

文章编号: 0451—0712(2005)02—0100—04

中图分类号: U414. 103

文献标识码: A

# 粉煤灰级配碎石混合料试验研究

陈国明<sup>1</sup>, 江厚权<sup>2</sup>, 顾洪江<sup>3</sup>, 李智慧<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨市 150090;  
2. 河北省建设集团路桥分公司 保定市 071051; 3. 辽宁省交通科学研究院 沈阳市 110015)

**摘 要:** 考察了不同级配类型和不同成型工艺的粉煤灰级配碎石混合料性能,分别采用*CBR* 值、永久变形和弹性模量对级配碎石混合料性能进行了评价。研究表明,掺加粉煤灰后级配碎石混合料性能显著提高,振动压实的混合料性能优于击实成型的混合料,近似间断级配的混合料性能优于连续级配混合料。

**关键词:** 粉煤灰级配碎石; *CBR*; 永久变形; 弹性模量

在我国,对于重交通的高等级沥青混凝土路面来说,基层形式主要是半刚性基层。但是由于半刚性基层密实而且刚度大,常常出现反射裂缝和水损害等路面病害。近年来,国内外对于在半刚性基层上铺筑级配碎石上基层进行了不少理论研究和修筑试验路。

从火力发电厂发电过程中排放出的废渣——粉煤灰已广泛地用作公路基层材料。以该材料为主铺筑的道路具有强度高,板体性好,水稳性和冻稳性优良的特点,因而在道路修筑过程中尤其是在高等级公路的施工中已成为一种不可缺少的材料。粉煤灰级配碎石混合料在路用性能、经济性和环保方面的优势决定了其广阔的应用前景。但就目前而言,粉煤灰级配碎石混合料在我国路面结构中应用并不多,对于其路用性能的优劣还有待于进行试验研究<sup>[1]</sup>。

本文选取了2种代表性的级配类型,分别采用标准重型击实和上置式振动压实2种成型工艺,对掺加粉煤灰前后级配碎石混合料的性能进行了试验研究,并分别采用*CBR* 值、永久变形和弹性模量对级配碎石混合料的性能进行了评价。

## 1 材料

### 1.1 原材料

粗集料:哈尔滨变质玄武岩,表观密度如表1。  
细集料:长余高速公路上面层玄武岩,表观密度如表2。

表1 粗集料密度

粒径/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
表观密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.793	2.829	2.834	2.830	2.835	2.834

表2 细集料密度

粒径/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
表观密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.774	2.772	2.772	2.774	2.759	2.761

矿粉:石灰石矿粉。  
粉煤灰:哈尔滨热电厂,其粒径组成见表3。

表3 粉煤灰粒径组成

粒径/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100	99.3	97.6	93.8	89.6	73.9

### 1.2 级配混合料

为考察不同级配类型粉煤灰级配碎石混合料的性能,本文采用了2种级配,如图1和表4所示。可见,级配Ⅰ中4.75~9.5 mm含量仅为2%,近似为间断级配,9.5 mm以上粗集料含量高达64%,而且4.75 mm以下含量较高;级配Ⅱ为泰波公式中 $n=0.65$ 时的连续级配。为对比掺加粉煤灰前后级配碎石混合料的性能,对上述2种级配各采用无粉煤灰(简记为0)和掺加3%粉煤灰(简记为3),即对4种不同类型的级配碎石混合料进行性能评价。

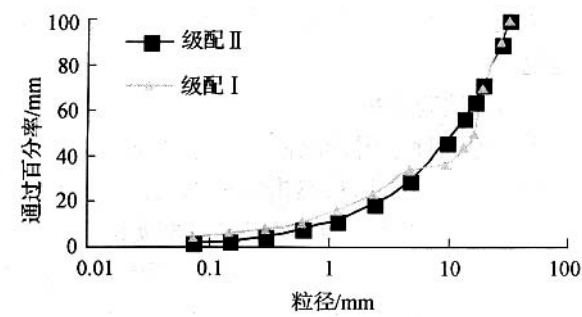


图1 粉煤灰级配碎石混合料级配曲线

表4 级配碎石混合料级配组成

级配种类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配 I	100	90	70	50	43	36	34	23	16	11	8	6	4
级配 II	100	89	72	64	57	46	29	19	12	8	5	3	2

