



利用粉煤灰-矿渣地聚合物的软基淤泥改良^{*}

刘勇文¹, 胡畔¹, 马力²

(1. 黄河水利职业技术学院土木与交通工程学院, 河南 开封 475004;

2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对某航道工程软基淤泥深度搅拌处理, 研究了粉煤灰(FA)-矿渣(S)地聚合物对淤泥土性质的影响。对现场淤泥加入了10%、20%和30%的地聚合物改良剂和传统改良剂, 配置不同的含水率试样。进行无侧限抗压强度(UCS)试验、弯拉模量试验和扫描电子显微镜(SEM)成像测试, 分析改良土力学性质和微观结构的变化特征, 尝试获取合理的改良剂掺量。结果表明: 1)采用FA+S结合碱激发液进行地聚合物改良可使土的微观结构更加密实, 并显著提高淤泥的强度和刚度。2)考虑到经济成本, 20%的地聚合物改良剂掺量(5%FA+15%S)较为理想, 而且适用的含水率范围较广, 即 $0.75W_L \sim 1.25W_L$ 。

关键词: 地聚合物; 软基处理; 淤泥; 无侧限抗压强度; 扫描电子显微镜

中图分类号: U 614; TU 47

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0030-07

Soft foundation mucky soil improvement with fly ash and slag-based geopolymer

LIU Yong-wen¹, HU Pan¹, MA Li²

(1. School of Civil Engineering and Transportation Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng, 475004, China;

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China)

Abstract: In view of the deep stirring treatment of soft foundation mucky soil in a certain waterway engineering, we study the effects of geopolymer with fly ash(FA) and slag(S) on the properties of mucky soil. Geopolymer and conventional amendments of 10%, 20%, and 30% are added into field mucky soil, and specimens of different moisture contents are prepared. Unconfined compressive strength(UCS) tests, flexural-tensile modulus tests, and scanning electron microscope(SEM) imaging tests are carried out to evaluate the characteristics of mechanical property and microstructure changes of the improved soil and thereby obtain a reasonable amendment amount. The following observations can be drawn from the results: 1) Geopolymer improvement with FA+S and alkali activation solution contributes to a more compact soil microstructure and significantly improves the strength and stiffness of the mucky soil. 2) Considering the economic cost, the desirable amount of geopolymer amendment is 20% (5%FA+15%S), and its applicable moisture content range is wide, specifically $0.75 W_L\sim 1.25 W_L$.

Keywords: geopolymer; soft foundation treatment; mucky soil; unconfined compressive strength (UCS); scanning electron microscope(SEM)

我国长江、黄河中下游沿河岸区广泛分布着软土层, 在航道整治中一般需要先进行地基加固再修筑护岸, 软基处置问题一直是水运岩土工程领域的重要研究内容之一^[1]。深层搅拌桩技术是一种常见的软基处置技术, 该方法将水泥或石灰作为改良剂, 通过搅拌机械将软土和改良剂拌合

而形成具有一定强度的桩体, 改良剂的含量一般控制在20%~30%^[2-3]。

然而, 生产水泥和石灰的过程本身具有一定的环境污染性, 寻求可替代的环保胶凝材料具有重要意义^[4]。Ding等^[5]通过控制粉煤灰、水泥和软土的比例, 发现粉煤灰在一定水泥掺量条件下

收稿日期: 2021-07-12

*基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20A560016)

