

渗流溶蚀作用下盐渍土变形特性与微观结构

曾涛^{1,2,3}, 刘亮^{1,2,3}, 丁金华^{1,2,3}, 官淼淼^{1,2,3}, 沈静东^{1,2,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 水工岩土与结构工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 堤坝工程安全及灾害防治兵团重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830004)

摘要: 为探究溶蚀作用下盐渍土压缩变形特性, 以新疆某地区亚硫酸盐渍土为研究对象, 采用室内渗流溶蚀试验和压缩试验, 并结合微观形貌分析了溶蚀作用对亚硫酸盐渍土压缩特性的影响, 揭示了渗流溶蚀作用下盐渍土的变形劣化机理。结果表明: 溶蚀作用下, 试样表面孔隙度随含盐量增大而增大, 浸出液电导率随溶蚀时间先快速减小后逐渐趋于稳定; 溶蚀作用显著增大了试样的压缩系数, 且压缩系数随含盐量的增大而线性增大; 溶蚀作用下, 团聚体解体, 片状大颗粒转化为中小颗粒, 形态趋于圆形, 架空孔隙和镶嵌孔隙转变为晶体溶孔, 从而导致更显著的宏观变形。

关键词: 盐渍土; 渗流溶蚀; 压缩特性; 变形特性; 微观结构

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)06-0061-07

Deformation characteristics and microstructure of saline soil under seepage dissolution effects//ZENG Tao^{1,2,3}, LIU Liang^{1,2,3}, DING Jinhua^{1,2,3}, GONG Miaomiao^{1,2,3}, SHEN Jingdong^{1,2,3} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Research Center of Hydraulic Geotechnical and Structural Engineering Technology, Urumqi 830052, China; 3. Key Laboratory of Dam Engineering Safety and Disaster Prevention Corps, Urumqi 830004, China)

Abstract: To investigate the compressive deformation characteristics of saline soil under dissolution, taking sulfite saline soil from a certain area in Xinjiang as the research object, using laboratory seepage dissolution tests, compression tests, and micro-morphological analysis, the influence of dissolution on the compressive properties of sulfite saline soil was analyzed, and the deformation degradation mechanism of saline soil under seepage dissolution effects was revealed. The results show that under dissolution, the surface porosity of the specimen increases with the salt content, and the electrical conductivity of the leachate decreases rapidly initially and then gradually stabilizes with dissolution time. Dissolution significantly increases the compression coefficient of the specimen, which increases linearly with the salt content. Under dissolution, aggregates disintegrate, large flaky particles are transformed into medium and small particles with rounded shapes, and inter-particle pores and interlocked pores are converted into crystalline dissolution pores, thereby leading to more significant macroscopic deformation.

Key words: saline soil; seepage dissolution; compression characteristics; deformation characteristics; microstructure

随着经济建设的快速发展,新疆基础设施建设中盐渍土问题日益突出。根据《盐渍土地区公路设计与施工指南》,中盐渍土(含盐量1.5%~2%)禁止用于二级及以上公路路基,仅在水文地质条件良好时用于三、四级公路。尽管压实后的盐渍土初期性能良好,但在长期渗流作用下,可溶盐逐渐溶解,导致土体结构破坏、孔隙增大、强度下降及溶陷性增强^[1-3],进而引发地基沉降与边坡失稳等工程隐患^[4],严重时可能造成安全事故。因此,深入研究长期渗流下盐渍土的变形特性对保障工程安全具有

重要意义。

盐渍土作为一种特殊的土体,其变形特性受含水率^[5]、含盐量^[6-7]以及含盐性质^[8-10]的影响较大。在含盐量相对较低的情况下,易溶盐与土颗粒表面紧密结合,起到胶结作用^[11]。然而,当土体遇水后结晶盐逐渐溶解,胶结作用减弱甚至消失,在土体自重和附加荷载作用下易产生较大变形^[12]。同时,易溶盐会改变土颗粒周围液体的浓度,影响土颗粒表面薄膜水的厚度,从而改变土颗粒之间的胶结状态,最终影响盐渍土的溶陷性^[13-15]。随着浸水时间的

