

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.005

干湿循环作用下钢渣-偏高岭土改性 膨胀土工程性质试验研究

王北杨¹, 查甫生¹, 康博¹, 沈银斌^{2,3}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043; 3. 机械工业勘察设计院有限公司 安徽分公司, 安徽 合肥 230051)

摘要:文章以钢渣-偏高岭土改性膨胀土为研究对象,通过一系列的室内试验分析干湿循环作用对改性土工程性质的影响。研究表明:干湿循环作用下,改性土的强度远高于素土的强度,其压缩系数、膨胀指标低于素土,在前5次干湿循环内,改性土强度下降、压缩系数上升趋势;继续增加干湿循环次数,改性土强度显著下降、压缩系数上升速度加快,但其强度仍满足二级公路基层建设要求;在干湿循环11次后,干湿循环作用对改性土工程性质影响减弱。微观结构分析表明:钢渣-偏高岭土改性剂可以在膨胀土内生成水化产物;在经历干湿循环作用后,水化产物的结构发生破坏,土颗粒间胶结力下降,土体内大孔增多、微裂隙发生扩张,这些是导致改性土工程性质劣化的重要因素。

关键词:膨胀土;钢渣-偏高岭土;干湿循环;工程性质;微观劣化机制

中图分类号:TU443;TU411.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)07-0898-07

Experimental study on engineering properties of steel slag-metakaolin modified expansive soil subjected to wetting-drying cycles

WANG Beiyang¹, ZHA Fusheng¹, KANG Bo¹, SHEN Yinbin^{2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, China; 3. Anhui Branch, China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: Steel slag-metakaolin modified expansive soil is taken as the research object, and the influence of wetting-drying cycles on the engineering properties of modified soil is analyzed through a series of indoor experiments. The results indicate that under wetting-drying cycles, the strength of the modified soil is significantly higher than that of the original soil, with lower compression coefficients and expansion indexes. Within the first five wetting-drying cycles, the strength of the modified soil decreases and the compression coefficient increases slowly. As the number of wetting-drying cycles continues to increase, the strength of the modified soil decreases significantly, and the rate of increase in compression coefficient accelerates. However, the strength of the modified soil still meets the requirements for the construction of secondary highway subgrades. After 11 wetting-drying cycles, the influence of wetting-drying cycles on the engineering properties of the modified soil weakens. Microscopic experiments demonstrate that the steel slag-metakaolin modifier can generate hydration products within the expansive soil; after undergoing wetting-drying cycles, the structure of hydration products is

收稿日期:2024-04-10; **修回日期:**2024-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42030710)

作者简介:王北杨(1997—),男,内蒙古呼和浩特人,合肥工业大学硕士生;

查甫生(1978—),男,安徽枞阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

康博(1988—),女,河北武安人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者, E-mail: kangbo@hfut.edu.cn;

沈银斌(1983—),男,浙江余姚人,博士,机械工业勘察设计院有限公司正高级工程师。

damaged, leading to a decrease in interparticle bonding strength, an increase in macropores, and expansion of microcracks within the soil body, which are important factors contributing to the deterioration of the engineering properties of the modified soil.

Key words: expansive soil; steel slag-metakaolin; wetting-drying cycles; engineering properties; microscopic deterioration mechanism

