

文章编号:1005-0523(2015)06-0067-07

# 水泥稳定三渣基层回收料的收缩性能

常 康<sup>1</sup>,李立寒<sup>1</sup>,汪于凯<sup>2</sup>

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2.青岛市市政工程设计研究院有限责任公司,山东 青岛 266000)

**摘要:**采用上海地区早期用二灰碎石(简称三渣)基层回收料部分或全部替代天然集料用于水泥稳定碎石基层建设中。为了研究水泥稳定三渣基层回收料收缩性能,基于干缩应变、失水率、干缩系数等指标,考虑三渣回收料掺量、水泥剂量等因素的影响,对其收缩特性进行了室内试验研究,并对比分析了水泥稳定三渣基层回收料与普通水泥稳定碎石收缩性能的差异。试验结果表明:暴露时间、失水率、三渣回收料掺量及水泥用量等因素,均对水泥稳定三渣基层回收料的收缩变形特性产生明显影响;普通水泥稳定碎石混合料的收缩性能优于水泥稳定三渣基层回收料。

**关键词:**三渣基层回收料;水泥稳定碎石;收缩性能

中图分类号:U416.26

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.011

20 世纪 80 年代初,上海率先开发了石灰粉煤灰稳定碎石基层,并将其广泛应用于各类等级道路的基层中,早期的石灰粉煤灰稳定碎石基层俗称三渣基层<sup>[1-2]</sup>,其中的主要材料为 35~70 mm 粗粒径的石料,开级配,空隙高,石灰粉煤灰的质量约占总量的 35%。近几年,在日益增加的交通量 and 环境因素作用下,三渣基层产生了较为严重的病害现象,养护、维修问题日渐凸显,产生了大量的三渣基层废料。

目前,大部分三渣基层废料采用填埋、露天堆放等方法予以处置,不仅耗用了大量耕地及垃圾清运等建设经费,还造成了严重的环境污染。同时据调查,每年约有 12% 的旧路需要从基层开始,将原有旧料挖除弃置,再用新材料重新铺设对路面进行改造,这种传统旧路改造方法导致成本增加、资源浪费等问题<sup>[3-5]</sup>。对其进行再生利用,对节省投资、保护环境等方面具有显著的经济效益和环境效益。近些年来,我国部分学者和研究机构开始对三渣基层回收材料的再生技术展开研究,研究主要涉及两方面的内容,一方面是针对再生方案的研究,包括将三渣回收料用作刚性基层的集料或用作半刚性基层的集料<sup>[3-4]</sup>;另一方面是针对再生混合料基本力学性能的研究,但未涉及再生混合料收缩性能的研究<sup>[5-6]</sup>。将三渣基层回收料用于水泥稳定碎石基层建设中,但该类基层致命的缺陷是容易产生裂缝,从而导致路面其它病害,裂缝产生的原因与混合料的收缩性能有关<sup>[7]</sup>。鉴于此,为合理有效的将三渣基层回收料用于基层建设中,有必要对水泥稳定三渣基层回收料的收缩性能进行研究。为了分析水泥稳定三渣基层回收料的收缩性能,并了解三渣回收料掺量、水泥剂量等因素对混合料变形性能的影响,依据相关的试验规范展开了一系列研究,期望此研究成果对实际工程中三渣回收料在水泥稳定碎石基层中的合理应用有所贡献。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

水泥采用江苏太仓海螺牌 32.5 复合硅酸盐水泥,其性质满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007)的要求,水泥的技术指标见表 1。试验中采用的天然集料为普通的石灰岩集料。

收稿日期:2015-06-14

作者简介:常康(1990—),男,硕士研究生,研究方向为路基路面工程;李立寒(1957—),女,教授,研究方向为路基路面。

表 1 海螺牌水泥技术指标  
Tab.1 Technical indicators of cement

细度/%	烧失量/%	初凝时间/h	终凝时间/h	28 d 抗压强度/MPa
4.4	5.0	5.0	20.0	35.0

本文采用的三渣基层回收料来自上海浦东新区南六公路道路改建工程,该道路已服役 15 年,回收料经反击式破碎处理。三渣基层回收料和天然集料的基本性能见表 2。

表 2 集料的基本性能  
Tab.2 Basic properties of aggregates

集料类型	表观密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	吸水率/%	压碎值/%	洛杉矶磨耗值/%
三渣基层回收料	2.37	12.6	25.5	28.3
天然集料	2.70	1.0	15.1	19.0

