

文章编号:1671-8879(2009)03-0032-05

三灰碎石快速养生试验及微结构观测对比

杨育生^{1,2}, 陈渊召¹, 王选仓¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:为了解决目前公路工程设计和施工周期长的问题,以高温养生作为三灰碎石快速养生的方法,通过试验和电镜扫描技术(SEM),对高温养生、标准养生条件下试样的微结构进行观测对比分析,得到 2 种养生条件下材料的强度增长关系,从而可用短龄期的高温养生结果确定标准养生龄期 180 d 的强度。结果表明:通过高温养生可以将养生龄期缩短为 25 d 左右;可以改善三灰碎石的微结构,提高其早期强度;能快速确定三灰碎石的设计参数和施工配合比设计的主要控制指标。

关键词:道路工程;三灰碎石;快速养生;标准养生;电镜扫描;设计参数

中图分类号:416.212

文献标志码:A

Test for rapid curing of lime-fly-ash-cement stabilized macadam and comparison on its micro structure

YANG Yu-sheng^{1,2}, CHEN Yuan-zhao¹, WANG Xuan-cang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of long curing time and long construction time of the project, using method of high-temperature curing to shorten the curing period of macadam stabilized by lime-fly-ash and cement. This paper adopts tests and SEM to analyze the microstructure of samples cured by high-temperature curing and standard curing, and gets the strength growing relationship between the two curing methods. Then, the author determines the strength of standard curing in 180 days from high-temperature curing strength. The result shows that the curing age of lime-fly-ash-cement stabilized macadam can be shorten, which is only about 25 days, microstructure of it can be improved, the early strength can be increased, the design parameters and major control index of ratio design for construction and can be confirmed rapidly. 9 tabs, 4 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; lime-fly-ash-cement stabilized macadam; rapid curing; standard curing; SEM; design parameter

0 引 言

二灰碎石是公路基层、底基层常用的无机结合

料稳定材料。但由于二灰混合料中含碎石较多,若单以石灰、粉煤灰作为结合料,则存在粘结力稍嫌不足的缺陷。因此,加入一定量的水泥组成的三灰结

收稿日期:2008-05-16

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2005 318 812 13)

作者简介:杨育生(1960-),男,陕西西安人,陕西省交通建设集团公司教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:cyz740513@sohu.com。

合料,不但能起到增强粘结力的作用,还能使结合料早期的加固强度提高,使混合料更好地发挥其优越性。此外,三灰碎石含碎石多,有利于提高混合料早期机械强度,改善缩裂性质,解决施工碾压和混合料基层养护以及早日开放交通等问题^[1-2]。此外,利用粉煤灰修路,还可以废物利用,有利于改善环境。

目前,由于公路项目施工周期短,需要找到一种能够缩短养生时间的快速养生方法,以便在较短的时间内测试到设计需要的参数和施工配合比设计的控制指标。为此,本文以高温养生作为快速养生的手段,通过试验研究,找出高温养生与标准养生条件下的三灰碎石的强度增长规律,并根据这种关系,利用短龄期的高温养生测试结果确定标准养生条件下长龄期的强度^[3]。

1 三灰碎石的高温养生试验方案

(1)以三灰碎石在标准养生条件下(温度(20±2)℃、湿度大于或等于 95%)180 d 的抗压回弹模量和劈裂强度值,作为三灰稳定材料的设计参数和施工配合比设计的主要控制指标。

(2)以三灰碎石在高温养生条件(温度(60±2)℃、湿度大于或等于 95%)下短龄期养生的抗压强度值,分析高温养生条件下稳定材料的强度增长规律,确定高温养生条件下强度-龄期的回归方程式及其参数的取值。

(3)在高温养生条件下,通过对三灰碎石达到标准养生 180 d 相同抗压强度对应龄期时的微观结构的观测对比分析,研究分析 2 种养生条件下稳定结合料的强度增长规律,进一步验证高温养生缩短三灰稳定类材料养生龄期的可行性^[4-5]。

2 混合料的物理力学性能试验

2.1 混合料的基本性能试验

2.1.1 原材料的基本性质

(1)水泥。采用陕西耀县秦岭水泥厂生产的“秦岭”牌复合 32.5 硅酸盐水泥,其各项指标见表 1。

表 1 水泥的各项指标

材料	3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa		初凝时间/min	终凝时间/min	安定性	细度/%
	抗折强度	抗压强度	抗折强度	抗压强度				
硅酸盐水泥	5.4	22.3	9.1	40.6	316	400	合格	5.4

