

文章编号:1671-6833(2023)05-0114-07

玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究

郭寅川, 刘逸伟, 申爱琴, 李震南, 吴金华, 张家龙

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为减少沥青路面反射裂缝的产生及扩展,提高沥青路面的整体抗裂性和延长其使用寿命,采用经济效益良好、取材便捷、增韧效果佳的玻璃纤维来改善水泥稳定碎石的收缩及抗裂性能,并通过干燥收缩试验、温度收缩试验、弯曲韧性试验、断裂能试验分析了玻璃纤维对水泥稳定碎石柔化抗裂能力的改善效果。研究表明:在玻璃纤维体积掺量为0.05%、0.10%、0.15%时水泥稳定碎石30 d龄期干燥收缩系数分别较普通水泥稳定碎石降低了6%、13%、16%;其平均温缩系数分别降低了6%、16%、19%,玻璃纤维的掺量从0.05%提高到0.10%时平均温缩系数的降低幅度最大,达到了10%,此时的提升效果最佳;3种不同玻璃纤维掺量的水泥稳定碎石的弯拉初度分别增加了25.9%、48.1%、150.0%,相对于普通水泥稳定碎石,加入0.10%玻璃纤维改性后极限破坏荷载提高了超过20%,破坏时的挠度增大了53%;水泥稳定碎石断裂能增益比达到了1.225。玻璃纤维的加入可以有效抑制水泥稳定碎石材料的干燥收缩和温度收缩变形,同时改性后水泥稳定碎石韧度和破坏时消耗的能量远远大于普通水泥稳定碎石,增强了水泥稳定碎石的收缩和抗裂性能。

关键词: 道路工程; 水泥稳定碎石; 玻璃纤维; 收缩性能; 柔化抗裂性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.016

半刚性基层具有一定的抗疲劳强度、良好的水稳定特性以及造价较低等突出优点,在中国公路建设中得到了广泛的应用。但水泥稳定碎石柔韧性不足,易出现干燥裂缝和温度收缩裂缝,继而致使水泥稳定碎石基层沥青路面出现反射裂缝^[1-3]。因此,改善半刚性基层的收缩、柔韧性能和其抗裂性能,对于防止半刚性基层沥青路面产生裂缝具有重要意义。

针对上述问题,国内外学者提出在水泥稳定类材料中掺入纤维来抑制基层开裂问题。Zhang等^[4]、张鹏等^[5]、Yang等^[6]和Lyu等^[7]研究表明,向水泥稳定类材料中添加钢、聚丙烯和玄武岩等纤维可以改变水泥基材料力学强度以及韧性。玻璃纤维与钢纤维、玄武岩纤维等路用纤维相比,有取材方便、增韧效果强、耐腐蚀性好、经济性高等优点,更具有大规模推广应用的潜质^[8]。掺入玻璃纤维可以有效改善路用材料的韧性、疲劳以及变形等性能。董苏波等^[9]研究表明,14 d龄期时掺入适量的玻璃纤维可以使水泥稳定碎石抗压回弹模量降低

27.5%,由此大幅度地减少其刚度,从而可有效地提升基层的韧性。白云^[10]研究发现,当玻璃纤维掺量在0.15%以下时,随着玻璃纤维的掺入,水泥稳定碎石的抗压强度、耐冻系数提升效果比较明显,而且会显著降低其干燥收缩,增强基层的抗裂性能。Wu等^[11]向水泥稳定碎石中掺入一定量的玻璃纤维,发现其无侧限抗压强度、劈裂强度、压缩模量等力学性能有了显著提升,确保了碎石承受较大的收缩变形而不受损,有效地提高了水泥稳定碎石的抗开裂性能。赵云飞^[12]通过研究发现,由于玻璃纤维加入,使水泥稳定碎石的弯拉强度和试件破坏时跨中位移均有所增加,可以有效地抑制裂缝的扩展,显著地提高水泥稳定碎石抗裂能力。Zhang等^[13]研究表明,纤维增强水泥稳定碎石的平均干缩系数随龄期的增加而明显降低,掺入玻璃纤维的水稳碎石比普通水泥稳定碎石干收缩系数减小约30%。然而,目前针对玻璃纤维在水泥稳定碎石基层中的应用主要集中于力学性能、抗冻性能和路用性能,对于玻璃纤维对

收稿日期:2022-09-03;修订日期:2022-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078050)

作者简介:郭寅川(1983—),男,江西九江人,长安大学副教授,博士,博士生导师,主要从事路面结构与材料方面研究, E-mail: silver007007@163.com。

引用本文: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. (GUO Y C, LIU Y W, SHEN A Q, et al. Research on shrinkage and softening crack resistance of glass fiber cement stabilized macadam[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(5): 114-120.)

