

固化处理海相黏土强度特性研究

李华洋, 刘俊伟*, 赵洪轩, 尚文昌, 贾云萍

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:设计一种新型滩涂海相黏土固化剂,并对固化海相黏土的强度特性进行研究。利用正交试验方法设计初始固化剂配比,并通过无侧限抗压强度试验和干湿循环试验,研究了固化龄期、干湿循环次数及固化剂对比对固化土强度的影响作用,分析得到固化剂最优配比及其固化效果。研究发现固化海相黏土早期强度可达到 1 MPa 以上,长期强度达到 2.6 MPa 左右,且具有较好的抵抗硫酸盐侵蚀的耐久性能。所研究的固化剂能够使海相黏土在较短的时间内减少含水率并完成初步硬化,同时具有足够的长期强度和抵抗硫酸盐侵蚀的性能以满足近海工程的需要。

关键词:海相黏土;化学固化;无侧限抗压强度;硫酸盐侵蚀;极差分析

中图分类号:TU411.6;TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)06-0026-08

Study on the strength characteristics of solidified marine clay

LI Huayang, LIU Junwei*, ZHAO Hongxuan, SHANG Wenchang, JIA Yunping

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: A new solidified agent for beach marine clay was designed, and the strength of solidified marine clay were studied. The initial proportion of curing agent was designed based on the principle of orthogonal test. Through unconfined compressive strength test and dry-wet cycle test, the effects of curing age, dry and wet cycle times and the proportion of curing agent on the strength of solidified marine clay were studied, and the optimal proportion of curing agent and its curing effect were obtained. It is found that the early strength of solidified marine clay can reach more than 1 MPa, and the long-term strength can reach about 2.6 MPa, and it has good durability against sulfate attack. The curing agent designed in this study can reduce the moisture content and complete the initial hardening of marine clay in a short time. Meanwhile, it also has sufficient long-term strength and the durability to resist sulfate attack and thus can meet the needs of offshore engineering.

Key words: marine clay; chemical curing; unconfined compressive strength; sulfate attack; range analysis

我国沿海区域地形复杂、地貌丰富,其中滩涂面积广阔,对滩涂淤泥进行合理有序的开发利用,具有重要的战略意义,也有较好的工程前景。然而,位于潮间带的淤泥质场地,具有含水率高、强度低和孔隙比

收稿日期:2023-08-21

基金项目:山东省优秀青年基金资助项目(ZR2021YQ31);国家自然科学基金资助项目(42277135)

作者简介:李华洋(1999—),男,河北蠡县人。硕士,研究方向为岩土工程。E-mail:qutlhy@163.com。

*通信作者:刘俊伟(1983—),男,山东青州人。博士,教授,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:zjuljw@126.com。

大、有机质含量高等特点,不能满足大型施工机械通行时对路基强度、变形与稳定性的要求,给工程建设造成了极大的阻碍^[1-3]。因此,在进行工程建设之前,必须对淤泥质场地采取固化处理,使得淤泥质场地的各项力学指标达到建设要求。目前采用化学固化法可以有效解决上述滩涂淤泥不利因素,该技术是在滩涂淤泥中加入无机化学固化剂以改善其性能。但是传统的单一化学固化剂已经不能满足滩涂淤泥的工程需要,新型的复合固化剂成为了研究热点。

YAO等^[4]采用无侧限压缩试验对水泥处理海相黏土的强度进行了广泛的混合比和固化时间范围的评估。研究发现,在总含水量一定时,水泥掺量越大,无侧限抗压强度越高,总含水量越低。建立并验证了考虑水泥掺合海相黏土配合比和养护周期的强度预测模型。邵吉成等^[5]探究生石灰对温州淤泥的固化效果,研究发现生石灰的添加可对温州淤泥的多项物性指标产生影响,淤泥的工程、力学性质得到改善,研究得到的线性方程可以预测在工程中采用生石灰固化温州淤泥的承载力特征值。

位于滩涂淤泥场地的海相黏土受到海洋潮汐的影响会处于浸泡与干燥的交替状态,因此,除无侧限抗压强度之外,固化土的耐久性也是固化效果的重要指标。针对固化土干湿循环作用下的耐久性问题,徐杨等^[6]选取河道淤泥,掺入水泥及新型固化剂进行固化处理,通过干湿循环试验及无侧限抗压强度试验发现淤泥固化土无侧限抗压强度随干湿循环作用的变化规律是劣化效应和养生修复效应协同作用的结果。HORPIBULSUK等^[7]研究发现了碱激发粉煤灰污泥固化土的干湿耐久性,并基于统计分析建立了无侧限抗压强度随干湿循环次数的预测公式。然而针对海相黏土受海水中硫酸盐侵蚀的研究较少。

