

Crack Resistance and Anti-Erosion Performance of Cement Stabilized Macadam Reinforced with Polyvinyl Alcohol Fiber

Xingguo Peng¹, Huiqiang Chen^{2*}, Tao Lan², Liang Xiong²

¹CRCC Chongqing Investment Group Co. LTD., Chongqing

²Chongqing JiaoTong University, Chongqing

Email: *chqlxj@126.com

Received: Sep. 19th, 2019; accepted: Oct. 8th, 2019; published: Oct. 15th, 2019

Abstract

To improve the crack resistance and anti-erosion performance of cement stabilized macadam in high altitude area, the effects of cement content, PVA fiber content and curing period on mechanical properties and crack resistance were investigated. This paper reasonably quantified cement and PVA fiber content. The results showed that dry shrinkage coefficient significantly decreased with increase of curing period, mainly in the first seven days. The increase of fiber content and decrease of cement content improved the crack resistance of cement stabilized macadam. When the fiber content was 0.9 wt% and the cement content was 5.0 wt%, both crack resistance and anti-erosion performance of cement stabilized macadam were excellent.

Keywords

Polyvinyl Alcohol Fiber, Cement Stabilized Macadam, Crack Resistance, Anti-Erosion Performance

聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石的抗裂性和抗冲刷性能

彭兴国¹, 陈辉强^{2*}, 兰滔², 熊亮²

¹中铁建重庆投资集团有限公司, 重庆

²重庆交通大学, 重庆

Email: *chqlxj@126.com

收稿日期: 2019年9月19日; 录用日期: 2019年10月8日; 发布日期: 2019年10月15日

*通讯作者。

摘要

为改善高海拔地区水泥稳定碎石的抗裂性和抗冲刷能力,分别研究了水泥用量、聚乙烯醇纤维掺量与龄期对水泥稳定碎石的路用性能的影响规律,确定了适用于高海拔地区水泥稳定碎石的合理水泥用量和聚乙烯醇纤维掺量。结果表明,随着龄期的增长,干缩系数显著下降,且下降幅度主要集中在前7天;较高的聚乙烯醇纤维掺量和较低的水泥用量有利于水泥稳定碎石抗裂性的提升,当纤维掺量在0.9 wt%、水泥用量为5.0 wt%时水泥稳定碎石不仅具有良好的抗裂性能,而且具有优良的抗冲刷性能。

关键词

聚乙烯醇纤维, 水泥稳定碎石, 抗裂性能, 抗冲刷性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泥稳定碎石基层以强度高、承载能力强、建设成本相对经济等诸多优点广泛应用于我国公路建设工程中,是我国目前甚至今后相当长一时期内各级公路基层的主要形式[1]。然而,水泥稳定碎石基层由于容易开裂、抗冲刷能力不足等局限性在一定程度上限制了其应用,高海拔山区特殊的气候条件和恶劣的自然环境对半刚性基层抗裂性和抗冲刷能力提出了更高的要求[2] [3]。针对水泥稳定碎石开裂的问题,诸多学者围绕干缩系数和温缩系数开展了大量研究,如通过提高水泥稳定碎石的密实度、掺加适量粉煤灰或聚丙烯纤维等途径以达到提高其抗裂性的目的[4] [5] [6] [7],取得了较显著的成果;同时,针对水泥稳定碎石抗冲刷能力不足的问题,通过优化其材料组成配比、掺入外加剂等方式也进行了系列研究[8] [9] [10],但就如何提高水泥稳定碎石在低温环境下抗裂性的同时,兼顾其抗冲刷性能的相关文献却鲜有报道。聚乙烯醇纤维物理性质与聚丙烯纤维近似,且聚乙烯醇纤维强度更高、韧性更好、耐久性能更良好[11] [12] [13],但关于采用聚乙烯醇纤维改善基层材料抗裂性和抗冲刷能力研究目前未见报道。本文采用掺入聚乙烯醇纤维的方法,通过干缩试验、温缩试验、无侧限抗压和抗拉试验方法[14] [15],系统研究水泥稳定碎石的力学性能和抗裂性能随水泥用量、纤维掺量和龄期改变的变化规律,并确定合理的水泥用量和纤维掺量,进而研究聚乙烯醇水泥稳定碎石的抗冲刷性能。