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A200)
作者简介:曾涛(1999—),男,硕士研究生,主要从事岩土工程研究。E-mail:320222272@xjau.edu.cn
通信作者:刘亮(1978—),男,副教授,主要从事岩土工程研究。E-mail:43381560@qq.com

延长而形成渗流时,土体会产生更大的变形。Rahil等^[16]利用自制的大尺寸淋溶模型系统地评估了3种石膏质土在淋滤下的性能变化,同时通过测量淋出液的溶解固体总量等来观察盐的溶解。Fattah等^[17]针对高石膏质量分数砂土进行淋溶湿陷研究,结果发现,淋滤会增大土壤的湿陷性,且湿陷性随石膏质量分数的增大而升高。

土的宏观力学性质与其微观结构有密切关系,目前主要利用扫描电镜(SEM)^[18-19]、压汞试验^[20-21]等技术探究盐渍土在不同条件下的微观结构变化^[22]。通过对土颗粒排列方式、颗粒团聚化程度、孔隙结构、孔隙大小、分形维数等微观参数的分析^[23],可以建立土体宏观力学性质与微观结构特征之间的联系。目前国内外学者针对盐渍土变形特性的宏观、微观研究已取得较多成果,但大多数研究针对试样浸水作用下的溶陷变形,而针对渗流作用下盐分溶解而试样保持无扰动状态的压缩变形特性研究较少。

本文以新疆某地区盐渍土为研究对象,开展5种不同含盐量盐渍土的渗流溶蚀和压缩试验,从宏观角度研究溶蚀作用对盐渍土变形特性的影响规律,并利用SEM从微观角度揭示其工程特性变化机制,以期作为盐渍土工程的设计、施工及安全运行提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用土样取自新疆博乐市雅孜木图自然沟内,该地区属冲积平原,地表植被稀疏,土样为黄褐色。土样的级配曲线如图1所示,其中不均匀系数与曲率系数分别为16.8、2.8,级配良好。土体物理性质指标如下:初始含水率为12.7%,最大干密度为1.86 g/cm³,相对密度为2.70,液限为27.8%,塑限为19.5%,塑性指数为8.3,不均匀系数为16.87,曲率系数为2.81。土的易溶盐离子质量分数之和为10.796%,其中Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺质量分数分别为2.105%、0.177%、4.842%、0.250%、0.045%,而K⁺和Na⁺质量分数之和为3.377%。

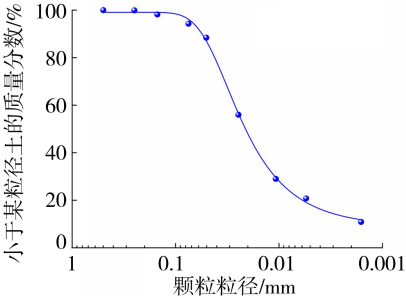


图1 颗粒级配曲线

依据GB/T 50145—2019《土的工程分类标准》,试验用土可定名为低液限黏土。试样Cl⁻浓度与SO₄²⁻浓度的2倍之比为0.59,介于0.3~1之间,依据GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》可判定为亚硫酸盐渍土。

1.2 渗流溶蚀试验

1.2.1 试样制备

试验所用盐渍土样均为重塑样,在天然含盐量1%基础上外掺一定质量分数的无水硫酸钠,制备成含盐量2%、3%、5%、7%的土样。采用轻型击实试验测定不同含盐量盐渍土的压实特性,试验结果见表1。

表1 不同含盐量盐渍土的试验结果

含盐量/%	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)
1	12.7	1.86
2	13.1	1.84
3	14.0	1.83
5	15.3	1.79
7	16.6	1.75

以相应的最优含水率作为试样的初始含水率,按预设含盐梯度配制土样,拌匀后密封静置12 h,使无水硫酸钠充分吸水膨胀。控制初始干密度为最大干密度的95%,通过静压法制备直径为61.8 mm、高度为20 mm的试样。

