



二灰水泥稳定碎石基层的力学与干缩性能

刘克非¹, 邓林飞¹, 蒋康²

(1. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015)

摘要: 为明确二灰水泥稳定碎石在道路基层中的使用性能, 采用室内实验测试不同粉煤灰掺量、不同水泥剂量下稳定碎石基层材料的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量、失水率和干缩应变。结果表明: 当采用二灰水泥稳定碎石铺筑二级和二级以下公路基层时, 结合料中石灰与粉煤灰的质量比宜取为 1:3.0 左右即粉煤灰的质量分数不大于 75%; 从经济合理的角度考虑, 应将水泥的质量分数控制在 2.5% 以下; 为避免二灰水泥稳定碎石基层产生较大的失水率和干缩量, 在实际应用中必须严格控制成型初期的保湿养生条件, 以防过早产生大量干缩裂缝。

关键词: 石灰; 粉煤灰; 路面基层; 力学性能; 失水率; 干缩应变

中图分类号: U414 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2016)05-0038-04

Mechanical and dry shrinkage properties of roadbase with fly ash cement stabilized crushed stone

LIU Kefei¹, DENG Linfei¹, JIANG Kang²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: In order to definite the service performance of roadbase with fly ash cement stabilized crushed stone, the indoor tests were implemented to test the unconfined compressive strength, compressive resilient modulus, splitting strength, filtration rate and dry shrinkage strain of stabilized crushed stone base materials with different fly ash content and cement dosage. The results show that when using the stabilized crushed stone base with fly ash to pave the base of secondary and under secondary roads, its dosage should not exceed 75% of the total. From the angle of economic rationality, cement dose can be controlled below 2.5%. To avoid the higher filtration rate and dry shrinkage strain of fly ash cement stabilized

crushed stone base, the moisturizing regimen must be strictly controlled in practical application at the beginning of the formation to prevent early dry shrinkage cracks generation.

Keywords: lime; fly ash; roadbase; mechanical property; filtration rate; dry shrinkage strain

粉煤灰是发电厂燃煤锅炉排放的粉质残渣, 通常又被称为“飞灰”, 在未经利用的情况下是一种工业废弃物。粉煤灰综合利用的趋势是以大规模利用为重点, 解决环境污染、减少灰场占地面积与灰场建设投资, 加大开发粉煤灰在道路工程中的广泛应用, 推广粉煤灰在建材、建工及农业中的应用, 重点在于普遍推广。开展高等级公路粉煤灰筑路综合技术研究, 符合我国当前的经济建设政策要求^[1-5]。

石灰-粉煤灰(简称“二灰”)水泥稳定基层是近年来发展起来的新型路面基层类型, 因其后期强度高、收缩系数小而有效减轻了半刚性基层的开裂问题。同时, 用粉煤灰替代水泥, 可大幅降低工程造价, 后期裂缝的减少使其路用性能显著增强, 因而产生良好的经济效益^[6-9]。由于二灰水泥稳定碎石在路面基层应用中的一些关键技术问题尚未完全解决, 其应用研究还处于起步阶段。本文中在明确二灰水泥稳定碎石物理性能的基础上, 通过室内实验测试不同二灰和水泥掺量下半刚性基层试件的力学性能与干缩性能, 为二灰水泥稳定碎石在道路基层中的实际应用奠定基础。

1 实验

1.1 原料

石灰: 湖南省益阳市桃江县永红精灰厂生产, 按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)^[10] 和《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034—2000)^[11](以下称标准)要求测试其基本性能指标见表 1。

粉煤灰: 大唐湘潭发电有限责任公司生产, 基本性能指标见表 2。

水泥: 长沙新星水泥厂生产的 P·O 42.5 级水泥。

粗集料(粒径 ≥ 4.75 mm): 公称粒径 5~20 mm 级配良好的石灰岩碎石, 物理性能指标见表 3。

收稿日期: 2015-12-03, 修回日期: 2016-07-03。

基金项目: 中南林业科技大学引进高层次人才科研启动基金; 中南林业科技大学青年科学基金, 编号: QJ2012004B。

第一作者简介: 刘克非(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为道路工程材料。E-mail: liukefei92013@163.com。

表 1 石灰基本技术指标

Tab. 1 Basic technical indexes of lime

	有效 CaO 和 MgO	粒径		MgO
		质量分数 /%		
		0.71 mm 方孔筛余	0.125 mm 方孔筛余	
实测值	58	0.83	10.7	1.0
标准	55	1.0	13.0	4.0