水泥稳定碎石抗裂性能的研究也仅限于弯拉强度和干缩性能方向,对掺入玻璃纤维后水泥稳定碎石的早期温度收缩、干燥收缩以及受力后抵抗变形的能力少有全面研究成果。

鉴于此,本文将玻璃纤维掺入水泥稳定碎石中,采用干燥收缩试验、温度收缩试验、弯曲韧性试验和断裂韧性试验,深入探究不同掺量下玻璃纤维对水泥稳定碎石收缩性能、弯曲韧性、断裂性能及抗裂性能的影响规律,并系统地分析了玻璃纤维对水泥稳定碎石抗裂性能的增强效果,以期提升基层材料柔韧性能并为沥青路面反射裂缝的防治和在道路基层的应用提供一定的指导。

表 1 水泥技术性能检测结果

Table 1 Cement technical performance test results									
项目	初凝时间/ min	终凝时间/ min	氧化 镁/%	三氧化 硫/%	安定性	氯离子/ %	细度 (45 μm) 筛余	28 d 抗折 强度/MPa	28 d 抗压 强度/MPa
标准值	≥45	≤600	≤6.0	≤3.5	合格	≤0.06	≤30	≥5.5	≥32.5
实测值	215	300	4.22	2.11	合格	0.04	6.1	7.9	39.2

表 2 玻璃纤维技术指标

Table 2 Glass fiber technical indicators				
项目	线密度/tex	含水 率/%	可燃物 含量/%	硬挺度/mm
检测平均值	2 394.3	0.08	1.09	119
技术要求	2 400±120	≤0.15	1.20±0.15	125±20

1.2 配合比设计

本研究通过振动击实试验确定了 3.5%、4.0% 和 4.5% 水泥用量条件下水泥稳定碎石的最佳含水率分别为 5.5%、5.2% 和 6.6%。养生 7 d(其中最后一天饱水)后,测定其无侧限抗压强度,结果分别为 5.91、6.91 和 7.03 MPa。3 种水泥用量的水泥稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度均满足 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》的要求,4.0%、4.5% 强度差异不大,但是水泥剂量越高经济性越差,也越容易开裂,故综合考虑选用 4% 的水泥用量。最终得出不同纤维掺量下的 4 种水泥稳定碎石配合比 14:35:24:27,其中碎石粒径按“逐级填充试验”^[14]确定 4 档集料之间的级配比例。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥收缩试验

干燥收缩试验参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》规定的方法来测定,所用试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的长方体试件,并按照式(1)计算总干缩系数评价其干缩性能。

$$\alpha_d = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum \omega_i} \tag{1}$$

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本研究选用青岛即墨中联水泥有限公司生产的标号为 32.5 的复合硅酸盐水泥,各项指标检测结果如表 1 所示。集料为青岛即墨中联水泥有限公司生产的碎石,试验所用集料共分 4 档,粒径分别为 19~31.5、9.5~19、4.75~9.5、0~4.75 mm。试验所用纤维为青岛黄海玻纤有限公司生产的无碱短切玻璃纤维,纤维直径为 14~17 μm,长度为 20~30 mm。玻璃纤维的技术指标如表 2 所示技术指标检测方法为 GB/T 7690.1,检测结果为合格。

式中:α_d 为总干缩系数,%; ∑ε_i 为总干缩应变; ∑ω_i 为总失水率。

1.3.2 温度收缩试验

温度收缩试验试件尺寸同干燥收缩试验,并参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的方法测定 7 个温度级,每次降温 10℃,降温速率 0.5℃/min,恒温 3 h,数据读取时间间隔为 5 min。根据测得的数据对温度收缩系数进行计算整理,计算公式如(2)、(3)所示。

