

# 分步拌和抗裂型水泥稳定碎石强度和模量规律

安平<sup>1</sup>,徐钦升<sup>2\*</sup>,丁伟<sup>1</sup>,秦泗龙<sup>1</sup>,闫翔鹏<sup>2</sup>

1.日照公路建设有限公司,山东日照 276800;2.山东省交通科学研究院,山东济南 250031

**摘要:**为解决水泥稳定碎石基层应用中出现裂缝和结构性破坏问题,通过无侧限抗压强度试验和抗压回弹模量试验,测试常规拌和工艺、分步拌和工艺及不同水泥质量分数的水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度和抗压回弹模量,对比分析分步拌和抗裂型水泥稳定碎石的无侧限抗压强度和抗压回弹模量变化规律及新型拌和工艺对水泥稳定碎石材料性能影响。结果表明:2种拌和工艺所制水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度和抗压回弹模量变化规律一致,均随水泥质量分数的增大而不断增大;相同水泥质量分数条件下,基于分步拌和工艺的水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度和抗压回弹模量更大;在相同的无侧限抗压强度和抗压回弹模量要求下,分步拌和工艺水泥稳定碎石混合料的水泥用量减少,可缩减工程成本。

**关键词:**水泥稳定碎石;分步拌和;无侧限抗压强度;抗压回弹模量

中图分类号:U416.214

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)03-0087-06

**引用格式:**安平,徐钦升,丁伟,等.分步拌和抗裂型水泥稳定碎石强度和模量规律[J].山东交通学院学报,2022,30(3):87-92.

AN Ping, XU Qinsheng, DING Wei, et al. Law of strength and modulus of crack resistant cement stabilized macadam by step mixing[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(3): 87-92.

## 0 引言

在我国高速公路建设中,水泥稳定碎石基层已发展成为高等级公路基层的主要结构类型<sup>[1-3]</sup>,且在今后相当长时间内仍将是高速公路基层建设的主流,与其他材料类型基层相比,水泥稳定碎石基层整体性好,承载力强,抗压强度大,抗压回弹模量高,荷载分散作用好,是路面结构的主要承重层,可较好地保证荷载作用在沥青路面上时整个路面结构不会因强度、模量不足或变形过大而发生破坏<sup>[4-6]</sup>。但大量工程应用实践表明,水泥稳定碎石基层在运营过程中出现了大量裂缝和耐久性差等问题<sup>[7-11]</sup>。为解决这些问题,研究人员从改变水泥稳定碎石搅拌工艺技术开展研究:薛少青<sup>[12]</sup>研究了振动搅拌技术对水泥稳定碎石性能的影响;杨周晓政<sup>[13]</sup>研究分离式振动拌和技术对水泥稳定碎石性能的影响;肖栋<sup>[14]</sup>研究了振动搅拌条件下的水泥稳定碎石混合料的性能及工程应用;蔡长松等<sup>[15]</sup>研究了基于拌和方式的水泥稳定碎石基层性能;闫翔鹏等<sup>[16]</sup>研究了分步拌和技术对水泥稳定碎石混合料性能的影响。工艺的改变提升了水泥稳定碎石混合料路用性能,但多采用振动搅拌技术,对水泥稳定碎石在不同拌和技术下力学性能变化规律研究较少,对减少水泥用量和用水量后混合料的性能指标变化规律的研究较少<sup>[17-20]</sup>。

本文研究分步拌和抗裂型水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度和抗压回弹模量的变化规律,分析不同水泥质量分数下分步拌和工艺和常规拌和工艺对水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度和抗压回

收稿日期:2021-07-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600103)

第一作者简介:安平(1973—),男,山东日照人,高级工程师,主要研究方向为道路工程,E-mail:1916559320@qq.com。

\*通信作者简介:徐钦升(1992—),男,山东寿光人,工程师,工学硕士,主要研究方向为道路工程,E-mail:956438206@qq.com。

弹模量规律的影响,以期减少水泥用量,提升水泥稳定碎石基层的耐久性,提高路面的工程质量。

## 1 试验

### 1.1 方案

对基于常规拌和技术和分步拌和技术的水泥稳定碎石混合料进行7 d无侧限抗压强度试验和抗压回弹模量试验,分析不同拌和工艺、不同水泥质量分数和不同养护龄期下的水泥稳定碎石混合料的7 d无侧限抗压强度和抗压回弹模量的变化规律。

