

纤维掺量对水稳碎石力学性能影响分析

纪续¹, 何同明², 周浩³, 任瑞波³, 邢又家², 王振³

(1. 济南城市建设集团投资有限公司, 山东 济南 250101; 2. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101;

3. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 水泥稳定碎石是我国路面基层的主要材料类型, 其性能对道路服务能力有直接影响。以自主研发高韧纤维为核心, 研究纤维水稳碎石抗折、干燥收缩、变形能力和综合性能的变化规律, 以及纤维掺量的影响。结果表明: 掺入纤维可以提高水稳碎石抗折强度, 但不同掺量时, 抗折强度差距不大, 1‰掺量时弯拉强度最大, 较普通水稳碎石提高 8.29%; 掺入纤维可以降低水稳碎石干缩系数, 干缩系数随纤维掺量的增加先降后升, 1‰时改善最优; 掺入纤维可以显著提高水稳碎石峰值应变, 且峰值应变随纤维掺量的提高呈现单调增长态势; 从综合性能角度看, 1‰为最佳纤维掺量, 综合性能指数提升 56.6%。

关键词: 纤维; 水稳碎石; 弯拉强度; 干缩系数; 综合力学性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0267-04

Analysis on Impact of Fiber Content on Mechanical Property of Cement-Stabilized Macadam

Ji Xu¹, He Tongming², Zhou Hao³, Ren Ruibo³, Xing Youjia², Wang Zhen³

(1. Jinan Urban Construction Group Investment Co., Ltd., Jinan 250101, China; 2. Jinan Jinri Highway Engineering Co., Ltd. Jinan

250101, China; 3. School of Traffic Engineering, Shandong University of Architecture, Jinan 250101, China)

Abstract: Cement-stabilized macadam is the main material type of pavement base courses in China, and its property has a direct impact on road serviceability. Focusing on self-developed high-toughness fibers, the variation laws of flexural strength, drying shrinkage, deformation capacity and comprehensive performance of fiber cement-stabilized macadam, as well as the influence of fiber cement are studied. The result shows that the addition of fibers can enhance the flexural strength of cement-stabilized macadam, but the difference in flexural strength is not significant when the content varies. When the content is 1‰, the flexural tensile strength is the highest, which is 8.29% higher than that of ordinary cement-stabilized macadam. The addition of fibers can reduce the drying shrinkage coefficient of cement-stabilized macadam. The drying shrinkage coefficient first decreases and then increases with the increase in fiber content. The best improvement is achieved at 1‰. The addition of fiber content can significantly increase the peak strain of cement-stabilized macadam, and the peak strain shows a monotonically increasing trend with the increase of fiber content. From the perspective of comprehensive performance, 1‰ is the optimal fiber content, and the comprehensive performance index increases by 56.6%.

Keywords: fiber; cement-stabilized macadam; flexural tensile strength; drying shrinkage coefficient; comprehensive mechanical properties

0 引言

半刚性材料是我国路面基层或底基层的主要材料类型, 具有成本较低、承载能力强等优点。但水泥稳定碎石易在荷载和环境作用下出现收缩裂缝^[1-2]

等问题。基层开裂后会在行车荷载的作用下向上扩展到路面面层, 形成反射裂缝。反射裂缝是我国沥青路面裂缝的主要成因^[3-5], 不仅直接影响道路美感和行驶舒适性, 还会导致水分渗入道路结构, 进而导致其他严重病害。

为了改善水泥稳定碎石的力学和路用性能, 国内外学者提出了多种方法。在水泥稳定类材料中掺入纤维^[6-7]可有效提高其强度, 并抑制基层开裂^[8-9]问题。纤维作为一种抗拉性能良好的材料, 可以形成三维网络结构, 强化水泥稳定碎石基层内部集料颗