膨胀土在我国分布广泛,其因富含伊利石、蒙脱石等黏土矿物具有吸水膨胀、失水收缩的特性,因此可能造成膨胀土地基失稳、滑坡等地质灾害;通常采用化学改性方法对膨胀土地基进行处理,常见的改性剂有石灰、水泥等^[1-3]。然而在实际工程应用中,受气象和水文条件变化的影响,经石灰、水泥等传统水硬材料改性的膨胀土会出现力学、胀缩等性质的劣化。文献[4]研究表明,干湿循环会影响改性土体孔隙结构,降低改性土内部储水能力,从而增大其膨胀势能;文献[5]通过试验发现,干湿循环次数与粉煤灰-石灰改性土的胀缩性、黏粒含量成正比,与粉粒含量、抗压强度成反比,干湿循环作用会破坏土颗粒之间的胶结产物;文献[6]研究发现,石灰改良膨胀土在干湿循环 3 次时发生结构性破坏;文献[7]指出,一定量水泥可以提高干湿循环作用下膨胀土的耐久性,但其无侧限抗压强度与干湿循环次数呈反比。由于石灰、水泥等都是高能耗物质,其大量使用不利于实现“双碳”目标,近年来一些研究人员采用固体废弃物改良膨胀土,并取得显著成效。文献[8]将秸秆灰渣掺入膨胀土,并进行干湿循环试验,结果表明,秸秆灰渣在土中发生物理化学作用,使土颗粒之间形成团聚物,可有效提高改性土黏聚力;文献[9]将碱激发矿渣和传统水硬材料改性膨胀土的湿胀进行比较,试验发现,碱激发矿渣改性膨胀土的湿胀变形幅度最小,且强度保留最多;文献[10]研究发现,碱激发矿渣改良膨胀土在 12 次干湿循环后,其力学性质仍满足工程需要;文献[11]利用工业甘蔗渣-低碱生态水泥改良膨胀土边坡,在干湿循环作用下,改性土裂隙发育得到明显抑制。综上所述,利用工业固体废弃物并配合其他稳定剂改性膨胀土,可以有效减缓和抵抗干湿循环对土体力学性能的负面影响。

钢渣中的氧化钙可作为膨胀土改性的有效成

分,另外其含有的硅酸钙等具有活性的物质,能够与膨胀土发生水化反应并生成水化凝胶产物,改善膨胀土工程性质^[12-14]。文献[15]研究发现,将钢渣与石灰掺入膨胀土中能一定程度上改善膨胀土的物理性质;文献[16]利用钢渣微粉改性膨胀土,通过无侧限抗压强度、自由膨胀率等试验,验证了钢渣微粉对膨胀土的工程性质具有一定的改性效果。但钢渣作为膨胀土改性剂存在早期水化活性低的问题,文献[17]研究表明,将偏高岭土与钢渣混合后再掺入膨胀土,偏高岭土可以激发钢渣活性,加速土中水化反应,进一步提升钢渣对膨胀土工程性质的改良效果。利用钢渣改性膨胀土为钢渣的资源化利用和膨胀土的低碳低能源改性提供了途径,顺应我国“双碳”战略目标的发展。

钢渣-偏高岭土改良膨胀土可以有效改善其工程性质,但是,其在干湿循环作用下的工程性质尚不明确。本文采用钢渣-偏高岭土复合改性剂改性膨胀土,通过室内试验研究干湿循环作用对改性膨胀土的工程性质和微观结构的影响,综合膨胀土的工程性质与微观特性分析改性土在干湿循环作用下的劣化机理。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验用膨胀土取自安徽合肥某工地地下 3~5 m,土体呈黄褐色、硬塑状态,含少量铁锰结核。将试验用土碾碎过筛处理后,根据文献[18]进行土工试验,其基本物理性能指标见表 1 所列,根据文献[19]判定该膨胀土为弱膨胀土。土中主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,见表 2 所列。试验钢渣来自宝山钢铁股份有限公司,呈乳白色,其主要成分为 CaO 、 SiO_2 等;试验偏高岭土来自河南某偏高岭土生产工厂,其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 等。改性剂主要化学成分见表 3 所列。

表 1 膨胀土基本物理性能指标

颜色	天然	界限含水率			击实试验		自由
	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑限指数	最大干密度/(g/cm^3)	最优含水率/%	膨胀率/%
黄褐色	26.13	54.7	24.7	30	1.76	16.30	53

表 2 膨胀土化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MgO	烧失量
w/%	59.27	17.48	8.93	4.12	1.54	1.27	0.49	6.90

表 3 改性剂主要化学成分

钢渣	成分	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	烧失量
	w/%	45.99	2.55	30.07	10.15	4.36	6.88
偏高岭土	成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	烧失量	
	w/%	58.50	29.20	4.70	2.30	5.30	

1.2 试样制备

参考文献[20]的研究结果,将掺入剂质量配比确定为 16% 钢渣与 4% 偏高岭土。根据试验需求,制作柱状试样与环刀试样若干,其规格分别为 $\phi 39\text{ mm} \times H 80\text{ mm}$ 与 $\phi 61.8\text{ mm} \times H 20\text{ mm}$,具体步骤^[18]如下。

