

钢渣粉水泥改良膨胀土干湿循环下力学性能及机理分析

吴燕开^{1,2}, 王浩², 苗盛瑶², 韩天³, 曹玉鹏⁴

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 中铁建工集团山东有限公司, 山东 青岛 266061; 4. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266590)

摘要:膨胀土是一种具有多裂隙性、超固结性和反复胀缩性的非饱和土。在干湿气候交替变化的环境中会因其湿胀干缩的变形导致工程事故的发生,通过化学改良法改善水土间相互作用,可达到改良膨胀土工程特性的目的。利用钢渣粉作为新型固化剂,与水泥组合改良膨胀土,研究改良膨胀土在干湿循环条件下力学特性变化规律及其改良机理。将纯膨胀土(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)4种土体进行不同次数干湿循环作用后,进行体积变化率试验、不固结不排水三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验。试验结果表明,改良土体的体积变化率较未改良土试样有了相当大的减小;改良膨胀土强度有大幅度提升,并且其强度关系总有 $Es-SSP-C-N > Es-C > Es-SSP-C > Es$;在干湿循环作用下改良土仍能保持较高的强度水平,且随循环次数增加强度有所提升。利用扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)技术对4种土体在干湿循环次数变化时的微观形貌和物相成分进行分析,发现水泥和钢渣粉水化致使土体颗粒变得密实,水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等水化产物逐渐增多,弱化了干湿循环中水的侵蚀作用,确保其强度在干湿循环过程中保持稳定。

关键词:干湿循环;改良膨胀土;钢渣粉水泥;力学性能

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Mechanical properties and mechanism of expansive soil modified by steel slag powder cement under dry-wet cycles

WU Yankai^{1,2}, WANG Hao², MIAO Shengyao², HAN Tian³, CAO Yupeng⁴

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

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

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

Abstract: Expansive soil is unsaturated soil with multiple fractures, super-consolidation, and repeated expansion and contraction. In the environment where the dry and wet climate changes alternately, engineering accidents may occur

收稿日期:2019-09-23

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51608312);山东科技大学科研创新团队支持项目(2015KYDT104)

作者简介:吴燕开(1976—),男,广西贵港人,副教授,博士,主要从事地下工程、边坡工程以及软基处理等方向的研究。

E-mail: wuyankai2000@163.com

王浩(1994—),男,山东胶州人,硕士研究生,主要从事软基处理等方向的研究,本文通信作者。

E-mail: m17852168662@163.com

due to the deformation of the swelling and shrinking of expansive soils. The chemical method of improvement is often used to enhance the interaction between soil and water so as to improve the engineering characteristics of expansive soils. In this paper, steel slag powder was used as a new curing agent combined with cement to modify the expansive soil, whose mechanical property variation law and mechanism under dry-wet cycles were studied. The dye-wet cycles tests were performed on the expansive soil (Es), which is improved by cement (Es-C), improved by cement and steel slag powder (Es-SSP-C), modified by cement and steel slag powder and NaOH (Es-SSP-C-N) respectively. Afterwards, the volume change rate test, the unconsolidated undrained triaxial compression test (UU test), and the unconfined compressive strength test were conducted on these samples to study the mechanical properties such as the shear strength and related indexes. The results show that the volumetric change rate of the modified soil is considerably reduced compared to the unmodified soil sample, that the strength of the modified expansive soil is greatly improved, and its intensity relationship is $Es-SSP-C-N > Es-C > Es-SSP-C > Es$. Moreover, the improved soil under the dry-wet cycles can still maintain a high level of strength, and that the strength increases with the number of cycles. Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were then used to analyze the micro-morphology and phase change of four types of soils during the change of the number of dry-wet cycles. It is found that the hydration of cement and steel slag powder leads to compactness of soil particles, and hydration products such as calcium silicate hydrated (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H) gradually increase, which weakens the erosion effect of water in the dry-wet cycle and ensures its strong stability during the dry-wet cycles.

Key words: dry-wet cycle; modified expansive soil; steel slag powder cement; mechanical property

膨胀土干湿效应下产生的吸水膨胀和失水收缩是导致工程事故的重要因素。不同学者通过室内试验研究,发现膨胀土经过多次干湿循环后强度衰减很大。吴珺华等^[1]对干湿循环作用下的非饱和膨胀土进行不排水剪切试验,发现干湿循环会显著降低膨胀土的不排水抗剪强度。韩华强等^[2]通过对非饱和膨胀土的强度和变形进行研究,认为干湿循环将引起非饱和膨胀土土体结构的改变,从而导致其长期强度和变形模量明显降低。毛新等^[3]发现干湿循环次数增多时,土体结构破坏严重,强度明显衰减。吕海波等^[4]通过干湿循环试验,得到了含水率变化幅度和干湿循环次数的增加都会降低膨胀土抗剪强度的结论。Khemissa 等^[5]和 Nowamooz 等^[6]对含水率和干密度与抗剪强度的关系也进行了大量的研究^[7],根据压汞试验结果发现干湿循环会削弱膨胀土内部土颗粒之间的连结力。膨胀土在干湿循环中的裂隙发展状况也十分明显,Zhan 等^[8]研究发现,膨胀土裂隙会随含水率增加而快速发展;并有学者通过模型试验对裂隙发育进行观测^[9-10]。

