

# 砂复合改性淤泥路用水稳性试验研究

柴芮祥<sup>1,2</sup>, 吴恺<sup>1,2</sup>, 叶薇<sup>3</sup>, 崔锦梅<sup>4</sup>, 王继成<sup>2\*</sup>, 李占涛<sup>2</sup>

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波宁大地基处理技术有限公司, 浙江 宁波 315000; 4. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:**砂复合改性淤泥作为砂与土的介质耦合体,与传统改性淤泥相比有所不同。为进一步研究其水稳性指标,通过正交设计法对砂复合改性淤泥进行水稳性室内模拟试验(地表渗水试验、地下毛细水试验以及干湿循环试验),采用无侧限抗压强度变化率表征改性淤泥的水稳性指标。试验结果表明:改性淤泥的无侧限抗压强度以及水稳性都有所提高。在不同的水扰动条件下海砂掺量、压实度、龄期对改性淤泥水稳性影响主次顺序有所不同,各因素分析图中三因素与水稳性都表现为正相关变化。实际工程中可以综合考虑海砂掺量、压实度、龄期来提高宁波地区改性淤泥路用水稳性要求。

**关键词:**砂复合改性淤泥;正交试验;无侧限抗压强度;水稳性

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

砂复合改性淤泥是在水泥、石灰传统改性剂基础上添加适宜掺量的海砂或河砂作为骨料的改性土混合料。砂本身无黏聚力,但其具有较好的压实性以及透水性等物理性能,通过与水泥石灰的水化产物黏结形成密实型混合料,且淤泥本身的黏聚力也有利于混合料黏结。

传统水泥—石灰改性淤泥路用性能研究方面已取得一定的成功经验,但在宁波某改性淤泥路用试验段中发现存在水稳性不足等问题,海砂在工程中的诸多应用证明其能够改善混合料性能以及渗透系数<sup>[1-2]</sup>,相比其他新型添加剂成本更低<sup>[3-6]</sup>。笔者在已有研究中发现,相比传统水泥+石灰改性淤泥,掺入适宜砂量可使其强度得到明显提升。对于多降雨以及高地下水位的宁波地区,砂复合改性淤泥的应用关键在于水稳性能。关于改性土水稳性研究方法主要有干湿循环、地下饱水试验以及泡水试验<sup>[7-9]</sup>等。

本文在现有水稳研究方法上,加入地表渗水试验,综合采用地表渗水、地下毛细水以及干湿交替3种不同水环境进行水稳性测试,渗水试验相比其他

两种环境对试样的水扰动更加剧烈,对改性淤泥的水稳性要求也更高。同时结合正交设计方法进行试验研究,减少试验量的同时得出砂复合改性淤泥水稳性因素主次顺序以及影响规律。

## 1 试验材料及其性质

(1) 砂。已有研究表明:在5%石灰、3%水泥改性淤泥的基础上分别掺入0、5%、10%、20%海砂(表1)或者河砂对改性淤泥无侧限抗压强度有明显的提升,由于海砂资源在沿海城市储量丰富、价格低廉,更具有工程应用价值。本文对以上不同海砂掺量复合改性淤泥水稳性进行研究。

表1 海砂基本性能指标

粒径/ mm	堆积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	氯离子/ %	贝壳含 量/%
<5	1.566	2.806	1.6	0.086	0.262

(2) 水泥、石灰。试验使用的水泥为江西省某水泥厂生产的P.O42.5普通硅酸盐水泥。石灰为江西新余生产的含钙95%生石灰粉。

(3) 淤泥。试验淤泥土样取自浙江省宁波市江

收稿日期:2021-12-30

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51508283)

作者简介:柴芮祥,男,硕士研究生.E-mail:394014797@qq.com

\*通信作者:王继成,男,博士,副教授.E-mail:wjc1818@zju.edu.cn

北区地铁站基坑开挖的淤泥,液限39.8%、塑限22.2%、天然含水率44.7%。按照击实试验的最优含水量和最大干密度制备50 mm×50 mm试样。击实以及试样制作过程参照《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)<sup>[10]</sup>以及《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)<sup>[11]</sup>。砂复合改性淤泥击实试验以及早期强度试验结果如表2所示。

