

高韧性纤维水泥稳定碎石路用性能研究

常德¹,李志忠¹,王振^{2,3},邢又家¹,任瑞波²

(1.济南金日公路工程有限公司,山东 济南 250101; 2.山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101;

3.淄博市交通运输管理服务中心,山东 淄博 255000)

摘要:反射裂缝是沥青路面半刚性基层中常有出现的问题,研究提出将自主研发的特种高韧性纤维掺入到水泥稳定碎石中,达到改善其抗裂性能的目的,通过测定多种纤维掺量水泥稳定碎石的无侧限抗压强度、劈裂强度、单轴压缩模量及收缩系数,分析该特种高韧性纤维对水稳碎石材料性能影响的变化规律。试验结果表明:随着纤维掺量逐渐大,水泥稳定碎石养护7、28、90 d的无侧限抗压强度和劈裂强度均呈现先增大后减小的趋势,且各种指标强度均在1‰纤维掺量时最大,单轴压缩模量在2‰下有最大值。养护90 d的无侧限抗压强度和劈裂强度在掺入1‰纤维后分别提高14.1%和9%;掺加特种高韧性纤维能够改善水稳碎石材料的收缩性能,纤维掺量为1‰时,温缩系数和干缩系数分别比不掺时提高14.1%和12.8%。

关键词:水泥稳定碎石;高韧性特种纤维;收缩性能;力学性能

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0270-06

0 引言

随着我国的交通基础设施建设不断完善,在公路、铁路、航空等多个领域发展迅速,交通运输服务水平不断提升,现在我国已经成为一个真正意义上的交通大国,而且正在快速朝着交通强国的目标迈进。据交通运输部发布的最新数据,截至2021年,我国公路总里程共计528.07万km,其中公路养护里程占总里程的99.4%。这一占比表明我国目前道路发展的重心已经从建设转移到养护上来了,对于路面病害的防治以及如何提升路面使用寿命,成为道路建设发展研究的重要课题。半刚性基层沥青路面作为我国现阶段主要的高速公路修建形式,占在建或已建成高速公路的90%以上^[1]。半刚性基层在强度、模量、水稳定性和抗冻性等方面的优势明显,同时,水稳碎石材料基层的力学性能也表现优异,且龄期增长会对其强度产生积极影响,主要原因为无机结合料的水化、硬化反应。

基层铺筑完成后,材料体积会由于温度、湿度、水泥水化反应、火山灰反应发生改变,导致基层周围产生收缩应力,若收缩应力超过极限,则将产生干缩、温缩裂缝,大幅减少路面的服役寿命^[2]。因此,避免以及减缓半刚性基层的开裂、防止反射裂缝产生

是延长路面使用寿命的重要手段。通常防治路面裂缝的产生大多都是从沥青面层、半刚性基层以及面层与半刚性基层界面的联结这几个方面展开,其中有增加沥青面层厚度^[3]、改善沥青面层^[4]或半刚性基层材料^[5-8]、使用土工织物^[9]或橡胶沥青作为应力吸收层^[10]等措施。不同种类的复合纤维对于半刚性基层的抗裂性能的提高均有积极影响,是目前较为有效的防开裂措施,这是由于纤维能够有效提高水稳碎石材料的干缩、温缩性能。目前常见的纤维种类可粗略分为两大类:柔性纤维和硬质纤维。柔性纤维是指以聚酯纤维、聚丙烯纤维为代表的一类纤维;硬质纤维多是以钢纤维、玄武岩纤维为代表的一类纤维。其中硬质纤维由于本身硬度较大,导致其抵抗变形的能力较差,在搅拌过程中容易对设备造成损耗,而且这类纤维大多造价较高,因此,难以在工程中大规模应用。相比之下,以聚丙烯、聚乙烯醇为代表的柔性纤维抗裂效果显著,因此应用较为广泛。

本文旨在研究自主开发的高韧性特种纤维对水稳碎石材料的无侧限抗压强度、劈裂强度等力学指标以及收缩特性等路用性能的影响,分析该纤维对水稳碎石材料各性能的影响规律,研究结果具有十分重要的现实意义。

