纤维掺量的增大,混合料劈裂强度先大幅度增大后减小;除了18 mm的纤维外,当纤维掺量为 0.9 kg/m^3 时,劈裂强度出现最大值。而18 mm的纤维,劈裂强度最大值出现在了更高的掺量,即 1.2 kg/m^3 时。对于同一纤维掺量,当掺量小于 0.9 kg/m^3 时,混合料劈裂强度随着纤维长度的增大,先增大后减小,在纤维长度为12 mm时出现最大值;当掺量大于 0.9 kg/m^3 时,劈裂强度随着纤维长度的增大,先增大后减小之后有少许回升,最大值仍然出现在纤维长度为12 mm时。因为,聚丙烯纤维在混合料内部形成了一种乱向支撑体系^[22],在一定程度上遏制了混合料裂缝的产生和发展,有效地降低了裂缝处的应力集中程度,从而提高了混合料的劈裂强度。

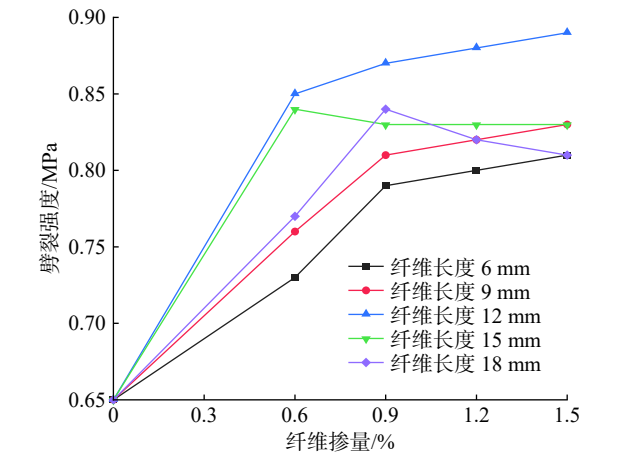


图4 不同掺加方式下劈裂强度

Fig.4 Splitting strength under different mixing methods

c. 抗冻性能。

选用冻融循环后试件抗压强度残余比 BDR 表征混合料的抗冻性能，试验结果如图 5 所示。掺加聚丙烯纤维后，混合料的 BDR 有不同程度的提高，长度为 12 mm、掺量为 0.9 kg/m³ 时，出现最大值，比未掺加纤维时提高了 7.76%。对于相同的纤维长度，随着掺量的增加，混合料抗冻性能增大后趋于平缓。对于同一纤维掺量，随着聚丙烯纤维长度的增大，抗冻性能先增大后趋于平缓，在纤维长度为 12 mm 时出现最大值。说明聚丙烯纤维的加入可以堵住混合料的连接间隙，起到加筋作用，且随着纤维长度的增加，聚丙烯纤维与混合料粘结面积增大，粘结强度得到增强，减少了冻融循环作用造成的破坏。

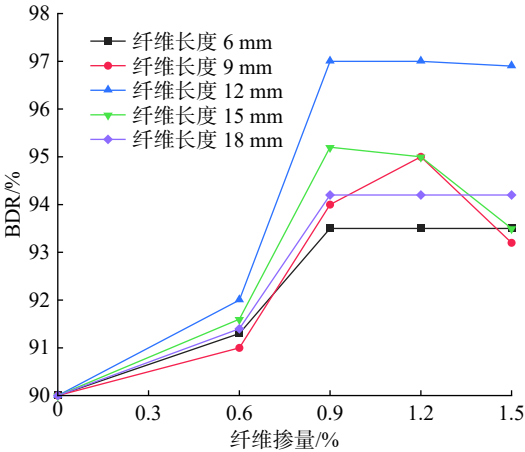


图 5 不同掺加方式下冻融强度残余比 BDR
Fig.5 Freeze thaw strength residual ratio BDR under different mixing methods

d. 抗干缩性能。

选用干缩系数表征混合料的抗干缩开裂性能，试验结果如图 6 所示。掺加聚丙烯纤维后，混合料抗干缩能力有不同程度的提高，长度为 12 mm、掺量为 1.5 kg/m³ 时，抗干缩性能最强，比未掺加纤维时提高了 7.69%。相同的纤维长度时，随着掺量的增加，混合料抗干缩性能明显提高；相同纤维掺量时，随着聚丙烯纤维长度的增加，抗干缩能力都呈现先增大后略有减小，在纤维长度为 12 mm 时出现最大值。加入聚丙烯纤维后，纤维与混料之间的粘结力抑制了干燥收缩，降低了干燥收缩系数。随着纤维含量的增加，混合料中分布的纤维数量增加，纤维间距减小，聚丙烯纤维对混合料和粘合剂的结合力会逐渐增强。因此，随着聚丙烯纤维含量的增加，混料的抗收缩能力逐渐增强。