表2 砂复合改性淤泥击实及7 d无侧限抗压强度试验结果

海砂含量/ %	最优含水率/ %	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/ MPa
0	16.10	1.71	1.15
5	15.80	1.72	1.21
10	15.70	1.76	1.38
20	15.80	1.81	1.22

表2结果表明:①海砂的掺入使改性淤泥的最优含水率减小,最大干密度增加,两者变化范围较小;②小掺量海砂对改性淤泥强度影响较小,海砂掺量在5%~10%时增加最为明显,当砂掺量超过10%后改性土强度开始有下降的趋势。说明适宜掺量的砂在混合料中起到了骨料的作用,提升了改性土颗粒间的黏聚力,当砂掺量过多时砂石骨料比表面积增大,不能够完全被水化合物包裹,降低了混合料的保水能力以及黏聚力,使得强度下降。

2 试验方法

2.1 水稳性试验方法

2.1.1 地表渗水模拟试验

长期降雨、洪涝等恶劣天气下可能导致地表水渗流到面层以下。为研究积水状态对路基土性能的影响,把养护到规定龄期的试件放入φ50 mm PVC管中,并用石蜡密封处理,将PVC管中水头控制在400 mm左右下渗水1 d、3 d、5 d。测试不同渗水时间后抗压强度以及含水率,并用渗水1~5 d内试样强度变化率表征其水稳性能。

2.1.2 地下毛细水试验

地下水可以通过负孔隙压力进入路基进而影响路的使用寿命。借鉴目前饱水试验方案对海砂复合改性土进行地下毛细水试验<sup>[7]</sup>。将养护至规定龄期的试样室内风干1 d后放入水槽中的透水石上进行吸水,分别测试吸水0、1 d、2 d、3 d、4 d后试件的抗压强度以及含水率,计算吸水0~4 d后改性淤泥抗压强

度的折损情况以反映水稳性能。

2.1.3 干湿循环试验

将养护完成的试样“风干1 d-在透水石上吸水1 d”为一次干湿循环,循环次数*N*取0、1次、3次、5次,测试干湿循环后试件的无侧限抗压强度及含水率变化。通过计算干湿0~5次后抗压强度折损率以反映改性淤泥水稳性能。

2.2 正交试验方法

以上3种水稳试验均按照正交试验设计组进行制样,每组试验做3个平行试样。制样时以5%石灰与3%水泥为基准,变量因素包含:砂掺量、压实度、龄期,并留出空白列进行误差分析。采用L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)进行正交试验设计,因素水平如表3所示,正交试验表见表4。通过对试验结果进行直观分析、方差分析(显著性水平α=0.05)以及各因素水平影响分析,探究海砂掺量、龄期、压实度对淤泥改性土水稳性影响的主次顺序以及变化规律。

表3 正交试验因素水平

水平	海砂掺量/%	压实度/%	龄期/d	水平	海砂掺量/%	压实度/%	龄期/d
1	0	93	7	3	10	98	28
2	5	95	14				

表4 正交试验表

试验编号	海砂掺量/%	压实度/%	龄期/d	试验编号	海砂掺量/%	压实度/%	龄期/d
1	0	93	7	6	5	98	7
2	0	95	14	7	10	93	28
3	0	98	28	8	10	95	7
4	5	93	14	9	10	98	14
5	5	95	28				

3 试验结果及分析

首先对水稳性试验每个阶段中试样强度、含水率的变化进行分析,得出混合料强度与含水率的变化规律。然后对水稳性指标进行正交分析,得出砂掺量、压实度、龄期三因素对水稳性的影响规律。本文采用水稳性试验整个过程的无侧限抗压强度变化率表征水稳性指标。

