

文章编号：0451—0712(2006)08—0180—05

中图分类号：U414. 16

文献标识码：B

含泥量对 HAS 稳定粒料强度和干缩特性的影响

薛永杰，冯柳羽，侯浩波

(武汉大学资源与环境科学学院 武汉市 430072)

摘 要：无机胶凝材料稳定粒料作为基层材料的干缩特性是影响其长期使用性能的重要因素之一。通过室内击实与干缩试验，研究 HAS 稳定粒料中的含泥量对其强度以及干缩特性的影响规律。采用回归分析方法，获得干缩应变和平均干缩系数与失水率的关系；同时采用灰色关联分析方法，论证了含泥量对 HAS 稳定粒料干缩特性(最大干缩应变和最大平均干缩系数)的重要影响。分析结果可为道路 HAS 固化剂稳定粒料基层设计和施工提供参考数据。

关键词：HAS 稳定粒料；含泥量；干缩特性；灰关联

无机结合料稳定粒料基层是目前应用范围最广的高等级公路路基结构形式之一。作为一种半刚性材料，其干缩特性是影响其长期使用性能的重要因素之一。这主要是因为混合料内部的水分不断减少的同时发生了水化作用、吸附作用、分子间力的作用、材料矿物晶体或胶凝体间层间水的作用和碳化收缩作用等引起的半刚性材料体积收缩造成的^[1]。而材料的干缩程度或干缩性(最大干缩应变和平均干缩系数)的大小与被稳定粒料中的含泥量也就是粒料中含有塑性指数大于 17 的细粒土或中粒土的含量有很大关系。粒料中存在塑性指数较大的细粒土或中粒土时，会对稳定粒料的最终干缩性能产生非常不利的影响。一般，粒料中含泥量越

大，混合料的最终干缩应变或平均干缩系数就越大，无机结合料稳定粒料基层收缩开裂的可能性就越大。

本文通过室内击实试验、强度试验与干缩试验，以一种灰渣胶凝材料——HAS 土壤固化剂来稳定粒料，利用 HAS 土壤固化剂在常温下固化含泥石屑而无需冲洗和筛分的优点，研究了 HAS 稳定粒料中的含泥量对其强度和干缩特性的影响规律，采用了回归与灰色关联分析方法进行了论证。同时将试验结果与路基工程中常用的水泥稳定粒料的相应指标进行比较分析，探讨了 HAS 稳定粒料作为基层材料特别是作为稳定高含泥量粒料，其在抗干缩开裂方面的优越性。

收稿日期：2006—03—16

参考文献

[1] 任志刚,王发洲. 高强轻骨料混凝土大跨径桥梁结构设计参数分析[J]. 国外建材科技,26(3).

[2] 吴茂华,刘龙江. 轻骨料混凝土的抗震性能[J]. 砖瓦,2003,(11).

[3] 黄智山,巴恒静. 大坍落度高性能轻骨料混凝土的研究[J]. 新型建筑材料,2002,(2).

[4] 吴丽芳,钱慧丽,刘娟红. 高强粉煤灰轻骨料的研制[J]. 粉煤灰综合利用,2002,(5).

[5] 李渝军,丁建彤. 泵送高强轻骨料混凝土的抗离析性能[J]. 混凝土,2005,(3).

[6] 王龙志,林开成,张海霞,杨勇. 轻骨料混凝土泵送技

术的研究与应用[J]. 新型建筑材料,2004,(12).

[7] 黄智山,巴恒静. 大坍落度高性能轻骨料混凝土的研究[J]. 新型建筑材料,2002,(2).

[8] 邓初道. 粗骨料级配对道路混凝土抗折强度的影响[J]. 山西建筑,2005,(8).

[9] 孙大明,等. 粗骨料对轻骨料混凝土塑性收缩裂缝的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2004,(8).

[10] 刘娟红,宋少民. 粉煤灰和磨细矿渣对高强轻骨料混凝土抗渗及抗冻性能的影响[J]. 硅酸盐学报,33(4).

[11] 陈莹,曾志兴. 钢纤维轻骨料混凝土的强度和变形性能[J]. 华侨大学学报(自然科学版),24(4).

