

文章编号: 1674-599X(2022)01-0015-06

粗集料棱角性对水泥稳定碎石强度的影响

张燕红¹, 徐龙², 方俊杰³

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2.拉萨市设计院, 西藏 拉萨 850000;
3.国家林业和草原局昆明勘察院, 云南 昆明 650500)

摘要:为研究粗集料棱角性对水泥稳定碎石强度的影响,基于数字图像处理技术,采用等效椭圆法评价粗集料的棱角性对石灰岩碎石与破碎鹅卵石的棱角性进行了对比分析,且对不同棱角性集料的工况组合水泥稳定碎石的强度性能进行了室内正交试验。研究表明:不考虑水泥因素的影响,无侧限抗压强度与棱角性正性相关;替换率相同条件下,19.0~26.5 mm的棱角性对无侧限抗压强度的影响小于9.5~19.0 mm的;棱角明显的粗集料和浑圆状的粗集料进行组合,可以提高水泥稳定碎石基层的劈裂强度。

关键词:道路工程; 棱角性; 无侧限抗压强度; 劈裂强度

中图分类号: U416.22 文献标志码: A

Influence of coarse aggregate angularity on strength characteristics of cement stabilized macadam

ZHANG Yan-hong¹, XU Long², FANG Jun-jie³

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Lhasa Design Institute, Lhasa 850000, China;
3. Kunming Survey Institute, State Forestry and grassland administration, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the influence of the angularity of coarse aggregate on the strength of cement stabilized macadam, based on digital image processing technology, the angularity of limestone macadam and broken cobble were compared and analyzed by using equivalent elliptic method and the door orthogonal test was carried out to obtain the strength performance of combined cement stabilized macadam according to the working conditions of different angular aggregates. The test results show that unconfined compressive strength is positively related to angularity without considering the influence of cement. Under the same replacement rate, the influence of 19 ~ 26.5 mm angularity on unconfined compressive strength is less than that of 9.5 ~ 19 mm. The splitting strength of cement stabilized macadam base can be improved by combining the coarse aggregate with obvious edges and corners with the round coarse aggregate.

Keywords: road engineering; angularity; unconfined compressive strength; splitting strength

水泥稳定碎石是一种由水泥、砂和碎石组成的多相复合材料。在水泥稳定碎石的骨架密实结构中,粗集料形成结构骨架后,石料之间的相互嵌挤作用能够有效提高多相复合材料的内摩擦角,是影响基层强度的关键因素^[1],而粗集料棱角性对

合成矿料骨架特性、混合料最终级配、施工、和易性都有显著影响,这些影响最终体现在路面结构层的路用性能上^[2]。目前,研究主要集中在不同配合比、不同水泥种类、不同水泥掺量、不同养护条件、不同龄期和不同压实方法等条件下,对

收稿日期: 2021-01-22

基金项目: 拉萨地区城市道路路面关键技术研究(649320200038)

作者简介: 张燕红(1998—),女,昆明理工大学硕士生。

半刚性基层路用性能的影响^[3-7]。姜舰等人^[8]认为棱角性对强度的影响较大,但没有明确提出评价棱角性的方法。王火明等人^[9]通过运用松装空隙法、振装空隙法和外形判别法来判别集料的棱角性,研究了粗集料棱角性对水稳河滩料强度特性的影响,得出了棱角性对水稳基层的强度特性有一定影响,但这3种方法都没有给出棱角性好坏的变化规律。在建筑材料匮乏地区,工程项目会考虑就近取材,采用河道中的砾石作为建筑材料,集料棱角性对水稳基层性能的影响研究是必要的。因此,本试验针对2种不同的粗集料,采用ImageJ进行数字图像处理,采用等效椭圆法^[10-12]评价粗集料的棱角性,并通过正交试验判断棱角性对水泥稳定碎石半刚性基层强度特性的影响,以期河道砾石的应用提供借鉴。

