

文章编号:1671-8879(2007)05-0016-04

## 水泥粉煤灰稳定碎石配合比设计

张嘎吱, 沙爱民

(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:**通过强度、干缩和冲刷试验,研究了水泥粉煤灰稳定碎石混合料的组成结构对混合料强度的影响,水泥质量分数与粉煤灰质量分数的最优比例,水泥质量分数及结合料总质量分数对混合料干缩和冲刷性能的影响。提出了混合料配合比设计方法:首先测试低质量分数水泥 7 d 龄期抗压强度,以确定混合料的最优集料质量分数;接着以后期抗压强度增幅指标(180 d/28 d)确定水泥质量分数与粉煤灰质量分数的最优比例;最后从抗冲刷和抗干缩性能考虑,前两步选定的配合比水泥质量分数应控制在 3%~5%之间,结合料总质量分数不应超过 25%。

**关键词:**道路工程;水泥粉煤灰;稳定碎石;路用性能;配合比设计

**中图分类号:**U414.1

**文献标志码:**A

### Mixing design of cement-fly-ash stabilized crushed-stones

ZHANG Ga-zi, SHA Ai-min

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the test of cement-fly-ash stabilized crushed-stones' strength, crack resistance and erosion resistance, this paper studies the mixture's road properties and puts forward the following mixture design method: firstly, mixture's 7 d age compressive strength of low cement percentage is tested in order to determine the best aggregate percentage; secondly, 180 d age and 28 d age's mix compressive strength is tested, because the proportion of 180 d age compressive strength to 28 d age one can determine the best proportion of cement to fly-ash; thirdly, in consideration of crack resistance property and erosion resistance property, the cement percentage must be limited to 3%~5%, bound materials percentage must be limited below 25%. 8 tabs, 5 figs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; cement-fly-ash; stabilized crushed-stones; road property; mixing design

## 0 引言

水泥粉煤灰稳定碎石混合料具有早期强度高、后期强度增长幅度大和能适应重型交通等优点,中国的一些石灰资源缺乏的省份已经开始尝试将其做为沥青路面的基层。因此,针对其开展配合比设计

研究是有意义的。已有的研究结论<sup>[1-2]</sup>在使用水泥粉煤灰稳定碎石混合料时有一定的参考价值,但其研究方案值得商榷。例如,在开展结合料、集料最优比例研究时,在结合料与集料比例变化的同时,如果水泥质量分数也在变化,可能是不合适的。因为,在这种研究方案中,不同配合比混合料路用性能的差

收稿日期:2006-05-18

基金项目:河南省交通科技项目(2002F232)

作者简介:张嘎吱(1972-),男,陕西西安人,讲师,博士, E-mail: Zhanggazi505@163.com.

异不仅源于组成结构的不同,而且水泥剂量对其也有很大的影响。又如,在开展水泥与粉煤灰最优比例研究时,将强度试验的最长龄期定为 90 d 也是不科学的。因为,水泥的水化产物之一  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与粉煤灰的火山灰反应速度很慢,它对强度的贡献更多地体现在后期。因此,90 d 龄期的强度较高往往是因为水泥剂量加大,并非水泥与粉煤灰的比例最优<sup>[3-9]</sup>。为了充分发挥这种材料的路用潜能,本文系统研究了混合料的强度、收缩性能和抗冲刷性能等指标随组成结构、水泥粉煤灰比例和水泥质量分数等因素的变化规律,提出了一种新的配合比设计思路,以供同行们参考。

## 1 原材料基本性质

水泥采用 425<sup>#</sup> 普通硅酸盐水泥,其基本性质见表 1。

表 1 水泥的基本性质

初凝时间/ min	终凝时间/ min	安定性	3 d 抗压强度/ MPa	3 d 抗折强度/ MPa
305	430	合格	23.2	3.3

粉煤灰的基本性质见表 2。

表 2 粉煤灰的基本性质

项 目	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	烧失量/ $\%$	细度(45 $\mu\text{m}$ )/ $\%$
检测值	43.24	2.14	30.11	16.55	42.9