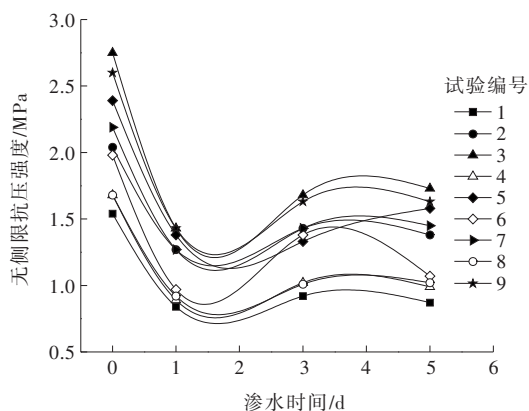
3.1 不同地表渗水时间改性淤泥抗压强度及含水量

渗水0、1 d、3 d、5 d后,各组试样的抗压强度及含水率测试结果如表5所示。渗水5 d后试样如图1所示。

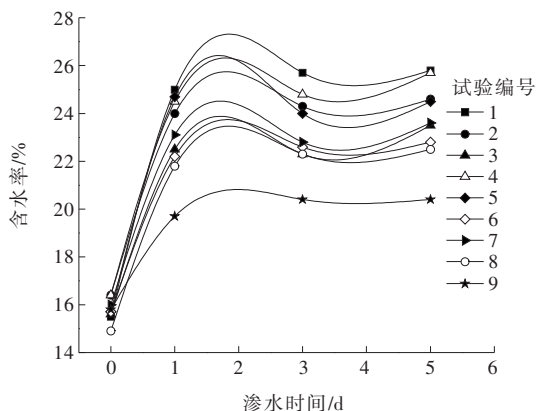
由表5可知:①改性淤泥在渗水0~5 d的过程中

表 5 渗水后改性淤泥强度及含水率变化值

试验 编号	不同渗水时间(d)后无侧限抗压 强度(MPa)/含水率(%)				渗水 5 d 与 1 d 强度变 化率/%
	0	1	3	5	
1	1.54/15.7	0.84/25.0	0.92/25.7	0.87/25.8	3.6
2	2.04/16.0	1.27/24.0	1.43/24.3	1.38/24.6	8.7
3	2.75/15.6	1.43/22.5	1.68/22.3	1.68/23.5	17.5
4	1.68/16.3	0.92/24.5	1.02/24.8	0.99/25.7	7.6
5	2.39/15.7	1.38/24.7	1.33/24.0	1.58/24.5	14.5
6	1.98/15.4	0.97/22.2	1.38/22.6	1.07/22.8	10.3
7	2.19/16.0	1.27/23.1	1.43/22.8	1.48/23.6	16.5
8	1.68/15.3	0.92/21.8	1.01/22.3	1.02/22.5	10.9
9	2.60/15.8	1.43/19.7	1.63/20.4	1.63/20.4	14.0



(a) 无侧限抗压强度变化曲线



(b) 含水率变化曲线



(c) 渗水 5 d 后试样

图 1 各组试样渗水后无侧限抗压强度、含水率变化曲线以及渗水 5 d 后试样

抗压强度并不是一直呈下降趋势,渗水 1 d 强度减小最为明显,之后有小幅度的增长趋势,且渗水 5 d 后试样表面有大量氢氧化钙析出,说明首次水扰动对试样的影响最为明显,且水从试样穿过的同时会带出氢氧化钙晶体,进而影响混合料的强度指标;② 随着渗水时间的增加,改性淤泥试件的含水率升高,3 d 后基本趋于稳定,说明改性淤泥具有一定的保水性;③ 对比改性淤泥强度与含水率变化情况可以发现渗水 5 d 后含水率较大的试样强度相对较低,说明试样渗水后的抗压强度与其吸水能力相关。

### 3.1.1 直观分析

考虑此试验装样前进行了轻微的削样以满足 PVC 管径,造成少量强度损失。水稳指标从装样后开始计算,统计渗水 1~5 d 内的抗压强度变化率,与后两种水稳性评定标准有所不同。通过直观分析得出海砂掺量、压实度、龄期对改性淤泥水稳性影响的主次顺序。

直观(极差)分析表中极差值越大,说明该因素的影响越强。由表 6 可知:对改性淤泥水稳性影响的主次顺序为:龄期>压实度>海砂掺量,贡献率分别为 50.1%、28.6%、21.3%。

