

# 固化风积沙底基层路用性能研究

苏跃宏, 吕川, 王晓敏, 任栋栋

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:**内蒙古风积沙资源丰富,将其应用于道路工程可减少天然砂石材料的消耗。该文主要对比了不同掺量下 FCS 型固化剂与冀东 32.5 级水泥固化风积沙试件的击实特性、强度特性、收缩特性、抗冻性及经济效益。结果表明:FCS 型固化剂固化风积沙密实度高于 32.5 级水泥,且最佳含水率与最大干密度随固化剂掺量的增加而增加;固化剂固化风积沙的无侧限抗压强度、劈裂强度均优于水泥,且强度随掺量增加而提高;8%与 10%固化剂固化风积沙的干缩、温缩应变都小于水泥,表现出更好的抗收缩性能;冻融循环作用下,混合料质量损失随掺量增加而减少,8%与 10%固化剂固化风积沙冻融 5 次后的抗冻系数为 73.67%和 71.01%,抗冻性优于 32.5 级水泥,适用于重冻区;固化剂原材料成本低于水泥,性价比更高。

**关键词:**FCS 型固化剂;风积沙;强度;收缩特性;抗冻性

## 1 前言

风积沙是经风吹、沉淀以后形成的沙层,具有黏聚力差、颗粒松散、颗粒表面活性低且级配不良等特性,广泛分布于中国西部的戈壁和沙漠。由于风积沙不易形成整体,难以在工程建设中应用,所以有必要研制风积沙固化剂,对其进行固化处理。目前,被人们广泛使用的固化材料包括水泥、粉煤灰、石灰等。固化材料与砂加水拌和后,混合料内部进行一系列物理化学反应,在砂粒间产生黏结物质,达到固化风积沙的效果。对不同材料固化风积沙进行强度及耐久性试验,学者们研制出各种类型的风积沙固化剂,其中部分固化剂得到成功应用和推广。另一方面,粉煤灰作为煤燃烧后的残留物,若将其应用于建筑领域,既能减少土地占用,又可以变废为宝。宋亮研究了粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收率强度和收缩性能的影响,并确定了粉煤灰的最佳掺量;邹桂莲采用水泥粉煤灰作为结合料稳定再生骨料,研究了各因素对水泥粉煤灰稳定碎石路用性能的影响效果。

该文以 FCS 型固化剂固化风积沙作为研究对象,进行击实试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验、干缩试验、温缩试验及冻融循环试验,与冀东 32.5 级水泥进行对比,研究其作为底基层材料的路用性能及经济效益。

## 2 试验材料

### 2.1 风积沙

风积沙取自内蒙古库布其沙漠,对风积沙进行筛分试验,结果见表 1。

表 1 风积沙粒径分布

筛孔尺寸/mm	质量百分比/%
<0.075	4.4
0.075~0.25	77.1
0.25~0.5	15.7
>0.5	2.8

### 2.2 固化剂

FCS 型固化剂是以高钙粉煤灰为基质材料的固化剂,通过水泥粉煤灰胶砂试验,确定其配合比为:粉煤灰:石灰:石膏:激发剂:增强材料 A:交联剂 B=60:21.3:3:1.5:14:0.2。粉煤灰化学成分见表 2,其主要成分为  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$  和  $CaO$ ,且  $CaO$  含量为 18.08%(>10%),属于高钙粉煤灰;石灰选用二级石灰;石膏为  $\alpha$  半水石膏( $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ )。激发剂为自制的粉煤灰活性激发剂。增强材料 A 可以提升固化效果,是固化剂的重要组成部分。交联剂 B 为高分子聚合物。对比试验选取的水泥为冀东 32.5 级普

通硅酸盐水泥,密度为  $2.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,细度为 1.2%,标准稠度用水量为 30.2%,体积安定性合格,

初凝时间为 264 min,终凝时间为 347 min,烧失量为 1.03%。

表 2 粉煤灰主要化学成分

SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	其他
40.2	2.34	8.56	18.0	18.1	1.31	1.7	5.1	0.7	0.7	0.9	0.58

### 3 击实特性

#### 3.1 风积沙击实试验

风积沙击实试验选用重型击实,按照规程进行,试验结果见图 1。

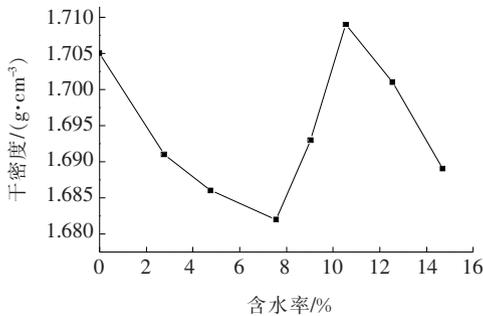


图 1 风积沙击实曲线

由图 1 可知:随着含水率增加,风积沙干密度呈现先降低后上升再降低的变化规律。当含水率为 10.54%时,风积沙干密度值最大,为  $1.709 \text{ g/cm}^3$ 。