## 1.2 试验方案

### 1.2.1 混合料

试验中设计了 2 组试件(NA 和 R),其中 NA 为普通水泥稳定碎石混合料,作为对照组;R 组用三渣回收料按照 60%、100%的比例(质量分数,对应集料总量)分别替代天然集料,相应的水泥稳定三渣基层回收料代号为 R-60 和 R-100。本文中水泥稳定三渣基层回收料和普通水泥稳定碎石的级配均采用《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)<sup>[8]</sup>中悬浮密实级配的中值。悬浮密实级配设计要求见表 3。如无特别说明,水泥用量均为 4.5%。研究水泥用量对水泥稳定三渣基层回收料混合料干缩性能影响时,三渣回收料掺量取 60%,水泥用量分别取 3%、4.5%、6%。

表 3 悬浮密实型集料级配  
Tab.3 Gradations of suspend-dense aggregates

级配类型	不同尺寸筛孔的通过率/%						
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
级配中值	100	95	70	39	22.9	9.5	2.5
级配上限	100	100	80	49	32	20	5
级配下限	100	90	60	29	15	6	0

### 1.2.2 试件成型

采用尺寸为 10 cm×10 cm×40 cm 的中梁试件进行水泥稳定三渣基层回收料的干缩试验。根据重型击实试验得出最大干密度及最佳含水量(4.5%水泥用量下各混合料击实试验结果见表 4),采用静压成型的方法制备梁试件,压实度 98%。试件的成型与脱模均在压力试验机上进行,成型后放置 3~4 h 后脱模,试件脱模后用塑料薄膜包裹,然后将其置于标准养生室进行养护。

表 4 4.5%水泥用量下混合料击实试验结果  
Tab.4 Compaction test results of mixture under 4.5% cement content

混合料编号	三渣回收料掺量/%	最大干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最佳含水量/%
NA	0	2.38	5.2
R-60	60	1.89	10.0
R-100	100	1.60	14.7

### 1.2.3 干缩试验

干缩试验依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51-2009)<sup>[9]</sup>中“T0854-2009 无机结合料稳定材料干缩试验方法”进行。试件标准养生6d后取出浸水24h,实验前将试件上端面磨平,并使用502胶粘结玻璃片,千分表通过钢托架放置在试件的顶部,见图1。之后试件放置于20℃左右的室内自然湿度下风干,观测千分表的数值变化。同时,成型另一组试件,养生与浸水条件一致,测定试件随放置时间的失水率。分别按式(1)、(2)及(3)计算试件的失水率、干缩应变和干缩系数。

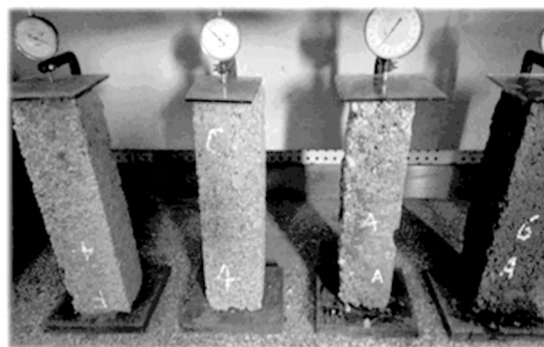


图1 干缩试验

Fig.1 Dry shrinkage test

$$w_i = (m_0 - m_i) / m_0; \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \delta_i / l; \quad (2)$$

$$\alpha_i = \varepsilon_i / w_i. \quad (3)$$

式中:  $m_i$  和  $m_0$  为第  $i$  次及初始测得的试件质量, g;  $w_i$  为第  $i$  次失水率, %;  $\delta_i$  为第  $i$  次测得的试件的干缩量, mm;  $l$  为试件的初始长度, mm;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  次干缩应变, %;  $\alpha_i$  为试件第  $i$  次干缩系数, %。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 暴露时间对混合料干缩特性的影响

水泥稳定三渣基层回收料的失水率与暴露时间的关系曲线见图2。分析图2可见:

