

文章编号:1671-8879(2009)01-0026-05

## 农村公路用硬化二灰土路面材料性能

袁春毅<sup>1,2</sup>, 赵乐易<sup>3</sup>, 韩 森<sup>1</sup>

(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. 交通运输部规划研究院, 北京 100029; 3. 国家开发银行 营业部, 北京 100037)

**摘 要:**为了开发适用于广大农村地区的经济型低交通量公路路面材料,采用固化剂硬化二灰土,对硬化粉煤灰混合料进行了无侧限抗压强度、水稳定性和冻稳定性等材料性能试验。结果表明,加入固化剂后,硬化二灰土路面材料的抗压性能、回弹模量、水稳定性和冻稳定性均有大幅提高,可基本满足农村低交通量公路路面的使用要求。

**关键词:**道路工程;农村公路;路面材料;二灰土;固化剂;材料性能

**中图分类号:**U416.212 **文献标志码:**A

### Material properties of hardened lime-flyash-soil for rural highway

YUAN Chun-yi<sup>1,2</sup>, ZHAO Le-yi<sup>3</sup>, HAN Sen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Planning and Research Institute of Ministry of Transport, Beijing 100029, China; 3. Department of Operation, China Development Bank, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to develop the pavement materials of the economic low-traffic-volume road in the rural areas, the lime-flyash-soil was hardened by adding solidified agent to form the hardened lime-flyash-soil for constructing the rural pavement. The material properties of the hardened lime-flyash-soil were tested for studying its unconfined compressive strength, water stability and freezing stability. The results show that after adding solidified agent, the performances anti-stress resilient modulus, water stability and freezing stability of hardened lime-flyash-soil are increased evidently, it can meet the needs for constructing rural highway with low traffic volume. 3 tabs, 6 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; rural highway; pavement material; lime-flyash-soil; solidified-agent; material property

## 0 引 言

近年来,中国对于高等级公路路面结构及材料的研究较多,但对适用于广大农村地区的经济型低交通量公路路面材料的研究则非常少。目前,农村低等级公路的路面材料多为泥结碎石、水结碎石和

级配碎石等,在许多地方甚至是无粒料路面。采用这些路面材料,路面病害较多,舒适性差,对于一些缺乏碎石及砂砾材料的地区,反而增加了造价<sup>[1]</sup>。国外农村道路的材料多采用沥青和水泥混凝土路面,虽然路用性能良好,但其造价偏高,且施工过程复杂,不适合中国现有国情。从实际出发,对一些经

收稿日期:2008 02-02

基金项目:陕西省交通科技项目(01 33R)

作者简介:袁春毅(1980-),男,北京市人,交通运输部规划研究院工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:ycyshy@sohu.com。

济不发达地区的农村公路,考虑其现有交通条件,可就地取材,采用硬化二灰土路面作为这些地区的路面结构。为此,本文对该类路面进行了深入研究,同时考察了实际使用效果。

1 硬化二灰土路面强度形成机理

采用固化剂硬化二灰混合料是一种综合加固土的方法,既有物理作用又有化学反应。物理作用主要表现为拌和与压实;化学反应主要表现为石灰在水中的解离反应,石灰、粉煤灰和土之间的火山灰反应以及固化剂与混合料之间的反应<sup>[2-4]</sup>。

固化剂主要为水溶性良好的高分子聚合物乳液,它是混合料中主要的成膜物质。固化剂的作用是将其他组分粘结成一体,并能附着在被涂基层表面,形成坚韧的保护膜,具有较高的化学稳定性<sup>[5-6]</sup>。固化剂和混合料的作用表现为:①土体基本单元在外力作用下彼此靠近,在界面上相互连接;②固化剂水化或与土壤发生反应,形成具有胶凝性的水化产物将土粒胶结,使土体在聚合物聚合物的作用下形成良好的整体。由于固化剂和混合料的共同作用,使土体的强度、水稳定性、冻稳定性和抗弯拉强度等均得到了不同程度的提高<sup>[7-8]</sup>,从而成为一种可以用于农村低交通量道路的新型路面材料。

2 路用性能试验设计

2.1 原材料

2.1.1 土

本研究用土来源于陕西省铜川市印台区广阳镇地区。该地区地处黄土高原南部沟壑区,土壤属于粉性亚粘土。通过试验,土的物理性质见表 1。

表 1 土的物理性质

颜色	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限 W <sub>L</sub> /%	塑限 W <sub>P</sub> /%	塑性指数 I <sub>P</sub> /%	土质分类
黄色	1.829	32.200	19.800	12.400	粉性亚粘土