(2)石灰。采用陕西富平县生产的Ⅱ级或Ⅱ级以上的优质钙质消石灰,其各项指标见表 2。

表 2 石灰的物理化学性质

材料	CaO 的质量 分数/%	MgO 的质量 分数/%	不同筛孔(mm)细度/%	
			0.71	0.125
钙质消石灰	59.7	3.0	0.32	11.08

(3)粉煤灰。采用陕西户县第二热电厂的干粉煤灰,其各项指标见表 3。

表 3 粉煤灰的物理化学性质

材料	SiO ₂ 质量分 数/%	Al ₂ O ₃ 质量分 数/%	Fe ₂ O ₃ 质量分 数/%	烧失量/ %	不同筛孔(mm) 细度/%	
					0.3	0.075
粉煤灰	48.8	27.5	6.2	6.2	2.7	26.0

(4)碎石。采用陕西泾阳县口镇石料场生产的优质石灰岩碎石,共 3 种规格,分别为 10~30 mm,5~10 mm,0~5 mm。其各项技术指标见表 4;级配见表 5。

表 4 碎石的技术指标

碎石粒径/mm	压碎率/ %	含泥量(质量 分数)/%	表观密度/ (g·cm ⁻³)
10~30	19.8	0.339	2.740
5~10		0.292	2.698
0~5			2.776

表 5 碎石级配

碎石粒径/ mm	下列筛孔(mm)的通过率/%							
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
10~30	100	79.8	1.2	0.5	0	0	0	0
5~10	100	100.0	95.2	44.1	5.7	2.9	0	0
0~5	100	100.0	100.0	99.7	84.4	63.9	39.6	8.7

2.1.2 三灰碎石的配合比试验

三灰碎石的配合比试验结果见表 6。

表 6 三灰碎石的配合比试验结果

混合料 配合比	重型击实		试件成型		
	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含 水量/%	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	压实度/ %
水泥、石灰、粉 煤灰、碎石的 配合比为 2: 6:14:80	2.05	9.7	2.01	9.7	98

2.2 抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量试验

在试验过程中,要保证集料有基本相同的最大干密度、最佳含水量和压实度等,尽量提高试验精度,减少误差,以使试验能够平行进行。为尽量减少试验误差,同类型的同组试件在同一测试龄期的试件数尽量应该保持为 7~10 个。在标准养生条件下,三灰碎石抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量的测试结果见下页表 7^[6]。

表 7 抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量试验结果

龄期/d	抗压强度/MPa	劈裂强度/MPa	抗压回弹模量/MPa
7	2.21	0.32	
28	3.37	0.40	852
90	6.24	0.86	1 268
150	7.56	1.11	1 605
180	8.22	1.24	1 771

2.3 2 种养生条件下试样的强度增长规律

在高温养生条件下,试样无侧限抗压强度随龄期的增长规律见图 1。

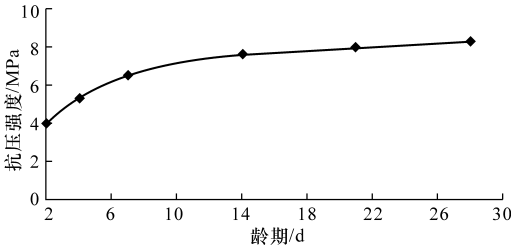


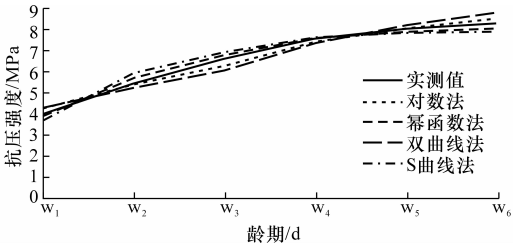
图 1 高温养生无侧限抗压强度增长规律

从图 1 可以看出,高温养生条件下,试样 14 d 龄期之前抗压强度增长幅度较大,14 d 之后强度增长幅度变缓;从表 7 及图 1 可以看出,高温养生 28 d 的强度值 8.25 MPa 已经超过标准养生 180 d 的强度值 8.22 MPa。

利用 SPSS 软件对实测值进行了对数曲线、幂函数曲线、双曲线和 S 型曲线等 4 种不同模型的拟合,为保证增长趋势线与实际情况吻合,变异性大的试验数据被剔除。具体拟合数据见表 8;4 种曲线与实测曲线的拟合效果见图 2。