1 粗集料棱角性试验

棱角性是指集料凸出程度,反映集料颗粒细观局部的变化特征和状态,直接影响集料的堆积性能和形成骨架的稳定性^[13]。在水泥稳定材料中,粗集料的占比大于细集料的,要求粗集料质地坚硬、无风化、无杂质、耐磨性优异,并且具有足够的抗压强度^[14]。本试验采用2种不同的集料:①石灰岩碎石,简称集料A,其压碎值、针片状、0.075 mm以下粉尘含量、软弱颗粒含量和0.5 mm以下颗粒塑性指数分别为25.7%、6.8%、0.0%、3.7%、9。②破碎鹅卵石,简称集料B,其压碎值、针片状、0.075 mm以下粉尘含量、软弱颗粒含量和0.5 mm以下颗粒塑性指数分别为:26%、3.2%、1.7%、4.3%、13。如图1所示。

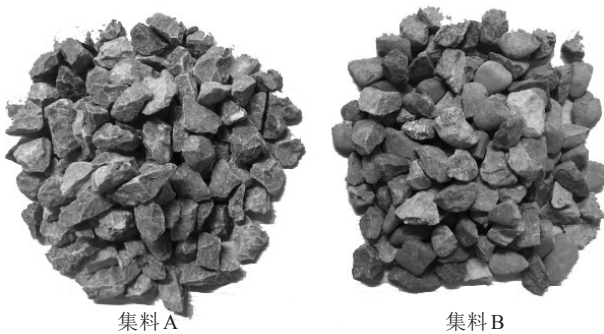


图1 集料A、B视觉对比
Fig. 1 Visual comparison of aggregate A and B

1.1 基于数字图像处理技术(DIP)评价粗集料棱角性

为研究粗集料棱角性对水稳性半刚性基层强度性能的影响,必须先研究粗集料棱角性的表示方法。数字图像,又称数码图像或数位图像,是以二维图像为基础,采用有限数字数值像素来表示。同时,其也是由模拟图像数字化得到,以像素为基本元素,用数字计算机或数字电路来存储和处理图像。

1.1.1 数字图像采集

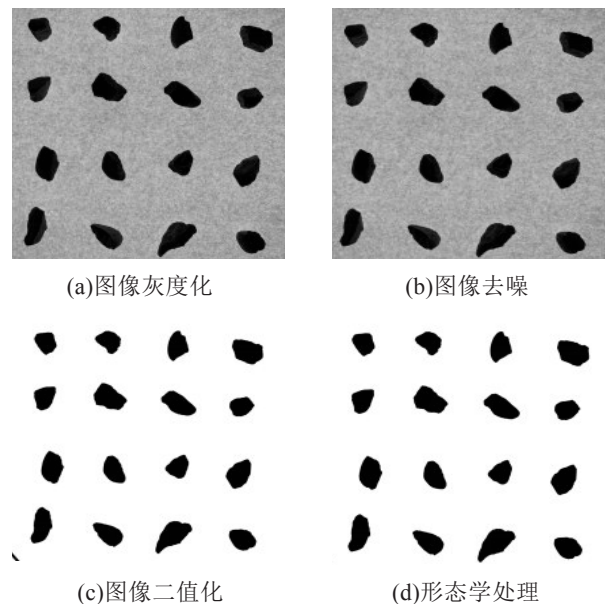
使用像素为1 400万的数码相机采集数字图像。采集过程中,用自制的逆光灯箱,消除外界光线和拍摄角度造成的阴影,如图2所示。为了减少粗集料数字图像采集一个面的单一性造成的误差,对集料的正反面都进行了图像采集。



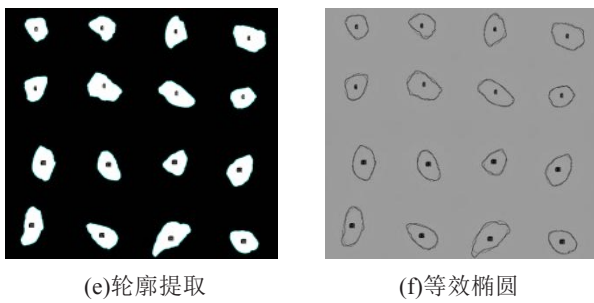
图2 在逆光灯箱条件下拍摄的部分集料
Fig. 2 Pictures of some aggregates taken in backlight light box