目前常用的膨胀土改良方法是采用石灰、水泥等改性材料进行改良。Guney 等^[11]采用石灰稳定土研究了干湿循环作用对膨胀土膨胀性的影响;李新明等^[12]通过剪切试验,发现使用石灰改良的膨胀土在干湿循环作用后,抗剪强度参数基本不变;Rao 等^[13]利用水泥稳定粉煤灰作为垫层材料抑制膨胀土的胀缩性。同时也有学者研究新的材料用于膨胀土的改良,Wang 等^[14]发现在一定范围内,增加黄麻纤维的含量和长度,可提高膨胀土的抗剪强度、黏聚力和强度比。近年来钢渣粉在地基土改良方面也取得了一定的成果,由于钢渣粉中有硅酸三钙和硅酸二钙等具有活性的物质,这些物质具有与水泥相似的水硬胶凝性,可部分替代水泥用于软土的固化。有研究者发现钢渣粉的加入可以在一定程度上降低软土的膨胀性^[15-16],故使用钢渣粉来改良膨胀土。厚荣斌^[17]使用钢渣、稻壳灰和生石灰对膨胀土进行改良,发现膨胀土的强度提升,可塑性降低。吴燕开等^[18]采用钢渣粉掺合料改良膨胀土,研究发现随钢渣粉掺量增加,膨胀率逐渐降低,强度逐渐增加。Reddy 等^[19]研究发现在水泥基、非水泥基以及化学添加剂三类稳定膨胀土的添加剂中,化学添加剂的性能要优于其他类型。

目前,对于钢渣粉做固化剂改良膨胀土以及对改良土的干湿循环耐受能力研究较少,以临沂膨胀土为研究对象,采用水泥、钢渣粉和 NaOH 对膨胀土进行改良处理,通过室内试验,对改良前后的膨胀土在干湿循环前后的抗剪强度变化进行分析,并对其内在改良机理进行探讨。

1 试验材料和试样制备

1.1 试验材料

试验用土取自山东省临沂市南郊某工地。土样埋深约 1.0~1.5 m,呈灰黑色,可塑,黏性较强,天然含水率高,裂隙面呈蜡状光滑,具有典型的膨胀土特征。利用晾晒和研磨之后的土样进行试样制作,其物理力学参数见表 1。

表 1 膨胀土土样的物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of expansive soil samples

比重 d_s	天然水量 $\omega/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_P
2.70	31.1	1.83	1.43	32.4	67	34.6
液性指数 I_L	自由膨胀率 $F_s/\%$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 C/kPa	孔隙比 e	最优 含水率/ $\%$	最大干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
-0.04	67	12.8	168	0.94	28.20	1.430

试验中所用的水泥是 P.C32.5R 复合硅酸盐水泥,其主要成分是 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 等;钢渣粉由产自石家庄的废弃钢渣加工而成,主要成分是 MgO 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MnO 等,水泥和钢渣粉化学成分见表 2。激发剂 NaOH 产自天津市北联精细化学品开发有限公司,分析纯。

表 2 钢渣粉和水泥主要化学成分及百分含量
Tab. 2 Main chemical composition and percentage content of steel slag powder and cement

化学成分	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	MnO_2	SO_3	Na_2O	P_2O_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

将现场取回的膨胀土土样自然风干,测得风干后土样含水率约为 6%,碾磨后过直径 2 mm 的标准筛,取过筛土样备用。按照《土工试验方法标准》^[20] 要求,采用压实法制作直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱状试样。通过击实试验测得纯膨胀土以及改良土的最优含水率和最大干密度,胶凝材料以及激发剂的掺比根据文献^[21]确定,试样具体控制参数如表 3 所示。试样制备好后脱模放入恒温恒湿养护箱中养护,养护温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$,试样养护到相应龄期后进行干湿循环试验。

2 干湿循环及测试内容

表 3 试样的控制参数

Tab. 3 Control parameters of samples

土样	最优 含水率/ $\%$	最大干密度/ (g/cm^3)	试验材料配比/ $\%$			
			水泥	钢渣粉	NaOH	水
Es	28.20	1.430	0	0	0	28
Es-C	29.05	1.424	10	0	0	29
Es-SSP-C	28.71	1.442	5	15	0	29
Es-SSP-C-N	28.96	1.421	5	15	1.5	29

注:Es,纯膨胀土;Es-C,水泥改良膨胀土;Es-SSP-C,钢渣粉-水泥改良膨胀土;
Es-SSP-C-N-NaOH,钢渣粉水泥 NaOH 改良膨胀土

2.1 干湿循环

试验主要参照水膜转移法以及文献^[22-23]方法进行。对达到养护龄期的试样进行先吸水然后干燥的处理,1 次吸水 1 次干燥为 1 次干湿循环,试验中对未改良土采用引流法吸水,改良土采用浸泡法吸水,两者均用自然风干法干燥,吸水和干燥时间各为 12 h。循环次数分别为:未改良

土,1、2、3、4、5次;三种改良土试样:1、3、5、7、9次。

2.2 测试内容

试样进行不同次数的干湿循环后,进行体积变化率试验、不固结不排水三轴压缩试验(unconsolidated undrained triaxial compression test,UU test)、无侧限抗压强度试验、扫描电镜试验(scanning electron microscope, SEM)以及能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS)。