本文研究化学处理青岛胶州湾畔滩涂海相黏土的固化效果。通过室内的正交试验,设计一种新型的复合型海相黏土固化剂。结合无侧限抗压强度试验研究固化剂各组分对于海相黏土的固化作用效果及影响趋势,根据正交试验结果得出针对此类海相黏土的最优配合比,并进行硫酸盐溶液下的干湿循环试验探究固化土耐久性能,为滩涂海相黏土的处理和工程应用提供理论依据。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

1.1.1 海相黏土

本试验所采集的海相黏土土样取自青岛市黄岛区红石崖附近的滩涂淤泥。取土深度为1~2 m,淤泥特点为表面颜色呈深褐色,内部颜色为黑色,泥质细腻,味道臭。将淤泥土样取回后用塑料桶密封保存。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)和《土壤检测》(NY/T 1121.16—2006)进行一系列室内土工试验测定出淤泥土的物理力学指标,见表1。

表1 海相黏土的物理力学特性

天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $\omega/\%$	比重 d_s	孔隙比 e	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	pH	水溶性盐/ $(g \cdot kg^{-1})$
1.68	120.10	2.73	1.65	83	36	8.25	29.6

1.1.2 固化剂

一般情况下,海相黏土具有含水率高、有机质含量高、孔隙比大、强度较低等特点,需要引入吸水性好、膨胀性高的材料。利用材料之间水化反应的产物,填充于土颗粒或土团粒孔隙,产生黏结应力,从而提高强度。将化学固化剂与海相黏土进行原位或异位搅拌形成固化土可有效改善土体工程性质,如提高土体的强度和抗渗性能、减少土体变形^[8]。迄今为止,水泥仍是最常用的土体固化剂^[9-10]。但是单纯使用水泥固化海相黏土效果有限且污染严重,需要引入外掺剂代替部分水泥,促进水化反应。生石灰、氢氧化钠、氢氧化钾等碱性材料可以中和土样中的 H^+ ,以此保障氢氧化钙保持在一定浓度水平,促使凝胶水化产物的产生^[11]。因此本次试验固化剂成分包括水泥、半水石膏、硅灰、氢氧化钾及生石灰。固化剂各组分及主要化学成分见表2。

1.2 试验方案

本研究采用正交试验方法确定固化剂最优配合比。已有大量研究表明,固化土强度会随着水泥掺量的增加而提高。根据前期试验研究结果,考虑到水泥掺量改变对其他材料作用效果的影响及固化剂成本等因素,此次固化方案将水泥掺量固定为12%。设计四因素三水平正交试验。正交试验方案见表3,其中各材料掺量定义均为固化剂材料与待处理海相黏土干质量比。

表2 固化剂组分及其主要化学成分

固化剂组分	主要化学成分
硅酸盐水泥	CaO、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃
半水石膏	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O
硅灰	SiO ₂
生石灰	CaO
氢氧化钾	KOH

表3 无侧限抗压强度试验方案

编号	硅酸盐水泥	半水石膏	硅灰	氢氧化钾	生石灰	%
0	12	—	—	—	—	
1	12	2	1.0	0.50	2	
2	12	2	1.5	1.00	4	
3	12	2	2.0	0.75	6	
4	12	4	1.0	1.00	6	
5	12	4	1.5	0.75	2	
6	12	4	2.0	0.50	4	
7	12	6	1.0	0.75	4	
8	12	6	1.5	0.50	6	
9	12	6	2.0	1.00	2	

注:编号0组为纯水泥配比组,为试验对照组。

1.3 试验方法

将取回的滩涂海相黏土烘干、粉碎,过2 mm筛备用。制作试块时首先按照试验方案中设计的配合比称取一定质量的干料。由于原状土含水率高达56%,而且在实际工程中将滩涂淤泥作为路基回填土使用时需要考虑其运输成本,因此需要将淤泥先晾干或采用其他脱水方法后再运输。但过低的含水率不利于固化剂与海相黏土的搅拌从而影响固化效果。为使固化土搅拌后达到可塑状态,按照水料比0.25称取相应质量的水备用。将所称取的干料放置于搅拌机中搅拌混合,搅拌机开启5 min后加水继续搅拌10 min至固化剂与海相黏土充分混合。分3次将固化土装入直径50 mm、高100 mm的圆柱形模具中,每填一层土后将模具放置在振动台上振捣以排除气孔。每组配比制作3个试样以进行平行试验。试样制作完成后用塑料薄膜包裹,24 h脱模后放入标准养护室(温度(20±1)℃,湿度95%以上)中养护至3、7、28 d的养护龄期。