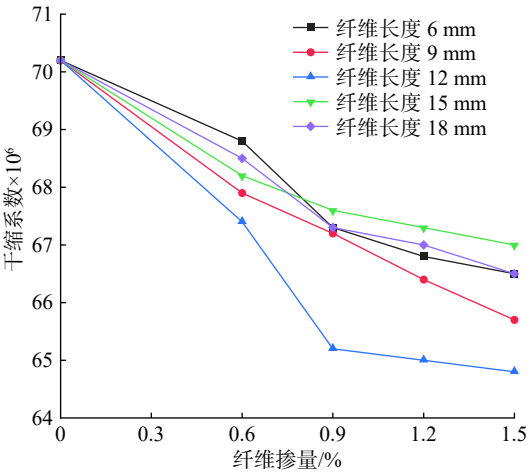


图 6 不同掺加方式下干缩系数
Fig. 6 Drying shrinkage coefficient under different mixing methods

综合分析得出，掺加聚丙烯纤维后，在标准养护条件下振动成型法成型的水泥稳定再生混合料的无侧限抗压强度均有不同程度的提高，高于规范要求 3~5 MPa，且长度为 12 mm、掺量为 1.5 kg/m³ 时，无侧限抗压强度最大，比未掺加纤维时提高了 23.6%。劈裂强度具有不同程度的提高，长度为 12 mm、掺量为 0.9 kg/m³ 时，劈裂强度最大，比未掺加纤维时提高了 33.8%。BDR 也随着纤维的加入有相应的提高，长度为 12 mm、掺量为 0.9 kg/m³ 时，出现最大值，比未掺加纤维时提高了 7.76%。抗干缩能力也有不同程度的提高，长度为 12 mm、掺量为 1.5 kg/m³ 时，抗干缩性能最大，比未掺加纤维时提高了 7.69%。综合经济性考虑，尽管在掺量为 1.5 kg/m³ 时，无侧限抗压强度和抗干缩性能表现最优，但在 0.9 kg/m³ 时干缩系数、无侧限抗压强度与 1.5 kg/m³ 相差不大，且抗拉与抗冻性能更优。因此，综合经济性考虑得出在标准养护条件下，振动成型法成型的水泥稳定再生混合料聚丙烯纤维最佳掺配方式：聚丙烯纤维长度为 12 mm、掺量为 0.9 kg/m³。

3 水泥用量对聚丙烯纤维水稳再生料性能影响

3.1 试验方案设计

研究得出添加聚丙烯纤维可以有效地提高强度、抗冻性、抗干缩性能，为了进一步研究其对于高寒地区气候条件的适应性，考虑更为苛刻的环境对其性能的影响。选用聚丙烯纤维最优掺配

方式来进行试验方案设计。通过了解包头全年气温变化,拟定3种混合料养护条件来表示恶劣环境、中等环境和良好环境:①号环境:温度5℃,湿度55%;②号环境:温度15℃,湿度75%;③号环境:温度20℃,湿度95%,并结合水泥稳定冷再生混合料在包头等高寒地区生产的特点,采用水泥用量分别为4%,4.5%,5%的3组水泥用量的试验设计,研究水泥稳定冷再生混合料低温抗冻性、抗干缩开裂能力、抗拉强度和抗压强度(选用与前文相同的各种试验方法表征各项指标)。

3.2 试验结果及分析

a. 无侧限抗压强度(抗压性能)。
通过不同养护环境下混合料的无侧限抗压强度来考虑更恶劣环境对混合料性能的影响。试验结果如图7所示。在②号、③号养护环境下未掺加纤维混合料的无侧限抗压强度曲线与①号、②号养护环境下掺加纤维混合料的无侧限抗压强度曲线基本重合,表明纤维的加入使水泥稳定冷再生混合料可以在恶劣环境、中等环境下达到中等环境、良好环境下水泥稳定冷再生混合料的无侧限抗压强度。