3 结果与分析

3.1 体积变化率

进行干湿循环试验时,在吸水和干燥结束时都对试样的体积和质量进行测量,图1是在7天养护龄期时不同土体进行干湿循环试验中采集到的数据,绘制成体积变化率((测量时的体积-初始试样的体积)/初始试样的体积)随干湿循环次数的变化规律。由图1(a)可知,4种土体的体积变化率可分为两种形式,一种是纯膨胀土试样,体积变化率较大,在坐标系中占据绝对大的空间;另一种是改良土体,与膨胀土试样相比较,体积变化率微乎其微,在坐标系中贴近零值上下浮动分布。在干湿循环的试验过程中,吸水过程可以保证试验条件相同,而干燥过程则是在自然环境下进行的风干处理,容易受到天气条件的影响,因此在吸水过程后得到的质量或体积数值较干燥处理后的结果更具有规律性。观察图1,发现纯膨胀土试样的体积变化更具有规律性,而3种改良土的体积变化更多是杂乱无章的,只能从整体上看出一个趋势走向。

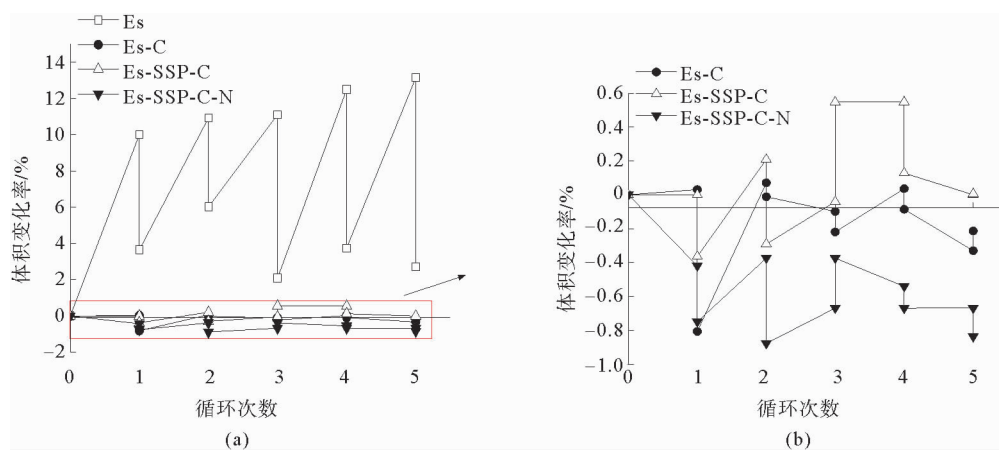


图1 体积变化率(7天)

Fig. 1 Volume change rate(7 d)

未改良土试样体积在干湿循环的过程中持续变化,仅从每次吸水后的体积变化来看,随干湿循环次数逐渐增加,从1次循环时的10.01%到第5次循环时的13.15%,体积变化率逐步上升。另外由于试验过程中环境的变化,导致干燥后试样体积变化率规律性不强,但也可以看出体积变化率始终大于零,其中包括质量变化率达到甚至低于零的时候,意味着在整个干湿循环的过程中试样体积始终比初始时候大,也表明纯膨胀土试样在干湿循环的作用下结构发生了不可恢复的变化,试样结构松散,土体颗粒的间距加大以及裂隙的逐步发展也是吸水时体积变化率缓慢上升的原因。试样体积变化率从0次到1次干湿循环的增量是10%,即膨胀土在初次干湿循环作用后体积就会出现10%的体积变化,可见膨胀土体对水敏感性较强。

另外,改良土体的体积变化率较未改良土试样有了相当大的减小,与未改良土吸水导致的体积膨胀相比,改良土体的体积膨胀率均可控制在1%以内,相比来说有90%以上的减小幅度。3种改良土中Es-SSP-C试样较多的表现出体积增量的正值,而水化反应较快的Es-SSP-C-N和Es-C则更多的表现出体积的减小,并且从总体来看,体积的变化率有一个逐渐减小的趋势。

3.2 干湿循环次数与抗剪强度指标间关系

图 2 是各试样在 UU 试验中黏聚力(C)和内摩擦角(φ)随干湿循环次数变化的曲线图。从图中可以看出,改良后膨胀土的黏聚力、内摩擦角明显高于未改良膨胀土。未改良土试样黏聚力随干湿循环次数的增加持续减小;改良土受干湿循环的影响较小,ES-C 几乎不受干湿循环作用的影响,而 ES-SSP-C 以及 ES-SSP-C-N 由于钢渣粉活性低的原因,未加 NaOH 活性激发剂与添加活性激发剂的改良土均随着干湿循环次数的增加,其黏聚力逐渐增强。由图 2(b)可知,未改良土试样的内摩擦角和黏聚力一样,改良膨胀土的内摩擦角明显大于未改良膨胀土,未改良膨胀土内摩擦角随着干湿循环次数的增加而减小,而 3 种改良膨胀土随着干湿循环次数的增加,其内摩擦角变化幅度不大。