2. 试验

2.1. 原材料

试验采用上海影佳实业公司生产的聚乙烯醇纤维,水泥采用重庆拉法基公司生产的42.5等级的普通硅酸盐水泥,其性能分别列于表1和表2。

Table 1. Physical properties of polyvinyl alcohol fiber

表1. 聚乙烯醇纤维的主要物理性能

种类	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	极限延伸率/%	直径/ μm	密度/(g/cm^3)
聚乙烯醇纤维	30~40	1200~1500	6.0	20.0	1.3

Table 2. Technical indexes of cement
表 2. 水泥主要技术指标

项目	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝时间	终凝时间	3 d	28 d	3 d	28 d
技术要求	≥45	≤600	≥17	≥42.5	≥3.5	≥6.5
结果	172	249	20.5	47.2	3.9	7.0

集料采用重庆本地石灰岩, 技术指标列于表 3, 相应骨架密实型水泥稳定碎石级配列于表 4。

Table 3. Main technical indexes of macadam
表 3. 集料主要技术指标

粒径/mm	密度/(g/cm ³)	吸水率/%	压碎值/%
20~30	2.687	0.2	/
15~20	2.658	0.4	15.4
10~15	2.633	0.5	14.1
5~10	2.608	0.7	/
3~5	2.612	0.6	/
0~3	2.586	1.1	/

Table 4. Gradation of macadam
表 4. 碎石级配

筛孔尺寸/mm	31.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
通过率/%	100	90	78	66	50	37	27	16	11	2

2.2. 试验设计

1) 试验固定聚乙烯醇纤维掺量(体积分数)为 0.9%, 分别测试水泥用量(质量分数)为 4.0%、5.0%、6.0%、7.0%时聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石在 28 d 龄期的干缩系数和温缩系数, 分析水泥用量对水泥稳定碎石抗裂性的影响规律, 确定合理的水泥用量。

2) 采用合理的水泥用量, 分别测试聚乙烯醇纤维掺量分别为 0.6%、0.9%、1.2%、1.5%时水泥稳定碎石 28 d 龄期的干缩系数和温缩系数, 分析纤维掺量对水泥稳定碎石抗裂性的影响规律, 并确定合理的纤维掺量。

3) 测试聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石在 3 d、7 d、14 d 及 28 d 不同龄期下的干缩系数、温缩系数和抗拉强度, 分析龄期对聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石抗裂性的变化规律及其强度形成机理。

4) 分别测试聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石和普通水泥稳定碎石的 7 d、28 d 的无侧限抗压强度和抗拉强度, 研究聚乙烯醇纤维对水泥稳定碎石强度的影响。

5) 将试件在标准条件下养生 90 天, 饱水 24 h, 然后将其固定在冲刷仪上进行冲刷试验, 分别测试聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石和普通水泥稳定碎石在相同级配下的抗冲刷能力。为了提高试验的精确度, 首先要除掉试件表面粘结不牢的细集料。

2.3. 试件的制备

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51-2009)》进行击实试验确定最大干密度和最佳含水量[14][15]。采用静压法成型试件, 其中用于干缩试验和温缩试验的试件尺寸为: 标准梁式 100 mm ×

100 mm × 400 mm; 用于无侧限抗压强度试验、抗拉强度试验及抗冲刷实验的试件尺寸均为: 标准圆柱式 150 mm × 150 mm, 并按规定条件进行养生。

3. 结果与讨论

干缩系数和温缩系数是评价抗裂性的可靠指标。通过对各个试件进行干缩性能试验, 得到最大干缩应变和干缩系数; 进行温缩试验, 温度区间为 40℃至-20℃即最大温差为 60℃, 得到最大温缩应变和温缩系数; 进行无侧限抗压试验、抗拉强度试验及抗冲刷实验得到无侧限抗压强度、抗拉强度及抗冲刷性能。