1) 水泥稳定三渣基层回收料与普通水泥稳定碎石混合料的失水率变化规律相似,均随着试件暴露时间的延长,失水率不断增大。与普通水泥稳定碎石相比,当暴露时间一定时,水泥稳定三渣基层回收料的失水率明显大于普通水泥稳定碎石,且随着三渣回收料掺量的增加,影响更加显著,失水率的大小排列顺序依次为: R-100 混合料 > R-60 混合料 > NA 混合料。水泥稳定三渣基层回收料失水率高于普通水泥稳定碎石混合料,一方面是因为水泥稳定三渣基层回收料最佳含水量较高,致使混合料中自由水含量相对较多,蒸发量相对较大;另一方面是因为三渣基层回收料表面粗糙多孔、保水性较差,三渣基层回收料掺量越多,其水分蒸发量越大,从而导致失水量增大。

2) 水泥稳定三渣基层回收料与对照组 NA 混合料的失水率相同,早期增长幅度较大,后期增长较慢趋于平缓;普通水泥稳定碎石混合料试件在测试7d后,其失水率基本趋于平缓,而水泥稳定三渣基层回收料失水率增长时间明显大于普通水泥稳定碎石混合料,甚至在试验测试28d后,依然有小幅度的增长。这可以解释如下,三渣基层回收料吸水率高于天然集料,随着三渣回收料掺量的增多,其吸收的水分越多,而这部分水分主要分散在混合料试件内部,其蒸发过程较慢,从而导致水泥稳定三渣基层回收料失水率增长时间较长。

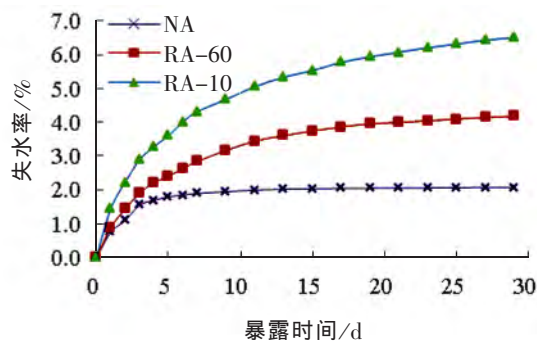


图2 失水率与暴露时间的关系

Fig.2 Relationship between water loss rate and exposure time

水泥稳定三渣基层回收料的干缩应变随暴露时间的关系曲线见图3。由图3可见:

1) 水泥稳定三渣基层回收料干缩应变变化规律与对照组 NA 混合料相同,即干缩应变随着暴露时间的增长而不断增大,对比发现水泥稳定三渣基层回收料干缩应变变化幅度明显大于普通水泥稳定碎

石混合料。

2) 当暴露时间低于 7 d 时, 混合料 RA-60 和 RA-100 的干缩应变较为接近, 稍大于对照组混合料 NA, 但随着暴露时间的延长, 水泥稳定三渣基层回收料的干缩应变逐渐大于对照组 NA 混合料。混合料的干燥收缩是由于内部含水量变化引起的体积收缩, 存在于混合料中的水分包括表面结合水、自由水以及晶体结晶水等。不同于普通水泥稳定碎石, 水泥稳定三渣基层回收料内部除了水泥水化反应产生的结晶水外, 其三渣回收料表面附着的灰浆(石灰粉煤灰水化作用产物)也可能产生一定量的结晶水。干缩试验早期, 混合料试件发生的干缩变形主要是因为混合料表面的结合水、自由水蒸发所引起, 而短时间内水泥稳定三渣基层回收料表面结合水及自由水蒸发量差距较小, 故其干缩变形较接近, 但由于最佳含水量较高, 所以干缩应变大于普通水泥稳定碎石混合料, 但差异不显著。随着混合料试件暴露时间的延长, 混合料试件的自由水与大量结晶水不断蒸发, 致使自由水及结晶水较多的水泥稳定三渣基层回收料所产生的干缩应变与普通水泥稳定碎石混合料之间的差距越大, 三渣回收料掺量越多, 影响越显著。

水泥稳定三渣基层回收料干缩系数与暴露时间的关系见图 4。由图 4 可知, 试件的干缩系数随放置时间以近似线性关系增大; 与对照组 NA 混合料相比, 水泥稳定三渣基层回收料的干缩系数相对较大; 三渣回收料掺量越多, 混合料的干缩系数越大; 暴露时间达 25 d 时, 干缩系数值趋于稳定, 几乎不再增长。

