

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202411004



# 低收缩砂岩洞渣水稳材料的 制备及性能分析

谭波<sup>1,2</sup>, 林奕安<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>3</sup>, 黎官福<sup>1,2</sup>, 邹可轩<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 中交路桥南方工程有限公司, 北京 101100)

**摘要:** 针对砂岩洞渣水稳材料强度偏低、收缩量大的问题,通过逐级填充法结合*i*法设计级配和掺入粉煤灰来制备低收缩水稳材料,并通过开展力学试验、干缩试验和干湿循环收缩试验研究其性能规律。试验结果表明:当粗、细集料质量比为 65:35 时,混合料具有较强的力学性能;掺入粉煤灰的混合料早期强度偏低,后期强度会提高,龄期 60 d 时,其力学性能明显优于试件 S1 的混合料,最佳粉煤灰掺量(质量分数)为 9%,掺量为 9% 的粉煤灰比未掺粉煤灰混合料的干缩应变降低了 41%,干缩系数降低了 48%;试件在经历干湿循环后,当次干湿循环的收缩应变都大于 0 次干湿循环时的收缩应变,掺入粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响。

**关键词:** 级配设计; 水稳材料; 粉煤灰; 力学性能; 收缩性能

中图分类号: U 414

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)02-0168-08

## Preparation and Performance Analysis of Low-Shrinkage Sandstone Cave Slag Water-Stabilized Materials

TAN Bo<sup>1,2</sup>, LIN Yian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>,  
LI Guanfu<sup>1,2</sup>, ZOU Kexuan<sup>1,2</sup>, CHEN Ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization,  
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Road and Bridge South Engineering Limited Company, Beijing 101100, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of lower strength and high shrinkage of sandstone cave slag water-stabilized materials, the low-shrinkage water-stabilized materials were prepared by step-by-step filling method, combining with the *i*-method designing gradation and mixing fly ash, and the performance were investigated by mechanical tests, dry-shrinkage tests, and dry-wet cycle shrinkage tests. The results of the experiment show that, when the mass ratio of coarse aggregates to fine aggregates is 65:35, the mixture has stronger mechanical performance. The early strength of the mixture mixed with fly ash is lower, the late strength increases. The mixture performance is significantly better than those of the piece S1 at age 60 d, the optimal mixing amount of fly ash (mass fraction) is 9%. Comparing to mixture with no fly ash, 9% fly ash decreases the dry

收稿日期: 2024-11-08

通信作者: 谭波(1977-),男,教授,博士,主要从事路基路面工程及新型建筑材料的研究。E-mail: bbsz2004@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52062009)

shrinkage strain by 41%，and the dry shrinkage coefficient by 48%. After dry-wet cycle, the shrinkage strain of second dry-wet cycle is greater than the shrinkage strain without dry-wet cycle, and the mixing fly ash reduces the dry-wet cycle effects.

**Keywords:** gradation design; water-stabilized material; fly ash; mechanical performance; shrinkage performance

随着高速公路的快速发展,石材短缺的矛盾日益突出,隧道洞渣的有效利用是解决石材短缺的途径之一。然而,砂岩洞渣偏酸性,制备的水稳材料强度低且收缩量大,易造成早期开裂。经济合理地制备砂岩洞渣和改善其力学性能、收缩性能是高速公路建设中亟待解决的技术难题之一。

针对砂岩洞渣制备水稳材料的文献相对较少,沈正伟等<sup>[1]</sup>采用联产生生产工艺对石英砂岩洞渣进行加工,并成功将其应用到宜长高速公路的基层和底基层中。杨虎陈等<sup>[2]</sup>研究发现,适当增加水泥剂量和延长养护龄期等方式可以使砂岩水稳材料获得同等的承载力。涂圣武等<sup>[3]</sup>按围岩等级将砂岩洞渣分类进行加工生产路基填料、混凝土和水稳集料。隧道洞渣的多数文献是研究集料的生产工艺或与其他材料混合利用<sup>[4-8]</sup>,而针对洞渣材料级配设计的方向较少。刘树堂等<sup>[9]</sup>通过建立矿料间隙率的物理模型,以混合料的密度或间隙率作为判断骨架密实性的简便指标。张丰焰等<sup>[10]</sup>利用响应曲面法建立模型来确定各原料的最佳取值范围。冯德成等<sup>[11]</sup>根据体积法,以混合料的空隙率作为指标来控制密实度。文献<sup>[12-14]</sup>通过粒子干涉理论与最大密度曲线理论结合,设计的混合料为骨架密实型结构,力学性能优于规范推荐的级配。

