



土壤稳定剂改良航道岸坡膨胀土试验研究*

王艳芳^{1,2}, 江涛³, 张磊¹, 夏炎¹

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017; 2. 金陵科技学院, 江苏 南京 211169;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为提高航道岸坡膨胀土的水稳性及干湿条件下的抗裂隙能力, 选用浓缩型 MB-148 CA 型土壤稳定剂对膨胀土进行土性改良。开展土的水稳性、干湿循环条件下的无侧限抗压强度以及扫描电镜试验, 从宏、细、微观多角度研究 MB-148 CA 型土壤稳定剂的改良效果及机理。试验结果表明: 1) 改良后土体水稳性较好, 无侧限抗压强度显著优于素膨胀土。在干湿循环条件下土体强度衰减速率及裂隙扩展速率得到有效抑制。2) 土壤稳定剂改良膨胀土的稀释浓度不应低于为 1:300 (体积比)。

关键词: 土壤稳定剂; 膨胀土; 干湿循环; 水稳性; 强度; 裂隙

中图分类号: U 614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0215-07

Experiment of soil stabilizer modifying swelling soil on channel bank slope

WANG Yan-fang^{1,2}, JIANG Tao³, ZHANG Lei¹, XIA Yan¹

(1.JSTI Group, Nanjing 210017, China; 2.Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;
3.CCCC Water Transportation Consultants Co. Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To improve the water stability of the swelling soil on the channel bank slope and the fracture resistance of the swelling soil under wetting-drying conditions, this study adopts the concentrated MB-148 CA soil stabilizer to modify the soil properties of the swelling soil. It examines the modification effect and mechanism of the MB-148 CA soil stabilizer from macroscopic, mesoscopic, and microscopic perspectives by testing the water stability of the soil and the unconfined compressive strength of the soil under wetting-drying cycle conditions and conducting scanning electron microscopy tests of the soil. The test results support the following conclusions: 1) The modified soil has better water stability, and its unconfined compressive strength is significantly higher than that of the plain swelling soil. The soil stabilizer adopted effectively suppresses the strength degradation rate of the soil and the fracture propagation rate under the wetting-drying cycle conditions. 2) The dilution concentration for the soil stabilizer to modify the swelling soil should not be lower than 1:300(volume ratio).

Keywords: soil stabilizer; swelling soil; wetting-drying cycle; water stability; strength; fracture

膨胀土是由强亲水矿物如蒙脱石、伊利石等组成的高液限高塑性黏土^[1], 具有强烈的胀缩特性、多裂隙性和强度衰减性, 常会引发土坡失稳、

地基裂缝、结构沉降错位等诸多工程病害, 尤其临渠岸坡、航道岸坡的膨胀土病害更是屡见不鲜^[2]。在无机改良材料方面, 石灰、水泥、粉煤

收稿日期: 2022-02-27

***基金项目:** 国家重点研发计划重点专项(2019YFC15098000); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908278); 江苏省高校自然科学基金面上项目(19KJD410002); 金陵科技学院高层次人才科研启动项目(jit-b-202017)

作者简介: 王艳芳(1983—), 女, 博士, 副教授, 从事膨胀土灾害治理、岩土工程相关科研及教学工作。

灰、碱渣、砂等^[3-5]是常见的固化材料,其中石灰和水泥最为普遍,这类材料能较大程度提高膨胀土的力学强度,但改善膨胀土的水稳性效果不良,在干湿循环条件下对强度衰减及胀缩裂缝的抑制效果不佳。因此,涉水工程中的膨胀土病害并不适宜用这类材料来处治。在化学改良方面,土壤固化剂用于改良膨胀土,既能增加膨胀土的最大干密度、压实度、CBR 值,又能改善膨胀土的胀缩性和水稳性^[6-8],逐渐受到了研究者们的青睐。