表 6 水稳性极差分析表

试验 编号	海砂掺 量/%	压实度/ %	龄期/ d	空白列	渗水 5 d 与 1 d 后 强度变化率/%
1	1	1	1	1	3.6
2	1	2	2	2	8.7
3	1	3	3	3	17.5
4	2	1	2	3	7.6
5	2	2	3	1	14.5
6	2	3	1	2	10.3
7	3	1	3	2	16.5
8	3	2	1	3	10.9
9	3	3	2	1	14.0
均值 1	9.933	9.267	7.933	10.700	
均值 2	10.900	11.033	10.200	11.767	
均值 3	13.400	13.933	16.100	11.767	
极差	3.467	4.666	8.167	1.067	

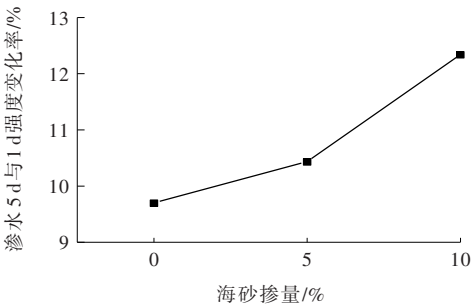
### 3.1.2 方差分析

通过方差分析各因素对水稳性影响显著性水平结果如表 7 所示,同时绘出各因素水平影响趋势图如图 2 所示。

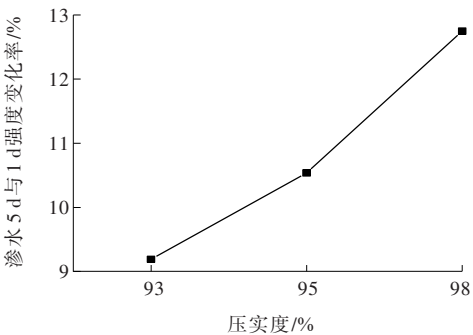
由表 7 和图 2 可知:① 各因素不同水平对应的试验结果差异由因素水平不同引起,龄期在渗水试验

表7 方差分析表

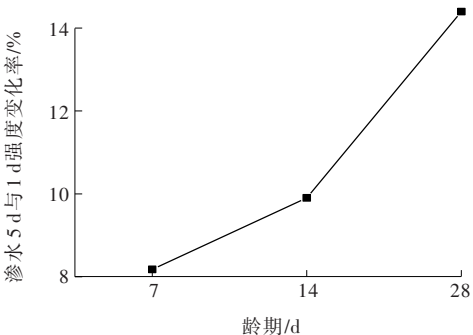
因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
海砂掺量	19.202	2	8.437	19.000	
压实度	33.309	2	14.635	19.000	
龄期	106.642	2	46.855	19.000	显著
空白列	2.276	2	1.000	19.000	
误差	2.28	2			



(a) 海砂掺量与强度变化曲线



(b) 压实度与强度变化曲线



(c) 龄期与强度变化曲线

图2 各因素水平对强度变化影响趋势图

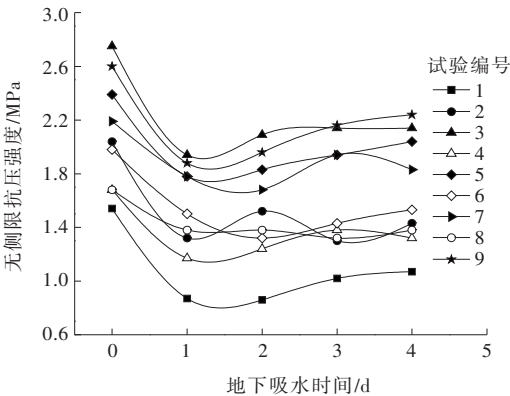
中对改性淤泥水稳性影响显著性最高,  $F$  比为 46.855, 压实度、海砂掺量相对较低分别为 14.635、8.437, 主次顺序与极差分析结果一致: 龄期 > 压实度 > 海砂掺量; ② 由因素分析关系图可看出三因素与水稳性均呈正相关变化, 随着因素水平的增加水稳性也有所提高, 与传统水泥石灰改性淤泥相比水稳性有所提升。

