

氯盐渍土无侧限抗压强度及体变特性研究

Experimental Study on Unconfined Compressive Strength and Volumetric Behavior Characteristics of Chlorine Saline Soil

程 良, 杨建华

(陕西能源职业技术学院 建筑测绘学院, 咸阳 712000)

摘 要: 为了探究氯盐含量和含水率对土体强度及体变特性的影响规律, 准确分析外界条件改变下氯盐渍土强度变化和体变的内在原因, 通过在黄土中添加不同含量 NaCl 的方法配置单一盐类盐渍土, 采用无侧限压缩试验和 SEM 扫描电镜方法开展试验研究。结果表明: 氯盐渍土的强度总体随含水率的降低而提高, 12% 含水率作为氯盐渍土强度变化的临界点, 在含水率大于 12% 时, 土体强度随含盐量的增大而降低, 当含水率小于 12% 时, 土体强度表现为 3% NaCl > 1% NaCl > 5% NaCl > 不含 NaCl; 氯盐渍土的体变由制样时的弹性压缩变形、失水时的体缩与盐胀三部分组成, 在不含 NaCl、1% NaCl 和 3% NaCl 含量时土体一直处于体缩状态, 在 5% NaCl 含量下随着含水率减小, 土体呈现先体缩后体胀变化规律, 含水率在 15% 时体缩量最大; SEM 扫描电镜图像显示, 土中的 NaCl 结晶体呈颗粒状填充于土颗粒之间的空隙或呈釉状将土颗粒包裹, 影响着土体强度及体变, 扫描电镜图像分析发现不含 NaCl 的土体孔隙数量最多, 3% NaCl 的土体孔隙数量最少。

关键词: 无侧限压缩; 盐渍土; 强度; 体变

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0090-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.017

CHENG Liang, YANG Jianhua

(School of Architecture and Geomatics Engineering, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: In order to explore the influence of chlorine salt content and moisture content on the influence of soil strength and body characteristics, accurately analyze the external conditions change chlorine saline soil strength change and the internal causes of body change, through the method of adding different content NaCl configuration single salt saline soil, using no limit compression test and SEM scanning EM method. The results show that the overall strength of chlorine saline soil increases with the decrease of water content, 12% water content as the critical point for the strength change of chlorine saline soil, At a moisture content greater than 12%, The strength of the soil decreased with increasing salt content, When the moisture content is less than 12%, The strength of the soil was 3% NaCl > 1% NaCl > 5% NaCl > without NaCl; The body change of chlorine saline soil consists of three parts: elastic compression deformation during sample preparation, body shrinkage during water loss and salt swelling, In the absence of NaCl, 1% NaCl and 3% NaCl, At 5% NaCl content with decreasing moisture content, The soil shows the change law of the first body shrinkage and then the body expansion, The body shrinkage is the largest when the moisture content is at 15%; SEM SEM images display, The NaCl crystals in the soil fill the gap between the soil particles or

作者简介: 程 良 (1992—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 黄土力学与特殊土、建筑工程技术。

通信作者: 杨建华 (1963—), 男, 硕士, 二级教授, 研究方向: 建筑工程技术。

收稿日期: 2024-08-01

wrap the soil particles in a glaze shape, Affect the strength and body change of the soil, SEM image analysis revealed the largest number of soil pores without NaCl, 3% NaCl has the least number of pores.

Key words: unconfined compression; saline soil; strength; volume change

0 引言

盐渍土在我国西北内陆分布很广, 其工程性质表现出浸水后溶陷、强度降低、黏性增大, 失水后盐胀、强度提高、压缩性降低的特点, 在复杂多变的建设工程环境下, 经常引发建筑物地基不均匀沉降、边坡失稳、路基鼓胀或溶陷等病害。为了减少盐渍土对建设工程的影响, 开展盐渍土在工程环境变化下的强度发展规律和体变特性研究。

