

水泥稳定碎石基层大厚度施工压实工艺研究

苗雷¹, 李怀海², 刘毅¹, 吴文娟³, 杨永富³, 徐钦升³

¹中建八局第二建设有限公司, 山东 济南

²山东恒建工程咨询有限公司, 山东 潍坊

³山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: wuwenjuan@sdjtky.cn

收稿日期: 2021年5月7日; 录用日期: 2021年6月2日; 发布日期: 2021年6月9日

摘要

本文依托水泥稳定碎石基层试验段进行了大厚度施工压实工艺研究, 检测结果表明: 单层施工压实厚度 36 cm 的水泥稳定碎石基层压实质量可满足设计要求; 碾压时遵循先轻后重、先慢后快、从低到高的原则, 碾压段落长度宜控制在 30~50 m 之间; 采用分层、整层相结合的压实度检测方法可有效控制大厚度水泥稳定碎石基层施工质量。

关键词

水泥稳定碎石基层, 大厚度施工, 压实工艺, 质量控制

Research on Compaction Technology of Cement Stabilized Macadam Base with Large Thickness

Lei Miao¹, Huaihai Li², Yi Liu¹, Wenjuan Wu³, Yongfu Yang³, Qinsheng Xu³

¹The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan Shandong

²Shandong Hengjian Engineering Consulting Co., Ltd., Weifang Shandong

³Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Email: wuwenjuan@sdjtky.cn

Received: May 7th, 2021; accepted: Jun. 2nd, 2021; published: Jun. 9th, 2021

Abstract

Based on the test section of cement stabilized macadam base, this paper studies the compaction

文章引用: 苗雷, 李怀海, 刘毅, 吴文娟, 杨永富, 徐钦升. 水泥稳定碎石基层大厚度施工压实工艺研究[J]. 材料科学, 2021, 11(6): 707-716. DOI: 10.12677/ms.2021.116082

technology of large thickness construction. The test results show that the compaction quality of cement stabilized macadam base with single layer construction compaction thickness of 36 cm can meet the design requirements; the rolling should follow the principle of light before heavy, slow before fast, from low to high, and the length of rolling section should be controlled between 30~50 m; the construction quality of cement stabilized macadam base with large thickness can be effectively controlled by using the compaction detection method of layered and whole layer.

Keywords

Cement Stabilized Macadam Base, Large Thickness Construction, Compaction Technology, Quality Control

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国高等级公路绝大多数采用水泥稳定碎石基层沥青路面结构，基层质量在一定程度上决定路面结构的使用寿命。从我国基本国情出发，“强基薄面”的设计理念，使得我国高等级沥青路面具有较厚的水泥稳定碎石基层结构。受限于传统的施工设备性能，水泥稳定碎石基层不得不分多层、分断面施工。传统水泥稳定碎石基层通常采用左右并机、三层分铺的施工方式，存在层间结合不良、基层分薄层受力的弊端。基层整体性不强，极易产生裂缝及疲劳损伤，影响路面结构使用寿命[1]。

我国的高速公路通车里程位居世界第一位，高等级公路解决了“从无到有”的问题，“从有到优”逐渐成为追求的目标。随着科学技术的不断进步，施工机具的性能也大幅提升，突破传统工艺单层最大压实厚度不大于 20 cm 的上限[2]，进行更大厚度的水泥稳定碎石基层施工逐渐成为可能。大厚度水泥稳定碎石施工是指水泥稳定碎石一次施工单层压实厚度大于 20 cm 的施工工艺[3]，施工厚度的增加，可减少厚层基层的分层，提升水泥稳定碎石的整体性，实现理论设计与实际施工的统一，提高施工效率，是提高水泥稳定碎石基层结构性能，保证路面结构使用寿命的有效途径。然而针对更大厚度的施工带来的压实等技术难题，许多研究人员进行了大量的研究。王选仓等人研究了半刚性路面材料大压实功压实规律，发现振动压路机吨位的大小根据铺层厚度和材料种类来定，当压实力过小时，单纯增加碾压遍数会降低最佳含水率，这样会导致当混合料含水率过大时，开裂的可能性增大[4]。同样，压路机吨位也不能一味地过大，否则会将石料击碎，下承层受到影响，或出现碾压“弹簧”现象。刘杰等人进行了超厚铺层压实设备的现状与应用的研究，发现与圆周振动压路机相比，垂直振动压路机对深处的压实效果更显著：在深度相同、压实遍数相同时，压实度可提高 1%~2% [5]。宋皓等人进行了垂直振动压路机不同参数压实性能试验研究，发现垂直振动压路机的压实性能受不同质量分配和振动参数影响，垂直振动压路机适合厚层压实，深层压实效果较佳[6]。但是针对实际施工过程中特定施工机具条件下的压实组合及压实工艺的研究还比较少，本文依托某新建高速公路项目，设置不同的碾压方案，进行大宽度一次性摊铺碾压成型施工工艺研究。根据设计文件要求，该依托工程主线及枢纽互通立交匝道道路基层采用 36 cm 水泥稳定碎石，水泥掺量参考剂量为 4.5%，要求压实度 $\geq 98\%$ 。