1.2.2 试验装置

利用自主研发的渗流装置(图2)进行渗流溶蚀试验。该装置由进水隔板、出水隔板、滤孔板等组成,试验时将环刀试样置于装置内,进水隔板上的进水管连接到储水装置,通过控制进水阀门来维持适当的水流,以提供淋溶条件,借助渗流条件来实现土体内部盐分的去除。

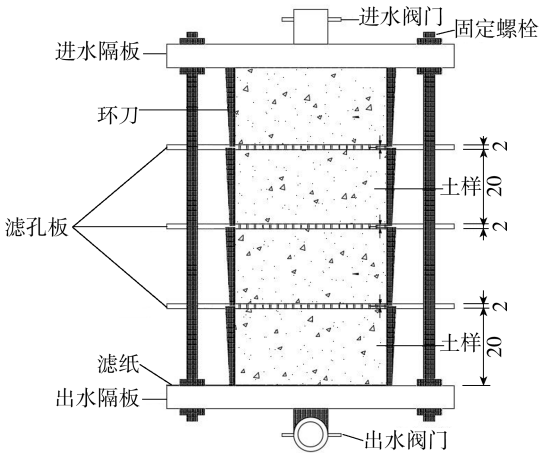


图2 溶蚀装置示意图(单位:mm)

1.3 压缩试验

采用WG-3A单杠杆固结仪,对不同含盐量试样进行溶蚀前后的压缩试验,逐级加压等级为25、50、

100、200、400、800 kPa, 每级压力稳定标准为连续 2 h 变形率不大于 0.01 mm/h。

1.4 SEM 试验

采用 SUPRA-55 场发式型电子扫描显微镜对溶蚀前后的试样进行微观形貌观测。在试验过程中, 将样品在 50℃ 下烘至恒重后获取样本的新鲜横截面, 制作成 10 mm×10 mm×20 mm 的长方体切片。使用离子溅射仪对切片进行镀金处理, 镀金完成后将处理过的样本置于电子扫描显微镜中进行微观观测。在微观结构分析时选取放大倍数为 1 000 倍的图像, 取其中成像清晰的图像进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 溶蚀作用对外观形貌的影响

图 3 为溶蚀前后含盐量为 1%、3%、5% 和 7% 的试样表面变化(选取环刀样的上表面作为溶蚀试验分析表面)。溶蚀后, 随着含盐量的增大, 试样表面孔隙与裂纹的数量和大小显著增大。当含盐量为 1% 时, 试样表面仅出现少量不均匀的溶孔, 未观察到明显裂纹, 表明在低含盐量条件下渗流溶蚀作用相对有限, 此时盐分的溶解和迁移作用较弱; 随着含盐量的增大, 试样表面新形成的溶孔数量显著增多, 且孔隙也有明显的扩展趋势, 同时部分区域开始出现裂纹, 表明溶蚀作用随含盐量的增大而加剧; 当含盐量达 7% 时, 试样的外观形貌变化尤为显著, 溶蚀前由于试样内部未溶解的结晶盐体积膨胀, 对土体骨架产生挤压, 造成试样表面存在少许裂纹和孔隙, 溶蚀后不仅原有的裂纹和孔隙扩大了, 还形成了新的溶孔和裂纹。这种现象表明, 较大的含盐量显著提高了试样表面的溶蚀程度, 导致孔隙与裂纹数量显著增加。

