

# 振动搅拌水泥稳定碎石的力学性能研究

张显安<sup>1</sup>, 周宇豪<sup>1</sup>, 李雪连<sup>2\*</sup>, 王文强<sup>3</sup>, 谭珂<sup>3</sup>, 杨乐<sup>4</sup>

(1. 湖北交通工程检测中心有限公司, 湖北 武汉 430200; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院;  
3. 佛山路桥建设有限公司; 4. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院)

**摘要:**为对比分析振动搅拌和传统普通静力搅拌工艺对水泥稳定碎石基层抗压强度、抗拉强度和抗压回弹模量等力学性能的影响,该文进行了无侧限抗压强度试验、间接抗拉强度试验和动态回弹模量试验,并铺筑振动搅拌水泥稳定碎石基层试验路。结果表明:振动搅拌能明显提高水泥稳定碎石的抗压强度、间接抗拉强度和动态抗压回弹模量,提高均匀性;试验路的强度、弯沉和压实度等各项技术指标良好。由此可见,振动搅拌工艺可提高水泥稳定碎石的力学性能且应用效果良好。

**关键词:**水泥稳定碎石; 振动搅拌; 抗压强度; 间接抗压强度; 抗压回弹模量

## 1 前言

水泥稳定碎石基层具有高强度、承载能力大、板体性良好、料源广泛、经济效益好等优点。因此,在中国高等级公路建设中,广泛采用水泥稳定碎石作为半刚性基层。在水泥稳定碎石基层的建设中,主要使用双卧轴连续式搅拌机进行普通静力搅拌,搅拌时间短,拌和强度不足,使混合料中的细料和水泥无法均匀散开、容易结团。结团后的水泥颗粒难以充分水化也无法均匀包裹在粗集料表面,最终导致水泥稳定碎石基层出现承载力及耐久性不足等问题。振动搅拌工艺不仅可有效提高搅拌机械的拌和强度,而且还可提高水泥稳定碎石的抗压强度和均匀性。但该工艺对水泥稳定碎石长龄期的力学性能影响和应用效果仍待进一步探索。因此,该文开展室内试验分析振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的抗压强度、抗拉强度和抗压回弹模量等力学性能的影响,并铺筑试验路,对该技术的可行性及

实际使用效果进行验证,为该技术以后的推广应用提供技术参考。

## 2 原材料与配合比设计

### 2.1 原材料

(1) 水泥:采用 P. C. 32.5R 缓凝型水泥,其各项技术指标均满足现行规范要求。

(2) 集料:根据相关规范要求,对粗、细集料的各项技术指标进行检测,具体结果见表1,各项指标均满足规范要求。

### 2.2 配合比设计

#### (1) 级配

研究采用 0~5、5~10、10~20、10~30 mm 共 4 档矿料配制混合料,根据各档料的筛分结果,并参照 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中推荐的水泥稳定碎石基层级配范围,设计得出骨架密实型水泥稳定碎石级配,确定 4 档集料的比例为(0~

表 1 集料技术指标

项目	粗集料			颗粒分析	细集料	
	软石含量/%	压碎值/%	针片状含量/%		小于 0.075 mm 颗粒含量/%	颗粒分析
实测值	3.8	22.4	18.9	满足规范级配	10.6	满足规范级配
规范要求	≤5	≤26	≤22	范围要求	≤15	范围要求

收稿日期:2020-11-29(修改稿)

作者简介:张显安,男,硕士,高级工程师. E-mail:610393630@qq.com

\* 通信作者:李雪连,女,博士,副教授. E-mail:lixuelian@csust.edu.cn

5 mm) : (5 ~ 10 mm) : (10 ~ 20 mm) : (10 ~ 30 mm) = 32 : 10 : 50 : 8。4 档集料的级配和合成级配见表 2。

(2) 击实试验

采用重型击实法确定混合料的最大干密度及最佳

含水量。试验水泥用量分别为 4.0%、4.5%、5.0%和 5.5%，每个水泥用量的含水量为 3.0%、4.0%、5.0%、6.0%和 7.0%。振动搅拌后,根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》重型击实试验中的丙试验方法进行击实试验,结果见表 3。

