

文章编号:1671-8879(2008)05-0001-04

## 骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计与路用性能

蒋应军<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 交通学院,江苏 南京 210096;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**以最大密度为原则,采用逐级填充方法研究了粗集料级配、粗集料与水泥粉煤灰砂浆最佳比例(质量比);以强度试验为基础,考虑经济性,研究了水泥粉煤灰最佳比例以及水泥粉煤灰与细集料比例。在此基础上,形成了骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计方法。研究结果表明:骨架密实型水泥粉煤灰碎石在后期强度、抗裂性能方面明显优于规范级配水泥稳定碎石;提出的骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计方法效果良好,具有优良的路用性能。

**关键词:**道路工程;骨架密实型;水泥粉煤灰碎石;逐级填充;组成设计;路用性能

**中图分类号:**U414.4

**文献标志码:**A

### Road performance and composition design of cement-ash stabilized aggregate of dense framework structure

JIANG Ying-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** On the basis of the principle for the maximum density of synthetic aggregate, the coarse aggregate grading design and the ratio of coarse aggregates to cement-fly ash mortar were researched in the way of the gradual filling theory. The ratio of cement-fly ash to fine aggregates and the ratio of cement to fly ash were performed on account of the compression strength and the economic character of cement-fly ash and cement-fly ash mortar. The mixture design method of dense framework type cement-ash stabilized aggregate was presented. Compared with the commonly-used cement stabilized aggregate, the cement-ash stabilized aggregate of dense framework type possesses better road performance, such as strength and anti-cracking. This indicates the composition design method of cement-ash stabilized aggregate of dense framework structure is practicable. 10 tabs, 3 figs, 7 refs.

**Key words:** road engineering; dense framework structure; cement-ash stabilized aggregate; gradual filling; materials composition design; road performance

## 0 引 言

石灰粉煤灰碎石基层存在早期强度不足的问题。

水泥粉煤灰碎石作为一种新型的筑路材料,具有优良的路用性能,已开始在工程中得到应用。但是,中国对水泥粉煤灰碎石的研究尚不够深入,工程

收稿日期:2007-10-25

基金项目:陕西省交通科技项目(21K-03)

作者简介:蒋应军(1975-),男,浙江兰溪人,副教授,工学博士,东南大学在读博士后,E-mail:jyj@gl.chd.edu.cn.

应用也不多,现行规范对此也没做相应的规定<sup>[1]</sup>,使得水泥粉煤灰碎石组成设计无章可循。因此,有必要对水泥粉煤灰碎石基层组成设计方法进行深入的研究,以指导设计和现场施工。此外,作为半刚性基层的水泥粉煤灰碎石开裂现象也是无法避免的,因而如何增强水泥粉煤灰碎石抗裂性能,是其组成设计的关键<sup>[2-7]</sup>。为此,本文采用逐级填充方法,提出了骨架密实型水泥粉煤灰碎石的组成设计方法,并对此进行了性能检验。

## 1 原材料性质分析

碎石:石灰岩,视密度平均为  $2.79 \text{ g/cm}^3$ ,压碎值为  $17.1\%$ 。

水泥: 32.5 级普通硅酸盐水泥,经检验各项指标均符合要求。

粉煤灰:取自西安灞桥发电厂,其化学性质测试结果见表 1。由表 1 可知,粉煤灰中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的总质量分数大于  $70\%$ ,烧失量小于  $20\%$ ,符合文献<sup>[1]</sup>对粉煤灰性质的要求。其颗粒组成见表 2。

表 1 粉煤灰的化学性质分析

主要氧化物的质量分数/%					$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数/%	烧失量/ %
$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$		
46.40	5.40	22.10	3.10	0.97	73.9	9.2

表 2 粉煤灰颗粒组成

筛孔孔径/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	99.9	98.4	93.5	72.1	37.0

## 2 骨架密实型水泥粉煤灰组成设计

### 2.1 粗集料级配的设计

#### 2.1.1 粗集料级配的确定原理

(1) 确定骨料规格  $D_0$  (一般选取  $19 \sim 31.5 \text{ mm}$  碎石),将一定质量  $M$  的此粒径的骨料分 3 次放入击实筒中,每层按重型标准击实 98 次,然后量测其击实后的高度,并计算体积  $V$ ,利用公式  $\rho = M/V$  计算击实密度  $\rho$ ,算出空隙率  $n$ 。