作者简介: 刘勇文(1978—), 女, 硕士, 讲师, 从事土木工程材料的研究。

能充分发挥火山灰反应、明显提高软土强度。James 等^[6]通过对比矿渣粉与石灰粉的改良效果发现, 两者进行联合改良产生的改良土 UCS 值最高。王东星等^[7]采用激发粉煤灰作为改良材料, 发现镁碳酸盐是碳化改良联合技术提高软土强度的关键因素。邵俐等^[8]指出, 在石灰提供的碱性条件下, 高炉矿渣能够更好地进行水化反应、增加改良土强度。粉煤灰(FA)和矿渣(S)都是工业废料, 相对水泥改良剂更加经济, 两者均富含铝和硅, 若与碱激发液(L)混合, 容易形成由 AlO_4 和 SiO_4 四面体结构单元组成三维立体网状结构的粉煤灰-矿渣地聚合物, 化学式为 $M_n[(\text{Si}-\text{O}_2)_m-\text{Al}-\text{O}]_n \cdot q\text{H}_2\text{O}$, 其中 M 为碱金属, m 可以为 1、2、3, n 为聚合度, q 为结合水量^[9]。地聚合物为非金属材料, 属于复杂的多晶和多相聚集体, 包括晶态、玻璃态、胶凝态及气孔等, 具有优良的机械性能和耐酸碱、耐火、耐高温的性能^[10], 在软基处理深层搅拌技术中有取代普通水泥的趋势, 相比普通水泥, 地聚合物的 CO_2 排放可减少约 70%, 但目前利用 FA 和 S 生成地聚合物实现软基改良的相关研究较少。

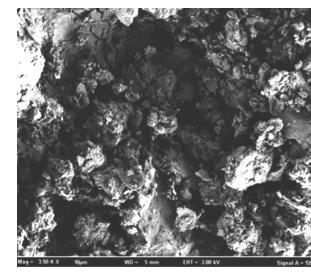
鉴于此, 本文针对某航道整治工程软基的深层搅拌技术处理, 研究利用粉煤灰(FA)-矿渣(S)地聚合物进行淤泥改良的规律。对现场淤泥质土加入 10%、20% 和 30% 的地聚合物改良剂和传统改良剂, 配置了不同的含水率试样, 进行了无侧限抗压强度(UCS)试验、弯拉模量试验和扫描电子显微镜(SEM)成像测试, 以分析改良土力学性质和微观结构的变化特征, 旨在为类似工程利用地聚合物改良方法进行软基处理提供参考。

1 试验材料

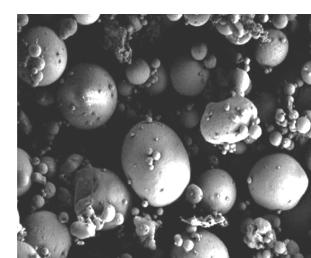
山东省菏泽市某航道是京杭运河的重要支线航道之一, 其复航工程全长 61.1 km, 为Ⅲ级航道, 沿线为平原、丘陵地貌, 地势由西北向东南倾斜, 地质构造较复杂。该复航工程涉及疏浚工程、堤坝工程、道路工程、环水保工程等, 其中堤坝工程地基以淤泥为主, 部分位置存在淤泥、粉土、粉质黏土交错互层, 厚度在 20 m 左右, 最大处接近 30 m。地基淤泥(MS)含水率高、承载力低, 天然含水率超过 55%, 为棕黑色流塑状, 现

场计划采用深层搅拌桩法对其进行处置。

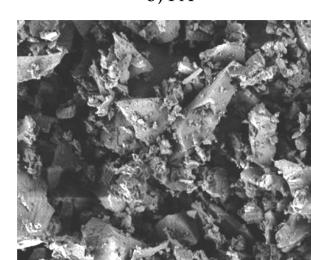
试验材料取自淤泥顶面以下 2~3 m, 将其存放在塑料袋里转移至实验室, 其物理特性为: 比重 2.71, 砂粒含量 10.3%、粉粒含量 48.4%、黏粒含量 41.3%, 液限 w_L 为 48.3%、塑性指数 I_p 为 16.1%, pH 值为 7.8, 有机质含量 4.3%。该淤泥中粉粒和黏粒含量合计为 89.7%, 其主要化学成分为 SiO_2 (68.61%)、 Al_2O_3 (13.65%)、 CaO (2.54%)、 MgO (2.12%)。试验涉及的改良地聚合物为粉煤灰(FA)-矿渣(S)地聚合物, 原材料 FA、S、水泥和石灰均来自山东本地的供应商。其中 FA 中主要化学元素为硅(23.35%)和铝(13.62%); S 中主要化学元素为钙(20.98%)和硅(14.01%); 用于改良的水泥为普通硅酸盐水泥 P42.5, 主要化学成分为 CaO 和 SiO_2 , 两者含量约占 82%, 烧失量为 0.95%; 生石灰主要化学成分为 CaO (76.56%)和 MgO (0.38%)。MS、FA、S 的 SEM 图像见图 1, 可以看出 MS 颗粒呈现不规则的团簇状、FA 颗粒呈大小不一的球形、S 颗粒呈半多边形形状。