杨真等^[1]对我国盐渍土的分布、类型及形成原因进行了系统总结与分析; 冯金凤等^[2]提出了使用折光率仪快速测定盐渍土含盐量的方法; 张卫兵等^[3]采用多种试验方法从微观层面对冻融条件下硫酸盐渍土强度劣化机理进行研究; 侯娟等^[4]研究了法向循环荷载下加筋盐渍土的剪切性能; 吕擎峰等^[5]采用核磁共振技术对不同固化剂下的盐渍土进行微观特征试验, 结合单轴抗压强度揭示土体强度变化的机理及土体内部微观结构变化情况; 唐雄宇等^[6]对察尔汗地区盐渍土进行不同含水率、密度和侧向压力试验条件下的三轴试验, 探究盐渍土强度变化规律; 丁士君等^[7]采用无侧限抗压强度试验和直剪试验研究超氯盐渍土在淡水影响下的强度演变规律, 并从微观结构层面分析了氯盐渍土强度变化的机理; 赵辉伟等^[8]以不同含盐量下土的超声波速和单轴抗压强度为基本数据, 搭建出考虑冻融循环次数和含盐量参数的 BP 神经网络强度预测模型; 曹亚鹏等^[9]研究了硫酸盐渍土含水率变化下的盐胀特性; 周志雄等^[10]建立了综合水、热、盐、力多场耦合模型以计算盐渍土变形; 王旭超等^[11]用室内试验与数值模拟相结合的方法研究了细粒土含量对硫酸盐渍土路基盐胀的影响; 侯兆领^[12]探究了含水率与压实度对低温环境下盐渍土的变形影响规律; 黄佑芬等^[13]通过进行不同条件下的冻融循环试验, 给出了冻结盐渍土的有效应力方程, 阐释了盐渍土的变形机理; 廖昕等^[14]采用动三轴试验开展冻融循环条件下盐渍土的积累变形研究, 并构建了用于盐渍土

沉降预测的积累塑性应变预测模型; 色麦尔江·麦麦提玉苏普等^[15]借助压缩试验研究氯盐渍土在冻融循环作用下的变形特性, 试验表明变形量随着冻融循环次数及盐含量的增加而增大; 刘凯等^[16]研究了亚氯盐渍土在不同温度下的盐胀特性, 试验表明一定温度范围内亚氯盐渍土的盐胀量随温度降低而增加, 且在降温前期盐胀表现明显。

盐渍土强度及体变特性的研究成果主要集中在较小含水率变化区间的硫酸盐渍土或复合盐渍土方面, 且计算盐胀的公式仅考虑了含水率降低引起的盐胀, 而土体失水后体缩对于盐胀的削弱作用考虑不全面。基于此, 在西安地区黄土加入不同含量 NaCl 的方法配置单一盐类盐渍土, 研究在较大含水率区间内 (6%~饱和) 氯盐含量和含水率变化对土体强度的影响及考虑失水体缩的体变特性, 并通过 SEM 扫描电镜试验统计不同氯盐含量下土体孔隙分布情况, 从微观层面分析土体存在强度及体变差异的原因。

1 试验方案

1.1 土样制备

试验选用重塑土样, 原状黄土破碎后过 2 mm 筛并烘干, 按照盐土比为 1%、3% 和 5% 所需的盐含量称取 NaCl, 将其分别溶解到制样含水率为 21% 时所需的纯净水中并与土样充分拌合。配制好的土样装入保鲜袋密封, 放入保湿缸内静置 24 h。在制样前再次测定含水率, 并依据干密度计算每组试样需要的湿土质量, 采用分层法制成直径 3.91 cm、高 8.00 cm 的圆柱试样, 试样含水率自然蒸发至 6%、9%、12%、15%、18% 后包裹密封, 完成制样。

1.2 试验仪器及方案

利用应变式三轴仪在不施加围压下, 对试样施加轴向应力, 剪切速率为 0.166 mm/min, 试样每压缩 0.1 mm 读量力环数值一次。

将不含 NaCl (基准组) 和氯盐含量为 1%、3%、5% 的土样制成干密度为 1.40、1.45 和

岩土力学

1. 50 g/cm³ 的试块, 在试块含水率为 6%、9%、12%、15%、18%、21% 及 32.78% (饱和) 时进行无侧限抗压强度试验。

扫描电镜试验选取不含 NaCl (基准组) 和氯盐含量为 1%、3%、5% 的土样, 制成干密度分别为 1.40、1.45 和 1.50 g/cm³ 的试块, 并将其切削成 5~6 mm 的立方体试样, 图像放大倍数选择 2 000 倍。