(2) 以  $D_0$  用量(质量)为 100,  $D_0$  下一级  $D_1 = \frac{1}{2}D_0$  ( $9.5 \sim 19 \text{ mm}$  碎石),以  $D_0$  用量的  $5\%$  为步长,将  $D_1$  逐次掺入  $D_0$  中,每次掺入后,击实 98 次,测定击实密度,建立填充数量与击实密度关系曲线。

(3) 选择  $D_1$  的合理用量,测得最佳填充率。

(4) 以此类推,进行 II、III 级填充,最后分别得到各级粒径的最佳填充比例,即粗集料的级配。

#### 2.1.2 粗集料级配的确定过程

(1) I 级填充试验。 $D_0$  ( $19 \sim 31.5 \text{ mm}$  碎石)取  $2500 \text{ g}$ ,按  $5\%$  步长依次填充  $D_1$  ( $9.5 \sim 19 \text{ mm}$  碎石),如图 1 所示。

由图 1 可知,当  $D_1$  以  $D_0$  用量的  $5\%$  为步长进行逐级填充,  $D_1 : D_0 = 5 : 1$  时,混合集料的密度达到最大值。

(2) II 级填充试验。在 I 级填充的基础上,进行 II 级填充。 $D_0$  取  $2500 \text{ g}$  和  $D_1$  取  $500 \text{ g}$ ,用  $D_2$  ( $4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$  碎石) 进行 II 级填充,试验结果见图 2。

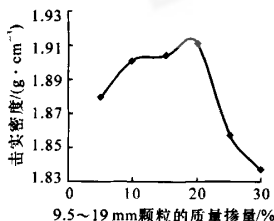


图 1 I 级填充

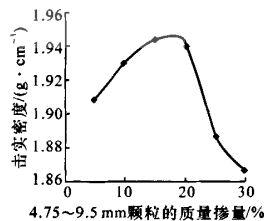


图 2 II 级填充

当  $D_2$  以  $D_0$  和  $D_1$  用量的  $5\%$  为步长进行逐级填充,  $D_2 : (D_1 + D_0) = 17 : 100$  时,混合集料的密度达到最大值。

(3) III 级填充试验。在 I、II 级填充的基础上,进行 III 级填充。取  $D_0$  为  $2500 \text{ g}$ 、 $D_1$  为  $500 \text{ g}$ 、 $D_2$  为  $500 \text{ g}$ ,填充  $2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$  碎石,试验结果见图 3。

由图 3 可知,当  $D_3$  以  $D_2 + D_1 + D_0$  用量的  $5\%$  为步长进行逐级填充,  $D_3 : (D_2 + D_0 + D_1) = 15 : 85$  时,混合集料的密度达到最大值,此时混合集料空隙率为  $30.3\%$ 。

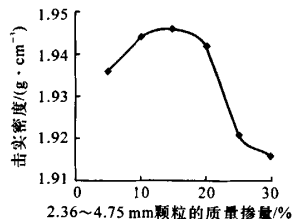


图 3 III 级填充

(4) 主骨料级配。根据 III 级填充试验结果,水泥粉煤灰碎石粗集料级配如表 3 所示。

表 3 嵌挤骨架主骨料级配

填充级别	不同筛孔(mm) 通过率/%			
	31.5 ~ 19	19 ~ 9.5	9.5 ~ 4.75	4.75 ~ 2.36
I	83	17		
II	68	17	15	
III	59	15	13	13

### 2.2 水泥粉煤灰砂浆的组成设计

#### 2.2.1 结合料配比的确定

水泥粉煤灰碎石混合料中,水泥粉煤灰既起填充集料空隙的作用,又起粘结作用。因此,水泥与粉煤灰的比例选择是否得当,将直接影响水泥粉煤灰碎石混

合料路用性能和经济性。本文改变水泥与粉煤灰的比例为 1:1~1:5,考察其强度变化规律,结果见表 4。

表 4 水泥粉煤灰 7 d 饱水强度

水泥与粉煤灰比例	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
抗压强度/MPa	7.35	6.20	4.00	3.04	2.10
劈裂强度/MPa	1.32	0.64	0.41	0.39	0.28