同时由图7可知,与未掺加纤维相比,加入纤维的水泥稳定冷再生混合料的无侧限抗压强度有较大提升。在确保混合料无侧限抗压强度条件下,水泥稳定冷再生混合料加入纤维可减少0.5%的水泥用量。

b. 劈裂强度(抗拉性能)。
不同水泥掺量及不同养护环境下,劈裂强度试验结果如图8所示。掺加纤维的水泥稳定冷再

生混合料的间接抗拉性能远优于未掺加纤维的水泥稳定冷再生混合料,随着水泥用量的增大,掺加纤维的水泥稳定冷再生混合料的间接抗拉性能提升显著。

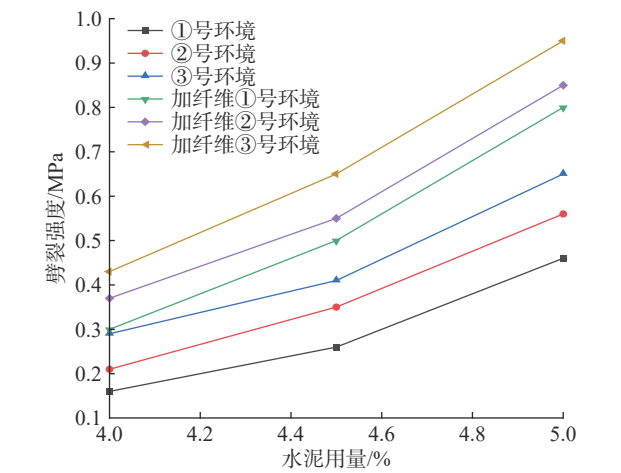


图8 不同水泥用量下劈裂强度
Fig.8 Splitting strength under different cement dosage

当水泥用量不变时,掺加纤维的混合料较未掺加纤维的混合料的劈裂强度提升幅度为34.2%~94.1%,表明纤维的加筋作用在混合料间接抗拉性能中发挥重要作用,从抗拉性能角度看,纤维的添加可以减少1%的水泥用量。

c. 抗冻性能。
冻融强度残余比表征水泥掺量和养护条件对混合料抗冻性能影响,由图9可知,随着水泥用量的增加,水泥稳定冷再生基层的抗冻融性能逐渐增强。当水泥用量不变时,水泥稳定冷再生基层的抗冻融性能随着养护环境的优化有明显提高。环境的优化,促进了水泥稳定再生基层材料中C-S-H凝胶、C-A-H结晶的形成^[23],使水泥稳定再生基层材料的强度提升。

在相同养护环境下,纤维的加入可有效地提高水泥基材料的粘结性能,提升水泥基材料的抗冻融性能。同时可以发现,在保证混合料强度不削弱的情况下,加入纤维可以有效地减少水泥的用量。

d. 抗干缩性能。
在不同水泥掺量及不同养护环境下,试件的干缩系数如图10所示。在相同环境下,掺加纤维的水泥稳定冷再生混合料的干缩系数相较于未掺加纤维的水泥稳定冷再生混合料的干缩系数低 5×10^{-6} 。在水泥用量不变的情况下,随着环境的恶化,混合料的干缩系数升高。因为,环境的恶

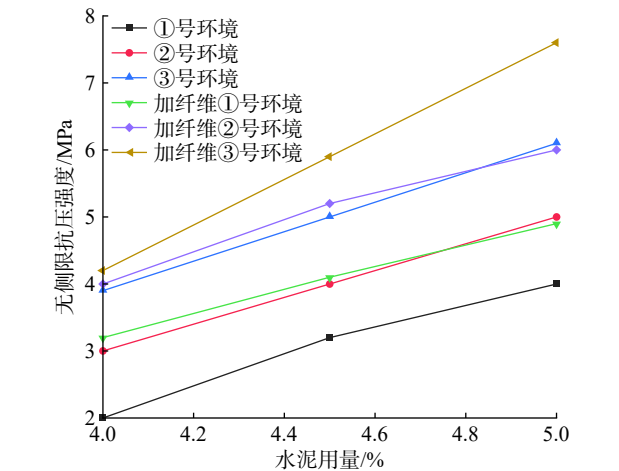


图7 不同水泥用量下无侧限抗压强度
Fig.7 Unconfined compressive strength under different cement dosage

