

文章编号: 0451-0712(2004)07-0150-03

中图分类号: U414.103

文献标识码: A

# 粉煤灰活性测试方法研究

叶昌勇<sup>1</sup>, 张洪波<sup>2</sup>

(1. 杭州湾大桥工程指挥部 慈溪市 315327; 2. 宁波市高等级公路建设指挥部)

**摘 要:** 针对粉煤灰的传统分级评价指标(比表面积指标), 不能够完整反应出粉煤灰活性的问题, 在室内通过大量实验对粉煤灰的活性测试方法及评价进行了研究。研究中选取了 9 种不同类型的粉煤灰, 运用不同方法对活性进行了测试。在对比细度以及活性度指标基础上, 提出了粉煤灰活性指数指标  $HH$ , 该指标将粉煤灰的外部宏观细度控制指标(比表面积)及内部活性控制指标(活性度)有机地结合在一起。最后实测了  $HH$  与二灰砂砾早期强度之间的关系, 强度试验结果表明, 该指标能够用于评价粉煤灰的活性, 并且测试方法简单, 利于推广应用。

**关键词:** 公路工程; 粉煤灰; 活性度; 比表面积; 活性指数指标  $HH$

石灰粉煤灰稳定材料由于具有整体性能优异、水稳性良好、后期强度高、成本低廉和易于施工等优点, 在公路工程的半刚性基层中被广泛应用。但是在实际应用过程中, 发现一些粉煤灰按照现行标准测定属较高级别粉煤灰, 但将其用到混合料中, 二灰混合料强度尤其是早期强度相当低, 难于满足现行基层施工规范的要求, 表明现有评价方法存在一定的问题。另外虽然现行标准中对公路基层用粉煤灰有细度、需水量比和烧失量等详细规定, 但是在使用中大家更关心的是粉煤灰的活性问题, 即达到什么样的标准粉煤灰才会有良好的活性, 才会有高的强度, 另外就是如何快速测定活性的问题

## 1 问题的提出

为了证明现有粉煤灰评价体系存在的不足, 研究中首先选取了 3 个地区的石灰, 粉煤灰选取了 2 个地区 3 种不同级别的粉煤灰, 测试了不同配比下的物理指标, 并在此基础上测定了石灰与粉煤灰不同龄期的强度(试件尺寸  $\phi 5\text{ cm} \times H 5\text{ cm}$ ), 详见表 1 所示。

由表 1 可见: 不同产地石灰对二灰强度的影响不同, 一般来说在粉煤灰相同的情况下, 一级石灰与粉煤灰形成的强度要高于二级石灰的强度。而当石灰相同时, 不同等级粉煤灰对二灰的不同龄期强度有较大影响; 一级粉煤灰和石灰组成的方案( $f-6$ )强度要高于由二级粉煤灰和石灰组成方案( $f-4$ )

的强度。就 7 d 和 36 d 强度而言, 一级粉煤灰要高于二级粉煤灰与石灰形成的强度, 分别高出约 18% 和 10%, 表明粉煤灰对二灰的强度影响很大。另外研究中发现  $f-1$  的二灰强度要远远大于  $f-5$  的二灰强度, 表现出当石灰相同时, 高级别粉煤灰的强度表现反不如低级别粉煤灰的怪现象。为了验证这个结果, 还对二灰砂砾强度进行了测试, 详见表 2。

表 1 石灰、粉煤灰物理指标及不同龄期强度测试结果汇总

方案 代号	石灰 (等级)	粉煤灰 (等级)	配合 比	最大干密度 g/cm <sup>3</sup>	最佳含 水量 %	不同龄期抗压 强度/MPa	
						7 d	36 d
$f-1$	I	II	1:3	1.345	22.0	2.24	5.02
$f-2$	I	II	1:2	1.331	23.0	1.96	5.02
$f-3$	I	II	1:4	1.366	22.5	2.26	4.63
$f-4$	I	I	1:3	1.345	24.0	2.07	5.04
$f-5$	II	I	1:3	1.145	26.0	1.07	3.00
$f-6$	I	I	1:3	1.412	24.0	2.45	5.56
$f-7$	I	I	1:3	1.401	22.0	2.37	5.61

表 2 两种对比方案(二灰砂砾)

