

文章编号: 1674-599X(2020)01-0038-06

# 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究

刘新海<sup>1</sup>, 彭小林<sup>2</sup>

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550)

**摘要:** 采用水泥粉煤灰作为无机结合料稳定天然碎石, 研究水泥剂量、粉煤灰剂量及养护龄期对无侧限抗压强度、劈裂强度及回弹模量等力学参数的影响。试验结果表明: 无侧限抗压强度、劈裂强度及回弹模量随着水泥剂量的提高均呈现线性增长的趋势; 无侧限抗压强度和劈裂强度随着粉煤灰剂量的提高均呈现先增长后减小的趋势, 并在9%粉煤灰剂量时达到峰值, 回弹模量随着粉煤灰剂量的提高呈线性减小的趋势; 28和60d的无侧限抗压强度较7d的分别增长约30%和60%, 28和60d的劈裂强度较7d的分别增长约50%和70%, 28和60d的回弹模量较7d的分别增长约65%和120%。

**关键词:** 水泥粉煤灰稳定碎石; 无侧限抗拉强度; 劈裂强度; 回弹模量

中图分类号: U414 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007

## Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone

LIU Xin-hai<sup>1</sup>, PENG Xiao-lin<sup>2</sup>

(1. Guangdong Hualu Communications Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China;

2. Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510550, China)

**Abstract:** Cement fly ash was used as inorganic binder to stabilize natural crushed stone. The effects of cement dosage, fly ash dosage and curing age on unconfined compressive strength, splitting strength and resilience modulus were studied. The results show that the unconfined compressive strength, splitting strength and resilience modulus increase linearly with the increase of cement dosage. The unconfined compressive strength and splitting strength increase first and then decrease with the increase of fly ash dosage, and reach the peak at 9% of fly ash dosage, and the modulus of resilience decreases with the increase of fly ash dosage. With the increase of curing age, the unconfined compressive strength of 28 and 60 d are increased by about 30% and 60%, the splitting strength of 28 and 60 d are increased by about 50% and 70%, and the resilience modulus of 28 and 60 d increased by about 65% and 120%, respectively compared with 7 d.

**Key words:** cement fly ash stabilized crushed stone; unconfined compressive strength; splitting strength; resilience modulus

水泥稳定碎石具有较高的强度和刚度。在中国高等级沥青路面中大多采用水泥稳定类混合料基层, 但容易因基层开裂引起沥青路面出现反射裂缝。在实际使用过程中, 人们往往着重关注水泥稳定碎石的强度。许多学者研究了水泥剂量、成型方

式及试件尺寸等因素对水泥稳定碎石强度的影响<sup>[1-3]</sup>, 而忽略了对水泥稳定碎石回弹模量的研究。回弹模量是表征半刚性基层材料性能的重要参数<sup>[4-5]</sup>, 其数值的增加意味着基层材料的抗变形能力减弱。在荷载和环境因素等作用下易使基层产生

收稿日期: 2019-08-08

作者简介: 刘新海(1993-), 男, 广东华路交通科技有限公司助理工程师, 硕士。

裂缝。在保证路面强度和刚度的前提下, 水泥稳定类材料混合料配合比设计时, 应适当减小回弹模量, 以改善基层的开裂情况。已有的研究表明<sup>[6-10]</sup>: 掺加一定量的粉煤灰活性粉末做结合料可以提高基层的抗裂性能。因此, 为提高基层抗开裂能力, 优化水泥粉煤灰稳定碎石配合比设计, 作者拟研究水泥剂量、粉煤灰剂量及养护龄期对无侧限抗压强度、劈裂强度及回弹模量的影响。

## 1 原材料

### 1) 集料

试验采用某石场产的花岗岩碎石, 其主要技术指标见表 1, 符合现行规范要求。各档集料按比例掺配后的合成级配如图 1 所示。

表 1 集料的技术性质及掺配比例

Table 1 Technical properties and mixing proportion of aggregates

材料类型	含泥量/%	针片状含量/%	压碎值/%	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	掺配比例/%
20~30 mm 碎石	0.5	9.0	—	2.712	0.42	25
10~20 mm 碎石	0.7	10.8	17.8	2.748	0.70	34
5~10 mm 碎石	0.5	9.6	—	2.756	0.93	16
石屑	11.4	—	—	2.705	—	25