2.1.2 石灰

本研究所用熟石灰的活性物质(CaO+MgO)含量(质量分数)为 63.4%。根据《公路路面基层施工技术规范》中石灰的技术标准,该石灰品质达到Ⅱ级,符合路用要求。

2.1.3 粉煤灰

本研究选用粉煤灰的化学组分见表 2。

表 2 粉煤灰化学组分

组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	烧失量
质量分数/%	49.8	26.9	5.4	2.4	1.1	10.5

2.1.4 固化剂

通过对 11 种固化产品的比较,最终确定 3 种效果最好的固化剂应用于本研究,分别记为 1<sup>#</sup>固化剂、2<sup>#</sup>固化剂、3<sup>#</sup>固化剂,见表 3。

表 3 不同固化剂混合料配合比结果

混合料类型	加固剂、石灰、粉煤灰与土的质量配比
二灰土	0.0:8:22:70
1 <sup>#</sup> 固化剂加二灰土(简称 1 <sup>#</sup> 固化剂)	0.2:8:22:70
2 <sup>#</sup> 固化剂加二灰土(简称 2 <sup>#</sup> 固化剂)	0.2:8:22:70
3 <sup>#</sup> 固化剂加二灰土(简称 3 <sup>#</sup> 固化剂)	0.2:8:22:70

2.2 试验设计

通过前期比较试验,确定出适宜的基准二灰混合料配合比;再通过路用性能试验,对已掺固化剂的硬化二灰土路面试件进行检验;对比基准试件,比较其性能变化,最终确定出最优组合。路用性能试验包括:抗压强度、抗压回弹模量、水稳定性及冻稳定性试验。

3 材料性能试验分析

3.1 抗压试验

抗压强度反映了路面在外力作用下抵抗破坏的能力,它是硬化二灰土路面最重要的力学指标之一。通过对 3 种不同固化剂硬化二灰混合料与普通二灰土材料的抗压强度对比,考察了固化剂的改性效果。在固化剂的掺配上,试用了高、低 2 种掺配浓度,同时考察固化剂浓度对二灰混合料的无侧限饱水抗压强度的影响,见图 1、图 2(见下页)。

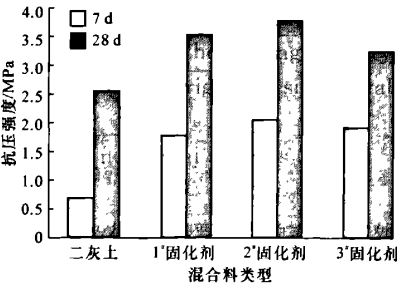


图 1 低浓度固化剂硬化混合料的抗压强度对比

由图 1、图 2 可以看出,加入固化剂的二灰混合料,无侧限饱水抗压强度均得到不同程度的提高。其中,7 d 无侧限饱水抗压强度平均提高了 184%;28 d 无侧限饱水抗压强度平均提高了 40%。由图 1 可知,3 种低浓度固化剂加入后,均使二灰土的抗压强度得到明显的提高。其中,低浓度 2<sup>#</sup>固化剂对混合料 7 d 抗压强度的提高幅度最大,增幅达到

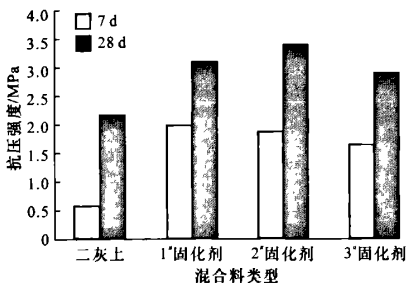


图2 高浓度固化剂硬化混合料的抗压强度对比

212%;对28 d抗压强度也有提高,增幅达到49%。这表明,2# 固化剂在提高抗压强度方面有最为显著的效果。

对比图1、图2可知,固化剂浓度提高时,二灰混合料的无侧限饱水抗压强度亦有所提高。其中,1# 固化剂使二灰混合料7 d抗压强度增幅最大,并且随着浓度的增加,抗压强度提高较明显;2# 固化剂使二灰混合料28 d抗压强度增幅最大,但随浓度的增加而引起的抗压强度增加幅度不大。总体看来,固化剂浓度的增加并没有使混合料强度有明显提高。由此说明,3种固化剂在低浓度时,已使二灰土强度达到了较理想的提高,若继续增加浓度并不能大幅度提高强度,还会使产品的成本成倍增加。