1) 将膨胀土、钢渣、偏高岭土放入 105 °C 烘箱内烘干 24 h,取出、碾碎,膨胀土过 2 mm 筛,钢渣、偏高岭土过 0.5 mm 筛。

2) 根据已设的配比,称取对应质量的干土及改性材料,将其搅拌混合。

3) 按照改性土最大干密度的 95% 计算含水率,称取相应体积去离子水,将其均匀喷洒在混合物料表面,并搅拌物料。

4) 称取一定质量物料倒入模具,用万能实验仪以 0.5 mm/s 的轴向位移速率压实土样,静置 30 min 后取下。

5) 将试样用保鲜膜包裹严密后放入标准养护箱(温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% $\pm$ 2%),试样养护龄期为 28 d。

1.3 试验方法

1.3.1 干湿循环试验

模拟研究自然降雨与蒸发条件下改性土工程性质演化规律,试样干湿循环试验步骤^[21]如下:湿润过程中,将试样置于透水石上并放入水箱底部,将水箱放入养护箱(温度 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$) 中 24 h,试验过程中持续添加去离子水保证水面刚刚浸透透水石;干燥过程中,将水箱水倒出后,水箱连同试样放入温度为 $(45 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的烘箱中 24 h,此为 1 次干湿循环。重复上述操作 1、3、5、7、9、11、13、15 个循环。

1.3.2 室内岩土工程测试

依据文献[18]对改性土各项工程性质进行试验,主要包括无侧限抗压强度试验、压缩特性试验、无荷载膨胀率试验、线缩率试验。无侧限抗压

强度试验试样应变速率控制为 1 mm/min;压缩特性试验设置荷载梯度为 25、50、100、200、400、800 kPa,判稳方法为最后一级荷载持续 24 h;无荷载膨胀率试验是将干燥试样置入膨胀仪后注水,水面刚刚没过透水石,每隔 30 min 记录数据,在 2 次仪表度数不变后停止读数;线缩率试验是将湿润试样置入收缩仪中,每隔 1 h 记录数据,在 2 次仪表度数不变后停止读数。

1.3.3 矿物学及微观结构分析

选取代表性样品进行一系列微观试验。为了确保试样在微观试验前不受干缩变形和持续的水化反应所影响,需对试样进行冻干处理:将试样切成横截面积约 5 mm $\times$ 5 mm 的长方体,放入冻干机,真空冻干 24 h,密封保存。

1) X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析。将试样放入 105 °C 烘箱烘干 24 h,碾碎后过 0.075 mm 筛,取粉末进行 XRD 分析。

2) 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)表征。将冻干的样品掰断,保留断面;将底面用刀片削平,控制试样厚度在 3 ~ 5 mm,然后对待测试样进行喷金处理,增加其导电性;最后进行 SEM 表征。

3) 压汞(mercury-in-pressure, MIP)表征。将冻干样品切成边长为 5 mm 的立方体用于 MIP 表征。

2 试验结果与分析

2.1 强度特性

对不同干湿循环次数后的土样进行无侧限抗压强度试验,试验结果如图 1 所示。素土在第 3 次干湿循环后崩解,而改性土的无侧限抗压强度在 5 次干湿循环后下降幅度较小(阶段 1),与掺入 6% 石灰改良膨胀土^[5]相比,其在干湿循环作用 5 次后的强度提高约 1.2 倍,这主要归因于钢渣-偏高岭土改性剂早期水化活性较低,即使在 28 d 养护龄期后,改性土内部仍在干湿循环作用下发生水化反应,生成的水化凝胶产物能胶结、包裹土体,从而抵抗劣化^[22]。继续进行干湿循环至 11 次(阶段 2),土体强度下降速度加快,改性土不断膨胀收缩,这影响了其结构的稳定,且土中一些水化产物结构发生破坏,导致土体水稳性下降,并