1 试验方案

为了尽量模拟集料中含泥量的变化情况,并结合施工现场最不利条件,考虑并设计了 4 种含泥量水平。4 种含泥量水平分别为 15%、20%、25%、30%,所选用的细粒土用水洗法实测含泥量为 20.1%,塑性指数为 24。同时为了检验粉煤灰(FA)对 HAS 稳定粒料可能存在的干缩开裂情况是否有减少或减缓的效果,在 HAS 稳定粒料中掺入了 FA,并研究了掺入一定量的粉煤灰前后 HAS 稳定粒料的强度与干缩特性。试验中采用了 16 种 HAS 稳定粒料混合料,试验编号分别为 H1~H8、M1~M8。试验方案与击实试验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 HAS 稳定粒料击实试验结果

试验编号	试验方案		试验结果	
	固化剂用量/%	含泥量/%	W_0 /%	ρ_0 /(g/cm ³)
H1	5	15	5.6	2.236
H2	5	20	5.9	2.220
H3	5	25	6.2	2.221
H4	5	30	6.4	2.210
H5	6	15	5.6	2.240
H6	6	20	6.0	2.240
H7	6	25	6.2	2.234
H8	6	30	6.6	2.210

注: W_0 为最佳含水量, ρ_0 为最大干密度。

表 2 FA 改性后 HAS 稳定粒料击实试验结果

试验编号	试验方案		试验结果	
	固化剂+外掺剂/%	含泥量/%	W_0 /%	ρ_0 /(g/cm ³)
M1	5+20% FA	15	7.2	2.084
M2	5+20% FA	20	7.2	2.103
M3	5+20% FA	25	7.6	2.108
M4	5+20% FA	30	8.1	2.020
M5	5+30% FA	15	7.4	1.960
M6	5+30% FA	20	7.5	1.953
M7	5+30% FA	25	8.0	1.952
M8	5+30% FA	30	8.4	1.945

注:同表 1。

2 抗压强度试验

在研究 HAS 稳定粒料收缩特性的同时,抗压强度是必要的指标。也就是说,一种稳定粒料不仅要有较小的干缩应变,还应具有较高的抗压强度。按击实试验得出的 16 组最佳含水量 W_0 与最大干密度 ρ_0 配

制圆柱型试件,在 HAS 固化剂的作用前期(7 d)和作用后期(28 d)进行该项试验。试验结果如表 3 所示。

表 3 抗压强度试验结果

编号	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
7 d	4.6	5.8	4.8	3.7	4.4	6.2	4.3	3.1
28 d	5.1	6.2	5.1	4.3	4.9	6.6	4.8	3.7
编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
7 d	4.4	6.5	5.7	5.2	3.4	4.8	3.1	2.4
28 d	4.7	7.0	6.3	5.8	3.7	5.2	3.3	3.0

从表 3 中 7 d 抗压强度结果可以看出,当稳定粒料中含泥量为 20% 左右时,出现最大的抗压强度。这主要是因为,在含泥量较小的级配中,细粒料含量偏少,与固化剂、水形成的结合料的含量少,稳定效果未达到最佳;当增加细料的含量时,由于细粒料的增多,级配发生改变,更多的集料“悬浮”在结合料中,抗剪切能力下降。另外,随着固化剂掺量的加大,强度有所提升;对于掺入粉煤灰的试件而言,20% 的 FA 掺量下强度指标好于 30% 掺量的试件,这说明外掺料 FA 的掺量有一最佳值,过多地掺入 FA 导致级配变化,降低了稳定粒料的强度。28 d 抗压强度结果也反映了这一规律。这说明,强度指标并非在含泥量越小时越好,由于稳定粒料存在一个合理的最佳级配组成,因此处于最佳级配下的含泥量水平时,试件达到最大的抗压强度,增大或减少细粒料的含量(含泥量)会导致稳定粒料试件强度下降。

3 干缩试验

以各种混合料的最佳含水量 W_0 与最大干密度 ρ_0 制作 24 种小梁试件(小梁尺寸均为 5 cm×5 cm×24 cm)。采用压力机静压成型,在标准养护室内养护 7 d 后,养生温度为(25±2)℃,相对湿度大于 90%。养生结束后置于自然状态,测量小梁质量变化,同时用千分表测量其干缩量。

3.1 失水率的变化

从标准养护室中取出置于自然状态时,小梁会发生失水干缩。小梁失水率随时间的变化规律见图 1 与图 2,失水率 W 表示单位干材料失去水的量,图中“WH1”对应于编号为 H1 的 HAS 稳定粒料混合料失水率,其余以此类推,试件测定周期为 18 d。