a) MS



b) FA



c) S

图 1 SEM 图像

2 试验方法

在 36.2%、48.3%、60.4% 这 3 种含水率下研究不同改良剂对软土工程性质和微观结构的影响,

这 3 种含水率对应的液限分别为 $0.75w_L$ 、 $1.00w_L$ 和 $1.25w_L$ 。具体的配合比见表 1。

表 1 改良土试样的配合比

改良软土类型	质量配合比	含水率 w	备注
MS+地聚合物	(FA+S):MS=10%、20%、30%	36.2%(0.75w _L)	FA 与 S 的质量配合比固定为 1:3
		48.3%(1.00w _L)	
		60.4%(1.25w _L)	
MS+水泥	水泥:MS=10%、20%、30%	36.2%(0.75w _L)	水泥与石灰的质量配合比固定为 1:1
		48.3%(1.00w _L)	
		60.4%(1.25w _L)	
MS+石灰+水泥	(水泥+石灰):MS=10%、20%、30%	36.2%(0.75w _L)	水泥与石灰的质量配合比固定为 1:1
		48.3%(1.00w _L)	
		60.4%(1.25w _L)	
MS+石灰	石灰:MS=10%、20%、30%	36.2%(0.75w _L)	
		48.3%(1.00w _L)	
		60.4%(1.25w _L)	

为了制备地聚合物改良试样, 采用搅拌装置将 MS、FA、S 混合 3 min, 同时加入富含钠离子的碱激发液, 其质量与 FA+S 的质量之比为 1:1。充分搅拌后再加入水分混合 3 min。对于传统改良剂(水泥、水泥+石灰、石灰)改良试样, 同样采用了 6 min 的混合搅拌时间。UCS 试验和弯拉回弹模量试验参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[11]开展, 在此不做详述。样品制作完成后立刻用塑料薄膜包裹, 放置在恒温(23 ± 1)℃的房间中进行养护, 养护时间分别为 7 d 和 28 d。UCS 试验结束后, 在试样上切取样品再进行 SEM 测试, 以分析试样的微观结构。

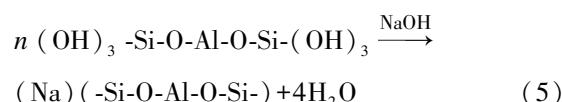
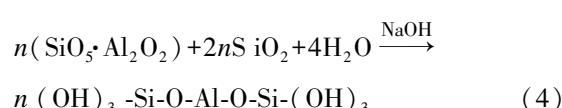
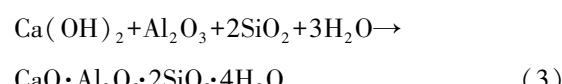
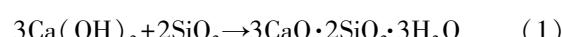
3 试验结果分析

3.1 UCS 试验

7 d 和 28 d 养护条件下, 改良剂掺量对改良土 UCS 值的影响见图 2。文献[12]指出采用深层搅拌桩处置软基, 桩体的 UCS 值至少应达到 1.034 MPa 以上, 该值在图中以黑色水平虚线表示。可以看出, 当改良剂掺量为 10% 时, 除了含水率为 $0.75w_L$

时的水泥改良土, 其余所有改良土的 UCS 都没有达到要求。对于该工程, MS 的天然含水率远高于 $0.75w_L$, 因此无论采用何种改良剂, 10% 的改良剂掺量都难以取得理想的处置效果。