从表 4 可知,随水泥剂量的增加,7 d 饱水强度随之增加。参考规范<sup>[1]</sup>要求基层 7 d 强度在 3~5 MPa 比较经济,因而取水泥与粉煤灰比例为 1:3,作为后续试验比例。

2.2.2 细集料级配的确定

采用 K 法(其设计参数为 K)计算,借鉴国内外经验并结合试验来确定细集料级配。为了较好地分析细集料级配对强度的影响,对照国外规定与中国经验,选用 K=0.50~0.70 时对应的细集料级配,与前述的水泥粉煤灰组合进行试验,可得到一个适用的细集料级配。

2.2.3 水泥粉煤灰与细集料比例的确定

固定水泥与粉煤灰的比例和水泥粉煤灰与细集料的比例不变,变化 K 值,通过重型击实试验确定砂浆的最大干密度和最佳含水量(含水质量分数),并根据击实结果成型圆柱体试件。测试其 7 d 无侧限饱水抗压强度(表 5)。

为了更好地研究细集料对粗集料的填充作用,根据 7 d 强度结果,结合单因素分析,选用两组比例进行填充试验,结果见表 6。

表 5 7 d 无侧限饱水抗压强度

K 值	水泥粉煤灰与细集料比例的强度/MPa			
	1:1	1:2	1:3	1:4
0.50	4.86	6.18	4.36	3.66
0.55	5.89	6.10	5.33	3.66
0.60	5.96	4.18	3.75	3.10
0.65	6.81	3.97	3.75	3.50
0.70	5.85	3.46	3.28	2.95

表 6 优选结果

水泥粉煤灰与细集料比例	1:1(A)	1:2(B)
K 值	0.65	0.60
最大干密度	1.75	1.90

注:A、B 为级配类型。

2.3 骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计

在水泥粉煤灰碎石中,以粗集料形成骨架嵌挤,使其空隙率最小;以水泥粉煤灰砂浆填充骨料的空隙,形成密实结构,使整体混合料获得最大的密度。使用振动压路机,可以使粗集料形成嵌挤骨架结构。所以,粗集料与砂浆的适宜配比组成是:1 个体积的水泥粉煤灰碎石中,可含有 1 个实方体积的粗集料;压实后密实的水泥粉煤灰砂浆完全填充到粗集料骨架结构的空隙中。

可采用体积法计算水泥粉煤灰砂浆的用量。

以表 3 中粗集料和砂浆的质量分数为基础,结合已确定的粗细集料比例和结合料的比例,计算集料的质量分数,结果如表 7 所示。

3 路用性能分析

选择两种级配(规范级配中值及骨架密实级配)的水泥稳定碎石进行对比试验,水泥剂量(质量分数)均取 5.0%。GF 为规范级配,GJ 为骨架密实级配。级配结果见表 7。

3.1 力学性能

各类材料不同龄期强度值及其与龄期的回归方程参数值见表 8、表 9(a、b、c、d 均为待定系数,R<sup>2</sup> 为相关系数)。

由表 8、表 9 可看出,不同结构类型同类混合料中,骨架密实型混合料强度普遍高于悬浮密实型结构。水泥粉煤灰碎石早期强度(28 d 龄期之前)不如水泥稳定碎石高,但后期强度(28 d 龄期之后)却高于水泥稳定碎石。表中方程的参数 a、c 表示材料强度随龄期的增长率,可以看出,水泥粉煤灰碎石的 a、c 普遍大于水泥稳定碎石,说明水泥粉煤灰碎石具有较强的后期强度。因此,建议在水泥稳定碎石施工中宜适当掺加粉煤灰,有利于基层后期强度的发展。

3.2 抗裂性能

考虑到试验工作量以及基层在早期以干缩为主,一旦覆盖面层后,基层以温缩为主。因此,在评价材料抗干缩开裂性能时,龄期选择为 7 d;而在评价抗温缩开裂性能时,龄期选择为 90 d。各材料抗裂系数见表 10。

表 7 骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计结果

材料类型	级配类型	不同筛孔(mm)的通过率/%								水泥	粉煤灰
		31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075		
水泥粉煤灰碎石	A	100	51	38	27	22	12	4	1	3.5	10.5
灰碎石	B	100	52	39	28	23	13	5	1	3.7	11.1
水泥稳	GF	100	72~89	47~67	29~49	17~35		8~22	0~7		
定碎石	GJ	100	79	47	31	22		14	4		