3.1. 水泥用量的影响

纤维掺量固定为 0.9‰, 龄期 28 d, 试验结果见表 5、图 1 和图 2。

Table 5. Effects of cement on crack resistance of cement stabilized macadam

表 5. 水泥用量对水泥稳定碎石抗裂性的影响

试件编号	水泥掺量/%	最大失水量/%	最大干缩应变 /10 ⁻⁶	干缩系数 /10 ⁻⁶ /%	最大温缩应变 /10 ⁻⁶	温缩系数 /10 ⁻⁶ /℃
A1	4%	4.17	120	28.7	412	6.86
A2	5%	4.27	145	34.0	452	7.53
A3	6%	4.31	212	49.2	486	8.1
A4	7%	4.40	307	69.8	502	8.36

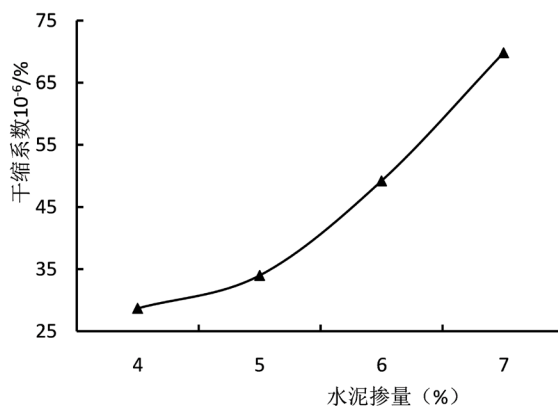


Figure 1. Effects of cement on dry shrinkage coefficient

图 1. 水泥掺量对干缩系数的影响

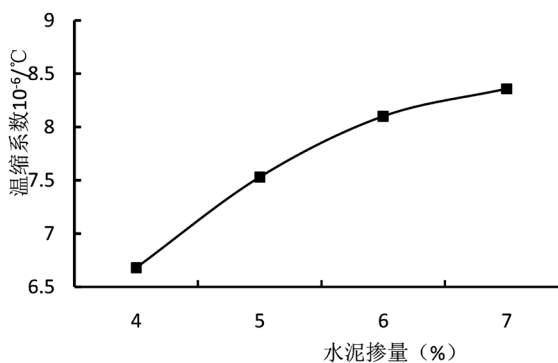


Figure 2. Effects of cement on thermal shrinkage coefficient

图 2. 水泥掺量对温缩系数的影响

试验结果表明,随着水泥用量的增加,水泥稳定碎石的干缩系数和温缩系数均增长明显;当水泥用量超过 5.0%后,水泥稳定碎石的干缩系数增幅显著增大,表明较大的水泥用量对水泥稳定碎石的抗裂性有不利影响。主要是因为随着水泥用量的增大,水泥稳定碎石水化作用所需要的水分也随之增加,因此干缩系数增大;随着水泥用量的增加,具有较高强度及收缩性能的水泥水化物也增加,从而使纤维水泥稳定碎石的温缩系数增加。综合考虑抗裂性、强度以及经济性指标,确定本次研究中水泥的合理用量为 5.0%。

3.2. 纤维用量的影响

水泥掺量取 5.0%,龄期 28 d,分别测试添加不同掺量的聚乙烯醇纤维后水泥稳定碎石的干缩系数和温缩系数,试验结果见表 6、图 3 和图 4。

Table 6. Effects of fiber on crack resistance of cement stabilized macadam

表 6. 纤维用量对水泥稳定碎石抗裂性影响试验结果

试件编号	纤维掺量/%	最大失水量/%	最大干缩应变 / 10^{-6}	干缩系数 / $10^{-6}/\%$	最大温缩应变 / 10^{-6}	温缩系数 / $10^{-6}/\text{ }^{\circ}\text{C}$
B0	0	3.90	198	50.8	487	8.12
B1	0.6	4.12	158	38.3	473	7.88
B2	0.9	4.27	145	34.0	452	7.53
B3	1.2	4.15	132	31.8	436	7.27
B4	1.5	4.13	125	30.2	416	6.93