当改良剂掺量达到 20% 和 30% 时, 地聚合物改良土(MS+FA+S)的 UCS 值最高, 其次是水泥改良土, 再次为水泥+石灰改良土和石灰改良土。当改良剂掺量为 30%、含水率为 $0.75w_L$ 时, 地聚合物改良土与水泥改良土相比, 7 d 和 28 d 养护条件下 UCS 分别提高 75.9% 和 93.5%。地聚合物改良土的 UCS 较高是因为同时发生了火山灰反应(式(1)~(3))和地聚合反应(式(4)~(5))。



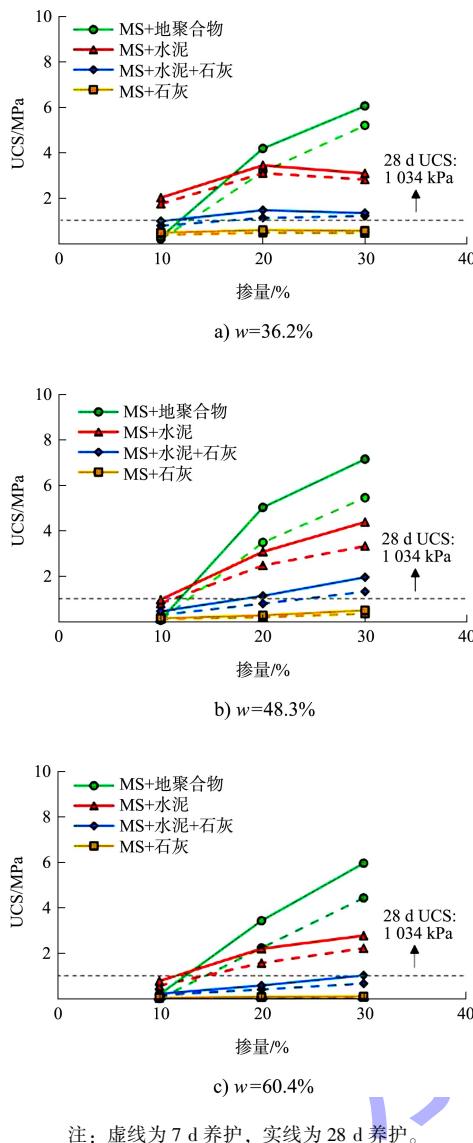


图2 不同改良剂掺量下的改良土 UCS 值

28 d 养护条件下, 含水率对改良土 UCS 值的影响见图 3。可以看出, 当改良剂掺量为 10% 时, UCS 随着含水率的增加而减小, 这是由于除了与改良剂发生化学反应的水分, 多余的水分填充了土结构中的孔隙, 对于地聚合物改良土, 孔隙中水分降低了碱激发液的浓度, 反应体系中 OH^- 和游离的 SiO_3^{2-} 含量减少, 减弱了地聚合反应。从图 3 还可以看出, 当改良剂掺量为 20% 时, 地聚合物改良土和水泥改良土的 UCS 达到了要求值的 2~5 倍, 但是水泥改良土的 UCS 随着含水率的增加而减小, 地聚合物改良土的 UCS 却呈现先增后减规律, 当改良剂掺量为 30% 时亦存在此规律。

因此, 对于地聚合物改良土, 含水率不宜过高。考虑到经济成本, 20% 的地聚合物改良剂掺量 ($5\% \text{FA} + 15\% \text{S}$) 较为理想, 而且适用的含水率范围较广, 即 $0.75w_L \sim 1.25w_L$ 。

