

干湿循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究

吴燕开¹, 乔晓龙¹, 李丹丹¹, 韩 天², 苗盛瑶¹, 曹玉鹏³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 中铁建工集团山东有限公司, 山东 青岛 266061;

3. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为有效控制干湿循环作用下膨胀土的膨胀性, 利用水泥钢渣粉掺合料改良膨胀土. 通过室内试验, 研究了纯膨胀土(Es)、水泥改良膨胀土(Es-C)、钢渣粉-水泥改良膨胀土(Es-SSP-C)和钢渣粉-水泥-NaOH 改良膨胀土(Es-SSP-C-N)在不同养护龄期以及不同干湿循环次数下的无荷载膨胀率、体积质量变化率、无侧限抗压强度(UCS)等物理力学性质的变化规律, 并结合扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析, 对改良土内部的微观结构和物质进行探讨. 结果表明: 3 种改良土的无荷载膨胀率均减少 95% 以上, 膨胀达到稳定的时间缩短, 其中: Es-SSP-C-N 对膨胀土膨胀性的控制效果最佳; 经干湿循环作用后, 改良土的体积变化率控制在 1.6% 以内, 减小 85%, 质量变化率远低于未改良土, 其中 Es-SSP-C 的体积、质量变化率最稳定; 3 种改良土的无侧限抗压强度均有明显提高, 其中 Es-SSP-C-N 的强度最高, Es-SSP-C 对多次干湿循环作用下强度劣化的抵抗效果最优; 但钢渣粉自身水化周期较慢, 约为 60 d, 掺加少量 NaOH 可以有效激发其水化活性.

关键词: 干湿循环; 改良膨胀土; 钢渣粉水泥; 无荷载膨胀率; 体积变化率; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0319-11

Experimental study on expansive soil improved by steel slag powder-cement under dry-wet cycles

WU Yankai¹, QIAO Xiaolong¹, LI Dandan¹, HAN Tian², MIAO Shengyao¹, CAO Yupeng³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China;

2. China Railway Construction Engineering Group Shandong Co., Ltd., Qingdao, 266061, China

3. School of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 266590, China)

Abstract: In order to effectively control the swelling characteristics of expansive soil under dry-wet cycles, the cement-steel slag powder admixture was used to improve expansive soil. The samples of expansive soil (Es), cement improved expansive soil (Es-C), steel slag powder-cement improved expansive soil (Es-SSP-C) and steel slag powder-cement-NaOH improved expansive soil (Es-SSP-C-N) were prepared. The change rules of physical and mechanical properties such as no-load expansion rate, volume mass change rate and unconfined compressive strength (UCS) of the samples under different curing ages and different dry-wet cycles were tested. Combined with scanning electron microscope (SEM) and energy spectroscopy (EDS) analysis, the microstructure and material changes of the improved soil were discussed. The tests results showed that the no-load swelling rate of each improved soils were reduced by more than 95%, and the time for the swelling to reach stability was shortened, among which Es-SSP-C-N has the best control effect on the swelling of expansive soil. After dry-wet cycles, the volume change rate of each improved soils were controlled within 1.6%, which is reduced by 85%, and the mass change rate was much lower than that of the expansive soil, the volume and mass change rate of Es-SSP-C is the most stable. The unconfined compressive strength of each improved soils were significantly improved, among which Es-SSP-C-N had the highest strength, and Es-SSP-C had the best resistance to strength deterioration under repeated dry-wet cycles. The hydration cycle of steel slag powder itself was slow, about 60 days, and its hydration activity could be effectively stimulated by adding a small amount of NaOH.

Key words: dry-wet cycle; improved expansive soil; steel slag powder-cement; no-load swelling rate; volume change rate; unconfined compressive strength

收稿日期: 2020-10-07 修改稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608312); 山东科技大学科研创新团队基金支持项目(2015KYDT104)

第一作者: 吴燕开(1976—), 男, 博士, 副教授. 主要从事不良地基土改良等方面的教学科研工作. E-mail: wuyankai2000@163.com

通信作者: 乔晓龙(1996—), 男, 硕士生, 主要研究改良土方面的内容. E-mail: QXLnjxm795@163.com

膨胀土的主要组成为蒙脱石、伊利石等强亲水性粘土矿物,具有显著的吸水膨胀与失水收缩的特性.已有研究表明,膨胀土的含水率及环境的湿度变化都会对其物理力学性能造成极大的影响^[1],尤其在干湿变化比较频繁的气候条件下,膨胀土在多次经历浸水和蒸发的过程后裂隙发展,土体软化,强度明显减弱,对工程安全带来极大的隐患.

为了有效改善膨胀土的胀缩特性,需要对其进行改良处理.膨胀土的改良措施主要包括湿度控制、土壤置换、特殊地基处理和化学改良^[2].目前化学改良膨胀土的研究成果已有不少,使用的改良材料也较为多样:李东森等^[3]利用水泥和石灰改良膨胀土;Cokca^[4]使用粒化高炉矿渣水泥改良膨胀土;Ashango^[5]使用钢渣、稻壳灰和生石灰改良膨胀土;吴燕开^[6]等采用钢渣粉水泥改良膨胀土;郭铎^[7]采用稻壳灰和电石渣改性膨胀土;毕海民^[8]等使用粉煤灰混合聚丙烯纤维改良膨胀土;孙孝海^[9]等使用工业碱渣改良膨胀土等,以上改良方式均能有效抑制膨胀土的膨胀性,并提高膨胀土的强度.为了探讨改良膨胀土在外界条件变化(如干湿循环、冻融循环)情况下的工程应用问题,有部分学者对干湿循环作用下改良膨胀土的性质进行研究:Dong^[10]利用石灰对膨胀土改性后,发现经过多次干湿循环后改良膨胀土的强度和变形指数都达到稳定值;韩春鹏^[11]等发现在干湿循环条件下,向膨胀土中掺入纤维,可以有效抑制土体表面裂隙的开展;单熠博^[12]等通过试验发现硅灰改良膨胀土具有较好的水稳性,经历干湿循环后其粘聚力和内摩擦角仍能保持较高水平;孙乐乐^[13]等利用粉煤灰对膨胀土进行改良,发现该方法可以抑制膨胀土在干湿循环过程中的裂隙发展,降低膨胀土的水敏性;张德恒^[14]等研究了秸秆灰渣改良膨胀土在干湿循环条件下的抗剪强度变化规律,发现随着秸秆灰渣掺量的增加,干湿循环对改良土抗剪强度的影响程度逐渐减小.随着可持续发展战略的不断深化,利用固体废弃物改良膨

胀土正成为一个热门话题,但有关固体废弃物改良膨胀土在干湿循环作用下性质变化的研究还较少,所以合理利用废弃资源改良膨胀土,研究干湿循环作用下其性质变化和微观作用机理具有重要的理论意义和工程实用价值.