(1)加州承载比(CBR)试验。

加州承载比CBR 值是美国加利福尼亚州提出的一种评定基层材料承载能力的试验方法,是衡量无粘结粒料强度及抗永久变形能力的重要指标。承载能力以材料抵抗局部荷载压入变形的能力表征,并采用标准碎石的承载能力为标准,以相对值的百分数表示CBR 值。

CBR 值按下式计算:

$$CBR=\frac{P}{P_0}\times100\%$$

(1)

式中:P 为试件材料在 0.254 cm 贯入值情况下的单位压力,MPa;P<sub>0</sub> 为标准碎石在相同贯入值情况下的单位压力,MPa。

CBR 值反映了材料在一定变形下的承载能力,一定程度上反映了材料的强度,但是将 CBR 值作为级配碎石材料的评价指标,具有局限性。在试验方法上,它所施加的荷载是一种静荷载,这与车轮作用于路面结构的动荷载是不同的;CBR 值反映的是材料在荷载作用下变形的一个点的特征,反映不出变形的发展过程,无法预测材料在使用过程中的变形发展过程;级配碎石材料作为松散材料,塑性变形大,弹性模量小,用它作为基层,破坏情况往往是沥青路面在行车荷载的反复作用下,由于基层发生过大的累积塑性变形而发生剪切破坏或疲劳破坏,CBR 试验法不能分离出材料在一定荷载作用下的弹性变形和塑性变形,也不能反映出累积塑性变形和累积总变形。

(2)重复加载试验。

重复加载的试验方法通过在试件顶端重复施加

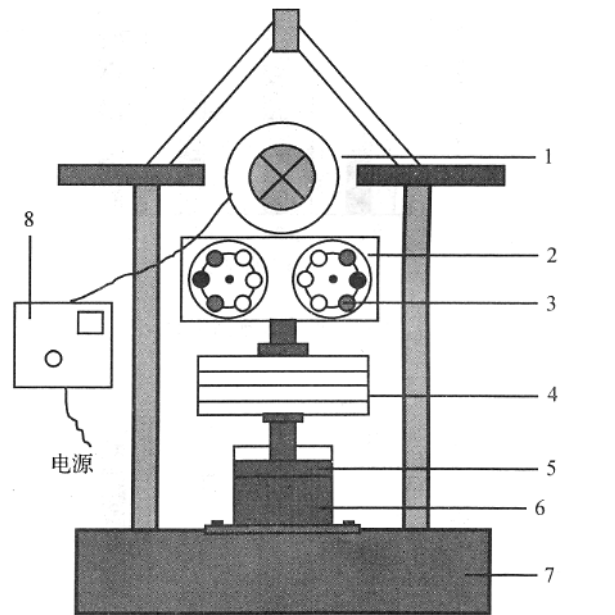
2 成型工艺及评价方法<sup>[2]</sup>

2.1 成型工艺

为考察不同成型工艺对混合料性能的影响,本文采用了 2 种成型工艺:标准重型击实(简记为 JS)和上置式振动压实仪(简记为 ZD)。经过室内大量试验,选取上置式振动压实仪的最佳振动参数如下:频率为 45 Hz,8 片配重,每片为 10 kN,振动时间为 3 min。

2.2 主要评价方法和指标

具有一定波形和频率的动态荷载,然后通过传感器测定试件产生的变形(或应变)。重复加载的 CBR 动力试验较静态的经典 CBR 试验更符合实际路面的受力状况,并且可以通过对试验数据的整理,得到反映材料力学特性的各种指标,本文中选取了永久变形(即累积塑性变形)和弹性模量作为评价指标。



1—电动机;2—偏心轮;3—偏心块;4—配重片  
5—压头;6—试筒;7—基础;8—变频器

图2 上置式振动压实仪结构

试验所用试样直径为 15.2 cm,高 17.78 cm。为了模拟实际行车中重荷载对基层的作用,压力分别按 10 kN、20 kN、30 kN、40 kN 等 4 个阶段施加,压