1.1.2 数字图像处理

图像的处理过程分为图像灰度化、去噪、二值化和形态学处理。使用ImageJ软件进行图像处理和轮廓提取,如图3所示。



(a)图像灰度化 (b)图像去噪
(c)图像二值化 (d)形态学处理



(e)轮廓提取

(f)等效椭圆

图3 数字图像处理过程

Fig. 3 Digital image processing

1.2 棱角性的评价方法

集料棱角性反映颗粒轮廓上角度的变化, 角度变化越锐利, 轮廓更凸或更凹。为了对不同种类和不同形状的颗粒进行棱角性量化分析, 使用等效椭圆的方法评价棱角性。等效椭圆是指与提取集料轮廓的面积和极惯性矩相同的椭圆, 并且等效椭圆保留了颗粒轮廓形状特征, 弱化了轮廓形状(集料的宏观性)对棱角性量化的影响^[15-16], 如图4所示。其计算式为:

$$P' = \left(\frac{P}{P_e} \right)^2 \quad (1)$$

$$P'' = \frac{\sum_i^n (A_i \times P'_i)}{\sum_i^n A_i} \quad (2)$$

式中: P 为集料轮廓周长; P_e 为轮廓的等效椭圆周长; P'_i 为粗集料中第*i*颗集料的棱角性; A_i 为第*i*颗集料的轮廓投影面积; P'' 为粗集料棱角性的加权指标值; n 为总的集料数。

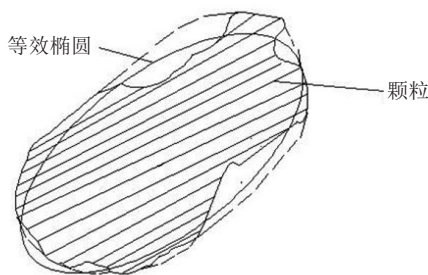


图4 等效椭圆法

Fig. 4 Equivalent elliptic method

通过比较集料A和集料B在不同粒径范围的棱角性。从2个不同的投影面共同计算棱角性, 其结果如图5~6所示。

集料A的粒径为9.5、13.2、16.0、19.0 mm的正面和反面 P'' 值的变异性系数分别为1.120、1.118、

1.139、1.137。集料B的粒径为9.5、13.2、16.0、19.0 mm的正面和反面 P'' 值的变异性系数分别为1.102、1.102、1.118、1.128。

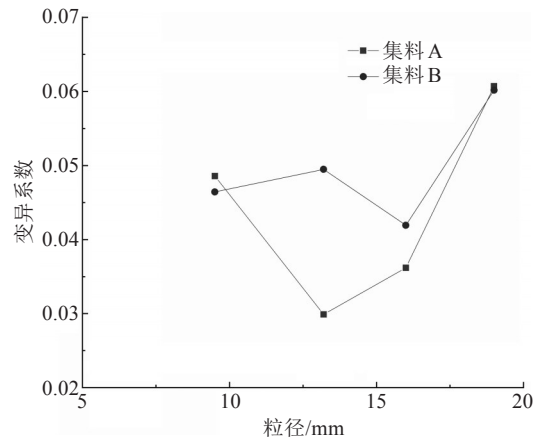


图5 集料A、B计算结果的变异性系数

Fig. 5 Variability coefficient of aggregate A and B

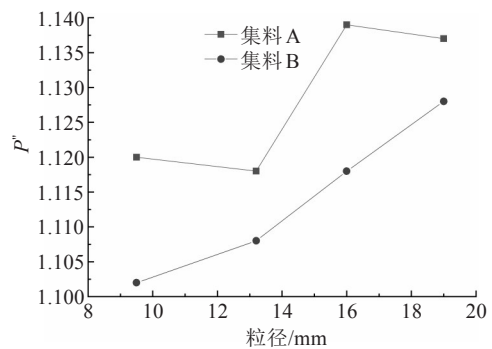


图6 集料A和B的棱角性对比

Fig. 6 Comparison of angularity of aggregate A and B

等效椭圆的理论计算与它的长轴和短轴有关, 当指标越接近1时, 表明: 原轮廓越接近于圆, 棱角性越差; 当指标大于1时, 值越大, 棱角性越好。由图6和表1可知, 在19.0~26.5 mm粒径范围内, 两种集料的变异性系数最大, 所以对于大粒径, 采集的数量相对较多; 集料A的棱角性优于集料B的, 随着粒径的增大, A集料的棱角性在16.0~19.0 mm粒径范围内最好, 棱角性的变化规律先增大后减小。集料B随着粒径的增大棱角性也逐渐增大。在9.5~13.2 mm、13.2~16.0 mm、16.0~19.0 mm粒径范围内, 集料A的棱角性都优于集料B的1%左右, 所以可把4种粒径归类为2种粒径范围: 9.5~19.0 mm, 19.0~26.5 mm。即棱角性大小的排列顺序为: 粒径为9.5~19.0 mm时, 集料A>集料B; 粒径为19.0~26.5 mm时, 集料A>集料B。并且在A、B 2种集料中, 19.0~26.5 mm的棱角性都优于9.5~19.0 mm的。

