

## 玄武岩纤维对水稳碎石基层强度的影响

舒洪波<sup>1</sup>,唐正光<sup>1\*</sup>,张燕红<sup>2</sup>,布希濂<sup>3</sup>,梁栋<sup>3</sup>

(1.昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650500; 2.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 云南分院,  
云南 昆明 650032; 3.创辉达设计股份有限公司 云南分公司,云南 昆明 650000)

**摘要:**为了研究玄武岩纤维改良棱角性不良的破碎鹅卵石基层性能,该文基于正交试验确定了水泥稳定破碎鹅卵石中玄武岩纤维最佳掺量为 $1\text{ kg/m}^3(15\text{ mm})+2\text{ kg/m}^3(25\text{ mm})$ ,对水泥稳定破碎鹅卵石、水泥稳定破碎鹅卵石+最佳掺量的玄武岩纤维和水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)3种工况混合料进行了无侧限抗压强度与劈裂强度试验。研究结果表明:受骨料棱角性的影响,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)混合料的强度优于水泥稳定破碎鹅卵石混合料;掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料,随着龄期的增加,其强度增长较快,与未掺入纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料相比,7 d抗压强度降低了0.08%,而14 d、28 d、60 d抗压强度提高了3.9%、17.1%、28.3%;7 d、14 d、28 d、60 d劈裂强度提高了4.3%、10.2%、19.0%、28.7%;在龄期45 d掺入纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的强度达到水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)的强度。

**关键词:**破碎鹅卵石基层;玄武岩纤维;掺量;棱角性;强度

**中图分类号:**U416.22

**文献标志码:**A

### Effect of Basalt Fiber on Strength of Cement-Stabilized Macadam Base

SHU Hongbo<sup>1</sup>, TANG Zhengguang<sup>1\*</sup>, ZHANG Yanhong<sup>2</sup>, BU Xilian<sup>3</sup>, LIANG Dong<sup>3</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Yunnan Branch, Anhui Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650032, China;

3. Yunnan Branch, Chuanghuida Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

**Abstract:** To study the performance of basalt fiber in improving the poor angularity of the crushed cobble base, based on the orthogonal test, this paper determined that the optimal dosage of basalt fiber in the cement-stabilized crushed cobble was  $1\text{ kg/m}^3(15\text{ mm})+2\text{ kg/m}^3(25\text{ mm})$ . Besides, unconfined compressive strength and splitting strength tests were carried out on mixtures under three working conditions including the cement-stabilized crushed cobble, cement-stabilized crushed cobble with the optimal dosage of basalt fiber, and cement-stabilized macadam (limestone machine-crushed stone). The results show that influenced by the aggregate angularity, the strength of the cement-stabilized macadam (limestone machine-crushed stone) mixture is better than that of the cement-stabilized crushed cobble mixture. For the cement-stabilized crushed cobble with the optimal dosage of basalt fiber, with the increase in curing age, its strength increases rapidly. Compared with the cement-stabilized crushed cobble without a dosage of fiber, its compressive strength is decreased by 0.08% on the seventh day and increased by 3.9%, 17.1%, and 28.3% on the fourteenth day, the twenty-eighth day, and the sixtieth day respectively, and its splitting strength is increased by 4.3%, 10.2%, 19.0%, and 28.7% on the seventh day, the fourteenth day, the twenty-eighth day, and the sixtieth day,

收稿日期:2023-11-13(修改稿)

基金项目:拉萨市科技项目(编号:649320200038);创辉达设计股份有限公司云南分公司科技项目(编号:2023530103000428)

作者简介:舒洪波,男,硕士研究生.E-mail:2062324512@qq.com

\*通信作者:唐正光,男,博士,副教授.E-mail:895667713@qq.com

respectively. On the forty-fifth day, the strength of the cement-stabilized crushed cobble with a dosage of fiber reaches the strength of the cement-stabilized macadam (limestone machine-crushed stone).