1.3.1 无侧限抗压强度试验

试样达到预定养护龄期后从养护室中取出,擦干表面水分。利用万能试验机测试试样的无侧限抗压强度,试验时加载速度为1 mm/min,直至试块破坏停止试验,记录试样加载时对应的荷载和位移。

1.3.2 干湿循环试验

将养护至3、7和28 d龄期的最优配合比固化土从养护环境中取出,擦干表面的水分。试块放入宽口玻璃杯中,并加5%的硫酸钠溶液没过试块顶部2 cm,浸泡12 h,然后置于(20±1)℃的室内干燥环境中12 h,此过程为1次干湿循环。本次试验共进行10次干湿循环。每次干湿循环后取出试块在室温环境中静置10 min,观察试块外观并拍照记录。随后测量其质量和无侧限抗压强度。

判断试块干湿循环耐久性质一般依据试块的质量变化和强度变化。质量变化选择累计质量损失率W作为评判标准,累计质量损失率W公式为

$$W = \sum_i \frac{W_i}{M_0} \times 100\% \quad (i=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)$$

式中: W 为累计质量损失率; M_0 为试样初始状态时的干质量; W_i 为第 i 次循环后试块的质量损失。

2 试验结果分析

2.1 基于正交试验测定的无侧限抗压强度分析

无侧限抗压强度结果如表 4 所示,可以看到养护龄期 3 d 的固化海相黏土的无侧限抗压强度已经基本达到 1 MPa 以上。试验室内进行的试验结果表明短期内该固化剂对海相黏土有着较好的固化效果,被处理的滩涂淤泥质场地可以在短时间内满足施工机械运行和移动的要求。试验结果表明,固化土的强度会随着养护龄期的增加而提高。以强度较高的 8 号配比如例,养护龄期 7 d 的固化土无侧限抗压强度相比养护龄期 3 d 的提高了 0.6%,养护龄期 28 d 的固化土无侧限抗压强度相比养护龄期 7 d 的提高了 58.4%,相比养护龄期 3 d 的无侧限抗压强度提高了 59.4%。此外,本试验设置了纯水泥配比组为对照组。养护龄期 3 d 复合型固化剂固化海相黏土的最高强度相比同龄期的纯水泥固化海相黏土提高 24.1%,龄期 7 d 提高 17.2%,龄期 28 d 提高 37.0%。在正交试验中,28 d 的固化土无侧限抗压强度值已经可以达到 2.63 MPa。当无侧限抗压强度值达到 1.5 MPa 以上时,即可符合行业标准《土壤固化剂应用技术标准》(CJJ/T 286—2018)中一级固化土的指标要求。说明本次试验所设计的复合固化方案对滩涂海相黏土的固化效果显著,可以满足工程需要。

2.2 无侧限抗压强度极差分析

为了进一步探究所选用的复合型固化方案的最优配合比,需要对正交试验的结果进行极差分析,极差分析的结果如表 5 所示。其中, K_1 、 K_2 、 K_3 分别为各个外掺剂材料在 3 种水平下相应的平均强度; R 为 K_1 、 K_2 、 K_3 中的最大值减去最小值,即极差。

表 4 无侧限抗压强度试验结果

编号	无侧限抗压强度/MPa		
	3 d	7 d	28 d
0	1.33	1.45	1.92
1	1.01	1.29	1.82
2	0.98	1.50	1.96
3	1.32	1.36	1.92
4	1.19	1.39	1.98
5	1.11	1.35	2.49
6	1.17	1.32	2.40
7	1.21	1.65	2.53
8	1.65	1.66	2.63
9	1.41	1.70	2.38