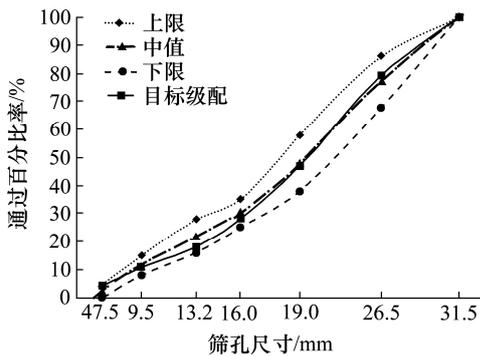


图 1 集料合成级配

Fig. 1 Synthetic gradation of aggregates

### 2) 水泥的技术指标

试验采用某水泥公司生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥, 其技术指标见表 2, 符合现行规范要求。

### 3) 粉煤灰的技术指标

试验采用某电厂生产的 II 级粉煤灰, 其技术指标见表 3, 符合现行规范要求。

表 2 水泥的物理性质及力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of the cement

数据类型	初凝时间/min	终凝时间/min	安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
实测值	350	475	合格	5.0	7.6	29.8	47.1
规范值	≥45	≤600	合格	≥3.5	≥6.5	≥17.0	≥42.5

表 3 粉煤灰检验结果

Table 3 Test results of the fly ash

数据类型	烧失量/%	含量 SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	含水量/%	需水比/%
实测值	2.7	91.5	0.3	104
规范值	≤20	>70	—	—

## 2 配合比设计

水泥粉煤灰稳定碎石配合比设计的关键参数包括: 集料的级配、水泥及粉煤灰与集料的比例。在该领域已有研究和前期试验的基础上<sup>[6-13]</sup>, 采用图 1 所示的集料合成级配, 分别掺加 2.5%~5.5% 的水泥、0%~12% 的粉煤灰, 拟定了 8 种配合比。根据拟定的配合比, 参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)》, 分别进行振动压实试验, 确定每种配合比的最大干密度和最佳含水量, 试验结果见表 4。

从表 4 中可以看出, 当粉煤灰剂量为 6% 时, 随着水泥剂量的提高, 水泥粉煤灰稳定碎石的最佳含水量先增加后减小, 4.5% 水泥剂量的最佳含水量最大为 6.1%。随着水泥剂量的提高, 水泥粉煤灰稳定碎石的最大干密度不变。当水泥剂量为 3.5% 时, 随着粉煤灰剂量的提高, 水泥粉煤灰稳定碎石的最佳含水量和最大干密度表现出类似的规律。

表 4 水泥粉煤灰稳定碎石的配合比设计

Table 4 Proportion design of cement fly ash stabilized crushed stone

配合比编号	集料质量占比/%	水泥剂量/%	粉煤灰剂量/%	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1 <sup>#</sup>	91.5	2.5	6	5.8	2.389
2 <sup>#</sup>	96.5	3.5	0	5.7	2.320
3 <sup>#</sup>	93.5	3.5	3	5.7	2.370
4 <sup>#</sup>	90.5	3.5	6	5.9	2.374
5 <sup>#</sup>	87.5	3.5	9	6.2	2.377
6 <sup>#</sup>	84.5	3.5	12	5.9	2.348
7 <sup>#</sup>	89.5	4.5	6	6.1	2.373
8 <sup>#</sup>	88.5	5.5	6	5.6	2.378

### 3 试验方法

根据表4中的设计配合比,制成尺寸为 $\Phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的试件。按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)》的要求,在完成养生后进行了试验,研究水泥剂量、粉煤灰剂量及养护龄期对水泥粉煤灰稳定碎石无侧限抗压强度、劈裂强度和回弹模量等力学参数的影响。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是反映无机结合料稳定类材料承载能力的一项重要技术指标,它的大小决定基层是否能够承受面层传递下来的荷载,影响路面的使用性能和寿命。