2. 试验段用原材料

水泥稳定碎石基层的主要原材料有水泥、碎石，我部对所用材料均按规定频率做了试验检测，各项

指标均满足要求[7]。

1) 水泥

采用普通 P.O 42.5 硅酸盐水泥，初凝时间在 4 小时以上，终凝时间在 6 小时以上。

2) 碎石

采用石灰岩碎石，按 19~31.5 mm，9.5~19 mm，4.75~9.5 mm，0~4.75 mm 四种规格备料。

3) 水

混合料拌合、养生用水均采用 120 m 深洁净的地下水，满足要求。

3. 水稳基层配合比

设计首先对原材料进行筛分，均采用水筛法，并对原材料各项密度指标进行测试。通过对原材料基本性能的分析，按照嵌挤骨架密实的原则进行级配优化设计，级配设计过程同时参考了国内与省内进行的同类型水稳碎石级配设计的成功经验，综合考虑了混合料的强度、抗裂、抗冲刷等性能以及施工过程中的和易、摊铺、压实、离析等因素进行级配选择[8]。在级配设计的基础上，用设计的级配及其相应的配比，按照规范要求击实试验确定不同水泥剂量的最大干密度和最佳含水量。击实试验采用三组水泥剂量，分别为 3.5%、4.5%、5.5%，每组水泥剂量采用五个含水量进行击实，分别为 3%、4%、5%、6%、7%。最后，用静压法成型试件，经过七天标准养生后进行无侧限抗压强度试验。通过级配及强度设计，选择合理的级配和水泥剂量，为生产配比设计及现场施工过程质量控制提供依据。目标配合比设计的结果如下表 1~3 所示。

Table 1. Design results of aggregate ratio

表 1. 集料配比设计结果

原材料(mm)	石灰岩 10~30	石灰岩 10~20	石灰岩 5~10	石灰岩 0~5
百分比(%)	18	30	20	32

Table 2. Synthetic gradation table

表 2. 合成级配表

筛孔(mm)	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
通过率(%)	100.0	94.7	78.7	51.7	29.6	16.7	11.3	7.6	2.4

Table 3. Design cement dosage and strength table

表 3. 设计水泥剂量及强度表

水泥种类	水泥剂量(%)	最佳含水量(%)	最大干密度(g/cm ³)	无侧限抗压强度平均值(Mpa)
普通硅酸盐水泥	4.5	4.4	2.344	4.86

4. 水泥稳定碎石大厚度施工工艺

水泥稳定碎石基层施工采用单层压实厚度为 36 cm，一次摊铺一次碾压成型的大厚度施工工艺。

4.1. 施工设备

根据大厚度水泥稳定碎石基层施工的是技术要求，配备以下主要施工机械(见表 4)进行施工。

Table 4. Main mechanical equipment on site
表 4. 现场主要机械设备

序号	设备名称	型号	数量
1	稳定土拌合站	WBZ-600	2
2	摊铺机	DT2000	1
3	胶轮压路机	YL37	2
4	单钢轮压路机	YZ36	1
5	双钢轮压路机	YZC17	1
6	运输车	20T	30
7	智能撒布车	FD5070GLQ	1
8	大容量灌砂筒	Φ150 mm	1
9	大功率取芯机	Φ100 mm * 600 mm	1

4.2. 施工工艺流程

主要采用 DT2000 摊铺机和 YZ36 单钢轮压路机、YL37 胶轮压路机、YZC17 双钢轮压路机进行摊铺碾压组合施工，施工时采用水泥稳定碎石拌合站进行集中拌合，用自卸车运输，主要施工工艺流程如图 1 所示。