此外,一些学者通过掺入其他材料来改善水稳材料的收缩性能。郭寅川等<sup>[15]</sup>发现掺入玻璃纤维能增强碎石混合料的韧性,显著提高其抵抗开裂的能力。胡勇勇等<sup>[16]</sup>研究胶粉纤维复合改善水泥稳定碎石的收缩性能和力学性能,发现掺入胶粉纤维复合改性可以减小干缩应变,并且能保持足够的强度。乔建刚等<sup>[17]</sup>将高吸水树脂(SAP)掺入水稳材料中,SAP的掺入能大幅抑制混合料的收缩应变。徐鸥明等<sup>[18]</sup>通过掺入粉煤灰与粒化高炉矿渣,可以很好改善水泥稳定碎石的收缩性能。关于制备水稳材料的性能研究有很多学者进行了探讨,但利用砂岩洞渣制备水稳材料的研究较少,并且在施工现场上发现,水稳层除早期发生开裂之外,在未覆盖养护的情况下,中长期也会产生开裂,对于这现象的发生缺乏合理解释。基于此,本文对低收缩砂岩洞渣水稳材料的制备及性能进行研究。

## 1 试验原材料

### 1.1 集料

集料选用那平高速公路三分部隧道开挖出来的砂岩洞渣材料,经生产加工的 4 档工程粒径分别为:31.50~19.00、19.00~9.50、9.50~4.75、4.75~0 mm,以 4.75 mm 的筛孔区分,细集料的粒径小于等于 4.75 mm,粗集料的粒径大于 4.75 mm。砂岩洞渣集料性能指标,如表 1 所示。表 1 中: $D$ 、 $\rho_a$ 、 $\rho_b$ 、 $\eta$ 、 $w_c$ 、 $w_a$ 、 $\alpha$ 、 $I_p$  和  $S_E$  分别为集料粒径、表观密度、毛体积密度、吸水率、针片状质量分数、软石质量分数、压碎值、塑性指数及砂当量。由表 1 可知:粗集料的密度较高,针片状质量分数、软石质量分数较低,是一种良好的级配碎石集料;细集料的砂当量较弱,其他测定的数据均满足技术指标。

表 1 砂岩洞渣集料性能指标

Tab.1 Performance indexes of sandstone cave slag aggregate

$D/\text{mm}$	$\rho_a/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\rho_b/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\eta/\%$	$w_c/\%$	$w_a/\%$	$\alpha/\%$	$I_p$	$S_E/\%$
31.50~19.00	2.719	2.682	0.40	5.2	0.6	8.3	—	—
19.00~9.50	2.724	2.718	0.59	13.9	1.6	12.6	—	—
9.50~4.75	2.717	2.645	1.01	16.1	1.9	—	—	—
4.75~0	2.729	2.703	1.98	—	—	—	4.4	56

### 1.2 水泥

试验所用水泥为广西省白色市登高(集团)田东水泥有限公司生产的 P·C42.5 型水泥。水泥主要性能指标,如表 2 所示。表 2 中: $t$ 、 $f_c$ 、 $f_s$ 、 $R_{45\mu\text{m}}$  和  $w_p$  分别为水泥凝结时间、抗压强度、抗折强度、细度及标准稠度用水量。

表 2 水泥主要性能指标  
Tab. 2 Main performance indexes of cement

参数	$t/\text{min}$		$f_c/\text{MPa}$		$f_s/\text{MPa}$		$R_{45\ \mu\text{m}}/\%$	$w_p/\%$
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
指标要求	$\geq 45$	$\leq 600$	$\geq 15.0$	$\geq 42.5$	$\geq 3.5$	$\geq 6.5$	$\leq 30\%$	$\leq 30$
检测结果	355	445	34.2	47.7	5.4	7.8	12.3	26

1.3 粉煤灰

粉煤灰采用一级粉煤灰,其细度为 13%,烧失量为 3.1%,比表面积为  $415\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ,密度为  $2.55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,堆积密度为  $1.12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,满足规范要求。粉煤灰的主要化学成分质量分数如下: $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 23.000%; $\text{SiO}_2$  为 43.000%; $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 2.500%; $\text{SO}_3$  为 0.800%; $\text{CaO}$  为 5.600%; $\text{MgO}$  为 0.950%;氯离子为 0.015%;铁为 0.850%;游离氯化钙为 0.800%。

2 低收缩水稳材料的制备

2.1 级配设计

逐级填充法是将粗集料以一定的比例进行两级填充,以填充为基础,嵌挤为原则。将工程实际用的粗集料划分成 3 档粗集料:D1(粒径为 19.00~31.50 mm),D2(粒径为 9.50~19.00 mm)和 D3(4.75~9.50 mm)。  $i$ (通过率递减系数)法是通过无侧限抗压强度试验与加州承载比(CBR)试验确定最佳  $i$ ,从而设计出细集料级配。将粗、细集料级配进行合成,拟定粗集料质量分数从 55%递增,每次增加 5%,设计 5 组混合料级配,通过力学性能试验确定较优的骨架密实型级配。

