

# 水泥冷再生灰土试验研究

张倩<sup>1</sup>, 韦华威<sup>1</sup>, 王永兵<sup>2</sup>, 应国强<sup>2</sup>, 胡建林<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 衢州市交通设计有限公司, 浙江 衢州 324002)

**摘要:**通过一系列室内试验包括液塑限实验、击实试验、强度试验、收缩实验以及稳定性实验,研究了水泥再生灰土材料石灰稳定细粒土的材料组成设计及其路用性能,研究了旧路面底基层材料石灰、水泥或二灰稳定类细粒土是否可以通过冷再生技术获得重新利用。由试验数据可看出,用水泥稳定旧路面灰土材料与典型半刚性材料相比具有类似的物理特性,同时也发现冷再生旧路面材料有很好的路用性能,可以用于道路底基层。这一研究对于合理综合利用废旧路面材料,使经济效益和社会效益共同最大化,对我国环境保护也有深远意义。

**关键词:**冷再生;材料;底基层;灰土

**中图分类号:**U414.75

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2012)05-0632-05

随着我国公路建设事业的迅速发展,道路通车里程逐年增加,一批早期修建的地方道路和高速公路已经相继进入了养护和改造阶段,以往对旧路全部挖除外运的维修方法会产生大量的废旧材料,这样不仅浪费资源且污染环境,在工业比较发达的国家,路面材料的再生技术发展非常迅速,应用也日趋成熟,并取得了显著的经济效益和社会效益,我国在沥青路面材料再生利用研究和应用技术方面已取得一定成绩,但是在水泥混凝土路面材料和旧灰土路面基层材料的再生利用和应用研究方面所做的工作不多。所以迫切需要新技术、新工艺的提出,以达到废旧沥青路面材料一体化再生,使经济效益最大化。为了实现这个目标,本文展开对水泥冷再生灰土进行了一系列试验研究,通过添加水泥稳定剂对旧路面底基层材料石灰、水泥或二灰稳定细粒土进行再生研究。

## 1 旧路面材料的性质

### 1.1 旧灰土材料的性质

选用废旧路面中底基层材料回收得到的石灰稳定土,通过晾晒、粉碎然后过筛,得到表1和表2<sup>[1-3]</sup>中基本物理参数。对旧底基层石灰土材料的活性进行试验分析,发现有效氧化钙和氧化镁含量仅为4.1%;检测石灰剂量用EDTA滴定法,结果显示有效剂量接近于零,既废旧底基层材料中石灰已反应完全。

### 1.2 水泥性质

R42.5级普通硅酸盐水泥性质检测结果见表3。

表1 旧石灰稳定土的塑性指标

Tab. 1 Old lime stabilized soil plasticity index

试验项目	土粒比重 $G_s$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数
测试结果	2.61	31.4	16.9	14.5

表2 旧石灰稳定土的击实试验结果

Tab. 2 Old lime stabilized soil compaction test results

试验项目	最大干密度/ $g \cdot cm^{-1}$	最佳含水率/ $\%$
测试结果	1.62	23.1

表3 水泥技术指标检验结果

Tab. 3 Test results of cement technology index

水泥种类	技术指标	实验结果	规范要求
42.5级普通硅酸盐水泥	初凝时间/min	133	$\geq 90$
	终凝时间/min	248	$\leq 600$
	安定性(沸煮法)	合格	必须合格
	抗压强度/MPa	3 d	$\geq 16.0$
		28 d	$\geq 42.5$
	抗折强度/MPa	3 d	$\geq 3.5$
		28 d	$\geq 6.5$

收稿日期:2012-04-13 修改稿日期:2012-10-09

基金项目:浙江省交通厅科技计划项目(2011H26);陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0795)

作者简介:张倩(1971-),女,陕西泾阳人,副教授,博士,主要从事道路工程领域的教学和科研工作。

2 冷再生灰土力学性能与路用性能研究

2.1 强度分析

本论文中试验选用 3%、4% 和 5% 三种水泥用量<sup>[5]</sup>, 然后通过击实试验确定不同水泥用量下的最大干密度和最佳含水率之后成型试件并养生. 试验测定了 7 d、28 d 和 90 d 龄期下的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量等力学指标. 试验结果如图 1~图 4.