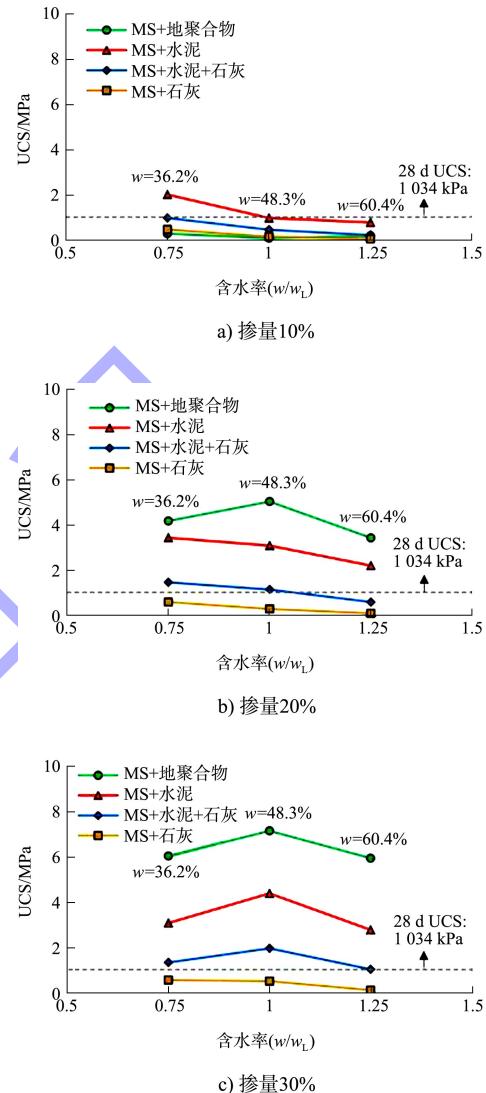


图3 不同含水率下的改良土 UCS 值

为了评估 MS 改良后刚度的变化, 利用弹性模量 E_{50} 作为刚度评价指标, 即 UCS 试验中应力-应变曲线上 0.5UCS 处对应的切线模量。图 4 显示了各类改良剂作用下改良土 E_{50} 与 UCS 的关系。可以看出, 随着 UCS 的增加, 地聚合物改良土和传统改良土的 E_{50} 都有所增加, 后者增速更快, E_{50} -UCS 具有较好的线性关系。同时可以看出, 在同一 UCS 下, 地聚合物改良土刚度相对水泥改良土的更小, 但差别不大。

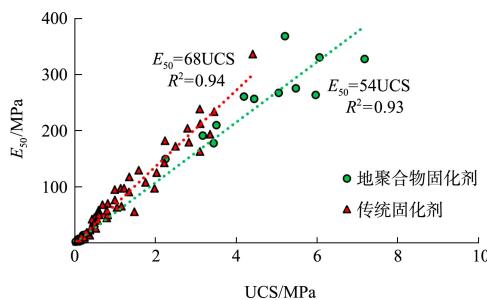
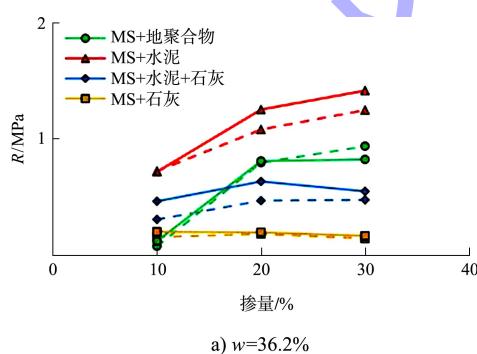
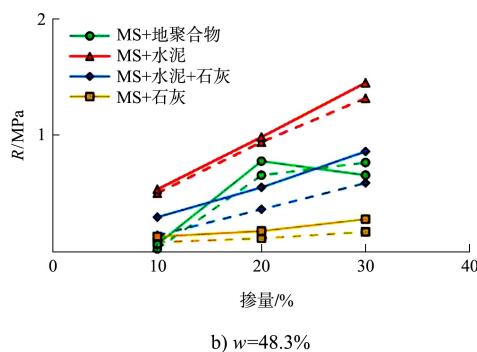
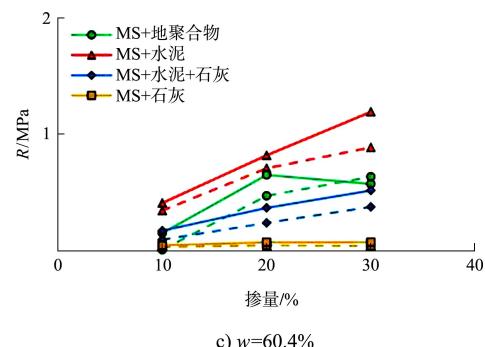