**Keywords:** crushed cobble base; basalt fiber; dosage; angularity; strength

## 0 引言

水泥稳定碎石是主要的道路基层,其性能的影响因素较多,目前研究主要从配合比、水泥掺量、掺外加剂、压实方法、集料材料本身等方面进行分析<sup>[1-5]</sup>,研究表明:改良混合料配比及成型方法都能改善水稳碎石材料的路用性能,却无法完全解决基层开裂的问题。马夫恒<sup>[6]</sup>指出,在水稳碎石基层出现裂缝前,其抗拉强度与抗裂性能呈正相关;基层受拉时,主要表现为层底拉应力,当裂缝出现时,层底会受到更大的拉力,较高的抗拉强度导致裂纹宽度变宽,从而产生更多的反射裂缝。因此,施工要注意基层建设。设计是施工必不可少的环节,从设计和施工两个方面来考虑基层强度指标的影响因素,即考虑无侧限抗压强度和劈裂强度两个影响因素。

郭立成等<sup>[7]</sup>指出,在一定的掺量范围内,水泥稳定再生骨料无侧限抗压强度随聚酯纤维掺量的增加先增后减,劈裂强度随聚酯纤维掺量增加而提高;张虹<sup>[8]</sup>研究发现:掺加适当长度和掺量的聚丙烯纤维,能够较好地提升水泥稳定碎石的抗压强度、劈裂抗拉强度及抗收缩能力。研究现状表明:在水泥稳定层中添加纤维能改善其力学性能。拉萨地区存有大量的破碎鹅卵石,可就地取材作为水泥稳定碎石基层材料中的部分集料。且鹅卵石品质坚硬,具有抗压耐磨耐腐蚀的天然石特性,然而由于棱角性不良,导致破碎鹅卵石基层的力学性能不佳,故考虑加入纤维改善破碎鹅卵石基层的力学性能。

玄武岩纤维是一种具有良好力学性能与化学稳定性的典型硅酸盐纤维。李淑<sup>[9]</sup>通过试验得出玄武岩纤维水泥稳定碎石的最优配合比,并证明了在水泥稳定碎石基层中加入玄武岩纤维能提高其力学性能;薛振华等<sup>[10]</sup>通过试验得出养护一定龄期后在水泥稳定再生碎石基层中加入玄武岩纤维能提高抗压强度和抗弯拉强度。同时石灰岩碎石的棱角性优于破碎鹅卵石,将棱角性较优的粗集料与浑圆状粗集料组合,能够大幅度增强水泥稳定碎石基层的力学

性能;而骨料的棱角性对水稳碎石基层的力学性能有较大的影响<sup>[11-13]</sup>。

本文基于正交试验确定玄武岩纤维最佳混合掺量,对水泥稳定破碎鹅卵石、水泥稳定破碎鹅卵石+最佳掺量的玄武岩纤维和水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)3种工况的混合料进行无侧限抗压强度试验和劈裂强度试验,研究玄武岩纤维改良棱角性不良的破碎鹅卵石基层性能。

## 1 试验材料

### 1.1 集料

采用破碎鹅卵石与石灰岩机轧碎石作为试验集料。破碎鹅卵石有4档粒径:20~30 mm、10~20 mm、5~10 mm、0~5 mm,分别称为A<sup>#</sup>、B<sup>#</sup>、C<sup>#</sup>、D<sup>#</sup>料。石灰岩机轧碎石有3档粒径:20~30 mm、10~20 mm、5~10 mm,分别称为AA<sup>#</sup>、BB<sup>#</sup>、CC<sup>#</sup>料。各集料物理技术指标见表1、2。

表1 粗集料物理技术指标

Table 1 Physicl technical indicators of coarse aggregate

集料编号	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	毛体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	压碎值/ %	针片状 含量/%	磨耗值/ %
A <sup>#</sup>	2.674	2.616		4.8	
B <sup>#</sup>	2.678	2.619	25.7	5	17.8
C <sup>#</sup>	2.717	2.632		5.3	
AA <sup>#</sup>	2.769	2.724		5.3	
BB <sup>#</sup>	2.744	2.701	26.0	5.5	18.6
CC <sup>#</sup>	2.763	2.715		6.5	