2 氯盐渍土的无侧限抗压强度

2.1 含水率对氯盐渍土无侧限抗压强度的影响

由图 1 可知, 在试验含水率范围内无侧限抗压强度随含水率的增大而降低, 含水率在 9%~21% 时无侧限抗压强度减小速率较快, 其余范围无侧限抗压强度减小相对缓慢。无论干密度、氯盐含量如何变化, 12% 含水率为其无侧限抗压强度变化速率的临界点, 具体表现为含水率在 12% 时, 相同干密度、不同氯盐含量的土体无侧限抗压强度基本相等; 含水率大于 12% 时呈现出含盐量越高无侧限抗压强度越低的规律, 当含水率小于 12% 时, 3% NaCl 的盐渍

土无侧限抗压强度最高, 没有添加 NaCl 的土体无侧限抗压强度最低。

2.2 NaCl 含量对氯盐渍土无侧限抗压强度的影响

由图 2 可知, 在不同的含水率范围内含盐量对于无侧限抗压强度的影响有不同的表现形式。在 32.78% 的饱和含水率下, 土体的强度较低, 且氯盐含量对强度基本没有影响。含水率为 21% 和 18% 时, 土体中的含水率较高, 盐分处于溶解状态, 使得土体中结合水膜的厚度增加、土颗粒间摩擦作用减小, 进而土体无侧限抗压强度随着含盐量的增大呈线性减小趋势。含水率为 15% 和 12% 时, 土体强度随含盐量变化存在一些波动, 当含盐量较高 (3%、5%) 时, 丰富的盐类结晶增强了土颗粒之间的连接或充填于土颗粒空隙之中, 就会增强土体无侧限抗压强度。土体无侧限抗压强度波动变化是含盐量、含水率和干密度众多因素共同作用的结果。当含水率为 9% 和 6% 时, 土体强度随含盐量的增加呈现先增大后减小的趋势, 在 NaCl 含量为 3% 时土体无侧限抗压强度最高。

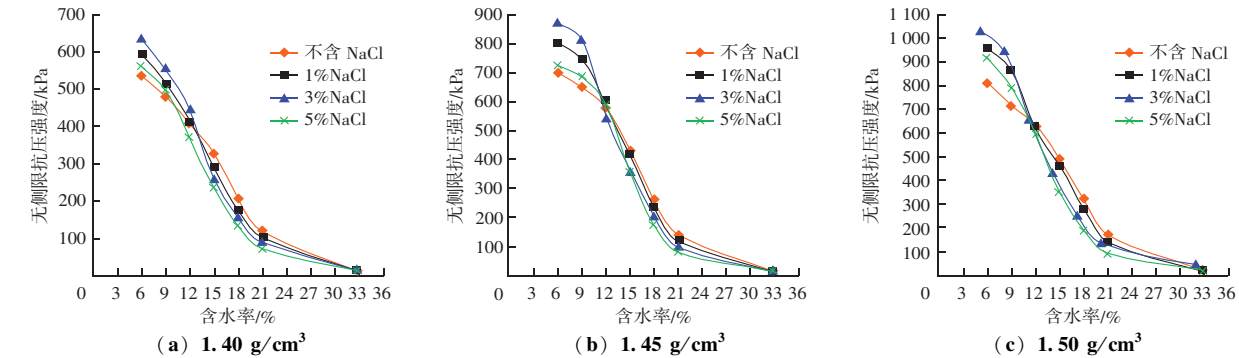


图 1 不同干密度下, 土体强度与含水率的关系

Fig. 1 Relationship between soil strength and moisture content at different dry densities