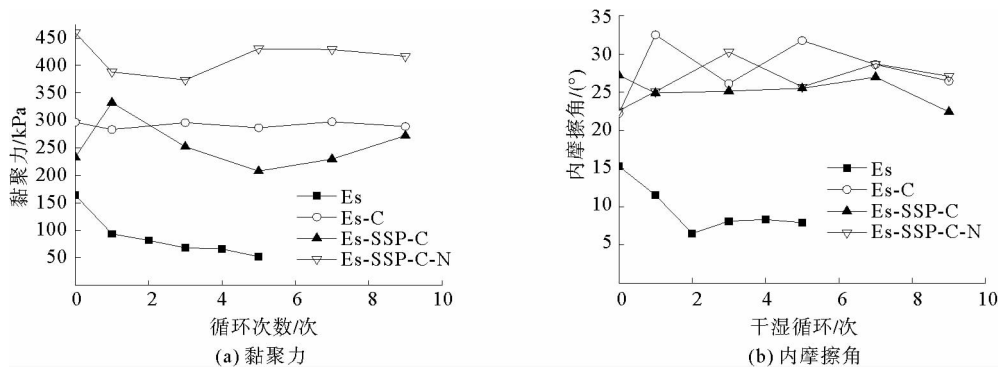


图 2 抗剪强度指标随干湿循环的变化

Fig. 2 Change of shear strength index with dry-wet cycle

究其原因,未改良膨胀土在干湿循环作用下反复经历湿胀干缩的体积变化,土体颗粒在水的作用下联结作用不断减弱,裂隙发展并逐渐贯通甚至形成裂缝,土体结构松散、土颗粒之间的相互交错阻力减小,因此未改良膨胀土黏聚力、内摩擦角随干湿循环的进行不断减小^[24-25];对于改良土,试样中水化产物将土颗粒包裹,相互之间连接紧密,各组成成分在胶凝物质的作用下形成团聚体,因此试样中的黏聚力大幅度提升;改良土试样中团聚体之间的交错阻碍了土体受压后的错位变形,但在干湿循环作用下,土体之中存在的微小孔隙也会受到水分的侵蚀,孔隙和裂隙周边的结构会受到影响,因此内摩擦角也会随干湿循环有一定的变化,但总体是在一个范围内上下浮动。

把 n 次干湿循环后得到的黏聚力与零次循环时的黏聚力之比定义为土体强度折损率,作图 3。图中显示未改良膨胀土的黏聚力随干湿循环次数的增加,黏聚力衰减逐渐变大,但初次干湿循环的影响最显著。改良膨胀土衰减率相对较低,Es-SSP-C 随着干湿循环次数的增加黏聚力有所增大,这主要是因为 Es-SSP-C 未掺活性激发剂,钢渣水化反应慢,随着干湿循环次数的增加,在湿循环作用下水化反应逐渐加快,因此出现黏聚力随干湿循环次数增加而增大的现象。

由以上分析可知,对于未改良膨胀土,受干湿循环影响其强度衰减明显,特别是初次干湿循环后,黏聚力和内摩擦角均大幅度降低。而对于采用水泥钢渣粉改良后的膨胀土,在干湿循环作用下,其强度会随干湿循环次数的变化而出现波动,但变化幅度相当小,3 种改良土中 ES-SSP-C-N 改良土的抗剪强度效果最好。

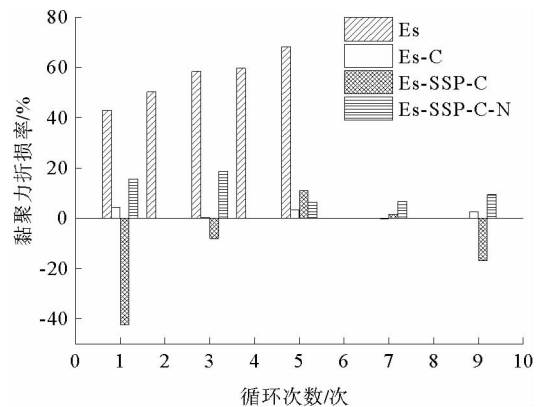


图 3 黏聚力折损率

Fig. 3 Cohesion loss rate

3.3 无侧限抗压强度与干湿循环次数间关系

图4为各类试样养护7天后不同次数干湿循环后无侧限抗压强度曲线图。由图可知,未改良膨胀土的强度较低,初始强度为0.39 MPa,经历第1次干湿循环后强度降低到0.19 MPa,降低幅度达到51.3%。在之后连续的干湿循环中,强度呈现出持续降低的趋势,但降低的幅度较小,曲线下落的较为缓慢,第3次循环即可达到稳定的状态,稳定时强度约为0.16 MPa,是初始强度的41%。由此可见,在干湿循环作用下膨胀土强度会剧烈变化,这是工程中需要解决的重要问题之一。经过改良后的Es-C、Es-SSP-C和Es-SSP-C-N,初始强度比未改良膨胀土均有大幅度的提升,改良效果 $Es-SSP-C-N > Es-C > Es-SSP-C$ 。Es-C在整个干湿循环过程中强度变化不大,Es-SSP-C强度表现出先增后减然后又增的趋势,而Es-SSP-C-N在第1次干湿循环时强度出现较为明显的下降后,随干湿循环的进行其强度逐渐增加。改良土强度随干湿循环的变化主要是胶凝材料在土体中发生水化反应的速度快慢不一致造成的。从整个强度变化趋势来看,Es-SSP-C-N的无侧限抗压强度随干湿循环所表现出来的强度变化符合工程需要。

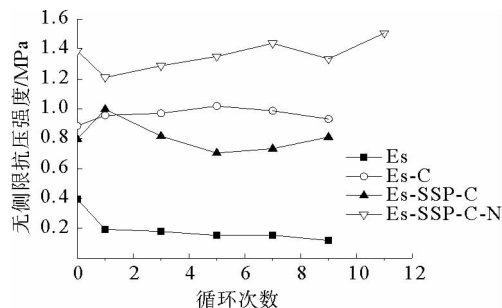


图4 各类试样无侧限抗压强度与干湿循环次数关系
Fig. 4 Unconfined compressive strength and number of dry-wet cycles for various types of samples