1) 粗集料设计。以一定质量的 D1 为参照,根据内掺法,D2 的的填充用量按 5%D1 的质量逐次递增,进行Ⅰ级填充;在Ⅰ级填充试验的结果上,将确定的 D1 与 D2 质量比作为参照,D3 的填充用量按 5%的  $m(\text{D1}):m(\text{D2})$  的质量逐次递增,进行Ⅱ级填充。逐级填充振实试验,如图 1 所示。图 1 中: $\rho_v$  为振实密度。

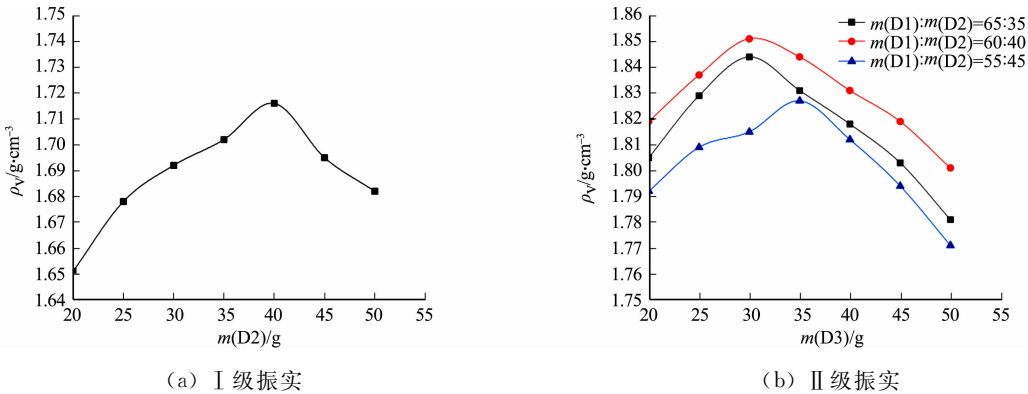


图 1 逐级填充振实试验  
Fig. 1 Step-by-step filling vibration tests

由图 1 可知:随着 D2 填充用量的增加,混合料的振实密度先增大后减小, $m(\text{D1}):m(\text{D2})$  为 60:40 时,Ⅰ级振实密度最佳;随着 D3 填充用量的增加, $m(\text{D1}):m(\text{D2})$  分别为 65:35,60:40,55:45 曲线的振实密度呈先增大后减小的趋势,以  $m(\text{D1}):m(\text{D2})=60:40$  为参照进行Ⅱ级填充,振实密度优于相邻比例的振实密度,即 3 档粗集料的质量比为 60:40:30 时,混合料的振实密度最大,粗集料间的嵌挤作用最好。通过振实试验结果,筛孔粒径为 31.50,19.00,9.50,4.75 mm 的通过率分别为 100%,46%,23%,0。

2) 细集料设计。细集料在混合料中起到填充空隙的作用,从而影响水泥稳定碎石试件成型后的强度和收缩性能。采用  $i$  法对细集料进行级配设计, $i$  为 0.58~0.68(按 0.02 为间隔), $i$  的计算公式为

$$P_K = P_0 \times i^k,$$
 (1)

$$K = 3.32 \times \lg \frac{D}{d}.$$
 (2)

式(1)~(2)中: $P_K$  为筛孔的通过率, $K$  为系数; $P_0$  为最大粒径的通过率; $k$  为级数; $d$  为粒径; $D$  为最大的粒径。

$i$  法计算细集料通过率,如表 3 所示。表 3 中: $l$  为塞孔粒径。

表 3  $i$  法计算细集料通过率

Tab. 3 Calculation of fine aggregate passage rate by  $i$  method

$i$	$P_K/\%$						
	$l=4.75\text{ mm}$	$l=2.36\text{ mm}$	$l=1.18\text{ mm}$	$l=0.60\text{ mm}$	$l=0.30\text{ mm}$	$l=0.15\text{ mm}$	$l=0.08\text{ mm}$
0.58	100	57.7	33.5	19.7	11.4	6.6	3.8
0.60	100	59.7	35.9	21.8	13.1	7.8	4.7
0.62	100	61.7	38.3	24.0	14.9	9.2	5.7
0.64	100	63.8	40.8	26.4	16.9	10.8	6.9
0.66	100	65.8	43.4	29.0	19.1	12.6	8.3
0.68	100	67.8	46.1	31.6	21.5	14.6	9.9