近年来,国内外学者借助土工试验、微观电镜及数字图像处理技术,围绕干湿循环条件下改良膨胀土强度衰减及裂缝演化机制开展了大量研究,多角度探索了干湿循环条件下膨胀土胀缩劣化机理,成果显著^[9-12]。笔者应用浓缩型 MB-148 CA 型土壤稳定剂改良芜申航道南京段岸坡工程的膨胀土。该边坡所处地理位置特殊,航道水位四季变幅较大,加之天然地质作用及人为影响的干扰,导致多次出现滑移,膨胀土病害尤其显著。鉴于此,笔者开展了土的水稳性、干湿循环条件下土的无侧限抗压强度以及扫描电镜试验,分析所选土壤稳定剂改良该航道滑坡体膨胀土的可行性。根据改良前后膨胀土裂隙特性、力学性能以及微观结构演化规律,提出该浓缩型离子土壤稳定剂的最优稀释比,应用于临水膨胀土边坡病害处治工程,为膨胀土土性改良提供新思路,为工程应用提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

1)素(膨胀)土取自航道边坡,位于芜申线航道南京红卫桥至下坝段,本段航道发生多次滑坡,经补勘发现场地内的换填土与黏土均为膨胀土,具有胀缩性、易膨胀开裂,在降雨作用下容易引发降雨入渗,使土体软化,影响岸坡的稳定性。取样深度为自坡顶以下 2~4 m,刚取出的膨胀土呈土黄色,天然状态下处于硬塑状态。膨胀土物理力学参数为:天然含水率 21.2%,优含水率 18.0%,天然密度 1.92 g/cm³,土粒比重 2.72,液限 45.0%,塑限 20.8%,塑性指数 24.2,自由

膨胀率 60.0%,黏聚力 75 kPa,内摩擦角 30.0°。由于土体自由膨胀率为 60.0%,根据 GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》,所取土料具有弱-中膨胀性。其中,黏聚力和内摩擦角由直剪试验(快剪)测得。

2)土壤稳定剂来自美国 MICAVA(美嘉华)国际公司提供的浓缩型 MB-148 CA 型土壤稳定剂,主要成分中含有阳离子活性有机硫代化合物,在土壤和黏土颗粒表面能形成保护性油层,从而减少土壤与水分子间的离子运动和离子互换、消除土壤颗粒的水分吸附,具有无毒、无害、无污染的特点。

1.2 试验方案及方法

1.2.1 最佳稀释比的确定

为确定浓缩型土壤稳定剂改良膨胀土最适宜稀释浓度,将土壤稳定剂与去离子水按体积比 1:150、1:200、1:250、1:300、1:400 配备成稀释溶液备用,再以膨胀土的最优含水率配备土样,土拌匀后分别密封静置 24 h。土调配好后,分别对土壤稳定剂改良土进行自由膨胀率及水稳试验。水稳试验时制备尺寸为 $\phi 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的素膨胀土、改良土样,完全浸泡在水中 1 周,观察浸水期间土样的稳定状况。综合自由膨胀率和水稳性的试验结果得出土壤稳定剂的最佳稀释浓度。

1.2.2 干湿循环试验

在最佳稀释比(体积比)下进行干湿循环试验,包括无侧限抗压强度试验、土样表面裂隙及微观孔隙试验。进行 5 次干湿循环,干步骤时,将土样置于烘箱中低温烘干,温度设定为 40℃,控制干燥试样含水率为 4%;湿步骤时,真空泵抽气 4 h,置入饱和缸饱水 24 h 以上,控制饱和含水率 31%;称取各时刻试样质量,初期采集频率为 2 h/次,当接近控制含水率时采集频率为 6 min/次。

1)无侧限抗压强度试验。制备素膨胀土、改良土样各 6 组,每组 4 个样。在每次湿步骤结束后,取出土样进行干湿循环条件下的无侧限抗压强度对比试验。当轴向应力读数达到峰值时,应再进行 3%~5%的轴向应变值停止试验;当读数无稳定值或者峰值时,进行到轴向应变达 20%为止。

