

# 基于拌和方式的水泥稳定碎石基层性能研究

蔡长松<sup>1</sup>, 韩 焯<sup>2</sup>, 吴立强<sup>1</sup>, 郑如岩<sup>3</sup>, 闫翔鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>滨州市公路事业发展中心, 山东 滨州

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

<sup>3</sup>山东省滨州公路工程有限公司, 山东 滨州

Email: 1250142159@qq.com

收稿日期: 2021年1月21日; 录用日期: 2021年2月13日; 发布日期: 2021年2月24日

## 摘 要

为了了解拌和方式对水泥稳定碎石材料性能的影响, 本文选用3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%五种水泥剂量分别对顺序拌和、振动拌和和传统常规拌和三种拌和方式下的最佳含水率、无侧限抗压强度、劈裂强度干缩系数等试验数据进行了对比分析。研究表明: 相比较传统常规拌和工艺, 顺序拌和和振动拌和技术最佳含水量可降低15%以上, 无侧限抗压强度也有较大提升, 同等水泥剂量下养护7 d后抗干缩性能也具有更优异的表现, 当水泥剂量较大时振动拌和技术比顺序拌和技术有更好的性能表现。

## 关键词

振动拌和, 顺序拌和, 水泥稳定碎石, 抗压强度, 干缩性能

# Study on Performance of Cement Stabilized Macadam Base Based on Mixing Mode

Changsong Cai<sup>1</sup>, Ye Han<sup>2</sup>, Liqiang Wu<sup>1</sup>, Ruyan Zheng<sup>3</sup>, Xiangpeng Yan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Binzhou Highway Development Center, Binzhou Shandong

<sup>2</sup>Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

<sup>3</sup>Shandong Binzhou Highway Engineering Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: 1250142159@qq.com

Received: Jan. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to understand the way of mixing effect on the performance of cement stabilized gravel

materials, this paper chooses 3.5%, 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, five kinds of cement dosage of traditional order mixing, vibrating mixing and conventional mixing three mixing mode of optimum moisture content and unconfined compressive strength, splitting strength, dry shrinkage coefficient and so on, comparing the test data analysis. Research shows that: compared with the traditional conventional mixing process, the order of mixing and vibrating mixing technology optimum moisture can reduce more than 15%, the unconfined compressive strength has large improvement, and also under the same cement dosage curing shrinkage resistance after 7 d also has more excellent performance, when the cement dosage larger vibration than order batch mixing technology has a better performance.

## Keywords

Vibration Mixing, Sequential Mixing, Cement-Stabilized Macadam, Compressive Strength, Dry-Shrinkage Performance

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

自上世纪八十年代, 随着我国高等级公路建设里程的快速发展以及轴重和交通量的逐年增加, 半刚性基层以其强度高、成本低、材料来源广泛等特点, 成为我国近几十年公路建设的主要承重层, 采用具有水硬性结合料处置基层的沥青路面的优势愈发凸显, 在社会经济水平相对较低的国情条件下, 在提高道路服务功能和保障交通运输的发展上, 起到了卓越的贡献。

然而, 半刚性材料因其为水硬性材料特点, 因水分挥发带来的干缩和温度变化与材料收缩性能引起的温缩, 造成半刚性基层过早出现裂缝, 裂缝迅速向面层反射, 产生反射裂缝, 进而在路面产生裂缝、坑槽等早期损坏, 严重影响道路行车安全以及使用寿命[1], 影响安全的同时也缩短路面使用年限, 沥青路面的横向开裂问题已成为国内半刚性基层结构的通病和难题。

针对半刚性基层的抗裂措施研究, 目前国内外主要的解决办法有降低水泥剂量、调整混合料级配类型、改善施工工艺等手段, 而顺序拌和技术和振动拌和技术是基于拌和方式通过改善施工工艺、提高混合料的均匀性、降低水泥剂量和最佳用水量等方式来提高抗裂性能。