#### 3.2 混合料击实试验

成型试件前必须要进行击实试验,确定不同混合料的最大干密度和最佳含水量。依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行固化剂和水泥掺量为 6%、8%、10% 混合料的击实试验。结果如表 3 所示。

表 3 击实试验结果

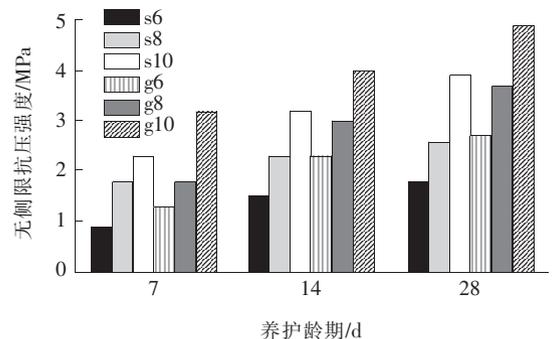
固化材料	掺量/ %	最优含水率/ %	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
固化剂	6	11.42	1.79
	8	11.85	1.83
	10	12.15	1.85
32.5 级水泥	6	12.89	1.77
	8	12.61	1.80
	10	12.38	1.83

表 3 表明:随着固化剂与水泥掺量增加,混合料最大干密度都增加。同掺比情况下,固化剂固化风积沙

### 4 固化风积沙路用性能研究

#### 4.1 无侧限抗压强度试验

依据击实试验结果制备材料,压实度控制为 95%,采用  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  圆柱形试模,试件制作与养护严格按照规范要求,养护 7、14、28 d 后进行无侧限抗压强度试验,结果如图 2 所示。



(注:图中 s 代表水泥,s6 代表水泥掺量 6%,g 代表 FCS 型固化剂,其他类似,下同)

图 2 各龄期下不同混合料无侧限抗压强度

由图 2 可知:随养护龄期增长,试件抗压强度提高。各龄期下的固化剂固化风积沙强度都高于同掺量水泥固化的强度,而且固化剂掺量对试件抗压强度影响较大。固化剂掺量为 8% 和 10% 的抗压强度比 6% 高出 0.5、1.9 MPa。随着养护龄期增长,混合料无侧限抗压强度也在继续增大。相比 7 d 的强度,养护 28 d 后分别提高了 1.4、1.9、1.7 MPa。依据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》可知:6% 固化剂掺量满足规范中水泥粉煤灰稳定类底基层二级及二级以下公路中、轻交通的要求;8% 固化剂掺量满足二级及二级以下公路重交通的要求;10% 固化剂掺量满足高速公路和一级公路底基层的强度要求。

固化剂固化风积沙试件能达到上述强度是因为固化剂与风积沙拌和后,石灰与水反应产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

创造了碱性环境,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与粉煤灰中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  发生火山灰反应, 生成的胶凝物质填充了砂颗粒间的空隙并将其胶结起来。同时, 激发剂促进了粉煤灰早期的火山灰活性发挥速度, 使得固化剂固化风积沙有更高的强度。

#### 4.2 劈裂强度试验

劈裂强度间接反映了半刚性基层的抗拉性能, 是路面设计的一个重要参数。试件尺寸与制作同无侧限抗压强度试件, 养护龄期为 7、28、90 d, 达到养护龄期后浸水 24 h 测其劈裂强度, 结果如图 3 所示。