收稿日期: 2025-01-22

作者简介: 纪续(1976—), 男, 硕士, 工程应用技术研究员, 从事交通工程研究工作。

通信作者: 周浩(1983—), 男, 博士, 讲师, 从事路面工程研究工作。电子邮箱: 523475585@qq.com

粒之间的联系,使其形成一个内聚力更强的整体结构^[10]。当基层结构在发生收缩或者受到行车荷载作用产生拉应力时,水稳碎石内部的纤维能够分担基层内部的拉应力;由于其高聚物纤维抗拉强度和变形能力优良,可以提高混合料整体的力学强度和变形能力。国内外学者对纤维强化水泥稳定类材料的研究^[11-13]表明,纤维可以提高水泥基材料力学强度和韧性。杨红辉等^[14]研究纤维对水泥稳定碎石力学性能的影响,发现纤维的掺加不仅可以提高水泥稳定碎石基层的抗压强度,还可以增加其抗弯拉强度,减小其抗弯拉模量,实现基层抗裂性能和整体性能的提升。王文彬^[15]的研究表明,掺加纤维能显著提高水泥稳定级配碎石混合料的无侧限抗压强度、劈裂强度与弯拉强度。刘纪等^[16]研究了聚丙烯纤维在高寒地区的应用,发现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。何小兵等^[17]用 MTS 系统研究了水稳碎石的抗冲刷性能,发现掺入适量的纤维可以将水稳碎石的抗冲刷能力提高 30% 以上。付春梅等^[18]研究纤维掺量对水稳碎石力学性能的影响,结果表明聚酯纤维与聚丙烯纤维均可显著提高水泥稳定碎石的无侧限抗压强度与劈裂强度,同时有效降低抗压回弹模量,并确定聚酯纤维的最佳掺量约为 0.07%,聚丙烯纤维则在 0.05%。在相同龄期且纤维掺量一致条件下,聚酯纤维增强的水泥稳定碎石强度表现更优,抗压回弹模量更低,并推导出聚酯纤维、聚丙烯纤维掺量与水泥稳定碎石各项力学性能指标间的回归关系式。这些研究较为系统和深入地研究了纤维水稳碎石的性能规律及纤维掺量的影响,但对纤维水稳碎石的变形能力及其对混合料的综合性能影响的研究不够系统。

本文基于自主研发的高韧纤维,对纤维掺量对水稳碎石的抗折强度、干燥收缩性能、变形能力及综合性能的影响进行了系统研究。

1 原材料与实验方法

1.1 原材料与技术指标

本试验使用的水泥为济南山水东岳水泥厂生产的标号为 42.5 的矿渣硅酸盐水泥,其基本技术指标满足要求。所用集料为石灰岩,参照《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)推荐的级配范围 C-B-3。本试验使用的纤维为自主开发的韧性纤维,具体指标见表 1。纤维掺量分别为 0‰、0.5‰、

1‰、2‰、3‰、4‰。

表 1 纤维技术指标

纤维类型	长度/ mm	直径/ μm	拉伸强度/ MPa	伸长率/ %	模量/ GPa
高韧性纤维	12	45	1 600	6.5	38

1.2 弯拉强度 R_s

半刚性基层材料易产生裂缝的根本原因是形成荷载过大导致拉应力超过材料强度极限或者环境收缩应变过大。弯拉强度^[19]是评价水泥稳定碎石力学和抗裂性能的重要指标,对基层承载能力有根本性的影响。本文弯拉强度试验采用 10 cm×10 cm×40 cm 的梁式试件,每组试件养护龄期为 90 d,弯拉强度按式(1)进行计算。

$$R_s = \frac{PL}{b^2h} \tag{1}$$

式中: R_s 为弯拉强度,MPa; P 为破坏极限荷载,N; L 为跨距,也就是两支点间的距离,mm; b 为试件宽度,mm; h 为试件高度,mm。

1.3 干缩系数(α_d)