表 2 粉煤灰基本技术指标

Tab. 2 Basic technical indexes of fly ash

	主要氧化物 (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	烧失物	粒径	
			质量分数 /%	
			0.3 mm 方孔筛余	0.075 mm 方孔筛余
实测值	76.4	8.6	93.7	79.1
标准	>70	20	>90	>70

细集料(粒径<4.75 mm):细度模数 3.04、级配良好的洁净中砂。

由表 1 和表 2 可知,各材料技术指标均满足标准要求。

表 3 天然粗骨料物理性能指标

Tab. 3 Physical performance indexes of coarse aggregates

表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	压碎值/%	吸水率/%	含泥量/%	粒径/mm
2 630	1 580	9.7	0.8	0.4	4.75~19

1.2 方法

层材料的力学性能和干缩性能,采用图 1 所示的配合比制作试样,将石灰和粉煤灰按质量比分别取 1:2.0、1:2.5、1:3.0、1:3.5 和 1:4.0,水泥掺量(质量分数,下同)分别为 1.5%、2.0%、2.5%和 3.0%,各材料的试

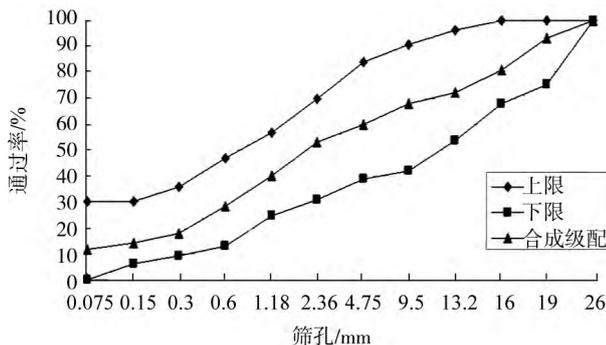


图 1 二灰水泥稳定碎石基层材料合成级配曲线

Fig. 1 Synthetic grading curve of fly ash cement stabilized crushed stone base

验编号分别为 1-1-1-4, 2-1-2-4, 3-1-3-4, 4-1-4-4, 5-1-5-4。

通过重型击实法测定各材料的最佳含水量和最大干密度后,按 JTG E51—2009 中规定的方法制作试件并测试其无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量和干缩应变等。其中干缩实验采用中梁试件(试样尺寸 100 mm×100 mm×400 mm),水泥掺量统一取为 2.5%^[12-13]。

2 结果与分析

2.1 物理力学性能

各材料最佳含水量、最大干密度、无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量实验结果见表 4。

在相同的水泥剂量下,结合料中粉煤灰含量越大,基层材料的最佳含水量越大。以 1.5% 的水泥掺量为例,5-4# 试样的最佳含水量(6.7%)约为 1-4# 试样(5.6%)的 1.2 倍,表明粉煤灰的较细颗粒直接导致其拌制基层试件的大需水量。另外,各材料的最佳含水量随水泥掺量的增加而逐渐增大,随结合料中粉煤灰占比增大而增速减缓。

各材料的最大干密度随水泥掺量的增加而逐渐增大,随结合料中粉煤灰占比增大而逐渐增大。

无论粉煤灰在各基层材料中的掺量如何,各试样 7 d 无侧限抗压强度值均随水泥掺量的增加而逐渐增大。随着结合料中粉煤灰用量的增大,各材料抗压强度值表现出先增大后减小的趋势,且在石灰与粉煤灰的质量比为 1:3.0 时达到最大值。结合已有的研究成果可知^[14-15],粉煤灰水泥浆体中存在 Ca(OH)₂,且由于

表 4 各基层材料试样编号及其性能测试结果

Tab.4 Sample numbers and performance test results of various stabilized base material