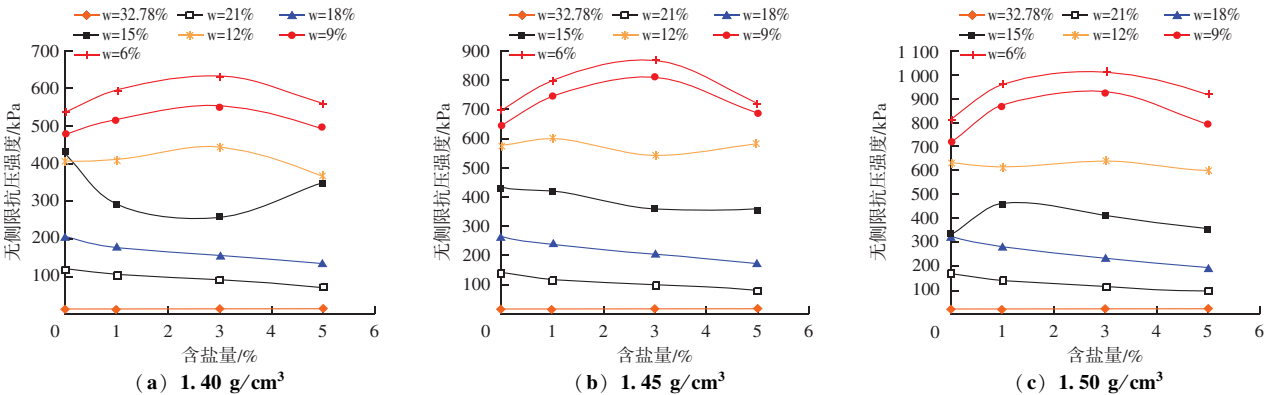


图 2 不同干密度下, 土体强度与 NaCl 含量的关系

Fig. 2 Relationship between soil strength and NaCl content at different dry densities

3 氯盐渍土的体变特性

3.1 含水率对氯盐渍土体变特性的影响

由图3可知,盐渍土的体变率大小与试样含水率密切相关,当试样含水率较高时,土体中的盐是以溶质的形式存在,对于试样的体变几乎无影响。当试样含水率较低时,一方面因为失水体积减小,表现为体缩;另一方面盐类结晶又会使试样体积增大,表现为盐胀,对于盐渍土体胀的研究主要集中在低含水率下体缩与盐胀。

对于不同干密度的试样,在没有添加 NaCl 和 NaCl 含量为 1% 时,随着含水率降低试样体积减小量呈现单调增大趋势,1% NaCl 含量试样的体变率的绝对值小于没有添加 NaCl 的。当含盐量为 3% 和 5% 时,随着含水率的降低体变率由开始的正值逐渐变为负值,当含水率降低到 15% 时盐胀作用表现较明显,试样的体缩达到最大值,随着含水率的继续降低,盐胀作用大于体缩作用,5% NaCl 含量试样的体变率由负值逐渐恢复到正值。

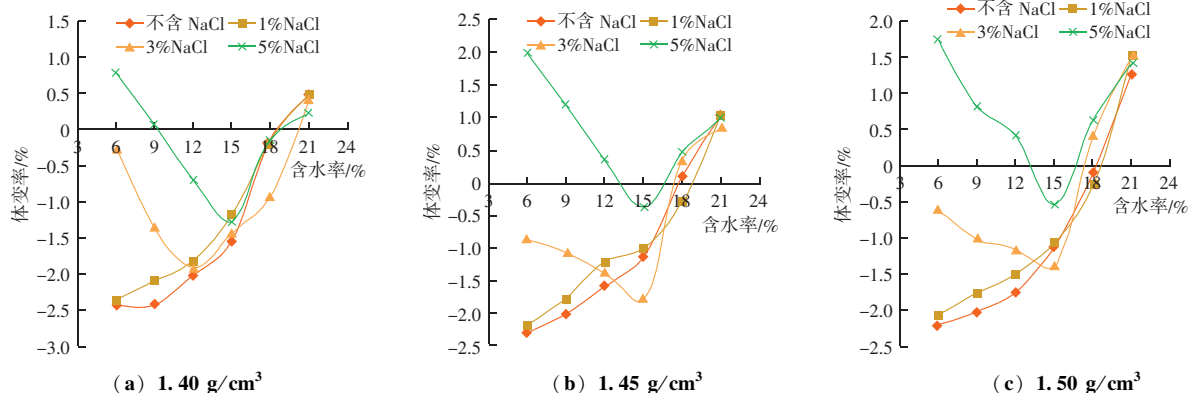


图3 不同干密度下,体变率与含水率的关系

Fig. 3 The relationship between body variation and water content at different dry densities

3.2 NaCl 含量对氯盐渍土体变特性的影响

由图4可知,不同干密度的试样在 21% 含水率时体变率都为正值,且随含盐量变化不明显;当含水率在 18%、15% 和 12% 时,由于试样静置时的回弹变形、失水体缩与盐胀的相互作用,使得体变率

随含盐量的增大总体呈减小趋势;当含水率逐渐减小到 9% 和 6% 时,盐胀处于主导地位,试样体变率随着含盐量的增加平稳地由体缩变为体胀,试样由体缩向体胀转化过程中,含盐量越高、含水率越低这种变化越明显。