表2 细集料物理技术指标

Table 2 Physicl technical indicators of fine aggregate

集料编号	表观相对密度	规范值	毛体积相对密度
D <sup>#</sup>	2.754	≥2.500	2.706

### 1.2 水泥

因考虑部分地区白天施工温度过高,使水泥的初凝时间过短,故采用缓凝水泥——PPS磷渣水泥,强度等级为32.5,其技术指标见表3。

表3 水泥的技术指标

Table 3 Technical indicators of cement

项目	细度/	初凝时间/	终凝时间/	安定性/	胶砂抗折强度/MPa		胶砂抗压强度/MPa	
	%	min	min	min	3 d	28 d	3 d	28 d
试验结果	2.0	215	505	1	3.01	7.33	11.5	40.5
规范要求	≤6.0	≥45	≤600	≤5	≥2.50	≥5.50	≥10.0	≥32.5

1.3 玄武岩纤维

采用6 mm、15 mm、25 mm 3种长度的玄武岩纤维,其技术指标见表4。

表4 玄武岩纤维的技术指标

Table 4 Technical indicators of basalt fiber

单丝直径/ μm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
7~15	2.625~2.627	3 000~4 000	91~110

表5 混合料合成级配

Table 5 Synthetic gradation of mixture

项目		通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
原材料级配	A <sup>#</sup>	100.0	7.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	B <sup>#</sup>	100.0	100.0	74.6	3.7	0.1	0.1	0.1	0.1
	C <sup>#</sup>	100.0	100.0	100.0	94.9	20.3	4.1	0.3	0.1
	D <sup>#</sup>	100.0	100.0	100.0	20.3	98.3	84.1	63.8	2.3
	上限	100.0	100.0	89.0	67.0	49.0	35.0	22.0	7.0
设计规定级配	下限	100.0	90.0	72.0	47.0	29.0	17.0	8.0	0.0
	中值	100.0	95.0	80.5	57.0	39.0	26.0	15.0	3.5
	合成级配	100.0	100.0	87.3	50.8	33.6	26.1	19.3	0.8

2.2 玄武岩纤维长度及含量的确定

当只采用同种长度的玄武岩纤维时,纤维有时不能均匀分散,会导致混凝土内部出现没有纤维或者纤维数量较少的区域<sup>[14]</sup>,受拉区出现纤维过多,破坏前无明显预兆,发生类似“超筋”破坏。为此本试验选取3种不同长度的纤维加入混合料中。

2.2.1 试验方案

采用正交试验确定玄武岩纤维的最佳掺量。试验使用的玄武岩纤维的长度为6 mm、15 mm、25 mm,各长度使用0 kg/m<sup>3</sup>、1 kg/m<sup>3</sup>、2 kg/m<sup>3</sup>、3 kg/m<sup>3</sup> 4个相同掺量。试验中,把玄武岩纤维的长度视为试验因素,其掺量视为试验水平,试验因素及试验水平对照如表6所示,以14 d无侧限抗压强度作为试验指标,

2 水泥稳定碎石混合料组成设计

2.1 混合料合成级配

试验采用150 mm×150 mm的圆柱形试件,压强度为97%,水泥掺量为5%,水泥稳定破碎鹅卵石混合料的合成级配见表5,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)混合料是采用9.5~19 mm、19~26.5 mm两档粒径的石灰岩机轧碎石对水泥稳定破碎鹅卵石同粒径的粗集料进行替换得到的混合料。

符号简写为L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>),正交试验设计如表7所示。

表6 试验因素及试验水平对照

Table 6 Comparison of test factors and test level

玄武岩纤维 长度/mm	各水平下纤维掺量/(kg·m <sup>-3</sup> )			
	水平1	水平2	水平3	水平4
6	0	1	2	3
15	0	1	2	3
25	0	1	2	3