试样	石灰与粉煤灰 质量比	水泥掺量/%	最佳含水量/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	无侧限抗压强 度(7 d)/MPa	劈裂强度(90 d) / MPa	抗压回弹模量 (180 d)/MPa
1-1	1:2.0	1.5	4.7	2.285	2.3	0.31	794
1-2		2.0	5.0	2.327	2.6	0.34	811
1-3		2.5	5.3	2.366	3.0	0.41	836
1-4		3.0	5.6	2.395	3.3	0.47	865
2-1	1:2.5	1.5	5.1	2.247	2.5	0.36	829
2-2		2.0	5.4	2.279	2.8	0.41	857
2-3		2.5	5.7	2.304	3.1	0.48	886
2-4		3.0	5.9	2.355	3.5	0.56	923
3-1	1:3.0	1.5	5.4	2.219	2.9	0.47	857
3-2		2.0	5.7	2.241	3.2	0.52	884
3-3		2.5	6.1	2.283	3.4	0.59	923
3-4		3.0	6.3	2.313	3.8	0.65	961
4-1	1:3.5	1.5	5.6	2.178	2.8	0.39	851
4-2		2.0	5.9	2.204	3.1	0.47	878
4-3		2.5	6.2	2.237	3.4	0.56	901
4-4		3.0	6.4	2.275	3.7	0.61	934
5-1	1:4.0	1.5	6.0	2.133	2.6	0.35	835
5-2		2.0	6.2	2.162	2.9	0.39	859
5-3		2.5	6.5	2.193	3.4	0.44	890
5-4		3.0	6.7	2.234	3.8	0.49	922

火山灰效应, Ca(OH)₂ 含量随粉煤灰的掺量增加而减少; 当粉煤灰掺量超过 75% 时, 粉煤灰-水泥浆体水化反应明显增强, 浆体结构更加致密, 因而强度更高。从数值上来看, 当粉煤灰在结合料中的占比达到 71% 及以上(即石灰与粉煤灰质量比为 1:2.5 及以下)时, 各水泥掺量下的基层抗压强度均满足规范中二级和二级以下公路基层强度(2.5~3.0 MPa)要求, 由此可初步确定, 当采用二灰水泥稳定碎石铺筑二级和二级以下公路基层时, 粉煤灰在结合料中的占比须达到 70% 以上。从经济合理的角度考虑, 可将水泥掺量控制在 2.5% 以下。

各材料的劈裂强度和抗压回弹模量均随水泥掺量的增加而逐渐增大, 且随着结合料中粉煤灰掺量的增大表现出先增大后减小的趋势。作为路面结构设计中的重要参数, 文献[16]中建议当基层厚度为 30 cm 以上时, 二级和二级以下公路劈裂强度标准值为 0.40~0.42 MPa。按照这一标准, 当粉煤灰在结合料中

的占比达到 75% 及以上(即石灰与粉煤灰的质量比为 1:3.0 及以下)时, 各水泥掺量下的水泥稳定基层劈裂强度均满足要求, 因而建议粉煤灰在结合料中的占比须达到 75% 以上。

2.2 干缩性能测试

图 2 为各材料失水率随时间变化规律图。

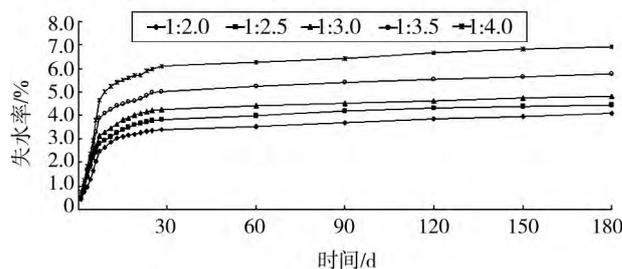


图 2 各材料失水率随时间变化规律

Fig. 2 Variation law of various material filtration rate with time

由图可知,二灰水泥稳定碎石基层材料的失水率随着时间的增加而逐渐增大,且均在凝结初期失去大量水分,各材料28 d以后的失水速率明显减缓。粉煤灰在结合料中的占比越大,失水率增大越快,5-3#试样的最终失水率(6.91%)为1-3#试样(4.08%)的1.69倍,表明粉煤灰的含量越多,结合料中细颗粒的比表面积越大,进而导致拌制混合料时含水量较大,成型后材料的失水率也较大。