1 原材料及技术指标

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

收稿日期:2023-05-22

作者简介:常德(1983—),男,工学学士,高级工程师,从事道路工程技术研究工作。

的试验结果如表 1 所示。所用集料为石灰岩,共分为六档,参照《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)^[11] 推荐的级配范围 C-B-3 进行级配设计,合成级配结果如表 2 所示。所用的特种高韧性纤维由课题组自主研究开发,其主要技术指标如表 3 所示。

表 1 水泥技术指标

技术指标	规范要求		实测值
初凝时间 /min	≥45		284
终凝时间 /h	≤10		6.8
抗压强度 /MPa	3 d	≥15	21.7
	28 d	≥42.5	47.3
抗折强度 /MPa	3 d	≥3.5	3.9
	28 d	≥6.5	7.6

表 2 集料级配

级配	各筛孔通过百分率 /%					
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6
级配上限	100	86	58	32	28	15
级配下限	100	68	38	22	16	8
合成级配	100	78.7	49.7	28.2	18.8	9.0

表 3 纤维技术指标

长度 /mm	直径 /μm	拉伸强度 /MPa	伸长率 /%	模量 /GPa
12	45	1600	6.5	38

1.1 试验方案

本研究选用的水泥掺量为 4%,分别对 6 个不同纤维掺量(0‰、0.5‰、1‰、2‰、3‰、4‰)的水稳碎石材料路用性能进行试验研究。其中力学性能方面主要对无侧限抗压强度、劈裂强度以及单轴压缩模量进行测试,收缩性能试验包括干缩和温缩试验。测试无侧限抗压强度、劈裂强度和单轴压缩模量采用 150 mm×150 mm 的圆柱型成型试件,其中对无侧限抗压强度和劈裂强度试件分别养护 7、28、90 d,对单轴压缩模量试件养护 90 d;在干缩和温缩试验中采用 100 mm×100 mm×400 mm 的中梁成型试件,养护龄期为 7 d。试验中所用试件压实度均为 98%。

1.2 纤维水泥稳定碎石作用机理

水泥稳定碎石材料作为一种准脆性的材料,在路面结构层中,主要起到承重和传递应力的作用。将纤维掺入水泥稳定碎石中,可以改善水泥性能、稳定碎石内部结构。当承受外部荷载作用时,材料整体的受力状态发生变化,纤维水稳碎石材料的力学性能改变,水稳碎石材料的强度和韧性增加,从而使水稳碎石材料的整体路用性能得到提升。

对于纤维增强水稳碎石材料性能的作用机理,目前主要有两种理论,分别是复合材料理论和纤维间距理论。复合材料理论指当纤维掺加到水稳碎石材料中后,可以将纤维和水稳碎石材料组成的复合材料看成是两相体^[12]。当纤维在水稳碎石材料中均匀地分散后,随着水泥的水化反应不断进行,每一个纤维单丝都会与水泥基体紧密黏结,大量的纤维在水稳碎石材料中形成致密的网状结构,呈现出一种三维的乱向支撑体系,从而增加复合材料整体的抗变形能力。此时,若对纤维水稳碎石材料施加一个外部的拉应力,纤维和水泥基体之间会产生黏结力来抵抗外界应力^[13]。随着外部拉应力的增强,纤维与水泥基体间的作用一般存在两种情况。第一种情况下,纤维会从水泥基体中拔出,这是由于纤维和水泥基体之间黏结力不足导致的,在这种状态下,纤维对水稳碎石材料的增强作用是有限的;第二种情况则是纤维与水泥基体间黏结力良好,存在于水泥基体中的纤维在外部拉应力作用下被从中间拉断,在这种状态下,想要对水稳碎石材料造成破坏,就必须克服纤维自身抗拉强度做功,但纤维本身的模量和强度就很高,因此,在断裂过程中会产生更大的变形量并消耗更大的能量。此时,纤维复合材料的抗拉强度是通过叠加水稳碎石材料基体和纤维的抗拉强度来实现的,该复合材料依赖纤维与水泥基体之间的界面吸附力,提高对开裂的抵抗能力,基层的开裂程度因而得到有效降低。