试验方案为:在水泥质量分数分别为2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%、6.5%,养护龄期分别为7、14、28 d条件下测试水泥稳定碎石混合料的7 d无侧限抗压强度;在水泥质量分数分别为2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%、6.5%,测试水泥稳定碎石混合料养护龄期为7 d的抗压回弹模量。

### 1.2 水泥稳定碎石混合料的配合比

#### 1.2.1 原材料

选定粒径规格为>20~30、>10~20、>5~10 mm的优质粗碎石集料及0~5 mm的优质细碎石集料,集料指标均满足文献[21]的技术指标要求,主要检测结果如表1所示。

表1 选用粗、细碎石集料的主要指标检测结果

集料类型	集料粒径/mm	压碎值/%	相对密度/%	吸水率/%	软石质量分数/%	针片状质量分数/%	砂当量/%
粗碎石	>5~10		2.612	0.78	0.5	7.2	
	>10~20	22.6	2.658	0.52	0	5.5	
	>20~30		2.694	0.55	0	4.2	
细碎石	0~5		2.601	2.25			62

选用P.O 32.5水泥,主要技术指标如表2所示。

表2 水泥主要技术指标

项目	抗拉强度/MPa		抗折强度/MPa		初凝时间/h	终凝时间/h	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	安定性
	3 d	28 d	3 d	28 d				
试验结果	22.8	22.8	5.4	5.4	3.7	7.2	3.21	合格
技术指标	≥17.0	≥15.0	≥3.5	≥3.5	>3.0	6.0~10.0		

选用可饮用自来水,主要技术指标如表3所示。

表3 所用水质分析试验结果

项目	pH	质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )					其他杂质
		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	碱	可溶物	不溶物	
试验结果	6.6	90	202	352	537	616	无
技术指标	≥4.5	≤3500	≤2700	≤1500	≤10 000	≤5000	无漂浮的油脂和泡沫及明显的颜色、异味

#### 1.2.2 级配

按照文献[22]推荐级配范围进行水泥稳定碎石混合料配合比设计,合成级配如表4所示。

表4 水泥稳定碎石混合料合成级配

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配/%	100	96.1	80.5	49.1	32.4	21.3	9.2	4.2
级配上限/%	100	100	86.0	55.0	36.0	26.0	16.0	5.0
级配下限/%	100	90.0	76.0	43.0	26.0	16.0	8.0	2.0

## 2 试验结果及数据分析

### 2.1 无侧限抗压强度

根据试验方案并按照文献[23]进行7 d无侧限抗压强度试验,常规及分步拌和工艺、不同水泥质量分数下的水泥稳定碎石混合料试验结果如表5、6所示。

表5 常规拌和水泥稳定碎石混合料试验结果

水泥质量分数/%	平均无侧限 抗压强度 $R$ /MPa	无侧限抗压 强度标准差 $S$ /MPa	无侧限抗压 强度偏差系数 $C_V$ /%	混合料强度 代表值 $R_d^0$ /MPa
2.5	2.9	0.23	7.931	2.52
3.0	3.6	0.31	8.611	3.09
3.5	4.2	0.34	8.095	3.64
4.0	4.5	0.38	7.917	4.17
4.5	5.8	0.38	6.552	5.17
5.0	6.7	0.42	6.269	6.01
5.5	7.9	0.44	5.570	7.18
6.0	8.8	0.46	4.886	8.09

表6 分步拌和水泥稳定碎石混合料试验结果

水泥质量分数/%	$R$ /MPa	$S$ /MPa	$C_V$ /%	$R_d^0$ /MPa
2.5	3.8	0.23	6.053	3.42
3.0	4.5	0.26	5.909	3.97
3.5	5.4	0.26	4.815	4.97
4.0	6.2	0.26	4.194	5.77
4.5	7.1	0.35	4.930	6.52
5.0	7.9	0.36	4.557	7.31
5.5	8.5	0.36	4.235	7.91
6.0	9.3	0.33	3.548	8.76