基层在服役期除了受到行车荷载的影响,还受到环境作用的影响。其中,最重要的是水泥稳定碎石施工完成后的初期阶段,由于水分不断蒸发导致体积收缩,内部产生干缩应力并出现开裂^[20]。在长期使用过程中,基层还会因为温度变化而热胀冷缩,从而产生温度收缩应力,并与行车荷载应力叠加。半刚性基层干燥收缩裂缝作用较为强烈,是基层裂缝的重要原因。基层裂缝会进一步向上发展,到路面面层形成反射裂缝,影响道路整体服务性能和寿命。干缩系数直接影响半刚性材料收缩开裂的严重程度。本研究制作 100 mm×100 mm×400 mm 的梁式试件,进行干缩实验,测试过程中的收缩应变,并计算不同纤维掺量水稳碎石试件的干缩系数。

1.4 极限变形值(D_l)

水稳碎石的变形能力,也是重要的力学性能指标。基层开裂的主要原因是,收缩系数较大,容易产生过大的收缩变形;但其变形能力较差,导致收缩应变超过极限变形值。极限变形值是水稳碎石的重要性能指标,对水稳碎石抗裂性能有直接影响。由于水稳碎石材料变形值过小,其弯拉极限应变很难直接测量,本文通过抗压试验中达到破坏状态时的极限变形(单位:mm)来作为评价水稳碎石的变形能力的指标。

1.5 综合力学性能指数(M_{gi})

水稳碎石材料作为基层在服务期内受到力学和

环境等因素的综合影响作用。荷载过大会导致荷载应力超过材料强度而发生破坏,主要控制指标是强度值;干燥收缩作用可能导致材料收缩应变值超过材料极限应变而发生破坏,主要控制指标是收缩系数和极限应变值。在荷载和环境因素共同作用下,半刚性材料性能同时受弯拉强度、干缩系数、极限变形值等多个指标的影响,单一性能参数无法反映水稳碎石在基层实际服役状态下的性能特点,通过综合力学性能指数可以较为全面地反映其力学行为。

$$M_{ci} = \frac{R_s \cdot D_l}{\alpha_d} \tag{2}$$

式中: M_{ci} 为综合力学性能指数,MPa·μm; R_s 为弯拉强度,MPa; D_l 为极限变形值,mm; α_d 为干缩系数,无量纲。

2 结果分析

2.1 纤维用量对抗折强度的影响

弯拉强度试验结果及纤维掺量影响规律见表2。

表2 不同纤维掺量下水泥稳定碎石弯拉强度

纤维掺量	0‰	0.5‰	1‰	2‰	3‰	4‰
弯拉强度/MPa	2.17	2.29	2.35	2.27	2.31	2.28

从表2的数据可以看出,在水泥稳定碎石中掺入纤维能够有效提升其弯拉强度^[21]。当纤维掺量在0‰~1‰时,弯拉强度显著提高。当纤维掺量超过1‰时,弯拉强度出现波动,并且略低于纤维掺量为1‰时的强度;但掺入纤维的水稳碎石的弯拉强度始终高于无纤维水稳碎石的强度。其中的机制是,在纤维掺量低于1‰时,纤维在单位体积内的数量随着纤维掺量提高而增加,增强了对水泥稳定碎石的加筋和约束能力,从而提高材料整体强度。当纤维掺量超过1‰时,过量的纤维容易结团和集聚,纤维的分散程度和均匀程度均降低。结团处纤维过于密集,妨碍水泥石和集料的接触和粘接,其他位置纤维用量不足,从而导致材料的整体强度有一定程度的下降。