2 粗集料棱角性对水稳基层部分力学性能的影响

2.1 水泥

使用磷渣硅酸盐水泥, 细度为2.0, 初凝时间为215 min, 终凝时间为505 min, 3 d抗压强度和抗折强度分别为11.5、3.0 MPa。

2.2 试验方案

采用正交设计试验来制定试验方案。正交表的标记符号形式为 $L_a(b^c)$, 符号中 a 为正交试验设计后的试验次数, b 为每个影响因数的水平数, c 为试验中的影响因素个数, L 为正交表符号。本试验 $L_9(3^4)$ 表示4因素3水平正交表, 根据正交设计方案, 一共需要进行9次试验。其中, 一个因素为空列便于误差分析。从图6中可以看出, 集料A的棱角性优于集料B的, 该试验方案主要内容是集料的替换, 集料A替换集料B, 即石灰岩碎石替换拉萨河破碎砾石。试验因素为: ①水泥含量; ②9.5~19.0 mm粒径范围内拉萨河破碎砾石被机制破碎砾石替换的替换率, 即9.5~19.0 mm粒径范围内集料A替换集料B的替换率(以下简称: 9.5~19.0 mm); ③19.0~26.5 mm粒径范围内拉萨河破碎砾石被机制破碎砾石替换的替换率, 即19.0~26.5 mm粒径范围内集料A替换集料B的替换率(以下简称: 19.0~26.5 mm)。其中, 水泥掺量的水平数: 4.0%、5.0%、6.0%; 9.5~19.0 mm的水平数: 0%、50.0%、100%; 19.0~26.5 mm的水平数: 0%、50.0%、100%。正交方案见表1。

表1 试验方案

Table 1 Test plan

编号	水泥掺量/%	9.5~19.0 mm /%	19~26.5 mm /%	空列(误差列)
1	4	0	0	1
2	4	50	50	2
3	4	100	100	3
4	5	0	50	3
5	5	50	100	1
6	5	100	0	2
7	6	0	100	2
8	6	50	0	3
9	6	100	50	1

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG-E51-2009)中规定的重型击实试验中丙

法, 确定在该配合比(表2)下混合料的最大干密度和最佳含水量分别为: $p_{\max}=2.352 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{opt}}=5.3\%$ 。按照压实度为97%的要求, 计算集料、水泥和水的用量, 拌和均匀后装模, 采取静压的压实方式来制作无侧限抗压强度试件和劈裂(间接抗拉强度)试件, 直径150 mm×高150 mm。经过2~6 h后进行脱模, 脱模后的试件装袋, 并将袋内空气排干净, 放进标准养护室(温度: $20\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度 $\geq 95\%$)养护, 无侧限抗压强度试件养护7 d, 劈裂试件养护90 d, 2种试件都在最后1天浸水养护, 然后对这2种试件做相应试验。

表2 水泥稳定碎石基层配合比

Table 2 Mix ratios of cement stabilized gravel base

筛孔/mm	31.5	26.5	19.0	9.5	4.75	0.6
通过率/%	100.0	91.6	81.3	54.4	45.10	10.6

2.3 无侧限抗压强度

在经过粉碎或原来松散的材料中, 掺入足量的水泥和水拌和, 在压实和养生后, 当抗压强度符合规定要求时, 称为水泥稳定材料^[17]。无侧限抗压强度是反映无机结合料承载能力的一项重要指标^[18]。本试验使用数显式压力试验机对试件进行抗压, 记录各组试件破坏时峰值, 得到相应的无侧限抗压强度, 见表3。对正交试验结果进行分析, 如图7所示。

表3 试件的无侧限抗压强度

Table 3 Unconfined compressive strength of specimens

编号	最大破坏力/N	无侧限抗压强度/MPa	编号	最大破坏力/N	侧限抗压强度/MPa
1	75 700	4.28	6	120 633	6.83
2	80 933	4.63	7	143 800	8.44
3	99 433	5.94	8	174 233	9.40
4	118 216	6.53	9	177 916	10.07
5	133 350	7.55			