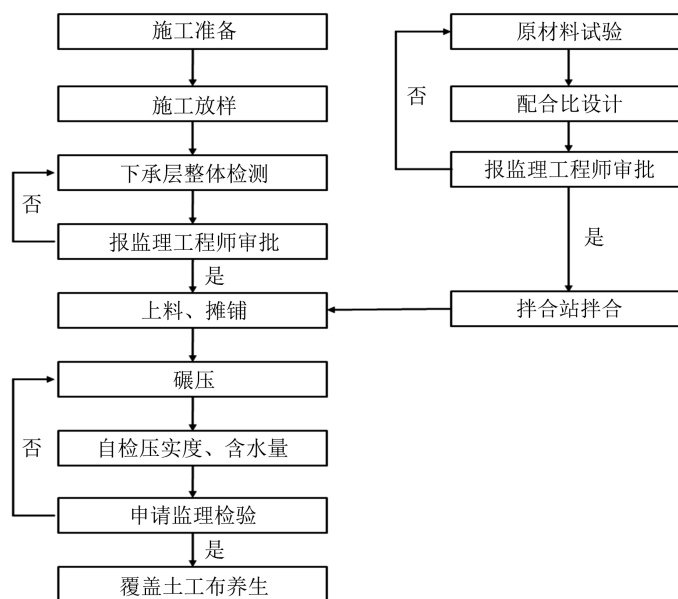


Figure 1. Construction process
图 1. 施工工艺流程

4.3. 压实工艺组合

混料摊铺后采用 1 台 YZ36 单钢轮振动压路机和 1 台 YZC17 双钢轮压路机、1 台 YL37 胶轮压路机跟在摊铺机后面全宽范围内进行碾压，碾压组合方式和遍数遵循先轻后重、先慢后快、从低到高的原则，碾压时后轮重叠 1/3 轮宽，摊铺根据现场摊铺速度和时间来控制碾压段。

为选取合理有效的碾压组合方式，采取三种碾压工艺进行碾压对比，碾压对比首先保证基层压实度要求，然后根据施工平整度、厚度等因素来优选碾压工艺，试验段具体碾压组合方式如下表 5。

Table 5. Compaction combination method

表 5. 压实组合方式

阶段	压路机类型	碾压遍数	方式
初压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅前静后静碾压 1 遍	方案一
	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅前震后震碾压 1 遍	
复压	YZ36 单钢轮压路机一台	全幅前静后震 1 遍，前震后震 2 遍	
	YL37 胶轮压路机一台	与单钢轮交叉碾压，全幅碾压 3 遍	
终压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅静压收光 1 遍	
初压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅前静静碾压 1 遍	
	YZ36 单钢轮压路机一台	全幅前静后震 1 遍，前震后震 1 遍，前震后静 1 遍	
	YL37 胶轮压路机一台	与单钢轮交叉碾压，全幅碾压 3 遍	
终压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅静压收光 1 遍	
初压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅前静后震碾压 1 遍	方案三
	YZ36 单钢轮压路机一台	全幅前静后震 1 遍，前震后震 1 遍，前静后静 1 遍	
	YL37 胶轮压路机一台	与单钢轮交叉碾压，全幅碾压 3 遍	
终压	YZC17 双钢轮压路机一台	全幅静压收光 1 遍	

4.4. 压实度检测方法

水泥稳定碎石基层大厚度施工压实度是施工质量控制的核心，由于施工厚度加大，压力传导衰减较快，易导致顶部超密，底部压实不足的现象。传统的灌砂法只能控制整层的压实度，对底部欠压问题无法控制。

本文提出了分层、整层相结合的压实度控制方法，采用挖坑灌砂法(如图 2 所示)分别检测上下半层的压实度，结合灌水法控制整层的压实度，在确保整体压实质量的同时，也控制上下的压实变异。



Figure 2. Compaction detection

图 2. 压实度检测

5. 试验段实测技术指标

5.1. 松铺系数检测

1) 试验段拟设松铺系数

试验段松铺系数拟定为 1.32，松铺厚度为 47.5 cm。

2) 松铺系数测试方法

摊铺前，对下承层顶面高程 H 进行检测，纵向每 10 米一个断面，每断面横向 3 个点，分别设在横向 2 m、7 m、12 m 处，共 9 个点，纵向采用中桩控制，横向用钢尺进行控制，以便松铺及压实后的检测能在同一点上进行。

混合料摊铺后、碾压前对混合料松铺高程 H_1 进行测量，混合料终压完成后对混合料压实高程 H_2 进行测量。通过下承层顶面高程 H 、松铺高程 H_1 及压实高程 H_2 三组高程的测量求得每个检测点混合料的松铺厚度和压实厚度。

3) 实测松铺系数

单点的松铺厚度除以压实厚度求得单点的松铺系数，将各点的松铺系数汇总取平均值求得水稳基层的松铺系数 K ，计算公式为 $K = \Sigma[(H_1-H)/(H_2-H)]/N$ (N 代表检测点的总数)，如表 6 所示实测水稳基层松铺系数为 1.353。