表 5 正交试验外掺剂极差分析

外掺剂材料	3 d				7 d				28 d			
	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R
半水石膏	1.10	1.16	1.42	0.32	1.38	1.35	1.67	0.32	1.90	2.29	2.51	0.61
硅灰	1.14	1.25	1.30	0.16	1.44	1.50	1.46	0.06	2.11	2.36	2.23	0.25
氢氧化钾	1.28	1.21	1.19	0.09	1.42	1.45	1.53	0.11	2.28	2.31	2.11	0.20
生石灰	1.18	1.12	1.39	0.27	1.45	1.49	1.47	0.04	2.23	2.30	2.18	0.12
影响顺序	半水石膏>生石灰>硅灰>氢氧化钾				半水石膏>氢氧化钾>硅灰>生石灰				半水石膏>硅灰>氢氧化钾>生石灰			

以表 5 中养护龄期 3 d 正交试验结果中半水石膏的 K_i 值结果为例,具体计算方法如下:

$$K_1 = (1.01 + 0.98 + 1.32) / 3 = 3.31 / 3 = 1.10 \quad (\text{第 1、2、3 组强度平均值})$$

$$K_2 = (1.19 + 1.11 + 1.17) / 3 = 3.47 / 3 = 1.16 \quad (\text{第 4、5、6 组强度平均值})$$

$$K_3 = (1.21 + 1.65 + 1.41) / 3 = 4.27 / 3 = 1.42 \quad (\text{第 7、8、9 组强度平均值})$$

极差分析结果如图 1 所示。试验结果表明在任一养护龄期下,固化土的无侧限抗压强度都会随着半水石膏含量的增加而显著提高。石膏加入后反应生成大量的钙矾石晶体。钙矾石晶体中包含 32 个结晶

水,在其形成过程中预计体积增长约 120%。由于钙矾石体积膨胀、填充孔隙,使固化土结构密实,孔隙量减少。固化土中水泥发生水化反应生成水化硅酸钙,在海相黏土内形成稳定的团粒结构,是强度提高的主要原因之一^[12]。水泥则把这些团粒包覆并连接成坚强的整体。钙矾石能够与水化硅酸钙一起形成独特的空间网状结构,钙矾石的这种填充和支撑孔隙的作用弥补了水化硅酸钙固化效果的不足,进一步提高了固化淤泥的强度^[13]。

养护龄期为 3 d 时,生石灰的 R 值是除半水石膏外最高的,表明生石灰的加入能够提高固化土的早期强度。生石灰首先与淤泥中自由水发生水化反应,生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,快速消耗淤泥中的部分水分。生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与淤泥中的 SiO_2 和 Al_2O_3 发生火山灰反应,再次消耗淤泥孔隙中的水,生成水化铝酸钙和水化硅酸钙,使淤泥的含水率进一步下降^[14]。但随着养护龄期的增加,生石灰的影响作用逐渐降低,半水石膏、硅灰和氢氧化钾开始起到主要作用。

养护龄期为 7 和 28 d 时,固化土内部的化学反应更加充分,外掺剂材料对无侧限抗压强度的影响趋势和规律也更加明显。硅灰的 R 值逐渐由第 3 位上升到第 2 位。这是由于硅灰是一种高活性的火山灰质材料,能与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成水化硅酸钙。随着反应的进行,待生石灰与自由水反应及水泥的水化反应基本完全后生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,为硅灰参与反应提供原料,硅灰开始发挥作用。

土壤中的 pH 值对强度的影响不容忽视,这是由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度直接影响固化土强度的大小,而 pH 过低会中和部分 OH^- , OH^- 在孔隙流体中处于低浓度状态,凝胶水化产物的生成量减少,导致固化土无侧限抗压强度较低。试验结果显示,氢氧化钾的 R 值在反应中后期处在较高位置,这是由于氢氧化钾等碱性材料可以提高固化土内部 pH 值,以此确保 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 保持一定的浓度,促使凝胶水化产物的产生。