产生微裂隙^[23];在此阶段,干湿循环对改性土劣化影响占主导,改性土强度明显降低,但强度仍满足二级公路基层建设要求^[24]。11次干湿循环后改性土强度下降趋势变得平缓(阶段3),改性土内部结构达到动态平衡^[25],强度低于高速公路及一级公路基层建设要求下限,但仍比石灰改性土有一定提升^[5]。

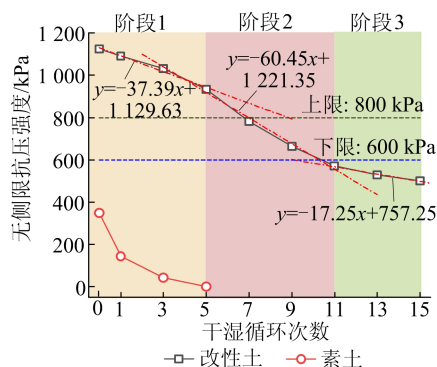


图1 干湿循环作用对改性土与素土无侧限抗压强度的影响

2.2 压缩特性

干湿循环作用下改性土压缩系数变化如图2所示。

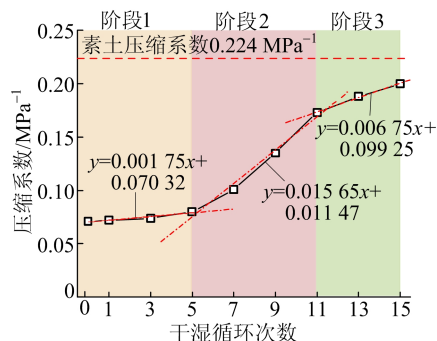


图2 干湿循环作用对改性土压缩系数的影响

改性土在干湿循环5次内(阶段1),压缩系数产生小幅上升,但均小于 0.10 MPa^{-1} 。这归因于改性材料在土中生成了水化产物,在胶结、包裹土体的同时,材料本身也充当骨料用于物理填充,共同抵抗干湿循环作用的劣化^[26]。干湿循环试验进行至11次(阶段2)时,土体在反复湿胀干缩变形后,土颗粒骨架之间胶结产物的结构遭到破坏,且大孔与微裂隙交织于整个改性土体内,其压缩系数上升较快,土体更易被压缩^[27]。继续增加干湿循环次数(阶段3),改性土的压缩系数上升速度减慢,这可能是由于多次干湿循环试验后,土颗粒排列经过重新分配,会形成稳定的颗粒分布,

这有利于改性土抵抗干湿循环作用对其压缩性能的劣化^[28]。在完整经历15次干湿循环后,改性土的压缩系数仍低于未经干湿循环作用素土的压缩系数,说明钢渣-偏高岭土的改性可以降低膨胀土的压缩性,并有效抵抗干湿循环作用对改性土压缩性质的劣化。

2.3 胀缩特性

干湿循环作用下改性土膨胀量及线缩率变化如图3所示。由图3可知,在干湿循环作用下,改性土膨胀量变化较小,且远低于素土膨胀量,说明改性剂对土体膨胀有很好的抑制效果,在试样养护龄期内在干湿循环作用下,土中钢渣-偏高岭土发生水化反应和火山灰反应,生成的水化产物通过胶凝、离子交换、包裹等作用降低土颗粒比表面积与亲水性^[20]。在干湿循环前5次时(阶段1),改性土线缩率上升相对平缓,改性剂生成的水化产物通过离子交换作用,降低土体双电层厚度,从而降低改性土亲水性,抑制其收缩性^[29];随着干湿循环的进一步作用(阶段2),土体线缩率上升速度加快,并在第11次干湿循环后线缩率略高于素土线缩率,说明反复的干湿循环会破坏改性土内部结构,增加其收缩性^[30];在阶段3,改性土线缩率上升速度减缓,其内部土颗粒重新分布,达到动态平衡,保水能力增强^[31]。在长期干湿循环下,改性剂仍能有效抑制膨胀土的膨胀特性,但对其收缩特性作用效果有限。