Table 6. Test data table of loose laying coefficient

表 6. 松铺系数检测数据表

位置	点位(m)	松铺前高 H (m)	松铺高程 (m)	压实后高程 H_2 (m)	松铺厚度 H_1-H (cm)	压实厚度 H_2-H (cm)	松铺系数 $(H_1-H)/(H_2-H)$
1	2	79.318	79.790	79.666	47.2	34.8	1.356
	7	79.248	79.722	79.600	47.4	35.2	1.347
	12	79.147	79.613	79.489	46.6	34.2	1.363
2	2	79.226	79.699	79.577	47.3	35.1	1.348
	7	79.140	79.609	79.489	46.9	34.9	1.344
	12	79.050	79.526	79.383	47.6	35.3	1.348
3	2	79.115	79.589	79.465	47.4	35.0	1.354
	7	79.026	79.495	79.374	46.9	34.8	1.348
	12	78.926	79.397	79.275	47.1	34.9	1.348
平均值 K							1.353

5.2. 混合料试验检测

1) 水泥剂量检测

水泥剂量的检测从拌合稳定的第三车进行首次检测，后场实测值为 4.5%，在现场对应的摊铺桩号处取样，检测值为 4.5%，水泥剂量无损失。试验段水泥剂量检测组数 6，合格组数 6，检测桩号及数据详见下表 7。本次检测数据满足《水泥稳定碎石底基层施工指导意见》不小于-1.0%的要求，合格率 100%。

Table 7. Cement dosage test data table
表 7. 水泥剂量检测数据表

取样位置	试样质量(g)	EDTA 滴定量(ml)				结合料剂量(%)
		初读数	末读数	滴定量	平均值	
1	1000	6.3	11.2	14.5	14.4	4.5
		11.2	25.4	14.2		
2	1000	4.6	19.7	15.1	15.0	4.7
		8.5	23.3	14.8		
3	1000	5.1	19.6	14.5	14.6	4.5
		12.7	27.3	14.6		
4	1000	4.6	19.4	14.8	14.8	4.6
		8.6	23.3	14.7		
5	1000	9.5	23.9	14.4	14.4	4.5
		14.9	29.2	14.3		
6	1000	6.7	21.5	14.8	14.8	4.6
		12.9	27.6	14.7		

2) 级配检测

级配检测从拌合稳定的第 3 车、第 10 车分别取样；级配检测共 2 组，各筛孔通过率均符合《水泥稳定碎石底基层施工指导意见》级配要求范围内，合格率为 100%，详细检测结果表 8 所示。

Table 8. Mixture gradation testing data table
表 8. 混合料级配检测数据表

组数	各筛孔通过率(%)							
	31.5	26.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
1	100	97.4	79.6	49.4	29.8	19.7	9.0	3.4
2	100	97.4	79.8	49.8	30.1	19.6	9.2	3.2
上限	100	100	86.0	55.0	36.0	26.0	16.0	5.0
下限	100	90.0	76.0	43.0	26.0	16.0	8.0	0.0

3) 含水量检测

由于第一、第二车混合料拌合相对不稳定，取拌合稳定的第 3 车混合料进行含水量检测，实测值为 5.76%，满足设计要求的 5.0%~6.0%。根据现场施工情况，运距约为 2.0 km。摊铺开始前，测得含水量为 5.57%，含水量损失 0.19%。碾压结束后，在相对应处用烘干法进行含水量检测，实测值为 5.39%，含水量损失 0.18%。经选取第 6 车、第 10 车、第 15 车、第 20 车含水量为 5.64%、5.83%、5.69%、5.74%，压实后测得含水量为 5.32%、5.44%、5.34%、5.36%，含水量损失 0.32%、0.39%、0.35%、0.38%，含水量损失平均值为 0.38%。

5.3. 压实度检测

现场根据三种碾压组合方式分别检测压实度，采用分层灌砂法和整层灌水法进行检测，检测数据如表 9 所示。

Table 9. Data sheet of compaction test

表 9. 压实度检测数据表

序号	桩号	压实方法	压实度		检测方法	备注
1	K69 + 180 距中 5 米处		100.3	98.7	分层灌砂法	上基层
			97.1			下基层
2	K69 + 220 距中 6 米处	方案一	100.9	98.9	分层灌砂法	上基层
			97.0			下基层
3	K69 + 180 距中 6 米处		98.2		灌水法	全厚度
4	K69 + 260 距中 8 米处	方案二	100.4	99.9	分层灌砂法	上基层
			99.4			下基层
5	K69 + 270 距中 6 米处		99.8		灌水法	全厚度
6	K69 + 315 距中 8 米处	方案三	102.1	99.6	分层灌砂法	上基层
			98.9			下基层
7	K69 + 340 距中 6 米处		99.1		灌水法	全厚度