2.2.2 纤维长度与含量的确定

对16组正交试验进行极差分析,结果亦示于表7中。

由表8可知: $R(15\text{ mm})>R(6\text{ mm})>R(25\text{ mm})$ ,长度为15 mm的纤维对混合料的强度影响最大,其最

优组合为 A1B2C3,即:玄武岩纤维的掺量为 0 kg/m<sup>3</sup> (6 mm)+1 kg/m<sup>3</sup> (15 mm)+2 kg/m<sup>3</sup> (25 mm)。

表 7 L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>)的正交试验及分析

Table 7 Orthogonal test and analysis of L<sub>16</sub>(4<sup>4</sup>)

试验号	A	B	C	D	最大 干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最佳 含水 量/%	无侧限抗 压强度/ MPa
	(6 mm)	(15 mm)	(25 mm)	误差			
1	1	1	1	1	2.324	5.220	5.20
2	1	2	2	2	2.326	5.223	5.83
3	1	3	3	3	2.325	5.224	6.32
4	1	4	4	4	2.323	5.220	5.52
5	2	1	2	4	2.325	5.224	6.34
6	2	2	1	3	2.326	5.226	5.60
7	2	3	4	2	2.323	5.225	5.07
8	2	4	3	1	2.323	5.227	4.88
9	3	1	3	2	2.324	5.219	5.74
10	3	2	4	1	2.323	5.223	5.72
11	3	3	1	4	2.323	5.218	5.63
12	3	4	2	3	2.322	5.215	4.96
13	4	1	4	3	2.324	5.210	5.06
14	4	2	3	4	2.322	5.213	5.59
15	4	3	2	1	2.321	5.216	4.95
16	4	4	1	2	2.321	5.214	4.75
K1	5.717 5	5.585 0	5.295 0	5.187 5			
K2	5.472 5	5.685 0	5.520 0	5.347 5			
K3	5.512 5	5.492 5	5.632 5	5.485 0			87.16
K4	5.087 5	5.027 5	5.342 5	5.770 0			
R	0.630 0	0.657 5	0.337 5	0.582 5			
因素主次	因素 B>因素 A>因素 C						
最优水平	A1	B2	C3				
最优组合	A1B2C3						

注:K1、K2、K3、K4 分别代表在 A、B、C、D 各试验因素下的同一水平下(相同掺量)无侧限抗压强度求和取平均值,R 代表 A、B、C、D 各试验因素下无侧限抗压强度的极值差,反映各试验因素对无侧限抗压强度的影响程度,值越大,影响越大。

### 3 龄期对水稳碎石基层无侧限抗压强度的影响

对水泥稳定破碎鹅卵石、水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)及水泥稳定破碎鹅卵石+最佳掺量的玄武岩纤维 3 种工况混合料进行 7 d、14 d、28 d、60 d 无侧限抗压强度试验,分析强度随龄期增长的变化。

试验结果如表 8 及图 1 所示。

表 8 3 种混合料的无侧限抗压强度随龄期变化的结果

Table 8 Results of unconfined compressive strength of three mixtures changing with curing age

混合料 类型	试验 工况	压力峰值平 均值/N	标准差/ N	无侧限抗压 强度/MPa	偏差 系数
水泥稳定破碎 鹅卵石	w-7	84 466.7	3 786.23	4.78	0.04
	w-14	94 000.0	3 341.66	5.32	0.04
	w-28	105 633.3	4 576.27	5.98	0.04
	w-60	131 900.0	9 002.59	7.46	0.07
水泥稳定碎石 (石灰岩机 轧碎石)	w-s-7	98 000.0	9 600.35	5.55	0.10
	w-s-14	106 566.7	4 046.67	6.03	0.04
	w-s-28	125 500.0	4 223.74	7.10	0.03
	w-s-60	166 866.7	6 434.46	9.44	0.04
最佳掺量玄武岩 纤维的水泥稳定 破碎鹅卵石	w-p-7	83 733.3	3 108.41	4.74	0.04
	w-p-14	97 733.3	2 033.61	5.53	0.02
	w-p-28	123 633.3	4 598.79	7.00	0.04
	w-p-60	169 100.0	4 364.25	9.57	0.03