2.2 纤维用量对干缩系数的影响

纤维的加入对水泥石的收缩行为有一定阻碍作用,从而降低了其干燥收缩系数^[22-23]。纤维用量对干缩系数的影响的具体规律如图1所示。

水泥稳定碎石干缩系数与纤维掺量之间的关系由图1可知。随着纤维掺量的逐渐增大,水泥稳定碎石的干缩系数表现出先下降后上升然后波动的规

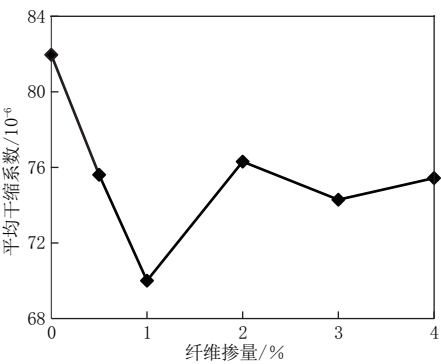


图1 干缩系数随时间的变化规律

律。在1‰的纤维掺量下,干缩系数达到最低值,较之无纤维的水稳碎石降低12.8%。当纤维掺量超过1‰时,水泥稳定碎石的干缩系数就会有一定程度上升;超过2‰后,干缩系数波动且变化较小。在0.5‰、2‰、3‰、4‰的纤维掺量下,干缩系数分别下降了4.7%、8.5%、6.9%和6%。这是因为纤维的模量较大,掺入纤维后对水泥石的收缩变形有一定程度的限制作用,从而降低混合料的收缩系数。所以,纤维用量从0提高到1‰过程中,水稳碎石干缩系数持续下降;但纤维掺量超过1‰时会结团聚集在一起,能限制水泥石收缩的纤维量反而减少,阻碍纤维作用的发挥,且纤维的结团有一定随机性。所以总体上看,纤维掺量超过1‰后,水稳碎石收缩系数高于1‰时的系数,且有一定的波动。

2.3 纤维用量对破坏应变的影响

当水泥稳定碎石在外部荷载作用下达其峰值应力时,其内部结构已经遭到了破坏,表面也会产生一定程度的微裂缝,进而导致其承载能力开始下降。峰值应变反映了水泥稳定碎石在达到峰值应力时的变形量,其数值越大,意味着在达到峰值应力之前,水泥稳定碎石所能承受的变形量越大。不同纤维掺量下水泥稳定碎石的受压应力-应变曲线如图2所示。

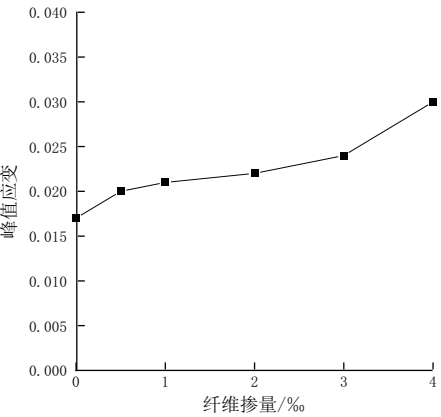


图2 峰值应变随纤维掺量变化曲线

由图2可知,在水泥稳定碎石中添加纤维后,其在达到峰值应力时的峰值应变逐渐增加,并且随着纤维掺量的增大,峰值应变增长的速率也显著加快。当纤维掺量从0.5‰增加到4‰时,水泥稳定碎石的峰值应变从0.017逐步提升至0.03。这表明纤维的掺入能够显著提高水泥稳定碎石在达到峰值应力时的变形能力,使其能够承受更大的变形量。具体而言,纤维掺量从0.5‰逐步增加至4‰时,水泥稳定碎石的峰值应变较普通水泥稳定碎石分别提高了14.3%、24.7%、28.2%、43.6%和74.5%。由此可见,纤维掺量对水泥稳定碎石的变形性能具有显著的增强效果,且纤维用量越高,水稳碎石的抗变形能力越强。

2.4 纤维用量对综合力学性能的影响

从图3可以看出,当纤维掺量从0增长到1‰过程中,水泥稳定碎石的综合性能系数升高;纤维掺量从1‰提高到2‰,综合性能系数有一定下降;纤维掺量超过2‰后,综合性能系数继续提高,曲线总体为呈现上升趋势的波浪线。这是因为水稳碎石的力学强度在1‰时有最大值,干缩系数在2‰有显著提高,3‰后变化不大;而峰值应变在0.5‰~2‰变化不大,超过2‰后有显著提高。这表明,水稳碎石的相对最优剂量为1‰和4‰,但4‰纤维掺量水稳碎石成本显著高于1‰掺量,且室内和现场试验的经验均表明:纤维产量超过2‰后,纤维团聚现象明显增加,混合料性能可能发生严重的局部离析,可能对耐久性造成明显的不利影响。1‰为基于综合性能指标的合理最佳掺量,其综合性能指数比水稳碎石提高56.6%。