由表5、6可知:2种拌和工艺下的水泥稳定碎石混合料的 $R$ 均随水泥质量分数的增大而增大;水泥质量分数相同时,采用分步拌和工艺的水泥稳定碎石混合料的 $R$ 更大。原因是分步拌和技术可使水泥与水搅拌均匀,形成有一定稠度的水泥胶浆,减少或避免生成水泥团粒,提高水泥颗粒的扩散均匀度;分步拌和技术也可提升粗集料表面的裹附效果,集料凹陷部位可被拌和均匀的水泥胶浆有效填充,混合料内部的孔隙率降低,材料密度增大,界面处水泥颗粒体积浓度增大,水泥浆与粗集料界面的机械咬合作用增强,集料间的结合更稳固,有效提升水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度。

实际工程中水泥稳定碎石基层一般设计无侧限抗压强度为 4.5~5.0 MPa,在保证设计强度的前提下,分步拌和技术所用水泥质量分数最小约为 3.0%~3.5%,常规拌和技术所用水泥质量分数最小约为 4.0%~4.5%,证明采用分步搅拌技术可在同一水泥质量分数下提高水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度。若要求同一无侧限抗压强度,可减少水泥用量,也间接表明分步拌和工艺可改善混合料抗裂性能。

由表 6 可知:在不同的水泥质量分数下,分步拌和工艺的水泥稳定碎石混合料  $C_v$  明显小于常规拌和,  $C_v$  约减小 24%~47%(同一水泥质量分数下,分步拌和工艺的  $C_v$  与常规拌和工艺的  $C_v$  的差与常规拌和工艺的  $C_v$  的比值),表明分步拌和工艺可有效改善水泥稳定碎石混合料的拌和状态,提升混合料拌和均匀性。

水泥稳定碎石混合料 7 d 无侧限抗压强度增量

$$E_{\sigma} = \frac{(\sigma_f - \sigma_c)}{\sigma_c} \times 100\%,$$

式中: $\sigma_f$  为分步拌和混合料 7 d 无侧限抗压强度; $\sigma_c$  为常规拌和混合料 7 d 无侧限抗压强度。

根据表 6 试验数据,计算 2 种拌和工艺、不同水泥质量分数下水泥稳定碎石混合料的  $E_{\sigma}$ ,如表 7 所示。

表 7 2 种拌和工艺、不同水泥质量分数下水泥稳定碎石混合料的  $E_{\sigma}$

水泥质量分数/%	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
$E_{\sigma}/\%$	31.03	25.00	28.57	29.17	22.41	17.91	7.59	5.68

由表 7 可知:水泥稳定碎石混合料所用水泥质量分数较低时,基于分步拌和工艺的水泥稳定碎石混合料 7 d 无侧限抗压强度约比常规拌和技术高 28.44%;随着水泥质量分数增加,强度增长趋势逐渐减小。总体来看,分步拌和工艺在相同水泥质量分数下 7 d 无侧限抗压强度更高;若要求同一无侧限抗压强度,可减少水泥稳定碎石混合料的水泥用量,提高混合料抗裂性能。

## 2.2 抗压回弹模量

参照文献[24]要求对 2 种拌和工艺下的水泥稳定碎石混合料进行抗压回弹模量试验,采用 UTM-100 万能试验机进行加载(分 6 级加载,单位压力为 0.5~0.7 MPa,加载速率为 1 mm/min,正式试验前,先预压 2 次),2 种拌和工艺、不同水泥质量分数水泥稳定碎石混合料抗压回弹模量结果如表 8 所示。

表 8 不同水泥质量分数时 2 种拌和工艺的水泥稳定碎石混合料的抗压回弹模量

水泥质量 分数/%	常规拌和抗压		抗压回弹模量 增量/%	水泥质量 分数/%	常规拌和抗压		抗压回弹模量 增量/%
	回弹模量/MPa	回弹模量/MPa			回弹模量/MPa	回弹模量/MPa	
2.5	1 222.44	1 598.19	30.74	4.5	2 619.23	3 069.13	17.18
3.0	1 456.91	1 889.77	29.71	5.0	2 962.91	3 381.75	14.14
3.5	1 660.31	2 169.33	30.66	5.5	3 232.45	3 599.18	11.35
4.0	2 277.55	2 850.69	25.16	6.0	3 438.86	3 796.58	10.40