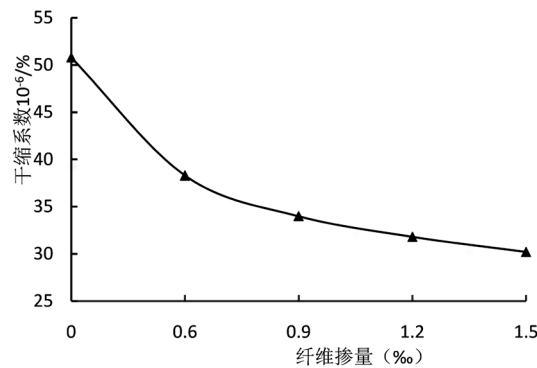


Figure 3. Effects of fiber on dry shrinkage coefficient

图 3. 纤维掺量对干缩系数的影响

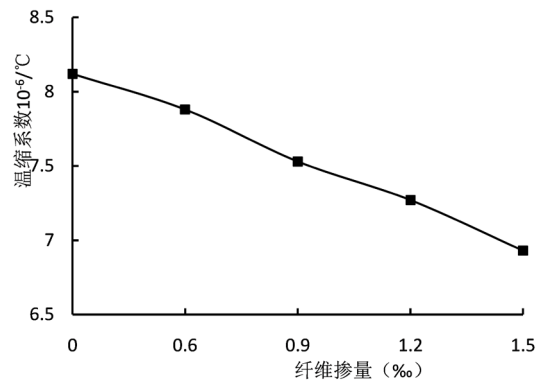


Figure 4. Effects of fiber on thermal shrinkage coefficient

图 4. 纤维掺量对温缩系数的影响

试验结果表明,随着聚乙烯醇纤维掺量的增加,水泥稳定碎石的温缩系数持续缓慢下降,而干缩系数呈现出较显著的下降趋势。当纤维掺量达到 0.9‰时,水泥稳定碎石的干缩系数为 34.0,相对于未添加纤维时已下降了 33.1%;但随着纤维掺量的继续增大,干缩系数的下降幅度明显变缓,表明继续增大纤维掺量对水泥稳定碎石抗裂性的作用不大。干燥收缩与水泥稳定碎石含水量损失紧密相关,干缩是由含水量的降低而导致水泥稳定碎石的宏观体积减小。半刚性材料由于含水量的减少而发生的毛细管作用、吸附作用、分子间力作用、材料矿物晶体或凝胶体间的层间水作用等会引起干燥收缩[1]。水泥稳定碎石材料首先损失的是大孔隙中的自由水,然后是毛细管中的水。自由水的蒸发一般不会引起材料宏观体积的变化;而当毛细管中的水分减少时,毛细管的孔径就会越来越细,毛细管张力则不断增加,表现为材料的宏观体积不断减小。毛细管作用后,随着含水量的继续降低,吸附水和分子间力开始起作用,颗粒表面的吸附水膜逐渐变薄,颗粒间距逐渐变小,分子应力逐渐增加,导致水泥稳定碎石宏观体积进一步缩小。而添加一定量的聚乙烯醇纤维之后,纤维在材料内部形成一个三维立体交错的网络结构,一方面承担了一部分内应力,另一方面挤压甚至阻塞内部的毛细管,抑制了因水分从毛细管流失而形成的表面张力,水泥稳定碎石的表面开裂状况得以缓解,因此抗干缩开裂性能得以提升[2]。掺入一定量的纤维后,由于纤维对温度不敏感,有着比水泥稳定碎石小得多的温缩系数,在水泥稳定碎石中呈三维乱向分布,因此聚乙烯醇纤维掺入水泥稳定碎石中对其温缩系数的减小具有一定作用。综合考虑抗裂性、强度及经济性指标,选取 0.9‰作为本次研究聚乙烯醇纤维的合理用量。

3.3. 龄期的影响及强度增长机理

根据以上试验结果,水泥掺量取 5.0%,纤维掺量固定为 0.9‰,试验结果见表 7。

Table 7. Effects of curing age on crack resistance of cement stabilized macadam

表 7. 龄期影响对水泥稳定碎石抗裂性试验结果

龄期/d	最大失水量/%	最大干缩应/10 ⁶	干缩系数/10 ⁶	最大温缩应变/10 ⁶	温缩系数/10 ⁶ / °C	间接抗拉强度/MPa
3	3.92	246	62.8	362	6.03	0.17
7	4.07	162	39.8	378	6.30	0.24
14	4.18	151	36.1	427	7.12	0.58
28	4.27	145	34.0	473	7.88	0.76