2) 表面裂隙提取试验。采用尺寸为 $\phi 110\text{ mm}\times 63.1\text{ mm}$ 的大环刀制备 2 组土样, 进行干湿循环条件下的土样裂隙演变规律对比研究。干湿循环时, 在每次干步骤结束取出试样, 采用高清数码相机采集试样表面裂隙照片, 利用图片处理软件对照片进行数值化处理, 提取出不同干湿循环次数下试样的裂隙宽度及长度值, 进而求出表观裂隙参数。

3) 微观孔隙扫描试验。采用尺寸为 $\phi 63.1\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的小环刀制备两组土样, 每组 6 个样。干湿循环时, 在每次湿步骤结束取出 1 个饱和状态下的试样, 切取中间部分, 切成 2 cm 长、1 cm 宽、1 cm 高的长条形土条, 在自然状态下风干, 切勿扰动、磨损, 利用环境扫描电子显微镜 (FEI-Quanta250) 对试样做扫描试验, 得到土体的 ESEM 图像。

2 试验结果

2.1 土壤稳定剂改良效果分析

图 1 为掺入不同稀释比例的土壤稳定剂后试样的自由膨胀率柱状图。由图 1 可知, 土壤稳定剂能一定程度降低膨胀土的自由膨胀率, 但这种降低程度与土壤稳定剂溶液稀释比浓度相关性不大。随着

溶液稀释比的减小, 土体自由膨胀率减小的幅度略微减缓, 说明土壤稳定剂能改善土体自由膨胀率, 但稀释比在 1:150~1:250 时差异性不大。

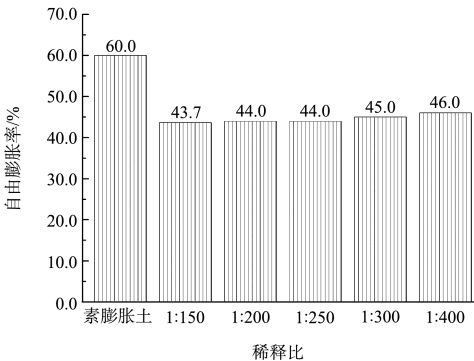


图 1 试样自由膨胀率柱状图

图 2 为土样浸水前后水稳差异性对比。由图 2a)~2c) 可知, 长时间浸水会影响膨胀土的稳定性, 但拌入土壤稳定剂能明显提高土体的水稳性, 尤其是当土壤稳定剂稀释体积比为 1:150 时, 改良后的膨胀土水稳性较好, 说明膨胀土中拌入一定浓度的土壤稳定剂能起到提高土体水稳性的作用; 土壤稳定剂浓度稀释体积比为 1:200 时效果稍差; 当土壤稳定剂浓度稀释体积比达到 1:300 后, 改良土与素膨胀土均出现不同程度的破坏。如图 2d)、2e) 所示, 土样周身多见环状裂缝, 局部有非贯通竖向裂缝, 纵横裂缝贯通后引起土体局部剥落乃至碎裂。