图 4 改良土刚度与 UCS 的关系

3.2 弯拉模量试验

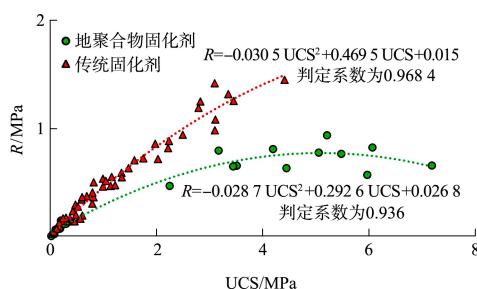
当进行弯拉模量试验时, 试样的上部和下部分别承受压应力和拉应力, 压缩和拉伸都导致试样弯拉破坏, 但后者的影响占主导。7 d 和 28 d 养护条件下, 改良剂对改良土弯拉模量 R 的影响见图 5, 影响规律跟 UCS 的相似, 但略有一些差异。总体来看, 水泥改良土的 R 值最高, 其次是地聚合物改良土、水泥+石灰改良土和石灰改良土。含水率对于 R 的影响不明显。含水率为 1.00 w_L 、养护 28 d 时, 改良剂掺量由 10% 增加至 20%, 上述 4 种改良土的 R 分别增加 0.43、0.79、0.21、0.10 MPa。

a) $w=36.2\%$ b) $w=48.3\%$ c) $w=60.4\%$

注: 虚线为 7 d 养护, 实线为 28 d 养护。

图 5 不同改良剂掺量下的改良土弯拉模量 R

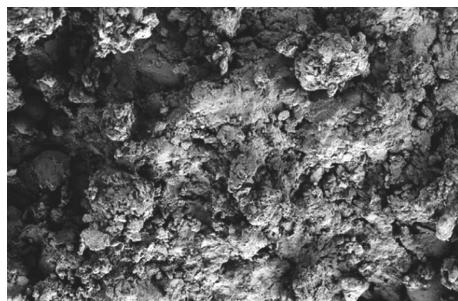
对于地聚合物改良土, 掺量从 20% 增加到 30% 时, R 值有所下降, 而且 28 d 养护时的 R 值低于 7 d 养护时的 R 值。从弯拉模量来看, 地聚合物改良剂掺量控制在 20% 是最优的。图 6 显示了各类改良剂作用下改良土 R 与 UCS 的关系。可以看出, 对于传统改良土, 随着 UCS 增加, R 快速提高; 但是对于地聚合物改良土, R 随着 UCS 增加而先增后减。

图 6 改良土弯拉模量 R 与 UCS 的关系

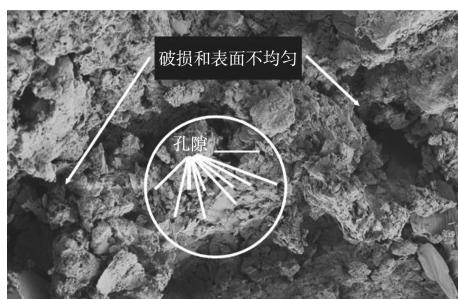
3.3 SEM 测试

为了解改良土的微观结构, 采用扫描电镜 (SEM) 对试样放大 3 000 倍进行观察。SEM 试样取自经历了 UCS 试验的试样, 养护时间统一为 28 d, 含水率统一为 1.00 w_L 。图 7 显示了不同改良剂作用下改良土的微观结构。在图 7a) 中, 可以看出 FA 与 S 充分发挥了作用, 产生了均匀的絮状凝胶产物, 与周边颗粒紧密胶结, 土体结构更加密实。而从图 7b) 可以看出, 尽管水泥也发挥了作用, 但是微观结构不够密实, 初始的孔隙被用线条圈住, 以便于与 UCS 试验形成的破损和表面