4 微观结构及机理分析

4.1 改良前后的微观结构变化分析

扫描电镜试验的主要步骤:①制作试样,将在压缩试验中破坏的试块切割取样,取试块破坏面附近的一部分土体,将其打磨成长宽约2 cm,厚约2 mm的扁平试块;②喷铂处理,对水泥土材料的试块进行喷铂处理,即将制作的试块放入高压喷射涂布机中进行真空表面喷铂处理;③提取微观图像,将表面布满镀层之后的试块安装在电镜扫描试验仪上,选取2 000倍和10 000倍的放大倍数进行微观图像的获取,并对特别的微区的成分进行能谱分析。图5为膨胀土(Es)干湿循环前后低倍镜下观察的试样结构整体性和裂隙的SEM图。从图5(a)可知,在干湿循环前,土体颗粒之间的连结更加紧密,观察面也比较平整,表明在压实法制样的作用下,未改良土土颗粒间有很好的连结,密实度也较好;从图5(b)可以看出,干湿循环后土体试样显得更加的疏松,土颗粒之间的连结力明显较弱,颗粒之间的间隙增大,并且在观察面可以看到很多较大的孔隙和裂隙,表明在干湿循环中膨胀土经历了吸水和失水的反复作用,土颗粒之间的连接作用明显减弱,土体中的孔隙不断增大,造成了结构的松散和裂隙的发育。

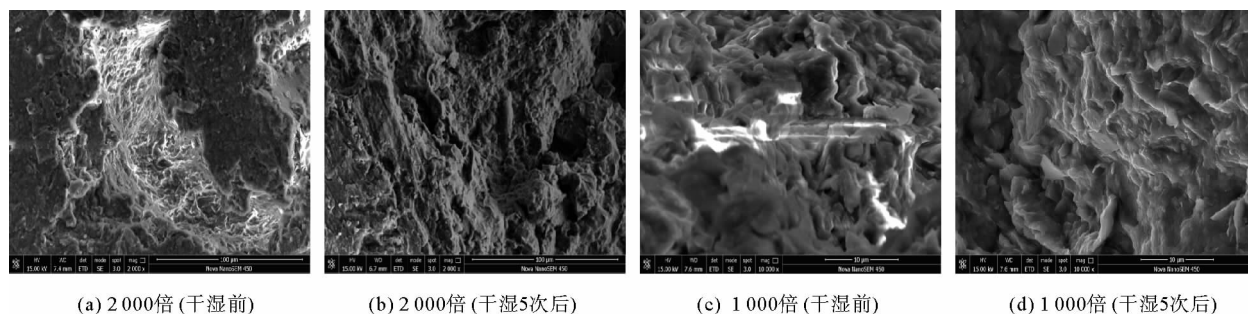


图5 Es在干湿循环前后的微观结构

Fig. 5 Microstructure of Es before and after drying-wetting cycles

在高倍镜(10 000倍)的放大倍数下观察发现,未改良土试样中土体颗粒大多呈层状结构,边缘呈不规则形状,黏土矿物之间的连结以面-面居多,干湿循环前后的变化主要体现在干湿循环后土体中单独存在的

黏土颗粒增多,并且层状矿物之间的间距有所加大,意味着连接力的降低。从图 5(c)中可以看出,土中以块状和层片状颗粒为主,土体微结构单元的排列定向性相对较好,其中有些矿物呈棉絮状分布,这是伊蒙混层^[26],而且成分较多,这是遇水膨胀的物质;在图 5(d)中,土颗粒多是以粒状和扁片状为主,颗粒之间的连结减弱,形成松散的结构。

4.2 各类改良土干湿循环前后的微观结构变化分析

图 6 和 7 分别为改良土干湿循环前和干湿循环 9 次后放大 2 000 倍和 10 000 倍的 SEM 图。从图 6~7 可以看出,相比于未改良土,3 类改良土在结构上颗粒之间分布更加均匀,并且颗粒排布更加紧密。水泥和钢渣粉作为胶凝材料,初始时填充在膨胀土中,使多种材料在干拌的过程中充分接触,在加水拌合后胶凝材料分布相对均匀,水泥和钢渣粉水化产生的 C-S-H 和 CH 等物质将膨胀土颗粒胶结并填充于颗粒之间的缝隙;同时水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为微溶物也会以结晶的形式出现在土颗粒表面,从而增强土体的强度。对比发现,3 种改良土中 Es-SSP-C-N 和 Es-C 试样颗粒分布更加均匀,颗粒之间的连结较为紧密,孔隙中有胶凝材料和水化产物填充,而 Es-SSP-C 试样比较疏松。通过图 6(c)可以看到,土体颗粒经过水化产物的胶结团聚,颗粒较为粗大,但在大的团聚体之间还有明显的裂隙,构成了试样的缺陷,致使其强度相对另外两种土体略有降低。