分析图中数据所表现出来的规律可知以下几点。

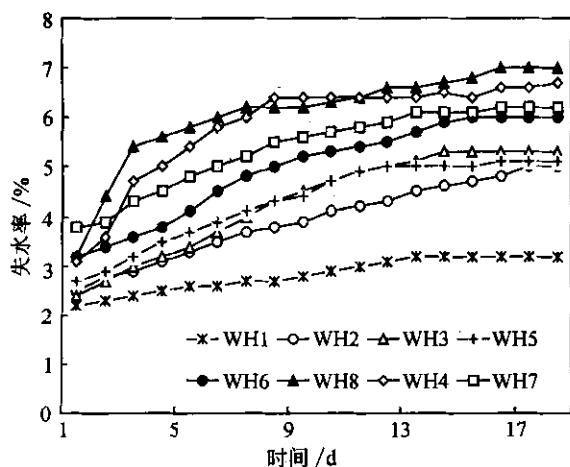


图1 H1~H8失水率变化曲线

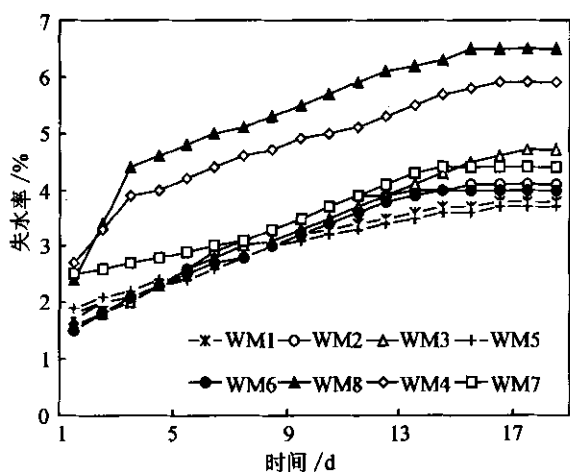


图2 M1~M8失水率变化曲线

(1)在固化剂用量一定的情况下,试件的失水率与含泥量,也可以说是与稳定粒料的级配有直接的关系;含泥量的增大和细集料含量高会导致试件的最终失水率大,而含泥量较少的试件最终失水率小。如图1中WH4与WH8的最终失水率远大于其他试件,这两个试件的含泥量均为30%。分析原因主要是因为含泥量大,则粘粒、胶粒的含量大,比表面积越大,吸水性越强,收缩也越显著。

(2)在含泥量一定的情况下,固化剂的掺量对试件最终失水率影响较小,这与文献[2]中提到的HAS固化剂具有干缩率小、最终失水率小是一致的。

(3)FA的掺入改变了稳定粒料试件的干缩性能,直接的表现是在相同的含泥量与固化剂用量的情况下试件的最终失水率小于未掺FA改性的试件。主要的原因是FA的掺入,改变了级配,级配中含泥量虽然未改变,但实际含泥量减少了,也就是粘粒、胶粒的比例减小,这也说明了失水率与粒料的级

配有直接的关系;同时由于FA中细小的圆滑球型颗粒的含量大,活性高,需水量少,则失水与收缩均不显著的原因。

(4)观察图1和图2,随着时间的延长,失水率逐渐变大,但在试验末期失水率曲线均趋于平缓。

3.2 干缩应变的变化

利用所测得的小梁试件干缩量 and 相应的水分损失量,可以计算试件的干缩应变和平均干缩系数,计算公式如下:

$$E_d = \Delta l / L \quad (1)$$

$$\alpha_d = E_d / W \quad (2)$$

式中: E_d 为小梁的干缩应变($\times 10^{-6}$); α_d 为小梁的平均干缩系数($\times 10^{-6}$); L 为小梁的长度,240 mm; Δl 为含水量损失 W (失水率)时小梁的整体收缩量,0.001 mm。