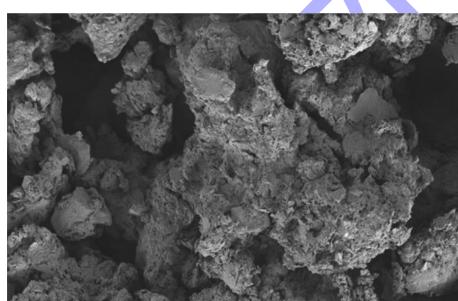
不均匀区分。不够密实的微观结构也导致了水泥改良土的 UCS 相对较低, 仅为 3.1 MPa, 而地聚合物改良土的 UCS 达到了 5.1 MPa。对于图 7c) 和图 7d), 可以看出明显出现了孔隙, 尤其当石灰单独使用时, 可以观察到海绵状的结构, 这导致水泥+石灰改良土和石灰改良土的 UCS 都很低, 分别为 1.2、0.3 MPa。



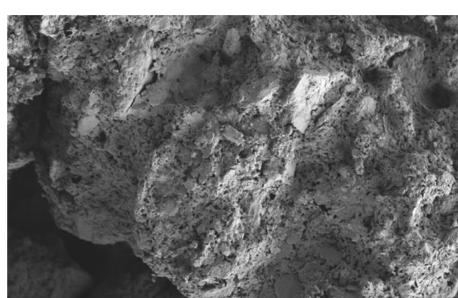
a) MS+FA+S



b) MS+水泥



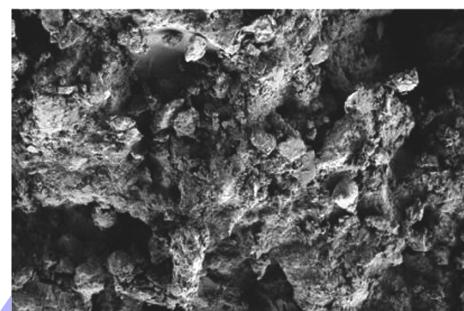
c) MS+水泥+石灰



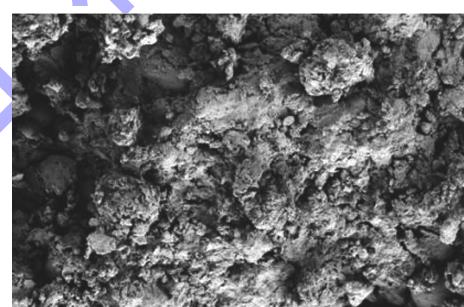
d) MS+石灰

图 7 改良土的 SEM 图像

不同地聚合物改良剂掺量下的改良土 SEM 图像见图 8, 含水率统一为 $1.00 w_L$ 。在图 8a) 中, 没有发现明显的地聚合反应, 这是由于改良剂掺量较少所致, 甚至还可以看见原始的团聚状淤泥颗粒, 这与宏观试验得出的较低 UCS 值 (0.2 MPa) 相吻合。而对于图 8b) 和图 8c), 可以看出结构逐渐密实, UCS 分别高达 5.1 MPa 和 7.2 MPa。



a) 10%改良剂



b) 20%改良剂



c) 30%改良剂

图 8 不同地聚合物改良剂掺量下的改良土微观结构

4 结论

1) 对于本工程软基淤泥, 采用水泥+石灰和石灰作为改良剂的改良效果较差。对于地聚合物改良剂和水泥改良剂, 当掺量大于 10% 时, 改良土的 UCS 逐渐增加, 相对于水泥改良剂, 地聚合物改良剂提升 UCS 的效果更加明显。

2) 随着 UCS 的增加, 地聚合物改良土和传统改良土的 E_{50} 都有所增加, E_{50} 与 UCS 具有较好的线性关系, 在同一 UCS 下, 地聚合物改良土刚度相对水泥改良土的略小。