方案 代号	配合比(石灰: 粉煤灰:砂砾)	强度代表 值/MPa		试件 个数	变异系数 $C_v$ %	
		7 d	28 d		7 d	28 d
$f-1$	6:14:80	0.82	2.01	13	7.9	6.8
$f-5$	10:20:70	0.91	1.58	13	9.8	7.8

注: 表 2 中二灰砂砾所用砂砾级配相同, 表 2 方案所用原材料与表 1 中同代号的一致。

收稿日期: 2004-06-06



表 2 测试结果于表 1 结论相同,即对方案  $f-5$  所用粉煤灰其强度特性表现出粉煤灰等级高,但二灰砂砾强度却很低的与粉煤灰等级不符的异常现象。表明现行标准中对粉煤灰活性评价存在较大漏洞。因此如何准确、快捷地测定粉煤灰活性对其的应用及弥补现行标准不足就显得尤为必要。

2 试验简介

2.1 试验原理简介

研究中对粉煤灰活性评价采用石膏激发活性加速反应的试验方法。石灰、粉煤灰强度主要来源于它们之间的火山灰反应,但其反应速度很慢,为了提高反应速度,反应中加入石膏。因为粉煤灰中氧化物( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )是以 2 种状态存在,一种为活性状态,存在于粉煤灰玻璃体中,能与石膏起作用;另一种是非活性状态,存在于粉煤灰结晶体中,以硅铝酸二钙的形式出现,不能与石膏起作用。加入石膏后,反应系统中的  $\text{Ca}^{2+}$  产生同离子效应,pH 值略有降低,从而石膏与粉煤灰的作用就是  $\text{SO}_4^{2-}$  产生的效应。一方面, $\text{SO}_4^{2-}$  能与  $\text{AlO}^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$  生成  $\text{AFt}$ ,使液相中  $\text{AlO}^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  浓度下降,促进粉煤灰中的  $\text{AlO}^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  溶出,导致玻璃体解体;另一方面,由于粉煤灰中一般都含有 25% 以上的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,除生成  $\text{A}_3\text{S}_2$  晶体外,剩余的  $\text{Al}^{3+}$  绝大部分为网络形成体,但也有可能有少量网络中间体,其键能仅为网络形成体的  $1/2\sim 1/3$ , $\text{SO}_4^{2-}$  吸附在这种活化点上以后,极易发生作用,使粉煤灰玻璃体受侵蚀而解体。 $\text{Al}-\text{O}$  键解体的同时,也促进  $\text{Si}-\text{O}$  键的解体。从上述描述不难发现石膏的使用可用来测定粉煤灰有效成分的活性大小。

2.2 计算公式

20 g 粉煤灰吸收的毫克数,即为粉煤灰活性度,用公式(1)进行计算:

$$\begin{aligned} H &= 8 \times (m_1 \times 0.583\,2 - m_2 \times 0.583\,2) \times 1\,000 \\ &\quad \div 20 \\ &= 233.28 \times (m_1 - m_2) \end{aligned} \tag{1}$$

式中:0.583 2 为  $\text{BaSO}_4$  对  $\text{CaSO}_4$  的换算系数;1 000 由 g 化为 mg 的倍数;8 为分取试样的倍数; $H$  为粉煤灰的活性度; $m_1$ 、 $m_2$  分别为反应前后  $\text{BaSO}_4$  的质量,g。

3 结果分析

根据上述的试验方法,对煮沸的时间进行了试

验,采用浙江某地区公路工程大量使用的粉煤灰,其试验数据见表 3 所示。

表 3 粉煤灰活性度与时间的关系

时间/h	0.5	1	2	4
活性度/ $\times 10^{-3}$	186.54	189.13	189.87	190.02

表 3 表明,粉煤灰活性度随时间增加而增长,并且早期增长快,后期增长慢,这与粉煤灰的火山灰反应现象相同。从试验数据和试验原理来分析,由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的反应速度最快,煮沸 2 h 后粉煤灰中的有效  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基本已反应完毕,因此利用 2 h 的活性度来判断粉煤灰活性。

据此选取多种粉煤灰在 2 h 条件下进行试验,并且用活性度对二灰的强度进行分析,试验结果如表 4 所示。

表 4 不同粉煤灰的活性度测试汇总

等级	1	2	3	2	2
活性度	212.0	213.90	209.6	189.7	153.3
比表面积/ $(\text{cm}^2/\text{g})$	6 498	4 724	4 839	3 345	4 724