为更好地成型,水泥的掺量(质量分数)为 5%,在不同  $i$  级配的最大干密度和最佳含水率(水的质量分数)下,进行 7 d 无侧限抗压强度和 CBR 试验结果,如图 2,3 所示。图 3 中: $R_c$  为无侧限抗压强度; $\eta_{CB}$  为加州承载比。

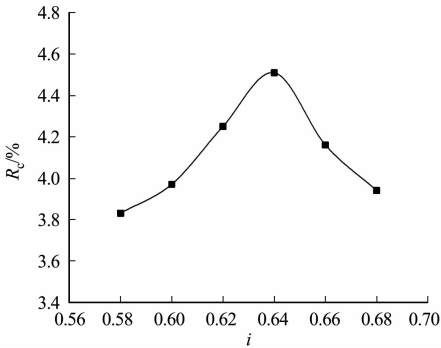


图 2 水泥的 7 d 无侧限抗压强度

Fig. 2 7-day unconfined compressive strength of cement

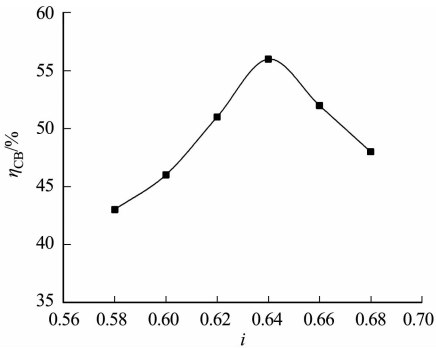


图 3 水泥的 CBR 试验结果

Fig. 3 CBR test results of cement

由图 2 可知:无侧限抗压强度随着  $i$  递增先增大后减小,当  $i$  为 0.64 时,该细集料级配的抗压强度最高; $i$  大于 0.64 时,其强度呈现下降趋势,说明  $i$  为 0.64 对应的细集料级配具有较好的粘结力,与粗集料混合后,可以形成最优的骨架密实型结构。

由图 3 可知: $\eta_{CB}$  随着  $i$  的递增先增大后减小,当  $i$  为 0.64 时, $\eta_{CB}$  出现峰值; $i$  继续增大时, $\eta_{CB}$  呈下降趋势,说明  $i$  为 0.64 对应的细集料级配有较强的抵抗荷载变形能力,其与粗集料混合形成的结构具有较强的稳定性。因此,细集料级配取  $i$  为 0.64 时所对应的级配。细集料的筛孔粒径为 4.75、2.36、1.18、0.60、0.30、0.15、0.08 mm 的通过率分别为 100.0%、63.8%、40.8%、26.4%、16.9%、10.8%和 6.9%。

3) 粗、细集料级配设计合成。根据粗、细集料设计的结果,对粗、细集料的级配进行合成,拟定混合料中的粗集料质量从 55%开始递增,每次增加 5%,设计 5 组混合料级配。合成级配,如表 4 所示。

表 4 混合料的合成级配

Tab. 4 Synthetic gradation of mixture

级配	$w_m/\%$									
	$l=31.50\text{ mm}$	$l=19.00\text{ mm}$	$l=9.50\text{ mm}$	$l=4.75\text{ mm}$	$l=2.36\text{ mm}$	$l=1.18\text{ mm}$	$l=0.60\text{ mm}$	$l=0.30\text{ mm}$	$l=0.15\text{ mm}$	$l=0.08\text{ mm}$
A	100	70.3	57.7	45.0	28.7	18.4	11.9	7.6	4.9	3.1
B	100	67.6	53.8	40.0	25.5	16.3	10.6	6.8	4.3	2.8
C	100	64.9	50.0	35.0	22.3	14.3	9.2	5.9	3.8	2.4
D	100	62.2	46.1	30.0	19.1	12.2	7.9	5.1	3.2	2.1
E	100	59.5	42.3	25.0	16.0	10.2	6.6	4.2	2.7	1.7

表 4 中:A、B、C、D、E 为 5 组级配,级配分别为 55 : 45,60 : 40,65 : 35,70 : 30,75 : 25; $w_m$  为混合料通过筛孔的质量分数。

在水泥掺量为 4% 下,测定水稳材料的 7 d 无侧限抗压强度和 7 d 劈裂强度( $R_t$ ),力学试验结果如图 4 所示。由图 4 可知:根据逐级填充法结合  $i$  法设计级配,5 组级配的强度呈先增大后减小的趋势,级配 C 的水稳材料间的嵌挤效果最佳,细集料能充分填充骨架结构的空隙,组成最优的骨架密实型结构。根据强度试验结果和试件成型密实的情况,最终确定级配 C 为掺入粉煤灰的水稳材料的级配。