钢渣的主要化学成分与水泥相似,有 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃ 等,将钢渣作为胶凝材料使用是目前有关钢渣研究的主题^[15],目前对于钢渣的研究有不少,其活性激发工艺也日趋完善,钢渣在建筑工程中也逐渐成为热点材料.但我国钢渣的利用率与发达国家相比仍有较大差距,2014 年我国钢渣综合利用率仅为 10%^[16],2018 年我国钢渣利用率提升至约 30%,而日本为 98.4%,欧洲为 87.0%,美国为 84.4%^[17];堆放丢弃的钢渣不仅严重占用土地资源,还会导致土壤、表层水和地下水污染^[18].

综上所述,采用钢渣粉代替部分水泥改良膨胀土,不仅可以有效改善膨胀土的工程特性^[6],还可以对废弃的钢渣进行有效利用.所以本文以临沂膨胀土为研究对象,采用水泥、钢渣粉和活性激发剂 NaOH 对膨胀土进行改良,研究干湿循环作用下钢渣粉水泥对膨胀土的改良效果及对干湿循环环境的承受能力,并通过微观结构分析,探讨其物理力学性质变化的内在机理.

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用膨胀土取自山东省临沂市南郊,土样呈灰黑色,可塑,粘性较强,天然含水率高,裂隙面呈蜡状、光滑,土体天然状态下的物理力学参数如表 1 所示.根据土的分类标准,该土为高液限黏土,根据膨胀土的潜势分类可定为中膨胀土,试验中取晾干研磨后直径在 2 mm 以下的土样制作试样.根据水泥化学分析方法(GB/T 176-2017)^[19],水泥与钢渣粉的化学成分如表 2 所示,可以看出,钢渣粉和水泥的组成成分相似.钢渣粉活性激发剂采用 NaOH,纯度为分析纯.

表 1 膨胀土物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of expansive soil

比重	天然含水率	湿密度	干密度	孔隙比	塑限
d_s	$\omega/\%$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	e	$\omega_{WP}/\%$
2.70	31.1	1.83	1.43	0.94	32.4
液限	塑性指数	液性指数	自由膨胀率	内摩擦角	黏聚力
$\omega_{WL}/\%$	I_P	I_L	$F_s/\%$	$\varphi/^\circ$	c/kPa
67	34.6	-0.04	67	12.8	168

表 2 钢渣粉和水泥的主要化学成分及百分含量

Tab. 2 Main chemical composition and percentage of steel slag powder and cement

化学成分	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅
钢渣粉	45.99	2.55	14.07	4.26	24.15	4.36	—	—	2.6
水泥	65.14	5.03	22.17	4.30	0.510	—	2.70	0.15	—

1.2 试样制备与试验方案

1.2.1 试样制备

试样的制备采用压实法, 初始含水率为最优含水率, 由击实试验确定, 根据课题组前期的研究成果^[6,20], 各掺合料的最佳配比如表 3 所示. 根据击实试验得到的最大干密度计算制样所需膨胀土的质量, 并根据各掺合料的配比, 计算出水泥、钢渣粉、NaOH 和水的质量. 将膨胀土样和各掺合料在容器中搅拌均匀后, 放入 39.1×80 mm 和 61.8×20 mm 的模具中成型(前者用于 UCS 试验, 后者用于膨胀率试验). 脱模后的样品放入 95% 湿度和 20 ℃ 的标准恒温恒湿养护箱中养护. 样品的养护时间分别为 7 d、28 d、60 d 和 90 d.

表 3 各类改良土掺合料配比(质量百分比)

Tab. 3 Material ratio of various samples (mass percentage)

试样	掺合料含量/%		
	水泥	钢渣粉	NaOH
Es	0	0	0
Es-C	10	0	0
Es-SSP-C	5	15	0
Es-SSP-C-N	5	15	1.5

注: Es 为纯土; Es-C 为水泥土; Es-SSP-C 为钢渣粉-水泥土; Es-SSP-C-N 为钢渣粉-水泥土-NaOH.

1.2.2 试验方案

对养护不同龄期的试样, 分别进行室内模拟干湿循环试验, 对不同次数干湿循环后的试样进行无荷载膨胀率、体积变化率、质量变化率、无侧限抗压强度试验, 再利用扫描电镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 试验对其微观结构进行分析.

室内模拟干湿循环试验方法: 先增湿后干燥构成一次干湿循环. ①增湿, 膨胀土试样采用与文献[21]相似的方法: 选取两个容器, 一个盛放试样, 另一个盛水, 盛放试样的容器高度略低于盛水容器, 将制作好的试样包上纱布放入容器中, 通过纱布将存于较高容器中的水引出并逐渐浸润试样; 对于改良土试样采用浸泡法^[22], 在一个容器中盛水, 将制作好的试样用纱布包好, 直接放入水中吸水, 吸水时间为 12 h. ②干燥, 采用自

然晾干的方法, 将吸水后的试样取出, 取下纱布后立即量取质量和体积, 再包上干燥的纱布放置于自然室温条件下, 静置 12 h, 完成一次干湿循环.

干湿循环试验方案如表 4 所示. 其中, 60 d 养护龄期的试样循环次数为 0、1、3、5、7、9、15 次.

表 4 干湿循环试验方案

Tab. 4 dry wet cycle test scheme

试样编号	试样	养护龄期/d	循环次数/次
1-6	Es	7	0、1、2、3、4、5
7-29	Es-C	7、28、60、90	0、1、3、5、7、9
30-53	Es-SSP-C	7、28、60、90	0、1、3、5、7、9
54-77	Es-SSP-C-N	7、28、60、90	0、1、3、5、7、9

2 试验结果与讨论

2.1 干湿循环对改良膨胀土物理特性的影响分析

2.1.1 无荷载膨胀率

图 1 为纯膨胀土试样在经历不同次数干湿循环后的无荷载膨胀率, 由图可知, 干湿循环作用后无荷载膨胀率具有阶段分级现象, 分别为 0 次循环, 第 1、2 次循环及第 3、4、5 次循环, 其无荷载膨胀率约为 5.4%、8.9% 和 13.1%, 且试样的无荷载膨胀率在经历 5 次循环之后达到稳定, 刘宽^[23]等将这三个阶段分为启裂期、传播期和平衡期. 在湿胀干缩的反复作用下, 土体中裂隙发展和微裂隙贯通是一个渐变的过程, 裂隙的不断发展导致无荷载膨胀率增大, 前三次循环对试样的影响较大, 膨胀率增长明显, 随着循环次数继续增加, 裂隙发展至平衡期, 无荷载膨胀率最终趋向于稳定.