从图7中可以看出, 水泥作为结合料, 对强度有影响, 并且影响效果比棱角性显著。从试验结果来看, 3个因素之间互不干扰, 在不考虑水泥因素的情况下, 当9.5~19.0 mm和19.0~26.5 mm两种粒径范围内的集料都未被替换时, 即混合料中的粗集料未被替换时, 混合料无侧限抗压强度的平均值为6.63 MPa。当两种粒径范围内集料A的替换率都为50.0%时, 混合料的无侧限抗压强度的平均值为7.08 MPa。当9.5~19.0 mm和19.0~26.5 mm

的集料都被集料 A 替换时, 即集料 A 的替换率为 100.0%, 混合料的无侧限抗压强度为 7.46 MPa。表明: 棱角性的优劣对混合料的强度影响呈正性关系, 较好的棱角性加强了集料之间的嵌合作用, 也更有利于骨架的形成, 对强度的提高有较大作用。所以, 半刚性基层抗压强度只要满足规范要求, 替换棱角性较好的粗集料, 减少水泥用量, 从而减少干缩裂缝的产生, 降低裂缝病害。

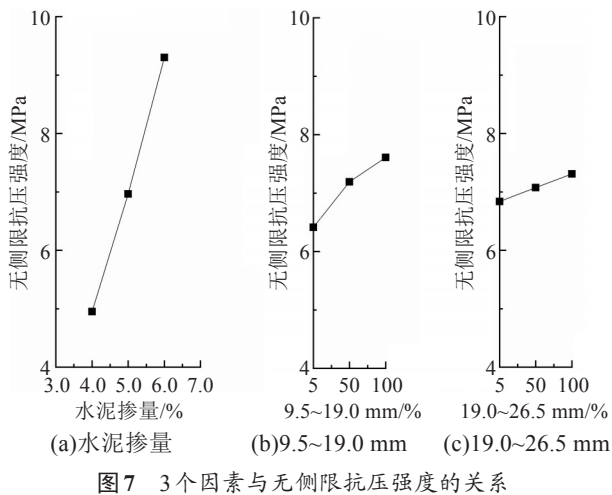


图7 3个因素与无侧限抗压强度的关系

Fig. 7 Relationships between three factors and unconfined compressive strength

2.4 劈裂强度

水泥稳定碎石材料的抗拉强度一般约为抗压强度的1/10, 但作为道路基层材料, 需承担车辆荷载产生的巨大弯拉应力, 因此, 路面结构设计时必须考虑水泥稳定碎石材料的抗拉性能。水泥稳定碎石的抗拉强度通常由劈裂强度和弯拉强度表征。相对于直接抗拉试验, 间接抗拉强度(劈裂强度)试验简单, 结果误差较小, 应用范围更广, 因此, 将劈裂强度作为设计参数进行研究^[9], 如图8所示。用CSS软件进行联机, 设置电子万能试验机的速率为1 mm/min。记录试件破坏时的最大压缩力分别为28 205、31 774、27 579、40 917、4 321、57 003、5 419、60 251 N。再计算得到劈裂强度分别为0.77、0.87、0.75、1.12、1.25、1.56、1.57、1.64 MPa。

从图7~8中可以看出, 水泥对无侧限抗压强度和劈裂强度的影响呈线性相关, 并且在各个因素的影响下, 劈裂强度约为抗压强度的1/6, 满足规范要求。从试验结果来看, 3个因素之间互不干扰, 在不考虑水泥因素的情况下, 当混合料中的粗集料未被替换时, 即混合料的组成都是拉萨河破

碎砾石时, 混合料劈裂强度的平均值为1.17 MPa。当两种粒径范围内集料A的替换率都为50.0%时, 混合料的劈裂强度的平均值为1.21 MPa; 当9.5~19.0 mm和19.0~26.5 mm的集料都被集料A替换时, 即集料A的替换率为100%, 混合料的无侧限抗压强度为1.19 MPa。表明: 劈裂强度的大小不仅与棱角性有关, 还与集料的替换率有关, 要提高劈裂强度, 就需对棱角性不同的粗集料进行组合, 如: 棱角明显的集料和部分浑圆状集料组成的混合料, 可以提高其劈裂强度。