在实际情况中,纤维水稳碎石材料的断裂过程是一个累积过程,少量纤维发生断裂时,对纤维水稳碎石材料整体影响并不大,只有当一定数量的纤维发生断裂,达到纤维水稳碎石材料所能承受的极限值后,复合材料整体才会出现破坏。所以,掺入纤维对水稳碎石材料的增韧阻裂效果十分明显。因此,若想要使纤维在水稳碎石材料中发挥最大的作用,就必须增强纤维与水泥基体之间的黏结力。目前,主要方式是对纤维表面进行处理,例如将纤维表面通过物理方法处理成凹凸不平的状态,或者将纤维断面加工成正方形等。对于一些直径很小的柔性纤维,则往往采用化学手段对纤维进行改性,以此来增强纤维与水泥基体界面之间的黏结力。

另一种理论是纤维间距理论^[14],理论认为,脆性材料的内部存在不同尺度的微小裂缝,当外部荷载作用在脆性材料上时,裂缝尖端会产生应力集中,导致裂缝不断扩展。如果裂缝扩大到一定程度,使裂缝

贯通,就会导致材料结构发生破坏。然而,通过将纤维添加到脆性材料中,在裂缝扩展时,纤维会在裂缝尖端处产生一个与裂缝扩展相反的应力场和应力强度因子,导致应力集中以及总应力强度因子减弱,限制裂缝的扩展。同时,纤维的阻裂作用很大程度上受到单位体积内纤维的数量、间距的影响,纤维数量越多,间距越小,阻裂作用越强。因此,根据纤维间距理论,水稳碎石材料中相邻纤维的间距越小,纤维对水稳碎石材料的约束作用就越强,对水稳碎石材料的阻裂效果就更明显。但是,当超过某一掺量后,大量的纤维难以均匀分散在水稳碎石材料中,会导致纤维重新结团,结团后的纤维与水泥基体的接触面积减小,黏结力明显下降,结团过大的纤维甚至会影响水稳碎石材料本身的嵌挤结构,从而减弱纤维对于水稳碎石材料性能的提高效果。所以,纤维存在一个合理掺量,使得其既能够充分与水泥基体黏结,又能够在单位体积内尽可能多地分布。

1.3 击实试验

通过击实试验对水稳碎石材料最佳含水率以及最大干密度进行确定。击实试验按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[15]中无机结合料稳定材料的击实试验方法丙法进行。所得击实曲线如图 1 所示。

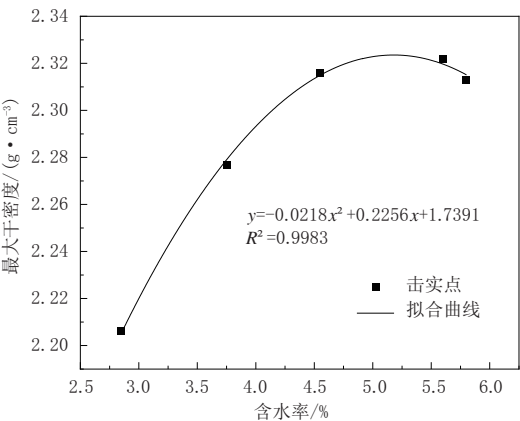


图 1 击实试验结果

对击实曲线进行多项式拟合之后,即可以得到含水率-最大干密度的拟合方程: $y=-0.0218x^2+0.2256x+1.7391$, $R^2=0.9983$ 。由方程计算得出,当含水率为 5.2% 时,对应有最大干密度 2.323 g/cm³。通过大量重复实验发现,在水泥剂量相同的情况下,纤维掺量在 0~4% 的范围内,击实试验得到的含水率和干密度几乎相同,且平行试验结果均满足试验的精度要求。因此,本文认为,在水稳碎石材料中掺入纤维,并不影响其最佳含水率和最大干密度,后续