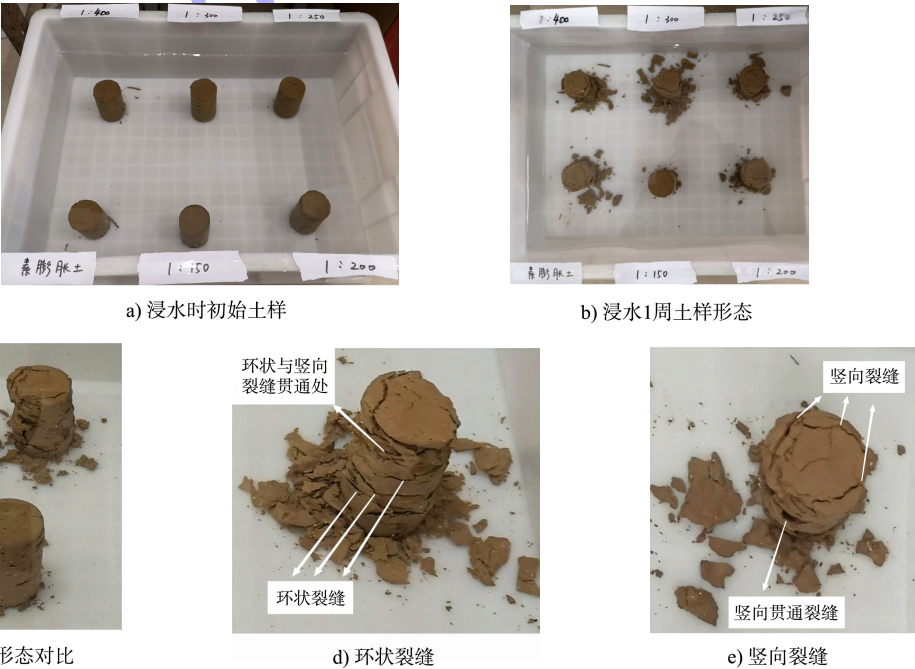


图 2 土壤稳定剂改良膨胀土的水稳性试验结果

实际上，土壤稳定剂拌入土体后，主要起到减小黏土颗粒间结合水膜的厚度，使得矿物颗粒间的距离减小，从而增强土颗粒间的黏结强度，这对提高膨胀土压实性、减小膨胀土的自由膨胀率、增强水稳性有很好的作用，但其改善效果受土壤稳定剂稀释浓度影响，且这个浓度不宜过低。依据试验结果，选用的浓缩型 MB-148 CA 型土壤稳定剂体积比稀释浓度不宜超过 1:300。该土壤稳定剂在改良高液限软土的工程实践中具有环保、经济、改良效果好的特点。结合施工单位工程经验，每 1 mL 浓缩型 MB-148CA 型土壤稳定剂可固化改良高液限软土的质量近 1 kg，且拌匀后静置洒水养护 24 h 即可进行工程路基压实。膨胀土亦属于高液限黏土，具有极强亲水性。素膨胀土的最优含水率为 18.0%，体积比换算下来土壤稳定剂适宜的稀释体积比为 1:180；而室内水稳试验采用稀释体积比为 1:150 的土壤稳定剂改良膨胀土的效果最佳，室内试验结果与现场施工经验基本吻合。因此，后续试验仍按土壤稳定剂稀释体积比为 1:150 来改良膨胀土，进一步讨论干湿循环条件下土壤稳定剂抑制膨胀土强度衰减速率及裂隙扩展速率的效果。

2.2 无侧限抗压强度

图 3 为不同循环次数下素膨胀土、改良土的应力-应变关系曲线。可以看出，素膨胀土、改良土的应力-应变关系曲线均呈应变软化的特征。在干湿循环条件下，土体无侧限抗压强度 q_u 均随循环次数的增加逐渐降低，素膨胀土的力学强度受干湿循环效应影响更明显。如图 4 所示，素膨胀土在干湿循环 5 次后，峰值强度下降了 44.5%；改良土力学强度的劣化也会受到干湿循环效应影响，但劣化程度得到改善，干湿循环后其峰值强度削弱程度为 33.8%。且经改良后膨胀土的强度劣化呈相对匀速下降规律，使得工程上不易出现突发性失稳事故，更有利于工程处治，改良后的膨胀土表现出了一定的抗干湿劣化能力。