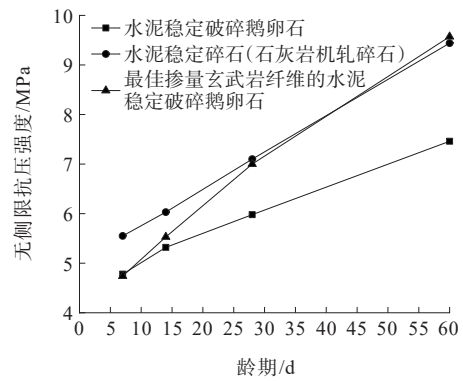


图 1 混合料无侧限抗压强度与龄期的关系

Figure 1 Relationship between curing age and unconfined compressive strength of mixture

由表 8 及图 1 可知:3 种混合料的无侧限抗压强度与龄期呈正线性相关,龄期 7 d 时,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)的抗压强度最高,水泥稳定破碎鹅卵石+最佳掺量的玄武岩纤维的强度略低于未掺入纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的强度。在龄期 45 d 后,掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的抗压强度超过水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石),这是由于玄武岩纤维将吸附部分拌和水,使拌和物变稠,流动性下降,从而减缓了水泥的水化反应,所以在短时间内,玄武岩纤维的掺入对混合料的强度作用不大。随着龄期的推移,水泥的水化反应逐渐完成,由于玄武岩纤维在水泥中均匀分布,在混合料中起到了布筋的作用,使其周围的混合料更紧密地联结,形成网状结构,从而提高了试件的抗压强度。

混合料无侧限抗压强度与龄期的线性拟合如图2所示。

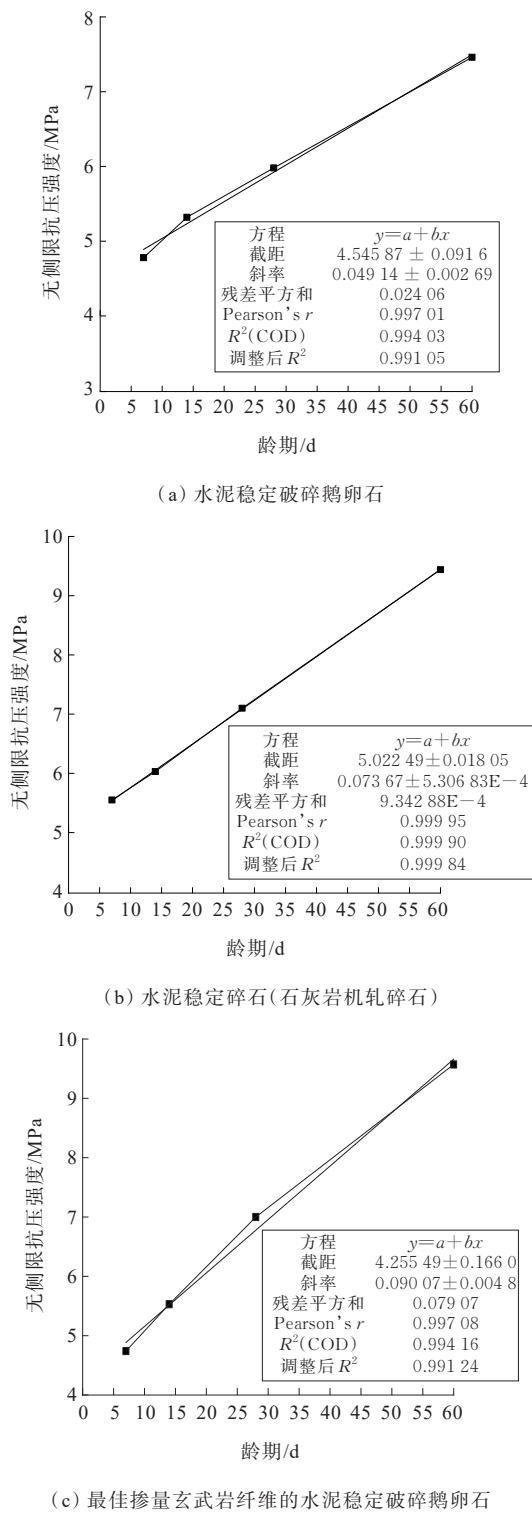


图2 混合料无侧限抗压强度与龄期的线性拟合

Figure 2 Linear fitting between curing age and unconfined compressive strength of mixture