16种小梁试件自然干缩应变随时间的变化规律如图3与图4所示。图中“EH1”对应于编号为H1的HAS稳定粒料混合料的干缩应变,其余类推。

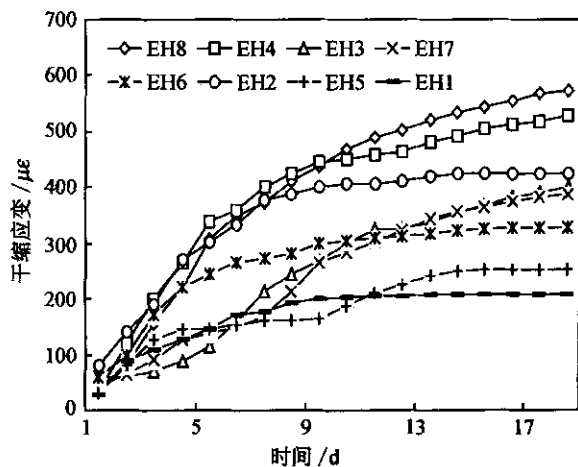


图3 H1~H8干缩应变曲线

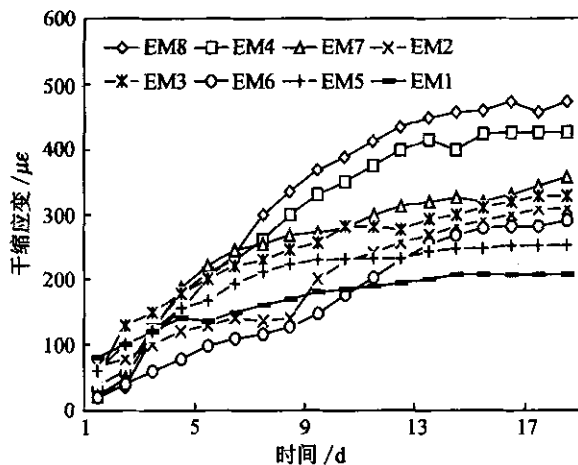


图4 M1~M8干缩应变曲线

由图中规律可知以下 3 点。

(1)HAS 稳定粒料的干燥收缩表现出的规律类似于失水率的变化规律,即随着时间的延长干缩应变逐渐增大,至试验后期增幅趋缓。

(2)在固化剂用量一定的情况下,试件的干缩应变与含泥量有直接的关系:含泥量的增大、细集料含量高会导致试件的最终失水率大,干缩应变大。如图 3 中 H4 与 H8 的干缩应变均大于其他试件,这两个试件的含泥量均为 30%。这主要是因为粒料含泥量大,则粘粒、胶粒的含量大,成型试件收缩显著。

(3)掺入 FA 后,相同含泥量水平下,试件的干缩应变变小。分析其主要原因是由于 FA 细粒的引入,一方面降低了细粒粘土的吸水性,降低了其收缩性;另一方面,FA 的细粒起到了一定的劈裂作用,使细粒土粒之间间距增大,即降低间距缩小的趋势,以此来减小粒料的收缩。

4 分析与讨论

4.1 回归分析

对 16 种 HAS 稳定粒料小梁的干缩试验数据进行整理,可得小梁干缩应变与失水率的关系,如图 5 所示。图 5 中曲线具有一个共同点,即 HAS 稳定粒料混合料的干缩应变随着失水率的增大而增加,只是增加的幅度大小不同。对于含泥量越大的粒料混合料,含水量以及干缩应变的变化越敏感。

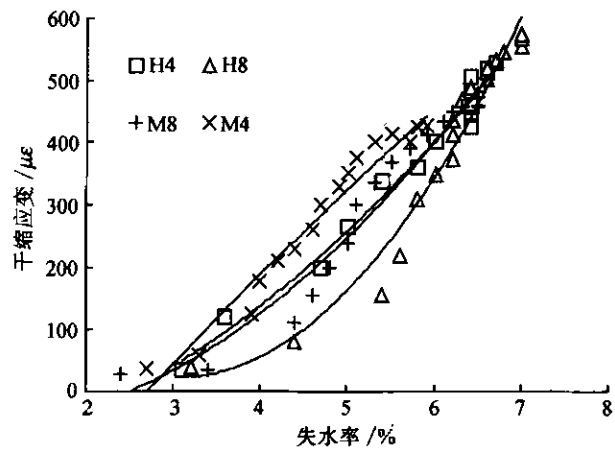


图 5 失水率与干缩应变拟合曲线

对图 5 中的数据,采用曲线回归分析方法,可以获得相应的干缩应变、平均干缩系数与失水率的关系曲线。部分小梁干缩应变与失水率的拟合曲线,如表 4 所示。

由拟合方程以及决定系数可知,4 个编号试件

表 4 失水率与干缩应变关系

试件编号	拟合方程	决定系数 R^2
H4	$E_d = -33.598w^2 + 526.96w - 1572.5$	0.958 2
H8	$E_d = -27.188w^2 + 496.45w - 1706.7$	0.973 4
M4	$E_d = -3.3598w^2 + 167.61w - 428.94$	0.964 6
M8	$E_d = 15.515w^2 - 17.157w - 54.124$	0.955 0

注: E_d 为小梁干缩应变, w 为失水率。

的失水率与干缩应变关系曲线拟合程度高,相关性非常好。为了方便研究,本文仅列出了含泥量为 30% 时,原样和 FA 改性后的 HAS 稳定粒料的失水率与干缩应变关系并进行分析,在其他含泥量水平下,利用 HAS 稳定粒料,失水率与干缩应变也具有很好的相关性。

4.2 灰关联分析

灰色关联分析方法是运用灰色系统基本理论进行多因素重要性分析的有效方法,其基本思想是根据序列曲线几何性状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,则因素(影响因素序列)对目标值(指标序列)的影响就越大^[3]。因而采用灰色关联分析方法,就可以对影响水泥稳定粒料最大干缩应变因素(含泥量、FA 和固化剂用量等)进行重要性分析。含泥量、FA 和固化剂用量等因素对 HAS 稳定粒料失水率、干缩应变的影响序列,如表 5 所示。