#### 4.1.1 水泥剂量对无侧限抗压强度的影响

半刚性材料的强度主要来源于水泥水硬化后的胶结作用。为研究水泥剂量对抗压强度的影响,将固定粉煤灰剂量取为6%,比较2.5%、3.5%、4.5%和5.5%水泥剂量下的无侧限抗压强度,其28d的试验结果如图2所示。从图2中可以看出,随着水泥剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石的28d抗压强度呈线性增加的趋势,这与普通水泥稳定碎石的强度随水泥剂量的提高而增加的变化规律相一致。当水泥剂量为5.5%时,其28d无侧限抗压强度为16.25 MPa,为2.5%水泥剂量的2.95倍。表明:提高水泥剂量可以显著增加半刚性材料的无侧限抗压强度。

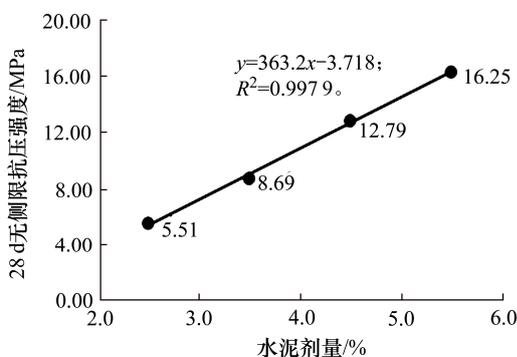


图2 水泥剂量对抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of cement dosage on the compressive strength

#### 4.1.2 粉煤灰剂量对无侧限抗压强度的影响

水泥粉煤灰中含有活性成分。为研究粉煤灰剂

量对无侧限抗压强度的影响,将固定水泥剂量取为3.5%,比较0%、3%、6%、9%和12%粉煤灰剂量下的无侧限抗压强度,其28d的试验结果如图3所示。从图3中可以看出,随着粉煤灰剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石的28d无侧限抗压强度呈先增加后减小的趋势。当粉煤灰剂量不大于9%时,随着粉煤灰剂量的提高,无侧限抗压强度总体呈增长趋势。当粉煤灰剂量为9%时,无侧限抗压强度最大,达到9.52 MPa。当粉煤灰剂量大于9%时,随着粉煤灰剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石无侧限抗压强度呈下降的趋势。

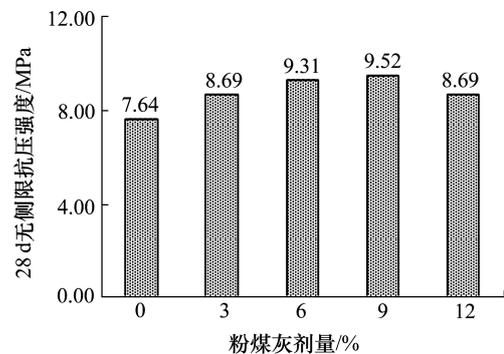


图3 粉煤灰剂量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of fly ash dosage on unconfined compressive strength

#### 4.1.3 养护龄期对无侧限抗压强度的影响

为研究养护龄期对无侧限抗压强度的影响,比较配合比2#普通水泥稳定碎石(3.5%水泥,0%粉煤灰)和配合比4#水泥粉煤灰稳定碎石(3.5%水泥,6%粉煤灰)7,14,28和60d的无侧限抗压强度,试验结果如图4所示。从图4中可以看出,随着养护龄期的延长,普通水泥稳定碎石与粉煤灰水泥稳定碎石

