

# Effect of Cement Stabilized Macadam Unconfined Compressive Strength with Different Rocks

Guangjian Ai<sup>1</sup>, Shuling Zhao<sup>2</sup>, Gongzeng Chen<sup>1</sup>, Xiaomeng Zhang<sup>3</sup>, Xiangpeng Yan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shandong Taishan Road and Bridge Engineering Company, Tai'an Shandong

<sup>2</sup>Shandong Binzhou Highway Engineering Corporation, Binzhou Shandong

<sup>3</sup>Shandong Transportation Institution, Jinan Shandong

Email: sdjtky408@163.com

Received: Apr. 14<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 29<sup>th</sup>, 2019; published: May 6<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The unconfined compressive strength of cement stabilized macadam with limestone, slag, phosphorus slag and steel slag contrasted and analyzed by field and laboratory test. The results show that partial replacement of phosphorus slag macadam and full replacement of steel slag macadam are the best, while cement stabilized slag macadam shows lower unconfined compressive strength than ordinary cement stabilized macadam. Using different types of rocks replaced limestone to prepare the cement stabilized materials was feasible.

## Keywords

Cement Stabilized Macadam, Unconfined Compressive Strength, Slag, Phosphorus Slag, Steel Slag

---

# 不同石料类型对水泥稳定碎石无侧限抗压强度的影响分析

艾广建<sup>1</sup>, 赵树岭<sup>2</sup>, 陈公增<sup>1</sup>, 张晓萌<sup>3</sup>, 闫翔鹏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山东泰山路桥工程公司, 山东 泰安

<sup>2</sup>山东省滨州公路工程总公司, 山东 滨州

<sup>3</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: sdjtky408@163.com

收稿日期: 2019年4月14日; 录用日期: 2019年4月29日; 发布日期: 2019年5月6日

**文章引用:** 艾广建, 赵树岭, 陈公增, 张晓萌, 闫翔鹏. 不同石料类型对水泥稳定碎石无侧限抗压强度的影响分析[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 478-483. DOI: 10.12677/hjce.2019.83056

## 摘要

通过采用工程现场钻孔取芯和室内试验方法,对比分析了以石灰石、炉渣、磷渣和钢渣碎石为集料的水泥稳定材料无侧限抗压强度,得到四种不同水泥稳定材料之间的强度关系,验证了不同石料类型的水泥稳定碎石在工程中的应用的可行性。研究表明:磷渣碎石部分替代和钢渣碎石全部替代石灰碎石的效果最好,而水泥稳定炉渣碎石则表现出逊于普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。采用不同类型的石料部分或全部替代石灰碎石制备水泥稳定碎石在工程中是可行的。

## 关键词

水泥稳定碎石, 无侧限抗压强度, 炉渣, 磷渣, 钢渣

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

水泥稳定碎石作为一种半刚性材料广泛应用于我国高速公路基层与底基层的填筑,并展现出强度高、稳定性强等优点。水泥稳定碎石主要由石料和水泥构成,其中石料起到骨架作用,作为主要承受荷载的载体。在道路工程中,石灰碎石被广泛应用于路面结构材料中,其中水泥稳定碎石材料常用的石灰碎石最大粒径一般为 31.5 mm。但是,目前随着环保政策的日益严峻,石灰碎石的开采成本越发高昂。因此,如何解决水泥稳定碎石中石灰碎石的来源,降低水稳材料的成本成为工程中亟待解决的问题之一。而采用其他类型石料代替石灰碎石成为解决该问题的一个可行途径。

目前,国内外学者对不同石料作为集料制备水泥稳定碎石材料开展了一定的研究。刘栋等采用生活垃圾焚烧后的炉渣替代部分石灰碎石制备了水泥稳定炉渣碎石材料,通过测定材料的无侧限抗压强度和劈裂强度,分析了炉渣熟化时间、粒径、养生龄期和温度、水泥用量对材料强度性能的影响。研究表明,炉渣压碎值随熟化时间的延长而降低,水泥稳定炉渣碎石 7 d 无侧限抗压强度随炉渣熟化时间的延长而提高;掺熟化 30 d 炉渣的水泥稳定炉渣碎石 7 d 无侧限抗压强度为 4 MPa;炉渣粒径越大,则水泥稳定炉渣碎石 7 d 无侧限抗压强度越低;养生龄期越长、水泥用量越大、养生温度越高,则无侧限抗压强度和劈裂强度越高[1]。钱国平等采用磷矿渣代替部分石屑制备了水泥稳定磷渣碎石材料,研究了材料的早期强度。研究表明,用磷渣代替部分石屑配制的水泥稳定材料以及用磷渣微粉代替部分水泥的水泥稳定碎石强度有所降低,但仍然满足高速公路路面基层的强度要求[2]。曾梦澜等利用钢渣部分替代石灰碎石,对不同钢渣掺加比例的水泥稳定钢渣碎石材料进行了击实、无侧限抗压强度、间接抗拉强度、稳定性和抗冲刷等试验,试验结果显示钢渣本身所具有的活性成分使得钢渣作为路面基层材料时具有较高的强度,但过高的强度对于半刚性基层材料的必要性有待进一步的探讨[3]。相关的研究显示,采用不同类型的石料部分或全部代替石灰碎石制备水泥稳定碎石材料是可行的[4] [5] [6],但是不同石料间对于水泥稳定碎石的材料性能影响仍需要深入研究。