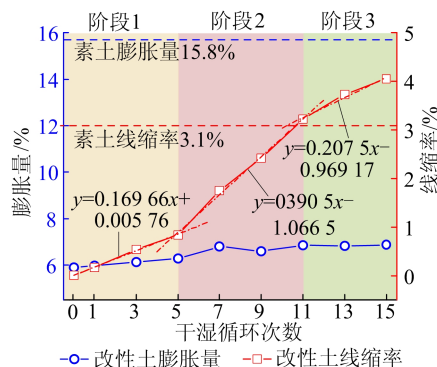


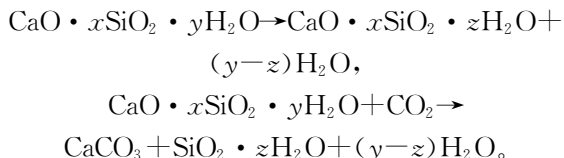
图3 干湿循环作用对改性土膨胀量及线缩率的影响

2.4 微观作用机制

2.4.1 矿物特征

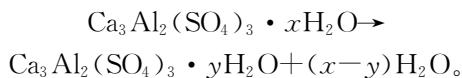
不同干湿循环次数下土体矿物成分变化如图4所示。改性土中存在矿物石英及水化产物水化硅酸钙、钙矾石、水化铝酸钙等。第5次干湿循环后水化硅酸钙峰有明显下降趋势,在工程性质方面体现为改性土在5次干湿循环后强度下降,压缩系数、线缩率上升显著(阶段2),直至15次

干湿循环时该峰消失,表明多次干湿循环试验会对改性土中的水化硅酸钙产生破坏,这是由于反复干燥过程中水化硅酸钙失去结合水,破坏其完整结构^[32];同时与环境中的 CO_2 和 H_2O 反应,发生碳化作用^[33],化学反应方程式为:



其中: x 根据水化程度不同而变化,通常接近 2; y 、 z 分别为水化硅酸钙初始状态、最终状态的水分子数。

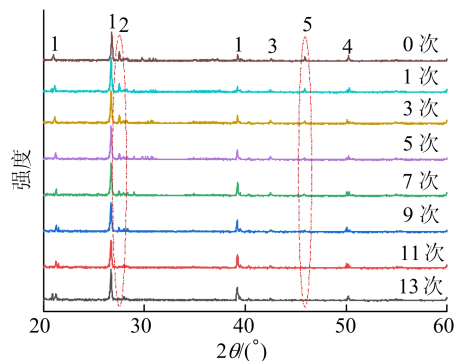
钙矾石峰值也随着干湿循环进行而下降,钙矾石在反复干燥过程中会部分或完全脱去结晶水,其晶格发生破坏,这将导致钙矾石发生分解^[34],化学反应方程式为:



其中, x 、 y 分别为钙矾石初始状态、最终状态的水分子数。

为了更加清晰直观地揭示干湿循环对水化产物的影响,本文参考文献[35-36],作出干湿循环作用对水化硅酸钙影响示意图,如图 5 所示。由图 5 可知:第 1 部分,水化硅酸钙在湿润状态,其由钙氧层、硅氧层和结合水组成主体结构,层间包含自由水;第 2 部分,在干燥状态下,水化硅酸钙自由水蒸发,结合水部分蒸发;第 3 部分,反复干湿循环作用后,湿润状态下,自由水进入层间结

构,结合水在物理化学作用下重新生成,但水化硅酸钙主体结构因反复坍塌变形而产生破坏或碎裂。水化产物峰值强度的降低,表明用于胶结包裹土颗粒的水化产物减少,使得土体局部结构在干湿循环过程中发生破坏,导致土体出现大孔,土体工程性质下降,并进一步导致土体裂隙发育,最终导致改性土工程性质劣化^[37]。



