

聚酯纤维增强水泥稳定再生骨料性能试验研究

郭立成¹, 曾国东^{1,2}, 周敏², 黄红明², 万暑³, 韩庆奎³, 吴超凡^{3*}

(1. 佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山 528313; 2. 佛山市公路桥梁工程监测站有限公司;
3. 湖南云中再生科技股份有限公司)

摘要:该文主要研究聚酯纤维对水泥稳定再生骨料性能的改善作用,在不同的聚酯纤维掺量条件下,测试水泥稳定再生骨料的力学性能、抗冲刷性能与干缩性。研究表明:在一定聚酯纤维掺量范围内,随聚酯纤维掺量增加,水泥稳定再生骨料无侧限抗压强度先增加后减少,劈裂强度不断提高,抗压弹性模量变化规律与无侧限抗压强度变化规律类似,扫描电镜结果能较好地解释上述规律。另外,掺入聚酯纤维能显著提高水泥稳定再生骨料抗冲刷性能,并降低其干缩变形。

关键词: 聚酯纤维; 水泥稳定再生骨料; 力学性能; 抗冲刷性能

近些年,中国交通行业快速发展,截至2019年,中国公路通车总里程为501.25万km,其中高速公路达到14.96万km。但由于矿石资源过渡开采,并且环境污染严重,许多矿山因未达到相关标准而被关闭,造成近期中国砂石骨料价格猛涨,并且原材料供不应求。若不改变现状,中国交通设施建设难以持续发展。另一方面,中国建筑固体废物产生量逐年上升,据统计,2017年中国建筑固废产生量已达到24.9亿t。如此体量的建筑固废既需要大量土地进行堆积,又会引起严重环境污染问题。研究将建筑固废再利用于道路工程建设是解决上述问题的最有效途径。

水泥稳定碎石具有强度高、水稳定性和抗冻性好等优点,是各等级公路路面基层首选材料。将建筑固废破碎成再生骨料用于制备水泥稳定材料被认为是最快消纳建筑固废的途径。目前,国内外有部分相关研

究,胡力群等对水泥稳定废黏土砖再生集料基层材料性能进行了研究,结果表明:随黏土砖再生集料掺量的增加,试验试件的力学性能、干缩应变和抗冻指数逐渐降低;徐驰等研究了含再生骨料的半刚性基层材料的抗裂性能,得出在满足强度要求下,应尽量减少细集料和水泥掺量,以达到水泥稳定再生骨料抗裂性能的要求;Sobhan等以质量分数为92%的再生集料、4%的水泥、4%粉煤灰制备了路面基层材料,其具有较好的疲劳性能。

从上述研究中可得出:水泥稳定再生骨料具有强度低、干缩大、抗裂性能低等缺点,严重妨碍了水泥稳定再生骨料在道路基层中的推广应用。因此,研究一种改善水泥稳定再生骨料性能方法至关重要。而根据以往研究,掺加纤维是提升水泥稳定碎石性能的有效途径。基于以上原因,研究纤维掺量对水泥稳定再生

- *****
- [7] Husain N M, Karim M R, Mahmud H B, et al. Effects of Aggregate Gradation on the Physical Properties of Semi-Flexible Pavement[J]. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2014(4).
- [8] 宋家楠. 贯入式复合混凝土路面基层沥青混合料配合比设计[J]. *北方交通*, 2018(9).
- [9] 王风华, 王伟明, 吴旷怀. 半柔性路面大空隙基层沥青混

- 合料设计与性能研究[J]. *公路工程*, 2015(5).
- [10] 胡玲玲, 刘祖国, 张大可, 等. 半柔性复合路面基层沥青混合料设计方法[J]. *重庆交通学院学报*, 2006(5).
- [11] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [12] 郭金星, 张书华. 沥青种类对 SMA-13 级配的影响[J]. *公路交通科技*, 2018(9).