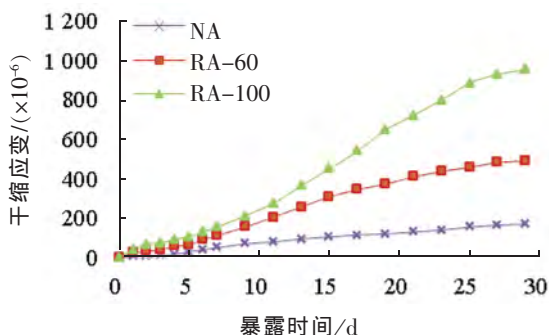


图 3 干缩应变与暴露时间的关系

Fig.3 Relationship between dry shrinkage strain and exposure time

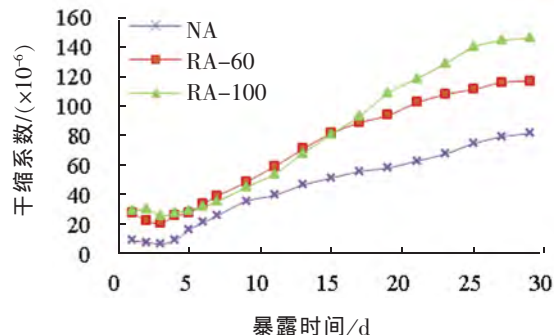


图 4 干缩系数与暴露时间的关系

Fig.4 Relationship between dry shrinkage coefficient and exposure time

## 2.2 失水率对混合料干缩特性的影响

图 5 和图 6 为水泥稳定三渣基层回收料与对照组 NA 混合料的干缩应变、干缩系数与失水率的变化曲线。由图可知: 当 NA 混合料失水率小于 1.70%(约为混合料最佳含水量的 32.7%)时, 干缩应变和干缩系数变化幅度较为平缓, 此后随着失水率的增加干缩应变和干缩系数迅速增大; 当 RA-60 混合料小于 2.85%(约为混合料最佳含水量的 28.5%)时, 干缩应变和干缩系数变化幅度较小, 此后随着失水率的增加干缩应变及干缩系数迅速增大; 当 RA-100 混合料失水率小于 4.32%(约为混合料最佳含水量的 29.4%)时, 干缩应变和干缩系数幅度较平缓, 此后随着失水率的增加干缩应变和干缩系数迅速增大。以上结论表明, 无论是水泥稳定三渣基层回收料还是对照组 NA 混合料, 在试件失水的初期(失水量不超过最佳含水量的 30%), 试件的干缩应变和干缩系数较小, 此后随着失水率的增加混合料的干缩应变和干缩系数急剧增大。

目前规范中并没有对水泥稳定类材料的收缩抗裂指标及要求作出明确规定。相关研究文献表明, 水泥稳定碎石的收缩抗裂性并不能简单以干缩应变或干缩系数评价, 还应考虑水泥稳定碎石的极限拉应力及拉应变。但总体而言, 干缩应变小、干缩系数小的水泥稳定类材料抗裂性更好。

综合以上分析, 为有效降低水泥稳定三渣基层回收料基层的干缩变形, 提高水泥稳定三渣基层回收料基层的收缩抗裂性能, 在该类混合料基层施工完毕后, 应该加强保湿措施, 防止水分过快、过多蒸发。