表 5 表明,活性度越大,石灰粉煤灰的强度就越高,尤其是早期强度,如  $f-1$  与  $f-5$ 。但是仅用活性度的指标来控制粉煤灰的等级常常会显得力不从心,如  $f-4$  与  $f-6$  即是如此,研究中发现其中粉煤灰的细度对二灰强度影响尤为突出。对粉煤灰的细度试验,采用比表面积法,即利用勃氏透气比表面积仪进行测定。结果如表 6 所示。

表 5 粉煤灰活性度与二灰强度的关系汇总

代号		$f-1$	$f-5$	$f-4$	$f-6$
石灰	等级	I	I	I	I
	等级	II	I	I	I
粉煤灰	活性度	209.6	189.7	213.9	212.0
	7 d	2.24	1.07	2.07	2.45
强度/MPa	36 d	5.02	3	5.04	5.56
	150 d	5.63	4.26	7.15	5.15

注:测试二灰强度试验中石灰粉煤灰的比例均定为 1:3。

表 6 结果表明,同一电厂粉煤灰的细度是随着等级的不同而不同,等级越高,比表面积越大。研究中还对粉煤灰的细度与二灰强度的关系进行了测试,试验结果详见表 7 所示。

表 7 结果表明,一般来说,粉煤灰细度越细,比表面积越大,二灰 7 d 强度越高,但细度也不能完全表征路用粉煤灰的特性,如  $f-5$  方案所用粉煤灰,



表 6 不同粉煤灰的比表面积

等级	I	I	II	II	I	I	II	II	I
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.300	2.194	2.207	2.060	2.227	2.006	1.969	2.084	1.897
比表面积/(cm <sup>2</sup> /g)	6 498	4 724	4 839	3 345	5 889	4 724	3 850	5 258	4 615

表 7 粉煤灰的细度与二灰强度的关系

方案代号		f-1	f-5	f-4	f-6
石灰	等级	I	I	I	I
	比表面积/(cm <sup>2</sup> /g)	4 839	3 345	4 724	6 498
强度/MPa	7 d	2.24	1.07	2.07	2.45
	36 d	5.02	3	5.04	5.56
	150 d	5.63	4.26	7.15	5.15

表 8 不同粉煤灰的活性指数 HH 值汇总

等 级	I	I	II	II	I	I	II	II	I
HH/(×10 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup> /g)	1.377 5	1.010 45	1.014 3	0.635 15	0.949 3	0.724 05	0.546 25	1.003 6	0.771 9

结合表 7、表 8 及表 1 的测试结果,可以发现粉煤灰活性指数 HH 值越大,二灰(相同石灰条件下)的 7 d 及 36 d 强度越高,表明该指标可用来评价粉煤灰的活性。并且对该指标的测试均采用常规仪器加以测试,利于推广应用。

据此结果并结合二灰砂砾的大量强度试验结果,测试了上述不同产地粉煤灰应用于二灰砂砾后的早期强度。为便于横向比较,试验中均采用浙江某地二级石灰,二灰砂砾级配均为现行标准规范中值级配,二灰比例 1:2.5,集料含量均为 80%,即二灰砂砾的配合比为 6:14:80。标准击实后按照相同压实度(97%)成型试件,标养 7 d 后测试无侧限抗压强度,试验结果详见表 9 所示。

表 9 粉煤灰活性指数与二灰砂砾强度测试汇总

粉煤灰等级	II	I	I	I
石灰等级	二级石灰(有效氧化钙、镁含量 57.0%+1.9%)			
二灰砂砾 7 d 无侧限抗压强度/MPa	0.78	0.98	0.32	0.70
试件个数	13			
变异系数 C <sub>v</sub> /%	7.80	8.10	7.90	8.87
粉煤灰活性指数 HH/(×10 <sup>3</sup> cm <sup>2</sup> /g)	1.003 6	1.010 45	0.635 15	0.771 9

表 9 测试结果表明,在集料及混合料配合比一定的前提下,粉煤灰活性指数和二灰砂砾的强度之

间存在着明显的关联,该指标越大,二灰砂砾的早期强度越高。

试验结果及实际应用表明采用现有方法对粉煤灰活性评价是不够的,因为二灰的强度与粉煤灰的细度以及活性度有很大的关联。试验结果表明,粉煤灰活性度越大,比表面积越大,二灰的强度就越高。因此通过比表面积与活性度的乘积即活性指数(活性指数 HH=比表面积×活性度)来评价粉煤灰的活性,结果详见表 8 所示。