从图1、图2也可看出,固化剂硬化二灰土与普通二灰土相比,7 d抗压强度的提高幅度大于28 d抗压强度的提高幅度。这主要是因为石灰与粉煤灰中的活性物质( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )发生火山灰反应的速度较慢,二灰土自身7 d抗压强度较低,此时固化剂对总体抗压强度的贡献比例相对较大,使得混合料的早期强度大大提高。这就很好地改善了二灰稳定材料强度形成比较慢的缺陷,也为二灰土后期强度的形成打下了良好的基础。

### 3.2 抗压回弹模量

回弹模量表征了材料在外力作用下抵抗变形的能力。回弹模量值大的材料,在相同外力作用下会产生较小的变形。具有较好的力学性能的混合料室内回弹模量的对比见图3。

由图3可以看出,加入固化剂后二灰混合料的回弹模量均有所提高。其中,3# 固化剂的增幅最大,达到46%。这是由于固化剂在混合料中起胶结剂作用,使二灰材料更好的粘结,并且形成整体结构。因此,经过硬化的二灰混合料比普通二灰土具有更好的抗变形能力。

### 3.3 水稳定性

水稳定性是材料稳定性的一个重要方面。由于

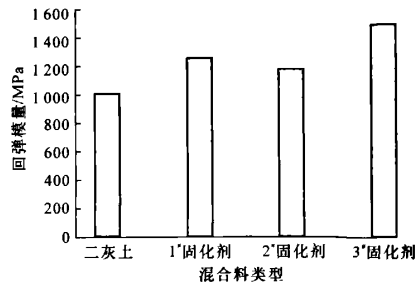


图3 混合料室内回弹模量的对比

硬化二灰混合料被使用在道路的表面,所以,此种材料的水稳定性就显得更为重要。

试件的水稳定系数  $K_w$  的计算公式为

$$K_w = \frac{R_0}{R_w}$$

式中: $R_0$  为试件的无侧限饱水抗压强度(MPa); $R_w$  为试件的无侧限非饱水抗压强度(MPa)。

从图4、图5可看出:

(1)加入固化剂后,二灰稳定材料水稳定系数均有不同程度的提高。其中,7 d水稳定系数平均增加了65%;28 d水稳定系数平均增加了56%。这说明,固化剂的加入使二灰土颗粒之间的连结更为紧密,并且有效阻止了水对土颗粒基团的浸润,从而增强了硬化二灰土的强度和稳定性。

(2)3种固化剂在低浓度时,对混合料7 d及28 d水稳定系数提高的幅度差别较小;而在高浓度时,1# 固化剂对混合料7 d及28 d水稳定系数的提高

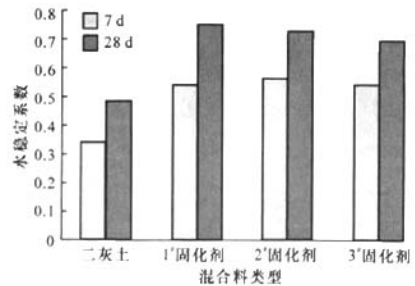


图4 低浓度固化剂硬化混合料的水稳定系数比较

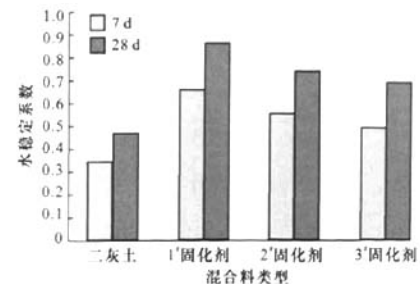


图5 高浓度固化剂硬化混合料的水稳定系数比较

均表现出较大的增幅,分别达到 97%和 83%。这说明,高浓度的 1<sup>#</sup> 固化剂在提高二灰混合料水稳定性上具有较好的效果。对比发现,混合料的水稳定系数会随固化剂浓度的增加有所增加,但增加的幅度并不太大。这说明,在固化剂浓度达到一定程度时,二灰混合料的水稳定系数也趋于稳定。