从图中还可以发现, 土体无荷载膨胀率的变化规律可分为快速上升阶段、缓慢上升阶段和稳定阶段, 经过干湿循环后, 无荷载膨胀率的快速上升阶段时间有所延长, 这是由于膨胀仪有侧壁约束, 试验中试样只能通过下表面吸水, 并通过渗透和毛细作用等输送到试样内部, 致使水分向

试样内部传输较慢,而经历干湿循环后,试样内部的裂隙发展,裂隙中可承载的水量随之增多,达到饱和和所需的时间更长,所以曲线上升阶段逐渐变缓。

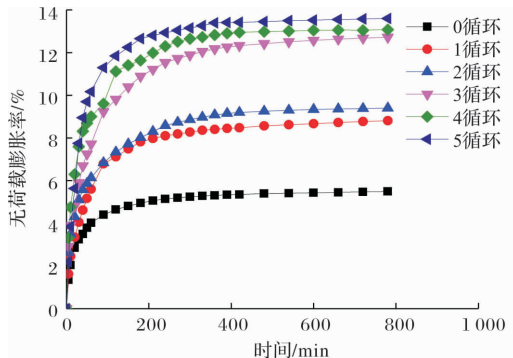
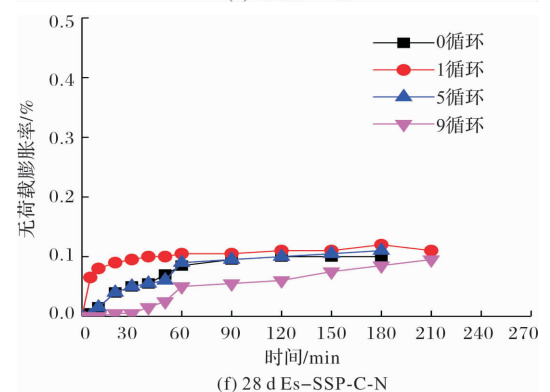
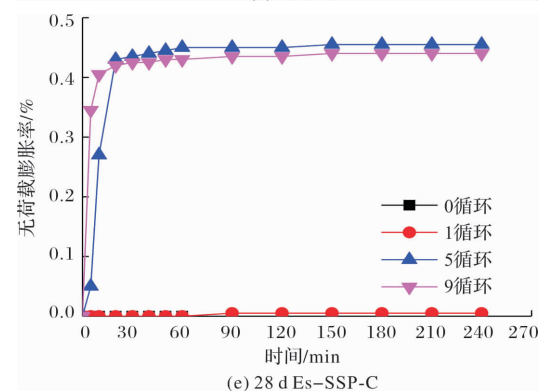
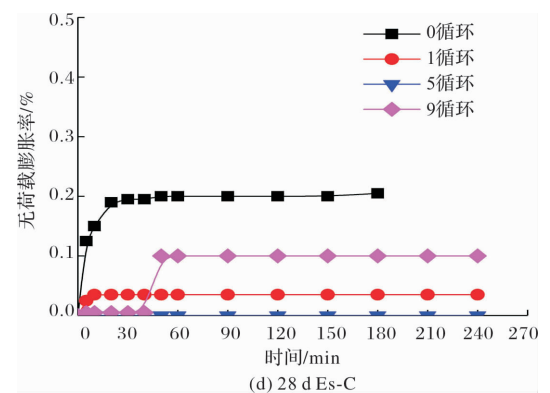
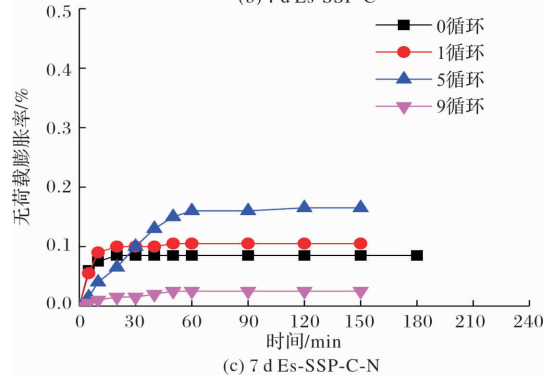
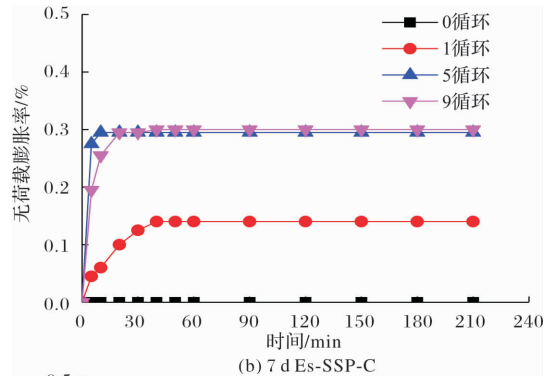
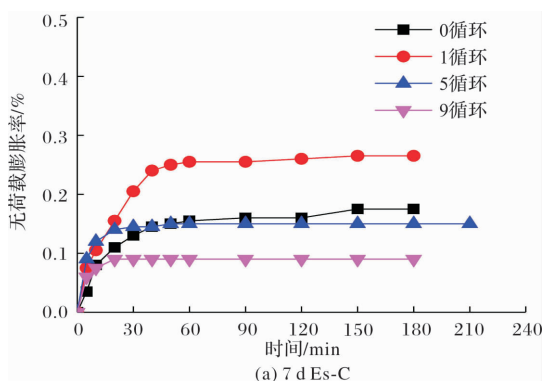


图1 未改良膨胀土的无荷载膨胀率

Fig.1 No-load expansion rate of unimproved expansive soil

图2是各类改良土不同龄期时的无荷载膨胀率,与纯膨胀土相比,改良土的膨胀性大幅度降低,土体膨胀变形的时间明显缩短。随着龄期增加,三种改良土在多次干湿循环作用下,其膨胀变形的快速上升阶段所需时间逐渐缩短,即改良土试样达到无荷载膨胀率最大值的时间随着养护龄期的增加而减小。这是因为试块与水接触后水分迅速进入试样外表面的微裂隙中,产生微小的膨胀变形,但改良土试样致密性良好,试样内部存在的裂隙较少^[6],水分的渗透量很快就会达到饱和和状态;表明在改良土试样的内部结构中由水分起到的膨胀作用十分微弱,钢渣粉水泥可以有效减弱膨胀土的膨胀性。

Es-SSP-C的无荷载膨胀率均在较短的时间内增长到最大值,然后保持稳定;而Es-C和Es-SSP-C-N则相对较慢,达到最大值所需的时间相对较长,这是由于养护龄期相同时,Es-C和Es-SSP-C-N试样的水化反应更充分,试样外表面和内部的密实性均较好,水分经过试样外表面渗入内部的时间更长,致使试样的快速膨胀阶段所需时间相对较长。