表 8 高温养生抗压强度及模型拟合数据

混合料配合比		水泥、石灰、粉煤灰、碎石的配合比为 2 : 6 : 14 : 80						相关 系数 R^2
龄期/d		2	4	7	14	21	28	
实测值/MPa		3.95	5.40	6.58	7.54	8.01	8.25	
回 归 值	对数法	4.21	5.34	6.25	7.38	8.04	8.51	0.981
	幂函数法	3.83	5.70	6.75	7.56	7.85	8.00	0.946
	双曲线法	4.29	5.18	6.03	7.28	8.13	8.79	0.953
	S 曲线法	3.63	5.92	6.91	7.57	7.79	7.90	0.986



注: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 、 w_6 分别表示 2、4、7、14、21、28。

图 2 4 种模型的拟合效果

根据三灰碎石养生试验结果、试验数据的对数

法、幂函数法、双曲线法和 S 曲线法回归计算,以及高温养生试样强度增长趋势线,由回归公式可以确定三灰碎石标准养生规定龄期 150 d、180 d 的强度值、高温养生强度与龄期的关系曲线方程式,以及达到标准养生规定龄期相同强度值时高温养生所对应的时间见表 9。

表 9 高温养生无侧限抗压强度与龄期的关系

回归法	高温养生无侧限抗压强度 R_c 与龄期 t 的关系曲线方程式	相关系数 R^2	150 d		180 d	
			标准养生抗压强度/MPa	达到标准养生的时间/d	标准养生抗压强度/MPa	达到标准养生的时间/d
对数法	$R_c = 1.631 \ln(t) + 3.077$	0.981	7.85	19	8.22	24
幂函数法	$R_c = 3.556t^{0.272}$	0.946		18		22
双曲线法	$R_c = 8.226 - 9.187/t$	0.953		24		
S 曲线法	$R_c = e^{(2.136 - 1.585/t)}$	0.986		21		

根据高温养生条件下三灰碎石的抗压强度增长趋势线,及其与标准养生的龄期对应关系,可以得出如下结论。

(1)高温养生时间愈长,三灰碎石的抗压强度愈高。三灰碎石在养生到一定程度之前,其抗压强度大致是沿着直线迅速增长,此后,随着龄期的增加强度增长缓慢,甚至不再增长,有少量的强度还出现了波动现象。分析其原因,这与稳定材料在硬化期产生的内压应力有关。在稳定材料水化进行过程中,随着水化新生物的发展,将形成较高的强度;但水化物仍在继续水化,继续生成水化物,增大体积,产生内压,撑破包覆膜,一定情况下就有可能在已经定型的稳定材料中引起微裂缺陷,或外部硬壳强度形成较快,气泡不易排除而形成气泡,导致强度受损或强度回缩;而随着水化继续进行和水化新生物继续发展,其强度将有一定发展,但是已经出现的微裂缺陷或气泡也随着发展而增多,一定程度上又将对内部结构产生破坏,从而引起试验值在临界时刻后出现波动现象^[7]。

(2)由高温养生达到标准养生规定龄期的强度值所需龄期的对应关系可以看出,对数法、幂函数法和 S 曲线法回归的强度值所需龄期接近,但也存在一些细小的差别。总体而言,3 种方法回归的对应龄期基本一致。

(3)从试验回归结果可以看出,对数法、幂函数法和 S 曲线法回归高温养生条件下的劈裂强度和抗压回弹模量,随龄期的增长规律其回归系数较高,回

归变异较小,回归效果比较显著。对数法相比幂函数法和 S 曲线法,其回归效果更好,更符合劈裂强度和抗压回弹模量随龄期的增长规律,因此本文推荐采用对数法^[8]。

3 试样的微结构观测对比

在进行微结构观测分析时,对高温养生的稳定

材料,应选取那些达到与标准养生条件规定龄期下相同强度值对应龄期的试样,并选取对应的最大高温养生龄期;对于标准养生三灰碎石,应选取规定标准养生龄期 180 d 的试样。不同养生条件、养生龄期的三灰碎石微观结构见图 3、图 4。