表 8 各材料不同龄期抗压强度值及与龄期的回归方程参数值

材料类型	级配类型	不同龄期 $T(d)$ 的抗压强度 $R_c/MPa$				方程 $R_c = a \ln(T) + b$		
		7	28	90	180	$a$	$b$	$R^2$
水泥	GF	4.82	6.03	6.67	7.26	0.731 5	3.457 3	0.99
稳定碎石	GJ	5.39	6.48	7.58	8.88	1.032 7	3.217 5	0.97
水泥粉煤	A	3.25	5.00	7.17	8.21	1.554 7	0.088 6	0.99
灰碎石	B	3.62	5.90	8.04	9.50	1.729 3	0.217 8	0.99

表 9 各材料不同龄期劈裂强度值及与龄期的回归方程参数值

材料类型	级配类型	不同龄期 $T(d)$ 的劈裂强度 $R_t/MPa$				方程 $R_t = c \ln(T) + d$		
		7	28	90	180	$c$	$d$	$R^2$
水泥	GF	0.23	0.53	0.66	0.71	0.147 9	-0.021 2	0.95
稳定碎石	GJ	0.32	0.67	0.84	0.96	0.194 0	-0.028 5	0.98
水泥粉煤	A	0.21	0.42	0.64	0.71	0.158 8	-0.099 3	0.99
灰碎石	B	0.22	0.59	0.75	0.99	0.224 9	-0.204 3	0.98

表 10 各材料的抗裂性能

材料类型	级配类型	90 d 龄期		7 d 龄期	
		平均温缩系数/( $10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	温缩能抗裂系数 $t/^\circ C$	平均干缩系数/( $10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	干缩能抗裂系数 $w/\%$
水泥稳	GF	11.83	4.16	58.30	4.69
定碎石	GJ	10.06	5.98	40.90	5.36
水泥粉	A	9.20	1.36	63.08	2.13
煤灰碎石	B	6.80	4.36	44.83	4.16

表 10 中  $t$  或  $w$  反映了该材料的抗温度或湿度收缩的相对能力,其值越大,表明材料抗温度或湿度收缩性能越好,反之亦然。从表 10 可看出,骨架密实结构半刚性基层材料抗裂性能明显优于规范级配悬浮密实结构半刚性基层材料,而水泥粉煤灰碎石抗裂性能优于水泥稳定碎石。

## 4 结 语

(1)以最大密度为原则,采用逐级填充法确定了水泥粉煤灰碎石的粗集料级配;考虑强度及经济性,确定了水泥粉煤灰比例以及水泥粉煤灰砂浆比例,最终形成了骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计方法。

(2)路用性能分析表明,骨架密实型水泥粉煤灰碎石在后期强度、抗裂性能方面明显优于水泥稳定碎石,也证明了本文提出的骨架密实型水泥粉煤灰碎石组成设计方法是可行的。

## 参考文献:

## References:

[1] JTJ 034-2000,公路路面基层施工技术规范[S].

[2] 张嘎吱.水泥粉煤灰稳定碎石基层配合比设计和路用性能研究[D].西安:长安大学,2004.

[3] 李炜光,申爱琴,张玉斌.二灰稳定集料抗裂性能评价与应用[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):1-5.

LI Wei-guang, SHEN Ai-qin, ZHANG Yu-bin. Anti-cracking capability of lime-fly-ash-stabilized-aggregate in road base[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2007, 27(2): 1-5.

[4] 沙庆林.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1999.

[5] 杨红辉,郝培文,戴经梁.掺膨胀剂水泥稳定碎石路用性能[J].交通运输工程学报,2006,6(1):48-51.

YANG Hong-hui, HAO Pei-wen, DAI Jing-liang. Road performance of cement-stabilized aggregate mixture with expansion agent[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 48-51.

[6] 滕旭秋,陈忠达,蒋万民.二灰碎石混合料配合比设计方法[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):29-34.

TENG Xu-qiu, CHEN Zhong-da, JIANG Wan-min. Mix ratio design of lime-fly-ash stabilized-aggregates-mixtures[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(1): 29-34.

[7] 陈忠达,袁万杰,高春海.多级嵌挤密实级配设计方法研究[J].中国公路学报,2006,19(1):32-37.

CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-37.