头直径为 5 cm。此时,应力分别为 5.09 MPa、10.19 MPa、15.28 MPa 和 20.37 MPa。应力施加方式为应力控制,动应力波形为半正弦波,振动频率采用 0.1 Hz,加载次数为 200 次,数据采集通过连接于应力应变传感器上的电子采集系统获得,通过量测一定作用次数下的总变形与弹性变形,从而实现弹、塑性变形的分离。

### 3 数据分析

#### 3.1 成型试验数据分析

对 4 种级配碎石混合料分别采用 2 种成型工艺进行成型,如图 3 和图 4 为成型后试件的最佳含水量和最大干密度对比。可见,对于相同的混合料,采用振动成型时的最佳含水量普遍高于击实成型的情况,而最大干密度均低于击实成型的情况。从压实原理来分析,击实试验是通过施加冲击荷载对被压材料进行压实,对材料产生剪应力使之压实;而振动压实通过高频振动作用使材料产生“液化”,使被压材料易于移动,出现了颗粒间的相互填充现象,使材料更易密实,形成骨架—密实结构。

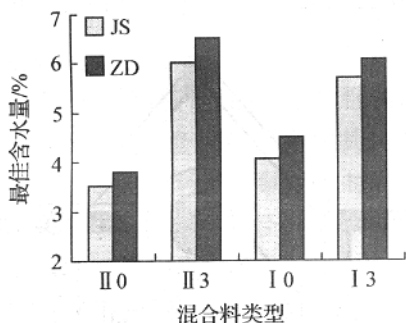


图3 最佳含水量对比

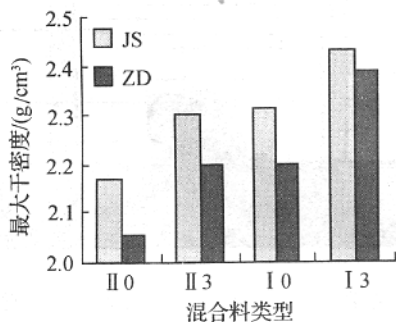


图4 最大干密度对比

掺加3%的粉煤灰以后,相同类型混合料的最佳含水量和最大干密度都大大提高,对于级配 II 此现象尤其明显;而且采用振动成型时,混合料的最佳含

水量和最大干密度提高的幅度要大于采用击实成型的情况。

#### 3.2 CBR 试验分析

图 5 为各种不同情况混合料加州承载比试验对比。结合图 3 和图 4,虽然击实成型的混合料最大干密度均大于其振动成型的情况,但击实成型的混合料 CBR 值都远远小于其振动成型的情况,即振动成型后混合料的强度远远大于击实成型的情况,其一定变形下的承载能力大大提高。

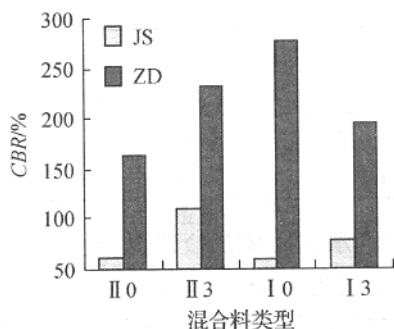


图5 加州承载比试验对比

掺加 3% 的粉煤灰后,级配碎石混合料的 CBR 值都远大于未加粉煤灰的情况,而且对级配 I,当采用振动成型时,其 CBR 值提高的幅度较大。

#### 3.3 重复加载试验分析

##### (1) 永久变形分析。

如图 6 所示,对于相同类型的混合料,采用振动成型的混合料永久变形值远低于击实成型的情况,以 I 3 的永久变形值最低,仅为约 4 mm。掺加 3% 粉煤灰后,混合料的永久变形值均有不同程度的降低,其中级配 I 混合料永久变形值大大降低。即对于级配 I 的近似间断级配,掺加粉煤灰后,其抗永久变形性能提高幅度最大。采用振动成型的级配碎石混合料的抗永久变形性能优于击实成型的情况。