集料采用河南省焦作市九里山石场的石灰岩石料,其技术指标见表 3。

表 3 集料技术指标

项 目	粒径范围/mm	视密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
	10~30	2.74
	10~20	2.76
洛杉矶磨耗值/ $\%$	5~10	2.72
		27.9
压碎值/ $\%$		24.1
磨光值		42

## 2 组成结构对混合料强度指标的影响

当结合料与集料比例发生变化时,混合料的组成结构及强度指标随之发生变化。为了寻求强度指标随组成结构的变化规律,本文进行了混合料抗压强度试验。由于水泥的水化反应影响混合料的早期和后期强度,为降低化学反应对强度指标的影响,本试验方案均采用了 3% 的低质量分数水泥。水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与粉煤灰间的火山灰反应主要影响混合料的后期强度,为降低火山灰反应对强度指标的影响,本文仅测试了早期即 7 d 龄期的抗压强度;试验结果见表 4;混合料抗压强度随组合结构的变化见图 1。

表 4 混合料抗压强度试验结果(7 d 龄期)

试验数据	配合比(水泥:粉煤灰:碎石)				
	3:7:90	3:10:87	3:12:85	3:17:80	3:22:75
抗压强度/MPa	1.87	1.98	1.92	1.83	1.64
变异系数/ $\%$	6	9	7	8	8

注:配合比为质量分数比,以下类同。

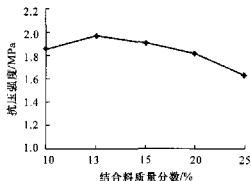
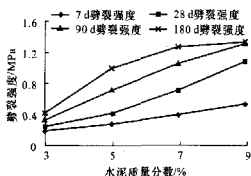


图 1 混合料抗压强度随组成结构的变化规律

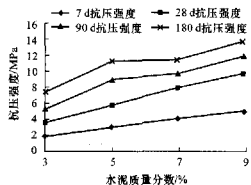
从图 1 可以看出,当结合料的质量分数小于 13% 或大于 13% 时,抗压强度均呈下降趋势。实践表明,集料间的嵌挤和锁结作用与结合料的粘结力均对抗压强度有重要贡献,前者的下降是由于集料间嵌挤和锁结作用程度的减弱;后者的下降是由于结合料粘结力的降低。因此,当集料质量分数约等于 87% 时,混合料形成骨架-密实结构,抗压强度最高。

## 3 水泥与粉煤灰的最优比例

为了寻求强度指标随水泥粉煤灰比例的变化规律,本文开展了混合料抗压强度试验。试验中 4 个配合比(质量分数比,以下类同)的碎石集料质量分数(85%)和级配均相同,以消除组成结构对强度指标的影响,试验结果如图 2、表 5 所示。



(a) 龄期强度随水泥质量分数的变化



(b) 抗压强度随水泥质量分数的变化

图 2 强度指标随水泥质量分数的变化规律

表 5 混合料抗压强度试验结果

试验项目	配合比(水泥:粉煤灰:碎石)							
	3:12:85		5:10:85		7:8:85		9:6:85	
	试验数据	变异系数/%	试验数据	变异系数/%	试验数据	变异系数/%	试验数据	变异系数/%
7 d 抗压强度/MPa	1.92	8	3.05	9	4.13	6	5.04	7
7 d 劈裂强度/MPa	0.13	7	0.25	8	0.32	7	0.41	7
28 d 抗压强度/MPa	3.63	5	5.78	7	7.91	5	9.69	9
28 d 劈裂强度/MPa	0.20	8	0.41	7	0.71	6	1.00	5
90 d 抗压强度/MPa	5.20	4	8.95	4	9.69	6	11.88	8
90 d 劈裂强度/MPa	0.34	6	0.70	7	1.05	7	1.27	4
180 d 抗压强度/MPa	7.29	8	11.21	6	11.47	7	13.77	8
180 d 劈裂强度/MPa	0.54	6	1.09	8	1.32	6	1.33	9