收稿日期:2020-10-17(修改稿)

基金项目:佛山市科技创新项目(编号:1920001000658);长沙市科技重大专项(编号:kq1804053);湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:201806)

作者简介:郭立成,男,大学本科,高级工程师. E-mail:809687771@qq.com

* 通信作者:吴超凡,男,博士,研究员. E-mail:42842788@qq.com

骨料性能影响具有十分重要的意义。

1 试验方法

1.1 原材料

水泥:采用 PC32.5 级水泥,密度为 3.12 g/cm³,技术指标参数见表 1。

聚酯纤维:由常州某工程材料有限公司提供,主要技术指标见表 2。

再生骨料:骨料由拆违建筑垃圾破碎而成,包括 0

~4.75、4.75~9.5、9.5~19 和 19~26.5 mm⁴ 档。按照 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》相关试验方法,测得集料性质指标如表 3 所示。

1.2 配比设计

(1) 再生骨料级配合成
混合料级配参考 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中水泥稳定级配碎石或砾石的推荐级配 C—C—1,通过对再生骨料水洗筛分,进而合成混合料级配情况如表 4 所示。

表 1 水泥技术指标

比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	标准稠 度/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
352	24.8	228	365	19.7	36.0	4.9	7.6

表 2 聚酯纤维主要技术指标

抗拉强 度/MPa	断面伸长 率/%	弹性模 量/GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	直径/ μm	水的质量 分数/%
≥450	≥2.5	≥4.5	1.38	16~24	≤1.8

表 3 再生骨料技术指标

砖混集 料/mm	表观密度/ (g·cm ⁻³)	毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	表干密度/ (g·cm ⁻³)	压碎值/ %	针片状 含量/%	含泥量/ %	砖渣含 量/%
19~26.5	2.55	2.08	2.28	32.9	6.4	0.1	21.2
9.5~19	2.62	2.10	2.24	30.8	7.6	1.3	28.7
4.75~9.5	2.56	1.98	2.22	34.7	7.3	4.7	23.6
0~4.75	2.58	2.05	2.20	—	—	10.7	—

表 4 级配合成

级配	通过下列方孔筛(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19.0	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	94.0	83.0	78.0	73.0	64.0	50.0	36.0	26.0	19.0	14.0	10.0	7.0
下限	90.0	81.0	67.0	61.0	54.0	45.0	30.0	19.0	12.0	8.0	5.0	3.0	2.0
再生骨料	99.2	93.7	77.1	71.3	63.6	52.6	36.2	27.3	22.3	15.8	10.3	8.1	5.3

(2) 击实试验
试验中混合料水泥掺量为 4.5%,聚酯纤维掺量为混合料质量的 0‰、0.3‰、0.5‰、0.7‰、1.0‰,通过重型击实方法获得最大干密度和最佳含水率,为验证一定聚酯纤维掺量对混合料最大干密度和最佳含水率的影响,试验对不同聚酯纤维掺量的混合料进行击实试验,其结果如表 5 所示。

从表 5 可得:随着聚酯纤维掺量增加,水泥稳定再

生骨料最大干密度和最佳含水率变化均较小,其变化值在 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》所规定两次重复试验容许误差之内,因此可认定,当聚酯纤维掺量在 1.0‰以内时,聚酯纤维掺量对水泥稳定材料最大干密度和最佳含水率无影响。在以往的研究中也出现过类似的结论。后续研究中混合料最大干密度与最佳含水率统一为 1.912 g/cm³ 与 13.1%。

表 5 击实试验结果

试样编号	聚酯纤维 掺量/%	最佳含水 率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
P0	0	13.1	1.912
P3	0.3	13.2	1.909
P5	0.5	12.9	1.913
P7	0.7	13.1	1.910
P10	1.0	12.8	1.911

1.3 性能测试方法

试验主要研究聚酯纤维掺量对水泥稳定再生骨料力学、模量、耐久性能的影响,试件成型、养护和测试方法参考 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。力学性能主要测试 7、28 和 90 d 无侧限抗压强度与劈裂抗拉强度,模量测试 28 d 抗压弹性模量,耐久性测试为试件 28 d 抗冲刷性能和 90 d 干缩系数,另采用 28 d 试件制片进行扫描电镜分析。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