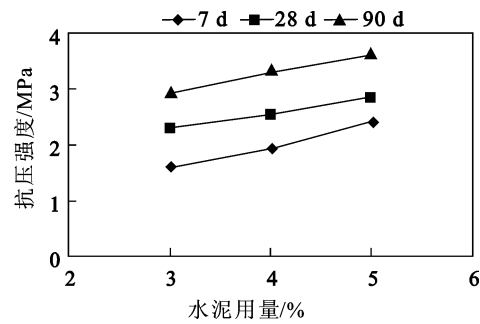


图 1 抗压强度与水泥用量的关系  
Fig. 1 The relationship between compressive strength and the cement dosage

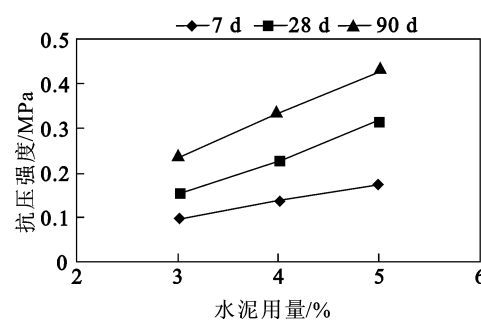


图 2 劈裂强度与水泥用量的关系  
Fig. 2 The relationship between cleavage strength and the cement dosage

由图 1 和图 2 可以看出,当水泥用量增大时,无侧限抗压强度和劈裂强度都随之提高,在 7 d、28 d、90 d 这三种龄期下有相似的规律,并且图形形状接近于直线,所以,对抗压和劈裂强度与水泥剂量间关系进行线性回归,得到结果见表 4. 在表 4 中可看出,水泥用量和强度线性相关系数均在 0.95 以上,表明无侧限抗压强度和劈裂强度与水泥剂量间有很好的线性相关性,说明从统计学规律上讲无侧限抗压强度和劈裂强度与水泥剂量之间满足一定的线性规律.

表 4 强度与水泥用量  $x$  (%) 的回归关系

Tab. 4 The regression relationship of strength and cement dosage  $x$  (%)

强度试验	无侧限抗压强度回归系数	劈裂强度回归系数
7 d	$0.395x+0.413, R^2=0.981$	$0.039x-0.014, R^2=0.998$
28 d	$0.275x+1.470, R^2=0.999$	$0.079x-0.084, R^2=0.994$
90 d	$0.325x+2.010, R^2=0.994$	$0.096x-0.0475, R^2=0.999$

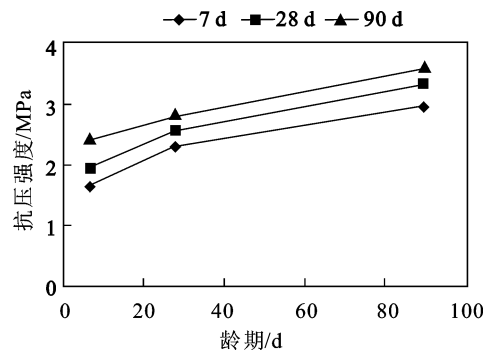


图 3 抗压强度与养生龄期的关系  
Fig. 3 The relationship between compressive strength and curing period

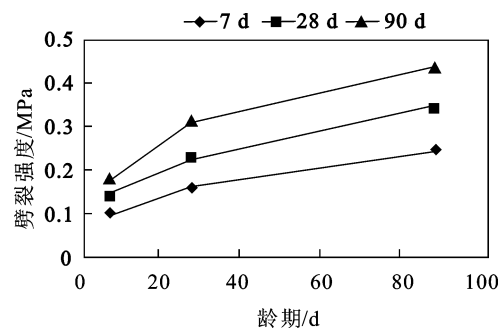


图 4 劈裂强度与养生龄期的关系  
Fig. 4 The relationship between cleavage strength and curing period

抗压强度和劈裂强度与龄期的关系示于图 3 和图 4. 可看出水泥冷再生灰土的强度均随龄期增长而增长,且前期增长快,后期增长慢. 当龄期大于 90 d 后,强度增长变得平缓.