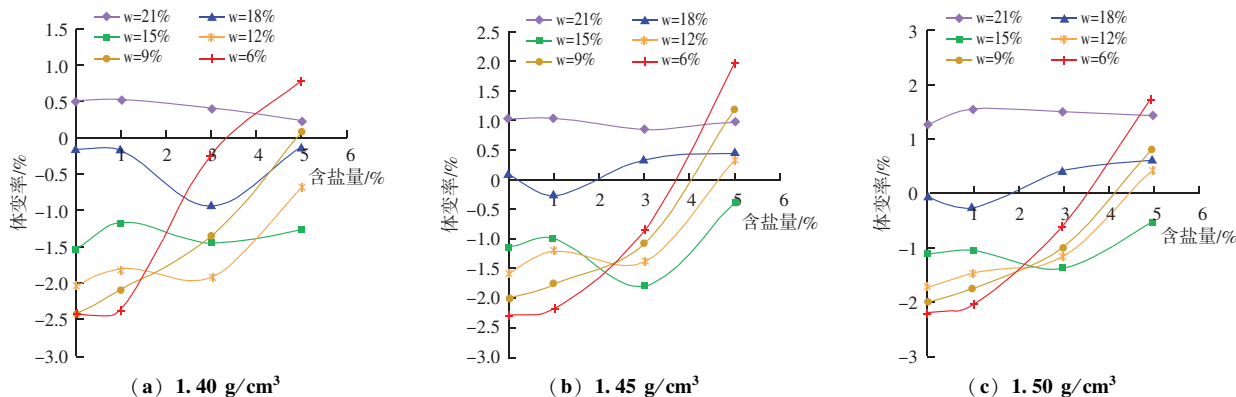


图4 不同干密度下,体变率与含盐量的关系

Fig. 4 Relationship between bulk variation and salt content at different dry densities

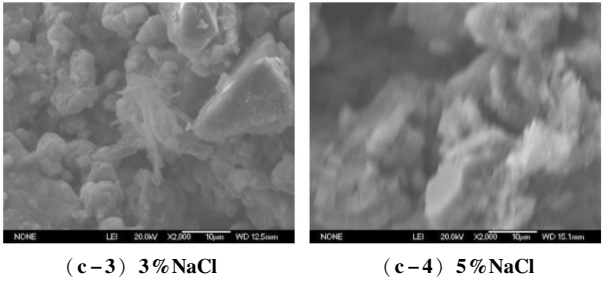
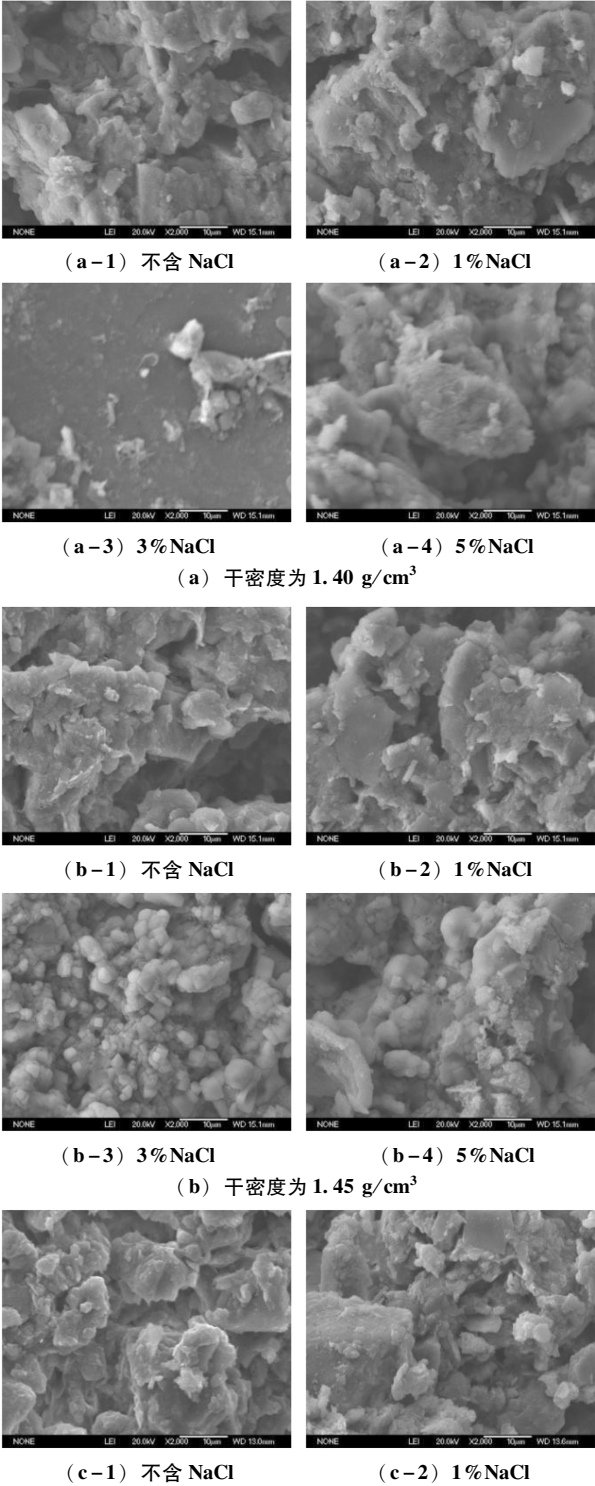
3.3 NaCl 含量对氯盐渍土体微观结构的影响