1.石英 2.水化硅酸钙 3.水化铝酸钙 4.碳酸钙 5.钙矾石

图 4 不同干湿循环次数下改性土矿物成分的变化

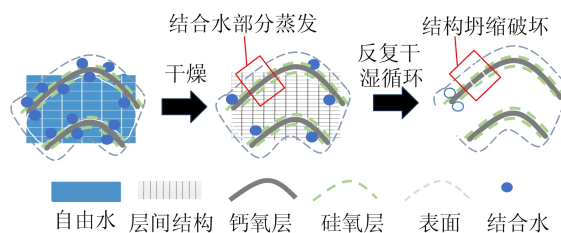


图 5 干湿循环作用对水化硅酸钙结构的影响

2.4.2 微观形貌特征

干湿循环作用下土样 SEM 图像如图 6 所示。

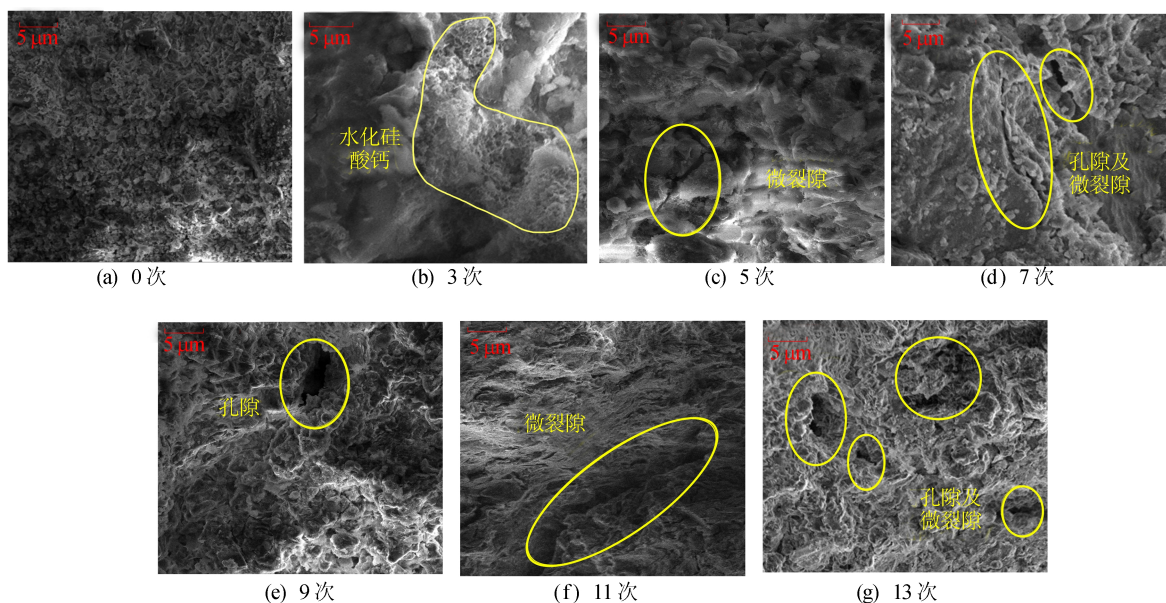


图 6 不同干湿循环次数下改性土 SEM 图像

从图6可以看出,随着干湿循环的进行,改性土微观结构出现大孔并不断发育成微裂隙。第3次干湿循环时存在包裹土体呈絮状的水化硅酸钙,土体微观结构仍未发生明显劣化,水化产物可以抵抗干湿循环作用对改性土工程性质的劣化,改性土强度下降,压缩系数、线缩率上升趋势(阶段1);第5次干湿循环时土体开始出现微裂隙;第7次干湿循环时土中可见微裂隙及孔隙,这是由于土中水化产物的减小使土体局部结构出现崩坏,导致大孔隙及裂隙增多^[38];第9次干湿循环时土中可见大孔;第11次干湿循环时土中可见明显微裂隙,这是由于土颗粒之间连接力变弱后,在干燥收缩过程中拉张应力超过土颗粒连接力,导致微裂隙发育^[31],大孔的产生与微裂隙的扩张是干湿循环作用下改性土工程性能劣化的重要因素之一,改性土在阶段2强度下降,压缩系数、线缩率上升明显;第13次干湿循环时可以观察到大孔与微裂隙遍布在改性土体内。