图 1 为水泥稳定再生骨料试件无侧限抗压强度随龄期的变化规律。

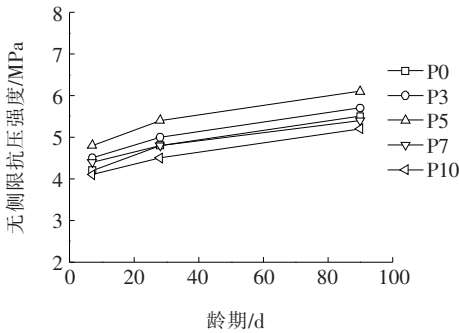


图 1 无侧限抗压强度与龄期关系曲线

从图 1 可得:所有试件前 7 d 强度发展较快,7 d 以后强度增长缓慢。聚酯纤维掺量为 0.5‰ 的试件无侧限抗压强度最高,7 d 强度接近 5 MPa,而聚酯纤维掺量为 1.0‰ 的试件无侧限抗压强度最低。当聚酯纤维掺量在 0.5‰ 以内时,水泥稳定再生骨料试件强度随聚酯纤维掺量增加而增大,当纤维掺量超过 0.5‰ 时,强度随纤维掺量增加而有一定幅度下降。已有研究表明:随纤维掺量增加,水泥稳定碎石抗压强度先增加后减少。一定的聚酯纤维掺量,能提高水泥稳

定再生骨料试件整体性,在试件受压过程中,阻止微裂缝的发展,从而提高试件无侧限抗压强度,但随着纤维掺量继续增加,骨料与水泥水化产物凝胶接触面减少,更多的凝胶黏附在纤维上,所以基体整体强度下降。由此可知,对于水泥稳定再生骨料,由于再生骨料吸水率大,且含泥量大,通过直接增加水泥含量提高强度会使试件收缩变大,从而导致材料结构易开裂,因此通过掺配一定量的纤维改善其强度是较好的选择。

2.2 劈裂抗拉强度

图 2 为水泥稳定再生骨料试件劈裂抗拉强度随龄期的变化规律。

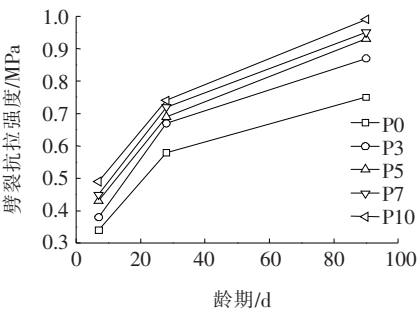


图 2 劈裂抗拉强度与龄期关系曲线

从图 2 可知:无聚酯纤维的水泥稳定再生骨料试件劈裂抗拉强度最低,掺有聚酯纤维的试件劈裂抗拉强度都有提高,且聚酯纤维掺量为 1.0‰ 的试件劈裂抗拉强度最大。随纤维量增加,试件劈裂抗拉强度变化规律与无侧限抗压强度变化规律不同,试件劈裂强度随纤维量增加而变大。已有研究表明:水泥稳定天然碎石材料劈裂抗拉强度主要影响因素是骨料与水泥的黏结性能。但由于再生骨料强度比天然碎石低,所以水泥稳定再生骨料试件劈裂破裂面上,有较多再生骨料裂成两部分,所以骨料与水泥黏结性并不是影响试件劈裂强度的主要因素。掺加聚酯纤维能在水泥稳定再生骨料体系形成无序的网状结构,延缓试件劈裂试验中裂缝的发展,因而在此次试验聚酯纤维掺量条件下,聚酯纤维掺量越高,试件劈裂抗拉强度越大。

2.3 抗压弹性模量

图 3 为水泥稳定再生骨料抗压弹性模量随聚酯纤维掺量的变化情况,图 3 中无聚酯纤维试件抗压弹性模量相对最小,而聚酯纤维掺量为 0.5‰ 的试件抗压弹性模量最大,试件抗压弹性模量随聚酯纤维掺量增加而先变大后变小,这与图 1 中无侧限抗压强度随聚酯纤维掺量增加变化规律相似。