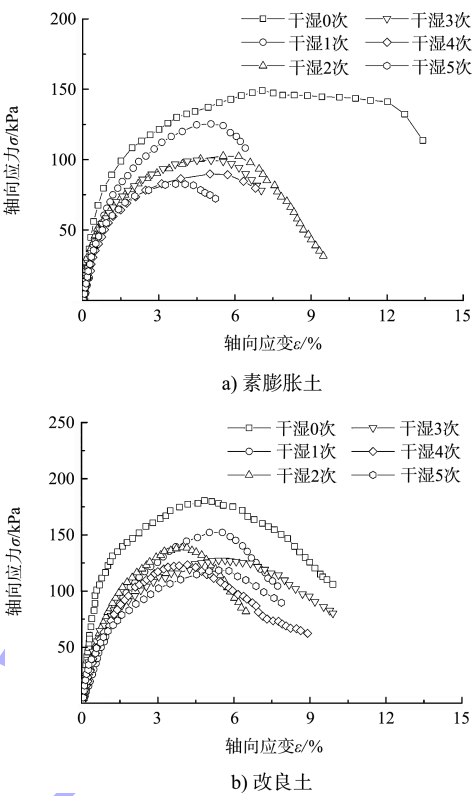


图 3 无侧限抗压强度应力-应变关系曲线

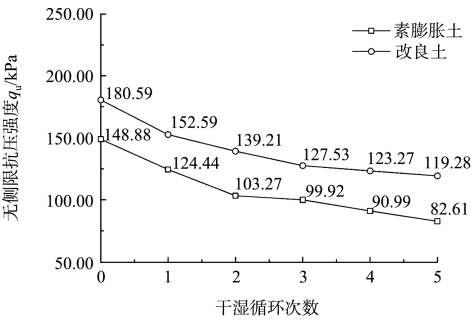


图 4 干湿循环条件下无侧限抗压强度衰减曲线

2.3 土样表面裂隙分析

图 5 是干湿循环条件下素膨胀土及改良土裂隙比对情况。利用 Image-J 与 Photoshop 软件对土样裂隙照片进行背景处理、灰度处理、二值化处理和裂隙骨架化处理，即可得到数字化的裂隙对比。由图 5 可看出，素膨胀土历经数次干湿循环后，外观变化显著，裂隙宽度及数量逐渐增加。具体为未经历干湿时土体结构较为致密，外观完整度高；干湿循环起始阶段(干湿 0~1 次)，试样边缘体缩效应显露，细观裂隙浮现，主要集中在试样中心部位，整体裂隙率、隙长、隙宽加剧；

干湿循环发展阶段(干湿 2~3 次), 裂隙率持续突出, 隙长加剧、隙宽加剧、局部延伸至试样边缘, 试样表面有矿物泥化析出; 干湿循环稳

定阶段(干湿 4~5 次之后), 裂隙发展趋于稳定, 试样表面的裂隙率、裂隙长、裂隙宽度均接近极限。

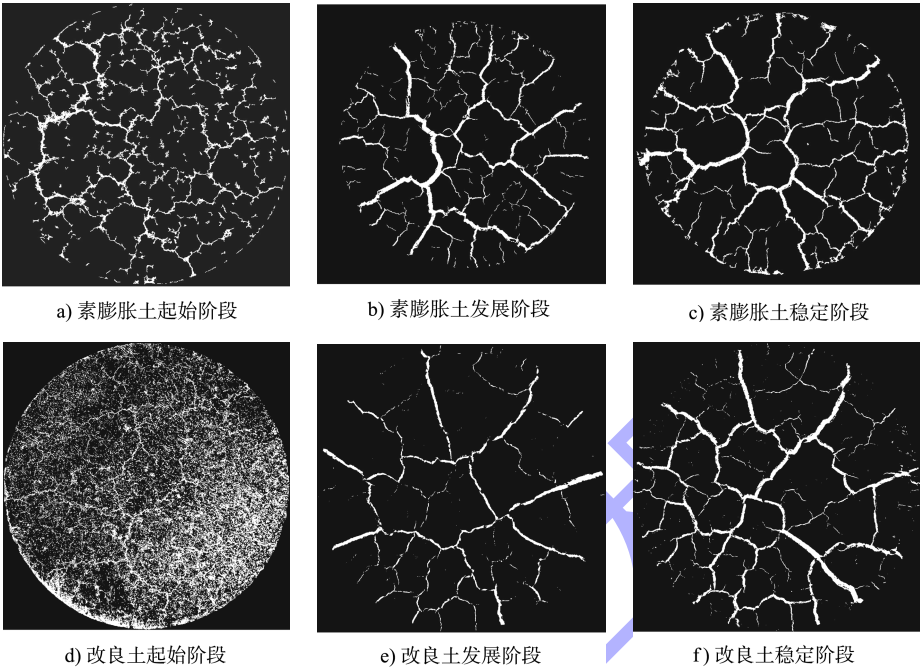


图 5 干湿循环条件下试样裂隙演化规律

定义土样平均裂隙率为裂隙投影面积与试样初始总面积之比(不考虑试样体缩); 平均裂隙宽度为裂隙总面积与裂隙总长度之比。提取各土样在各次干湿循环次数下的裂隙参数值, 求解出不