## 2. 技术原理

半刚性基层材料受压开裂破损可以看作剪切破坏, 水泥稳定碎石材料的抗剪切强度表达式为  $\tau = \sigma \tan \phi + c$ , 从式中可得抗剪强度主要取决于垂直压应力  $\sigma$ 、内摩擦角  $\phi$  和粘结力  $c$ , 内摩擦角可通过改善级配类型来提高, 而粘聚力主要取决于水泥稳定碎石材料中结合料的粘结力, 通过提高结合料的均匀性、改善黏结界面的强度可提高水泥稳定碎石材料的抗裂性能。振动拌和技术是通过拌和设备的高频振动可使混合料颗粒保持振动, 这就使得拌和过程中团聚的水泥颗粒分散开来, 加快了粉料与水的弥散, 水泥水化反应更加充分, 同时集料颗粒的振动增强了彼此之间的碰撞机会, 净化了集料表面包裹的粉尘, 增强了水泥胶浆对集料的裹覆效果[2]。顺序拌和技术是基于流变学理论研究水泥稳定碎石材料, 通过调整混合料的掺配顺序为水泥与在水中的弥散提供充分的时间, 同时控制水泥浆的稠度, 改善拌和过程中集料的润湿状态, 保证集料具有良好的流动性, 粗集料较细集料提前加入到拌和过程中, 使粗、细集料

均能达到较为均衡的裹覆状态，提高了集料界面黏结的均匀性和强度[3]。振动拌和技术和顺序拌合技术是基于拌和方式的抗裂型水泥稳定碎石材料制备工艺，均能够通过提升均匀性、降低水泥剂量和含水量来改善水泥稳定碎石材料的抗裂性能。

### 3. 原材料及配合比设计

本文研究以 S247 乐胡线惠民县城至里则镇段改建工程为依托，所有试验原材料皆来自于施工现场。试验用水泥采用滨州青龙山水泥有限公司 P.S.A32.5 水泥，根据相关国家标准及行业规范进行各性能指标检测，经检测试验均符合 GB175-2007《通用硅酸盐水泥》标准的要求。粗集料采用厂家山东隆银工程材料有限公司 10~30 mm、10~20 mm、5~10 mm 石灰岩，检测压碎值、针片状含量和 0.075 mm 以下粉尘含量均符合规范要求，细集料应选取没有杂质的、洁净干燥、无风化并有适当级配的 0~5 mm 石屑，厂家山东隆银工程材料有限公司，检测砂当量和 0.075 mm 以下粉尘含量均符合规范要求。本文采用骨架密实型结构，参照 JTG/TF20--2015《公路路面基层施工技术细则》中“表 4.5.2”中推荐的 C-A-1 级配范围中值，并根据实验室试验确定级配 10~30 mm: 10~20 mm: 5~10 mm: 0~5 mm = 22:33:20:25，级配如表 1。

**Table 1.** Synthetic gradation of cement stabilized materials (%)

**表 1.** 水泥稳定材料合成级配(%)

规格 \ 筛孔尺寸	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.065
级配上限	100	—	90	68	50	38	22	7
级配下限	90	—	67	45	29	18	8	0
混合料	100	96.71	77.36	53.54	34.31	24.53	12.11	3.85

公路路面基层施工技术细则(JTGT F20-2015) 4.6.4 中，对于中粗粒式水泥稳定碎石集中厂拌法要求最低水泥剂量为 3%，如表 2 所示，根据山东地区水泥稳定碎石基层工程应用经验，水泥剂量控制在 4.0%~4.5%，超过 6%后，混合料的收缩系数增大，水泥稳定碎石基层容易出现裂缝，不宜采用，为减少混合料的收缩性，应控制水泥剂量不超过 6%，故在本研究配合比设计阶段选择 5 种水泥剂量(3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%)的混合料进行试验，每个沥青用量分别使用传统常规拌和、顺序拌和和振动拌和三种拌和工艺制备混合料，通过室内试验确定最佳含水率和最大干密度，对每一组混合料分别验证无侧限抗压强度、劈裂强度和干缩性能。室内性能试验混合料来源于项目现场水泥稳定碎石拌合站取料，顺序拌合技术集料的拌和顺序为粗集料 + 水泥胶浆 + 细集料，即首先将粒径不小于 5 mm 的粗集料拌和均匀，再向上述搅拌均匀的粗集料中加入设计浓度的均匀水泥浆拌和均匀，最后加入细集料补足设计用水量充分搅拌。施工现场振动拌和采用许昌德通振动搅拌技术有限公司生产的“DT600ZBT 型振动搅拌机”，该机型采用双卧轴连续振动搅拌技术，振动拌和频率为  $30 \pm 1$  Hz，激振力为 7.6 KN，振幅为  $1.3 \pm 0.05$  mm [4]。