表 5 和表 6 为水泥冷再生灰土抗压强度和劈裂强度在各龄期下的对比结果. 从中可以看出水泥冷再生灰土 7 d 龄期与 90 d 龄期抗压强度比平均为 59.8%,这说明水泥稳定冷再生灰土早期强度高;28 d 龄期与 90 d 龄期抗压强度比平均为 77.6%,这说明水泥稳定冷再生灰土的各龄期强度有较好的相关性,

与典型半刚性材料具有相同的特性. 水泥稳定冷再生灰土 7 d 龄期与 90 d 龄期的劈裂强度比平均为 41.3%, 28 d 龄期与 90 d 龄期劈裂强度比平均为 67.9%, 两个龄期下的比值都小于抗压强度的比值, 这说明劈裂强度与抗压强度相比随龄期增长的幅度低.

表 7 和表 8 为抗压强度和劈裂强度与龄期增长规律经过回归处理后的结果. 从表中的回归方程和回归相关系数可以看出其强度增长的规律性非常好. 回归方程中系数  $A$  的值表示强度随龄期而增长的幅度. 随着水泥用量的增大, 抗压强度的回归系数  $A$  无规律, 说明他们之间规律性差; 而劈裂强度的回归系数  $A$  随水泥用量的增大而增大.

## 2.2 抗压回弹模量分析

表 9 为不同水泥用量作用下水泥稳定冷再生灰土各龄期抗压回弹模量试验结果. 从表中可以看到, 随着水泥剂量的增加, 水泥稳定冷再生灰土抗压回弹模量也在增加, 现象同强度的变化. 水泥稳定冷再生灰土的抗压回弹模量与水泥稳定土类半刚性材料结果相同, 在刚度上这两种材料规律基本相同, 表明水泥稳定冷再生灰土在刚度上能满足使用要求.

综上所述, 水泥冷再生灰土材料的力学强度性质基本符合一般水泥稳定细粒土材料的特征, 可用于修建高等级公路的基层.

## 2.3 稳定性分析

### 2.3.1 水稳定性分析

选 3% 和 4% 的水泥用量, 同一配比同一龄期分别成型两组平行试件, 一组浸水 24 h, 另一组不浸水, 测其无侧限抗压强度, 试验结果见表 10 所示.

由表 10 可以看出, 在不同水泥用量下, 不同龄期下水泥稳定冷再生灰土的软化系数值都能够大于 0.9, 说明水泥稳定冷再生灰土水稳性很好.

### 3.3.2 抗冻融性分析

选择 3% 和 4% 两种水泥用量, 选择 28 d 龄期和 90 d 龄期的试件进行冻融循环试验. 试验方法是将养护好的试样, 先在  $-20 \pm 2^\circ\text{C}$  的温度下冻 16 h, 再放入  $20^\circ\text{C}$  温水浴泡 8 h, 如此冻融循环 5 次, 测定其无侧限抗压强度. 冻融试验结果见表 11. 由表中试验结果可以看出: 水泥稳定冷再生灰土耐冻系数值均大于 0.8, 经过 5 次冻融循环后强度损失不大, 说明水泥稳定冷再生灰土具有良好的抗冻融性能. 废旧路面灰土材料加入水泥后, 水泥经过水化作用而产生的水化产物使灰土具有很好的抗冻性, 经过水泥处理后可用于路面底基层.