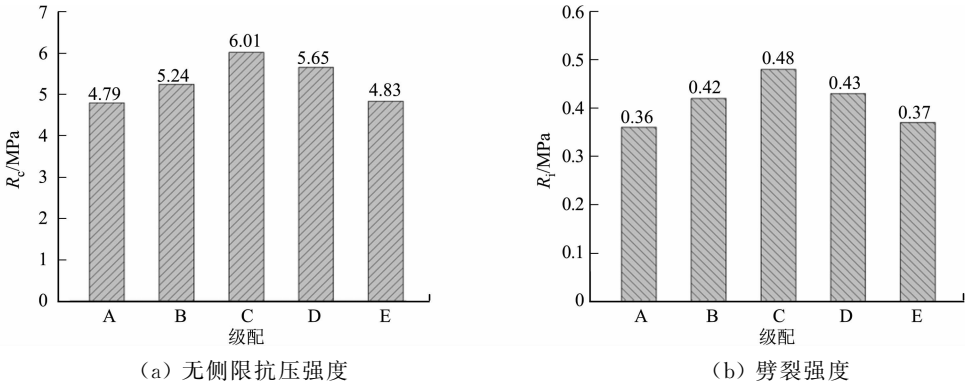


图 4 水泥掺量为 4% 的水稳材料力学试验

Fig. 4 Mechanical test of water stable material with 4% cement content

2.2 粉煤灰掺量的设计

粉煤灰掺量分别取 0%、3%、6%、9%、12%、15%、18%,水泥掺量为 4%,对 7 组试件(水稳材料)进行丙法击实试验。试件的最大干密度和最佳含水率,如表 5 所示。表 5 中: $w$ (CD)、 $w$ (FAD)、 $\rho_d$ 、 $w_b$  分别为水泥掺量,粉煤灰掺量、最大干密度和最佳含水率;S1~S7 为不同试件。

表 5 试件的最大干密度和最佳含水率

Tab. 5 Maximum dry density and optimum moisture content of specimens

试件	$w$ (CD)/%	$w$ (FAD)/%	$\rho_d$ /	$w_b$ /%
S1	4	0	2.370	5.1
S2	4	3	2.361	5.3
S3	4	6	2.329	5.7
S4	4	9	2.307	6.1
S5	4	12	2.265	6.9
S6	4	15	2.237	7.5
S7	4	18	2.202	8.2

2.3 粉煤灰最佳掺量的确定

1) 无侧限抗压强度。水稳材料在 4% 水泥掺量下,不同养护龄期的无侧限抗压强度变化,如图 5 所示。由图 5 可知:养护龄期为 3 d 时,试件 S6、S7 的抗压强度是试件 S1 的 71% 和 60%,说明粉煤灰掺量越多,早期的无侧限抗压强度会越小;随着养护龄期的增加,有无粉煤灰掺入的水稳材料,其抗压强度的差距越来越小;当养护龄期为 60 d 时,抗压强度呈现先增大后减小的趋势,试件 S4 的抗压强度达到峰值,其抗压强度是试件 S1 的 106%。

2) 劈裂强度。间接抗拉强度又称劈裂强度,能够侧面反映水泥稳定碎石混合料的抵抗开裂破坏能力,水稳材料在水泥掺量为 4% 下,不同养护龄期的劈裂强度变化,如图 6 所示。

由图 6 可得:早期的劈裂强度随着粉煤灰掺量的增加而减小;养护龄期 3 d 时,试件 S4 的劈裂强度是试件 S1 的 68%,14 d 龄期时,试件 S4 的劈裂强度是试件 S1 的 82%,当养护龄期为 60 d 时,劈裂强度随着粉煤灰掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,试件 S4 的劈裂强度为峰值,其劈裂强度是试件 S1 的 114%,后期掺有粉煤灰水稳材料的劈裂强度提升较为明显。

3) 最佳掺量的确定及原因。粉煤灰在水稳材料中起到两个方面的作用:一是填充;二是火山灰反应<sup>[19-20]</sup>。掺入的粉煤灰由于粒径较细会填充到水泥颗粒之间的空隙中,同时粉煤灰表面具有一定的活性,能够吸附水泥颗粒表面的离子和水分子,这一定程度上阻碍水泥与水的接触,从而延缓水泥的水化

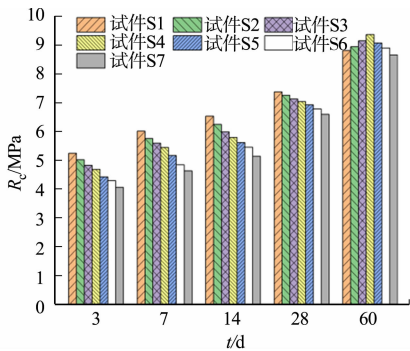


图 5 不同养护龄期的无侧限抗压强度变化  
Fig. 5 Changes of unconfined compressive strength at different age of curing