3) 弯拉模量 R 值随着改良剂掺量的增加而上升, 整体变化趋势跟 UCS 相似, 总体来看, 水泥改良土的 R 值最高, 其次是地聚合物改良土、水泥+石灰改良土和石灰改良土。含水率对于 R 的影响不明显。

4) 考虑到经济成本, 20%的地聚合物改良剂掺量(5%FA+15%S)较为理想, 而且适用的含水率范围较广, 即 $0.75w_L \sim 1.25w_L$ 。

5) 从微观结构来看, 地聚合物改良土中, FA 与 S 充分发挥了作用, 产生了均匀的絮状凝胶产物, 与周边颗粒紧密胶结, 土体结构更加密实; 水泥改良土微观结构的密实程度欠佳; 水泥+石灰改良土和石灰改良土的孔隙较为明显, 尤其当石灰单独使用时, 可以观察到海绵状的结构, 这导致水泥+石灰改良土和石灰改良土的 UCS 都很低。

参考文献:

- [1] 冯兴国, 朱超, 沈阳, 等. 含水率对水泥—钢渣复合固化疏浚土性能的影响[J]. 水运工程, 2021(7): 1-6.
- [2] 付佰勇, 师启龙. 深层水泥搅拌桩承载特性研究进展分析[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(4): 29-31, 76.
- [3] 朱瑞虎, 郑金海, 杨永清. 地质雷达在海堤围堰爆破挤淤施工效果检测中的应用[J]. 水运工程, 2015(11): 30-32, 51.
- [4] 周道传, 朱海堂, 张启明, 等. 浇筑参数对混凝土介电性能影响的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 470-472, 477.
- [5] 徐建东, 陈超纲. 探地雷达收发天线极化方向变化对其电磁波响应的影响[J]. 公路工程, 2007(6): 137-140.
- [6] 李尧, 李术才, 刘斌, 等. 钻孔雷达探测地下不良地质体的正演模拟及其复信号分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 300-308.
- [7] 吴庆全, 杨子龙, 罗伟斌. 基于 GprMax 正演模拟及工

- [3] 付佰勇, 宋神友, 徐国平, 等. 碎石垫层与深层水泥搅拌桩复合地基沉降研究[J]. 公路, 2021, 66(5): 65-70.
- [4] 夏可强, 王伟. 海上“复杂地质条件下深层水泥搅拌”桩地基加固技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(7): 25-29.
- [5] DING J H, FENG Z M, SUN D, et al. Analysis of influencing factors of silt solidified soil in flowing state[J]. World journal of engineering and technology, 2019, 7(3): 455-464.
- [6] JAMES R, KAMRUZZAMAN A H M, HAQUEAND A, et al. Behaviour of lime-slag-treated clay[J]. Ground improvement, 2008, 161(4): 207-216.
- [7] 王东星, 肖杰, 肖衡林, 等. 武汉东湖淤泥碳化—固化试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1805-1812.
- [8] 邵俐, 李佩青, 王彬杰. 复合激发高炉矿渣加固软土的强度特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(5): 154-156.
- [9] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2187-2194.
- [10] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 364-371.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [12] LATIFI N, MEEHAN C L, MAJID M Z A, et al. Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calciumbased non-traditional additive: a micro-level study [J]. Appl Clay Sci, 2016, 132: 182-193.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 13 页)

- [8] 付佰勇, 宋神友, 徐国平, 等. 碎石垫层与深层水泥搅拌桩复合地基沉降研究[J]. 公路, 2021, 66(5): 65-70.
- [9] 葛德彪, 魏兵. 电磁波时域计算方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [10] WARREN C, GIANNOPoulos A, GIANNAKIS I. GprMax: open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar[J]. Computer physics communications, 2016, 209: 163-170.
- [11] GIANNOPoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax[J]. Construction & building materials, 2005, 19(10): 755-762.

(本文编辑 王璁)