表 5 各龄期抗压强度的对比

Tab. 5 Compressive strength contrast in different ages

水泥用量 /%	抗压强度/MPa			抗压强度比/%	
	7 d	28 d	90 d	$R_{C7}/R_{C90}$	$R_{C28}/R_{C90}$
3	1.63	2.30	2.97	54.9	77.4
4	1.93	2.56	3.34	57.8	76.6
5	2.42	2.85	3.62	66.9	78.7
平均值				59.8	77.6

表 6 各龄期劈裂强度的对比

Tab. 6 Cleavage strength contrast in different age

水泥用量 /%	抗压强度/MPa			抗压强度比/%	
	7 d	28 d	90 d	$R_{C7}/R_{C90}$	$R_{C28}/R_{C90}$
3	0.102	0.157	0.243	42.0	64.6
4	0.138	0.225	0.337	40.9	66.8
5	0.179	0.315	0.435	41.1	72.4
平均值				41.3	67.9

表 7 抗压强度与龄期回归关系分析

Tab. 7 The regression relationship analysis of compressive strength and age

水泥用量 /%	$R=A \cdot \ln(T)+B$ , 抗压强度 $R/\text{MPa}$ ; 龄期 $T/\text{d}$		
	$A$	$B$	$R^2$
3	0.523 4	0.594	0.998
4	0.549 1	0.820	0.988
5	0.464 9	1.448	0.956

表 8 劈裂强度与龄期回归关系分析

Tab. 8 The regression relationship analysis of cleavage strength and age

水泥用量 /%	$R=A \cdot \ln(T)+B$ , 劈裂强度 $R/\text{MPa}$ ; 龄期 $T/\text{d}$		
	$A$	$B$	$R^2$
3	0.0547	-0.0110	0.970
4	0.0775	-0.0191	0.985
5	0.1002	-0.0168	0.998

表 9 水泥稳定再生底基层材料抗压回弹模量/MPa

Tab. 9 Cement regenerated subbase material

compressive modulus of resilience/MPa

水泥用量/%	3	4	5
28	325	330	367
90	384	416	452

表 10 水泥冷再生灰土的软化系数

Tab. 10 Softening coefficient of cement cold regeneration of lime soil

养生龄期/d		28	90
3%水泥	未饱水强度/MPa	2.46	3.05
	饱水强度/MPa	2.30	2.97
	软化系数	0.935	0.974
4%水泥	未饱水强度/MPa	2.68	3.4
	饱水强度/MPa	2.56	3.34
	软化系数	0.955	0.982

表 11 水泥冷再生灰土的耐冻系数

Tab. 11 Resistance to frozen coefficient of cement cold regeneration lime soil

养生龄期/d		28	90
3%水泥	饱水强度/MPa	2.30	2.97
	冻融循环后强度 $R_{冻}$ /MPa	1.87	2.57
	耐冻系数 $K_{冻}$	0.813	0.865
4%水泥	饱水强度/MPa	2.56	3.34
	冻融循环后强度 $R_{冻}$ /MPa	2.14	2.98
	耐冻系数 $K_{冻}$	0.836	0.892

## 4 结 论

论文通过大量室内试验,研究了水泥冷再生灰土的力学性能和稳定性能,由试验结果可以得出以下结论:水泥稳定冷再生灰土材料与典型半刚性材料相同,具有相似的物理力学特性,在路用性能方面水泥稳定冷再生灰土材料同样有很好性能,在水稳定性和抗冻融性方面都能达到技术要求,由于强度略低,所以可以作为底基层材料.这一研究对于合理综合利用废旧路面材料,使社会效益和经济效益最大化,还有环境保护都有很大的现实意义.