试验中掺加了纤维的水稳碎石材料的最佳含水率及最大干密度均与相同水泥掺量下普通水稳碎石材料的最佳含水率及最大干密度相同。

2 试验结果分析

2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度的试验在多功能路面材料强度试验机上进行,以研究纤维掺杂量对纤维水稳碎石材料无侧限抗压强度的影响规律。所用水泥剂量为 4%,选取 6 个纤维掺量 0%、0.5%、1%、2%、3%、4%,分别测定养护时间为 7、28、90 d 下的无侧限抗压强度,平行试验样本数为 8 个。标准试件按要求养护至预定时间后,浸水一昼夜,擦除表面水分后进行无侧限抗压强度试验。试验加载速率设定为 1 mm/min,试验结果如表 4 所示,绘制成变化曲线图如图 2 所示。

表 4 无侧限抗压强度试验结果

纤维掺量 /%	无侧限抗压强度平均值 /MPa					
	不掺	0.5	1	2	3	4
7 d	3.5	3.7	4.3	4.1	3.3	3.1
28 d	6.5	6.9	7.9	7.1	6.6	6.2
90 d	9.0	9.8	10.3	9.3	9.0	8.8

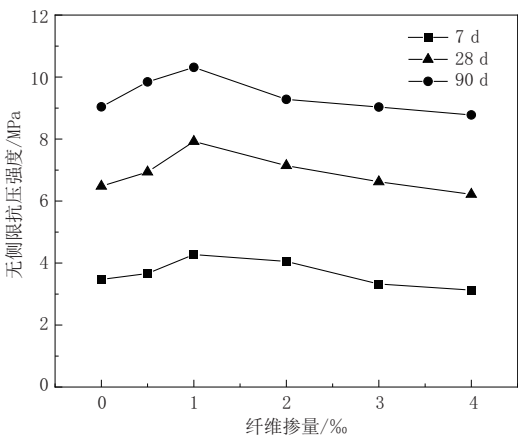


图 2 无侧限抗压强度试验结果

由图 2 可知,随纤维掺量增加,7、28、90 d 养护龄期下的纤维水稳碎石材料的无侧限抗压强度呈先增大后减小的趋势,其中,在纤维掺量 0~1% 的区间中,当纤维掺量逐渐增加时,不同养护龄期下的无侧限抗压强度均随之增加,当纤维掺量增加 1% 左右时,无侧限抗压强度达到峰值;在纤维掺量为 1%~4% 的区间中,不同养护龄期下的无侧限抗压强度则随掺量的增大而呈现下降趋势。在纤维掺量为 3%~4% 的区间中,各个龄期下呈现下降趋势的无侧限抗压强度均接近但低于不掺纤维的水稳碎石材料。

2.2 劈裂强度

劈裂强度试验过程与无侧限抗压强度相同,6种不同纤维掺量的纤维水稳碎石材料在养护7、28、90 d时的劈裂强度如表5和图3所示。

纤维掺量 /‰	劈裂强度平均值 /MPa					
	不掺	0.5	1	2	3	4
7 d	0.29	0.33	0.36	0.28	0.25	0.23
28 d	0.61	0.62	0.67	0.64	0.62	0.60
90 d	0.73	0.76	0.80	0.77	0.74	0.72

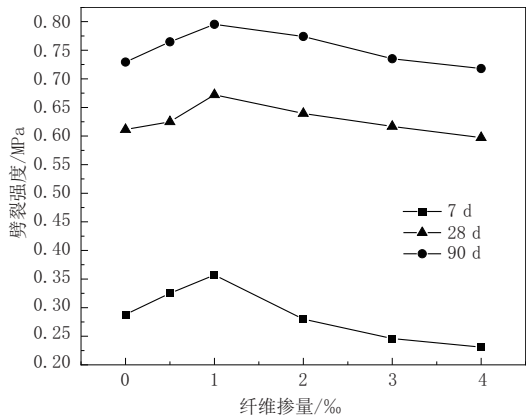


图3 劈裂强度试验结果

由图3可知,不同养护龄期下纤维水稳碎石材料的劈裂强度变化趋势与无侧限抗压强度的相同,均表现为随纤维掺量增加呈先增大后减小的趋势,养护龄期为7 d的劈裂强度的减小幅度更为显著,当纤维掺量增加到2‰后,7 d养护期的劈裂强度都低于普通水稳碎石材料。对于2‰纤维掺量的水稳碎石材料,养护时间的增加会对强度增强产生积极影响,当养护龄期在28 d和90 d时,其劈裂强度优于普通水稳碎石材料,但养护90 d后,纤维掺量大于3‰的水稳碎石材料劈裂强度仍低于普通水稳碎石材料。1‰纤维掺量时的劈裂强度增长最大,为9.04%。