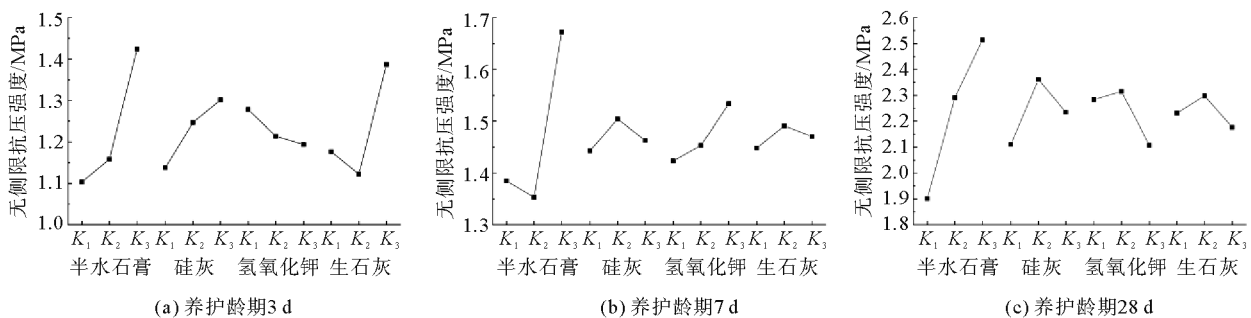


图 1 不同养护龄期时不同外掺剂含量下平均无侧限抗压强度

2.3 最优配合比的确定

从图 1 中可以看到,半水石膏的曲线仍然有明显的上升趋势,但硅灰和生石灰的曲线出现峰值。随着反应的继续进行,固化剂中各个成分之间的反应基本完成。在图 1(c)中除半水石膏曲线外,其余 3 种外掺剂均出现峰值,说明这 3 种外掺剂存在最优掺量。这为进一步优化固化配比方案和探究最优配合比提供了良好的数据支撑。因此进一步优化试验方案。硅灰、氢氧化钾和生石灰分别取 1.5%、0.75%和 4%,半水石膏含量设计取用 6%、8%和 10% 3 个水平。具体配比方案及试验结果见表 6。

表 6 优化后试验配比方案及无侧限抗压强度测试结果

编号	硅酸盐水泥/%	半水石膏/%	硅灰/%	氢氧化钾/%	生石灰/%	无侧限抗压强度/MPa		
						3 d	7 d	28 d
YH1	12	6	1.5	0.75	4	1.05	1.34	2.53
YH2	12	8	1.5	0.75	4	1.29	1.67	2.06
YH3	12	10	1.5	0.75	4	1.03	1.51	2.02

无侧限抗压强度测试结果显示养护龄期为 3、7 d 时,YH2 号配比的无侧限抗压强度最高,养护龄期

为 28 d 时, YH1 号配比无侧限抗压强度最高。这是由于半水石膏的加入会生成具有膨胀性的钙矾石晶体, 足量的钙矾石与固化土内部的水化硅酸钙构建成紧密的空间网状结构, 有效地填充了固化土内部的孔隙, 提高了固化土无侧限抗压强度。随着反应进行, 过量的半水石膏加入导致固化土后期反应生成大量钙矾石, 钙矾石由于其膨胀性而造成固化土内部出现裂缝使强度降低。试验结果表明 YH2 号配比在早期具有较好的固化效果, 但从长期来看 YH1 号配比具有较高强度。且 YH1 号配比早期强度也可达到 1.05 MPa, 在短时间内满足工程需要; 固化土长期强度达到 2.53 MPa, 可以达到公路路基回填土的要求。结合材料成本和无侧限抗压强度综合考虑, 本试验最终确定该复合型海相黏土固化剂的最优配合比为硅酸盐水泥 12%, 半水石膏 6%, 硅灰 1.5%, 氢氧化钾 0.75%, 生石灰 4%。

2.4 干湿循环对海相黏土固化效果的影响

为了研究固化海相黏土在海水环境中的强度特性, 本文使用 5% 的硫酸钠溶液对固化海相黏土进行干湿循环测试。试验中采用累计质量损失率作为干湿循环作用下固化效果变化的总体控制指标, 无侧限抗压强度的变化趋势作为固化海相黏土在干湿循环作用下微观结构演变的宏观表现。固化海相黏土经过 10 次干湿循环作用的累计质量损失率如图 2 所示, 无侧限抗压强度如图 3 所示。其中累计质量损失率为正值表示试样质量下降, 为负值表示试样质量增加。