试验结果表明,随着养护龄期的增加,干缩系数逐渐减小,前 7 d 减小趋势剧烈,而温缩系数逐渐增大,但随着龄期的增加温缩系数缓慢增长。分析其原因,干缩主要由水泥稳定碎石中水分散失而产生的,这种水分的散失主要集中在养生的前 7 天,之后水分的散失作用逐渐降低,体现为前 7 天的干缩系数增长迅速,之后增长缓慢;水泥是形成水泥稳定碎石强度的主要胶结物,有着比矿料更高的强度和更大的温缩系数。随着龄期的增长和水泥水化硬化反应的进一步推进,以水泥凝胶形式存在的胶结物在整体体系中所占比例越来越大,而它们本身的干温缩系数又比集料大,因此随着龄期的增大,水泥稳定碎石的温缩系数增加,宏观上体现为水泥稳定碎石抗裂性的降低。随着龄期的增长,抗拉强度呈现初期增长迅速后期逐渐放缓的趋势,这是由硅酸盐水泥中的四种矿物各自的含量及其在水化过程中的行为决定的。 C_3A 尽管含量不高,但是反应速度最快,其含量决定水泥凝结速度和释热量,对水泥早期强度起主导作用; C_3S 水化速度较快且含量高, C_3S 水化产物对水泥早期强度和后期强度起主要作用; C_4AF 通常含量约为 10%,遇水反应较快,水化热较高,主要对抗弯拉强度起重要作用; C_2S 在硅酸盐水泥中含量与 C_3S 大致相近,其遇水反应速度最慢,水化热也较低,主要对水泥后期强度起重要作用。因此,水泥

中四种矿物含量及其各自的水化行为的不同导致聚乙烯醇纤维稳定碎石初期强度增长较快, 中后期强度逐渐趋于平稳。

3.4. 强度试验

分别对龄期为 7 d 和 28 d 的水泥掺量取 5%且纤维掺量取 0.9‰的聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石和普通水泥稳定碎石的抗压、抗拉强度进行试验, 结果如表 8 所示。

Table 8. Result of strength test

表 8. 强度试验结果

类别		聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石	普通水泥稳定碎石
无侧限抗压强度(MPa)	7 d	4.07	4.51
	28 d	7.69	7.75
抗拉强度(MPa)	7 d	0.28	0.31
	28 d	0.63	0.58

试验结果表明, 前期聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石比普通水泥稳定碎石抗压强度低 9.76%, 抗拉强度低 9.67%; 随着龄期的增长, 两者强度接近, 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石比普通水泥稳定碎石抗压强度低 0.77%, 抗拉强度高 8.6%。这是因为前期纤维与水泥基的连接很弱, 并且阻隔了水泥网状晶体的形成, 而后期纤维水泥基共同受力使得强度增加。

3.5. 抗冲刷性能测试

高海拔地区山体水对半刚性基层的冲刷和积压在半刚性基层空隙中的动水作用是半刚性基层早期病害的主要原因, 因此研究聚乙烯醇水泥稳定碎石的抗冲刷能力是非常必要的。本实验选用标准条件养生 90 天的试件进行冲刷试验, 结果见表 9 和图 5。

Table 9. Cement stabilized macadam scour test results

表 9. 水泥稳定碎石冲刷试验结果

水泥稳定碎石类别	聚乙烯醇水泥碎石			普通水泥稳定碎石		
	分计冲刷量 /g	累计冲刷量 /g	冲刷率 /(g/min)	分计冲刷量 /g	累计冲刷量 /g	冲刷率 /(g/min)
3	1.215	1.215	0.405	1.680	1.680	0.56
7	4.776	5.991	0.318	5.931	7.611	0.395
11	4.425	10.416	0.295	5.127	12.738	0.342
15	2.458	12.874	0.164	2.893	15.7216	0.193