3.2 不同毛细水作用时间改性淤泥强度与含水率  
分别测试各组试样吸水 0、1 d、2 d、3 d、4 d 的无

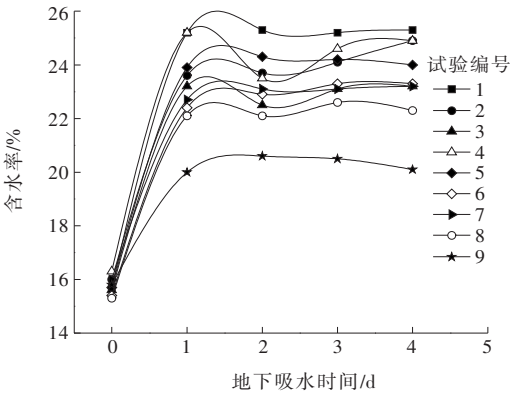
侧限抗压强度及含水量结果如表 8、图 3 所示。

表8 毛细吸水后改性淤泥强度及含水变化值

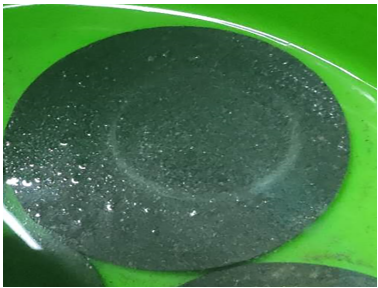
试验 编号	不同饱水时间(d)后抗压强度(MPa)/含水率(%)					强度 折损 率/%
	0	1	2	3	4	
1	1.54/15.7	0.87/25.2	0.86/25.3	1.02/25.2	1.07/25.3	30.5
2	2.04/16.0	1.32/23.6	1.52/23.7	1.30/24.1	1.43/24.9	29.9
3	2.75/15.6	1.94/23.2	2.09/22.5	2.14/23.1	2.14/23.2	22.2
4	1.68/16.3	1.17/25.2	1.24/23.5	1.38/24.6	1.32/24.9	21.4
5	2.39/15.7	1.78/23.9	1.83/24.3	1.94/24.2	2.04/24.0	14.6
6	1.98/15.4	1.50/22.4	1.32/22.9	1.43/23.3	1.53/23.3	22.7
7	2.19/16.0	1.78/22.7	1.68/23.1	1.94/23.1	1.83/23.2	16.4
8	1.68/15.3	1.38/22.1	1.38/22.1	1.32/22.6	1.38/22.3	17.9
9	2.60/15.8	1.88/20.0	1.96/20.6	2.16/20.5	2.24/20.1	13.8



(a) 无侧限抗压强度变化曲线



(b) 含水率变化曲线



(c) 吸水 4 d 后透水石

图3 各组试样吸水后无侧限抗压强度、含水率变化  
曲线以及透水石



由表8和图3可以看出:①毛细水作用下第1天强度减小最为明显,之后同样出现缓慢增长的趋势,毛细水作用4 d后试样表面无明显变化其透水石上出现少量白色氢氧化钙,说明毛细水作用对混合料中晶体的扰动较小,水扰动没有渗水试验剧烈;②随着毛细水作用时间的增加,改性淤泥试件的含水率先升高,然后趋于稳定。试样吸水4 d后含水率较高者抗压强度相对较低。说明毛细水作用下改性淤泥强度下降的主要原因是由于含水率上升导致,混合料中氢氧化钙析出是次要原因。

### 3.2.1 直观分析

极差分析结果如表9所示,水稳性由吸水0~4 d后强度折损率为评定标准。由表9可以看出:各因素对改性淤泥水稳性影响的主次顺序为:海砂掺量>龄期>压实度。

表9 直观分析表

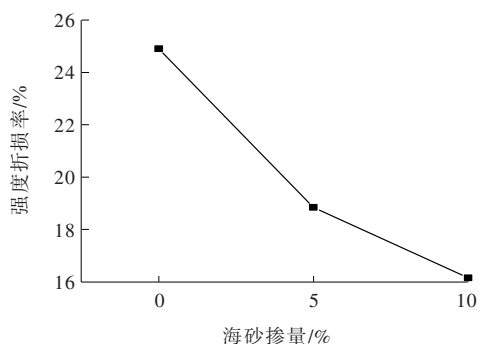
试验 编号	海砂掺 量/%	压实度/ %	龄期/ d	空白列	强度折损 率/%
1	1	1	1	1	30.5
2	1	2	2	2	29.9
3	1	3	3	3	22.2
4	2	1	2	3	21.4
5	2	2	3	1	14.6
6	2	3	1	2	22.7
7	3	1	3	2	16.4
8	3	2	1	3	17.9
9	3	3	2	1	13.8
均值1	27.533	22.767	23.700	19.633	
均值2	19.567	20.800	21.700	23.000	
均值3	16.033	19.567	17.733	20.500	
极差	11.500	3.200	5.967	3.367	