(3)对比 7 d 与 28 d 龄期的混合料水稳定系数可以看出,随着龄期的延长,混合料水稳定系数也有较大增长。

3.4 冻稳定性

冻稳定性试验是为了测定硬化二灰混合料在水和负温共同反复作用下的强度变化,这对于硬化二灰路面在较寒冷地区应用有着重要的意义。

将试件经过一定次数的冻融循环后,测其无侧限饱水抗压强度,并与未经冻融循环试件的无侧限饱水抗压强度进行比较,其比值称为冻稳定系数,即

$$D_n = \frac{R'_n}{R_0}$$

式中: $D_n$  为冻融  $n$  次后的冻稳定系数; $R'_n$  为对比试件的无侧限饱水抗压强度(MPa); $R_n$  为冻融  $n$  次后的无侧限饱水抗压强度(MPa)。

一般来讲,材料的抗冻性能与材料中的空隙率、颗粒间的连结强度和液相中离子浓度等诸多因素有关。其中,颗粒间的连结强度对抗冻性能起主要的作用。如果颗粒间的连结强度很高,同时又比较密实,就能有效降低水的浸入,足以抵抗因冻胀作用引起的内应力,材料就不容易破坏,抗冻性能就越好,冻稳定系数也就越高。

从图 6 可以看出,加入固化剂的二灰混合料冻稳定系数均有一定程度的提高。其中,2<sup>#</sup> 固化剂使混合料的冻稳定系数提高最大,28 d 与 90 d 冻稳定系数增幅分别达到 26%和 24%。由此可以看出,2<sup>#</sup> 固化剂在改善二灰土抗冻性方面比其他两种固化剂效果更好。

另外,抗压强度在一定程度上反映了材料颗粒

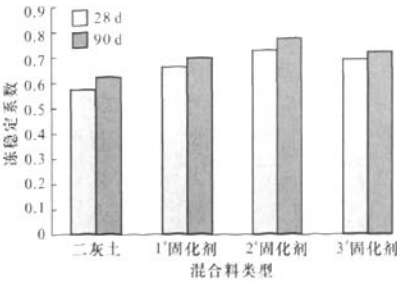


图 6 冻稳定系数的比较

间的连结强度。一般情况下,抗压强度越高,抗冻性能就会越好。由于固化剂的加入,提高了二灰土的抗压强度,因此抗冻性能也得到一定程度的提高。

4 试验路应用

2005 年 9 月,在陕西省铜川市坡头镇冯兰村分别铺筑了 4 段硬化二灰土路面的试验路段,分别为 3 种不同固化剂种类的硬化二灰土路面及不掺固化剂的普通二灰土路面,在实际路用条件下,考察固化剂改性路面的使用效果。

4.1 试验路施工

考虑到硬化二灰土路面主要面向农村低交通量路面,因此,在原材料的选择及施工机具的选取上都从农村公路建设的现状出发,使该种路面具有在农村推广的可行性。

原材料包括石灰、粉煤灰、土、石屑及固化剂,采用路拌法施工。对于石灰,应在使用前 7 d 浇水,使生石灰充分消解,并筛除所含灰团和生石灰块;为防止粉煤灰飞扬造成污染,应使粉煤灰料堆表面保持潮湿,粉煤灰含水量(质量分数)保持在 15%~20%;试验路的工程用土应在拌和前去除其中大石块及树枝、草根等杂物;为保证路面具有一定的耐磨耗性,在混合料铺筑压实后,在路面加入了少量的粒径为 10~20 mm 的碎石。施工机具利用当地现有设备,采用农用车、旋耕机及振动式压路机等。

4.2 试验路观测

试验路铺筑完成后,进行了 3 次观测(30 d、90 d、180 d),分别对试验路的整体效果和具体情况进行了调查与观测,并与普通二灰土路面进行了对比,结果发现:

(1)与普通二灰土路面相比,硬化粉煤灰路面具有更好的整体强度,故其平整度较好,行驶的舒适性也较好。

(2)由于固化剂的加入,使得二灰混合料的水稳定性得到了很大程度的提高,基本没有出现车辙;而普通二灰土路面在第 1 次观测时就已出现较严重的车辙问题,第 3 次观测时由于不能够正常使用已进行了翻修;另外,硬化粉煤灰路面在雨天行车时也不会出现泥泞状况,晴天行车时其扬尘量也大大小于普通二灰土路面。