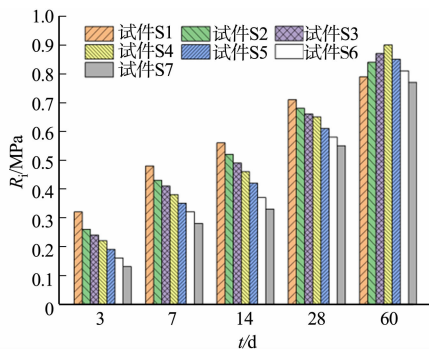


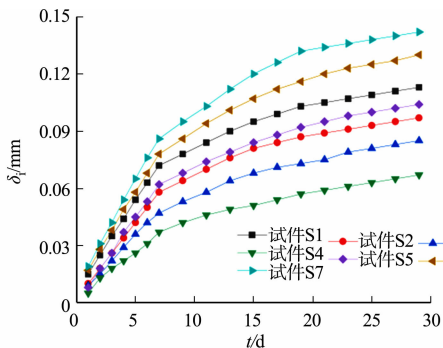
图 6 不同养护龄期的劈裂强度变化  
Fig. 6 Changes of splitting strength at different age of curing

速度。水化产物中的氢氧化钙等碱性物质能激发粉煤灰的活性，逐渐发生火山灰反应，不过这一反应速度相对缓慢。龄期越长，火山灰反应越充分，但因为水泥剂量有限，当粉煤灰超过一定质量分数时，多余的粉煤灰只起到填充作用。所以，早期的强度主要是依靠水泥的水化反应，后期时粉煤灰的活性发挥作用，产生更多地凝胶填充混合料间的空隙，水稳材料的强度也随之提高，最佳粉煤灰掺量为 9%。

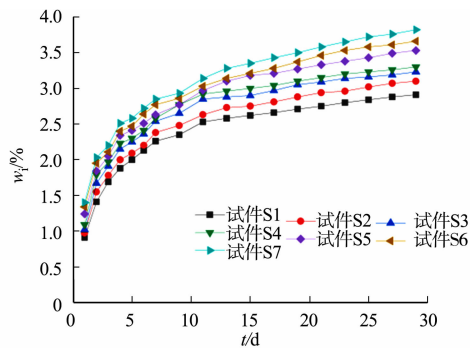
### 3 收缩性能试验

#### 3.1 干缩试验

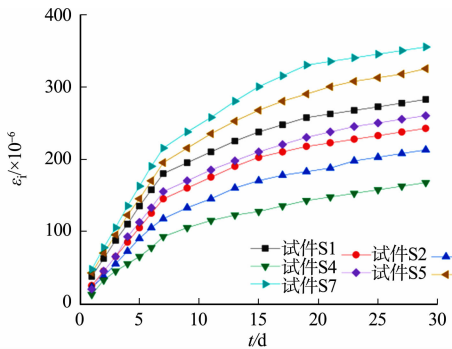
7 d 标准养护完成后，将梁式体试件表面的自由水擦净，放在底部放置有玻璃棒的收缩仪上，试件两侧固定玻璃片，千分表通过收缩仪两侧连接与玻璃片接触并固定。每隔 24 h 测一次试件的收缩量、失水量，7 d 后，每隔 48 h 测一次，观测周期 29 d，试验结束后，根据试件的收缩量和失水量计算其干缩应变和干缩系数。不同粉煤灰掺量下水泥稳定洞渣碎石的干燥收缩规律，如图 7 所示。图 7 中： $\delta_i$  为干缩量； $w_i$  为失水率； $\varepsilon_i$  为干缩应变； $\alpha_i$  为干缩系数。



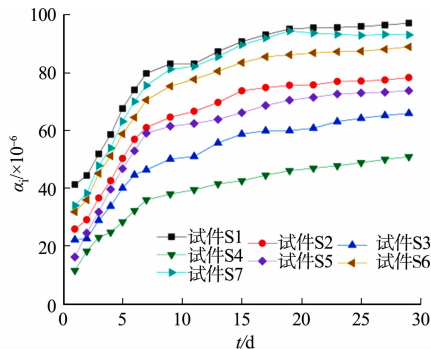
(a) 干缩量随着时间的变化



(b) 失水率随着时间的变化



(c) 干缩应变随着时间的变化



(d) 干缩系数随着时间的变化

图 7 不同粉煤灰掺量下水泥稳定洞渣碎石的干燥收缩规律

Fig. 7 Drying shrinkage of cement stabilized slag gravel under different fly ash dosages