综合无侧限抗压强度和劈裂强度数据,结果表明掺入适量的纤维对强度的提升有显著效果,但过量的纤维对水稳碎石材料的强度却有不利影响,当纤维掺入过量时,在试件成型过程中纤维难以均匀分散,而过量的纤维结团、集聚在集料缝隙之中,降低甚至没有起到纤维原本的拉扯、缠绕作用。若纤维集聚成团且占有体积过大时,将会降低集料间的嵌挤力,进而改变甚至破坏其原有的骨架结构,使其无法发挥原有的能力。因此,掺加过量的纤维不仅不会提高水稳碎石路面基层材料的强度,反而会出现降低趋势。

2.3 单轴压缩模量

单轴压缩模量是水稳碎石材料在单轴受压状态下,应力与应变的比值。与道路设计常用的回弹模量试验方法相比,单轴压缩模量试验能够更好地反映水稳碎石材料的抗变形能力。试验在单轴压缩模量测试仪上进行,试验开始前先安装传感器,然后以破坏荷载10%的压力对试件进行3 s的预加载,预加载完成后逐渐卸载至0,使试件与设备表面完全接触,然后开始试验,试验加载速率设定为1 mm/min,直至试件破坏。不同纤维掺量下水稳碎石材料单轴压缩模量的试验结果如图4所示。

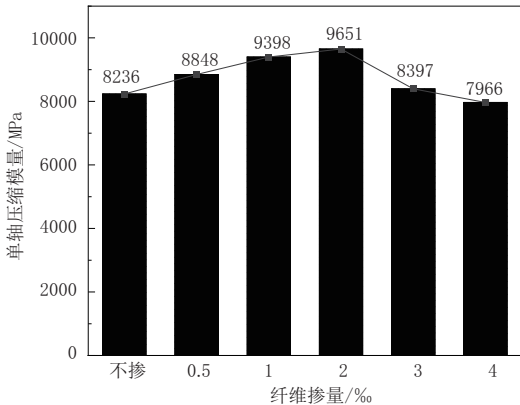


图4 单轴压缩模量试验结果

由图4可知,当纤维掺量逐渐增加时,水稳碎石材料的单轴压缩模量变化趋势为先增大后减小,其中,在0‰~2‰的区间内,单轴压缩模量呈现递增的趋势,在2‰~4‰的区间内,则呈现出递减的趋势,单轴压缩模量在2‰的纤维掺量时达到最大值,其数值从8 236 MPa增加到9 651 MPa;纤维掺量增加到4‰时,单轴压缩模量则下降至7 966 MPa,较普通水稳碎石材料的单轴压缩模量有所降低。由此可知,在相同应力水平下,掺加适当的纤维对提高水稳碎石材料抵抗竖向变形的能力有显著效果。以2‰为界,当纤维掺量超过2‰时,单轴压缩模量逐渐降低,其抵抗竖向变形的能力也随之降低。由此表明,纤维掺量在2‰时近乎达到饱和,继续增加纤维掺量,使得单位体积内的纤维超出分散极限,将会出现结团、聚集等现象,对水稳碎石材料单轴压缩模量的影响也逐渐减小,甚至对其产生不利影响。

2.4 温缩试验

按照规范采用静压成型100 mm×100 mm×400 mm的中梁试件进行温缩试验,在试件养护7 d结束后放入105℃烘箱进行水分烘干,直至恒重。选择50~40℃、40~30℃、30~20℃、20~10℃、10~0℃、0~-10℃和-10~-20℃七个温度区间,从50~40℃开始逐级降