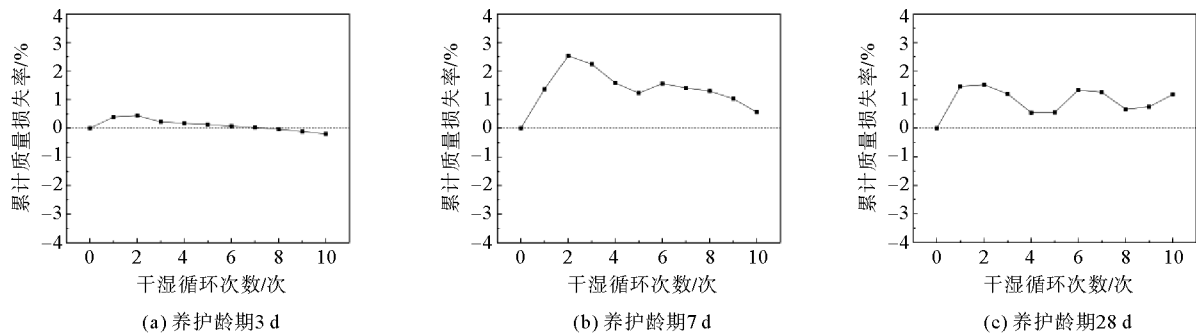


图 2 干湿循环作用下固化海相黏土的累计质量损失率

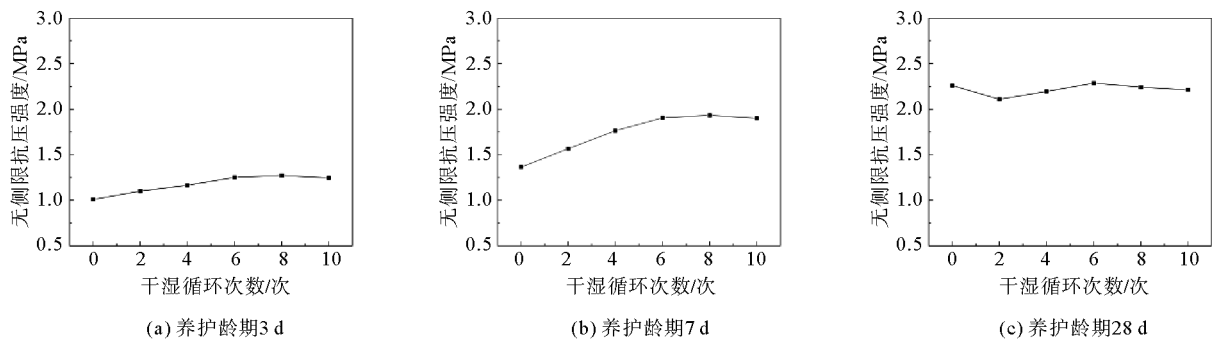


图 3 干湿循环作用下固化海相黏土的无侧限抗压强度

干湿循环作用对固化土的影响主要体现在两方面^[15]; 一方面被称为劣化效应, 即在干湿循环作用下固化海相黏土含水率发生变化, 土体颗粒胀缩变形导致固化海相黏土内部产生微裂缝, 在此过程中自由水的迁移还会对固化海相黏土骨架产生侵蚀作用; 另一方面被称为养生修复效应, 即水分反复进入固化海相黏土内部, 激发未反应固化剂发生二次水化反应。

2.4.1 干湿循环作用下固化海相黏土累计质量损失率

为了探究在固化剂产生反应的早期固化海相黏土抵抗硫酸盐侵蚀的性质, 将养护至龄期 3 d 的固化海相黏土试样进行干湿循环, 其累计质量损失率如图 2(a) 所示。固化海相黏土试样的累计质量损失率在第 1 次和第 2 次干湿循环期间存在一定程度的上升, 表明试样质量在此期间降低, 这与已有研究结果相同^[16], 随后累计质量损失率逐渐趋于稳定, 试样质量逐渐增加至高于干湿循环开始前的质量。这是由于固化海相黏土内部的水化反应还未进行完全, 干湿循环作用下水分进入固化海相黏土后产生的积极作用

占主导。

将养护至龄期 7 d 的固化海相黏土进行干湿循环。累计质量损失率如图 2(b) 所示, 试验结果与龄期 3 d 时并不相同。固化海相黏土试样累计质量损失率经过第 1 次和第 2 次干湿循环明显上升, 表明试样质量不断降低, 随后累计质量损失率不断下降, 表明试样质量逐渐增长。在第 6 次干湿循环期间试样质量出现一个短暂的下降, 但整体趋势仍为质量增长, 且最终没有增长至干湿循环开始前的质量。这是由于随着养护龄期的增加, 固化剂反应也逐渐完全, 养生修复效应的效果逐渐下降。

养护至龄期 28 d 的固化海相黏土干湿循环累计质量损失率如图 2(c) 所示。试样质量随着干湿循环次数的增加呈现较为明显的波动。其中, 试样累计质量损失率在第 1 次、第 6 次和第 10 次干湿循环均有明显上升, 表明在此期间试样质量明显下降, 其余循环次数中质量都在以较为稳定的趋势增加。固化土试块基本保持原本状态直到试验结束, 累计质量损失率保持在 2% 以下。