由图2可知:掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石无侧限抗压强度随龄期增长最快。这是由于随

着龄期的增加,水泥的水化和硬化反应逐渐完成,提高了混合料的整体强度。但由于纤维对混合料中的水化反应起减缓作用,掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石早期强度低于另外两种未掺入玄武岩纤维的混合料,随着龄期的递增,水化反应逐渐完成,各水化产物的含量保持稳定,此时掺入玄武岩纤维的混合料,其水泥基之间的咬合力逐渐增大,玄武岩纤维与水泥基形成的网络结构也逐渐完善,从而使混合料的整体强度大幅度增加。

4 龄期对水稳层劈裂强度的影响

对3种工况混合料进行7 d、14 d、28 d、60 d劈裂强度试验,其试验结果如表9与图3所示。

表9 混合料的劈裂强度随龄期变化的结果

Table 9 Results of splitting strength of mixture changing with curing age

混合料 类型	试验 工况	压力峰值 平均值/N	劈裂强 度/MPa	标准差/ MPa	偏差 系数
水泥稳定破碎鹅卵石	p-7	33 785.67	0.93	0.003 8	0.003
	p-14	35 738.00	0.98	0.009 9	0.009
	p-28	38 210.33	1.05	0.015 9	0.015
	p-60	41 709.33	1.15	0.018 4	0.016
水泥稳定碎石 (石灰岩机轧碎石)	p-s-7	38 375.67	1.06	0.021 0	0.019
	p-s-14	41 113.67	1.14	0.018 1	0.016
	p-s-28	46 430.00	1.28	0.015 8	0.012
	p-s-60	52 633.33	1.45	0.011 8	0.008
最佳掺量玄武岩 纤维的水泥稳定 破碎鹅卵石	p-p-7	35 555.33	0.97	0.013 6	0.013
	p-p-14	39 216.67	1.08	0.015 1	0.014
	p-p-28	45 396.00	1.25	0.012 6	0.010
	p-p-60	54 094.67	1.48	0.024 5	0.016

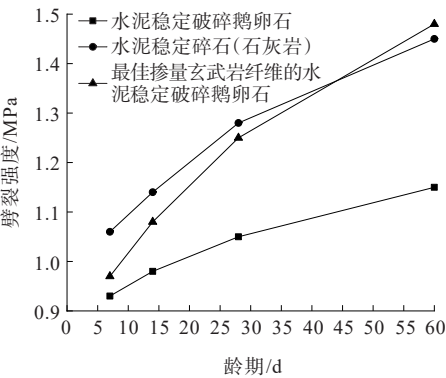


图3 混合料的劈裂强度与龄期的关系

Figure 3 Relationship between curing age and splitting strength of mixture



由表9及图3可知:在7 d龄期时,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)混合料的劈裂强度最高,其强度为1.06 MPa,比最佳掺量的玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的0.97 MPa高出约9.3%,比水泥稳定破碎鹅卵石的0.93 MPa,高出约14.0%;龄期28 d时,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)混合料的劈裂强度依旧最高,达到1.28 MPa,但只比最佳掺量玄武岩纤维混合料劈裂强度1.25 MPa高出2.4%。在45 d龄期之后,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)的劈裂强度低于掺入纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的劈裂强度。这是由于玄武岩纤维在混合料中随机分布,避免了应力分布出现集中的情况,从而使整体混合料的抗拉强度得到提高,在最佳掺量的条件下,整体混合料的强度会超过未掺入纤维的混合料。