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i+1}}{L_0}; \tag{2}$$

$$\alpha_t = \frac{\varepsilon_i}{t_i - t_{i+1}}. \tag{3}$$

式中:l_i 为第 i 次千分表读数,mm;t_i 为第 i 级温度,℃;L₀ 为试件的初始长度,以试验开始时测定的试件长度代替,mm;ε_i 为第 i 个温度条件下的温度收缩应变,%;α_t 为材料的温度收缩系数,表征单位温度变化条件下材料的收缩系数,%。

1.3.3 弯曲韧性试验

弯曲韧性试验仪器采用 SANS CMT5105 型电子式万能试验机,采用配套的 4 点弯曲夹具进行试验。夹具下部跨度为 300 mm,上部跨度为 100 mm,加载速率为 0.1 mm/min。加载过程中通过万能试验机数据采集系统对荷载、时间、挠度等数据进行实时采集。数据采集后,利用荷载-挠度曲线计算不同纤维掺量下的弯曲韧性系数 f_e 以及通过对曲线积分得出

弯曲初度即弯曲破坏过程中水稳碎石吸收的能量。 f_e 计算公式为

$$f_e = \frac{\Omega L}{bh^2\delta} \quad (4)$$

式中: f_e 为弯曲韧性系数,MPa; Ω 为从开始到挠度为 $L/150$ 荷载-挠度曲线下面积, $N\cdot mm$; L 为两支座之间的跨度,mm; b 为试件的宽度,mm; h 为试件的高度,mm; δ 为 $L/150$,mm。

1.3.4 断裂能试验

试件尺寸如图 1 所示,尺寸为 $L\times b\times h=400\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。试验开始前,在梁式试件下部预锯一条缝,相对切口深度为 5 mm。其养生龄期为 90 d。试验仪器采用 SANS CMT5105 型电子式万能试验机,加载速率控制在 0.1 mm/min,最大力为 100 kN,准确度等级为 0.5 级。本试验参照 RILEM 混凝土弯曲试验方法,对水泥稳定碎石材料的断裂能进行测试,计算公式为

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_{\max}}{A_{\text{lig}}} \quad (5)$$

式中: G_F 为断裂能, N/m ; W_0 为荷载所做功, $N\cdot m$; m 为试件质量,kg; δ_{\max} 为跨中最大挠度,m; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; A_{lig} 为韧带净面积, m^2 。

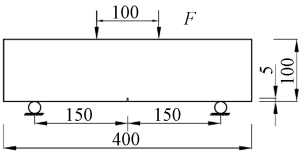


图 1 断裂能试件示意图 (mm)

Figure 1 Schematic diagram of fracture energy specimen (mm)

2 结果与讨论

2.1 干缩性能试验结果分析

按照式(1)计算不同玻璃纤维掺量下的总干缩系数,试验结果如图 2 所示(图中 Fib-non、Fib-0.05%、Fib-0.10%、Fib-0.15%依次表示体积掺量为 0、0.05%、0.10%、0.15%,下同)。

由图 2 可知,随着龄期的增长,水泥稳定碎石总干缩系数逐渐增加,当龄期相同时,总干缩系数随纤维掺量的增加逐渐降低,由此可以说明纤维的加入可以显著改善水泥稳定碎石的干缩性能。以 30 d 龄期的水泥稳定碎石总干缩系数为例分析:与普通水泥稳定碎石相比,玻璃纤维掺量由 0 增大到 0.15%,水泥稳定碎石干燥收缩分别降低 6%、13%、16%,每增大 0.05%,干燥收缩分别降低 6%、7%、3%。由 0.05%增大到 0.10%时玻璃纤维对水泥稳

定碎石干燥收缩的抑制效果最优,故掺量为 0.05%~0.10%为抑制干缩的最佳掺量。

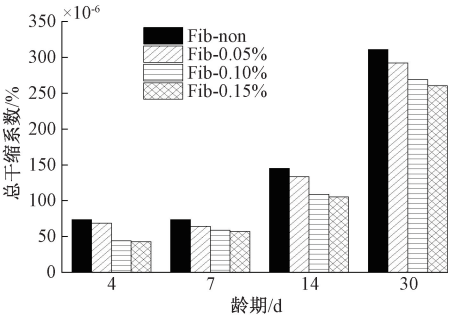


图 2 不同龄期、不同纤维掺量水泥稳定碎石总干缩系数

Figure 2 Total dry shrinkage coefficient of cement stabilised aggregates at different ages and different fibre doses