图3为各材料干缩应变随时间变化规律图。

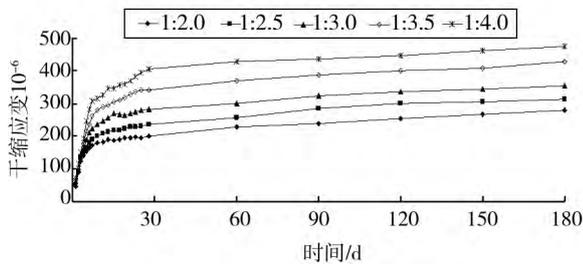


图3 各材料干缩应变随时间变化规律

Fig. 3 Variation law of various material dry shrinkage strain with time

由图可知,粉煤灰在基层结合料中的掺入比例对其干缩应变产生较大影响,且其影响程度较失水率更为显著。各材料在前7 d内即已产生61%~65%的干缩量,28 d的干缩量可达到总干缩量的72%~85%,表明粉煤灰的加入导致稳定碎石基层在强度形成初期水分快速蒸发,进而加快材料颗粒间的吸附作用、胶凝体间层间水的作用、毛细管作用和碳化收缩作用,引起半刚性基层体积收缩明显。事实上,粉煤灰-水泥浆体的水化主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉煤灰反应生成C-S-H凝胶引起,粉煤灰掺量的增加可提高整个体系的水化程度,一方面消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 而提高空隙率,另一方面削弱 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体对干缩的抑制作用,即粉煤灰掺量的变化导致的火山灰效应直接影响C-S-H凝胶微观结构,进而影响试件的干缩率^[17-18]。当粉煤灰的掺量由1:3.0增至1:4.0时,水泥稳定基层总干缩量增加了34.2%,增幅显著,因而应控制结合料中粉煤灰掺量,以不超过1:3.0为宜。

3 结论

1)当采用二灰水泥稳定碎石铺筑二级和二级以

下公路基层时,结合料中石灰和粉煤灰的质量比宜取为1:3.0左右。从经济合理的角度考虑,应将水泥掺量控制在2.5%以下。

2)为避免二灰水泥稳定碎石基层产生较大的失水率和干缩量,在今后的实际应用中必须严格控制成型初期的保湿养生条件,以防过早产生大量干缩裂缝。

参考文献(References):

- [1] 周厚杰. 粉煤灰水泥稳定碎石铺筑路面基层关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [2] 刘兴德, 牛福生, 倪文. 粉煤灰的资源化利用现状与研究进展 [J]. 建材技术与应用, 2005(1): 12-15.
- [3] 李頔, 陈忠达, 任蛟龙, 等. 基于浆体的水泥粉煤灰稳定碎石力学特性预估 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(3): 687-695.
- [4] 肖佳, 陈雷, 邢昊. 粉煤灰和矿粉对水泥胶砂自收缩的影响 [J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 604-609.
- [5] 谢慧东, 张云飞, 栾佳春, 等. 脱硫石膏在水泥-粉煤灰-矿渣粉复合胶凝体系普通干混砂浆中的应用研究 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3): 645-651.
- [6] 曾梦澜, 阮文, 蒙艺, 等. 二灰钢渣碎石路面基层材的设计与使用性能 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10): 1-6.
- [7] 俞建荣, 栗学铭, 窦有年. 粉煤灰水泥稳定粒料的路用性能研究 [J]. 中国公路学报, 1998, 11(8): 30-35.
- [8] 万朝均, 张廷雷, 陈璐圆, 等. 粉煤灰水泥碳化性能的化学分析 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1102-1111.
- [9] 伍勇华, 姚源, 南峰, 等. 脱硫石膏-粉煤灰-水泥胶凝体系强度及耐久性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(2): 315-320.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术规范 JTJ 034-2000 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [12] 谢慧东, 张云飞, 栾佳春. 石灰石粉对水泥-粉煤灰混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(2): 371-376.
- [13] 张翔, 何廷树, 何娟. 硅酸盐水泥-粉煤灰-脱硫石膏复合材料的性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4): 796-799.
- [14] 蒋林华, 林宝玉, 蔡跃波. 高掺量粉煤灰水泥胶凝材料的水化性能研究 [J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(6): 695-701.
- [15] 应德标, 李振明, 卢振平. 级粉煤灰掺量、细度对水泥强度发展的影响 [J]. 中国粉体技术, 2006, 12(1): 31-32.
- [16] 李淑明, 许志鸿. 水泥稳定碎石基层的最低劈裂强度和抗压强度 [J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 177-182.
- [17] 蔡安兰, 李顺凯, 严生. 养护温度对高掺量粉煤灰硅酸盐水泥砂浆干缩性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 100-104.
- [18] 马昆林, 龙广成, 谢友均, 等. 水泥-粉煤灰-石灰石粉复合浆体的流变性能 [J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(5): 582-587, 596.