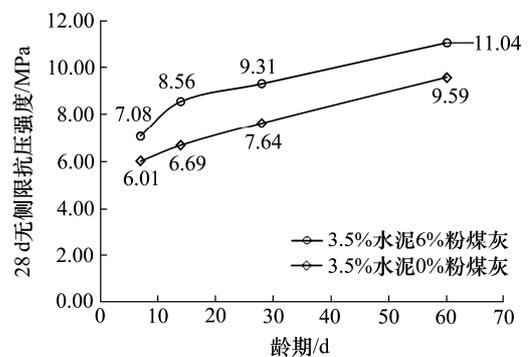


图4 养护龄期对无侧限抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of curing age on unconfined compressive strength

的无侧限抗压强度均呈增大的趋势。与 7 d 的无侧限抗压强度相比, 28 d 无侧限抗压强度增长了约 30%, 60 d 无侧限抗压强度增长了约 60%。在相同的水泥剂量和养护龄期条件下, 水泥粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度是普通水泥稳定碎石的 1.2 倍左右。

## 4.2 劈裂强度

劈裂强度是反映无机结合料稳定材料抗拉能力的常用指标, 其数值的大小对路面基层抗开裂能力的影响显著。

### 4.2.1 水泥剂量对劈裂强度的影响

为研究水泥剂量对抗拉强度的影响, 固定粉煤灰剂量为 6%, 比较 2.5%, 3.5%, 4.5% 和 5.5% 水泥剂量下的抗拉强度, 其 28 d 的试验结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 随着水泥剂量的提高, 水泥粉煤灰稳定碎石的 28 d 劈裂强度呈线性增加的趋势。这与普通水泥稳定碎石的强度随水泥剂量的增加而增加的变化规律相一致。当水泥剂量为 5.5% 时, 其 28 d 劈裂强度为 1.32 MPa, 为 2.5% 水泥剂量的 2.16 倍。表明: 提高水泥剂量可以显著增加半刚性材料的劈裂强度。

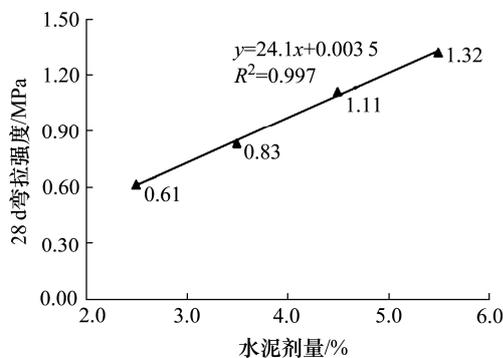


图 5 水泥剂量对劈裂强度的影响

Fig. 5 Effect of cement dosage on splitting strength

### 4.2.2 粉煤灰剂量对劈裂强度的影响

为研究粉煤灰剂量对劈裂强度的影响, 将固定水泥剂量取为 3.5%, 比较 0%, 3%, 6%, 9% 和 12% 粉煤灰剂量下的劈裂强度, 其 28 d 的试验结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 随着粉煤灰剂量的提高, 水泥粉煤灰稳定碎石的 28 d 劈裂强度呈先增加后减小的趋势。当粉煤灰剂量不大于 9% 时, 随着粉煤灰剂量的提高, 劈裂强度总体呈增长趋势。当粉煤灰剂量为 9% 时, 劈裂强度最大, 达到 0.87 MPa。当粉煤灰剂量大于 9% 时, 随着粉煤灰剂量的提高,