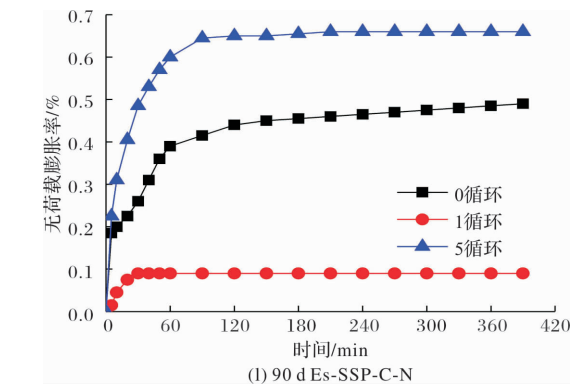
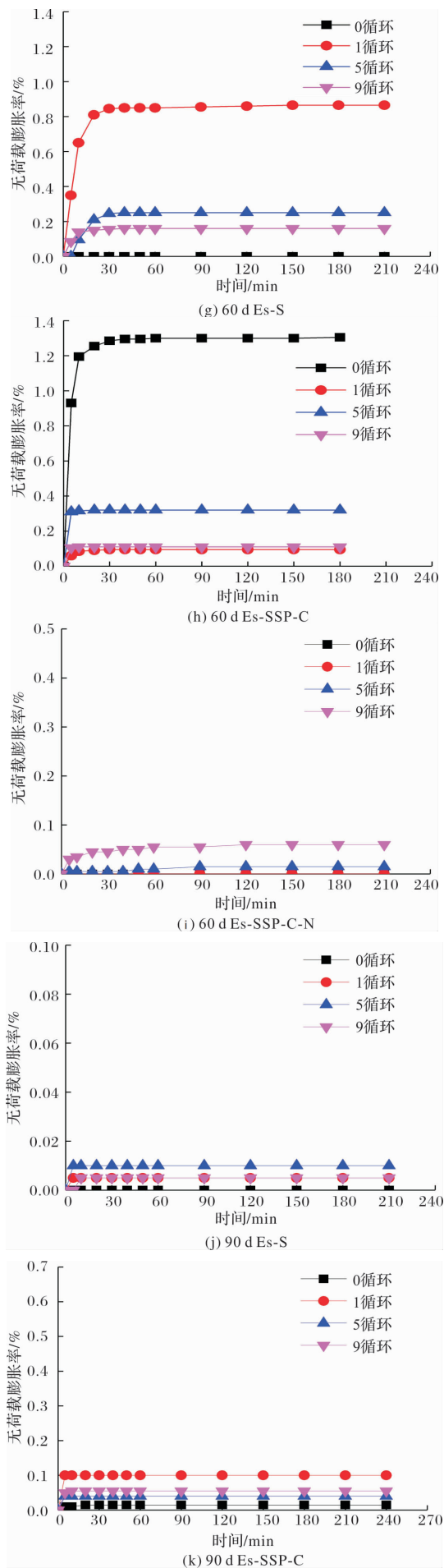


图2 不同龄期改良土在干湿循环作用下的无荷载膨胀率

Fig. 2 No-load expansion rate of improved soils at different ages under the action of dry and wet cycles

对比图1和图2可以发现,相比于未改良土试样,各类改良土无论是正常养护条件下还是干湿循环后试样的无荷载膨胀率均有大幅度减小,达95%以上。养护龄期60 d前后,各试样对膨胀性的控制效果呈现不同的发展趋势。养护60 d前,Es-SSP-C-N对膨胀性的控制效果最好,稳定时无荷载膨胀率最小值仅为0.025%,Es-C次之,Es-SSP-C效果最差,养护时间达到90 d后,Es-C和ES-SSP-C对膨胀性的控制效果有显著提高,Es-SSP-C-N的效果反而有所降低。

对于早期(7~28 d)养护龄期的试样,Es-C试样内的胶凝材料持续水化,无荷载膨胀率在干湿循环作用下有所减小,而Es-SSP-C试样无荷载膨胀率先增大后保持稳定,稳定值分别为0.3%和0.4%,这是因为钢渣粉前期水化速度比水泥慢,掺加钢渣粉的试样内部结构较松散,孔隙较多,故其吸水膨胀的性质更为突出;Es-SSP-C-N试样无荷载膨胀率均保持在0.15%以下,说明NaOH可以有效提高钢渣粉前期的水化速率。

对于中后期(60~90 d)养护龄期的试样,在干湿循环作用下,Es-SSP-C试样60 d龄期时,初始无荷载膨胀率达到了1.2%,是各类改良土中的最大值,但经历1次干湿循环后其无荷载膨胀率就快速降低至0.2%以下,说明此时钢渣粉的水化反应已开始进行,增湿后加速了钢渣粉的水化,养护90 d的试样经历多次循环后其无荷载膨胀率稳定在0.1%以下,可以认为钢渣粉自身起水化作用的周期约为60 d。Es-SSP-C-N试样在90 d时的膨胀性有所提高,这是因为氢氧化钠激发钢渣粉的活性促进其水化效率,使得养护龄期90 d的试样其内部水化过程已趋于完成,此时外界干湿循环的环境对其无荷载膨胀率的影响较为

明显,同时试验过程中观察到试样外表面有所脱落,增大了试样与水的接触面积,从而膨胀率有所提高。

2.1.2 体积变化率

进行干湿循环试验时,因干燥过程易受天气、气温等客观因素的影响,所以试样吸水后体积变化率比干燥后更具有规律性。图3是4种试样养护7 d后在不同干湿循环次数作用下的体积变化率。对于未改良土试样,随干湿循环次数增加,吸水后的体积变化率从第1次循环时的10.01%增大至第5次循环时的13.15%。试样干燥后,其体积变化率始终大于零,在整个干湿循环的过程中,试样体积都比初始体积大,这表明未改良膨胀土试样在干湿循环作用下其内部结构产生不可恢复的变形,裂隙的扩展致使试样结构逐渐松散,土体颗粒间距加大,吸水时试样体积变化率增大。

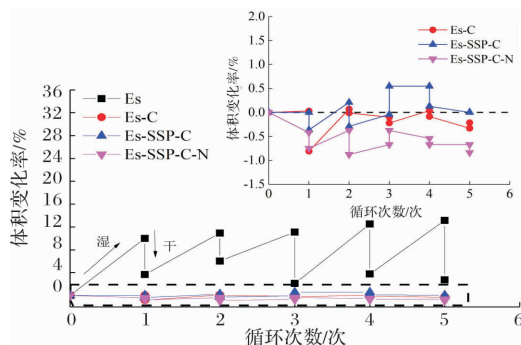


图3 各类土在干湿循环下的体积变化率(7 d)

Fig. 3 Volume change rate of each improved soil under dry and wet cycle (7 days)

图4是不同龄期时3种改良土在干湿循环过程中体积的变化情况。结合图3和图4可以看出,在干湿循环作用下,随着龄期增加,Es-C的体积先增大后减小,而Es-SSP-C和Es-SSP-C-N的体积变化不大,两种试样的体积变化率始终稳定在0.6%、1.0%以下,说明相对于单掺水泥的试样而言,掺入钢渣粉的试样具有较好的水稳性,对膨胀土体积的控制力更强。对比图3和图4,经过干湿循环后,三种改良土在4个龄期时体积变化率均在1.6%以下,相比于未改良土的10.01%,减小了85%以上,表明三种改良方案均能有效控制膨胀土的体积变化。试样在干湿循环过程中体积变化率比膨胀率试验中的膨胀率更大,是因为干湿循环试验中,试块四周没有约束,其体积涨缩不受外界条件影响,而膨胀仪对试块有侧壁约束作用,使得试块只能产生纵向变形。