2.4 冲刷试验

图 4 为水泥稳定再生骨料试件养护 28 d 后进行

冲刷试验所得的质量损失率与冲刷时间关系曲线。

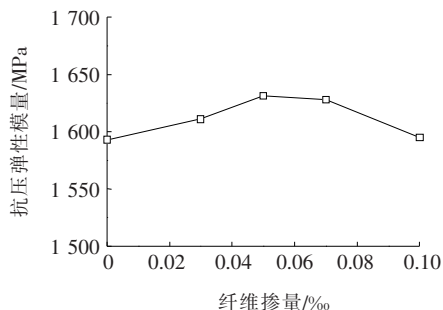


图3 抗压弹性模量与纤维掺量关系曲线

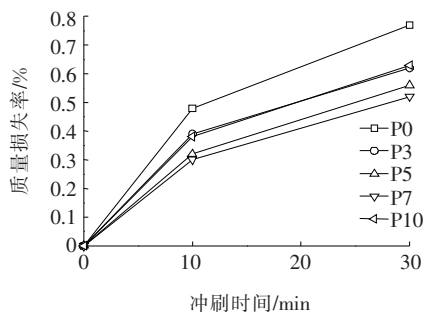


图4 水泥稳定再生骨料试件冲刷质量损失率与冲刷时间关系曲线

从图4可得:未掺聚酯纤维的P0试件经过一定时间的冲刷后质量损失率最大,聚酯纤维掺量为0.5‰的P5试件和掺量为0.7‰的P7试件在同等冲刷条件下质量损失率相对较小。以上结果说明聚酯纤维能有效提高水泥稳定再生骨料抗冲刷性能,但以0.5‰左右掺量效果最佳。类似研究表明:纤维能提高水泥稳定碎石基层材料的抗冲刷性能,主要原因是在试件进行冲刷的过程中,试件外部产生许多微裂缝,纤维的掺入能增加水泥稳定基层材料抗裂能力,阻止微裂缝的进一步发展,减少试件由冲刷造成的质量损失。

2.5 干缩试验

图5为水泥稳定再生骨料干缩系数与聚酯纤维掺量的关系曲线。

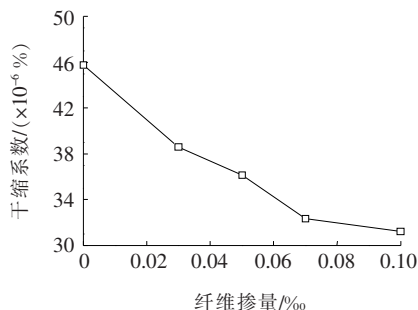


图5 干缩系数与聚酯纤维掺量关系曲线

从图5可知:聚酯纤维掺入能有效降低试件干缩系数。随聚酯纤维掺量增加,试件干缩系数不断下降。纤维掺量为1.0‰的试件干缩系数比无纤维试件干缩系数降低35%左右。由于聚酯纤维在水泥稳定再生骨料基体中呈无序网状分布,所以能有效约束试件由失水造成的收缩形变。由上述分析可得,再生骨料吸水率大、含泥量高,因而水泥稳定再生骨料试件干缩较大,如直接用于道路基层会出现较多收缩裂缝。通过掺加聚酯纤维能有效抑制水泥稳定再生骨料干缩,减少材料用于道路结构层时收缩裂缝的产生。

2.6 扫描电镜

图6为不同聚酯纤维掺量条件下水泥稳定再生集料扫描电镜照片。

从图6(a)可知:再生集料与水泥水化产物的界面处存在多条裂缝。从图6(b)、(c)可得:随着聚酯纤维的掺入,再生集料、聚酯纤维和水泥水化产物结合较为紧密,较少发现裂缝。而从图6(d)可得,随着聚酯纤维掺量的增加,再生集料、聚酯纤维和水泥水化产物结合之处逐渐出现较多裂缝。

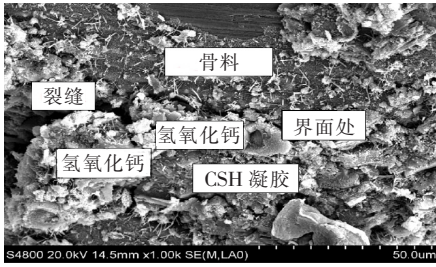
上述现象较好地解释了水泥稳定再生集料随聚酯纤维掺量增加强度先变大后变小,当无聚酯纤维掺入时,水泥水化后所形成的胶结产物与再生集料的界面处存在较多裂缝,在试件承受外界荷载时,界面处的裂缝逐渐变大,最终使试件整体破坏的规律。随着聚酯纤维的掺入,使结合处的裂缝减少,且聚酯纤维无序的网状分布,能在试件受力时抑制结合处的微裂缝进一步发展。但当聚酯纤维掺量进一步增大时,水泥水化所形成的胶结产物过多与聚酯纤维黏结,所以再生集料、聚酯纤维和水泥水化产物结合之处出现较多微裂缝,试件的整体强度下降。