分析机理可知,水泥稳定碎石中玻璃纤维的间距会直接影响其对干燥收缩的抑制效果,在其他条件都相同的情况下,随着掺量的增加,玻璃纤维之间的间距不断降低。纤维间距较小可以更好地分散和降低水泥稳定碎石内部的收缩应力,但当纤维的用量超过一定限度后,玻璃纤维在水泥稳定碎石中的均匀分布将会难以实现,进而出现纤维结团的现象,在水泥稳定碎石中形成薄弱区,不但使得水泥稳定碎石的抗收缩能力降低,甚至使得水泥稳定碎石的强度达不到要求。故掺入适当的玻璃纤维可以有效地降低水泥稳定碎石的干燥收缩。

2.2 温度收缩试验结果分析

测定不同纤维掺量下水泥稳定碎石试件在温度变化条件下的变形量,并对水泥稳定碎石的温度收缩应变、温缩系数进行了计算,结果如图 3 所示。

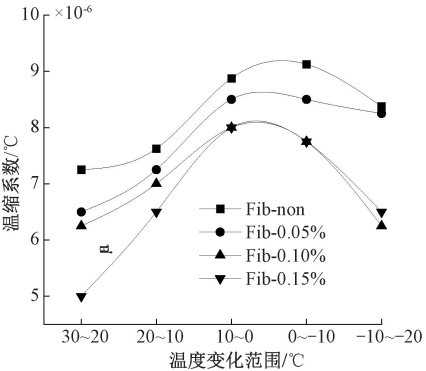


图 3 平均温缩系数随纤维掺量变化趋势

Figure 3 Variation trend of average temperature shrinkage coefficient with fiber content

分析图 3 可知,水泥稳定碎石的温度收缩系数在整个测试温度周期内先随着温度的降低而升高,在 10~-10 °C 内达到最大,然后开始下降。材料的温度收缩系数在 10~-10 °C 内达到最大值。主要是由于水泥稳定碎石材料内部自由水的冰点在 10~

-10℃内,水分开始结冰膨胀,由此产生的体积变形抵消了部分温度收缩引起的变形,最终体现为温度收缩系数有所减小。由图 3 可知,3 种纤维掺量的混合料温度收缩系数较不掺玻璃纤维的对照组分别下降了 5.5%、14.5%、18.2%。由 0.05% 增大到 0.10% 时,玻璃纤维对水泥稳定碎石温度收缩的抑制效果最优,同时经计算其平均温缩系数,玻璃纤维从 0.10% 增加到 0.15%,水泥稳定碎石的温缩系数仅降低了 $0.27\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,约为纤维掺量从 0.05% 增加到 0.10% 温缩系数降低值的 1/3。故掺量为 0.05%~0.10% 为抑制温缩的最佳掺量。

玻璃纤维提升水泥稳定碎石材料的温度收缩性能主要通过抑制材料的温度收缩变形和增加材料的阻裂能力两方面来实现。首先,短切玻璃纤维经过拌和后在混合料中呈乱向分布,在击实作用及水泥的水化作用下,与水泥稳定碎石材料相互联结,初期强度构成主要为嵌挤、摩擦力。随着水泥水化的不断进行,水泥材料的裹覆力逐渐增大,并最终占据主导地位。在两种力的作用下最终使混合料形成一个立体网状结构,增强了材料的整体性。其次,玻璃纤维长径比极大的特性保证了其能够与水泥稳定碎石具有足够的接触面积,进而具有足够的黏结力来限制试件内部出现裂缝以及抑制裂缝的发展,在一定程度上提高了水泥稳定碎石基层材料的抗裂能力。