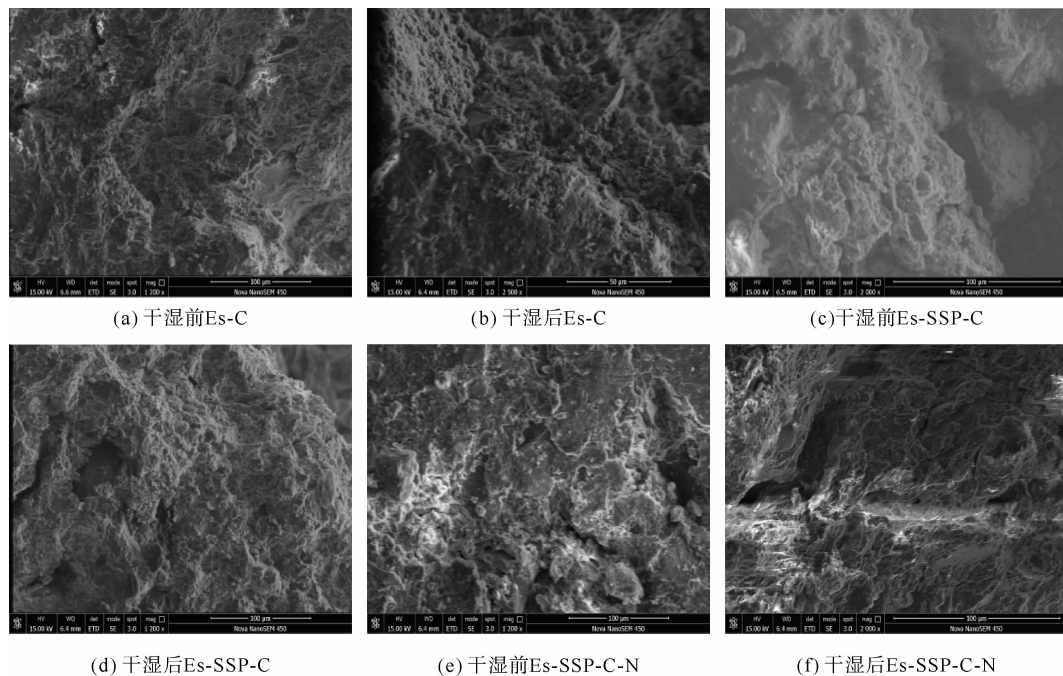


图 6 干湿前和 9 次干湿循环后各类改良土在 2 000 倍下的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of various types of improved soil under 2 000-fold mirror before dry-wet and after 9 dry-wet cycles

从图 7 中更加清晰地观察到改良土的土体单元排列紧密,定向性较好,颗粒间的胶凝物质也清晰可见。通过图 8 所示的 EDS 能谱分析发现,钢渣粉和水泥两种胶凝材料水化后,以板状分布的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和形状不规则却具有胶凝特性的 C-S-H 和 C-A-H 为主。图中可以看到 Es-SSP-C-N 和 Es-C 的土颗粒胶结的更加密实,黏土颗粒与 C-S-H 连接紧密,并且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶分布其中。其中 Es-SSP-C 试样的 SEM 图像中胶凝材料的水化产物以无定型结构存在,将未水化的水泥和钢渣粉以及黏土颗粒包裹并联结在一起。图 7(a)中可以看到棱角比较分明的未水化的水泥颗粒,但黏土矿物颗粒不太明显,只能看到大颗粒之间的连结。由此可见,膨胀土在水泥的掺和下,黏土颗粒被具有胶凝性质的水化产物包裹,水化产物在性能上较为稳定,并且对水的敏感度较低,因此在干湿循环条件下对水分较为敏感的黏土颗粒与水接触的机会大大降低,同时胶凝材

料的胶结作用也可以承受黏土颗粒遇水膨胀产生的膨胀力,对土体颗粒形成约束,所以在干湿循环作用下,土体的胀缩特性极大的减小,并且强度有了质的提高,另外 C-S-H 表面有零星分布的片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,这表示水化反应不充分。

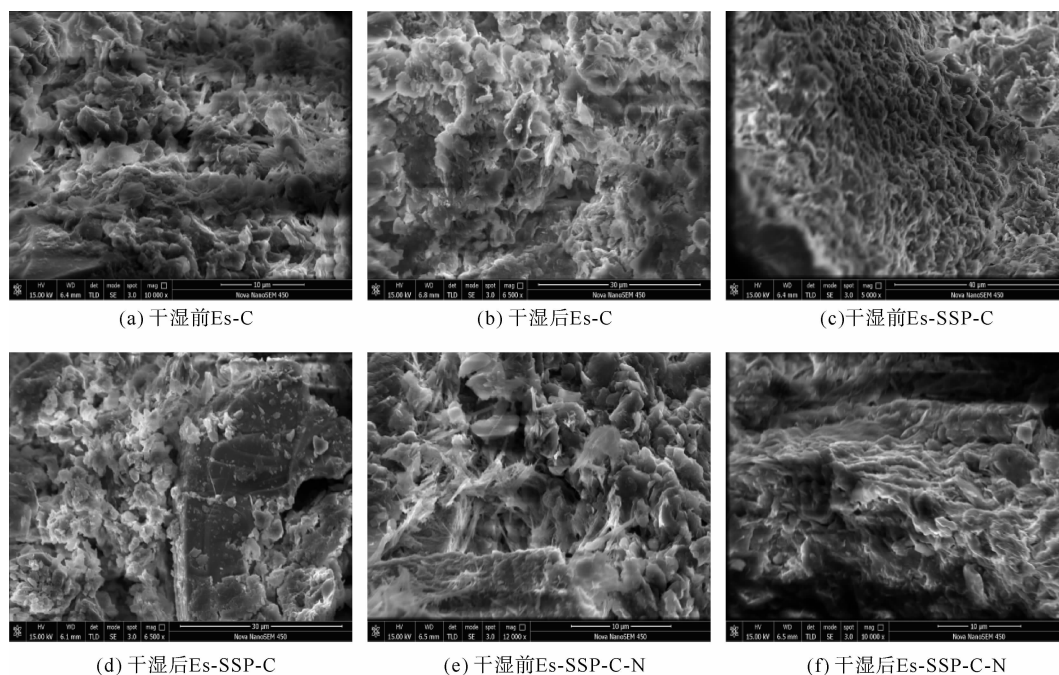


图7 干湿前和9次干湿循环后各类改良土在10 000倍下的SEM图像

Fig. 7 SEM images of various types of improved soil under 10 000-fold mirror before dry-wet and after 9 dry-wet cycles