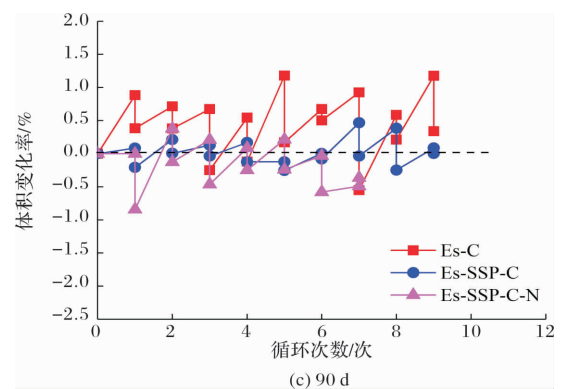
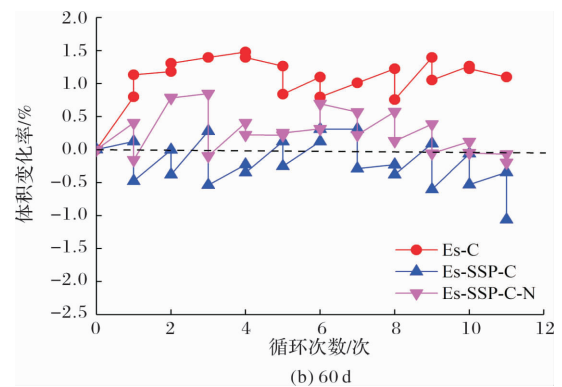
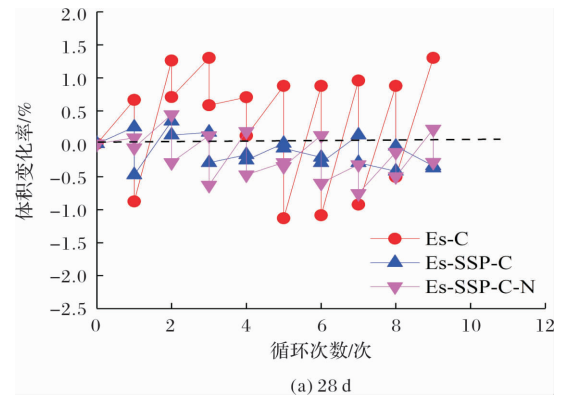


图4 不同龄期改良土在干湿循环过程中的体积变化率

Fig. 4 Volume change rate of improved soils at different ages during the dry-wet cycle

改良土可以有效降低膨胀土的膨胀性,是因为胶凝材料水化将生成碱性环境,水化产物中存在的 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 等高价阳离子在碱性环境中会与亲水性黏土颗粒中的 K^{+} 和 Na^{+} 进行离子交换反应^[24],使土体的双电层结构厚度减薄,减少土体颗粒表面吸附水的厚度,土颗粒之间产生的吸附力更大,形成絮凝作用,结构将更加稳定,并且高价阳离子的存在使膨胀土的渗透压力减小,抑制渗透膨胀量的发展。

2.1.3 质量变化率

图5是3种改良土在不同养护龄期下进行干湿循环作用时的质量变化率曲线图。在干湿循环作用下,吸水后Es-C和Es-SSP-C-N的质量变化率随龄期增加而减小,而Es-SSP-C的质量变化率变化不大。除7 d龄期外,3种改良土中质量增长率

最大的始终是 Es-C, 最大值为 5.6%, Es-SSP-C 的质量稳定保持在 2.0% 左右, Es-SSP-C-N 质量增长率最小约为 -8%, 这是因为在干湿循环多次作用下, Es-SSP-C-N 有外表皮侵蚀剥落的现象, 即使吸水后试样质量仍有所减小。

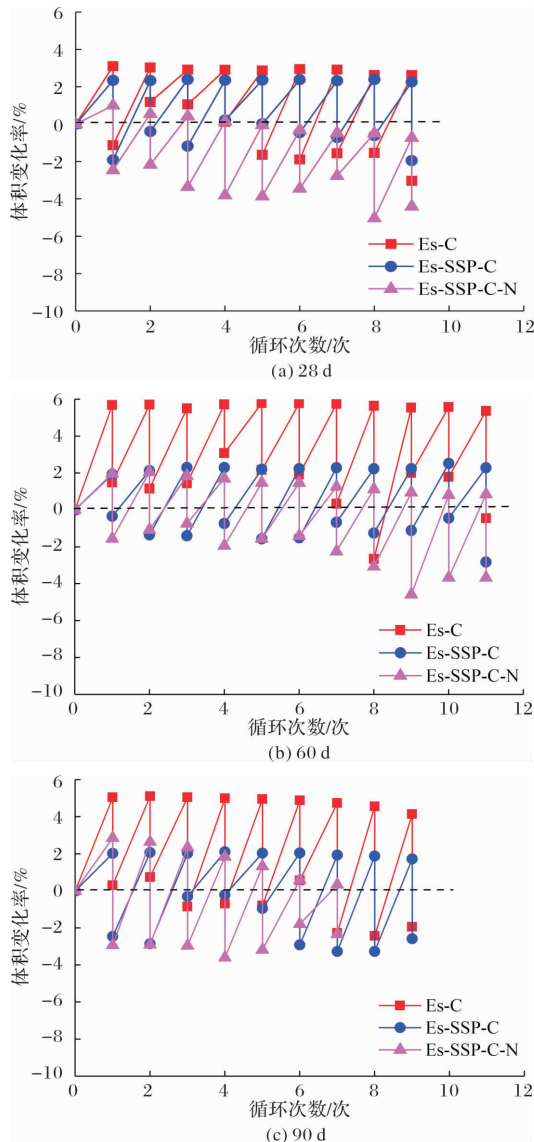


图5 不同龄期改良土在干湿循环过程中的质量变化率

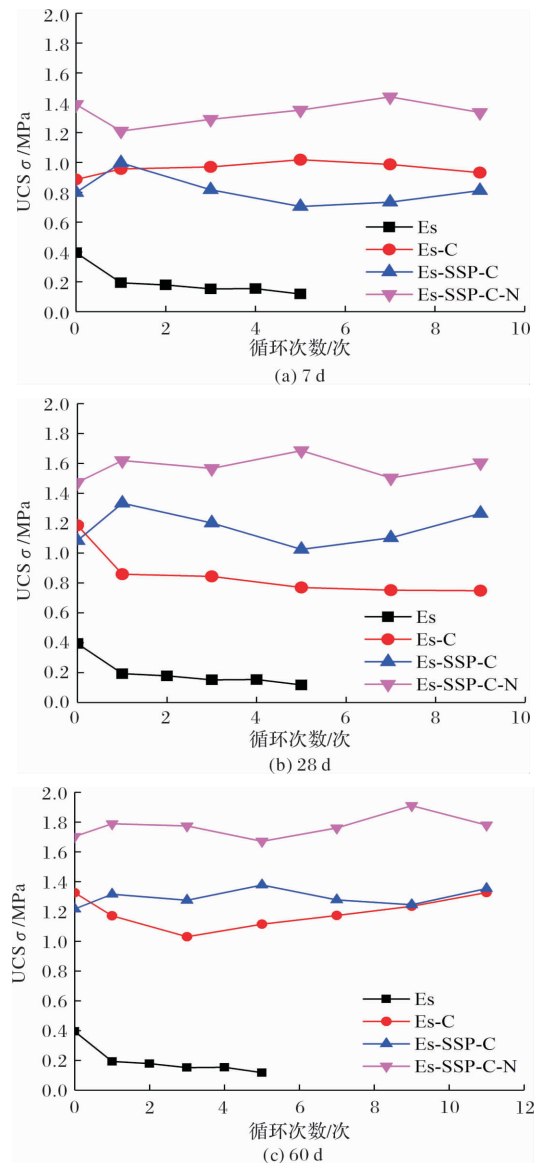
Fig. 5 Mass change rate of improved soils at different ages during the dry-wet cycle