2.4.2 干湿循环作用下固化海相黏土无侧限抗压强度

养护龄期 3 d 的固化海相黏土经过干湿循环后的无侧限抗压强度如图 3(a) 所示。固化海相黏土内部的反应机理在宏观上的表现为无侧限抗压强度逐渐提高。在前 6 次循环过程中, 由于生成的水化产物逐渐增多, 使颗粒间的联结增强, 结构更加紧密, 固化海相黏土的无侧限抗压强度以较高的增长速率不断上升至 1.27 MPa, 但在第 8 次循环之后开始下降。试验结果表明随着干湿循环次数的增加, 固化海相黏土内部水化反应逐渐完全, 劣化效应占据上风, 对强度特性的消极作用逐渐展现。

将养护龄期 7 d 的固化海相黏土进行干湿循环, 强度变化情况如图 3(b) 所示。试验结果显示, 养护龄期 7 d 试样经过 10 次干湿循环后的无侧限抗压强度及其增长率均高于养护龄期 3 d 试样。随着干湿循环次数的增加, 试样无侧限抗压强度先增后减, 变化规律与养护龄期 3 d 情况类似, 劣化效应逐渐起到主要作用。

从图 3(c) 中可以得到养护龄期 28 d 的固化海相黏土的强度变化规律。无侧限抗压强度测试结果显示固化土受干湿循环作用的影响强度也呈现出明显波动, 其中在第 1 次和第 6 次循环后强度均有较多的下降, 这与质量损失结果相对应。由此可知在固化剂参与反应的后期, 经过 10 次干湿循环的固化海相黏土的内部由于劣化效应和养生修护效应同时存在且共同作用, 其力学性质呈现出一定程度的下降, 但经过 10 次干湿循环之后无侧限抗压强度保持仍在 2.2 MPa 左右。通过以上试验测试可以证明该固化剂对海相黏土有着较好的固化效果和抵抗硫酸盐侵蚀的性能。

3 结论

本试验依据正交设计方法对海洋滩涂淤泥固化土进行了无侧限抗压强度试验, 探讨了固化土的无侧限抗压强度、累计质量损失率等随养护龄期、干湿循环次数和固化剂配比的变化规律, 主要得出以下结论:

1) 在正交试验中的 9 组配比中, 3、7 和 28 d 3 个龄期的最高强度分别达到了 1.65、1.70 及 2.63 MPa。经过极差分析, 得出了影响强度的固化剂组分的作用趋势和主次顺序, 并进一步优化配比方案从而确定最优水平配比, 即硅酸盐水泥 12%, 半水石膏 6%, 硅灰 1.5%, 氢氧化钾 0.75%, 生石灰 4%。

2) 固化土无侧限抗压强度随养护龄期的增加而提高。以 8 号配比为例, 养护龄期 7 d 的固化土无侧限抗压强度相比养护龄期 3 d 的提高了 0.6%, 养护龄期 28 d 的固化土无侧限抗压强度相比养护龄期 7 d 的提高了 58.4%, 相比养护龄期 3 d 的无侧限抗压强度提高了 59.4%。此外, 本试验设置了纯水泥配比为对照组。养护龄期 3 d 的最高强度相比同龄期的纯水泥组提高 24%, 龄期 7 d 提高 17%, 龄期 28 d 提高 37%。

3) 极差分析结果显示, 除水泥外半水石膏对强度提升作用明显, 其生成的钙矾石能够有效填充空隙, 弥补水泥反应生成的水化硅酸钙的不足。但过量的钙矾石又会因其膨胀性而破坏土体内空间网状结构而使固化海相黏土强度降低; 生石灰快速反应吸收固化土内的自由水使含水率降低, 对于固化土早期强度的快速提升具有显著作用。

4) 随着干湿循环次数的增加, 固化土未出现明显的脱落及破碎迹象, 整体结构完整。龄期 3 d 和龄期 7 d 的固化土由于其内部水化反应进行不完全, 养生修复效应占主导, 固化土质量和强度均有提升。龄期为 28 d 的固化土在干湿循环作用下出现了质量和强度的损失, 但累计质量损失率控制在 2% 以下, 无侧

限抗压强度保持在 2.2 MPa 左右。该固化剂对海相黏土有着较好的固化效果,同时抵抗硫酸盐侵蚀的效果较好,可以满足近海工程的需要。

参考文献(References):