(3)由于硬化粉煤灰路面的使用性能良好,使当地村民的出行条件得到很大程度的改善,因此,受到了广大村民的一致好评。

## 5 经济性比较

对普通石灰土路面、二灰土路面与硬化粉煤灰路面的经济性进行比较,以分析硬化粉煤灰路面在农村地区的实用性。

以本次试验路铺筑的路面形式为例,路面宽度为 4.5 m,铺筑厚度为 15 cm,硬化粉煤灰路面所增加的原材料费用只有固化剂的费用。根据实验室设计验算的配合比,用 3.5 kg 固化剂可以处理 1 m<sup>3</sup> 二灰土,那么,每平方米原材料增加的费用就为 4~7 元(3 种固化剂价格不同),每公里硬化粉煤灰路面所需花费的固化剂费用为 1.6 万元~2.7 万元。另外,需要增加的人工和机械费用则非常少,与普通二灰土路面铺筑所需费用差别不大。

单纯从花费上讲,硬化二灰土路面使农村公路的整体费用有所增加;但硬化二灰土路面具有很好的水稳定性和强度,即使在雨天或一定的重荷载作用下也不会产生车辙,这就使道路的整体使用水平得到了很大提高,又加之固化剂的固结作用,使得道路在晴天使用时扬尘现象大大降低。将其与同时铺筑的普通二灰土路面相比,在同样的使用条件下,普通二灰土路面出现了严重的变形和车辙,车辙最深可达 10~15 cm,并且在雨天行驶时相当困难,必须经过维修和养护才能正常使用;但硬化二灰土路面则不需要这部分开支。因此,从长期的使用情况来看,硬化二灰土路面实际上降低了农村道路的总体使用费用。

另外,由于硬化粉煤灰路面的铺筑过程非常简单,使用机械很容易得到,需要增加的人工也不多,因此,非常适合陕西铜川地区及类似地区的广大农村推广使用。

## 6 结 语

(1)由于固化剂产生的硬化作用及粉煤灰与石灰自身的水化反应,从而提高了二灰土路面的强度。

(2)通过室内材料试验证明,加入固化剂后,硬化二灰土路面材料的各项性能比普通二灰土都有显著的提高,可基本满足农村低交通量公路路面的使用要求,此种材料也可用于具有类似原材料地区的一般公路施工。

(3)通过试验路的铺筑可看出,硬化二灰土路面的施工工艺简单可靠,并且经济合理,适合在具有类似原材料及施工条件的广大农村地区推广使用。

(4)通过对试验路后期的跟踪观测可以看出,硬

化二灰土路面比普通二灰土路面具有良好的平整度、水稳定性及冻稳定性,并且具有很好的抗车辙能力,其路用性能明显优于普通二灰土路面;在不使用水泥、沥青结合料的情况下,实现了农村公路“晴天无尘土,雨天无泥浆”的愿望。

### 参考文献:

### References:

- [1] 中国公路建设行业协会. 农村公路建设与管理必读[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 张登良. 加固土原理[M]. 北京:人民交通出版社,1990.
- [3] 松尾新一郎. 土质加固方法手册[M]. 孙明漳,梁清彦,译. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [4] 吴少鹏,沈卫国,周明凯,等. 磷石膏粉煤灰石灰固结材料的研究[J]. 中国公路学报,2001,14(增刊):13-15.  
WU Shao-peng, SHEN Wei-guo, ZHOU Ming-kai, et al. Study of phosphogypsum-fly ash-lime solidified material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(S):13-15.
- [5] 张洪亮,胡长顺,刘保健,等. 压实石灰黄土力学特性试验[J]. 交通运输工程学报,2003,3(4):13-16.  
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun, LIU Bao-jian, et al. Mechanical properties experiment of compacted loess-lime[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003,3(4):13-16.
- [6] 刘瑾,陈晓明,张峰君,等. 高分子土固化剂的合成及固化机理研究[J]. 材料科学与工程,2002,20(2):230-234.  
LIU Jin, CHEN Xiao-ming, ZHANG Feng-jun, et al. Studies on synthesis and harding mechanism of polymeric soil consolidator[J]. Materials Science and Engineering, 2002,20(2):230-234.
- [7] 董邑宁,徐日庆,龚晓南. 固化剂 ZDYT-1 加固土试验研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):25-29.  
DONG Yi-ning, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan. The experimental study of the clay stabilized with solidified agent ZDYT-1[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2001,4(3):25-29.
- [8] 周明凯,李北星,沈卫国. SGL 结合料稳定土性能应用及其硬化机理研究[J]. 中国公路学报,1999,12(增刊):30-34.  
ZHOU Ming-kai, LI Bei-xing, SHEN Wei-guo. Properties, application and harding mechanism of stabilized soil with SGL binder[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999,12(S):30-34.