表 2 混合料集料级配

集料/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	0.075	0.6	2.36	4.75	9.5	19	31.5
0~5	10.6	33.6	60.9	87.0	100	100	100
5~10	1.0	1.0	1.0	5.2	99.9	100	100
10~20	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	54.5	100
10~30	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	2.4	100
合成级配推荐范围/%	0~3	8~15	16~28	22~32	38~58	68~86	100
合成级配通过率/%	3.6	12.1	21.0	28.9	43.4	70.3	100

表 3 重型击实试验结果

水泥用量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水量/%
4.0	2.313	4.9
4.5	2.319	5.0
5.0	2.322	5.2
5.5	2.329	5.3

(3) 制备试件

按照上述合成级配中的比例配制 4 档集料。根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中试件制备方法,首先加入比最佳含水量小 2% 的水浸润 2 h 后,再加入水泥及剩下的水分别进行振动搅拌和普通静力搅拌。振动搅拌采用 DT60ZBW 型搅拌机进行拌和,参考文献[15]。搅拌机搅拌参数为:A(振幅):1.0 mm;ω(角频率):201.1 rad/s;D(振动速度):4.13;A<sub>0</sub>(振动强度):2/g(振动加速度)。普通静力搅拌采用室内混凝土搅拌设备进行搅拌。两种搅拌方式搅拌时间均为 2 min。振动成型法成型效果优于静压成型法,故试验采用振动成型法成型试件。将拌和好的混合料在 1 h 内采用振动压实法成型试件,试件成型 4 h 后脱模。

(4) 最佳水泥剂量

根据重型击实试验结果,分别采用振动搅拌和普通静力搅拌制备 4.0%、4.5%、5.0%和 5.5%水泥用量的 φ15 cm×15 cm 圆柱形试件,养生 7 d 后测试无侧限抗压强度,其结果见表 4。

由表4可知:采用振动搅拌时,混合料水泥最佳剂

表 4 7 d 无侧限抗压强度试验结果

搅拌方式	水泥剂量/ %	代表值 R <sub>d</sub> <sup>0</sup> /MPa	设计强度/ MPa
振动搅拌	4.0	3.73	4.0
	4.5	4.72	
	5.0	5.45	
	5.5	6.50	
	4.0	2.63	
普通静力搅拌	4.5	3.33	4.0
	5.0	4.32	
	5.5	5.21	

量为 4.5%;采用普通静力搅拌时,混合料水泥最佳剂量为 5.0%。因此,为分析振动搅拌工艺对水泥稳定碎石力学性能的影响,后续室内试验选定 4.5%和 5.0%两个水泥剂量进行研究。

3 室内试验研究

3.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度作为无机结合料稳定材料质量控制的主要指标,对水泥稳定碎石基层性能而言至关重要。试件在分别标准养生 7、28 和 90 d 后进行无侧限抗压强度试验,结果见表 5。

从表 4、5 可以看出:① 当水泥剂量及龄期相同时,振动搅拌的无侧限抗压强度明显高于普通静力搅拌。在龄期为 7 d、水泥剂量为 4.5%时,振动搅拌混

表 5 无侧限抗压强度及变异系数  $C_v$  值

水泥 剂量/ %	期龄/ d	振动搅拌		普通静力搅拌	
		无侧限抗压 强度/MPa	变异系 数 $C_v$ /%	无侧限抗压 强度/MPa	变异系 数 $C_v$ /%
4.5	7	4.72	7.7	3.33	8.1
	28	6.18	3.2	4.57	5.4
	90	7.13	3.8	5.82	5.4
5.0	7	5.45	5.5	4.32	7.0
	28	6.71	4.7	5.40	5.5
	90	7.65	4.0	6.42	5.1

合料的无侧限抗压强度为 4.72 MPa,而相同水泥剂量下普通静力搅拌时的混合料强度仅为 3.33 MPa,振动搅拌无侧限抗压强度提高了 41.7%;当水泥剂量为 5.0%时,振动搅拌混合料的强度较普通静力搅拌混合料提高了 26.2%。说明振动搅拌工艺可明显提高水泥稳定碎石混合料的抗压强度;② 在相同水泥剂量及相同龄期时,振动搅拌下的混合料的强度变异系数  $C_v$  均小于普通静力搅拌,故振动搅拌混合料的均匀性更好。如当龄期为 28 d、水泥剂量为 4.5%时,振动搅拌混合料的  $C_v$  值为 3.2%,而普通静力搅拌混合料的  $C_v$  值为 5.4%,振动搅拌混合料的变异系数较普通静力搅拌混合料的  $C_v$  值下降了 40.7%;③ 振动搅拌的抗压强度增长速度较普通静力搅拌增长快。振动搅拌时,4.5%和 5.0%水泥剂量的混合料在 7 d 时强度分别占 90 d 强度的 66.2%和 71.2%;而普通静力搅拌时,4.5%和 5.0%水泥剂量的混合料在 7 d 时强度仅分别占 90 d 强度的 57.2%和 67.3%。