由图 7 可知:水稳材料的累计干缩量和累计干缩应变随着时间的增加而增大,7 d 前增长速率是最快的,其中,试件 S4 的累计干缩量和累计干缩应变较低,试件 S5 累计干缩量、累计干缩应变明显大于试件 S1 的水稳材料;粉煤灰掺入的量越多,水稳材料的累计失水率越大。根据击实试验结果可以看出:粉煤灰掺量越多,水稳材料的最佳含水率越高,且早期的水分蒸发大部分来自于混合料内部的自由水,所以含水率高的试件,失水率也会相应偏大;相比试件 S1 的水稳材料,掺有粉煤灰的总干缩系数会更低。

由此可知,通过掺入粉煤灰可以改善水稳材料的干燥收缩影响,同时也存在着一个最优掺量,从干缩量、干缩应变及干缩系数来看,粉煤灰掺量为 6%~9% 的效果最好,当掺量为 9% 时,抵抗干缩能力最佳。早期时,粉煤灰在水稳材料中只起到填充作用,其有利于提高水稳材料的密实性,减小骨架结构的孔隙率,同时还减缓了水化反应的时间,使毛细水迁移的速率变慢;当粉煤灰掺入的量过多时,粉煤灰的比表面积较大,吸附水较多,后期的水分蒸发较强,因此,水稳材料的干缩相对增大<sup>[21]</sup>。

3.2 干湿循环收缩试验

在施工过程中,7 d 内没有发现裂缝扩产,但是 14~20 d 时突然出现开裂的现象,因此,水稳材料在经历干湿循环时,可能会出现较大的收缩导致开裂,所以室内采用干湿循环收缩试验进行模拟来探索规律。

试验方法如下:1) 将脱模出的试件放置水中浸泡 24 h;2) 擦拭浸泡试件表面的自由水,将试件置于温度为 90 ℃ 的烘箱内,烘干 12 h;3) 将烘干的试件放置在收缩仪上,测量其试件 2,6,12,24 h 的收缩量,最后计算累计收缩应变,这一过程结束为 1 次干湿循环试验。干湿循环试验结果,如图 8 所示。图 8 中: $n$  为循环次数。

由图 8 可知:试件在经历干湿循环后,当次干湿循环的收缩应变都大于 0 次时的收缩应变,说明干湿循环的经历是水稳材料长期暴露于表面,出现开裂的重要原因之一;随着循环次数增加,收缩应变的增长幅度会降低或趋于平缓。干湿循环 0 次时,相比于未掺入粉煤灰的水稳材料,掺入粉煤灰的累计收缩应变降低了 46.2%,第 5 次时降低了 35.3%,说明粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响,提高水稳材料在中后期抵抗收缩的能力。

5 次循环时间需要 13 d,对比 13 d 干缩试验结果的累计干缩应变,可以看出水稳材料早期未进行养护且经历干湿循环时,收缩应变会急剧增大,早期的强度还较低,收缩应变突然增大,这就有可能导致水稳材料产生开裂。实际现场施工完成后,应及时对水稳层进行养护覆盖,达到规定时间后,及时铺上层,减少干湿循环对水稳层的影响。

4 结论

1) 采用逐级填充法设计 3 档粗集料的掺配比例,当 3 档集料的比例为 60 : 40 : 30 时,混合料的振实密度最大,粗集料间的嵌挤作用最好;采用  $i$  法理论设计细集料级配,通过无侧限抗压强度和 CBR 试验确定最佳  $i$  为 0.64。最后,通过逐级填充法结合  $i$  法设计 5 组级配,当粗、细集料比例为 65 : 35 时,其无侧限抗压强度和劈裂强度较高。

2) 水稳材料随着粉煤灰掺量越多,早期的抗压强度和劈裂强度越小。当龄期达到 60 d 时,掺入粉煤灰水稳材料的力学性能明显优于未掺入粉煤灰的水稳材料,同时也存在最佳粉煤灰掺量为 9%,水泥的水化产物中的氢氧化钙等碱性物质能激发粉煤灰的活性,使粉煤灰发生火山灰反应,生成更多的凝胶有效提高水稳材料后期的强度。

3) 在水稳材料中掺入粉煤灰,可以改善其混合料整体的密实性,减缓毛细水迁移的速度,提高内部早期的粘结力,有效降低干缩量和干缩应变,水泥掺量为 9% 时抵抗干燥收缩的效果最佳。

4) 试件在经历干湿循环后,每次干湿循环的收缩应变都大于 0 次时的收缩应变,说明早期强度还没提高时水稳材料又经历了干湿循环,内部会急剧收缩,这就解释了工地上施工完成后未及时养护覆盖,中后期出现开裂的原因。掺入粉煤灰可以降低干湿循环作用的影响,提高水稳材料在中后期抵抗收缩的能力。

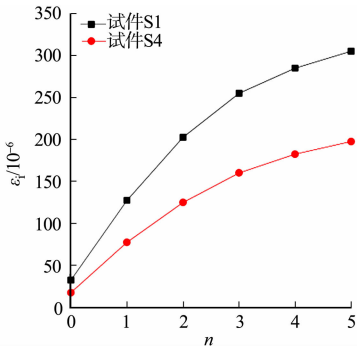


图 8 干湿循环试验结果  
Fig. 8 Dry-wetcycle test results

参考文献：

[1] 沈正伟,涂圣武. 石英砂岩隧道洞渣在路面基层中的应用[J]. 现代交通技术,2022,19(4):7-11,16. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-9889. 2022. 04. 002.