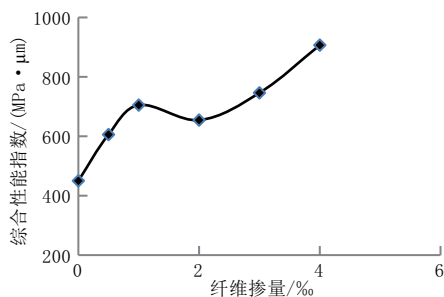


图3 综合力学性能-纤维掺量曲线

综上所述,水稳碎石中纤维的最佳掺量为1‰。

3 结论

(1)纤维的添加能够显著提升水泥稳定碎石的弯拉强度,但不同掺量之间的强度变化幅度并不显著。研究发现,弯拉强度的最大值出现在纤维掺量

为1‰时,相较于普通水泥稳定碎石,弯拉强度提高了8.29%。

(2)纤维的加入可以改善水泥稳定碎石的干缩性能,且其干缩系数随纤维掺量的增加呈现先下降后上升的趋势。当纤维掺量在0.5‰~4‰时,水泥稳定碎石的干缩系数依次降低了4.7%、12.8%、8.5%、6.9%和6%,其中在纤维掺量为1‰时,干缩性能的改善效果最为显著。

(3)掺加纤维后,水泥稳定碎石的峰值应变显著增加。具体来说,随着纤维掺量从0.5‰增加到4‰,峰值应变分别增加了14.3%、24.7%、28.2%、43.6%和74.5%。

(4)1‰为基于综合性能指标的合理最佳掺量,其综合性能指数比水稳碎石提高了56.6%

参考文献:

- [1] 黄煜煊,吕伟民,徐建达,等.水泥稳定碎石基层收缩裂缝综合防治试验[J].重庆大学学报,2006,29(11):154-159.
- [2] 房娜仁,胡士清,李琪琪,等.基于半刚性基层强度控制的反射裂缝防治对策研究[J].公路,2022(9):51-60.
- [3] 王渊,贾秦龙,范晓燕,等.冬寒区高速公路面层与基层裂缝的关联性研究[J].中外公路,2023,43(6):68-73.
- [4] 张阳,王傲鹏,张靖霖,等.水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J].吉林大学学报:工学版,2023,53(2):297-311.
- [5] 张业兴,胡占红,吴禹,等.沥青面层和层间处治措施对再生水稳基层路面反射裂缝的影响分析[J].中外公路,2020,40(1):26-30.
- [6] 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,2024.
- [7] 张鹏,李清富,黄承逵.聚丙烯纤维水泥稳定碎石断裂性能试验研究[J].工程力学,2008,25(8):188-193.
- [8] 付春梅,齐善忠.掺纤维水泥稳定碎石抗裂性能研究分析[J].中外公路,2015,35(2):198-202.
- [9] Zhao Y, Yang X, Zhang Q, et al. Crack Resistance and Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cement-Stabilized Macadam Base[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-15.
- [10] 乌日乐.聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石路用性能研究[D].西安:长安大学,2021.
- [11] 杨红辉,陈忠达,戴经梁.掺纤维水泥稳定碎石基层材料配合比研究[J].公路交通科技,2006,23(3):20-22.
- [12] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等.玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(5):114-120.
- [13] 吴启一,姚华彦,扈惠敏,等.玄武岩纤维对水泥稳定多孔玄武岩碎石力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(1):192-198.
- [14] 杨红辉,王建勋,郝培文,等.纤维在水泥稳定碎石基层中的应用[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(3):14-16,20.
- [15] 王文彬.不同纤维增强水泥稳定碎石混合料路用性能与耐久性研究[J].新型建筑材料,2021(3):57-62.
- [16] 刘纪,黄丽平,李秀君,等.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[J].上海理工大学学报,2021(5):460-467.
- [17] 何小兵,杨庆国,何国基.聚丙烯纤维增强水泥稳定碎石基层材