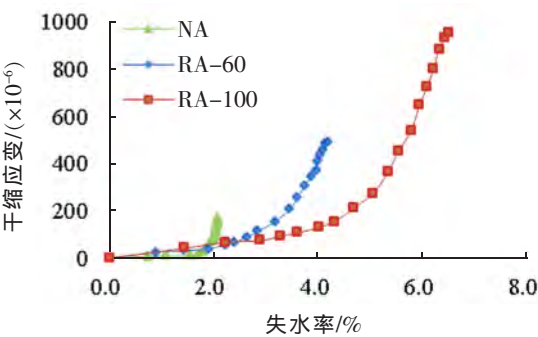


图5 干缩应变与失水率的关系

Fig.5 Relationship between dry shrinkage strain and water loss rate

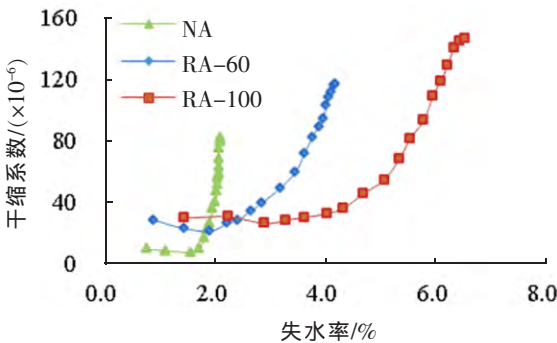


图 6 干缩系数与失水率的关系

Fig.6 Relationship between dry shrinkage coefficient and water loss rate

2.3 三渣回收料掺量对混合料干缩特性的影响

不同三渣回收料掺量下各混合料的 30 d 累积失水率、30 d 累积干缩应变及 30 d 干缩系数试验结果见表 5,水泥用量 4.5%。分析表 5 数据可知,三渣回收料掺量是影响水泥稳定三渣基层回收料干缩特性的关键因素,随着三渣回收料掺量的增加,水泥稳定三渣基层回收料的 30 d 累积失水率、30 d 累积干缩应变及 30 d 干缩系数均呈现增大的趋势。如,对照组 NA 混合料 30 d 累积失水率、30 d 累积干缩应变及 30 d 干缩系数分别为 2.08%, $170\times10^{-6}$  和  $82\times10^{-6}$ ,三渣回收料掺量 60% 的 RA-60 混合料各项干缩指标值增大大约 2.0 倍、2.9 倍及 1.4 倍;而回收料掺量 100% 的 RA-100 混合料各项干缩指标值增大大约 3.1 倍、5.6 倍及 1.8 倍。对水泥稳定三渣基层回收料各干缩指标与三渣回收料掺量的相关性进行回归分析,分析结果见表 6。

表 5 混合料 30 d 干缩试验结果  
Tab.5 30 d dry shrinkage test results of mixture

三渣回收料掺量/%	累积失水率/%	累积干缩应变/( $\times10^{-6}$ )	干缩系数/( $\times10^{-6}$ )
0	2.08	170	82
60	4.18	490	117
100	6.51	953	146

表 6 混合料干缩指标与三渣回收料掺量的相关关系  
Tab.6 Correlation between dry shrinkage indexes of mixture and recycled aggregate contents

指标	回归方程	$R^2$
失水率	$y=0.043\ 6x+1.933\ 2$	0.979\ 1
干缩应变	$y=7.632\ 9x+130.580\ 0$	0.952\ 4
干缩系数	$y=0.635\ 5x+81.105\ 0$	0.996\ 3

注:表中  $x$  表示三渣回收料掺量, $y$  表示混合料干缩指标。

2.4 水泥用量对混合料干缩特性的影响

水泥稳定三渣基层回收料的 30 d 累积失水率、30 d 累积干缩应变及 30 d 干缩系数与水泥用量的关系曲线见图 7,三渣回收料掺量 60%,水泥用量为 3%、4.5% 及 6%。由图可见,水泥稳定三渣基层回收料的失水率、干缩应变及干缩系数均随着水泥用量的增加而增大。相关研究表明混合料的干燥收缩与水泥石收缩过程相关,水泥石即水泥水化浆体,是由不同晶体组成的多孔体,这些晶体可以吸附水,水泥用量越多,水化作用产生的晶体物质越多,其吸附水增多,因此蒸发的水分变多,导致混合料的干缩变形增大。对水泥稳定三渣基层回收料各干缩指标与水泥用量的相关性进行回归分析,分析结果见表 7。

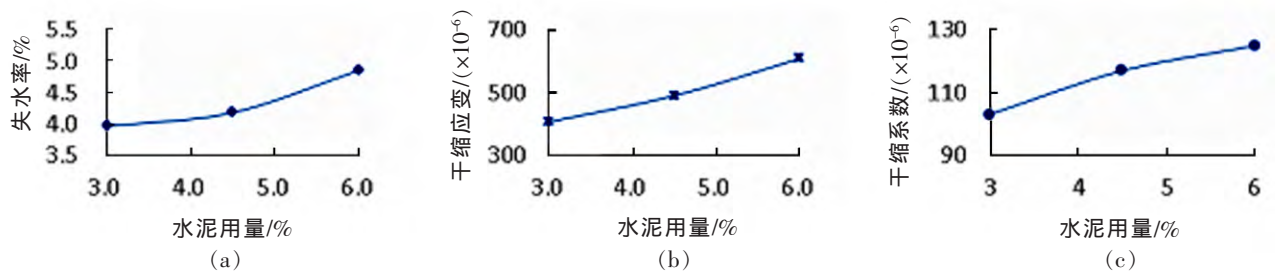


图 7 混合料干缩特性与水泥用量的关系

Fig.7 Relationship between dry shrinkage properties of mixture and cement contents