温,每个温度区间恒温 3 h,降温速率为 0.5 ℃/min,读取前千分表数值,并记录温缩应变。6 种纤维掺量下温缩应变的试验结果如表 6 所示。

表 6 不同纤维掺量下的温缩应变 单位:10 ⁻⁵							
纤维掺量 /‰	50~40℃	40~30℃	30~20℃	20~10℃	10~0℃	0~-10℃	-10~-20℃
0	7.50	7.81	7.06	7.29	9.25	8.25	6.87
0.5	6.61	6.61	7.25	7.76	8.15	8.25	6.88
1	6.69	6.03	6.56	7.00	7.69	6.75	5.69
2	6.44	6.88	5.78	7.38	6.83	6.56	7.31
3	6.66	7.13	5.66	7.06	8.44	7.23	6.45
4	5.56	6.69	6.56	6.56	6.94	7.94	7.38

根据测得的温缩应变,计算得到在 6 种纤维掺量下水稳碎石材料的平均温缩系数变化如图 5 所示。

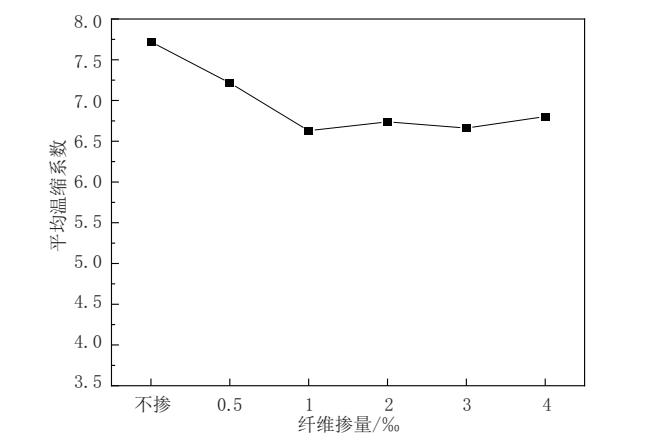


图 5 纤维水稳碎石材料平均温缩系数

由图 5 可知,随着纤维掺入量的逐渐增加,水稳碎石材料的平均温缩系数呈现先显著降低、后保持稳定的趋势。其中,纤维掺量在 0‰~1‰的区间内,当纤维掺入逐渐增加时,温缩系数线形减小,且变化显著。纤维掺量在 1‰~4‰区间内,纤维掺量的增加对水稳碎石材料的温缩系数的影响基本保持不变。在纤维掺量在水稳碎石材料中掺入纤维能够有效地降低平均温缩系数,表明纤维对于水稳碎石材料温缩性能的提升有积极作用,有利于水稳碎石材料抗裂性能的增强。

致使平均温缩系数发生该种变化的原因是水稳碎石材料较纤维的温度敏感性更为显著,水稳碎石材料的温缩系数约为纤维的十倍,在外界因素导致温度发生变化时,水稳碎石材料将首先产生体积变化,形成收缩应力,该应力会作用在掺入的纤维上,使得纤维抵抗由温度变化而产生的应力,限制水稳碎石材料的收缩,进而阻止其产生温缩开裂,对水稳碎石材料的温缩性能产生正向影响。

2.5 干缩试验

在干缩试验中选择纤维掺量为 0.5‰、1‰、2‰、3‰、4‰的 5 种不同的纤维水稳碎石材料进行试验研究,并将不掺纤维的普通水稳碎石材料作为对照。将试件安装在收缩仪上,放入恒温恒湿试验箱内,保持试验条件进行 20 d,对千分表数值进行记录并称测试件质量,试验结果如图 6 所示。