混合料的劈裂强度与龄期的非线性拟合结果如图4所示。

由图4可知:3种混合料的劈裂强度与龄期的变化呈非线性增长,掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料劈裂强度增幅最大,60 d龄期,劈裂强度高于其他两种工况的混合料。掺入的两种不同长度的玄武岩纤维均匀分布在混合料中各个部分,不定向分布,从而提高混合料的整体抗变形能力,表明掺入适当的纤维可以大幅度提高混合料的抗拉强度。

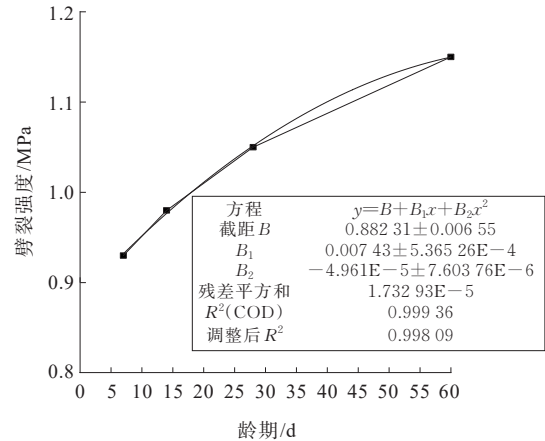
## 5 结论

(1) 基于正交试验,得到水泥稳定破碎鹅卵石中玄武岩纤维的最佳掺量为:1 kg/m<sup>3</sup>(15 mm)+2 kg/m<sup>3</sup>(25 mm)。

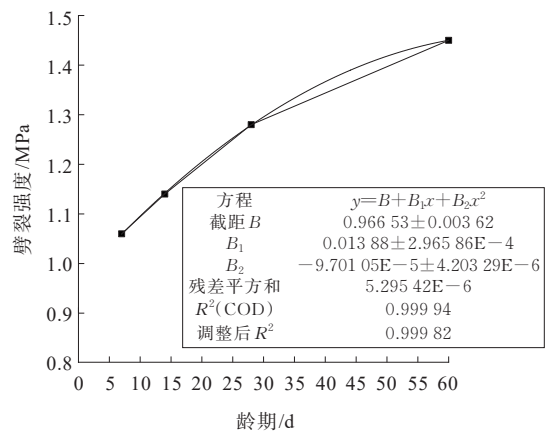
(2) 受骨料棱角性的影响,水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)混合料的强度优于水泥稳定破碎鹅卵石混合料。

(3) 掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料与未掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料相比,7 d抗压强度降低了0.08%,14 d、28 d、60 d抗压强度提高了3.9%、17.1%、28.3%;7 d、14 d、28 d、60 d劈裂强度提高了4.3%、10.2%、19.0%、28.7%。

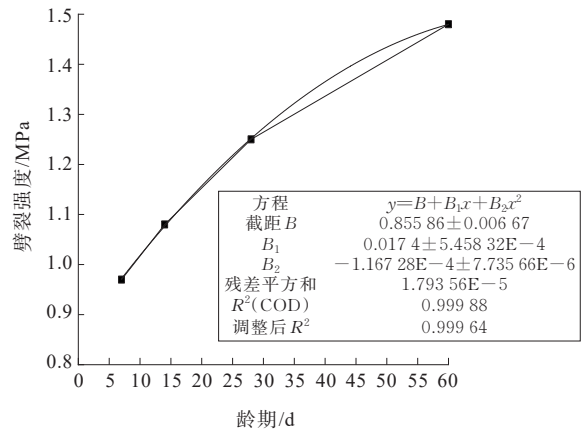
(4) 在3种工况的混合料中,掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石混合料的强度增幅最快,在龄期45 d,掺入玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石的强



(a) 水泥稳定破碎鹅卵石



(b) 水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)