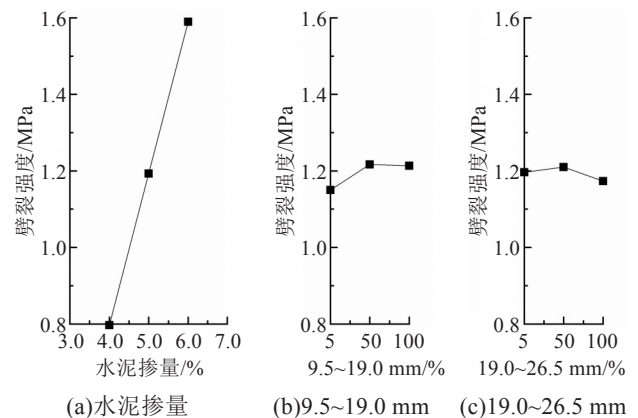


图8 3个因素与劈裂强度的关系

Fig. 8 Relationships between three factors and splitting strength

3 结论

1) 在不考虑水泥的影响条件下, 棱角性对无侧限抗压强度呈正向递增, 对劈裂强度的影响呈先增大后略减小。

2) 为了提高水泥稳定基层劈裂强度, 混合料的粗集料部分可由棱角明显和浑圆状集料组成。

3) 粗集料棱角性的好坏对无侧限抗压强度的大小有影响。在相同粒径范围内, 无侧限抗压强度随着集料A替换率的增大而线性增大。在9.5~19.0 mm和19.0~26.5 mm 2个粒径的替换率相同时, 9.5~19.0 mm对无侧限抗压强度的影响程度大于19.0~26.5 mm的。所以, 在抗压强度满足规范要求时, 可用棱角性较好的粗集料替换混合料中的粗集料, 减少水泥用量, 降低干缩系数。

参考文献(References):

- [1] 孙兆辉. 基于抗裂性能的水泥稳定碎石级配组成研究[J]. 公路, 2006, 51(8): 34-40. (SUN Zhao-hui. A study on