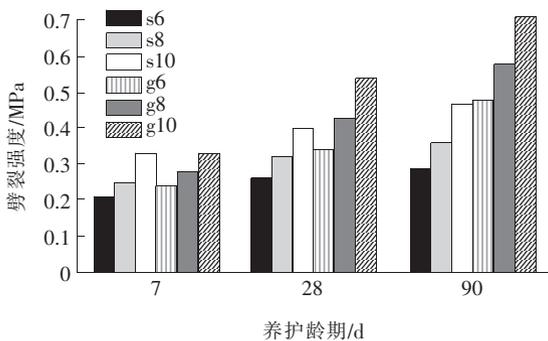


图 3 各龄期下不同混合料劈裂强度

由图 3 可知: 劈裂强度随着养护龄期的增长而增长, 且同掺量的固化剂强度均高于水泥, 表明固化剂固化风积沙的抗拉性能强于水泥。固化剂掺量为 6% 对应 7 d 劈裂强度为 0.24 MPa, 与同掺量水泥劈裂强度相近, 但随着龄期增长, 掺加固化剂的劈裂强度增长幅度远大于水泥固化风积沙的劈裂强度。与 7 d 的养护龄期相比, 养护 90 d 后 6%、8%、10% 固化剂固化风积沙的劈裂强度增长了 0.24、0.30、0.38 MPa, 增速达到 1 倍以上。一方面, 固化剂内部不断反应, 生成水化硅酸钙, 水化硅铝酸钙等胶凝材料将砂粒黏结在一起; 另一方面, 固化剂中存在高分子聚合物, 在试件内部形成相互连接的“桥路”, 两者的协同作用提高了固化风积沙的抗拉性能。

#### 4.3 干缩试验

基层材料的干燥收缩是由于内部水分的不断减少导致的, 宏观上表现为试件体积变化。干缩达到一定程度后会使得基层材料产生裂缝, 影响道路正常使用。试件规格为 100 mm × 100 mm × 400 mm, 固化剂和水泥掺量为 8% 和 10%。试件成型、养护及试验操作依据规范进行。试验结果如图 4 所示。

图 4 表明: 不同掺量固化剂和水泥固化风积沙的累计失水率和累计干缩应变与时间的关系曲线变化趋势大致相同, 都表现为先快后慢。在试验开始的 2 d

内试件内部失水量较大, 从 3 d 开始失水速率逐渐减小, 到 7 d 趋于稳定。而累积干缩应变在试验前 7 d 内增长较快, 7 d 后开始变慢。同掺量的固化剂与水泥相比, 失水量更小, 这是由于粉煤灰内部存在不参与反应的微颗粒填充了砂颗粒间的空隙阻碍了毛细水的迁移, 进而减少了水分蒸发。

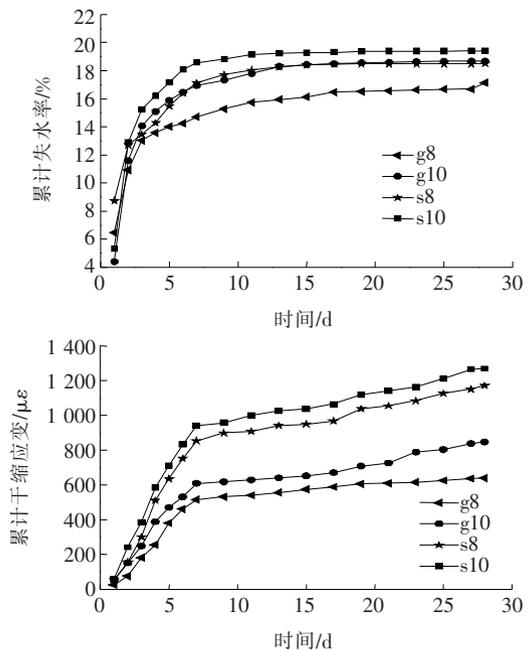


图 4 干缩试验结果

#### 4.4 温缩试验

温缩试验试件尺寸及制作与干缩试验相同, 将养生 7 d 后的试件烘干 12 h 后贴应变片, 放入高低温交变箱中设置温度区间为  $-15 \sim 45$  °C, 温度降低速率为 0.5 °C/min。将采集的数据计算结果绘制 4 种混合料的温缩系数与温度关系图(图 5)。

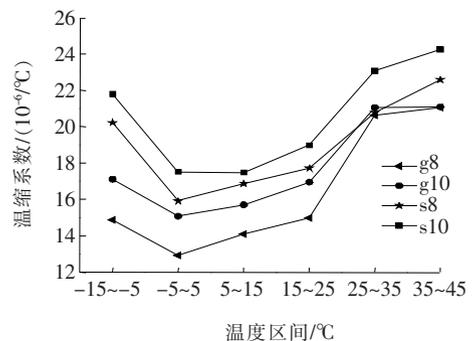


图 5 温缩系数曲线

由图 5 可知: 随着温度升高, 4 种混合料的温缩系数都表现为先降低后增大, 在  $-5 \sim 5$  °C 出现最小值, 因为这个温度区间内, 材料内部部分自由水及重力水开始结冰, 产生的膨胀力抵消掉部分温缩变形。在