3.2 间接抗拉强度

水泥稳定碎石的间接抗拉强度是最接近水泥稳定碎石基层实际破坏模式的控制指标,对基层设计具有重要意义,故进行 7、28 和 90 d 的间接抗拉强度试验,结果如表 6 所示。

表 6 间接抗拉强度及变异系数  $C_v$  值

水泥 剂量/ %	期龄/ d	振动搅拌		普通静力搅拌	
		间接抗拉强 度/MPa	变异系 数 $C_v$ /%	间接抗拉强 度/MPa	变异系 数 $C_v$ /%
4.5	7	0.33	8.3	0.22	10.1
	28	0.46	6.6	0.37	7.6
	90	0.59	5.4	0.51	6.7
5.0	7	0.39	7.7	0.30	8.5
	28	0.55	5.3	0.44	6.0
	90	0.69	4.2	0.56	5.4

由表 6 可知:① 在相同水泥剂量及龄期下,振动搅拌的间接抗拉强度均大于普通静力搅拌强度。在龄期为 90 d 时,4.5%和 5.0%水泥剂量的振动搅拌间接抗拉强度分别比普通静力搅拌增大了 15.7%和 23.2%。这说明振动搅拌工艺可明显提高水泥稳定碎石的间接抗拉强度;② 振动搅拌混合料的强度在早期形成得更快。采用振动搅拌工艺时,4.5%和 5.0%水泥剂量的混合料 7 d 时的间接抗拉强度为 90 d 强度的 55.9%和 56.5%;而普通静力搅拌下,4.5%和 5.0%水泥剂量的混合料 7 d 时的间接抗拉强度仅为 90 d 强度的 43.1%和 53.6%。这与无侧限抗压强度的规律是一致的,振动搅拌工艺对于提高施工效率,加快施工进度具有极大的促进作用;③ 相较于无侧限抗压强度,振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的间接抗拉强度的提升效果更为明显。在龄期为 7 d、水泥剂量为 4.5%时,振动搅拌工艺下混合料的间接抗拉强度相较于普通静力搅拌混合料的间接抗拉强度提升了 50%,但对无侧限抗压强度仅提升了 41.7%。

3.3 抗压回弹模量

水泥稳定碎石的抗压回弹模量对路面的承载力和路面整体的强度有着重要影响。目前中国大多采用静态试验方法对其测定,但在实际情况下,路面不断受到汽车动态荷载的作用,静态并不能反映路面结构的实际受力状态。故采用动态试验测量水泥稳定碎石的抗压回弹模量,使其更加符合路面的实际使用状态,试验结果见表 7。

表 7 动态抗压回弹模量试验结果

搅拌方式	水泥剂 量/%	龄期/ d	动态抗压回弹模 量代表值/MPa	变异系数 $C_v$ /%
振动搅拌	4.5	28	2 686	7.2
		90	3 784	6.4
	5.0	28	2 976	6.2
		90	4 128	5.3
	4.5	28	2 273	8.9
		90	3 186	6.9
普通静力 搅拌	5.0	28	2 401	6.6
		90	3 395	5.9

由表 7 可知:当龄期 and 水泥剂量相同时,振动搅拌动态抗压回弹模量均高于普通静力搅拌。当龄期为 28 d、水泥剂量为 4.5%时,振动搅拌的动态抗压回弹模量比普通静力搅拌提高了 18.2%。在龄期为 28 d 时,使用振动搅拌工艺,当水泥剂量从 4.5%提升至

5.0%时,水泥稳定碎石的动态模量提升了10.8%;而在同样龄期下,使用普通静力搅拌工艺,当水泥剂量从4.5%提升至5.0%时,水泥稳定碎石的动态模量仅提升了5.6%。这说明当使用振动搅拌工艺时,能更好地发挥水泥的胶结能力。其原因为相对于普通静力搅拌,振动搅拌能将水泥凝聚成团的状态打破,使得水泥的水化更加充分,并且使水泥微粒分布得更加均匀,从而使水泥的潜能充分发挥。