2.4.3 孔隙分布特征

不同干湿循环次数下改性土孔隙分布曲线呈“三峰”状,如图7所示。

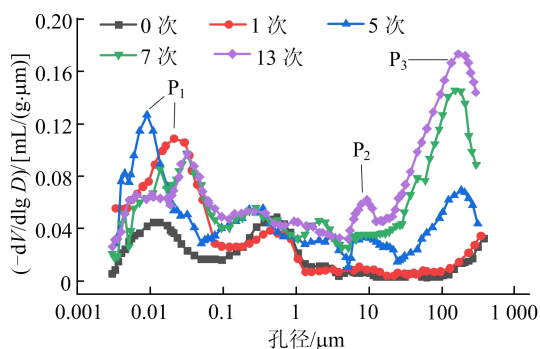


图7 不同干湿循环次数改性土的孔隙分布特征

图7中: V 为孔体积; D 为孔直径; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为小孔、大孔、微裂隙对应的峰。从图7可以看出:5次干湿循环时, P_1 峰向左向上偏移;随着干湿循环次数增加, P_2 、 P_3 峰峰值不断升高。研究表明,在干湿循环作用下,改性剂在吸湿过程中不断生成水化凝胶产物填充土体,使改性土小孔($0.05 \sim 0.50 \mu\text{m}$)体积收缩,数量增加,小孔总体积变化不大,改性剂通过填充作用、离子交换作用、水化作用等使土体结构致密^[14],同时,在干燥过程中,改性土含水率降低,致使土颗粒间基质吸力增大^[25],加剧土体收缩,小孔数量增加,工程性质表现为改性土线缩率不断上升;而大孔($5 \sim 20 \mu\text{m}$)在13次干湿循环时有明显增加,同时, P_3

峰峰值的不断升高表明改性土中微裂隙(大于等于 $20 \mu\text{m}$)的产生与发育,土颗粒收缩使改性土大孔数量增加,而反复干湿循环后,土颗粒间基质吸力大于土颗粒间连结力时,就会导致土体内部形成微裂隙^[25]。这是干湿循环作用下改性土工程性质劣化的重要原因之一。

3 结 论

本文对干湿循环作用下钢渣-偏高岭土改性膨胀土的强度、压缩、胀缩性质及微观结构变化进行探究,并分析其工程性质劣化机理,得出如下结论:

1) 干湿循环作用下,改性土无侧限强度下降趋势呈先缓慢、后加快、再趋缓3个阶段。相较于素土,改性剂可以有效抵抗干湿循环作用对膨胀土强度性质的劣化。干湿循环作用下,改性土压缩系数上升趋势与无侧限抗压强度规律类似,也呈3个阶段。经历多次干湿循环作用后其压缩系数仍低于未经干湿循环作用素土的压缩系数,说明改性剂可以抵抗干湿循环作用对膨胀土压缩性质的劣化。

2) 0~15次干湿循环后,改性土膨胀量仍维持较低水平,改性剂对膨胀土膨胀特性有很好抑制作用;而改性土的线缩率在第11次干湿循环时高于素土的线缩率,在实际工程中要注意在反复干湿循环作用后,改性土收缩性质过度劣化可能引起的地基不均匀沉降、基础结构失稳等工程问题。

3) XRD结果表明,干湿循环作用下,改性土中水化产物发生破坏,使得土颗粒间胶结力下降;SEM、MIP结果表明,土体内大孔、微裂隙发生扩张。这些是导致改性土工程性质劣化的重要因素。

【参 考 文 献】

- [1] 查甫生,刘松玉,杜延军. 石灰粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007,37(2):339-344.
- [2] 商拥辉,徐林荣,刘维正,等. 重载铁路水泥改良膨胀土工程特性与路用性能[J]. 西南交通大学学报,2020,55(5):1044-1051.
- [3] 王佩,宋新江,徐海波,等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):56-60.
- [4] Khemissa M, Mekki L, Mahamedi A. Laboratory investigation on the behaviour of an overconsolidated expansive clay in intact and compacted states[J]. Transportation Geotechnics,2018,14:157-168.
- [5] 杨成斌,查甫生,崔可锐. 改良膨胀土的干湿循环特性试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(1):98-102,12.
- [6] 邱钦元. 干湿循环下石灰改良膨胀土特性研究[J]. 路基工程,2021(1):79-83.
- [7] Abdullah H H, Shanen M A, Sarker P. Use of fly-ash geopolymers