同干湿循环次数下各试样的平均裂隙率和平均隙宽, 可得土样平均裂隙率和平均裂隙宽度随干湿循环次数变化的关系曲线, 见图 6。

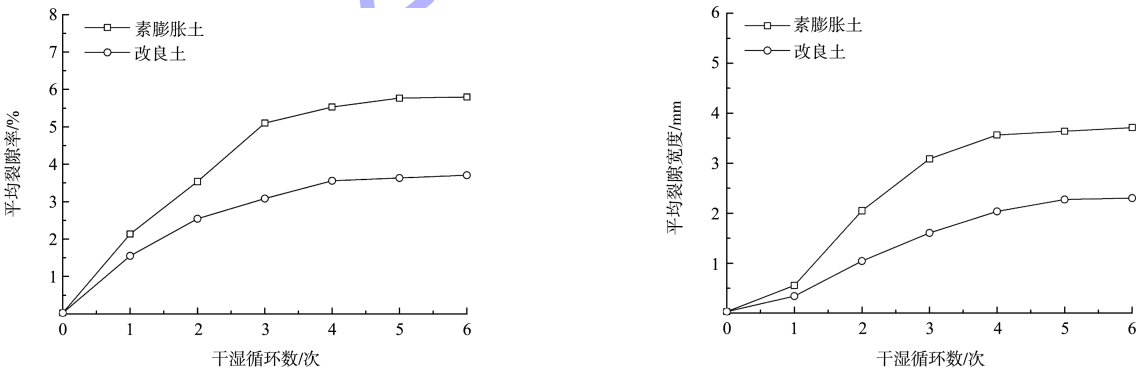


图 6 试样平均裂隙率及平均裂隙宽度随干湿循环次数的变化曲线

由图 6 看出膨胀土裂隙的发展是一个渐进的过程。随着干湿循环次数的增加, 前期裂隙发育速度较快, 随后发育速度放缓并逐渐趋于稳定。前 3 次干湿循环后, 裂隙宽度、长度均迅速增加。素膨胀土的平均裂隙率增至 5.09% (改良土为 3.08%), 占整体增幅的 88% (改良土为 83%); 素

膨胀土平均裂隙宽度接近 3.5 mm (改良土为 2.0 mm 左右), 说明土壤稳定剂对膨胀土的裂隙数量及裂隙宽度都有较好的抑制效果。后 3 次干湿循环, 两种土样的平均裂隙率及平均裂隙宽度增幅迅速减弱, 裂隙数量及宽度变化并不大, 裂隙处有泥化物析出使得裂隙发育深度加深。这是

因为在干湿循环的末期，土体内有更多细微的次生裂隙产生，使得土样平均隙宽增加不明显，其次干湿循环末期土样体积干缩效应更显著，体积干缩挤压已有裂隙，使其侧壁处的欠稳定颗粒崩落至裂隙内，再次降低裂隙宽度。从力学角度分析，干湿循环条件下土样裂隙的发育是一种张拉破坏。主裂隙一旦形成，限制垂直于主裂隙方向上的变形作用也被解除，相应的应变能得以释放，而平行于主裂隙发育方向的应变能继续积聚，张拉应力场强度持续增加，当超过土体的抗拉强度时新的子级裂隙便会形成。随着子级裂隙处应变能的释放，应力场又一次重新调整，从而诱发新的裂隙发