## 参考文献 References

- [1] 中华人民共和国交通运输部标准. JTJ058—2000 公路工程集料实验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2000.  
China Traffic & Transportation Minister Standard. JTJ058—2000 Test Methods of Aggregate for Highway Engineering[S]. Beijing: People's Traffic Press, 2000.
- [2] 徐培华,张登良,王邦杰. 旧灰土材料再生利用研究[J]. 公路,1995(8):46-51.  
XU Pei-hua, ZGANG Deng-liang, WANG Bang-jie. Study on Recycling of Old Lime-treated Soil[J]. Highway, 1995 (8):46-51.
- [3] 徐秀香,王 蓉. 水泥灰土特性的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(6):911-915.  
XU Xiu-xiang, WANG Rong. Research on the Property of Cement-Lime-Treated Soil[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Nature Scienc, 2006, 22(6):911-915.
- [4] 张敏江,刘 峰,李 辉. 冷再生材料路用性能的实验分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学,2007,23(7):363-366.  
ZHANG Min-jiang, LIU Feng, LI Hui. Test of Mechanical Property of Cold Recycled Mixture with Foamed Bitumen[J]. Journal of Sheyang Jianzhu University: Nature Scienc, 2007, 23(7):363-366.
- [5] 伍发茂. 半刚性基层沥青路面材料水泥冷再生技术研究[D]. 西安:长安大学,2011.  
WU Fa-mao. The research of cold recycling asphalt pavement materials stabilized by cement of semi-rigid base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [6] 王永兵,应国强,胡建林,等. 基于振动成型的冷再生粒料性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2012,44(6):452-456.  
WANG Yong-bing, YING Guo-qiang, HU Jian-lin, et al. Study on Vibration Molding Cold Recycling Mixture Properties[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Nature Science Edition, 2012, 44(6):452-456.

## Study on cement stabled cold recycling lime-treated soil

ZHANG Qian<sup>1</sup>, WEI Hua-wei<sup>1</sup>, WANG Yong-bing<sup>2</sup>, YING Guo-qiang<sup>2</sup>, HU Jian-lin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Quzhou Traffic Design Co., Ltd, Quzhou 324002, China)

**Abstract:** In this paper, composition design and properties of lime-treated fine-grained soil are studied using a serious of

such test liquid plastic limit test, compaction test, strength test, contraction test and stability test. Feasibility of recycling old subbase material as lime, cement or lime-fly ash treated fine-grained soil is proved. Test results show that cement stabilized recycling lime-treated soil has similar physical properties as typical semi-rigid materials. The recycled material also illustrates good road-use properties and thus is suitable to be used as subbase. This is of significance both to the comprehensive utilization of cold pavement material and to the achievement of the maximum economic and social benefits.

**Key words:** *cold regeneration; materials; subbase; lime soil*

---

**Biography:** ZHANG Qian, Ph. D., Associate Professor, Xi'an 710055 P. R. China, Tel: 0086-13609129179, E-mail: zh22qs@126.com

---

(上接第 631 页)

- [10] GERDES A, WITTMANN F H. A new application technology for water repellent surface treatments[C]//Proc. Hydrophole II Int. Cont. on Water Repellent Treatment of Buildings Materials, Switzerland, Aedificatio Publishers, 1998:217.
- [11] SAKURADA Ryoji, MARUYAMA Kyu-ichi. Effect of Pore Structure on the Chloride-ion Diffusivity of Concrete [C]//Proceedings of the Beijing International Symposium on Cement and concrete, 1998:359-364.

## Discussion of the affecting factors on concrete sorption capacity

ZHU Fang-zhi<sup>1,3</sup>, ZHAO Tie-jun<sup>2</sup>, WANG Peng-gang<sup>2</sup>, MA Zhi-ming<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

3. Department of Building Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Concrete sorption capacity is an important index of durability appraisal. The theory and measurement of capillary suction in the concrete were introduced. The effect of water-cement ratio, drying temperature, submerged depth, environmental temperature and relative humidity on sorption capacity in the concrete were investigated by the capillary rise test. The test results showed that water-cement ratio and drying temperature had significant effects on concrete sorption capacity. The submerged depth below 5 mm had little effect on it. The increase of the environment temperature and relative humidity could promote the concrete sorption capacity. The sensitivity of the environmental temperature on the sorption capacity was higher than that of the relative humidity.

**Key words:** *sorption capacity; drying temperature; environmental temperature; relative humidity; durability appraisal*

---

**Biography:** ZHU Fang-zhi, Associate Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-527-84203115, E-mail: fzzhu@sqc.edu.cn