- mer incorporating ground granulated slag for stabilisation of kaolin clay cured at ambient temperature[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37: 721-740.
- [8] 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.
- [9] Sahoo S, Singh S P. Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymers and conventional stabilizers[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 328: 127078.
- [10] Chowdary V B, Ramanamurthy V, Pillai R J. Experimental evaluation of strength and durability characteristics of geopolymer stabilized soft soil for deep mixing applications[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6: 40.
- [11] 刘灿. 干湿循环下工业甘蔗渣—低碱生态水泥改良膨胀土土水特性及边坡稳定性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023: 31-34.
- [12] Wei J H, Wei J M, Huang Q J, et al. Mechanism and engineering characteristics of expansive soil reinforced by industrial solid waste: a review[J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 1001.
- [13] 陈益民, 张洪滔, 郭随华, 等. 磨细钢渣粉作水泥高活性混合材料的研究[J]. *水泥*, 2001(5): 1-4.
- [14] 赵旭光, 赵三银, 李宁, 等. 高钢渣掺量和高强度钢渣水泥的研制[J]. *武汉理工大学学报*, 2004, 26(1): 38-41.
- [15] 项国圣, 葛磊, 谢胜华, 等. 钢渣和石灰改良膨胀土的工程特性研究[J]. *安徽建筑大学学报*, 2023, 31(1): 30-34.
- [16] 袁明月, 张福海, 王远航. 钢渣改良膨胀土试验效果与机理分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(2): 67-70.
- [17] 朱教群, 秦维高, 刘凤利, 等. 偏高岭土对钢渣-石膏复合材料性能影响研究[J]. *混凝土*, 2018(6): 64-67, 71.
- [18] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].
- [19] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S].
- [20] 杜欣鹏. 偏高岭土-钢渣复合材料改良膨胀土路用性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 67-69.
- [21] ASTM D559/D559M-15(2023)e1 Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures[S].
- [22] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(9): 18-26.
- [23] 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: 111-118.
- [24] JTJ 034—2000 公路路面基层施工技术规范[S].
- [25] 刘晶晶, 吴东彪, 许龙, 等. 水泥-碱渣改良膨胀土干湿循环耐久性及其劣化机制试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9207-9218.
- [26] Maslehuddin M, Sharif A M, Shameem M, et al. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes[J]. *Construction & Building Materials*, 2003, 17: 105-112.
- [27] Dong Q, Sun X, Lei N Z, et al. Effect of dry-wet cycling on the degradation characteristics and mechanisms of red sandstone[J]. *Geofluids*, 2023, 2023: 9950331.
- [28] Zang M, Tai J, Lu H J. Microstructure and mechanical properties of expansive clay under drying-wetting cycle[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 7464.
- [29] 陈盼, 向锐, 魏小棋, 等. 考虑土水吸附效应的黏土收缩曲线方程[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(8): 866-872.
- [30] Yang L G, Ji W D, Zhang Y T. Study on the influence of expansive soil slope on bridge foundation under excavation and rainfall conditions[J]. *Engineering Reports*, 2023, 5(8): e12588.
- [31] Pires L F. Changes in soil water retention and micromorphological properties induced by wetting and drying cycles[J]. *Soil Systems*, 2023, 7(2): 51.
- [32] Ding Y H, Wu J, Zhang X G, et al. Quality improvement of recycled concrete aggregate by accelerated carbonation under different pressure[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, 2023, 38(3): 623-631.
- [33] Liu X, Cheng B, Hu J F. $\text{CaSiO}_3(001)$ surface reconstruction and CO_2 molecular adsorption[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2023, 323: 124027.
- [34] Afflerbach S, Pritzel C, Hartwich P, et al. Effects of thermal treatment on the mechanical properties, microstructure and phase composition of an Ettringite rich cement[J]. *Cement*, 2023, 11: 100058.
- [35] Pinson M B, Masoero E, Bonnaud P A, et al. Hysteresis from multiscale porosity: modeling water sorption and shrinkage in cement paste[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3: 064009.
- [36] Tiwari N, Satyam N, Singh K. Effect of curing on microphysical performance of poly-propylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 7624.
- [37] Li J S, Xue Q, Wang P, et al. Effect of drying-wetting cycles on leaching behavior of cement solidified lead-contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 10-13.
- [38] 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, 174/175/176/177: 166-170.

(责任编辑 张淑艳)