育。当表面裂隙发育到一定程度，应力场将会向纵向调整，引发土体内部纵向裂隙的发育。

2.4 土样微观结构

图 7、8 为不同干湿循环次数下土样的微观结构特征。可以看出，在干湿循环作用下，两种土的颗粒间隙不断扩展，土体的孔隙率和孔径均逐渐变大。原因在于干湿循环作用下土样内部矿物成分逐渐泥化析出，致使土体颗粒结构、颗粒间孔隙结构发生变化。同时，对比发现素膨胀土的这种泥化析出更严重，表明土壤稳定剂能减缓土体内部矿物成分的泥化析出，从而起到抑制膨胀土孔隙扩展速率、减缓裂隙发育的作用。

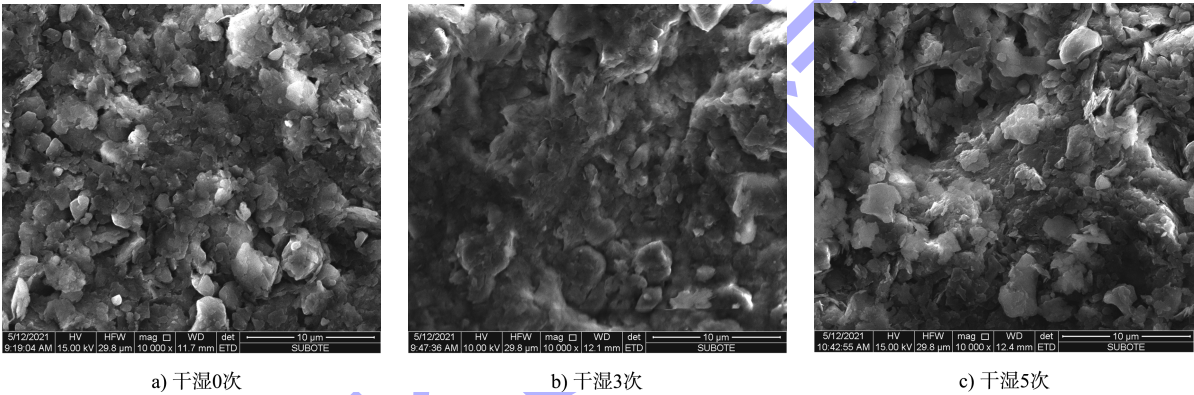


图 7 土壤稳定剂改良土孔隙结构随干湿循环次数的演化特征

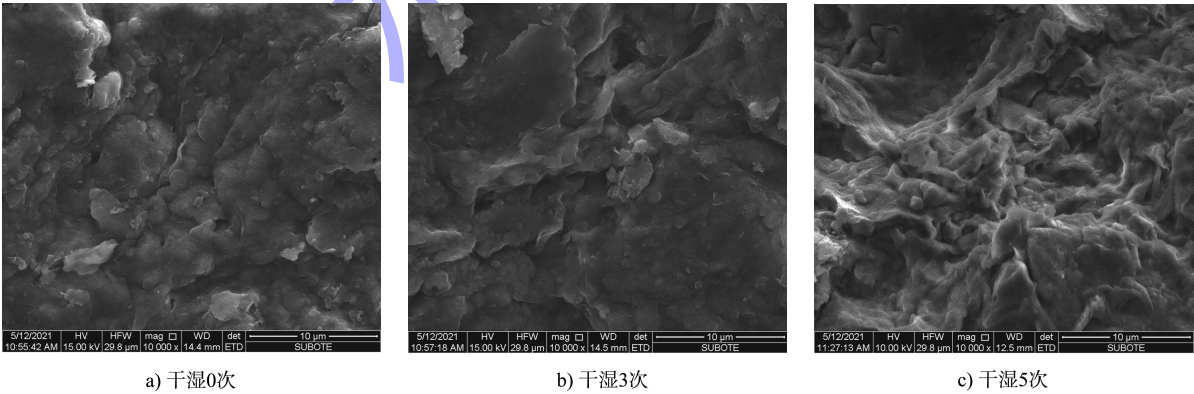


图 8 素膨胀土孔隙结构随干湿循环次数的演化特征

3 结论

1) 土壤稳定剂改良膨胀土的稀释体积比不建议低于 1:300，土壤稳定剂改良后的膨胀土水稳性显著提高。在干湿循环作用下，改良后膨胀土的无侧限抗压强度不会急剧劣化，而是呈匀速衰减的特征。