注:抗压回弹模量增量为分步拌和与常规拌和抗压回弹模量之差与常规拌和抗压回弹模量的比值。

由表 8 可知:2 种拌和工艺下的水泥稳定碎石混合料抗压回弹模量均随水泥质量分数的增大而升高;与常规拌和工艺相比,相同试验条件下,基于分步拌和工艺的水泥稳定碎石混合料抗压回弹模量更高;在水泥质量分数较低时,分步拌和成型的水泥稳定碎石混合料抗压回弹模量更大,约比其常规拌和 29.07%;随水泥质量分数的增大,分步拌和成型的水泥稳定碎石混合料抗压回弹模量增长幅度逐渐减小,但总体来看,在相同水泥质量分数下分步拌和工艺可获得更高的抗压回弹模量,强度/刚度更大,变形更小,基层耐久性相对更佳;在相同抗压回弹模量指标要求前提下,基于分步拌和工艺的水泥稳定碎石混

合料可以在水泥质量分数较低时满足要求,降低混合料的水泥用量,可有效减少水泥稳定碎石的开裂,提升混合料的抗裂性能。

### 3 结论

1)相同条件下,基于分步拌和与常规拌和工艺的水泥稳定碎石混合料7 d无侧限抗压强度和抗压回弹模量整体变化趋势一致,均随水泥质量分数的增大而增大。

2)同一水泥质量分数下,分步拌和水泥稳定碎石混合料的抗压强度和抗压回弹模量更大。

3)分步拌和工艺可在相同7 d无侧限抗压强度和抗压回弹模量设计指标下,降低水泥稳定碎石混合料的水泥质量分数,缩减成本。

#### 参考文献:

- [1] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.  
SHA Aimin. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5
- [2] 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, 1998.
- [3] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [4] 廖晓锋, 陈忠达, 蒋应军, 等. 施工期间高速公路水泥稳定碎石基层裂缝研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(4): 716-722.  
LIAO Xiaofeng, CHEN Zhongda, JIANG Yingjun, et al. Research on cracking of cement-stabilized macadam base during highway construction[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(4): 716-722.
- [5] 吴明启, 段飞祥. 水泥稳定碎石基层的质量通病及防治[J]. 中国住宅设施, 2021(6): 42-43.
- [6] 吴辉本, 韩焯, 蔡长松, 等. 大厚度水泥稳定碎石基层施工常见问题及质量控制[J]. 山东交通科技, 2021(3): 33-34.  
WU HuiBen, HAN Ye, CAI Changsong, et al. Common problems and quality control of large thickness cement stabilized macadam construction[J]. Shandong Communications Technology, 2021(3): 33-34.
- [7] 李昊, 安平, 高俊启, 等. 水泥稳定碎石长期强度发展规律[J]. 公路, 2021, 66(6): 59-62.  
LI Hao, AN Ping, GAO Junqi, et al. Long-term strength development rules of cement stabilized macadam[J]. Highway, 2021, 66(6): 59-62.
- [8] 张鹏. 高等级公路半刚性基层材料的抗裂性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.  
ZHANG Peng. Research on anti-cracking performance of semi-rigid base course high-grade highway[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [9] 甄少华. 水泥稳定碎石基层材料耐久性提升技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.  
ZHEN Shaohua. Study on durability improvement technology of cement stabilized macadam base material[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019.
- [10] 甘学超. 基于抗裂性能的公路水泥稳定碎石基层材料组成设计研究[D]. 南昌:南昌工程学院, 2020.
- [11] 冯建生. 水泥稳定碎石基层耐久抗裂的振动搅拌技术的研究与应用[D]. 西安:长安大学, 2015.  
FENG Jiansheng. Research and application of the vibration mixing techniques on durability and crack resistance of the cement stabilized macadam base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [12] 薛少青. 振动搅拌对水泥稳定碎石性能影响的试验研究[D]. 西安:长安大学, 2016.  
XUE Shaoqing. Vibratory mixing mechanism and experimental study on improving the cement stabilized macadam performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [13] 杨周晓政. 水泥稳定碎石分离式振动拌合试验研究[D]. 西安:长安大学, 2017.  
YANG-ZHOU Xiaozheng. Study on the test of separated vibration mixing for cement stabilized crushed aggregate[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [14] 肖栋. 振动搅拌条件下水泥稳定碎石性能研究及工程应用[D]. 西安:长安大学, 2019.  
XIAO Dong. Study on performance of cement stabilized macadam under vibration mixing and its engineering application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