4 试验路铺筑

2019年4月摊铺的试验路位于广东省佛山市高明大桥至富龙大桥公路工程第NHS-01标段K026+140~K026+240,路面结构形式为:4 cm AC-13C+6 cm AC-20C+8 cm AC-25C+56 cm 水泥稳定碎石基层。试验路水泥稳定碎石基层的设计强度为4.0 MPa,根据室内7 d无侧限抗压强度试验结果,当水泥剂量为4.5%时,强度满足设计强度要求。根据规范要求,为保证路面基层强度,采用集中厂拌法施工时,工地实际采用的水泥剂量宜比室内试验确定的最佳剂量增加0.5%,故选定水泥剂量为5.0%。集中厂拌法采用德通DT700ZBT型搅拌机,搅拌机搅拌参数为: $A:1.0\text{ mm};\omega:201.1\text{ rad/s};D:4.13;A_{\omega}:2/g$ 。

4.1 现场强度试验

取一定量的拌和楼混合料,在室内静压成型 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的圆柱形试件,分别标准养生7、28 d,在养生最后一天放入水中浸泡24 h。使用万能压力机进行无侧限抗压强度试验,结果见表8。

表8 无侧限抗压强度试验结果

试件龄期/d	强度平均值 $R/\text{MPa}$	强度标准差 $\text{MPa}$	强度变异系数 $C_v/\%$	强度代表值 $R_d^0/\text{MPa}$
7	5.1	0.45	6.8	4.64
28	6.2	0.47	8.7	5.48

由表8可知:试验路现场所用混合料的7 d无侧限抗压强度满足设计强度(4.0 MPa)要求。在28 d时,混合料无侧限抗压强度相比7 d增大了18.1%,强度明显增大。另外,变异系数基本相同,也说明现场混合料搅拌状况良好,满足实际工程要求。

4.2 现场芯样

钻芯取样是检验路面水泥稳定碎石基层质量的关键指标,为了解水泥稳定碎石基层的强度情况,在施工

结束养生7 d后对试验路段进行现场取芯调查。结果表明:振动搅拌试验路段取出的芯样都完整无松散状,说明水泥稳定碎石在摊铺7 d后,路面基层强度较高,基层已形成板体结构。

4.3 试验路检测与评价

在试验路铺筑碾压完成后,采用灌砂法对其压实度进行检测。在基层养生7 d后,使用贝克曼梁(5.4 m)每隔20 m对其弯沉进行检测,结果见表9。

表9 试验路检测指标

项目	弯沉值/(0.01 mm)			压实度/%		
	平均值	标准差	代表值	平均值	标准差	代表值
测量值	2.8	1.55	5.9	99.0	0.32	98.7
设计要求	24.6			98.0		
规范要求	满足设计要求			98.0		

由表9可知:① 振动搅拌工艺铺筑的试验路路面基层的弯沉值远小于设计要求。这说明使用振动搅拌工艺施工的水泥稳定碎石基层的板体性好,刚度较高;② 振动搅拌路段的压实度较高,满足设计及相关施工规范要求。

5 结论

为对比振动搅拌与静力搅拌工艺的优劣,开展了两种工艺施工的水泥稳定碎石的力学性能试验并铺筑了试验路,具体结论如下:

- (1) 振动搅拌工艺明显提高了水泥稳定碎石无侧限抗压强度、间接抗拉强度和均匀性,且加快了这两个强度的增长速度。
- (2) 相较于无侧限抗压强度,振动搅拌工艺对水泥稳定碎石的间接抗拉强度的提升效果更为明显。
- (3) 振动搅拌不但能提高水泥稳定碎石的动态抗压回弹模量,且当增大相同水泥用量时较静力搅拌工艺施工提升幅度更大。
- (4) 试验路检测结果表明振动搅拌工艺在实际施工中应用效果良好。

参考文献:

[1] 彭波,魏翻,黄祯敏.骨架密实型水泥稳定碎石级配算法研究[J].中外公路,2017(3).  
[2] 杨春玲,铁明亮.水泥稳定碎石疲劳性能影响因素研究[J].中外公路,2016(2).