结合改良土质量和体积的变化规律, 说明改良土对干湿循环的承受能力有了极大的改善。且 3 类改良土中, Es-C 对干湿循环变形方面的承受能力最差; Es-SSP-C 的表现较好, 随干湿循环次数的增加其质量和体积变化率都可以保持稳定的状态; 而 Es-SSP-C-N 在水和 NaOH 的作用下, 质量和体积变化率多以负值形式出现, 经受多次干湿循环作用后, 试样的体积和质量变化率呈减小趋势, 且有外表皮侵蚀剥落的现象。因此在实际工程中, Es-SSP-C 土体抵抗干湿循环作用的能力更强, 但鉴于其养护周期过长, 建议在 Es-SSP-C 土

体中掺加微量活性激发剂 NaOH, 一方面提高钢渣粉前期的水化能力, 另一方面微量 NaOH 在参与反应过程中被逐渐消耗, 可以延长 Es-SSP-C 养护后期抵抗干湿循环的能力。

2.2 干湿循环对改良土强度的影响

不同养护龄期、不同试样的无侧限抗压强度 (UCS) 试验结果如图 6 所示。干湿循环试验前, 7 d 龄期的 Es-C、Es-SSP-C、Es-SSP-C-N 的强度分别为 0.886 MPa、0.797 MPa 和 1.49 MPa, 相比未改良土的 0.39 MPa, 分别提高了 128%、104% 和 282%, 由此可见水泥作为常用的胶凝材料, 对膨胀土的强度具有明显的提升作用; 混掺钢渣粉-水泥对膨胀土同样具有增强作用, 但与单掺水泥时相比效果有所降低, 这是钢渣粉自身活性低导致的, 掺加 NaOH 活性激发的 Es-SSP-C-N, 其强度相比于 Es-SSP-C 提升 87%, 相比于 Es-C 提升 68.2%, 说明相对于单掺水泥而言, 钢渣粉-水泥复合掺料对试样强度的提升作用更为明显。



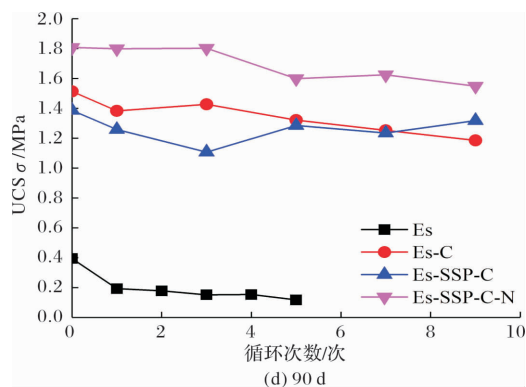


图 6 不同养护龄期下各试样随干湿循环过程的无侧限抗压强度

Fig. 6 UCS of each sample under different curing ages with the process of dry and wet cycles

干湿循环后, 纯膨胀土强度明显降低, 尤其在第 1 次干湿循环后, 其强度降至 0.19 MPa, 降低幅度达到 51.3%; 之后其强度降低幅度减小, 但降低趋势不变, 并在第 3 次干湿循环后达到稳定状态. 对于改良土试样, 在干湿循环作用下, Es-C 的强度从 7 d 时的先增大后减小逐渐发展为 28 d 和 60 d 时的先减小后上升, 90 d 后又持续减小, 体现了试样强度是胶凝材料水化和干湿循环作共同作用的结果; Es-SSP-C 的强度在 7 d 和 28 d 龄期时呈先增大后减小再增大的趋势, 60 d 和 90 d 龄期试样的强度规律不明显, 但始终在初始强度附近波动, 说明钢渣粉在四个龄期中持续保持水化状态, 干湿循环作用和钢渣粉的水化作用相辅相成, 互相影响; 7 d 龄期的 Es-SSP-C-N 试样经历第 1 次循环后强度降低, 多次循环后强度逐渐恢复并略有提高, 28 d 和 60 d 龄期的强度在初始值附近波动, 90 d 龄期的试样强度随循环次数的增多略有下降, 表明掺入 NaOH 后的试样养护 90 d 后其水化反应已基本完成, 此时干湿循环的影响占主导地位.

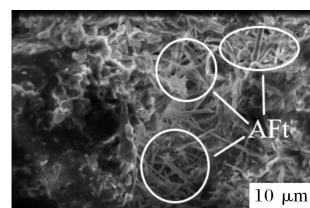
2.3 干湿循环作用下改良土的微观结构分析及宏观性质讨论

为探索在干湿循环过程中试样内部结构的变化, 对试样进行 SEM 及 EDS 试验. 选取养护 60 d、经过 UCS 试验后的试样进行试验, 分析改良土在干湿循环作用下的微观结构变化规律.

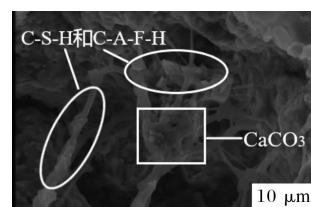
图 7 是 3 种改良土的 SEM 图像. 由图 7(b)可知, Es-SSP-C 试样中有大量的网状结构连接着周边的团聚体, 这种网状结构是由条状物质以中间的连接点为汇聚中心, 相互之间交错排列形成的, 在干湿循环过程中具有阻止水分进入试样内部的功能. 通过 EDS 进行定点分析, 发现这种物质是由大量的 C、Ca、Si 和 O 元素及少量 Fe 和 Al 元

素构成, 如图 8 所示. 通过元素原子百分比发现, 这种物质是水化产物的组合体, 其主要成分为水化硅酸钙(C-S-H), 具有很好的胶凝性; 还有水化铁铝酸钙(C-A-F-H), 这是 Fe 和 Al 元素存在的原因. 还有其中大量的 C 元素和 Ca、O 元素组成 CaCO_3 , 其产生的原因是由于胶凝材料的水化中会生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 该物质微溶于水^[25]且稳定性较差, 在随龄期增大的过程中与空气中的 CO_2 反应, 转化成更加稳定的 CaCO_3 结构; 除此之外, 经过 UCS 试验使试样受到压缩破坏, 其内部与空气接触加快了碳化反应的进行, 因此试样中有较多 CaCO_3 存在. 通过以上分析, 可以得出结论: 这种空间网状结构是以 CaCO_3 为连接点, 通过 C-S-H 和 C-A-F-H 等具有胶结性的水化产物与周围聚合物连接而形成, 它能提高试样的整体性和强度, 保证试样内部物质的紧密联系.