[2] 杨虎陈,晏永. 洞渣硬质砂岩水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 散装水泥,2022(5):183-185. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-3922. 2022. 05. 062.

[3] 涂圣武,沈正伟. 宜兴至长兴高速公路江苏段隧道洞渣综合利用研究[J]. 江苏建筑,2022(增刊 1):86-91. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-6270. 2022. z1. 021.

[4] XIE Zhiwei,LÜ Xilin,ZHANG Yan,*et al.* Study on mechanical property and breakage behavior of tunnel slag containing weak rocks as road construction material[J]. Construction and Building Materials,2024,411:134164. DOI: 10. 1016/J. constrbuildmat. 2023. 134164.

[5] 李增庆. 山区高速隧道洞渣在路面结构层中应用探析[J]. 交通建设与管理,2023(5):116-119.

[6] JING Chao,SHI Wenhua,WANG Ning,*et al.* Laboratory investigation of solid wastes combined with tunnel slag in cement stabilized base of asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials,2023,392:131807. DOI:10. 1016/J. constrbuildmat. 2023. 131807.

[7] 张华永. 岳武高速公路酸性洞渣分类及加工技术研究[J]. 交通节能与环保,2019,15(1):102-105. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-6478. 2019. 01. 027.

[8] SHANG Xiaodong,LIU Zhiqiang,ZHENG Jianhao,*et al.* Study on comprehensive utilization and management of tunnel slag in expressway[J]. E3S Web of Conferences,2020,145:02033. DOI:10. 1051/e3sconf/202014502033.

[9] 刘树堂,刘时俊,刘天林,等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2020,41(5):582-588. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201912039.

[10] 张丰焰,邸文锦,张硕文,等. 基于响应曲面法水泥稳定碎石混合料配合比设计研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(6):1125-1130. DOI:10. 3963/j. issn. 2095-3844. 2023. 06. 027.

[11] 冯德成,于飞,巩春伟. 基于体积法的水泥稳定级配碎石配合比设计方法[J]. 公路交通科技,2012,29(10):22-27, 32. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2012. 10. 005.

[12] 彭波,尹光凯,李海宁,等. 骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J]. 中外公路,2016,36(3):284-288. DOI:10. 14048/j. issn. 1671-2579. 2016. 03. 062.

[13] 杨宝帅,关博文,孙增智,等. 水泥稳定再生粗集料级配设计方法研究[J]. 长江科学院院报,2021,38(2):131-136. DOI:10. 11988/ckyyb. 20191386.

[14] 谭波,唐琛皓,陈平,等. 骨架密实型稳定碎石制备及性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2023,45(2):20-26. DOI: 10. 3963/j. issn. 1671-4431. 2023. 02. 004.

[15] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等. 玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2023, 44(5):114-120. DOI:10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2023. 02. 016.

[16] 胡勇勇,陶正文,周志刚,等. 胶粉纤维复合改性水泥稳定碎石路用性能研究[J]. 公路,2024,69(4):36-42.

[17] 乔建刚,张雪,徐阳,等. 水性环氧树脂对废旧材料水稳基层性能影响[J]. 热固性树脂,2023,38(4):34-39. DOI: 10. 13650/j. cnki. rgxs. 2023. 04. 007.

[18] 徐鸥明,王士珩,白敏,等. 粉煤灰与粒化高炉矿渣对水泥稳定碎石强度和收缩特性影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(2):509-515. DOI:10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2019. 0509.

[19] 徐鸥明,韩森,孙薇. 水泥粉煤灰稳定碎石强度增长特性[J]. 广西大学学报(自然科学版),2009,34(4):474-478. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-7445. 2009. 04. 008.

[20] 崔昌洪,张俊. 水泥粉煤灰稳定碎石力学特性研究[J]. 中外公路,2012,32(2):238-241. DOI:10. 3969/j. issn. 1671- 2579. 2012. 02. 058.

[21] 张阳,王傲鹏,张靖霖,等. 水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(2):297- 311. DOI:10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20220175.

(责任编辑：陈志贤      英文审校：方德平)