本文对工程现场采用石灰碎石作为集料的水泥稳定碎石无侧限抗压强度进行了研究,并与炉渣碎石、磷渣和钢渣碎石作为集料的水泥稳定碎石材料的无侧限抗压强度进行了对比,分析了不同石料类型间,水泥稳定碎石材料的强度差异,为其他类型石料替代石灰碎石用于制备水泥稳定碎石提供了参考与依据。

## 2. 试验材料

本研究中水泥采用日照中联水泥有限公司生产的普通 42.5 硅酸盐水泥，初凝时间为 4 小时，终凝时间为 6 小时以上。

碎石采用安丘山水集团生产的石灰碎石，集料粒径为 19 mm~31.5 mm，9.5 mm~19 mm，4.75 mm~9.5 mm，0 mm~4.75 mm 四种规格。

水泥稳定碎石的拌合、养生用水采用深洁净的地下水。普通水泥稳定碎石材料的配合比见表 1。

Table 1. Mix ratio of ordinary cement stabilized crushed stone

表 1. 普通水泥稳定碎石配合比

	集料用量(%)				水泥掺量 (%)	最大干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最佳含水率 (%)	压实度 (%)
	31.5~19	19~9.5	9.5~4.75	<4.75				
水泥稳定碎石	21	30	22	27	4.5	2.345	5.2	≥98

## 3. 普通水泥稳定碎石的现场制备

为了保证水泥稳定碎石材料与现场施工状态相一致，直接采用工程现场拌合、摊铺、养生后的水泥稳定碎石材料芯样作为试验材料。水泥稳定碎石基层施工压实厚度为 36 cm，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。在水泥稳定碎石基层摊铺前，将水泥稳定碎石底基层的松散颗粒及尘土清扫干净，并进行洒水，以保证下承层湿润，保持下承层顶部不发白，避免因补水不充分导致的摊铺时基层下部的水份被吸走，取芯时芯样下部松散、烂根或成蜂窝状的情况。

水泥稳定碎石的拌合采用 WCQ600H 电子自动称量拌合站拌合，拌合前根据各种材料的含水量，天气状况和运输距离调整含水量。拌合时保证各料仓石料充足，避免出现断料现象，使拌合后的混合料达到设计配合比要求。拌合前根据原材料含水量，参照设计配合比调整施工配合比，确保含水量满足设计要求。同时根据运距、施工气候等情况调节含水量，使混合料运到现场摊铺后碾压时的含水量达到最佳。

## 4. 普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度

水泥稳定碎石基层摊铺完成后，首先，分别采用分层灌砂法和灌水法对水泥稳定碎石基层的压实度进行检测，试验结果见表 2。养生 7 d 后在铺筑的水泥稳定碎石基层中取芯，芯样为直径 150 mm，高度 150 mm 圆柱体试件(图 1)，并对芯样试件进行无侧限抗压强度试验。



Figure 1. Cement stabilized macadam core sample

图 1. 水泥稳定碎石芯样

**Table 2.** Compactness of cement stabilized macadam base  
**表 2.** 水泥稳定碎石基层压实度

序号	桩号	压实度		检测方法	位置
		实测值	平均值		
1	K69 + 180	100.3	98.7	分层灌砂法	上基层
		97.1			下基层
2	K69 + 220	100.9	98.9	分层灌砂法	上基层
		97.0			下基层
3	K69 + 180	98.2		灌水法	全厚度
4	K69 + 260	100.4	99.9	分层灌砂法	上基层
		99.4			下基层
5	K69 + 270	99.8		灌水法	全厚度
6	K69 + 315	102.1	99.6	分层灌砂法	上基层
		98.9			下基层
7	K69 + 340	99.1		灌水法	全厚度