间存在着明显的关联,该指标越大,二灰砂砾的早期强度越高。

## 5 结论

通过大量的室内试验,发现粉煤灰活性指数 HH 指标将粉煤灰活性度及传统的比表面积指标有机的统一到一起,该指标从粉煤灰的外部物理细度指标以及内部活性物质两方面对粉煤灰活性进行了评价。并且通过二灰砂砾强度试验对评价结果进行了验证,结果表明,该指标解决了实际应用中大家更为关心的活性指标问题;该指标的使用可将室内试验指标评价粉煤灰活性与实际混合料的强度加以联系,使用 HH 值的大小来评价粉煤灰的活性,另外该指标的测试方法简单易行,均是用常规仪器,利于实际应用。

## 参考文献:

- [1] 朱蓓蓓,等. I 级粉煤灰火山灰反应性研究[J]. 混凝土与水泥制品,2002.
- [2] 王智,等. 硫酸盐对粉煤灰活性激发的比较[J]. 粉煤灰综合利用,1999.
- [3] 焦宝祥,钟白茜. 激发剂对粉煤灰—Ca(OH)<sub>2</sub> 系统性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2001.
- [4] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰[M]. 混凝土,科学出版社,2002.
- [5] JTJ 034—2000,公路路面基层施工技术规范[S].



文章编号: 0451-0712(2004)07-0153-05

中图分类号: U416.202

文献标识码: B

# 级配碎石柔性基层设计参数的研究

李长江, 栾海, 张宏伟

(吉林省公路勘测设计院 长春市 130021)

**摘 要:** 为了改善级配碎石基层材料与工艺, 进行了大量的以室内试验为基础的研究, 采用了古典的 CBR 法和动力 CBR 试验, 进行了力学性能评价。通过试验得出的力学性能数据, 验证了现场承载板与动三轴试验所得到的设计参数。提出了级配碎石基层材料设计参数(弹性模量)建议值及其依据。

**关键词:** 级配碎石; 弹性模量; 承载板; 动三轴

## 1 目前国内外路面设计参数概况

粒状材料在交通荷载作用下表现出非线性和依赖于时间的弹塑性特性, 为了表述这种非线性特征, 通常用弹性模量表达。弹性模量是表征级配碎石刚度的重要指标及设计参数, 传统的柔性基层通常是设置于土基或其他柔性基层上, 其弹性模量一般较低。美国沥青协会设计法中规定粒料基层弹性模量一般采用 100~350 MPa, 并控制基层与路基弹性模量之比在 2~4 之间。

前苏联《柔性路面设计须知》中推荐嵌挤型碎石

弹性模量: 1~3 级配碎石为 350~450 MPa; 1~4 级配普通碎石为 200~250 MPa; 级配碎石为 150~250 MPa。

我国《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97) 中提出: 级配碎石可用作任何等级公路的基层, 并给出抗压模量(见表 1), 抗压模量一般在 200~350 MPa 范围内, 当交通量较大时, 级配碎石不宜作基层, 或不能作为承重层, 否则需加大沥青混凝土面层的厚度。

沥青混凝土路面在荷载作用下发生弹性变形和残余变形, 在反复的荷载作用下, 当累积残余变形在

收稿日期: 2004-04-20

## Research on How to Measure Activity Peculiarity of Flyash

YE Chang-yong<sup>1</sup>, ZHANG Hong-be<sup>2</sup>

(1. Headquarters of Hangzhou Bay Bridge Engineering, Cixi 315327, China;

2. Headquarters of High Type Highway Construction in Ningbo City, China)

**Abstract:** To counter the problems of traditional classification index of flyash, the index of fine-degree can't reflect it's activity fully. So the testing-method and estimate method of the activity-peculiarity of flyashes are researched by a great deal of experiments in laboratory. In this research, 9 kinds of flyashes are selected and their activities-peculiarities tested in different ways. On the basis of contrasting the fine-degree and activity-degree, the activity-index of flyash (*HH*) are put out. The exterior macroscopic fine-degree (the specific surface area) is connected with the interior index (activity-degree) together well. At last the relations between *HH* with the strength of lime-stone and flyash gravel are tested. The strength tests indicate that the activity-index can estimate the activity of flyash, and the testing way is simple and easy to apply.

**Key words:** highway engineering; flyash; activity-degree; specific surface area; activity-index