表 7 混合料干缩指标与水泥用量的相关关系

Tab.7 Correlation between dry shrinkage indexes of mixture and cement contents

指标	回归方程	$R^2$
失水率	$y=3.175\ 1e^{0.068\ 3}x$	0.930\ 9
干缩应变	$y=269.35e^{0.135\ 2}x$	0.998\ 3
干缩系数	$y=85.744e^{0.064\ 5}x$	0.967\ 7

注:表中  $x$  表示水泥用量,  $y$  表示混合料干缩指标。

3 结论

通过室内试验研究了水泥稳定三渣基层回收料的收缩性能,并与普通水泥稳定碎石混合料的收缩性能进行对比分析,主要得到以下几方面结论:

- 1) 水泥稳定三渣基层回收料与普通水泥稳定碎石混合料的失水率、干缩应变及干缩系数均随着暴露时间的延长呈现增大的趋势;且混合料的失水率、干缩应变与干缩系数早期增长幅度较快,后期增长趋于平缓。
- 2) 无论是水泥稳定三渣基层回收料还是普通水泥稳定碎石混合料,当失水量不超过混合料最佳含水量 30% 时,试件的干缩应变和干缩系数较小,此后随着失水率的增加混合料的干缩应变和干缩系数急剧增大;为有效降低水泥稳定三渣回收料的干缩变形,该类混合料在基层施工完成后,应立即采取措施减缓混合料中的水分蒸发。
- 3) 当水泥用量、暴露时间一定时,水泥稳定三渣基层回收料的失水率、干缩应变和干缩系数均大于普通水泥稳定碎石混合料;随着三渣回收料掺量的增加,水泥稳定三渣基层回收料的失水率、干缩应变和干缩系数逐渐增大,且其各项干缩指标与三渣回收料掺量之间有很好的线性关系。
- 4) 水泥稳定三渣基层回收料的失水率、干缩应变和干缩系数随着水泥用量的增加呈现增大的趋势,且其各项干缩指标与水泥用量之间有很好的相关关系。

参考文献:

[1] 孙文州, 张见官. 半刚性基层材料在上海地区道路中的应用[J]. 中国市政工程, 2008(4): 20-22.  
[2] 周净. 上海地区三渣基层的质量控制[J]. 上海公路, 2000(4): 20-22.  
[3] 姚昆. 二灰碎石半刚性基层再生做刚性基层的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.  
[4] 孔晨光, 王霄, 姚占勇. 二灰碎石再生集料刚性基层应用研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2011, 76(4): 95-99.  
[5] 李猛. 水泥、二灰稳定废旧二灰碎石路用性能分析[J]. 黑龙江交通科技, 2009, 181(3): 53.  
[6] 郭兆丰, 张博, 薛健. 二灰碎石基层冷再生技术的应用[J]. 市政技术, 2012, 30(6): 28-30.

- [7] 王宏畅,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.
- [8] 杨孟金. JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [9] 王旭东. JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

## Shrinkage Performance of Cement Stability Recycled Lime Fly Ash Stabilized Aggregate

Chang Kang<sup>1</sup>, Li Lihan<sup>1</sup>, Wang Yukai<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** This paper used early recycled lime fly ash stabilized aggregate of Shanghai to replace natural aggregate for cement stabilized aggregate base. Shrinkage performance of cement stabilized recycled lime fly ash stabilized aggregate was analyzed, considering the influence of different recycled aggregate contents and different cement contents by laboratory test, and based on the parameters of dry shrinkage strain, water loss rate and dry shrinkage coefficient. The performance of cement stabilized lime fly ash stabilized aggregate was compared with cement stabilized aggregate. Test results have indicated that the factors including exposure time, water loss rate, recycled aggregate contents and cement contents have significant impact on the shrinkage performance of cement stabilized recycled lime fly ash stabilized aggregate. The shrinkage performance of cement stabilized aggregate is better than that of cement stabilized recycled lime fly ash stabilized aggregate.

**Key words:** recycled lime fly ash stabilized aggregate; cement stabilized aggregate; shrinkage performance

(责任编辑 刘棉玲)