

文章编号:1671-8879(2006)05-0017-04

水泥粉煤灰稳定碎石路面的水泥与粉煤灰比例

张嘎吱¹, 沙爱民¹, 周宗科²

(1. 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;

2. 九易通路桥有限公司, 湖北 随州 430070)

摘 要:为了研究水泥粉煤灰稳定碎石混合料中水泥与粉煤灰的最优比例,通过集料含量和级配不变,只改变水泥与粉煤灰比例的方法,研究了不同配合比混合料强度指标随龄期的变化规律。结果表明:混合料不同龄期的强度更多地取决于水泥剂量,而非水泥与粉煤灰比例;180 d 龄期与 28 d 龄期的强度比值 R_{180}/R_{28} 能够反映水泥与粉煤灰比例的优劣; R_{180}/R_{28} 随水泥/粉煤灰变化曲线的拐点对应水泥与粉煤灰的最优比例。

关键词:道路工程;水泥粉煤灰稳定碎石;最优比例;配合比设计;强度指标

中图分类号:U416.214

文献标识码:A

Proportion of cement to fly-ash in cement-fly-ash stabilized crushed-stones pavement

ZHANG Ga-zhi¹, SHA Ai-min¹, ZHOU Zong-ke²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Jiuyitong Road and Bridge Co Ltd, Suizhou 430070, Hubei, China)

Abstract: In order to give the best proportion of cement to fly-ash for constructing cement-fly-ash stabilized crushed-stones pavement, through varying the proportion of cement to fly-ash while maintaining aggregate percentage and gradation, the variation law of mixture strength index with age is studied by experiment. The results show that the cement percentage determines mixture's strength; the strength ratio value (R_{180}/R_{28}) can indicate the proportion's value; the special point of variation curve of R_{180}/R_{28} to cement/fly-ash indicate the best proportion of cement to fly-ash. 7 tabs, 2 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; cement-fly-ash stabilized crushed-stones; best proportion; mix design; strength index

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,适应重型交通发展等优点,因此针对它开展最佳配合比研究是有意义的。本文只

就混合料总剂量保持不变,对水泥与粉煤灰的最优比例进行了探讨。徐江萍等^[1]通过分析不同水泥粉煤灰比例 3 个龄期(7 d、28 d、90 d)的强度试验认为,水泥与粉煤灰的最佳比例是 1:2;杨锡武等^[2]基本上采用了同样的思路,得出的是最佳比例为

1:3~1:5。以上结论在使用水泥粉煤灰稳定碎石混合料时有一定的借鉴意义,但其研究方案存在改进的必要。首先,强度试验的最长龄期仅为 90 d 是不合理的,因为水泥的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉煤灰的火山灰反应速度较慢,它对强度的贡献更多地体现在后期;其次,90 d 龄期的强度越高,水泥与粉煤灰的比例不一定最优,因为他们的研究方案显示此时水泥剂量往往较大,因此强度的高低更多地取决于水泥剂量,而非水泥与粉煤灰的比例。鉴于以上原因,本文通过研究认为,采用指标 R_{180}/R_{28} 来评价水泥与粉煤灰比例的优劣是科学的。

1 原材料基本性质

水泥采用 425# 普通硅酸盐水泥,其基本性质见表 1。粉煤灰的基本性质见表 2。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 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

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 μm)/%
检测值	43.24	2.14	30.11	16.55	42.9

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
	5~10	2.72
洛杉矶磨耗值/%	27.9	
压碎值/%	24.1	
磨光值	42	

2 研究方法

(1)配合比。固定集料含量为 85%,集料级配为现行规范中石灰粉煤灰稳定碎石基层级配范围中限,以此变化水泥与粉煤灰的相对比例。具体配合比为:水泥:粉煤灰:碎石=3:12:85;5:10:85;7:8:85;9:6:85。