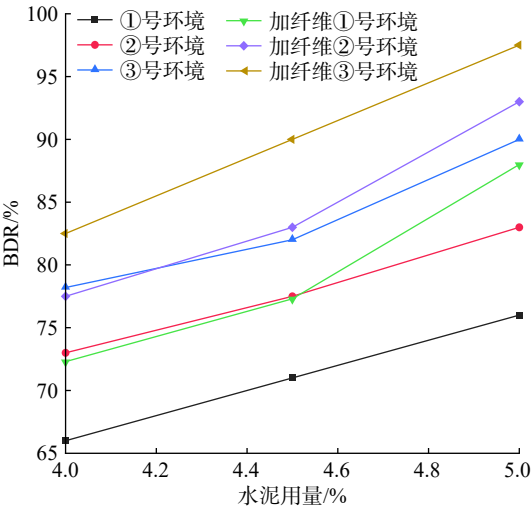


图9 不同水泥用量下冻融强度残余比 BDR

Fig.9 Freeze thaw strength residual ratio BDR under different cement dosage

化, 混合料内部失水加剧, 产生毛细管张力、自由水、分子间力以及碳化脱水作用, 导致严重的干缩效应^[18]。

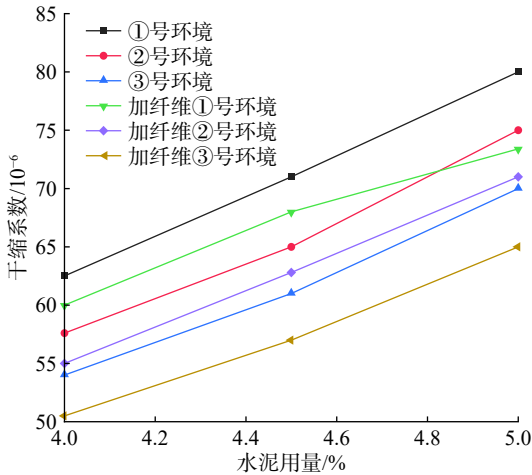


图10 不同水泥用量下干缩系数

Fig.10 Drying shrinkage coefficient under different cement dosage

对比不同水泥掺量下掺加纤维与未掺加纤维的干缩系数, 得出在混合料强度满足要求的情况下, 纤维的添加可以减少约 0.6% 的水泥用量, 且大幅度降低了混合料的干缩系数。因此, 聚丙烯纤维的掺入, 在一定程度上可以有效地提高混合料抗干缩性能, 同时可减少水泥用量, 降低了高寒地区水泥稳定冷再生基层产生干缩裂缝的可能性。

综合分析可知, 水泥用量的增加, 可以提升混合料的抗压、抗拉和抗冻性能, 但会降低抗干缩性能; 在相同的水泥用量情况下, 养护环境的

提升可以提升混合料的抗压、抗拉、抗冻和抗干缩性能。对比①号养护环境下掺加纤维与未掺加纤维的各项性能指标可知, 纤维的加入, 增强了低温、低湿度条件下混合料的抗压、抗拉、抗冻和抗干缩性能。同时考虑经济效益, 纤维的加入可同比减少 0.5% 的水泥用量, 从而达到相近力学性能和工程性质, 且聚丙烯纤维的加入使得水泥稳定冷再生混合料在恶劣养护条件下达到较高性能, 从而增强了水泥稳定冷再生混合料对恶劣养护环境的适应性, 实现了低温、低湿度的可养护, 大幅度提高了冬季的可施工时间。有效地解决了高寒地区低温、低湿度和昼夜温差大导致施工条件差以及水泥稳定冷再生基层的强度不足和开裂等病害, 有效地提高了水泥稳定就地冷再生技术在高寒地区市政道路中的应用效果。