(c) 最佳掺量玄武岩纤维的水泥稳定破碎鹅卵石

图4 混合料的劈裂强度与龄期的非线性拟合

Figure 4 Nonlinear fitting of splitting strength and curing age of mixture

度达到水泥稳定碎石(石灰岩机轧碎石)的强度。

## 参考文献:

## References:

- [1] 丛卓红,郑南翔,闫红光.半刚性基层材料路用性能综合

- 评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 23-28.
- CONG Zhuohong, ZHENG Nanxiang, YAN Hongguang. Comprehensive evaluation method of semi-rigid base mixture's pavement performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 23-28.
- [2] 杨芙蓉, 武旭, 杨小森, 等. 钢渣对半刚性基层力学强度及稳定性影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 292-296.
- YANG Furong, WU Xu, YANG Xiaosen, et al. Study on influence of steel slag on mechanical strength and stability of semi-rigid base[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 292-296.
- [3] 辛艳刚, 姜玉娇, 丁浩. 水泥稳定碎石基层配合比设计方法及其性能研究[J]. 四川建材, 2023, 49(1): 19-21, 24.
- XIN Yangang, JIANG Yujiao, DING Hao. Study on mix design method and performance of cement stabilized macadam base[J]. Sichuan Building Materials, 2023, 49(1): 19-21, 24.
- [4] 雷蕾, 姜慧, 顾万, 等. 外掺剂改良再生水泥稳定碎石基层材料试验研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 31-37.
- LEI Lei, JIANG Hui, GU Wan, et al. Research on recycled cement stabilized crushed stone base material improved with admixtures[J]. Highway, 2022, 67(2): 31-37.
- [5] 涂亮亮, 许勰, 范璐璐, 等. 基于振动模式的再生水泥稳定碎石基层力学性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(9): 20-26.
- TU Liangliang, XU Meng, FAN Lulu, et al. Research on mechanical properties of recycled cement stabilized crushed stone based on vibration mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(9): 20-26.
- [6] 马夫恒. 基于反射裂缝防治水泥稳定碎石基层合理强度指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- MA Fuheng. Research on application of liquid cement flyash filled in bridge abutment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [7] 郭立成, 曾国东, 周敏, 等. 聚酯纤维增强水泥稳定再生骨料性能试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 232-236.
- GUO Licheng, ZENG Guodong, ZHOU Min, et al. The experimental study on properties of polyester fiber reinforced cement stabilized recycled aggregate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 232-236.
- [8] 张虹. 聚丙烯纤维在水稳碎石基层中的应用[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 20-24.
- ZHANG Hong. Application of polypropylene fiber in the cement-stabilized macadam base[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 20-24.
- [9] 李淑. 玄武岩纤维水泥稳定碎石路用性能试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- LI Shu. Experimental study on pavement performance of basalt fiber cement stabilized macadam[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] 薛振华, 关博文, 樊兴华. 掺玄武岩纤维水泥稳定再生碎石基层性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 269-273.
- XUE Zhenhua, GUAN Bowen, FAN Xinghua. Research on road performance of cement stabilized reclaimed gravel base mixed with basalt fiber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 269-273.
- [11] 林博煌, 石立万, 廖伟杰, 等. 基于图像处理的粗集料细观分布均匀性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 214-218.
- LIN Bohuang, SHI Liwan, LIAO Weijie, et al. Study on meso-distribution uniformity of coarse aggregate based on image processing[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 214-218.
- [12] 杜昊. 粗集料棱角性对骨架嵌挤作用及混合料性能影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- DU Hao. Study on the influence of coarse aggregate angularity on skeleton interlocking capacity and mixture performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [13] 江照伟, 韦金城, 刘航, 等. 基于撒布磨耗料的SMA沥青路面早期抗滑性能改善研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 56-60.
- JIANG Zhaowei, WEI Jincheng, LIU Hang, et al. Study on improvement of early skid resistance of SMA asphalt pavement based on spreading grit[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 56-60.
- [14] 胡小庆, 王永生. 纤维间距理论缺陷分析[J]. 安徽建筑, 2011, 18(2): 73-74.
- HU Xiaoqing, WANG Yongsheng. Defect analysis of theory of fiber spacing[J]. Anhui Architecture, 2011, 18(2): 73-74.