-15~-5℃及温度大于25℃时温缩系数较大,说明固化剂固化风积沙会在寒冷或者高温时产生较大的温缩变形。同掺比的固化剂与水泥相比,温缩系数较小,说明其抵抗温缩变形的能力强于水泥。

#### 4.5 冻融循环试验

多次冻融循环作用后仍具有一定强度的性质称为材料的抗冻性。此次试验以冻融过程中的质量损失率和抗冻系数来评价混合料的抗冻性。试件规格为 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ ,每组18个试件,一半为冻融件,其余为对比件。试验操作按照规范进行。冻融试验结果如图6和表4所示。

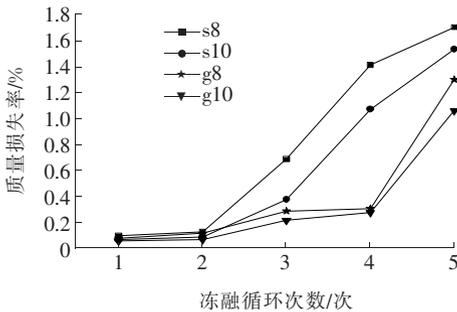


图6 不同冻融次数下试件质量损失率

表4 试件冻融循环5次后抗冻系数

固化材料	掺比/%	$R_{DC}/\text{MPa}$	$R_C/\text{MPa}$	$BDR/\%$
固化剂	8	1.4	1.9	73.67
	10	1.6	2.3	71.01
水泥	8	1.0	1.5	71.12
	10	1.3	2.0	67.52

注: $R_{DC}$ 为 $n$ 次冻融循环后试件的抗压强度; $R_C$ 为对比试件的抗压强度; $BDR$ 为经 $n$ 次冻融循环后试件的抗压强度损失,即抗冻系数。

由图6可知:在试验初期,4种混合料的质量损失基本相同,但从第3次开始,质量损失速率快速增加。相同掺量的固化剂与水泥相比,前者质量损失更少,完成5次冻融循环后,水泥固化风积沙的质量损失率比固化剂高0.4%。固化剂掺量越高,试件强度损失与质量损失越少。8%和10%固化剂固化风积沙完成5次冻融循环后的抗冻系数都大于70%,满足重冻区对石灰粉煤灰稳定类结构层的抗冻要求。

#### 4.6 经济效益分析

对FCS型风积沙固化剂经济效益进行分析,表5为10%固化剂和10%的32.5级水泥固化1t风积沙的费用对比结果。

表5 掺加剂费用分析结果

项目	单价/(元·t <sup>-1</sup> )	掺量/kg	费用/(元·t <sup>-1</sup> )
风积沙	45	1 000.00	45.00
粉煤灰	173	66.67	11.53
石灰	261	23.67	6.18
石膏	315	3.33	1.05
激发剂	2 058	1.67	3.44
交联剂	1 568	0.22	0.35
增强材料 A	467	15.56	7.27
32.5 级水泥	318	111.11	35.33

注:按照内掺法计算掺加剂的质量。

由表5可知:在10%的掺量下,FCS型固化剂固化1t风积沙所用材料的总费用为74.82元,而32.5级水泥固化则需要80.33元。因此FCS固化剂相比32.5级水泥固化风积沙所需成本更底,是一种优良的固化材料。

## 5 结论

(1) FCS型固化剂固化风积沙最优含水率和最大干密度随固化剂掺量增加而增加,相同掺比下都大于冀东32.5级水泥。

(2) 相同条件下,FCS型固化剂固化风积沙的无侧限抗压强度、劈裂强度都高于水泥。随掺量的增加,强度也在不断增加。固化剂掺量一定时,强度随龄期快速增长,强度增长速率高于同掺比的水泥。

(3) 4种混合料的累计失水率和累计干缩应变均呈现先快后慢的增长趋势。从第7d开始,失水率趋于稳定。此时,试件的干缩应变速率也开始变慢。FCS型固化剂固化风积沙的干缩应变小于水泥,抗干缩性能更强。

(4) 4种混合料的温缩变化曲线为先降低后增加,在-5~5℃出现最小值,在-15~-5℃及温度大于25℃时温缩系数较大。相同掺比的固化剂与水泥相比,温缩系数更小,抗温缩性能更好。

(5) 冻融循环5次以后,掺量为8%和10%的固化剂固化风积沙的质量损失及强度损失都低于水泥,抗冻系数大于70%,达到重冻区的要求,抗冻性能强于32.5级水泥。

(6) FCS型固化剂比32.5级水泥更具有经济效益,固化1t风积沙所需费用比水泥低5.51元。