通过图5的SEM扫描电镜图像对比发现,添加NaCl的土体水分蒸发后会出现NaCl结晶,随着土体中NaCl含量的提高析出的NaCl晶体也越多,一部分

为颗粒状,另一部分为釉状,土体表面的孔隙比没有添加NaCl的土体少。处理扫描电镜图像后,用等效孔径来量化表示土体表面孔隙大小分布情况,结果如图6所示,三种干密度下土中孔隙主要集中在

岩土力学

2 μm 以下,以微小孔隙为主,不同 NaCl 含量对于土的孔隙填充效果不同。土中等效孔径小于 2 μm 时,没有添加 NaCl 的土中孔隙数量最多,1% NaCl 和 5% NaCl 的土中孔隙数量次之,3% NaCl 的土中孔隙数量最小。



(c-3) 3% NaCl (c-4) 5% NaCl (c) 干密度为 1.50 g/cm³

图 5 放大 2 000 倍下土的 SEM 图像
Fig. 5 Zoom in for SEM images of 2 000 x lower soil

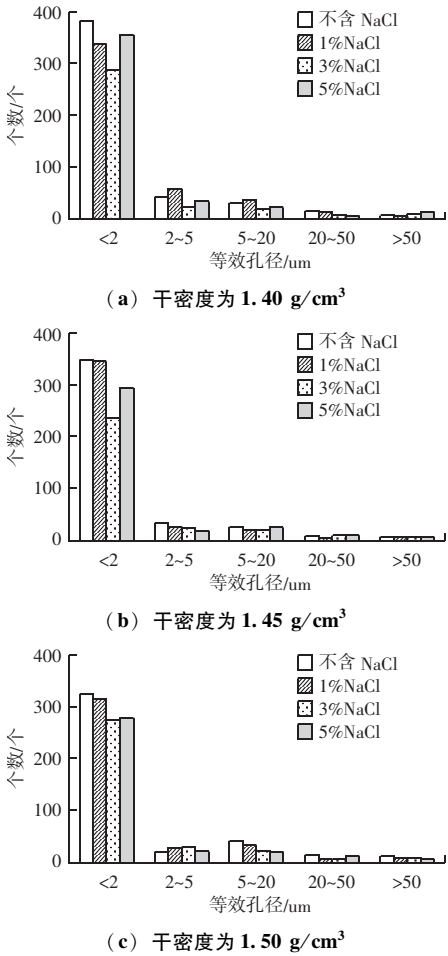


图 6 不同 NaCl 含量下土的孔隙数量
Fig. 6 Pore osity of soil with different NaCl content

从微观角度分析氯盐渍土强度与体变特性发现,土体干密度的增大使得土颗粒之间的空隙减少,水分的蒸发使得土体中溶解的 NaCl 逐步析出为 NaCl 结晶,结晶后的 NaCl 有的呈颗粒状填充于土颗粒间的空隙,有的呈釉状包裹或连接土颗粒,就使得不同 NaCl 含量的土体强度与体变表现出差异性。1% NaCl 的土中 NaCl 晶体能填充土颗粒间的部分空隙,减少

体缩, 增强土颗粒之间的连接; 5% NaCl 的土中过多的结晶物会对土体产生盐胀破坏, 削弱土颗粒之间的连接, 引发土体膨胀; 3% NaCl 土体中的结晶物能较好填充土颗粒间的空隙而又不引起盐胀破坏。

4 结论

通过对西安地区的黄土加入 NaCl 的方法配制盐渍土, 研究土体在不同含盐量、含水率下的强度变化规律和体变特性, 得到了以下结论:

(1) 试验中无论氯盐渍土的干密度、盐含量为何值, 土体强度总体随含水率的降低而升高。12% 含水率作为氯盐渍土强度变化的临界点, 在大于 12% 的含水率时, 土体的强度随含盐量的增大而降低; 当试验含水率小于 12% 时, 表现为氯盐渍土的强度高于不含氯盐的土体强度。

(2) 含水率小于 12% 的情况下, 氯盐渍土强度在 3% NaCl 含量下最高、1% NaCl 次之、5% NaCl 最小, 氯盐的加入在低含水率下虽然有助于增强土体强度, 但是过高的盐含量会破坏土体结构, 降低土体强度。

(3) 氯盐渍土的体变由制样时的压缩弹性变形、失水时的体缩和盐胀三部分组成, 在不含 NaCl、1% NaCl 和 3% NaCl 含量时, 土体一直处于体缩状态, 且随着含水率的降低体缩速率有所减缓; 在 5% NaCl 含量下, 随着含水率减小, 土体由体胀向体缩变化, 含水率在 15% 时体缩量达到最大, 随着含水率继续减小, 土体由体缩发展至体胀。

(4) 土的 SEM 扫描电镜图显示, NaCl 结晶体呈颗粒状填充于土颗粒之间的空隙或糊状将土颗粒包裹, 土颗粒间的空隙主要集中在 $2\ \mu\text{m}$ 以下, 不含 NaCl 的土中孔隙数量最多, 3% NaCl 的土中孔隙数量最小。

(5) 3% NaCl 含量的土体在含水率小于 12% 时, 土体结构基本没有破坏, 结晶盐能加强土颗粒之间的连接、增强土体强度。

参 考 文 献

- [1] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策 [J]. 山东农业科学, 2015, 47 (4): 125–130.
- [2] 冯金凤, 李晓民, 赵静卓, 等. 折光率仪快速测定盐渍土总盐含量的方法研究 [J]. 中国建材科技, 2024, 33 (2): 41–45.
- [3] 张卫兵, 雷过, 周瑞璞, 等. 冻融作用下固化盐渍土的强度劣化及微观机理研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (20): 8869–8876.
- [4] 侯娟, 楚辰玺, 孙银玉, 等. 法向循环荷载下格栅加筋盐渍土剪切性能研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (增刊1): 3832–3841.
- [5] 吕擎峰, 周刚, 王生新, 等. 固化盐渍土核磁共振微观特征 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (1): 245–249.
- [6] 唐雄宇, 张吾渝, 何蓓, 等. 不同初始条件下察尔汗地区盐渍土强度试验研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (1): 48–55.
- [7] 丁士君, 李绍民, 孔森, 等. 淡水诱因干湿循环下超氯盐渍土强度演变 [J]. 工程地质学报, 2024, 32 (3): 785–799.
- [8] 赵辉伟, 邵慧. 基于超声波速的冻融盐渍土强度预测模型构建 [J]. 冰川冻土, 2024, 46 (2): 612–624.
- [9] 曹亚鹏, 文桃, 米海珍, 等. 硫酸盐渍土含水率单次递减条件下的盐胀特性 [J]. 岩土力学, 2018, 39 (3): 881–888.
- [10] 周志雄, 周凤玺, 张明礼, 等. 降雨作用下硫酸盐渍土水–热–盐迁移及变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (8): 2056–2068.
- [11] 王旭超, 张莎莎, 赵凯旋. 细粒土含量对粗粒硫酸盐渍土路基填料盐胀特性的影响试验及分析模型 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (8): 2191–2202.
- [12] 侯兆领. 压实度及含水率对盐渍土冻胀规律影响试验研究 [J]. 公路, 2023, 68 (3): 316–320.
- [13] 黄佑芬, 吴道勇, 吴诗雨. 冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究 [J]. 冰川冻土, 2022, 44 (2): 602–611.
- [14] 廖昕, 范茂基, 陈治良, 等. 冻融循环下罗布泊盐渍土的累积变形特性研究 [J]. 工程地质学报, 2024, 32 (3): 800–810.
- [15] 色麦尔江·麦麦提玉苏普, 陶士超, 阿里木. 冻融作用下氯盐渍土变形与强度特性试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (17): 267–272.
- [16] 刘凯, 张远芳, 张运海, 等. 冻融循环条件下亚氯盐渍土盐冻胀试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (5): 93–96.