### 3.2.2 方差分析

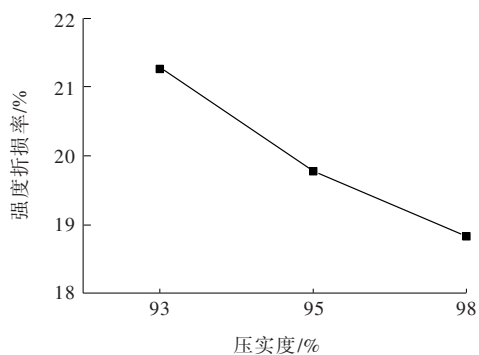
吸水试验水稳性方差分析结果与各因素水平影响趋势如表10、图4所示。

表10 方差分析表

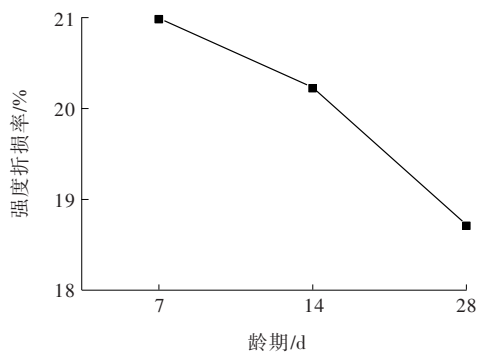
因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
海砂掺量	208.202	2	13.322	19.000	
压实度	15.629	2	1.000	19.000	
龄期	55.336	2	3.541	19.000	
空白列	18.336	2	1.173	19.000	
误差	15.630	2			



(a) 海砂掺量与强度变化曲线



(b) 压实度与强度变化曲线



(c) 龄期与强度变化曲线

图4 各因素的水平对强度变化影响趋势图

由表10及图4可知:①改性淤泥在地下毛细水作用下水稳性能影响的主次顺序为:海砂掺量>龄期>压实度,海砂对改性淤泥水稳性影响显著,龄期、压实度显著性较低;②吸水后改性淤泥的强度折损率与海砂掺量、压实度、龄期呈负相关,说明改性淤泥水稳性随着三因素水平的提高而提高,与传统水泥石灰改性淤泥相比水稳性有所提升。

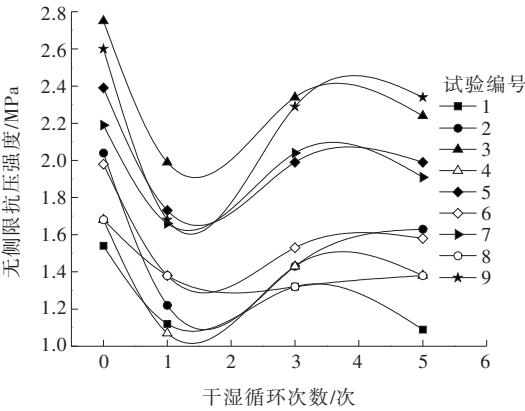
### 3.3 不同干湿循环改性淤泥强度及含水率

各组试样干湿循环0、1次、3次、5次后的无侧限抗压强度及含水量变化情况如表11、图5所示。

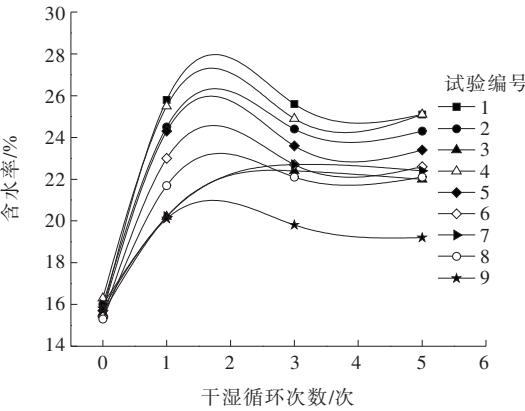
由表11、图5可以看出:①干湿循环作用下试样强度先减小后增大,增幅较大,但小于初始状态强度,试件的含水率先升高后趋于稳定,干湿循环