观察图 7(a)和(c)发现, 在 Es-SSP-C-N 和 Es-C 试样微裂隙结构中, 有相同的填充孔隙的物质, 呈短棒状和针状. 通过 EDS 能谱分析, 该物质主要由 Ca、Al、Si、O 元素以及少量的 S 元素组成, 根据李岩宾^[20]的研究成果, 该物质为钙矾石 (AFt). 在 Es-C 中, AFt 以短棒状为主填充于团聚体和土颗粒之间的空隙中, 细小的针状 AFt 填充于更狭窄的缝隙之中. Es-SSP-C-N 试样中的 AFt 以细小的针状为主, 连接着堆叠在一起的胶结物. AFt 是有 S 元素参与的水化反应的产物, 以结晶物存在, 在整个水化反应中占有一定的比例. 但因在 Es-SSP-C-N 试样中 S 元素量较少, 水化过程中 S 元素逐渐减少并消耗完, 此时 AFt 就会逐渐转化为单硫型硫铝酸钙 (AFm), 直至最终转化为稳定的 C-A-F-H, 在微观结构中表现为针状和棒状物质减少. 这种现象也表明 Es-SSP-C-N 和 Es-C 中, 前者的水化反应更充分.



(a) Es-C



(b) Es-SSP-C

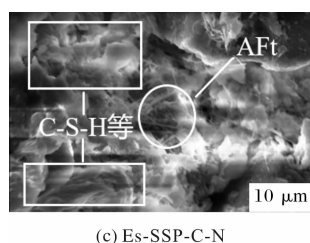
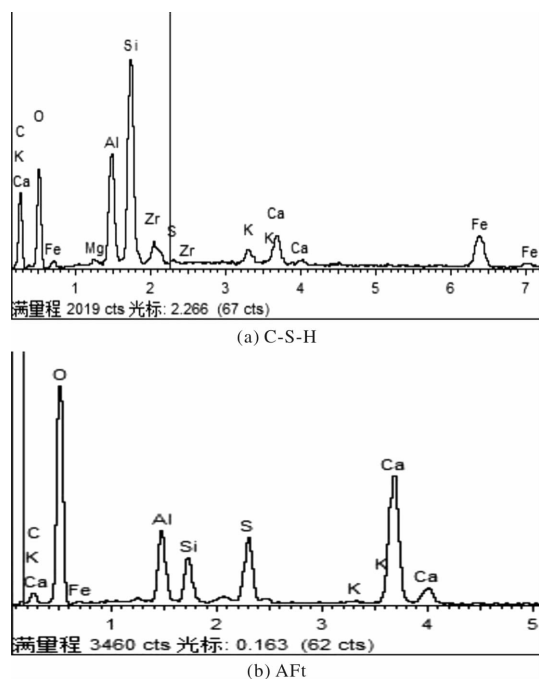
图7 各改良土经历干湿循环前 SEM 图像($\times 10\,000$)Fig. 7 SEM image of each improved soil before dry-wet cycles ($\times 10\,000$)

图8 EDS 能谱图

Fig. 8 Energy spectrum

图9是各类改良土养护60 d后经过9次干湿循环的SEM图.与图8干湿循环前相比,各改良土的物质成分没有较大差别,仍以团絮状分布的C-S-H和C-A-F-H凝胶包裹土颗粒,颗粒之间的缝隙中存在AFt连接周边的团聚体,提高土体的整体性.值得注意的是,AFt是一种不溶于水的晶体,其强度较高却不具备胶凝特性^[26],在水泥土中作为中间物质存在,会随着水化反应的进行逐渐转化为更加稳定的C-A-F-H.但在干湿循环过程中,AFt作为针状物质填充于孔隙之中,其不溶于水的性质可以有效地防止干湿循环中水对裂隙周边结构的破坏,使土体仍能保持较高的强度.

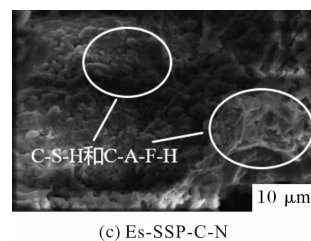
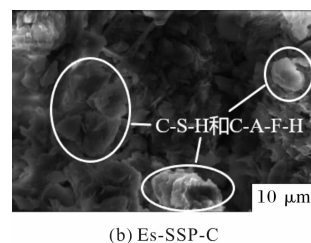
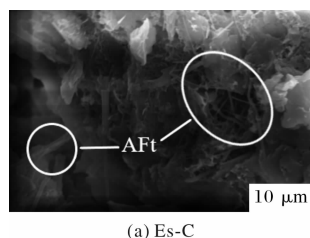
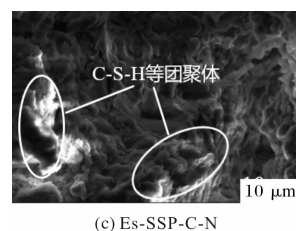
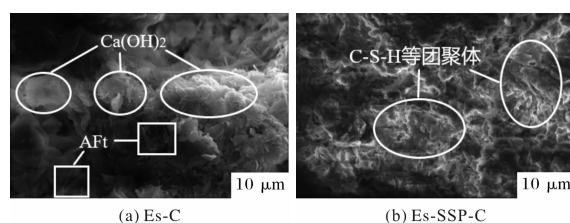
图9 各改良土经历9次干湿循环后的 SEM 图像($\times 10\,000$)Fig. 9 SEM images of each improved soil after 9 cycles of dry and wet ($\times 10\,000$)

图10是各类改良土体养护60 d后经过15次干湿循环的SEM图.对比图9、10,发现经历15次干湿循环后试样中的物质成分有所变化.在Es-C中,孔隙周边出现少量碎小且些许透明的片状物质,根据Xiao^[27]等的研究结果,认为该物质为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,是多次干湿循环重结晶的难溶物质.同时AFt在水化反应中减少,并且随着干湿循环次数的增加,裂隙周边结构被破坏,AFt缺少附着点,排列更加无序,试样内部结构不再完整,导致试样的强度降低.相比而言,掺入钢渣粉的Es-SSP-C和Es-SSP-C-N的变化则较小.尤其是前者,其结构十分密实,碎小的颗粒很少,说明其内部结构受到干湿循环的影响很小.这也反映了Es-SSP-C试样对多次干湿循环的承受能力更强.

图10 各改良土经历15次干湿循环后的 SEM 图像($\times 10\,000$)Fig. 10 SEM images of each improved soil after 15 cycles of dry and wet ($\times 10\,000$)

3 结论

通过在室内进行改良膨胀土的干湿循环试验,研究了改良土的物理特性、力学特性变化规律,并初步探讨了其变化的内在机理,得到了以下结论:

(1)改良后膨胀土的膨胀率均有大幅度减小,达95%以上,膨胀率上升阶段时间明显缩短,改良膨胀土的膨胀性得到有效控制.在干湿循环条件下,掺加钢渣粉可以长期有效控制膨胀土的膨胀率.