从图 3 和图 4 可以清晰看出,高温养生 21 d 的试样微结构比较致密,基本上没有孔隙、微裂缝和气

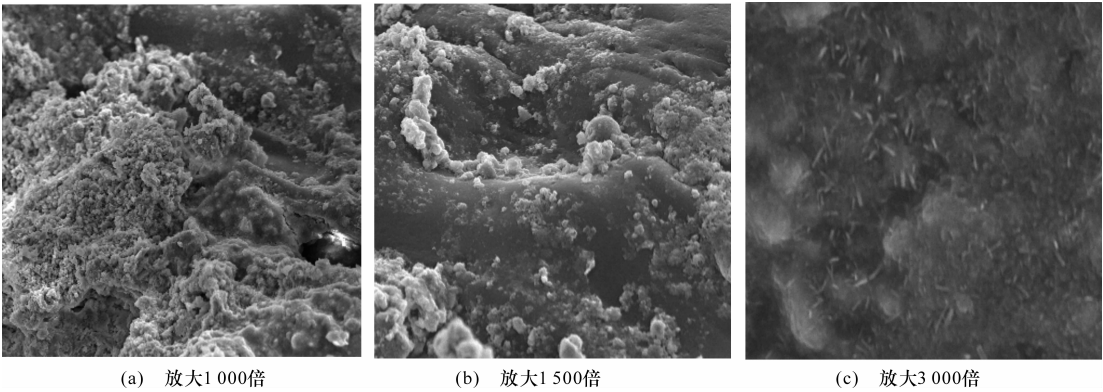


图 3 三灰碎石高温养生 21 d 的微结构形貌

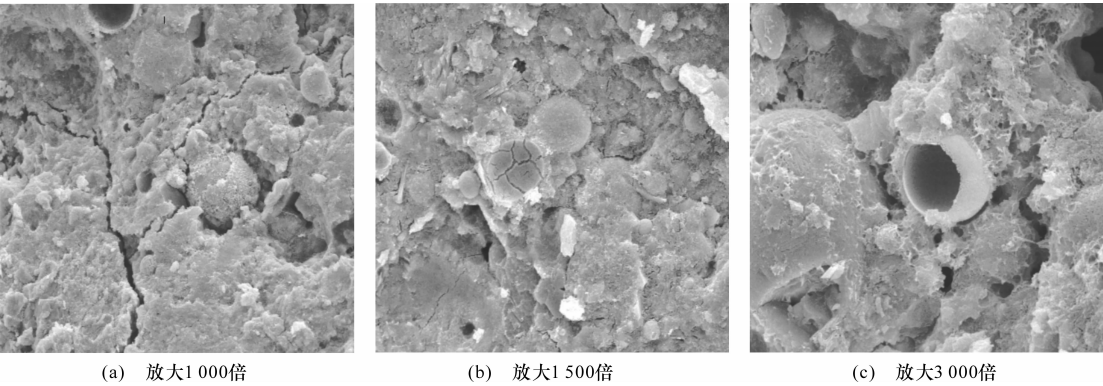


图 4 三灰碎石标准养生 180 d 的微结构形貌

泡等缺陷存在,石灰、粉煤灰水化反应和火山灰反应产生的水化凝胶已经将试样完全包覆,使试样表面看起来比较光滑。六角薄板状的氢氧化钙晶体成层的朝一个方向以面-面接触的方式紧密地叠聚在一起,晶体与晶体之间的缝隙被水化凝胶物质完全填满胶结。材料内部的孔隙、裂缝也被水化凝胶填满并胶结在一起。混合料被胶凝物质连结凝固为一个实在的整体。标准养生 180 d 的试样微结构出现了大量的孔洞、裂缝和气泡。这些孔洞、裂缝和气泡分布比较广,裂缝比较宽,并且贯穿了整个试样。水化凝胶物质还没有将晶体与骨料完全胶结,它们之间还存在数量不少的缝隙。从以上的观测分析中可以看到,在达到相同强度值时,高温养生 21 d 的试样微结构比标准养生 180 d 的试样微结构更加致密,结构性更好。综合以上分析,高温养生的试样微结构发育更快、更好,结合料稳定材料内部没有明显的

孔洞、微裂缝和气泡。高温养生使稳定材料孔隙变小,结构更加均匀、致密、完整,从而改善了稳定材料内部的连结性能,提高了稳定材料的早期强度。在宏观表现上,稳定材料高温养生对应龄期时的强度值与标准养生规定龄期时的强度值相当。从高温养生和标准养生试样的微结构观测对比和宏观强度值的分析可以得出:①利用高温养生可以改善三灰碎石的微结构,提高其早期的强度,缩短三灰碎石的养生龄期,从而能够满足工程设计的需要;②通过高温养生,可以缩短三灰碎石的养生龄期,因而该方法切实可行^[9-15]。