2.3 弯曲韧性试验结果分析

在水泥稳定碎石材料进行韧性测试的过程中,裂缝不断扩展,扩展过程如图 4 所示。

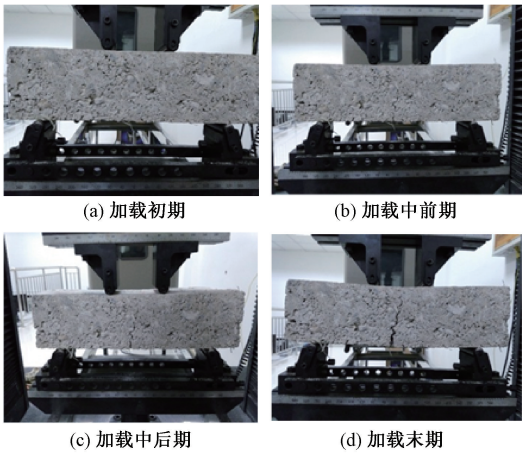


图 4 韧性试验裂缝扩展过程

Figure 4 Toughness test crack propagation process

在加载初期,水泥稳定碎石试件作为一个整体受力,随着微裂缝的逐渐产生,玻璃纤维开始承担由于荷载作用产生的拉应力,裂缝继续扩展为宏观裂缝,材料出现薄弱面,此时,连接裂缝的玻璃纤维并

没有失去承载能力,直到纤维开始被拉断,纤维的承载能力开始降低。随着荷载继续增大,玻璃纤维不断被拉断,裂缝继续扩展,直至形成贯通缝,试件破坏。根据万能试验机采集到的数据选取代表性的样本绘制 4 种纤维掺量的水泥稳定碎石荷载-挠度曲线,如图 5 所示。

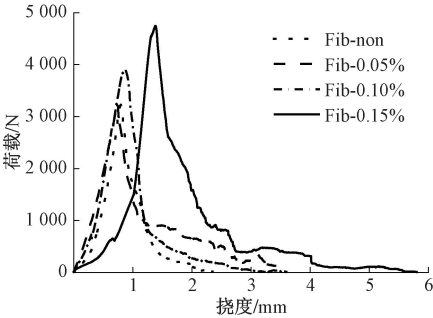


图 5 不同纤维掺量水泥稳定碎石荷载-挠度曲线
Figure 5 Load-deflection curves of cement stabilized macadam with different fiber content

分析图 5 可知,首先,加入玻璃纤维可以大幅提高水泥稳定碎石材料的极限破坏荷载,0.10% 纤维掺量和 0.15% 纤维掺量的水泥稳定碎石极限破坏荷载相对于普通水泥稳定碎石分别提高了 20.6% 和 46.9%;其次,随着玻璃纤维掺量的增加,水泥稳定碎石材料峰值荷载所对应的挠度也相应增大,表明玻璃纤维的加入在提高材料极限破坏荷载的同时还能增大水泥稳定碎石材料的变形能力;最后,加入玻璃纤维后,水泥稳定碎石完全破坏时的挠度较普通水泥稳定碎石显著增加,3 种纤维掺量分别使得材料破坏时的挠度增大了 52.9%、53.2%、147.1%。普通水泥稳定碎石材料的承载能力在达到极限荷载后迅速下降,试件在短时间内被完全破坏。加入玻璃纤维后,虽然在达到极限荷载之后的初始阶段承载能力下降依然相对较快,但是下降一段时间之后,荷载的变化趋势逐渐趋于缓和。说明在裂缝扩展的后期,玻璃纤维作用更加显著,使水泥稳定碎石材料能够在荷载作用下拥有更强的变形能力以及剩余弯拉强度。

为了分析整个加载周期内的能量消耗,本研究还计算了不同纤维掺量下水泥稳定碎石材料的极限荷载下对应的弯曲韧性和弯切度系数,计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,随着玻璃纤维掺量的增加,水泥稳定碎石的弯曲韧度也随之升高,3 种不同纤维掺量的水泥稳定碎石弯曲韧度分别提高了 25.9%、48.1%、150.0%。当纤维掺量超过 0.05% 时,弯曲韧性系数显著增大,玻璃纤维掺量为 0.10% 及 0.15% 时,其等弯曲韧性系数较普通水泥

表 3 不同水泥稳定碎石弯曲韧度和弯曲韧性系数

Table 3 Bending toughness and bending toughness coefficient of different cement-stabilized crushed stone

试件编号	弯曲韧度/ (N·mm)	韧度 增幅/%	弯曲韧性 系数/MPa
Fib-non	1 919.5		0.285
Fib-0.05%	2 416.4	25.9	0.297
Fib-0.10%	2 842.7	48.1	0.402
Fib-0.15%	4 797.4	150.0	0.514