灰色关联分析方法弥补了采用数理统计方法做系统分析的缺陷,它对样本量的多少和样本有无规律等同样适用。通过计算,各影响因素(含泥量、FA 量与 HAS 用量)与抗压强度(7 d)之间(7 d 与 28 d 的抗压强度变化规律相同)的灰色绝对关联度为(0.503、0.502、0.462);与最大失水率之间的灰色绝对关联度为(0.638、0.584、0.628);与最大干缩应变之间的灰色绝对关联度为(0.545、0.526、0.513)。由结果可知,各影响因素对强度、最大失水率的灰色关联度大于与最大干缩应变之间的关联度,影响次序略有不同,即 FA 因素对最大失水率的影响要大于对最大干缩应变的影响,3 个因素对抗压强度和最大干缩应变的影响是一致的。计算的结果表明,含泥量对于失水率和最大干缩应变之间两个指标的影响最显著,对于强度的影响并不明显。因此控制含泥量在一定范围,同时保持粒料级配的完整合理性,对用 HAS 稳定含泥粒料作道路基层具有重要意义。根据前面的强度、收缩试验,并结合灰色关联分析结果,

表 5 灰色关联分析序列

序列		序列值															
指标序列	7 d 抗压强度/MPa	4.6	5.8	4.8	3.7	4.4	6.2	4.3	3.1	4.4	6.5	5.7	5.2	3.4	4.8	3.1	2.4
	失水率/%	3.2	5.0	5.3	6.7	5.1	6.0	6.2	7.0	3.8	4.1	4.7	5.9	3.7	4.0	4.4	6.5
	最大干缩应变/ $\mu\epsilon$	218	424	402	527	253	328	388	573	208	308	328	427	252	289	357	473
影响因素 序列	含泥量/%	15	20	25	30	15	20	25	30	15	20	25	30	15	20	25	30
	FA 量/%	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	30	30	30	30
	HAS 量/%	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	5	5	6	6	6	6

本文认为粒料中含泥量在 20%~25%(水洗法),FA 掺量在 20%,HAS 土壤固化剂用量在 5%~6%(施工现场适当放宽结合料的用量)时,HAS 稳定含泥粒料可以表现出高强度、低收缩性能。

5 结 论

- (1)含泥量对抗压强度的影响是非线性的,最大抗压强度出现在最佳含泥量点即最优级配下的含泥量水平。增大或减小细粒料含量,强度都会降低。
- (2)含泥量的大小直接影响 HAS 稳定粒料的强度与干缩特性。含泥量越大,HAS 稳定粒料混合料的强度越低;含泥量越大,HAS 稳定粒料混合料的失水率越高,干缩应变就越大,HAS 稳定粒料基层开裂的可能性就越大,回归分析与灰关联分析验证了这一点。

- (3)20%的 FA 的掺入能够改善 HAS 稳定粒料的强度与干缩特性,FA 在 HAS 稳定高含泥量粒料道路基层中的应用拓宽了工业固体废物处置手段。
- (4)利用 HAS 土壤固化剂稳定高含泥粒料试验室评价是可行的,实际施工时,应尽量控制 HAS 稳定粒料中含泥量在 20%~25%,前提是保持级配合理完整。

参考文献:

[1] 沙庆林.高等级道路半刚性路面[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.

[2] 侯浩波.HAS 耐水土壤固化剂及其应用[J].新技术新工艺,1999,(5).

[3] 刘思峰,郭天榜,党耀国.灰色系统理论及其应用(第二版)[M].北京:科学出版社,1999.

Effects of Mud Content on Strength and Dry Shrinkage Performance of HAS Stabilized Aggregate

XUE Yong-jie¹, FENG Liu-yu¹, HOU Hao-bo¹

(School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Dry-shrinkage performance of inorganic cement stabilized aggregate base course is one of important factors which affects its long-term pavement performance. By using laboratory compaction and dry shrinkage tests, the effects of mud content on the strength and dry shrinkage performance of HAS stabilized aggregate are studied. Using the regression analysis method, the relationships between dry shrinkage strain or average dry shrinkage index and water-losing rate can be simulated. At the same time, by using the grey incidence analysis method, the important effects of mud content on the dry shrinkage performance of HAS stabilized aggregate are confirmed. The results provide reference data for the design and construction of HAS stabilized aggregate base course.

Key words: HAS stabilized aggregate; mud content; dry shrinkage performance; grey incidence