4 结 语

(1)以高温养生作为三灰碎石快速养生的手段,通过试验研究,找出高温养生与标准养生条件下的三灰碎石的强度增长规律;根据这种关系,利用短龄

期的高温养生测试结果,可以确定标准养生条件下长龄期的三灰碎石强度。

(2)利用数理统计学的回归分析方法,对高温养生条件下三灰碎石强度增长规律进行分析,确定了三灰碎石抗压强度与龄期关系回归方程式和关键参数的取值,以及三灰碎石高温养生达到与标准养生规定龄期相同强度值时所对应的龄期。

(3)利用电镜扫描技术,观测分析在高温养生条件下三灰碎石的微结构随龄期增长的变化规律,研究并解释了高温养生条件下稳定材料的强度增长规律;通过对三灰碎石在高温养生与标准养生条件下养生 180 d 相应龄期的微结构的观测对比,研究分析了 2 种养生条件下的稳定材料的强度增长规律;研究结果表明,利用高温养生可以改善三灰碎石的微结构,显著提高其早期的强度,缩短稳定材料的养生龄期,从而能够满足工程设计的需要。

参考文献:

References:

- [1] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5.
- [2] 姜中力, 蒋劲松, 郑晓霞. 浅析三灰碎石在市政道路工程中的质量控制[J]. 森林工程, 2003, 19(5): 65-66.
JIANG Zhong-li, JIANG Jin-song, ZHENG Xiao-xia. Quality control of base-layer construction with three-kind ash gravels in municipal road projects[J]. Forest Engineering, 2003, 19(5): 65-66.
- [3] 朱世凯. 缩短半刚性路面基层养生期研究与探讨[J]. 华东公路, 2002(5): 21-24.
ZHU Shi-kai. Research and discussion of curing period for semi-rigid base[J]. East China Highway, 2002(5): 21-24.
- [4] 何思国, 楚红, 罗小刚. 缩短半刚性基层养生期施工方法的应用研究[J]. 公路, 2002(10): 21-25.
HE Si-guo, CHU Hong, LUO Xiao-gang. Application research on construction method for shorting curing period of semi-rigid base[J]. Highway, 2002(10): 21-25.
- [5] 陈亚莉, 刘连战. 石灰稳定土强度的快速测定法应用[J]. 公路, 1999(12): 28-29.
CHEN Ya-li, LIU Lian-zhan. Rapid determination method application for strength of lime stabilized soil [J]. Highway, 1999(12): 28-29.
- [6] JTJ 057—94, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [7] 王龙, 孟书涛, 徐全亮. 级配碎石基层的设计参数研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 22-27.
WANG Long, MENG Shu-tao, XU Quan-liang. Study on the design parameter of graded macadam base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 22-27.
- [8] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [9] Jiang Z G, Zhao Y. Mechanism and optimal application of chemical additives for accelerating early strength of lime-flyash stabilized soils[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2005, 20(3): 110-112.
- [10] 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.
- [11] 吴传海, 袁玉卿, 郑南翔, 等. 二灰碎石基层材料的合理结合料质量分数[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 6-11.
WU Chuan-hai, YUAN Yu-qing, ZHENG Nan-xiang, et al. Optimal volume content of binder in lime-fly-ash-stabilized aggregate [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 6-11.
- [12] 周晓龙. 嵌挤骨架式二灰碎石基层的研究与工程实践[C]//周晓龙. 中国公路学会第 3 届国际道路和机场路面技术大会论文集. 北京: 华杰出版社, 1998: 135-138.
- [13] 冯瑞玲, 王园, 谢永利. 粗粒土振动压实特性试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 19-23.
FENG Rui-ling, WANG Yuan, XIE Yong-li. Test on vibrated compaction properties of coarse-grained soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 19-23.
- [14] 蒋建平, 罗国煜, 高广运. 粘性土变形和强度参数分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 76-79.
JIANG Jian-ping, LUO Guo-yu, GAO Guang-yun. Analysis of deformation and strength parameters for cohesive clay[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 76-79.
- [15] 李炜光. 二灰砂砾组成设计、路用性能评价及工程特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.