稳定碎石材料分别提高了 41.6% 及 80.3%。这与弯曲韧度变化规律保持一致。综上,加入玻璃纤维之后可以显著提升水泥稳定碎石材料的抗弯拉韧性,能够在很大程度上改善水泥稳定碎石材料柔韧性性能不足的缺陷,进而大大提升水泥稳定碎石基层沥青路面的使用寿命,提高行车舒适性。但是纤维的掺量应该在路用性能与经济性之间进行平衡,在保证水泥稳定碎石具有较高抗裂性能的前提下,应尽可能地降低材料的造价,增强其经济性。且 0.10% 玻璃纤维掺量的水泥稳定碎石破坏时的挠度较普通水泥稳定碎石提高了 52.9%,韧度提升幅度 41.6%。综合考虑前 2 节试验结果分析,当掺量为 0.05%~0.10% 时可以较好地满足要求,故此掺量为最佳掺量。

为了探究掺入玻璃纤维后水泥稳定碎石弯拉韧性随着挠度增加的变化规律,本研究还计算了从开始加载至试件破坏为止的累积能量吸收值,用以分析玻璃纤维对水泥稳定碎石弯拉韧性的影响。不同纤维掺量的水泥稳定碎石材料累积能量吸收值随挠度变化如图 6 所示。

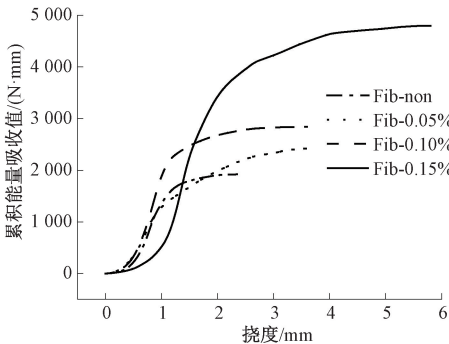


图 6 累积能量吸收值随挠度变化

Figure 6 Cumulative energy absorption value with increasing deflection

分析图 5 及图 6 可知,随着玻璃纤维掺量的增加,水泥稳定碎石材料的荷载峰值相应增大,韧度较普通水泥稳定碎石也显著增大;随着纤维掺量的增加,荷载-挠度曲线的走势也更为平缓,表明加入玻璃纤维后材料的弯拉韧性更为优良。在玻璃纤维水泥稳定碎石材料达到其承载能力的极限值后,裂缝

失稳扩展,处于底部的玻璃纤维开始出现被拉断的现象,材料的承载能力开始下降,随着玻璃纤维不断被拉断或者拔出,试件不断消耗能量,因此与普通水泥稳定碎石材料相比,玻璃纤维水泥稳定碎石的荷载-挠度曲线呈现缓慢下降的趋势,能量吸收值仍持续增长,表现出优异的弯拉韧性,进而延缓裂缝的产生和发展。

2.4 断裂能试验结果分析

根据仪器自动记录的数据,选取代表性数据绘制荷载-挠度测试曲线如图 7 所示。

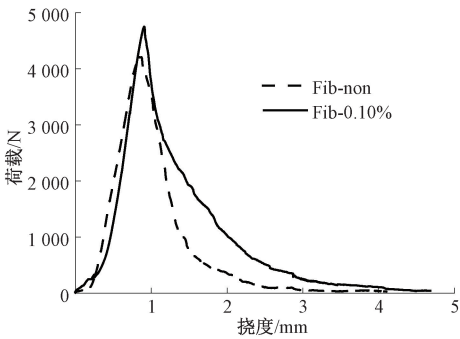


图 7 荷载-挠度测试曲线

Figure 7 Load-deflection test curve

对试验所得曲线分析可知,2 种水泥稳定碎石曲线变化的总趋势是一致的,即在荷载增大的初期,荷载缓慢增长,增长一段时间后荷载增加速度加快,达到荷载峰值后有一段快速下降段,然后荷载下降速度逐渐变慢,直至最后基本变成一条水平线。对比 2 条曲线可知,在曲线增长阶段,两者均为快速增长,但玻璃纤维水泥稳定碎石荷载峰值及其对应的挠度均有一定增加,同时,在荷载下降阶段,由于玻璃纤维可以在试件开裂后提供一定的荷载承受能力,改性后的水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石相比会更早开始缓慢下降,其吸收的能量与普通水泥稳定碎石相比也有一定的增长。由于 10% 玻璃纤维掺量时水泥稳定碎石的抗干缩、抗温缩性能最佳,故选取代表性掺量,根据式(4)对 2 种试件的断裂能进行计算,结果如表 4 所示。