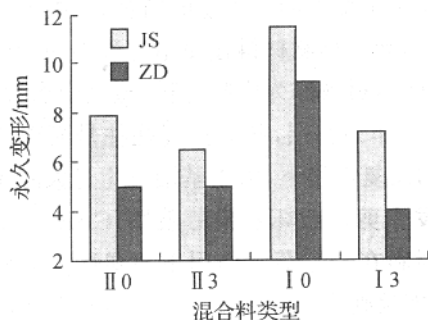


图6 混合料永久变形对比

(2)弹性模量分析。

本部分采用应力为10.19 MPa 和15.28 MPa 下级配碎石混合料的弹性模量进行性能评价。如图7和图8,随着应力的增加,级配碎石混合料的弹性模量迅速增大;掺加3%的粉煤灰后,混合料的弹性模量值均有不同程度的增加,其中级配Ⅰ混合料的增幅较大;从成型工艺来看,采用振动成型的试件,其混合料的弹性模量均高于击实成型的情况,这种现象对级配Ⅰ更为明显。

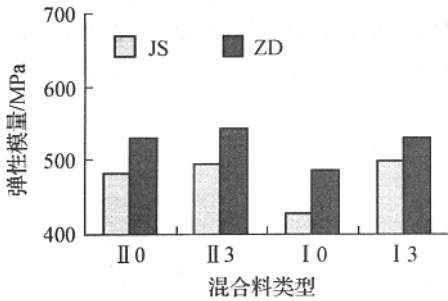


图7 10.19 MPa 下弹性模量对比

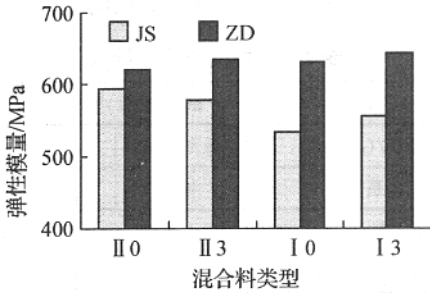


图8 15.28 MPa 下弹性模量对比

4 结论

(1)对相同类型的级配碎石混合料来讲,当采用振动成型时,其最佳含水量高于击实成型的情况,而最大干密度小于后者;掺加3%的粉煤灰后,相同类型级配碎石混合料的最佳含水量和最大干密度都大大提高,而且采用振动成型时,这2个参数提高的幅度要大于采用击实成型的情况。

(2)击实成型的级配碎石混合料CBR 值都远远小于其振动成型的情况;掺加粉煤灰后,其CBR 值远大于未加粉煤灰的情况,而且对近似间断级配的类型Ⅰ,当采用振动成型时,其CBR 值提高的幅度较大。

(3)掺加粉煤灰后,级配碎石混合料的抗永久变形性能大大提高,对于级配Ⅰ这样的近似间断级配,其抗永久变形性能迅速增加;而且采用振动成型时,其抗永久变形性能优于击实成型的情况。

(4)随着应力的增加,级配碎石混合料的弹性模量迅速增大;掺加粉煤灰后,混合料的弹性模量值均有不同程度的增加,其中级配Ⅰ混合料的增幅较大;从成型工艺来看,采用振动成型的试件,其混合料的弹性模量均高于击实成型的情况,而且对级配Ⅰ尤为明显。

参考文献:

- [1] 萧赓,梁乃兴,杨超杰,尚刚,曹树本,高爱民. 水泥粉煤灰级配碎石基层试验路研究[J],公路,2002,(7).
- [2] 曹建新. 重载交通下级配碎石基层材料组成结构与动力特性的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2002.

## Experimental Study on Flyash Grading Macadam Mixture

CHEN Guo-ming<sup>1</sup>, JIANG Hou-quan<sup>2</sup>, GU Hong-jiang<sup>3</sup>, LI Zhi-hui<sup>1</sup>

- (1. School of Communications Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
- 2. Highway and Bridge Branch, Construction Group of Hebei Province, Baoding 071051, China;
- 3. Communication Research Institute of Liaoning Province, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In the paper, flyash grading macadam mixture performance of different grading types and compaction methods are studied. CBR, permanent deformation and elasticity modulus are adopted respectively to evaluate its performance. Test results show that the grading macadam mixture performance is remarkably increased after adding flyash, the performance of the mixture compacted by vibratory compaction method is better than that of heavy-duty hitting method and the mixture performance of approximate gap grading is superior to that of continuous grading.

**Key words:** flyash grading macadam; CBR; permanent deformation; elasticity modulus