(2)强度指标和试验龄期。分别试验混合料 4 个龄期(7 d、28 d、90 d、180 d)的 4 种强度指标(抗压强度、抗压模量、劈裂强度和抗弯拉强度)。

3 结果分析

混合料不同龄期的强度指标试验结果见表 4。

表 4 水泥粉煤灰稳定碎石混合料强度指标试验结果

试 验 项 目	3:12:85		5:10:85		7:8:85		9:6:85	
	试验	变异系	试验	变异系	试验	变异系	试验	变异系
	数据	数 C_V	数据	数 C_V	数据	数 C_V	数据	数 C_V
7 d 抗压强度/MPa	1.92	0.08	3.05	0.09	4.13	0.06	5.04	0.07
7 d 劈裂强度/MPa	0.13	0.07	0.25	0.08	0.32	0.07	0.41	0.07
7 d 抗弯拉强度/MPa	0.201	0.06	0.501	0.07	0.553	0.08	0.630	0.09
28 d 抗压强度/MPa	3.63	0.05	5.78	0.07	7.91	0.05	9.69	0.09
28 d 抗压模量/MPa	558	0.12	714	0.14	1029	0.13	1326	0.14
28 d 劈裂强度/MPa	0.20	0.08	0.41	0.07	0.71	0.06	1.00	0.05
28 d 抗弯拉强度/MPa	0.43	0.06	0.89	0.08	1.50	0.04	1.93	0.05
90 d 抗压强度/MPa	5.20	0.04	8.95	0.04	9.69	0.06	11.88	0.06
90 d 抗压模量/MPa	744	0.16	1028	0.11	1098	0.10	1485	0.12
90 d 劈裂强度/MPa	0.34	0.06	0.70	0.07	1.05	0.07	1.27	0.04
90 d 抗弯拉强度/MPa	0.73	0.07	1.80	0.04	2.03	0.06	2.41	0.07
180 d 抗压强度/MPa	7.29	0.08	11.21	0.06	11.47	0.07	13.77	0.08
180 d 抗压模量/MPa	1041	0.15	1404	0.14	1463	0.11	1904	0.12
180 d 劈裂强度/MPa	0.54	0.06	1.09	0.08	1.32	0.06	1.33	0.09
180 d 抗弯拉强度/MPa	1.10	0.08	2.15	0.07	2.68	0.08	2.96	0.10

由表 4 的试验结果,可以得出以下结论:

(1)水泥的剂量越大,或者说水泥与粉煤灰的比值越大,水泥粉煤灰稳定碎石混合料不同龄期的强度指标越高,如图 1 所示。

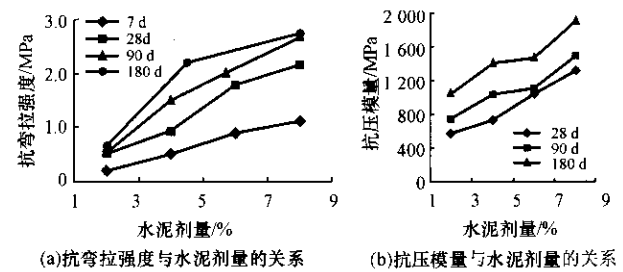


图 1 强度指标随水泥剂量的变化规律

水泥粉煤灰稳定碎石混合料的强度源于三方面:①集料碎石的嵌挤和锁结作用;②水泥的凝结和硬化作用;③水泥的水化产物之一 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 与粉煤灰的火山灰反应。本文试验方案中 4 个配合比的碎石集料含量和级配均相同,故从理论上讲,骨料对不同混合料的强度指标基本没有影响,所以强度差异是由于化学反应生成物量的不同造成的。水泥剂量与混合料不同龄期强度间相关性的规律说明,不同水泥粉煤灰比例混合料即使后期强度增长幅度不同,但各龄期(7 d、28 d、90 d、180 d)的最终强度仍由水泥剂量绝对支配,因此混合料力学强度指标高是由于水泥剂量大,而不表明水泥粉煤灰比例最优。

(2)为了便于对水泥粉煤灰稳定碎石混合料的力学强度指标与龄期的关系进行分析,本文摘引了一组水泥稳定碎石、石灰粉煤灰稳定碎石混合料的力学特性指标与龄期的关系数据,如表 5、表 6 所示^[3]。

表 5 稳定碎石的力学特性指标与龄期关系

力学参数/MPa	28 d	90 d	180 d	R_{28}/R_{180}	R_{90}/R_{180}
R	4.49	5.57	6.33	0.71	0.88
E_P	2093	3097	3872	0.54	0.80
σ_{sp}	0.413	0.634	0.813	0.51	0.78
E_{sp}	533	926	1287	0.41	0.72