表 11 干湿循环后改性淤泥强度及含水变化值

试验 编号	不同干湿次数(次)后抗压强度(MPa)/含水率(%)				强度折 减率/%
	0	1	3	5	
1	1.54/15.7	1.12/25.8	1.32/25.6	1.09/25.1	29.2
2	2.04/16.0	1.22/24.5	1.43/24.4	1.63/24.3	20.1
3	2.75/15.6	1.99/20.2	2.34/22.4	2.24/22.0	18.5
4	1.68/16.3	1.07/25.5	1.43/24.9	1.38/25.1	17.9
5	2.39/15.7	1.73/24.3	1.99/23.6	1.99/23.4	16.7
6	1.98/15.4	1.38/23.0	1.53/22.7	1.58/22.6	20.2
7	2.19/16.0	1.66/20.2	2.04/22.7	1.91/22.4	12.8
8	1.68/15.3	1.38/21.7	1.32/22.1	1.38/22.1	17.9
9	2.60/15.8	1.68/20.1	2.29/19.8	2.34/19.2	10.0



(a) 无侧限抗压强度变化曲线



(b) 含水率变化曲线

图 5 各组试样干湿后无侧限抗压强度及含水率变化曲线

后试样以及透水石上无明显氢氧化钙析出,说明干湿循环条件对混合料的扰动最小;② 干湿循环后改性淤泥同样表现出含水率较高的试样抗压强度相对较低,这可能与改性淤泥的强度与保水能力有关。

3.3.1 直观分析

干湿试验的水稳性指标由干湿0~5次后强度折

损率进行评定。极差分析结果如表12所示。

表 12 直观分析表

试验 编号	海砂掺量/ %	压实度/ %	龄期/ d	空白列	强度折 损率/%
1	1	1	1	1	29.2
2	1	2	2	2	20.1
3	1	3	3	3	18.5
4	2	1	2	3	17.9
5	2	2	3	1	16.7
6	2	3	1	2	20.2
7	3	1	3	2	12.8
8	3	2	1	3	17.9
9	3	3	2	1	10.0
均值1	22.600	19.967	22.433	18.633	
均值2	18.267	16.233	16.000	17.700	
均值3	13.567	16.233	16.000	18.100	
极差	9.033	3.734	6.433	0.933	

由表12可以看出:各因素对改性淤泥水稳性影响的主次顺序为:海砂掺量>龄期>压实度。

3.3.2 方差分析

干湿试验下水稳性能方差分析结果以及各因素的水平影响趋势如表13、图6所示。

表 13 方差分析表

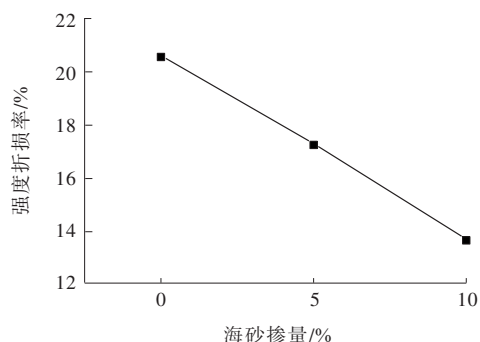
因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
海砂掺量	122.469	2	93.062	19.000	显著
压实度	20.942	2	15.913	19.000	
龄期	82.776	2	62.900	19.000	显著
空白列	1.316	2	1.000	19.000	
误差	1.320	2			

由表13、图6可知:① 干湿循环作用对改性土水稳性影响的主次顺序为:海砂掺量>龄期>压实度,海砂掺量以及龄期对改性淤泥水稳性影响显著度高,压实度显著度较低;② 改性淤泥强度折损率随着海砂掺量、压实度、龄期的增大而减小,说明水稳性与三因素水平呈负相关变化,水稳性较传统水泥石灰改性淤泥有所提升。