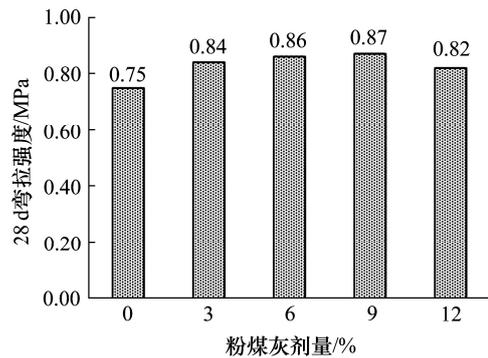


图 6 粉煤灰剂量对劈裂强度的影响

Fig. 6 Effect of fly ash dosage on splitting strength

水泥粉煤灰稳定碎石劈裂强度呈下降的趋势。

### 4.2.3 试件养护龄期对劈裂强度的影响

为研究养护龄期对劈裂强度的影响, 比较配合比 2<sup>#</sup>普通水泥稳定碎石 (3.5% 水泥, 0% 粉煤灰) 和配合比 4<sup>#</sup>水泥粉煤灰稳定碎石 (3.5% 水泥, 6% 粉煤灰) 7, 14, 28 和 60 d 的劈裂强度, 试验结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 随着养护龄期的延长, 普通水泥稳定碎石与粉煤灰水泥稳定碎石的劈裂强度均呈增大的趋势。与 7 d 的劈裂强度相比, 28 d 劈裂强度增长了约 50%, 60 d 劈裂强度增长了约 70%。在相同的水泥剂量和养护龄期条件下, 水泥粉煤灰稳定碎石的劈裂强度是普通水泥稳定碎石的 1.1 倍左右。

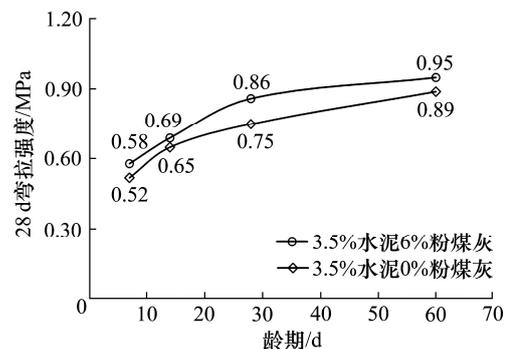


图 7 养护龄期对劈裂强度的影响

Fig. 7 Effect of curing age on splitting strength

## 4.3 回弹模量

回弹模量是弹性变形阶段内材料在荷载作用下产生的应力与其相应的回弹应变的比值。在无机结合料稳定类材料强度不变的条件下, 适当地降低回弹模量可以增强基层的抗开裂能力。

### 4.3.1 水泥剂量对回弹模量的影响

当粉煤灰剂量为 6% 时, 2.5%, 3.5%, 4.5% 和 5.5%

水泥剂量的 28 d 回弹模量试验结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,随着水泥剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石的 28 d 回弹模量呈线性增加的趋势。增长速率先快后慢,水泥剂量达到 4.5% 后趋于稳定。当水泥剂量为 5.5% 时,其 28 d 回弹模量为 4 285 MPa,为 2.5% 水泥剂量的 1.85 倍。

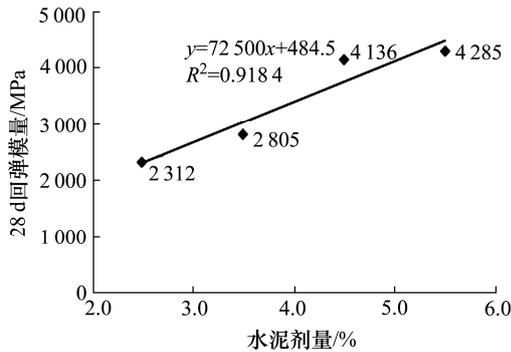


图 8 水泥剂量对回弹模量的影响

Fig. 8 Effect of cement dosage on resilience modulus

#### 4.3.2 粉煤灰剂量对回弹模量的影响

当水泥剂量为 3.5% 时,0%,3%,6%,9% 和 12% 粉煤灰剂量的 28 d 回弹模量试验结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随着粉煤灰剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石的 28 d 回弹模量呈线性减小的趋势。12% 粉煤灰剂量的回弹模量是 0% 粉煤灰剂量的回弹模量的 85%。表明:在水泥剂量一定的条件下,掺加粉煤灰可以降低水泥稳定碎石的回弹模量,提高其抗变形能力。