表 6 石灰粉煤灰稳定碎石的力学特性指标与龄期关系

力学参数/MPa	28 d	90 d	180 d	R_{28}/R_{180}	R_{90}/R_{180}
R	3.10	5.75	8.36	0.37	0.69
E_P	1086	1993	2859	0.38	0.70
σ_{sp}	0.219	0.536	0.913	0.41	0.59
E_{sp}	359	960	1720	0.37	0.56

注: R 为抗压强度; E_P 为抗压回弹模量; σ_{sp} 为劈裂强度; E_{sp} 为劈裂模量。

由表 5 可知,水泥稳定碎石 90 d 龄期的抗压强度达到 180 d 龄期的 90%,90 d 龄期的劈裂强度达到 180 d 龄期的 80%,因此水泥稳定碎石 90 d 龄期以后的抗压强度和劈裂强度增长空间不大,其实这正是水泥稳定类材料的设计龄期规定为 90 d 的原因。由表 6 可知,石灰粉煤灰稳定碎石 90 d 龄期的抗压强度达到 180 d 龄期 70%,90 d 龄期的劈裂强度达到 180 d 龄期的 60%。因此,石灰粉煤灰稳定碎石 90 d 龄期以后抗压强度和劈裂强度仍有很大的增长空间,这正是石灰粉煤灰稳定类材料的设计

龄期规定为 180 d 而非 90 d 的原因^[4-6]。

以上分析可得如下启示,即到达 90 d 龄期时,水泥对水泥粉煤灰稳定碎石混合料强度增长的贡献可能已经基本结束,90 d 龄期以后的强度增长主要源于水泥的水化产物之一 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 与粉煤灰间的火山灰反应。因此,水泥粉煤灰稳定碎石混合料 90 d 和 180 d 龄期的力学强度指标比值 R_{180}/R_{90} 越大,即 90~180 d 龄期混合料强度指标的拓展空间越大,则 CH 消耗越多,水泥的化学潜能挖掘得越充分。鉴于此,将水泥粉煤灰稳定碎石混合料的力学特性指标与龄期的关系计算列于表 7。

表 7 水泥粉煤灰稳定碎石的力学特性指标与龄期关系

力学参数/MPa	28 d	90 d	180 d	R_{180}/R_{28}	R_{180}/R_{90}
$R(3:12:85)$	3.63	5.7	7.29	2.00	1.28
$\sigma_{sp}(3:12:85)$	0.20	0.34	0.54	2.70	1.59
$E_P(3:12:85)$	558	744	1041	1.94	1.40
$R(5:10:85)$	5.78	8.95	11.21	1.94	1.25
$\sigma_{sp}(5:10:85)$	0.41	0.70	1.09	2.66	1.56
$E_P(5:10:85)$	714	1028	1404	1.97	1.37
$R(7:8:85)$	7.91	9.69	11.47	1.45	1.18
$\sigma_{sp}(7:8:85)$	0.71	1.05	1.32	1.86	1.26
$E_P(7:8:85)$	1029	1098	1463	1.42	1.33
$R(9:6:85)$	9.69	11.88	13.77	1.42	1.16
$\sigma_{sp}(9:6:85)$	1.00	1.27	1.33	1.33	1.05
$E_P(9:6:85)$	1326	1485	1904	1.44	1.28

注: $R(3:12:85)$ 为水泥:粉煤灰:碎石配合比为 3:12:85 时的抗压强度; $\sigma_{sp}(3:12:85)$ 为水泥:粉煤灰:碎石配合比为 3:12:85 时的劈裂强度; $E_P(3:12:85)$ 为水泥:粉煤灰:碎石配合比为 3:12:85 时的抗压回弹模量。

不同混合料的强度指标比值 R_{180}/R_{28} 和 R_{180}/R_{90} 随水泥与粉煤灰的比例变化而变化的规律如图 2 所示。

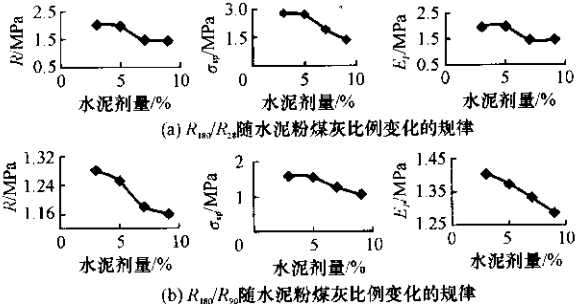


图 2 R_{180}/R_{28} 和 R_{180}/R_{90} 随水泥粉煤灰比例变化的规律

当水泥与粉煤灰的比值大于 5:10 时(即图 2 水泥剂量大于 5% 的部分),力学特性指标 R_{180}/R_{28} 和 R_{180}/R_{90} 明显降低。原因分析:当水泥与粉煤灰