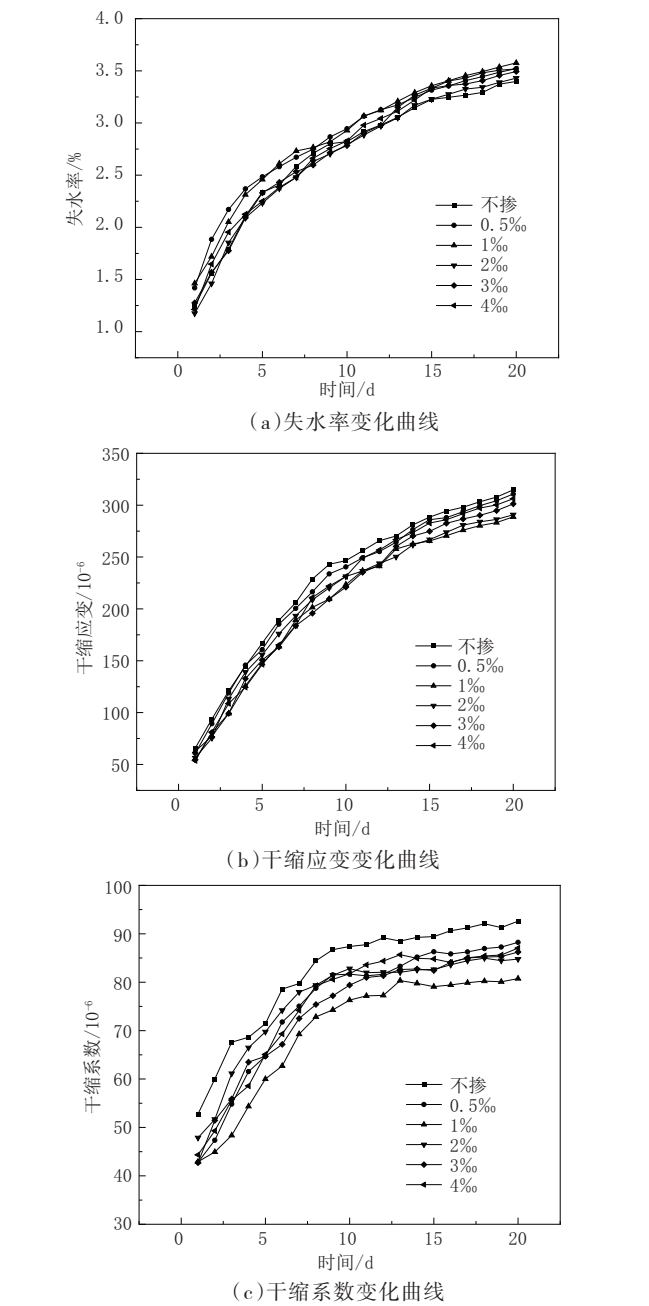


图 6 失水率、累计干缩应变与干缩系数随时间的变化规律

根据图 6 可知,在相同的试验环境下,6 种纤维掺量的水稳碎石材料的失水率变化趋势相同且区别显微。随着时间的增加,曲线斜率逐渐趋于平缓,表明养护时间的增加对水稳碎石材料失水率的变化在逐渐减小。且在试验观测中发现,变化趋势大小以 7 d

为界限,6种纤维掺量的水稳碎石材料在前7d失水速度较快,且失水速率减小较缓,从8d至试验结束,失水速度则逐渐降低,失水率减小速度较前7d更显著。产生该现象的原因为,干缩试验的准备工作中使用毛巾擦拭试件表面,但试件表面的空隙中仍存在大量水分与空气直接接触,导致试验前期试件的水分蒸发速度快、失水率高。试验中测得6种纤维掺量的水稳碎石材料前7d的失水率占20d失水率的75%到80%。

水稳碎石材料的累计干缩应变随时间的变化趋势与失水率随时间的变化趋势高度相似。均为随着时间增加,呈现出增大的趋势,且速率逐渐降低。其中,前7d水稳碎石材料的累计干缩应变占总体累计干缩应变的65%上下。不同纤维掺量的累计干缩应变在前7d没有明显的区别,但随着时间的推移,掺加纤维后,水稳碎石材料干缩应变累计值相比于普通水稳碎石材料更低。从图中可以明显看出,掺加1‰纤维的水稳碎石材料的后期干缩应变累计值相比其他纤维掺量更低。因此,该试验表明掺加纤维可以一定程度减小水稳碎石材料干缩应变。

当纤维掺量逐渐增加,水稳碎石材料的干缩系数整体变化趋势呈现先降低后上升的趋势,1‰纤维掺量下的干缩系数最低,干缩系数比普通水稳碎石材料低12.8%,其他掺量从小到大干缩系数分别降低了4.7%、8.5%、6.9%、6%。这说明,纤维可以提高水稳碎石材料的干缩性能。在1‰纤维掺量时,纤维改善水稳碎石材料干缩性能的效果最好。