对于 Es-C 和 Es-SSP-C,反应机理相似,不同的是有了钢渣粉的参与,一方面钢渣粉的活性较低,尤其在早期的试样中,水化反应较慢,并且在水泥和膨胀土拌合均匀后占据了一定的试块体积,在水化反应中也吸收了一部分的水,同比减少了水泥的水化用水量,因此在水化反应的程度上不如单独掺加水泥的 Es-C。在图 7(d)中可以看到,在无定型的水化产物中有较多棱角平滑的钢渣粉颗粒以及少量的水泥颗粒,未水化的胶凝材料颗粒镶嵌于 C-S-H 和 C-A-H 等水化产物中,与黏性土颗粒形成胶结,试块的强度也得到了提升,并且在干湿循环的环境中也会有较稳定的性能,但由于水化反应的程度较低,Es-SSP-C 终究会弱于另外两种试样。

由图 7(e)可知,Es-SSP-C-N 具有更加紧密的结构,土体颗粒被团絮状的水化产物包裹,形成密实的团聚体,其中大量的片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 堆叠在一起,表征了水化反应的充分性,在未水化的胶凝材料和黏土颗粒上存在大量 C-S-H 和 C-A-H 等胶结矿物,并且相互之间的联结处有很多针状物,在构成空间框架结构的同时也形成了很好的联结作用,对土体中存在的微裂隙进行填充,并且也使孔隙周边的颗粒联结良好。

在干湿循环之后,土体的微观形貌变化不大,由图 6(b)、6(d)、6(f)可知,没有明显的劣化痕迹,甚至可以看到大颗粒裂隙进一步的弥合,尤其是 Es-SSP-C,表明在早期的干湿循环中,土体裂隙部分会有水的填充,但由于结构在受到水侵蚀的同时仍存在着胶凝材料的水化,并且早期的胶凝材料水化只是进行了一小部

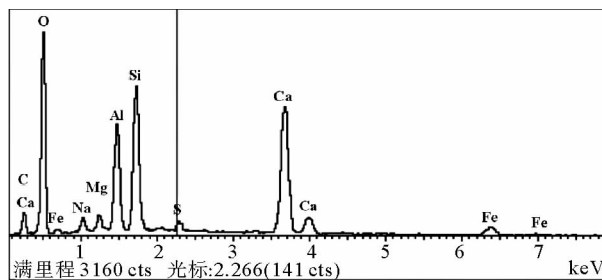


图8 C-S-H 和 C-A-H 能谱图

Fig. 8 Energy spectra of C-S-H and C-A-H

分,所以在水更加充足的环境中可以更快速的完成水化反应,因此水化产物会进一步填充孔隙结构,并胶结土体颗粒,从而有更加紧密的结构。

对比图 7 可知,各类改良土干湿循环前后物质的组成没有明显变化,并且颗粒排列仍然十分密实,但是在土颗粒或团聚体颗粒之间的微裂隙中的胶凝状况略有区别。在干湿循环中,水的不断侵入和挥发,使试块中的部分微溶物质(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)溶解,并且在多次干湿循环中不断地产生溶解侵蚀,部分胶结物也会被破坏,从而微裂隙部位受到影响而扩大。干燥过程中,水分挥发使部分溶解物重新结晶,因此在裂隙周边有一些零散分布的片状物质,此物质结合力较弱,影响试样整体性。但在整个干湿循环中,水在侵蚀土体结构时胶凝材料的水化反应仍在进行,因此胶结性仍保持正常的范围,但即使如此强度也会受到影响而有所降低。

5 结论

通过室内三轴压缩试验以及无侧限抗压强度试验,研究了钢渣粉水泥改良膨胀土在干湿循环作用下强度变化规律并进行了分析总结,结合 SEM 以及 EDS,对其变化机理进行了解释,得到了如下结论:

1) 抗剪强度会随围压增大而增大,并受干湿循环的影响呈非单调性变化,在不同干湿循环次数时强度大小关系总是 $E_s\text{-SSP-C-N} > E_s\text{-C} > E_s\text{-SSP-C} > E_s$,表现了改良土强度特性的优异性,以及掺入活性激发剂后对钢渣粉改良膨胀土强度的贡献。在干湿循环次数和围压两种因素中,后者对抗剪强度的影响大于前者。黏聚力和内摩擦角在改良土中的数值明显大于未改良土,并且随干湿循环次数的增加,黏聚力的变化幅度大于内摩擦角,其中水化效果更好的 $E_s\text{-SSP-C-N}$ 和 $E_s\text{-C}$ 变化幅度较小,表现了两者的承受干湿循环侵蚀能力的优势。