的比值大于 5 : 10 并向图 2 的右侧变化时,水泥的水化产物 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 越来越多,而粉煤灰剂量却越来越小,虽然粉煤灰反应得比较充分,但未反应的 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 量越来越多,两者的比例逐渐远离其完全火山灰反应时的比值,90~180 d 区间力学特性指标相对于 90 d 以前的拓展空间越来越小,故 R_{180}/R_{90} 的值明显降低。在这一范围内,水泥的水化反应和粉煤灰的火山灰反应均比较充分,粉煤灰的化学潜能对强度的贡献得到了充分的挖掘,但 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 却有剩余^[7-8]。

当水泥与粉煤灰的比值接近 5 : 10(即图 2 水泥剂量约等于 5% 的部分),力学特性指标 R_{180}/R_{28} 和 R_{180}/R_{90} 较高;而当比值小于 5 : 10(即图 2 水泥剂量小于 5% 的部分)时,力学特性指标 R_{180}/R_{28} 和 R_{180}/R_{90} 缓慢增加。原因分析:当水泥与粉煤灰的比值约等于 5 : 10 时,水泥的水化产物 $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 与粉煤灰剂量的比例接近完全火山灰反应的比值,它们的化学效能对力学特性指标的贡献均得到了充分的挖掘,此时 90~180 d 区间力学特性指标相对于 90 d 强度值拓展空间较大,故 R_{180}/R_{90} 值较高;当水泥与粉煤灰的比值继续减小时, $\text{CH}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 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,虽然未反应的粉煤灰量越来越多,但 CH 的消耗依然比较充分,90~180 d 区间力学特性指标相对于 90 d 以前的拓展空间依然很大,故 R_{180}/R_{90} 值仍然较高。总之,混合料前期的强度取决于水泥剂量,后期的强度增幅取决于 CH 的消耗程度。综上所述,可知水泥与粉煤灰的最优比例对应于图 2 曲线左侧的拐点处,即 5 : 10,此时水泥和粉煤灰的化学潜能均得到了充分的挖掘。鉴于 R_{180}/R_{28} 随水泥粉煤灰比例变化而波动的幅度比 R_{180}/R_{90} 大,故衡量比例的优劣采用 R_{180}/R_{28} 更为合理^[9]。

4 结 语

(1)水泥粉煤灰稳定碎石混合料不同龄期的强度更多地取决于水泥剂量,而非水泥与粉煤灰的比例。

(2)混合料 180 d 与 28 d 两个龄期的强度比值 R_{180}/R_{28} 能够反映水泥与粉煤灰比例的优劣。

(3) R_{180}/R_{28} 随水泥与粉煤灰比例变化曲线的拐点对应水泥与粉煤灰的最优比例。

参考文献:

References:

[1] 徐江萍. 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. Cement-flyash strength study in early stage[J]. Highway Engineering of South China, 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] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社,2000.

DENG Xue-jun. Subgrade and pavement engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.

[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,1998.

SHA Qing-lin. Asphalt pavement on semi-rigid road-base for high-class highways [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.

[5] 张嘎吱,沙爱民. 水泥粉煤灰稳定碎石基层材料的纪配范围[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(4):1-5.

ZHANG Ga-zhi, SHA Ai-min. Grading envelope of cement and flyash stabilized crushed-stones used as roadbase material[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(4):1-5.

[6] 张嘎吱,沙爱民. 悬浮骨架密实结构配合比设计[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):1-4.

ZHANG Ga-zhi, SHA Ai-min. Mix design of suspended framework dense structure [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):1-4.

[7] 张超. 劣质低活性粉煤灰路用理论基础[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(3):13-16.

ZHANG Chao. Application principle in roadbase for low-activity fly-ash[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(3):13-16.

[8] 陈拴发,郑木莲,王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[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.