压实度试验结果见表 2, 结果显示: 采用分层灌砂法测得的结构能够达到设计要求, 且两层的差值较小; 采用灌水法也满足设计要求, 且和灌砂法测得的压实度平均值相差较小。

无侧限抗压强度试验结果见表 3, 普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度为 4.86 MPa, 标准差为 0.213, 偏差系数为 4.383%。

**Table 3.** Unconfined compressive strength of cement stabilized macadam  
**表 3.** 水泥稳定碎石无侧限抗压强度

	试件 1	试件 2	试件 3
力(kN)	84.71	88.84	84.68
无侧限抗压强度(MPa)	4.79	5.03	4.79
平均值	4.86		
标准差(MPa)	0.213		
偏差系数(%)	4.383		

## 5. 不同石料水泥稳定材料强度对比

水泥稳定炉渣碎石中水泥掺量为 4.5%, 炉渣碎石来自生活垃圾的焚烧, 分别采用 17%、28%和 35% (质量比)的炉渣碎石代替石灰石碎石, 由室内试验制备试件, 养生 7 d 后进行无侧限抗压强度试验。由图 2 可知, 随着炉渣碎石替代率的增加, 水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度呈现先增加后减小的趋势, 在炉渣碎石含量 28%时达到最大值, 此时的材料强度为 4.2 MPa [1]。

水泥稳定磷渣碎石采用的水泥掺量为 4.5%。磷矿渣主要来自磷工业生产的废料, 呈褐色颗粒状, 较脆, 多孔隙结构。分别采用 20%~100%掺量的磷渣碎石代替石屑制备水泥稳定磷渣碎石, 同样在养生 7 d 后进行无侧限抗压强度。试验结果见图 2, 随着磷渣碎石掺量的逐渐增加, 水泥稳定磷渣碎石的无侧限抗压强度同样呈现出先增加后减小的趋势, 最大值为 25%磷渣碎石时, 无侧限抗压强度强度为 5.92 MPa。但是与水泥稳定炉渣碎石相比, 其强度先增加的幅度较小, 而强度在 50%和 60%磷渣碎石掺量时降低幅度较大[2]。

水泥稳定钢渣碎石的水泥掺量与其他材料一致，均为 4.5%。钢渣是炼钢工业中在氧气顶吹转炉里将生铁转换为钢铁或在电弧炉里熔化废钢所形成的副产品。钢渣的压碎值高、抗磨耗等物理力学性能优良，因此其最适宜作为道路工程材料。分别采用粗、中和细级配的钢渣室内制备水泥稳定钢渣碎石。同时采用 75%、50%和 25%的替代率，将钢渣碎石部分代替石灰碎石。图 2 显示，中级配水泥稳定钢渣碎石具有最大的无侧限抗压强度，为 7.48 MPa。对于完全不采用石灰碎石的三种不同级配的水泥稳定钢渣碎石，随着级配越细它们的无侧限抗压强度先增加后减小。而用钢渣碎石部分代替石灰碎石时，随着替代率的增加，水泥稳定钢渣碎石的抗压强度逐渐增加[3]。

将以上三种不同石料的水泥稳定材料与普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度及其变化率分别绘制在图 2 和图 3 中。由试验结果可知，普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度高于水泥稳定炉渣碎石，水泥稳定炉渣碎石的强度分别降低 58.8%、13.6%和 36.2%。当磷渣碎石掺量小于 50%时，其无侧限抗压强度分别高于普通水泥稳定碎石 16.5%、21.8%和 15.8%，而其他掺量时，其抗压强度均低于普通水泥稳定碎石。水泥稳定钢渣碎石的无侧限抗压强度与普通水泥稳定碎石的相近，其中，中级配水泥稳定钢渣碎石的强度相比普通水泥稳定碎石增加 53.9%，增长明显。

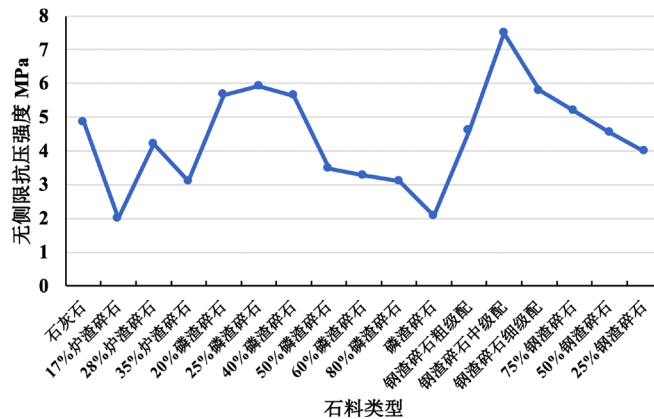


Figure 2. 7 d unconfined compressive strength of cement stabilized materials with different aggregates  
图 2. 不同石料的水泥稳定材料 7 d 无侧限抗压强度