2) 素膨胀土、稳定剂改良土在经历干湿循环后，其劣化特征均为裂隙突出、体缩效应加剧及完整度退化。在干湿循环条件下，两种土样裂隙发展历程可分为起始阶段(干湿 0~1 次)、发展阶段(干湿 2~3 次)、稳定阶段(干湿 4~5 次之后)，土壤稳定剂的拌入能减小土样裂隙发育的平均裂

隙率及平均隙宽。

3)随着干湿循环次数的增加,土体内部矿物泥化析出,土体的孔隙率和孔径均逐渐变大。添加土壤稳定剂能减缓土体内部矿物成分的泥化析出,对抑制膨胀土孔隙扩展速率、减缓裂隙发育有一定作用。

参考文献:

[1] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[2] 陆定杰, 陈善雄, 罗红明, 等. 南阳膨胀土渠道滑坡破坏特征与演化机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 189-196.

[3] 杨俊, 童磊, 张国栋, 等. 初始含水率和改良材料掺量对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 水利水电科技进步, 2014, 34(3): 39-43, 49.

[4] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4675-4684.

[5] 郑新江, 徐永福. 盐溶液饱和高庙子膨润土的强度特性[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 783-788.

(上接第 201 页)

4 结语

1)针对目前船闸工程缺少快捷、高效的钢筋算量方法和专业软件的现状,本文基于 Revit 软件提供的 API 进行了二次开发,开发出一款可自动算量、一键提取的船闸工程钢筋算量插件。

2)本文以淮河航道临淮岗复线船闸工程上闸首钢筋算量为例,通过比较 Revit 软件原生钢筋算量和基于 Revit 二次开发的钢筋算量,验证了二次开发的算量插件具有计算高效、过程可视化的特点,同时保证设计图纸工程量与插件计算工程量的差值在误差允许范围内,具有较强的应用价值,可供类似项目钢筋算量工作参考。

参考文献:

[1] 贾盈平. 基于 BIM 技术的工程结构钢筋算量系统研

[6] 陈永青, 廖祥辉, 方炫强, 等. 膨胀土改良剂配方试验研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(13): 1445-1451.

[7] 庄心善, 余晓彦. 石灰-玄武岩纤维改性膨胀土强度特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 166-170.

[8] 文畅平, 王解军. 基于南水模型生物酶改良膨胀土应力-应变关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 1011-1019.

[9] 黄欣. 新型土壤处理剂对膨胀土的改良试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.

[10] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941.

[11] CHEN T L, ZHOU C, WANG G L, et al . Centrifuge model test on unsaturated expansive soil slopes with cyclic wetting-drying and inundation at the slope toe[J]. International journal of civil engineering, 2018, 16(10): 1341-1360.

[12] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土裂隙演化特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4555-4563.

(本文编辑 武亚庆)

发[D]. 上海: 上海大学, 2016.

[2] 于鑫, 蒋绮琛, 李鑫, 等. 基于 Revit 二次开发实现三维钢筋算量[J]. 土木建筑工程信息技术, 2019, 11(3): 38-43.

[3] 高涛, 陈云娟, 敬艺, 等. 基于 BIM 技术的钢筋算量应用研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(5): 97-102.

[4] 詹述琦. 建筑工程独立基础钢筋平法识图与算量[J]. 安徽建筑, 2020, 27(7): 213-214.

[5] 张国启, 邵凌, 陈灿奇, 等. 基于 BIM 的钢筋工程复杂节点深化设计及应用[J]. 建筑机械化, 2021, 42(3): 66-68.

[6] 中冶建筑研究总院有限公司, 冶金工业信息标准研究院, 首钢长治钢铁有限公司, 等. 钢筋混凝土用钢第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB/T 1499.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

(本文编辑 王璁)