- [1] 杨爱武,肖敏,周玉明. 石灰粉煤灰固化天津滨海软土试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(1):60-67.
YANG Aiwu,XIAO Min,ZHOU Yuming. Experimental study on lime-fly ash to cure Tianjin marine soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(1):60-67.
- [2] 吴越鹏,王修山,金胜赫,等. 生石灰-石粉-WSS 固化剂在钻渣废弃土筑路再生中的应用[J]. 工程地质学报,2023,31(2):409-420.
WU Yuepeng,WANG Xiushan,KIM Sunghyok, et al. Application of quicklime-limestone powder-WSS soil stabilizer in road regeneration of drilling waste mud[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):409-420.
- [3] 辜伟芳,赵鑫,吴创收. 浙江省淤泥质海岸线特点及整治修复探讨[J]. 海洋开发与管理,2019,36(5):37-40.
GU Weifang,ZHAO Xin,WU Chuangshou. Characteristics of muddy coastline of Zhejiang Province and discussion on the remediation[J]. Ocean Development and Management,2019,36(5):37-40.
- [4] YAO K,PAN Y,JIA L, et al. Strength evaluation of marine clay stabilized by cementitious binder[J]. Marine Georesources & Geotechnology,2020,38(6):730-743.
- [5] 邵吉成,袁波,骆嘉成,等. 生石灰固化温州淤泥的物理力学性质研究[J]. 工程地质学报,2023,31(2):421-431.
SHAO Jicheng,YUAN Bo,LUO Jiacheng, et al. Study on the physical and mechanical properties of sludge in Wenzhou solidified by quicklime[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):421-431.
- [6] 徐杨,曹磊,阎长虹,等. 城市河道淤泥固化土干湿耐久性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(5):1028-1035.
XU Yang,CAO Lei,YAN Changhong, et al. Experimental study on drying-wetting durability of solidified urban river sludge[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2022,42(5):1028-1035.
- [7] HORPIBULSUK S,SUKSIRIPATTANAPONG C,SAMINGTHONG W, et al. Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolimer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(1):04015078.
- [8] 许军,汪展翊,易卫锋,等. 新型聚合物固化剂工程防护性能试验研究[J]. 公路,2018,63(12):252-257.
XU Jun,WANG Zhanchi,YI Weifeng, et al. Experimental study on engineering protection performance of new polymer hardener[J]. Highway,2018,63(12):252-257.
- [9] 杨玉婷,黄英,金克盛,等. 水泥加固红土的受力特性及其微结构特征[J]. 水文地质工程地质,2012,39(4):80-87.
YANG Yuting,HUANG Ying,JIN Kesheng, et al. Mechanical properties and micro-structure characteristic of laterite mixed with cement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2012,39(4):80-87.
- [10] 李光耀,张振,叶观宝,等. 新型土体固化剂加固海底淤泥力学特性研究[J]. 水文地质工程地质,2022,49(5):106-111.
LI Guangyao,ZHANG Zhen,YE Guanbao, et al. Mechanical characteristics of submarine silt stabilized by a novel agent[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2022,49(5):106-111.
- [11] 宁建国,黄新,许晨. 土样 pH 值对固化土抗压强度增长的影响研究[J]. 岩土工程学报,2007(1):98-102.
NING Jianguo,HUANG Xin,XU Sheng. Effect of pH value of soil on strength increasing of the stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007(1):98-102.
- [12] 吴燕开,李文艳,郭肖阳,等. 钢渣粉水泥固化淤泥土氯盐侵蚀下力学性能及机理研究[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(2):23-34.
WU Yankai,LI Wenyan,GUO Xiaoyang, et al. Study on mechanical properties and mechanism of steel slag powder cement solidified silt under chlorine salt erosion[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(2):23-34.
- [13] 黄新,胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报,1998(5):75-79.
HUANG Xin,HU Tong'an. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1998(5):75-79.
- [14] MUZAHIM A M,ABDELMADJID L,ALCOVER J F. Lime consumption of different clayey soils[J]. Applied Clay Science,2014,95:133-145.
- [15] 郑军,阎长虹,夏文俊,等. 干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3051-3056.
ZHENG Jun,YAN Changhong,XIA Wenjun, et al. Experimental study of influence of drying and wetting cycles on bearing capacity of improved soil by cmsc soil stabilized agent [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(S1):3051-3056.
- [16] LUY,LIU S,AIONSO E, et al. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology,2019,157:206-214.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)