- [15] 蔡长松, 韩焯, 吴立强, 等. 基于拌和方式的水泥稳定碎石基层性能研究[J]. 土木工程, 2021, 10(2): 117-123.  
CAI Changsong, HAN Ye, WU Liqiang, et al. Study on performance of cement stabilized macadam base based on mixing mode[J]. Civil Engineering, 2021, 10(2): 117-123.
- [16] 闫翔鹏, 安平, 丁伟, 等. 分步拌和技术对水泥稳定碎石混合料性能的影响[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(2): 48-54.  
YAN Xiangpeng, AN Ping, DING Wei, et al. Influence of stepwise mixing technology on performance of cement stabilized macadam mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2021, 29(2): 48-54.
- [17] 孙军利, 胡敏, 贾文渊, 等. 振动搅拌对水泥稳定碎石性能影响综述[J]. 工程机械, 2021, 52(4): 78-82.
- [18] 周宇豪, 张伟, 廖辉, 等. 振动搅拌技术的水泥稳定碎石性能研究[J]. 四川建材, 2021, 47(7): 114-115.
- [19] 郑世伦, 李鸿, 梁旭之, 等. 不同拌和工艺的水泥稳定碎石基层路用性能试验研究[J]. 公路交通技术, 2020, 36(5): 24-31.  
ZHENG Shilun, LI Hong, LIANG Xuzhi, et al. Experimental study on road performance of cement stabilized macadam with different mixing processes[J]. Technology of Highway and Transport, 2020, 36(5): 24-31.
- [20] 张先岭. 基于顺序拌和技术的水泥稳定碎石性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.  
ZHANG Xianling. Study on performance of cement stabilized macadam based on sequential mixing technology[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.
- [21] 水泥稳定碎石基层施工技术规范: DB 37/T 3577—2019 [S/OL]. (2019-12-26) [2021-06-15]. <https://www.doc88.com/p-1826191925299.html>.
- [22] 公路路面基层施工技术规范: JTG/TF 20—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [23] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [24] 无机结合料稳定类材料单轴压缩抗压回弹模量试验方法(中间段法): GB/T 38989—2020 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.

## Law of strength and modulus of crack resistant cement stabilized macadam by step mixing

AN Ping<sup>1</sup>, XU Qinsheng<sup>2\*</sup>, DING Wei<sup>1</sup>, QIN Silong<sup>1</sup>, YAN Xiangpeng<sup>2</sup>

1. Rizhao Highway Construction Co., Ltd., Rizhao 276800, China; 2. Shandong Transportation Institution, Jinan 250031, China

**Abstract:** In order to solve the problem of cracks and structural damage in the application of cement-stabilized crushed stone base, the unconfined compressive strength test and compressive resilience modulus test were used to test the conventional mixing process, step-by-step mixing process and different cement mass fractions. Unconfined compressive strength, compressive rebound modulus, and effect of new mixing process on the properties of cement-stabilized crushed stone materials of cement-stabilized crushed stone mixture, is comparatively analyzed of the unconfined compressive strength and compressive rebound modulus of step-mixed crack-resistant cement-stabilized crushed stone. The results show that the change rules of unconfined compressive strength and modulus of cement-stabilized crushed macadam mixture prepared by two mixing processes are consistent, and both increase with the increase of cement mass fraction. With the same cement mass fraction, the unconfined compressive strength and modulus of the cement-stabilized crushed macadam mixture based on the step mixing process are greater. Cement stabilized crushed macadam mixture through step mixing process with less cement can match the same unconfined compressive strength and compressive rebound modulus requirements, thus reduce the engineering cost.

**Keywords:** cement stabilized crushed macadam; step mixing; unconfined compressive strength; compressive resilience modulus

(责任编辑:王惠)