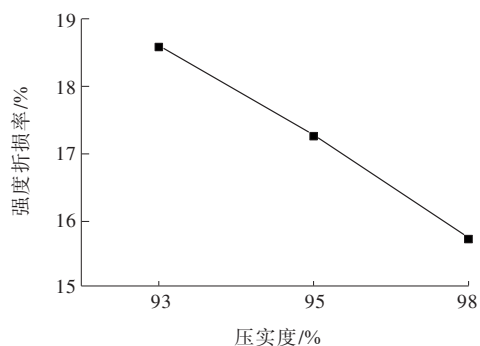
4 结论

(1) 海砂复合5%石灰+3%水泥后的改性淤泥

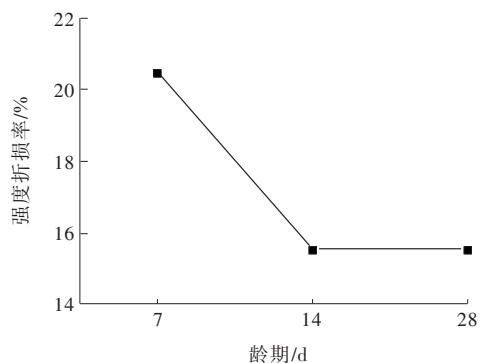
无侧限抗压强度有较大提高。



(a) 海砂掺量与强度变化曲线



(b) 压实度与强度变化曲线



(c) 龄期与强度变化曲线

图 6 各因素水平对强度变化影响趋势图

(2) 水稳试验中改性淤泥的抗压强度并不是一直减小,而是先急剧下降后有小幅增长;含水量急剧增加后逐渐趋于稳定,说明改性淤泥具有一定的保水能力。各组试样最终含水率较高者抗压强度相对较低,说明改性土强度与其保水能力有关。

(3) 3种水稳性试验结束后渗水试样伴有大量氢氧化钙晶体析出,毛细水作用下只有少量氢氧化钙晶体析出,且渗水后试样强度较其他两种试验更低。说明渗水试验对试样的水扰动最强,且氢氧化钙析

出是造成水环境下改性淤泥强度损失的原因之一。

(4) 3种水稳试验中三因素与改性淤泥水稳性能都呈正相关变化,但影响主次顺序有所不同。地下渗水试验各因素主次顺序为:龄期>压实度>海砂掺量;地下毛细水作用为:海砂掺量>龄期>压实度;干湿循环试验为:海砂掺量>龄期>压实度,原因可能是因为不同试验间非确定因素导致。试验结果都表现为:海砂复合改性淤泥较传统水泥、石灰改性淤泥水稳性有所提升,在路用工程中可以通过调节三因素以获得改性淤泥最佳水稳性能指标。

## 参考文献

- [1] 张福海,陈庆,张晓阳,等.海砂-海泥混合料作为海堤填料的可行性试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(S1):182-186.
- [2] 王启叶楠,丰土根,宋健,等.淤泥海砂混合料动力特性试验研究[J].水运工程,2017(10):96-100,129.
- [3] NA W.Utilization of portland cement and municipal solid waste incineration fly ash for solidification/stabilization of sewage sludge[J]. Nature Environment and Pollution Technology,2015,14(1):141-144.
- [4] ROY A, STEGEMANN J A. Nickel speciation in cement-stabilized/solidified metal treatment filtercakes[J]. Journal of Hazardous Materials,2017,321:353-361.
- [5] XIN D, CHAI X, ZHAO W. Hybrid cement-assisted dewatering, solidification and stabilization of sewage sludge with high organic content[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management,2016,18(2):356-365.
- [6] CORREIA A A S, OLIVEIRA P J V, CUSTÓDIO D G. Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders[J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(2):97-106.
- [7] 乐金朝,李新明,乐旭东.石灰钢渣稳定土的水稳性试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(6):773-778.
- [8] 薛颖慎.滨海淤泥改性填筑路基应用技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [9] 郭增,李彦红.基于回归正交试验的赤泥基改性剂改良粉质粘土水稳性研究[J].数学的实践与认识,2019,49(5):315-320.
- [10] 交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [11] 交通运输部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.