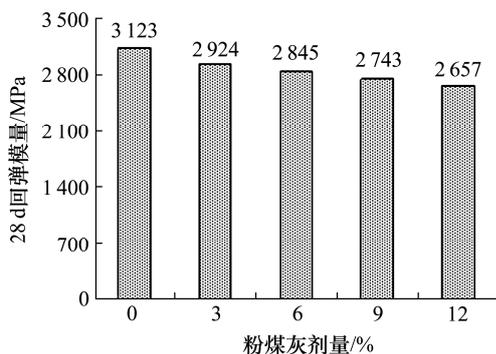


图 9 粉煤灰剂量对回弹模量的影响

Fig. 9 Effect of fly ash dosage on resilience modulus

#### 4.3.3 养护龄期对回弹模量的影响

采用配合比 2<sup>#</sup>(3.5% 水泥, 0% 粉煤灰)和配合比 4<sup>#</sup>(3.5% 水泥, 6% 粉煤灰)研究养护龄期对回弹模量的影响,试验结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,随着养护龄期的延长,普通水泥稳定碎石和粉

煤灰水泥稳定碎石的回弹模量均呈增大的趋势。与 7 d 的回弹模量相比,28 d 回弹模量增长了约 65%;60 d 回弹模量增长了约 120%。在相同的水泥剂量和养护龄期条件下,水泥粉煤灰稳定碎石的回弹模量是普通水泥稳定碎石的 1.2 倍左右。

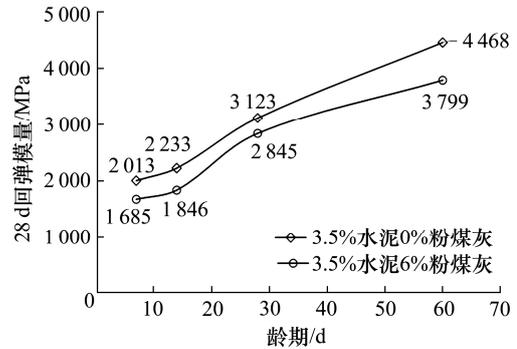


图 10 养护龄期对回弹模量的影响

Fig. 10 Effect of curing age on resilience modulus

## 5 结论

通过研究水泥剂量、粉煤灰剂量及养生龄期对水泥粉煤灰稳定碎石无侧限抗压强度、劈裂强度及回弹模量的影响,得出的结论为:

1) 28 d 无侧限抗压强度随水泥剂量的提高呈线性增加趋势,随粉煤灰剂量的提高呈先增加后减小的趋势。随养护龄期的延长,普通水泥稳定碎石与粉煤灰水泥稳定碎石的无侧限抗压强度均呈增大的趋势。与 7 d 的无侧限抗压强度相比,28 和 60 d 无侧限抗压强度分别增长了 30% 和 60%。

2) 28 d 劈裂强度随水泥剂量的提高呈线性增加趋势,随粉煤灰剂量的提高呈先增加后减小的趋势。随着养护龄期的延长,普通水泥稳定碎石和粉煤灰水泥稳定碎石的劈裂强度均呈增大的趋势。与 7 d 的劈裂强度相比,28 和 60 d 劈裂强度分别增长了 50% 和 70%。

3) 28 d 回弹模量随着水泥剂量的提高呈线性增加趋势。增长速率先快后慢,水泥剂量达到 4.5% 后趋于稳定。随着粉煤灰剂量的提高,水泥粉煤灰稳定碎石的 28 d 回弹模量呈线性减小的趋势。随着养护龄期的延长,普通水泥稳定碎石和粉煤灰水泥稳定碎石的回弹模量均呈增大的趋势。与 7 d 的回弹模量相比,28 和 60 d 回弹模量分别增长了 65% 和 120%。