**Table 2.** Minimum cement dose

**表 2.** 水泥的最小剂量(%)

被稳定材料类型	拌和方法	
	路拌法	集中厂拌法
中、粗粒材料	4	3
细粒材料	5	4

## 4. 实验结果分析

### 4.1. 最佳含水率及最大干密度

5 种沥青用量对应最佳含水率及最大干密度如下图所示：

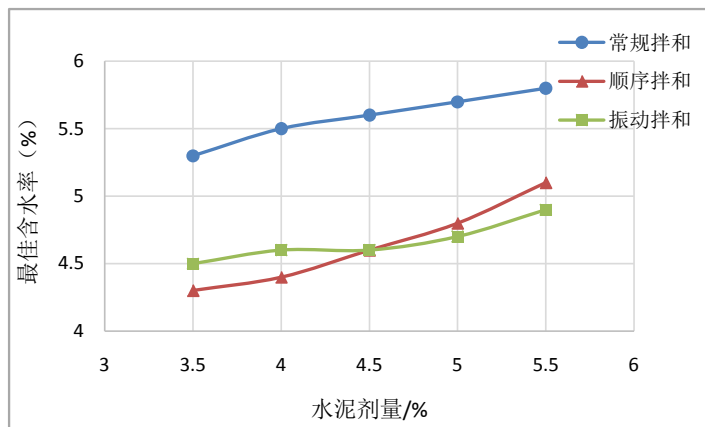


Figure 1. The optimum moisture content of three mixing processes

图 1. 三种拌和工艺最佳含水率

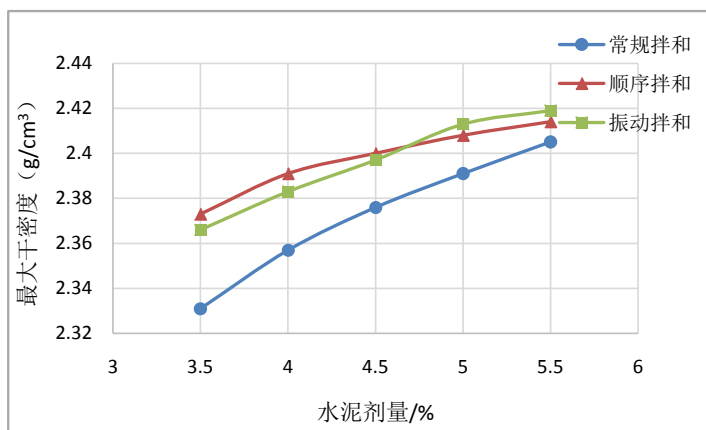


Figure 2. Three mixing processes had the highest dry density

图 2. 三种拌和工艺最大干密度

通过图 1、图 2 分析可得：三种拌和工艺的混合料最大干密度都随着水泥用量的增加，而呈增大趋势；随着水泥用量的增加，混合料中需要更多的水来参加水化反应。顺序拌和和振动拌和两种拌和工艺均可在显著提高试件的最大干密度的同时降低最佳含水量，相比较传统常规拌和工艺，顺序拌和技术最佳含水量可降低 16.8%，振动拌和技术可降低 16.5%。相比较顺序拌和技术振动拌和技术在水泥用量较大时最佳含水量降低效果越来越显著。

### 4.2. 强度和模量

不同水泥剂量、不同拌和方式下水泥稳定碎石混合料的 7 d 无侧限抗压强度如图 3 所示；水泥稳定碎石的劈裂抗拉强度能够从侧面反映其抵抗开裂破坏的能力，本次试验采用尺寸为  $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的试件，静压成型，标准养护 6 d，第 7 d 浸水养护测试劈裂强度如图 4 所示。