(2)干湿循环作用下,改良土的体积变化率比未改良土减小85%以上.随循环次数的增加,Es-C对干湿循环的承受能力最差,Es-SSP-C的体积和质量变化率基本稳定,Es-SSP-C-N的质量变化率持续减小.证明在干湿循环作用下,钢渣粉水泥复合掺料对膨胀土的体积控制能力比水泥更好.

(3)3种改良方案均能大幅度提升膨胀土的无侧限抗压强度.在干湿循环作用下,不同龄期的三种改良土的强度变化规律有所不同,试样的水化反应始终和干湿循环的侵蚀作用相互影响,显著提高了膨胀土抵抗干湿循环破坏的能力,其中Es-C和Es-SSP-C强度较为接近,Es-SSP-C-N试样的强度最高、变化最为稳定.

(4)干湿循环次数较少时改良土颗粒排列上更加紧密,其中以Es-SSP-C-N结构最为致密,在水化产物的胶结作用下有更强的整体性体现;循环次数较多时Es-SSP-C试样的内部结构整体性更强,联结最为致密,其体积变化率、强度变化规律最稳定.

参考文献 References

- [1] LI K, NOWAMOOZ H, CHAZALLON C, et al. Limit deformation analysis of unsaturated expansive soils during wetting and drying cycles[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2018, 55(1): 1-7.
- [2] 郑健龙, 张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 1-10.
ZHENG Jianlong, ZHANG Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1-10.
- [3] 李东森, 夏熙临, 陈丛丛, 等. 石灰、水泥及砂改性膨胀土工程特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 25-27, 46.
LI Dongsun, XIA Xilin, CHEN Congcong, et al. Experimental study on engineering characteristics of expansive soils modified with lime, cement and sand[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 25-27, 46.
- [4] COKCA E, YAZICI V, OZAYDIN V. Stabilisation of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-Cement[M]. Faculty of Engineering-Papers (Archive), 2009.
- [5] ASHANGO A A, PATRA N R. Behavior of expansive soil treated with steel slag, rice husk ash, and lime[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(7): 06016008.
- [6] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉掺合料改良膨胀土特性试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 136-143.
WU Yankai, HU Rui, ZHAO Weiying, et al. Study on expansive soil properties improved by steel slag powder admixture[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(1): 136-143.
- [7] 郭铎. 稻壳灰和电石渣改性膨胀土力学性能及作用机理研究[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 210-215.
GUO Shuo. Study on mechanical properties and mechanism of expansive soil modified by RHA and CCR[J]. Highway Engineering, 2020, 45(3): 210-215.
- [8] 毕海民, 祁凤祥. 粉煤灰混合聚丙烯纤维改良膨胀土性能试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018, 3: 62-64.
BI Haimin, QI Fengxiang. Study on the performance test of the modified expansive soil by fly ash mixed polypropylene fiber[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018, 3: 62-64.
- [9] 孙孝海, 谢建斌, 陈伟, 等. 工业碱渣改良云南典型膨胀土的膨胀特性试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 615-620.
SUN Xiaohai, XIE Jianbin, CHEN Wei, et al. Experiment of swelling properties of improved typical expansive soil in Yunnan by industrial alkali residue[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 615-620.
- [10] DONG Y, WANG B T. Test study on mechanical properties of the lime stabilized expansive soil under wet and dry cycle[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 166-170.
- [11] 韩春鹏, 田家忙, 张建, 等. 干湿循环下纤维加筋膨胀土裂隙特性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 392-400.
HAN Chunpeng, TIAN Jiamang, ZHANG Jian, et al. Analysis of crack characteristics of fiber-reinforced expansive soil under wetting-drying cycle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 392-400.

- tion), 2019, 49(2): 392-400.
- [12] 单熠博,王保田,张福海,等. 硅灰改良膨胀土室内试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 63-66.
- SHAN Yubo, WANG Baotian, ZHANG Fuhai, et al. Laboratory experiments on stabilization of expansive soil by silica ashes[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2018, 40(5): 63-66.
- [13] 孙乐乐,张文慧,张福海. 粉煤灰改良膨胀土不良工程特性试验研究[J]. 河南科学, 2019, 37(4): 588-593.
- SUN Lele, ZHANG Wenhui, ZHANG Fuhai. Experimental study on poor engineering characteristics of modified expansive soils by fly ash[J]. Henan Science, 2019, 37(4): 588-593.
- [14] 张德恒,孙树林,李方. 干湿循环条件下秸秆灰渣改良膨胀土试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 180-186.
- ZHANG Deheng, SUN Shulin, LI Fang. Experimental research on improved expansive soil with straw ash under dry and wet cycling conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 180-186.
- [15] WU Jun, LIU Qianwen, DENG Yongfeng, et al. Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways[J]. Soils and Foundations, 2019, 59: 955-965.
- [16] 陆天龙,刘栋,杨光照,等. 钢渣综合利用及尾渣中铁的回收研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 14-18.
- LU Tianlong, LIU Dong, YANG Guangzhao, et al. Research progress on comprehensive utilization of steel slag and iron recovery from tailings[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(17): 14-18.
- [17] GUO Jianlong, BAO Yanping, WANG Min. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Management, 2018, 78: 318-330.
- [18] 王会刚,彭犇,岳昌盛,等. 钢渣改性研究进展及展望[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 133-138.
- WANG Huigang, PENG Ben, YUE Changsheng, et al. Research progress and prospect of steel slag modification[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(5): 133-138.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水泥化学分析方法:GB/T176-2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Method for chemical analysis of cement: GB/T176-2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [20] 李岩宾. 钢渣粉改良膨胀土和淤泥质土特性研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2016.
- LI Yanbin. Study on characteristics of improved expansive soil and mud soil by steel slag powder[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2016.
- [21] 毛新,汪时机,程明书,等. 膨胀土初始破损与湿干交替耦合作用下的力学行为[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 571-579.
- MAO Xin, WANG Shiji, CHENG Mingshu, et al. Mechanical behavior of expansive soil under initial damage and wetting-drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 571-579.
- [22] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. Geoderma, 2011, 166(1): 111-118.
- [23] 刘宽,叶万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148-2159.
- LIU Kuan, YE Wanjuan, GAO Haijun, et al. Multi-scale effects of mechanical properties degradation of expansive soil under drying-wetting environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148-2159.
- [24] 项国圣. 含盐环境中膨润土的膨胀理论及膨胀衰减机理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- XIANG Guosheng. Expansive theory of bentonite in saline environment and its mechanism of expansion attenuation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [25] FENG C H, LI D X, MIAO C, et al. Effects of grinding aids on activation and fineness of steel slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society. 2010, 38(7): 1160-1166.
- [26] 邢皓枫,徐超,叶观宝,等. 可溶盐离子对高含盐水泥土强度影响的机理分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 26-31.
- XING Haofeng, XU Chao, YE Guanbao, et al. Mechanism analysis of influence of soluble salt ions on strength of salt-rich cement-soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 26-31.
- [27] XIAO J, YANG H P, ZHANG J H, et al. Surficial failure of expansive soil cutting slope and its flexible support treatment technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2018(2): 1-13.

(编辑 吴海西 沈 波)