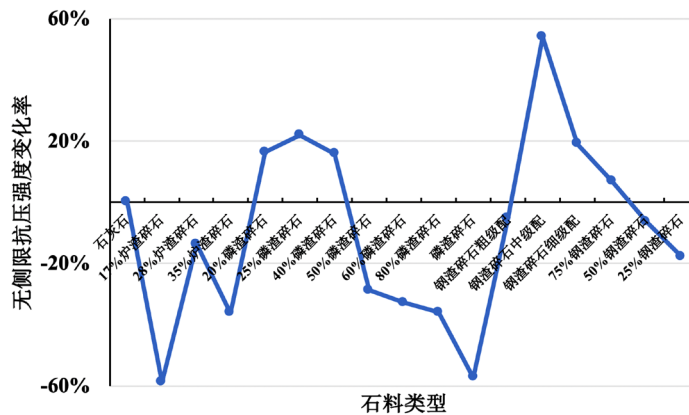


Figure 3. Change rate of unconfined compressive strength of cement stabilized materials with different aggregates in 7 d  
图 3. 不同石料的水泥稳定材料 7 d 无侧限抗压强度变化率

通过试验结果的对比可知，炉渣碎石、磷渣碎石和钢渣碎石均可以全部或部分替代石灰碎石制备水泥稳定碎石材料。其中，掺加部分炉渣碎石的水泥稳定碎石材料，其无侧限抗压强度均低于普通水泥稳



定碎石；低掺量的磷渣碎石可以有效提高材料的无侧限抗压强度，但掺加量不宜超过 40%；采用钢渣碎石完全代替石灰碎石制备水泥稳定碎石材料是可行的，且中级配的钢渣碎石强度更高。

不同石料类型对水泥稳定碎石的无侧限抗压强度具有显著的影响。总体上，磷渣碎石部分替代石灰碎石和钢渣碎石全部替代石灰碎石的效果最好，而水泥稳定炉渣碎石则表现出逊于普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。根据工程现场特点以及道路等级，采用不同类型的石料部分或者全部替代石灰碎石制备水泥稳定碎石材料是可行的。

## 6. 结论

本文通过对采用石灰碎石作为集料的普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度和压实度进行了试验研究，并将试验结果与水泥稳定炉渣碎石、水泥稳定磷渣碎石和水泥稳定钢渣碎石的无侧限抗压强度进行了对比分析，得到以下结论：

1) 采用分层灌砂法测得的结构压实度能够达到设计要求，且两层的差值较小；采用灌水法同样满足设计要求，且和灌砂法测得的压实度平均值相差较小。水泥稳定碎石的无侧限抗压强度为 4.86 MPa，标准差为 0.213，偏差系数为 4.383%。

2) 以相同的水泥掺量制备不同石料的水泥稳定材料时，普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度高于水泥稳定炉渣碎石。水泥稳定钢渣碎石的无侧限抗压强度与普通水泥稳定碎石的相近。

3) 不同石料类型对水泥稳定碎石的无侧限抗压强度具有显著的影响。根据工程现场特点以及道路等级，采用不同类型的石料部分或者全部替代石灰碎石制备水泥稳定碎石材料是可行的。

## 参考文献

- [1] 刘栋, 李立寒, 崔华杰. 水泥稳定炉渣碎石的强度性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 538-542.
- [2] 钱国平, 蒋博, 巨锁基. 水泥稳定磷渣碎石混合料早期强度试验[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 254-257.
- [3] 曾梦澜, 吴盛华, 胡冰, 孙艳华, 龙劭一. 水泥稳定钢渣-碎石路面基层材料试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2011, 33(1): 29-33.
- [4] Zheng, Y.X., Zhang, P., Cai, Y.C., Jin, Z.Q. and Moshtagh, E. (2019) Cracking Resistance and Mechanical Properties of Basalt Fibers Reinforced Cement-Stabilized Macadam. *Composites Part B*, **165**, 312-334. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.115>
- [5] Ge, L., Wang, C.-C., Hung, C.-W., Liao, W.-C. and Zhao, H.H. (2018) Assessment of Strength Development of Slag Cement Stabilized Kaolinite. *Construction and Building Materials*, **184**, 492-501. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.236>
- [6] Li, X.G., Lu, Y. and Ma, B.G. (2012) Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash in Blended Cement. *Journal of Cleaner Production*, **32**, 395-398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.038>

### 知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)