表 4 水泥稳定碎石材料断裂能

Table 4 Fracture energy of cement stabilized macadam material

纤维掺量/%	断裂能/(N·m ⁻¹)	增益比
0	420.510	
0.10	514.937	1.225

由表 4 可知,玻璃纤维的加入可以显著提高水泥稳定碎石材料的断裂能,玻璃纤维改性后的水泥稳定碎石断裂能与未改性相比,断裂能提高了

22.5%。这意味着在其他条件完全相同的情况下,掺入玻璃纤维的水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石相比消耗的能量高出了 22.5%,表明玻璃纤维改性后水泥稳定碎石破坏时消耗的能量远远大于普通水泥稳定碎石,进而增加了水泥稳定碎石基层的使用寿命。从式(4)可以明显看出,对断裂能产生比较大影响的是测试过程中荷载所做功以及跨中最大挠度这 2 个变量,随着荷载所做功和跨中挠度逐渐增大,断裂能也随之逐渐增大。从图 7 可以看出,玻璃纤维改性后的水泥稳定碎石较未改性的材料而言,荷载所做功和跨中挠度均有不同程度的增大,这可以在一定程度上对玻璃纤维改性后水泥稳定碎石材料断裂能的增加进行解释。同时,与水泥稳定碎石弯拉韧性对比发现,两者的变化趋势是一致的。

3 结论

- (1)玻璃纤维在水泥稳定碎石材料中呈乱向分布以抵消部分干缩收缩产生的内应力,可以显著地降低水泥稳定碎石的干燥收缩,且在相同龄期下水泥稳定碎石干燥收缩系数随着玻璃纤维掺量的增加而降低,以 30 d 龄期为例,其中 0.05%~0.10% 掺量时降低幅度最大,达到 7%。
- (2)玻璃纤维在材料内部逐渐形成立体网状结构,能够在很大程度上抵消温度变化带来的内应力,进而提高水稳碎石温度收缩性能。3 种纤维掺量下水泥稳定碎石平均温缩系数分别下降了 6%、16%、19%,尤以掺量为 0.05%~0.10% 时下降幅度最大。
- (3)抗拉强度较高的玻璃纤维加入到混合料内部后,可以很好地承受内应力,形成了良好的加筋作用,限制了裂缝的产生,极大地增强水稳碎石的韧性,表现出了优异的抗裂性能。在加入 0.05%、0.10%、0.15% 的玻璃纤维后,水泥稳定碎石的弯曲韧度分别增加了 25.9%、48.1%、150.0%,最终延缓裂缝的产生、发展,提高水稳碎石基层沥青路面使用寿命。
- (4)加入 0.10% 玻璃纤维改性后的水泥稳定碎石断裂能增益比达到了 1.225,表明玻璃纤维改性后水泥稳定碎石破坏时消耗的能量远远大于普通水泥稳定碎石,进而增加了水泥稳定碎石基层的使用寿命。故综合考虑各项试验指标,建议玻璃纤维掺量为 0.05%~0.10%。

参考文献:

[1] 王雪莲,黄晓明,卞国剑. LSPM 对防治半刚性基层沥青路面反射裂缝机理分析[J]. 公路交通科技,

2016, 33(7): 12-18.
WANG X L, HUANG X M, BIAN G J. Analysis on mechanism of using LSPM for preventing reflective cracks in asphalt prevent with semi-rigid base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(7): 12-18.
[2] SHENG Y P, JIA H C, GUO S C, et al. Effect of brucite fibers and early strength agent on cement stabilized macadam in Alpine regions[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12(3): 315-324.
[3] 张蓓,李海龙,郭成超,等. 沥青路面表面裂缝扩展分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(2): 42-46.
ZHANG B, LI H L, GUO C C, et al. Analysis of surface crack propagation of asphalt pavement[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(2): 42-46.
[4] ZHANG D, TAN K H, DASARI A, et al. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 109: 103512.
[5] 张鹏,刘晨辉,李清富. 聚丙烯纤维水泥稳定碎石力学性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(5): 44-47.
ZHANG P, LIU C H, LI Q F. Experimental study on mechanical properties of cement stabilized crushed stones reinforced with polypropylene fiber[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(5): 44-47.
[6] YANG J, CHEN B C, NUTI C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124104.
[7] LYU Z H, SHEN A Q, MENG W N. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276: 122212.
[8] 郭寅川,陈乔森,申爱琴,等. 玻璃纤维改善砾石沥青混合料路用性能[J]. 公路交通科技, 2018, 35(8): 28-33.
GUO Y C, CHEN Q S, SHEN A Q, et al. Road performance of glass fiber-improved gravel asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(8): 28-33.
[9] 董苏波,韩静云,邵志海. 纤维对水泥稳定碎石基材抗弯拉强度影响试验研究[J]. 华东公路, 2011(1): 25-27.
DONG S B, HAN J Y, GAO Z H. Experimental study on

influence of fiber-stabilized macadam base material on flexural tensile strength[J]. East China Highway, 2011 (1): 25-27.

[10] 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.

BAI Y. Glass fiber cement stabilized aggregate performance study[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.

[11] WU W, ZHANG C, WEI S Z. Experimental study on the mechanical performance of cement-stabilized macadam reinforced with fiber[C] //Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE). Piscataway: IEEE, 2011: 1989-1991.

[12] 赵云飞. 纤维对水泥稳定碎石材料性能影响的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.

ZHAO Y F. Experimental study on effect of fiber on properties of cement stabilized macadam[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.

[13] ZHANG C, WU W, CHEN R J. Experimental study on the deformation performance of cement-stabilized macadam reinforced with fiber[J]. Advanced Materials Research, 2011, 335/336: 391-395.

[14] 白梅力. 振动法多级嵌挤水泥稳定碎石路用性能及工程应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

BAI M L. Study on the performance and engineering application of multi-grade interlock cement stabilized macadam by using vibrating compaction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

Research on Shrinkage and Softening Crack Resistance of Glass Fiber Cement Stabilized macadam

GUO Yinchuan, LIU Yiwei, SHEN Aiqin, LI Zhennan, WU Jinhua, ZHANG Jialong

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to reduce the generation and expansion of reflective cracks in asphalt pavements, to improve the overall crack resistance of asphalt pavements and prolong their service life, glass fibres, which were economically efficient, convenient to obtain and have good toughening effect, were used to improve the shrinkage and crack resistance of cement stabilised macadam, and the effect of glass fibres on the softening and crack resistance of cement stabilised macadam was analysed through drying shrinkage tests, temperature shrinkage tests, bending toughness tests and fracture energy tests. The results of the study showed that three different types of glass fibres were used to improve the shrinkage and cracking resistance of cement stabilised macadam. The results showed that the drying shrinkage coefficients of cement stabilized macadam with three different glass fibre doping levels decreased by 6%, 13% and 16% respectively at 30 d compared with those of ordinary cement stabilized macadam; the average temperature shrinkage coefficients decreased by 6%, 16% and 19%, respectively; the average temperature shrinkage coefficient decreased the most when the glass fibre doping level was increased from 0.05% to 0.10%, reaching 10%, and the best improvement effect was achieved at this time. The bending and tensile toughness of the three different glass fibre admixtures increased by 25.9%, 48.1% and 150.0%, respectively; the ultimate breaking load increased by more than 20% and the deflection at breakage increased by 53% after the addition of 0.10% glass fibre modification compared to ordinary cement stabilised macadam; the fracture energy gain ratio of cement stabilised aggregates reached 1.225. The addition of glass fibre could effectively inhibit the drying shrinkage and temperature shrinkage deformation of cement stabilised macadam, while the modified cement stabilised macadam were much tougher and consumed much more energy at breakage than ordinary cement stabilised macadam, which was important for enhancing the shrinkage and crack resistance of cement stabilised macadam.

Keywords: road engineering; cement stabilized macadam; glass fiber; shrinkage property; softening and crack resistance