2) 在干湿循环条件下,纯土颗粒之间的连接力进一步减弱,层状分布的颗粒之间有明显的间隙,同时伴随有结构松散以及裂隙发展,因此会有性能减弱的表现;改良土颗粒排列上更加紧密,在水化产物的胶结作用下有更强的整体性体现,在干湿循环的作用下相比纯土的变化更小。

3) 相比于干湿循环前,改良土干湿循环后呈不定形态分布的 C-S-H 和板状分布的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物有增多的迹象,尤其是 $E_s\text{-SSP-C}$ 最为明显,表明了干湿循环既是干湿侵蚀的过程,也是胶凝材料水化的过程,尤其在早期胶凝材料水化不充分时,水化效果更明显,因此对干湿循环的侵蚀作用承受能力较强。

参考文献:

- [1] 吴君华,杨松.干湿循环下膨胀土基质吸力测定及其对抗剪强度影响试验研究[J].岩土力学,2017,38(3):678-684.
WU Junhua, YANG Song. Experimental study of matric suction measurement and its impact on shear strength under drying-wetting cycles for expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(3): 678-684.
- [2] 韩华强,陈生水.膨胀土的强度和变形特性研究[J].岩土工程学报,2004,26(3):422-424.
HAN Huaqiang, CHEN Shengshui. A study on strength and deformation of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 422-424.
- [3] 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.
- [4] 吕海波,曾召田,赵艳林,等.膨胀土强度干湿循环试验研究[J].岩土力学,2009,30(12):3797-3802.
LÜ Haibo, ZENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797-3802.
- [5] KHEMISSA M, MEKKI L, MAHAMED A. Laboratory investigation on the behaviour of an overconsolidated expansive clay in intact and compacted states[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 157-168.
- [6] NOWAMOOZ H, JAHANGIR E, MASROURI F, et al. Effective stress in swelling soils during wetting drying cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 33-44.
- [7] XIAO J, YANG H P, ZHANG J H, et al. Surficial failure of expansive soil cutting slope and its flexible support treatment technology[J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2018: 1-13. DOI: 10.1155/2018/1609608.
- [8] ZHAN T L, NG C W. Shear strength characteristics of an unsaturated expansive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(7): 751-763.

- [9] VENKATARAMANA K, HANUMANTHA R B, SINGH D N, et al. Some investigations on cracking characteristics of soils [C]// Proceedings of the 12th IACMAG: Geomechanics in the Emerging Social & Technological Age. Goa, 2008: 1532-1538.
- [10] PERON H, HUECKEL T, LALOUI L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: Experimental characterization and mechanisms identification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46: 1177-1201.
- [11] GUNEY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. Building & Environment, 2007, 42(2): 681-688.
- [12] 李新明, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于工程包边法的膨胀土抗剪强度干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 675-682.
- LI Xinming, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Experimental research on shear strength of expansive soil under wetting-drying cycles based on wrapping method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 675-682.
- [13] RAO M R, RAO A S, BABU R D. Efficacy of cement-stabilized fly ash cushion in arresting heave of expansive soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 189-197.
- [14] WANG Y X, GUO P P, REN W X, et al. Laboratory investigation on strength characteristics of expansive soil treated with jute fiber reinforcement[J/OL]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(11): 04017101.
- [15] FAISAL I S, IBRAHIM M A, HISHAM Y Q. Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils[J]. Journal of King Saud University (Engineering Sciences), 2016, 29(4): 394-399.
- [16] ASHANGO A A, PATRA N R, ASCE M. Behavior of expansive soil treated with steel slag, rice husk ash, and lime[J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28: 06016008.
- [17] 厚荣斌. 钢渣、稻壳灰和生石灰改良膨胀土的性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(7): 208-210.
- HOU Rongbin. Study on properties of expansive soil improved by steel slag, rice husk ash and quicklime[J]. Journal of Highway and Transportation Technology, 2017, 13(7): 208-210.
- [18] 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 Weiyang, 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.
- [19] REDDY N G, TAHASILDAR J, RAO B H. Evaluating the influence of additives on swelling characteristics of expansive soils[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2015, 1(1): 1-13.
- [20] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [21] 李岩宾. 钢渣粉改良膨胀土和淤泥质土特性研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2016.
- LI Yanbin. Property study of expansive and mucky soil improved by steel slag powder[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2016.
- [22] 陈四利, 张精禹. 氯化钠腐蚀及干湿循环条件下水泥土的力学特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(4): 456-462.
- CHEN Sili, ZHANG Jingyu. Mechanical properties of cemented soil under condition of sodium chloride corrosion and dry-wet cycles[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(4): 456-462.
- [23] 武科, 赵闯, 张文, 等. 干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 121-127.
- WU Ke, ZHAO Chuang, ZHANG Wen, et al. Swelling-shrinking characteristics and irreversible deformation of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 121-127.
- [24] 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.
- [25] 王力, 李喜安, 洪勃, 等. 黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 179-185.
- WANG Li, LI Xian, HONG Bo, et al. Effect of clay content on shear strength of loess[J]. Coal Geology and Exploration, 2019, 47(3): 179-185.
- [26] 陈宝, 潘熹敏, 路晓军, 等. 弱膨胀土在浸水膨胀过程中的微观结构变化特征[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(4): 140-144.
- CHEN Bao, PAN Yanmin, LU Xiaojun, et al. Microstructural variation characteristics of weak expansive soils during hydration[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(4): 140-144.

(责任编辑: 吕海亮)