试验结果表明, 随着时间的增加, 两种水泥稳定碎石混合料的冲刷率逐渐下降, 聚乙烯醇水泥稳定碎石在不同时间段的冲刷量和冲刷率均低于普通水泥稳定碎石, 说明聚乙烯醇水泥稳定碎石具有更优良的抗冲刷能力。在相同级配下, 水泥稳定碎石的抗冲刷能力主要取决于混合料中集料的排列结构、密实程度和细集料的粘附特性。冲刷过程中被冲掉的主要是细颗粒, 聚乙烯醇在水泥稳定碎石中一方面加强了粗细集料的紧密结合, 形成立体网状结构; 另一方面对细集料起着保护作用, 从而提高了混合料的抗冲刷能力。

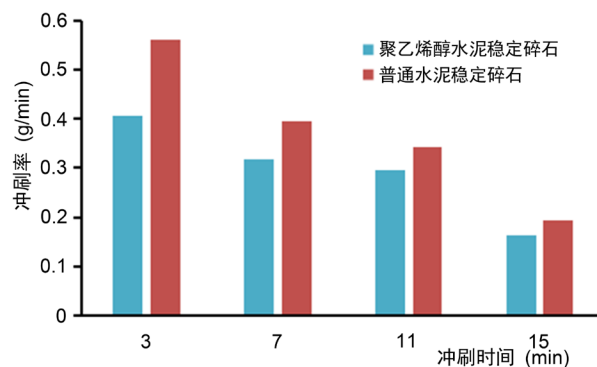


Figure 5. Scour rate of two kinds of cement stabilized macadam under different scour time
图 5. 不同冲刷时间下两种水泥稳定碎石的冲刷率

4. 结语

1) 聚乙烯醇纤维能有效降低水泥稳定碎石的抗裂性, 综合考虑抗裂性能、强度指标和经济性, 确定纤维的合理掺量为 0.9%。

2) 水泥稳定碎石的干缩系数和温缩系数随着水泥用量增大而增大, 当水泥用量超过 5.0% 后, 干缩系数增幅显著增大, 确定水泥合理用量为 5.0%。

3) 与普通水泥稳定碎石相比, 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石的抗冲刷性能显著增强, 有利于提升高海拔地区沥青路面的使用耐久性。

基金项目

国家自然科学基金项目(51678098)。

参考文献

- [1] 周启伟, 叶伟, 等. 水泥稳定碎石低温强度与干缩特性分析[J]. 硅酸盐学报, 2016, 35(3): 948-952.
- [2] Kjellsen, K.O. and Lagerblad, B. (2007) Microstructure of Tricalcium Silicate and Portland Cement Systems at Middle Periods of Hydration Development of Hadley Grains. *Cement and Concrete Research*, 37, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.008>
- [3] 朱唐亮, 谈至明. 半刚性基层材料抗冲刷性能影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 41-46.
- [4] 潘钻峰, 汪卫, 等. 混杂聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 33-40.
- [5] 唐羽, 吴国雄, 等. 半刚性基层沥青路面基层间界面强度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 33-37.
- [6] 张静, 魏连雨, 等. 水泥稳定碎石早期微裂干缩性能试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2016, 35(11): 3865-3869.
- [7] Makar, J.M., Chan, G.W. and Esseghaier, K.Y. (2007) A Peak in the Hydration Reaction at the End of the Cement Induction Period. *Journal of Materials Science*, 42, 1388-1392. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1427-3>
- [8] 刘曙光, 闫敏, 等. 聚乙烯醇纤维强化水泥基复合材料的抗盐冻性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(1): 63-67.
- [9] 孙兆辉. 水泥稳定碎石温缩变形特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 166-171.
- [10] Ahmed, S., Maalej, M. and Paramasivam, P. (2007) Analytical Model for Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking Behavior of Hybrid Fiber-Engineered Cementitious Composites. *Journal of Material in Civil Engineering*, 19, 527. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:7\(527\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(527))
- [11] 程培峰, 于铭泽. 掺玄武岩纤维水泥稳定碎石温缩抗裂性能试验研究[J]. 中外公路, 2013(6): 234-238.
- [12] 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): 14-17.

- [13] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 半刚性基层材料抗冲刷性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 608-613.
- [14] 李立寒, 黄璞. 旋转与静压成型对水泥稳定碎石性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 17-24.
- [15] 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.