注:配合比为质量分数比。

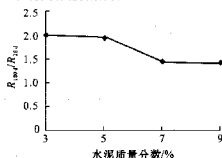
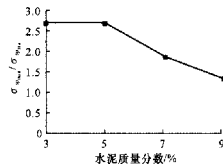
从图 2 可看出,水泥质量分数越大,或者说水泥质量分数与粉煤灰质量分数的比值越大,水泥粉煤灰稳定碎石不同龄期的力学强度指标就越高。水泥质量分数与混合料不同龄期强度间强相关性的规律说明,不同水泥粉煤灰比例的混合料即使后期强度增长幅度不同,但各龄期(7、28、90、180 d)的最终强度仍绝对由水泥质量分数支配。因此,这种混合料的力学强度指标高是由于其水泥质量分数大,不表明其水泥粉煤灰比例最优。

水泥粉煤灰比例优的混合料即使早期强度高,后期强度的增幅也很大。所以,180 d 龄期的强度指标与 28 d 龄期的强度指标的比值在一定程度上能反映水泥粉煤灰间比例的优劣,表 6 和图 3 分别显示了龄期比(180 d/28 d)的计算值随水泥粉煤灰比例变化的规律。

表 6 混合料强度指标与龄期的关系

力学参数/MPa	28 d	180 d	180 d/28 d
$R(3:12:85)$	3.63	7.29	2.00
$\sigma_{wc}(3:12:85)$	0.20	0.54	2.70
$R(5:10:85)$	5.78	11.21	1.94
$\sigma_{wc}(5:10:85)$	0.41	1.09	2.66
$R(7:8:85)$	7.91	11.47	1.45
$\sigma_{wc}(7:8:85)$	0.71	1.32	1.86
$R(9:6:85)$	9.69	13.77	1.42
$\sigma_{wc}(9:6:85)$	1.00	1.33	1.33

注: $R(3:12:85)$ 表示水泥:粉煤灰:碎石配合比为 3:12:85 时的抗压强度; $\sigma_{wc}(3:12:85)$ 表示水泥:粉煤灰:碎石配合比为 3:12:85 时的劈裂强度;余同。

(a) 抗压强度的  $R_{180d}/R_{28d}$  与水泥质量分数的关系(b) 劈裂强度的  $R_{180d}/R_{28d}$  与水泥质量分数的关系图 3  $R_{180d}/R_{28d}$  的计算值随水泥粉煤灰比例变化的规律

注: $R_{180d}$ 、 $R_{28d}$  分别为混合料 180 d、28 d 龄期的抗压强度; $\sigma_{wc180d}$ 、 $\sigma_{wc28d}$  分别为 180 d、28 d 龄期的劈裂强度。

图 3 曲线左侧的拐点处水泥与粉煤灰质量分数的比值为 5:10。当比例小于 5:10 时,水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和粉煤灰间的比例逐渐远离两者完全火山灰反应时的比值,虽然 180 d 龄期时未反应的粉煤灰量越来越多,但  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的消耗依然比较充分,28~180 d 区间力学特性指标相对 28 d 前其拓展空间依然很大,故 180 d/28 d 的值仍然较高;当比例大于 5:10 时,水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  越来越多,而粉煤灰剂量却越来越小,虽然粉煤灰反应地比较充分,但未反应的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量越来越多,两者的比例逐渐远离完全火山灰反应时的比值,28~180 d 区间力学特性指标相对于 28 d 前其拓展空间越来越小,故  $R_{180d}/R_{28d}$  的值明显降低。综上所述,水泥与粉煤灰的最优质量分数比例为 5:10,比值  $R_{180d}/R_{28d}$  能够衡量结合料比例的优劣。

#### 4 混合料的干缩性能

不同配合比混合料的累积干缩应变见表 7。

表 7 显示,在集料级配和质量分数不变的情况下,随着水泥质量分数的增加,粉煤灰质量分数的减小,累积干缩应变增大;在水泥质量分数不变的情况下,随着粉煤灰质量分数的增加,集料质量分数的减