3 结 语

本文将一种特种高韧性纤维掺入到水稳碎石材料中,对其进行了无侧限抗压强度、劈裂强度和单轴压缩模量三种力学性能试验及温缩试验和干缩试验,对于该纤维对水稳碎石材料路面性能的影响进行评定。通过上述分析,可得出以下结论。

(1)在相同级配的条件下,随着纤维掺入量逐渐增大,水稳碎石材料在养护龄期为7、28、90d时的无侧限抗压强度和劈裂强度变化曲线呈现出抛物线形,变化趋势为先增大后减小,且两种强度均在纤维掺量为1‰时达到最大值。

(2)在相同级配的条件下,当纤维掺入量逐渐增加,水稳碎石材料的单轴压缩模量的变化趋势同样为先增大后减小,纤维掺入量为2‰时,单轴压缩模量达到最大值。

(3)掺加适量纤维能够有效提升水稳碎石材料的力学性能,但当纤维掺入量大于3‰时,掺加纤维的水稳碎石材料力学性能指标均低于普通的水稳碎石材料,表明掺加过量的纤维,将对水稳碎石材料力学性能有不利影响。

(4)向水稳碎石材料掺入高韧性特种纤维,能够提高其温缩性能。随着纤维掺量逐渐增加,温缩系数先减小后保持稳定。纤维掺量在0~1‰范围内,温缩系数显著减小,说明对材料的温缩开裂有明显的改善,纤维掺量超过1‰后,温缩系数基本保持稳定。

(5)随着时间增加,失水率和累计干缩应变逐渐上升,但增长速率逐渐变缓。其中,前7d失水率和累计干缩应变增长较快。当纤维掺量逐渐增加,水稳碎石材料的干缩系数的整体变化趋势呈现先降低后上升的趋势,这表明纤维可以提高水稳碎石材料的干缩性能。1‰掺量时,纤维改善水稳碎石材料干缩性能的效果最好。

参考文献:

- [1] 李靖.基于界面弱化的水泥稳定碎石组成优化设计研究[D].南京:东南大学,2021.
- [2] 邓有左.半刚性基层沥青路面开裂原因及防治措施[J].公路,2001(6):54-66.
- [3] 张业兴,胡占红,吴禹.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.
- [4] 梁悦,邹晓翎.沥青路面 Top-Down 裂缝成因研究综述[J].中外公路,2021,41(3):58-65.
- [5] 马春锋.抗裂型水泥稳定碎石基层应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [6] 刘兰强,曹诚.聚丙烯纤维在混凝土中的阻裂效应研究[J].公路,2000(6):39-42.
- [7] Suleman M, Ahmad N, Ullah Khan S, et al. Investigating flexural performance of waste tires steel fibers-reinforced cement-treated mixtures for sustainable composite pavements[J].CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS,2021,275: 122099.
- [8] Jo B W, Chakraborty S, Kim H. Efficacy of alkali-treated jute as fibre reinforcement in enhancing the mechanical properties of cement mortar[J].MATERIALS AND STRUCTURES, 2016, 49(3):1093-1104.
- [9] 田源.土工合成材料对沥青路面抗裂性能的影响[J].中国科技论文,2019,14(12):1305-1310.
- [10] 雷蕾,姜慧,沈楸.嵌挤式橡胶沥青应力吸收层抗裂性能研究[J].公路,2021,66(6):1-6.
- [11] JTG/T F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S].
- [12] 高峰,郝洪洪,吴安利.低模量聚酯纤维/水泥基复合材料抗冲击性能及损伤机制[J].复合材料学报,2021,38(11): 3838-3849.
- [13] 马银华,易志坚,杨庆国.柔性纤维对水泥稳定粒料基层的阻裂增韧机理分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007,26(5): 84-86,144.
- [14] Romualdi J P, Batson G B. Mechanics of crack arrest in concrete[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1963, 89(3): 147-168.
- [15] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].