2.7 经济性分析

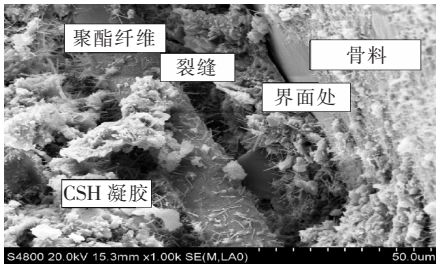
聚酯纤维市场售价约为20元/kg,由于水泥稳定再生集料中所需的聚酯纤维掺量较少,仅为0.3‰~0.5‰,所以每吨水泥稳定再生集料成本增加不多,相比普通水泥稳定天然集料,聚酯纤维水泥稳定再生集料整体成本较低。而且聚酯纤维的掺入可以显著提高道路的使用性能,节约大量路面使用过程中的维修费用,延长了道路的使用寿命,因此聚酯纤维水泥稳定再生集料应用于路面基层具有较好的经济效益。

3 结论

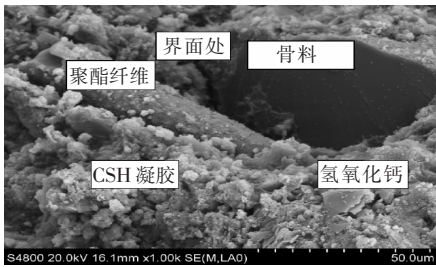
该文主要研究聚酯纤维对水泥稳定再生骨料性能



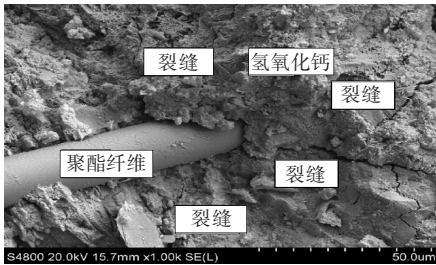
(a) 聚酯纤维掺量 0‰



(b) 聚酯纤维掺量 0.3‰



(c) 聚酯纤维掺量 0.5‰



(d) 聚酯纤维掺量 1.0‰

图 6 不同聚酯纤维掺量的水泥稳定再生集料扫描电镜照片

的改善作用,在不同的聚酯纤维掺量条件下,测试水泥稳定再生骨料力学性能、抗冲刷性能与干缩性。得出如下结论:

(1) 再生骨料具有吸水率大、压碎值大等特点,直接将再生骨料用于制作水泥稳定材料具有强度低、干缩大等缺点。

(2) 聚酯纤维的掺入能有效提高水泥稳定再生骨料力学性能,在一定聚酯纤维掺量范围内,随聚酯纤维掺量增加,水泥稳定再生骨料无侧限抗压强度先增加后减少,劈裂强度不断提高,抗压弹性模量变化规律与无侧限抗压强度变化规律类似,扫描电镜结果能较好地解释上述规律。

(3) 掺入聚酯纤维能显著提高水泥稳定再生骨料的抗冲刷性能,并降低其干缩变形,当聚酯纤维掺量为 0.7‰时效果最佳,主要原因是聚酯纤维无序分布在水泥稳定再生骨料基体内,能有效抑制其在受力过程中微裂缝的发展。

参考文献:

- [1] Janile O, Mustafa H, Bora C, et al. Mechanical and Environmental Suitability of Recycled Concrete Aggregate as a Highway Base Material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(9): 60—67.
- [2] Tutumluer E, Pan T. Aggregate Morphology Affecting Strength and Permanent Deformation Behavior of Wn-bound Aggregate Materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(9): 617—627.
- [3] 胡力群,沙爱民. 水泥稳定废黏土砖再生集料基层材料性能试验[J]. 中国公路学报, 2012(3).
- [4] 徐驰. 利用再生集料的半刚性基层抗裂性能研究[J]. 华南理工大学硕士学位论文, 2012.
- [5] Sobhan K, Krizek R J. Fatigue Behavior of Fiber—Reinforced Recycled Aggregate Base Course[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(2): 124—130.
- [6] 许鹏,卢明智,王楹. 纤维增强水泥稳定碎石路用性能研究[J]. 道路工程, 2017(9).
- [7] 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(1).
- [8] 沙爱民,胡力群. 半刚性基层材料的结构特征[J]. 中国公路学报, 2008(4).
- [9] 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料的抗冲刷性能[J]. 建筑材料学报, 2010(2).
- [10] 展宏图,柳力. 玄武岩纤维/橡胶复合改性沥青胶浆路用性能研究[J]. 中外公路, 2020(1).
- [11] 岳爱军,韩涛,谭波,等. 陶瓷废料在水泥混凝土路面中的再生应用研究[J]. 中外公路, 2020(4).