表7 混合料累积干缩应变试验结果(7 d)

配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	5:5:90	5:10:85	5:15:80	5:20:75
累积干缩应变/ $10^{-6}$	396	483	582	829
配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	3:7:90	3:12:85	3:17:80	3:22:75
累积干缩应变/ $10^{-6}$	282	319	435	677
配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	7:8:85	7:13:80	7:18:75	
累积干缩应变/ $10^{-6}$		612	798	965

注:配合比均为质量分数比。

小,累积干缩应变增大。

## 5 混合料的冲刷性能

不同配合比混合料的冲刷性能测试结果见表8。

表8 混合料冲刷性能试验结果(28 d)

配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	3:7:90	3:10:87	3:12:85	3:17:80	3:22:75
平均冲刷/(g·min <sup>-1</sup> )	32.4	36.7	40.8	45.6	60.7
配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	4:5:90	4:9:87	4:11:85	4:16:80	4:21:75
平均冲刷/(g·min <sup>-1</sup> )	11.2	13.9	15.8	19.1	35.7
配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	5:5:90	5:8:87	5:10:85	5:15:80	5:20:75
平均冲刷/(g·min <sup>-1</sup> )	9.6	11.2	12.2	14.3	29.8
配合比 (水泥:粉煤灰:碎石)	7:6:87	7:8:85	7:13:80	7:18:75	
平均冲刷/(g·min <sup>-1</sup> )		3.8	4.3	7.2	19.9

注:配合比均为质量分数比。

由图4和图5的试验数据可以得出以下结论:

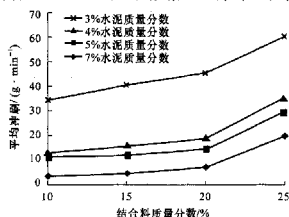


图4 平均冲刷量随结合料质量分数的变化规律

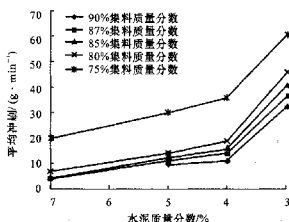


图5 平均冲刷量随水泥质量分数的变化规律

(1)当结合料质量分数从10%变化到20%时,平均冲刷量缓慢增加;但当结合料质量分数增大到25%时,平均冲刷量增加明显。

(2)当结合料质量分数固定不变,水泥质量分数相对减少时,平均冲刷量起初缓慢增加,但当水泥质量分数减小到3%时,平均冲刷量增加明显。

## 6 结语

(1)180 d龄期的强度指标与28 d龄期的强度指标之比能衡量水泥粉煤灰比例的优劣。

(2)水泥粉煤灰稳定碎石混合料配合比设计方法:保持低质量分数(3%以下)水泥不变,变化粉煤灰与集料的相对质量分数,测试不同粉煤灰、集料比例的7 d龄期抗压强度,抗压强度最大时的集料质量分数为最优集料质量分数;保持集料质量分数为最优质量分数,变化水泥、粉煤灰质量分数的相对比例,以后期强度增幅指标(180 d/28 d)衡量水泥粉煤灰比例的优劣;前两步确定的水泥粉煤灰结合料总质量分数不应超过25%,结合料中的水泥质量分数应控制在3%~5%之间。

## 参考文献:

### References:

- [1] 徐江萍,姚爱玲,张登良. 水泥-粉煤灰碎石早强特性的研究[J]. 中南公路工程, 1999, 24(2): 4-6.  
XU Jiang-ping, YAO Ai-ling, ZHANG Deng-liang. Cement-flyash strength study in early stage [J]. Central South Highway Engineering, 1999, 24 (2): 4-6.
- [2] 杨锡武,梁富权. 水泥(石灰)粉煤灰混合料的最佳配合比研究[J]. 公路, 1995, (9): 13-16.  
YANG Xi-wu, LIANG Fu-quan. Best proportion of cement(lime)-flyash mixture [J]. Highway, 1995, (9): 13-16.
- [3] 张嘎吱,沙爱民,周宗科. 水泥粉煤灰稳定碎石路面的水泥与粉煤灰比例[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 17-20.  
ZHANG Ga-zi, SHA Ai-min, ZHOU Zong-ke. Proportion of cement to fly-ash in cement-fly-ash stabilized crushed-stones pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 17-20.
- [4] 徐鹤明,韩森,郝培文,等. 弱风化石粒料结构强度与组成关联因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 21-25.