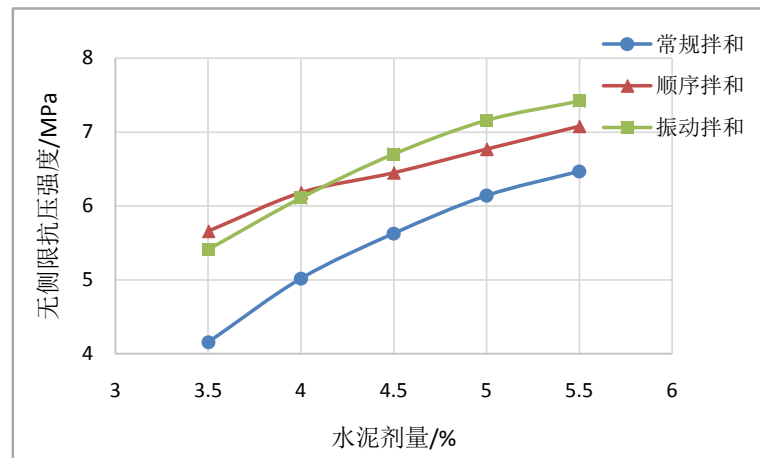


Figure 3. Unconfined compression strength

图 3. 无侧限抗压强度

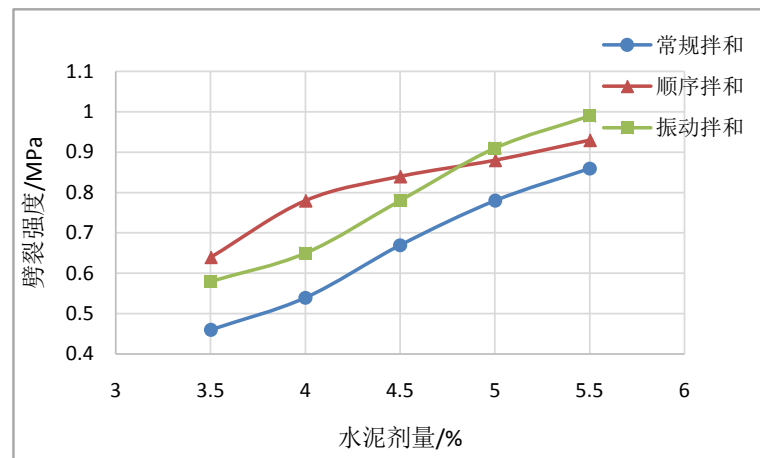


Figure 4. Splitting strength

图 4. 劈裂强度

通过图 3、图 4 实验结果分析可得无论采用顺序拌和技术还是振动拌和技术，其 7 d 无侧限抗压强度和劈裂强度均有不同程度的提升。相比较传统常规拌和方式，顺序拌和 7 d 无侧限抗压强度提升了 17.2%，振动拌和 7 d 无侧限抗压强度提升了 19.6%，顺序拌和和劈裂度提升了 23%，振动拌和和劈裂度提升了 18.1%。通过以上比较不难发现：振动拌和技术对 7 d 无侧限抗压强度提升幅度更大一些，顺序拌和技术对劈裂强度改善效果更明显。通过图 3、图 4 曲线走势还能够得出无论是无侧限抗压强度还是劈裂强度，在水泥剂量较低时顺序拌合技术的改善效果要比振动拌和技术更为明显一些，当水泥剂量较大时振动拌合技术优势更大。

### 4.3. 干缩性能

通过实验数据对比分析可得知水泥稳定碎石试件的干缩系数比温缩系数大 8~10 倍，因此干燥收缩是水泥稳定碎石材料产生收缩裂缝的主要原因[5]，选取水泥剂量为 4% 配制混合料，按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG E51-2009 制作 100 mm × 100 mm × 400 mm 试件进行干缩实验，测试三种拌和方式下随着龄期的增加失水率和干缩量的变化，实验结果如下图所示：