以上三种碾压方式都能满足压实要求，其中方案二压实度相对较好，采用分层灌砂法每层都能达到设计要求，且两层的差值较小，采用全厚度灌水法也完全达到设计要求，且和灌砂法测得的压实度平均值相差很小。

5.4. 工程技术检测

1) 平整度

采用 6 米直尺进行平整度检测，共检测 4 处*10 尺，数据如表 10 所示。

Table 10. Flatness test data table

表 10. 平整度检测数据表

检测桩号		幅别	数据值(mm)										超过规定 值点数
起	止		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
69 + 180	69 + 240	左 9 米	10	7	5	9	6	8	6	7	10	7	2
69 + 180	69 + 240	左 4 米	5	8	7	4	6	5	8	9	6	4	1
69 + 310	69 + 370	左 9 米	7	9	10	6	3	6	4	5	8	3	2
68 + 310	68 + 370	左 4 米	4	10	11	9	8	7	3	4	10	6	4

合格值 ≤ 8 ，经过检测，大部分平整度都符合规范要求，在压路机分段碾压接头处，平整度相对较差，后期施工中需要加强处理和控制在碾压接头处平整度。

2) 厚度

通过取芯检测水稳基层整体厚度，数据如表 11 所示。

Table 11. Thickness test data table

表 11. 厚度检测数据表

桩号及位置	厚度			
	规定值(cm)	实测(cm)	偏差(cm)	
1	距中 3 米	36	34.5	-1.5
	距中 8 米	36	35	-1.0
	距中 11 米	36	34.5	-1.5
2	距中 3 米	36	34.5	-1.5
	距中 8 米	36	34.5	-1.5
	距中 11 米	36	35.1	-0.9
3	距中 3 米	36	34.1	-1.9
	距中 8 米	36	35.1	-0.9
	距中 11 米	36	33.6	-2.3
4	距中 3 米	36	33.6	-2.3
	距中 8 米	36	34.0	-2.0
	距中 11 米	36	35.5	-0.5
5	距中 3 米	36	35.6	-0.4
	距中 8 米	36	34.8	-1.2
	距中 11 米	36	35.5	-0.5

对检测数据分析发现，水泥稳定碎石大厚度施工试验段压实厚度控制难度较大，均较设计值偏低。

6. 结论

1) 水泥稳定碎石基层大厚度施工技术需配备具备相应性能的施工设备，单层施工压实厚度为 36 cm 时，应至少配置一台大功率摊铺机、一台 36 t 大吨位单钢轮压路机、一台 37 t 胶轮压路机、一台 17 t 双钢轮压路机及产量 600 T/h 以上的水泥稳定碎石拌合站。

2) 水泥稳定碎石基层大厚度施工压实工艺推荐采用文中工艺二，碾压时遵循先轻后重、先慢后快、从低到高的原则。为保证平整度，碾压段落长度宜控制在 30~50 m 之间，分段接头处易出现推移拥包，须加强控制。

3) 水泥稳定碎石大厚度施工松铺系数大，厚度及平整度控制难度大大增加，须加大监测频率，可通过提高摊铺后混合料的初始压实度及使用双钢轮初压，减少大吨位压路机碾压造成的平整度差及厚度不足的问题。

4) 压实度是水泥稳定碎石施工质量控制的核心，水泥稳定碎石大厚度施工压实度控制应采用分层和整层相结合的压实度控制方法，保证施工质量。

参考文献

- [1] 韦金城, 王林, 等. 半刚性基层损伤评价与工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [2] 中交路桥技术有限公司. JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [3] 公路水泥稳定碎石基层宽幅大厚度整体化施工技术指南[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2019.
- [4] 王选仓, 乔志, 尹燕, 等. 半刚性路面材料大压实功压实规律研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 280-286.
- [5] 刘洁, 牛春亮, 李朋伟, 等. 超厚铺层压实设备的现状与应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(10): 30-35.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-033X.2016.10.015>
- [6] 宋皓, 李彦伟. 垂直振动压路机不同参数压实性能试验研究[J]. 工程机械与维修, 2017(12): 82-83.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2114.2017.12.043>
- [7] 交通运输部公路科学研究院. JTG/TF20-2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 山东省市场监督管理局. DB37/T3577-2019 水泥稳定碎石基层施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.