4 结 论

a. 聚丙烯纤维可有效提升混合料的无侧限抗压强度、劈裂强度、BDR 强度和抗干缩能力。在标准养护条件下, 振动成型法成型的水泥稳定再生混合料聚丙烯纤维的最佳掺配方式为: 聚丙烯纤维长度为 12 mm、掺量为 0.9 kg/m³。

b. 聚丙烯纤维在水泥稳定冷再生混合料中起到加筋作用, 极大地改善了低温、低湿度养护条件下水泥稳定再生混合料的强度、劈裂、抗干温缩性能和抗冻融性能, 有效地提高了聚丙烯纤维水泥稳定冷再生技术在高寒地区市政道路中的应用效果。

c. 在确定的最优纤维掺加方式下, 确保混合料抗压强度、抗拉强度、抗冻性满足相应要求, 聚丙烯纤维的加入可以同比减少 0.5% 的水泥用量, 使抗干缩性能大幅提高, 工程经济效益大幅度提高。

d. 在确定的最优纤维掺加方式下, 加入聚丙烯纤维, 可有效地解决高寒地区养护条件难以满足的情况, 降低了养护温度及养护湿度, 实现了低温、低湿度的可养护, 大幅度提高了冬季的可施工时间, 有效地提高了水泥稳定就地冷再生技术在高寒地区市政道路中的应用效果。

参考文献:

[1] 王周凯. 公路路面水泥稳定就地冷再生关键技术与工程应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
[2] 谢卓然. 高寒地区沥青混凝土路面裂缝病害防治研

- 究[J]. [内蒙古公路与运输](#), 2006(3): 12–14.
- [3] 陶志刚. 高寒地区沥青路面病害模式及处治对策研究[J]. [内蒙古公路与运输](#), 2014(4): 64–66.
- [4] 屈春杰. 高寒地区沥青路面病害调查分析与养护决策[J]. [青海交通科技](#), 2016(1): 63–67.
- [5] 高种晟, 诸剑峰, 方磊, 等. HPMC 对水泥稳定全深式冷再生材料的性能影响研究[J]. [上海理工大学学报](#), 2019, 41(3): 300–306.
- [6] 付廷波. 乳胶粉对水泥砂浆性能影响的研究[J]. [铁道建筑技术](#), 2019(12): 17–20.
- [7] 何智海, 李增, 詹培敏, 等. 橡胶粉对水泥基材料性能影响的研究进展[J]. [混凝土](#), 2020(6): 73–78.
- [8] 盛燕萍, 贾海川, 孙仕伟, 等. 不同温度下早强低收缩水泥稳定碎石特性的试验研究[J]. [硅酸盐通报](#), 2019, 38(10): 3215–3220, 3228.
- [9] 童攀. PVA 纤维水泥稳定碎石基层材料及结构性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [10] 吴建华, 马石城, 唐昭青, 等. 聚丙烯纤维再生混凝土力学性能影响因素的试验研究[J]. [公路工程](#), 2007, 32(4): 110–112, 117.
- [11] 陆鹏. 水泥稳定碎石半刚性基层再生应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [12] 彭兴国, 陈辉强, 兰滔, 等. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石的抗裂性和抗冲刷性能[J]. [土木工程](#), 2019, 8(8): 1284–1292.
- [13] FONSECA C S, SILVA M F, MENDES R F, et al. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites[J]. [Construction and Building Materials](#), 2019, 211: 517–527.
- [14] DOS SANTOS V, TONOLI G H D, MÁRMOL G, et al. Fiber-cement composites hydrated with carbonated water: Effect on physical-mechanical properties[J]. [Cement and Concrete Research](#), 2019, 124: 105812.
- [15] 徐建成. 掺聚丙烯纤维的水泥稳定碎石在市政道路中的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [16] 白云. 玻璃纤维水泥稳定碎石路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [17] 张虹. 聚丙烯纤维在水稳碎石基层中的应用[J]. [交通科学与工程](#), 2019, 35(1): 20–24.
- [18] 陈玉宏, 马乙一, 霍斌, 等. 水镁石纤维对再生基层材料路用性能的影响[J]. [公路](#), 2020, 65(3): 53–59.
- [19] 交通部科学研究院. JTG 3420-2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [20] 交通部科学研究院. JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [21] 董浩林. 混杂纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [22] 王海龙, 罗月静, 彭光宇, 等. 掺合料对纤维增强水泥基材料拉伸性能的影响[J]. [西南交通大学学报](#), 2017, 52(1): 61–68.
- [23] 闫亚鹏. 寒冷地区水泥稳定碎石基层抗裂性改善技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

(编辑: 石 瑛)