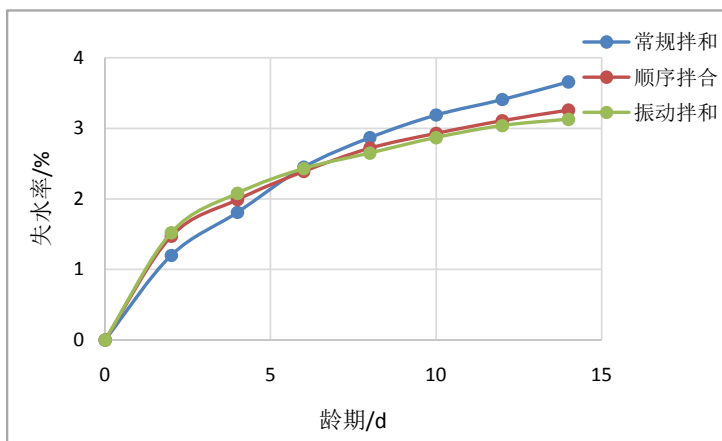


Figure 5. Relationship between age and water loss rate  
图 5. 龄期与失水率关系

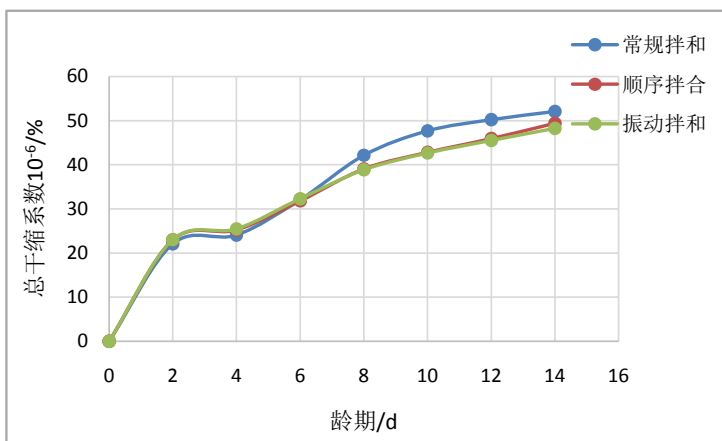


Figure 6. Relationship between age and total shrinkage coefficient  
图 6. 龄期与总干缩系数的关系

通过图 5、图 6 分析可得试件失水率和总干缩系数都随着龄期的增长而增加，在龄期的前 6 d，振动拌和和顺序拌和成型试件失水率和总干缩系数要比传统常规拌和成型试件更大一些，从龄期第 7 d 开始常规拌和试件失水率和总干缩系数超过振动拌和和顺序拌和试件。这是由于振动拌和和顺序拌和混合料分散更均匀，在前期水化反应更快、更充分。

通过以上综合分析可得水泥稳定碎石试件完成养护后同等水泥剂量条件下顺序拌和和振动拌和试件的无侧限抗压强度和劈裂强度要比常规拌和试件高，因此在同等强度下顺序拌和和振动拌和试件的水泥剂量要比常规拌和试件低；根据水泥剂量与干缩系数的关系，无论哪种拌和方式，相同级配下水泥稳定碎石材料的干缩系数随着水泥剂量的增加而增大，对于骨架密实型试件的干缩系数，常规拌和方式比振动拌和方式增加了 21.8% [6]，综合上述原因可得同等强度条件下，振动拌和和顺序拌和技术要比传统常规拌和技术干缩性能有较大提升。

### 5. 结语

本文主要是基于振动拌和、顺序拌和和传统常规拌和三种拌和技术展开的水泥稳定碎石基层抗裂性能研究，主要根据室内试验对三种拌和方式下的最佳含水率、最大干密度、7 d 无侧限抗压强度、劈裂强

度和干缩系数分析研究。通过本文研究主要形成以下结论：

1) 相比较传统常规拌和工艺，顺序拌和技术最佳含水量可降低 16.8%，振动拌和技术可降低 16.5%，相比较顺序拌和技术振动拌和技术在水泥用量较大时最佳含水量降低效果越来越显著。

2) 相比较传统常规拌和工艺，顺序拌和和振动拌和技术对无侧限抗压强度和劈裂强度都有较大程度的提升；振动拌和技术对 7 d 无侧限抗压强度提升幅度更大一些，顺序拌和技术对劈裂强度改善效果更明显，在水泥剂量较低时顺序拌合技术的改善效果要比振动拌和技术更为明显一些，当水泥剂量较大时振动拌合技术优势更大。

3) 从龄期第 7 d 开始常规拌和试件失水率和总干缩系数超过振动拌和和顺序拌和试件，在满足强度指标要求的条件下，顺序拌和和振动拌和技术可以降低水泥剂量，进而改善水泥稳定材料的干缩性能。

## 参考文献

- [1] 陈海民. 沥青路面密度测试方法分析[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(1): 34-35.
- [2] 但路昭, 陈飞, 陈伟, 等. 基于振动拌和工艺的水泥稳定碎石混合料路用性能研究[J]. 公路交通技术, 2018, 5(34): 22-26.
- [3] 张先玲. 基于顺序拌和技术的水泥稳定碎石性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [4] 徐程. 振动拌和对水泥稳定碎石性能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 张鹏. 高等级公路半刚性基层材料的抗裂性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [6] 施洲辉. 基于振动搅拌的抗裂型水泥稳定碎石基层应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.