(下转第48页)

- 然科学报, 2002, 22(1): 63-65.
- SUN Chao-yun, SHA Ai-min, LUO Ying, et al. A computer management system for highway construction materials based on Delphi 5.0 [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(1): 63-65.
- [2] 张碧琴, 李江华, 田茂杰, 等. 新疆公路三级区划设计参数的研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 18-21.
- ZHANG Bi-qin, LI Jiang-hua, TIAN Mao-jie, et al. Research on design parameter of the third division for highway in Xinjiang [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 18-21.
- [3] 贺国佑. 新疆公路三级自然区划设计参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [4] 张碧琴, 田茂杰, 叶亚丽, 等. 新疆公路三级自然区划划分原则和方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 29-33.
- ZHANG Bi-qin, TIAN Mao-jie, YE Ya-li, et al. Principle and method of third level natural division for highway construction in Xinjiang province [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 29-33.
- [5] 马京辉, 赵鸿铎. GIS-T 中的公路里程桩定位参照系统[J]. 山西建筑, 2004, 30(5): 133-134.
- MA Jing-hui, ZHAO Hong-duo. Positioning reference system of highway mile post in GIS-T [J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(5): 133-134.
- [6] 暨育雄, 阙胜男, 孙立军, 等. 基于 GIS 的机场道面管理系统[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 70-74.
- Ji Yu-xiong, KAN Sheng-nan, SUN Li-jun, et al. Airport pavement management system based on GIS [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 70-74.
- [7] 李 莉, 周美玉. 基于 ArcView 平台的地理信息系统[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 110-113.
- LI Li, ZHOU Mei-yu. Geographical information system based on ArcView platform [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 110-113.
- [8] 张映雪, 黄利芒. GIS 技术在公路建设管理中的应用研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 90-93.
- ZHANG Ying-xue, HUANG Li-mang. Application study of GIS technology in highway construction management [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 90-93.
- [9] 张碧琴, 李 霞, 李江华, 等. 新疆公路三级自然区划标志体系的建立[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4): 21-25.
- ZHANG Bi-qin, LI Xia, LI Jiang-hua, et al. Symbolic system of third level natural division for highway construction in Xinjiang province [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 21-25.
- [10] 邹国平, 邹 群, 黄 伟. 基于 SDSS 的高速公路养护系统结构[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 47-50.
- ZOU Guo-ping, ZOU Qun, HUANG Zheng. Architecture of expressway maintenance management system based on SDSS [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 47-50.
- ~~~~~
- (上接第 19 页)
- XU Ou-ming, HAN Sen, HAO Pei-wen, et al. Relationship between structure strength and composition for weakly-weathered-stone-gravel [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 21-25.
- [5] 马 磊, 莫石秀, 王秉纲, 等. 基于剪切性能的级配碎石关键筛孔合理范围确定[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 27-31.
- MA Biao, MO Shi-xiu, WANG Bing-gang, et al. Rational range determination of key sieve pores for graded crushed stone based on shear performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 27-31.
- [6] 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 the design method of multilevel dense built-in grading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-37.
- [7] 王宏杨, 黄晓明, 傅 智. 半刚性基层表面裂缝影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 38-41.
- WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Influence factors on surface crack of semi-rigid base course [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 38-41.
- [8] 陈拴发, 郑木莲, 王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀性试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 14-17.
- CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang. Experimental research on stress corrosion character of fly-ash-cement concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 14-17.
- [9] 陈拴发, 王秉纲. 高性能混凝土应力腐蚀评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 6-10.
- CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang. Stress-corrosion evaluation indices of high-property-concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 6-10.