## 参考文献(References):

- [1] 汪水银,王旭东.考虑尺寸效应和端部效应下的水泥稳定材料的强度试验[J].公路,2007,52(3):119-125.(WANG Shui-yin,WANG Xu-dong.Strength test of cement stabilized crushed stone considering scale-effect and end-effect[J].Highway,2007,52(3):119-125.(in Chinese))
- [2] 李立寒,黄璞,刘栋.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):17-25.(LI Li-Han,Huang Pu,LIU Dong.Impact on the performance of cement stabilized macadam mixtures between gyratory compaction and static compaction methods[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2016,36(6):17-25.(in Chinese))
- [3] 沙庆林.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1999.(SHA Qing-lin.Semi-rigid base asphalt pavement of high-grade highway[M].Beijing:China Communications Press,1999.(in Chinese))
- [4] 王小庆,马磊,李笑盈,等.水泥稳定碎石抗压回弹模量取值模型的建立[J].中国科技论文,2018,13(19):2233-2241.(WANG Xiao-qing,MA Biao,LI Xiao-ying,et al. Development of a model on the compressive resilient modulus value of the cement-stabilized aggregate[J].China Sciencepaper,2018,13(19):2233-2241.(in Chinese))
- [5] 李威,成真霖.冻融循环对水泥稳定碎石抗压回弹模量影响试验研究[J].湖南交通科技,2018,44(1):10-12.(LI We,CHENG Zhen-lin. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycle on compressive resilience modulus of cement stabilized macadam[J].Hunan Communication Science and Technology,2018,44(1):10-12.(in Chinese))
- [6] 徐江萍,徐晓刚,刘国清.水泥粉煤灰稳定碎石基层性能研究[J].中外公路,2005,25(3):15-18.(XU Jiang-Ping,XU Xiao-Gang,LIU Guo-qing. Study on the performance of cement fly ash stabilized macadam base[J].Journal of China & Foreign Highway,2005,25(3):15-18.(in Chinese))
- [7] 张嘎吱,沙爱民.水泥粉煤灰稳定碎石基层的龄期和强度[J].公路交通科技,2005,22(6):27-29.(ZHANG Ga-zi,SHA Ai-min.Study on the design parameter of cement and flyash stabilized crushed-stones[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2005,22(6):27-29.(in Chinese))
- [8] 张嘎吱,沙爱民,周宗科.水泥粉煤灰稳定碎石路面的水泥与粉煤灰比例[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):17-20.(ZHANG Ga-zi,SHA Ai-min,ZHOU Zong-ke. Proportion of the cement to fly ash in cement fly ash stabilized crushed stones pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(5):17-20.(in Chinese))
- [9] 张嘎吱,沙爱民,郝建波,等.水泥粉煤灰稳定碎石基层材料的级配范围[J].长安大学学报:自然科学版,2003,23(4):1-5.(ZHANG Ga-zi,SHA Ai-min,HAO Jian-bo,et al. Grading envelope of cement and fly ash stabilized crushed-stones used as road base material[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2003,23(4):1-5.(in Chinese))
- [10] 邹桂莲,刘新海,周浩浩.水泥粉煤灰稳定再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2018,38(3):254-258.(ZOU Gui-lian,LIU Xin-hai,ZHOU Hao-hao. Study on road performance of cement fly ash stabilized recycled aggregate[J].Journal of China & Foreign Highway,2018,38(3):254-258.(in Chinese))
- [11] 刘新海.再生集料泡沫沥青混合料设计及性能研究[D].广州:华南理工大学,2018.(LIU Xin-hai.Study on the design and performance of form asphalt mixture with recycled concrete aggregate[D].Guangzhou:South China University of Technology,2018.(in Chinese))
- [12] 骆宏勋,龙劭一,吴超凡.水泥粉煤灰稳定钢渣路面基层材料研究[J].公路工程,2011,36(5):47-51.(LUO Hong-xun,LONG Shao-yi,WU Chao-fan.Experimental study on steel slag stabilized with portland cement and coal fly ash[J].Highway Engineering,2011,36(5):47-51.(in Chinese))
- [13] 张可强.水泥粉煤灰稳定碎石组成对其路用性能的影响[J].交通科学与工程,2014,30(2):1-5.(ZHANG Ke-qiang. The composition of cement and fly ash stabilized crushedstones and the impact on the road performance[J]. Journal of Transportation Science and Engineering,2014,30(2):1-5.(in Chinese))