- gradation composition of cement stabilized macadam based on crack resistance performance[J]. Highway, 2006,51(8):34-40.(in Chinese))
- [2] 王火明,杨敏,符德省,等.粗集料棱角性对水稳河滩料强度和干缩特性影响的试验研究[J].公路交通技术,2013,29(1):1-5. (WANG Huo-ming, YANG Min, FU De-xing, et al. Experimental study on influences of angularity of coarse aggregates on strength and dry-shrinkage characteristic of cement stabilized beach materials[J]. Technology of Highway and Transport,2013,29(1):1-5.(in Chinese))
- [3] 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 Zhuo-hong, ZHENG Nan-xiang, YAN Hong-guang. Comprehensive evaluation method of semi-rigid base mixture's pavement performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011,11(4):23-28. (in Chinese))
- [4] 张道伟,葛景锋.不同养生温度下半刚性基层材料路用性能试验研究[J].公路工程,2013,38(3):196-199,204. (ZHANG Dao-wei, GE Jing-feng. The study of pavement performance in different curing temperature semi-rigid material[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3): 196-199, 204.(in Chinese))
- [5] 张宜洛,陈凤桐,戈永卫.水泥对半刚性基层路用性能的影响研究[J].重庆交通学院学报,2004,23(1):19-21,35. (ZHANG Yi-luo, CHEN Feng-tong, GE Yong-wei. Research on the performance of the semi-rigid roadbase [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(1):19-21,35.(in Chinese))
- [6] 王敏.不同掺量粉煤灰的水泥稳定碎石基层综合路用性能分析[J].粉煤灰综合利用,2015,28(4):48-50. (WANG Min. Analysis on road vsage performance of cement-stabilized macadam base course materials with different dosage of fly ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2015,28(4):48-50.(in Chinese))
- [7] 赵宇婷.水稳碎石基层振动压实与静压性能对比分析[J].山西建筑,2017,43(27):125-126. (ZHAO Yu-ting. The comparison analysis on vibration compaction and static pressure performance of water stabilized macadam base [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(27): 125-126. (in Chinese))
- [8] 姜舰,童红明,张英富,等.水泥稳定半刚性基层材料强度影响因素的研究[J].建材世界,2009,30(5):30-33,40. (JIANG Jian, TONG Hong-ming, ZHANG Ying-fu, et al. Influence factors on the strength of cement stabilizing semi-rigid road base materials[J]. The World of Building Materials, 2009,30(5):30-33,40.(in Chinese))
- [9] 王火明,杨敏,符德省,等.粗集料棱角性对水稳河滩料强度和干缩特性影响的试验研究[J].公路交通技术,2013,29(1):1-5. (WANG Huo-ming, YANG Min, FU De-xing, et al. Experimental study on influences of angularity of coarse aggregates on strength and dry-shrinkage characteristic of cement stabilized beach materials[J]. Technology of Highway and Transport, 2013,29(1):1-5. (in Chinese))
- [10] Fletcher T, Chandan C D, Masad E, et al. Aggregate imaging system for characterizing the shape of fine and coarse aggregates[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003,1832(1):67-77.
- [11] Petersen D R, Link R E, Kuo C Y. Correlating permanent deformation characteristics of hot mix asphalt with aggregate geometric irregularities[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002,30(2):136.
- [12] Wilson J D, Klotz L D. Quantitative analysis of aggregate based on Hough transform[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996,1530(1):111-115.
- [13] 王彦喆.粗集料细观结构特征对沥青混合料性能的影响研究[D].西安:长安大学,2012. (WANG Yan-zhe. The study of the effect of coarse aggregate of microstructure characteristic on the performance of asphalt mixture[D]. Xi'an: Changan University, 2012. (in Chinese))
- [14] 梅晨悦,刘子铭,祁静,等.小粒径排水型超薄罩面路用性能研究[J].公路与汽运,2019(2):84-87,92. (MEI Chen-yue, LIU Zi-ming, QI Jing, et al. Study on the road performance of small particle size drainage ultra thin cover surface[J]. Highway and Automobile Transportation, 2019(2):84-87,92.(in Chinese))
- [15] 程小云.基于矿料颗粒量化指标的沥青混合料优化设计[D].西安:长安大学,2010. (CHENG Xiao-yun. Study on the optimizing mix design based on particle shape of coarse aggregate[D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese))
- [16] 熊琴.粗集料形状特征的数字图像分析[D].重庆:重庆交通大学,2011. (XIONG Qin. Research on digital image technology of coarse aggregate morphology

- [25] Kazemi M T, Golsorkhtabar H, Beygi M H A, et al. Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 482-489
- [26] Hillerborg A. Results of three comparative test series for determining the fracture energy G-F of concrete[J]. *Materials and Structures*, 1985,18(5):407-413.
- [27] 河海大学. 水工混凝土断裂试验规程 DL/T 5332—2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006. (Hohai University. Electricity & Power Standard of the People's Republic of China: Norm for fracture test of hydraulic concrete: DL/T 5332—2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese))
- [28] 邓宗才, DAUD Jumbe R. 混掺纤维 RPC 增韧特性试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(2): 202-207. (DENG Zong-cai, DAUD J R. Experimental study on the flexural toughness of RPC reinforced by hybrid fibers[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(2):202-207. (in Chinese))
- [29] 姚志雄, 周健. 纤维增强活性粉末混凝土(RPC)断裂能的研究 [J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(4): 356-360. (YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian. Study on fracture energy of reactive powder concrete reinforced by steel-polypropylene hybrid fiber[J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(4): 356-360. (in Chinese))
- [30] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能 [J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1): 14-21. (DENG Zong-cai, FENG Qi. Fracture properties of hybrid fibers reinforced reactive powder concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1):14-21. (in Chinese))

(上接第 20 页)

- characteristics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [17] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 518-521. (SUN Li-jun. Structural behavior study for asphalt pavements[M]. Beijing: China Communications Press, 2005:518-521. (in Chinese))
- [18] 刘新海, 彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究 [J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(1): 38-43. (LIU Xin-hai, PENG Xiao-lin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(1):38-43. (in Chinese))
- [19] 李建庆, 王天伟, 郝磊. 水泥稳定碎石劈裂强度影响因素研究 [J]. *山东交通科技*, 2017(5): 49-51. (LI Jian-qing, WANG Tian-wei, XI Lei. Research on influencing factors of the splitting strength of cement stabilized macadam[J]. *Shandong Jiaotong Keji*, 2017(5):49-51. (in Chinese))