2.2 浸出液电导率随溶蚀时间的变化

通过测定不同溶蚀时间下浸出液的电导率, 得

到浸出液电导率与溶蚀时间的关系, 如表 2 所示。由表 2 可知, 浸出液电导率随溶蚀时间先快速减小后逐渐趋于稳定。溶蚀初期前 8h 浸出液电导率变化最明显, 含盐量为 1%、2%、3%、5%、7% 的试样溶蚀 8 h 后电导率相比溶蚀 2 h 后下降幅度分别为 60.9%、61.3%、59.7%、53.4%、50.9%。原因是, 溶蚀初期土样孔隙水与渗流液之间存在较大的浓度梯度, 加速了土样中盐分的溶解, 随着盐分的溶解, 土样中的渗流孔隙通道逐渐畅通, 水分流动路径较短, 因此盐分更易被溶解淋出。随着溶蚀的进行, 浓度梯度逐渐减小, 细小颗粒迁移而堵塞孔隙通道, 使水分流动路径变长, 溶蚀效率降低, 电导率下降速率也逐渐减缓; 随着含盐量的增大, 电导率趋于稳定所需时间也逐步延长, 这是因为在含盐量较大时土壤颗粒团聚严重, 改变了土壤结构, 影响水分流动路径, 使某些区域的溶蚀过程变慢, 进而延长整体达到稳定的时间。

表 2 浸出液电导率与溶蚀时间的关系

溶蚀时间/h	不同含盐量下的电导率/(mS/cm)				
	1%	2%	3%	5%	7%
2	44.20	73.40	76.20	79.20	81.00
4	28.50	51.10	51.70	54.90	64.70
8	17.25	28.40	30.70	36.90	39.70
12	12.42	15.56	22.30	28.90	32.40
20	4.83	6.96	13.30	22.30	26.10
28	2.27	4.93	7.21	18.97	24.20
36	2.29	3.52	5.41	14.35	19.25
48	1.54	3.41	3.56	11.37	18.00
60	1.23	2.15	2.82	7.65	17.29
72	0.95	1.87	2.04	4.90	11.83
96	0.88	1.23	1.13	2.64	2.77
120	0.67	0.98	0.84	1.51	2.35
144		0.67	0.65	0.98	1.63
168				0.64	0.88
192					0.68

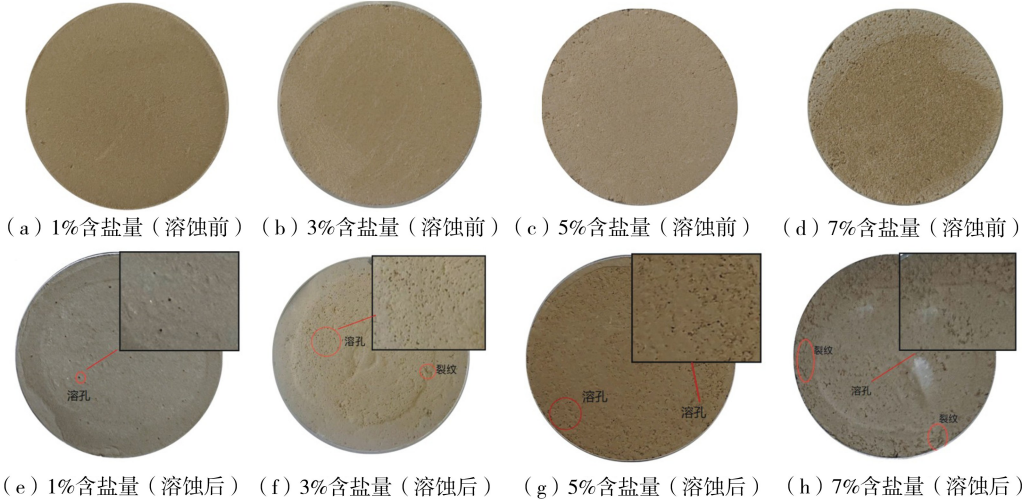


图 3 溶蚀前后试样表面变化

2.3 溶蚀作用对压缩特性的影响

2.3.1 溶蚀前后压缩变形特性

图 4(a)为不同含盐量试样溶蚀前后的压缩变形曲线。由图 4(a)可知:①不同含盐量试样在溶蚀前后的压缩变形曲线均呈相似的规律,即变形量随着垂直压力的增大而增大。但二者变化幅度存在明显差异:溶蚀前,垂直压力较小时压缩变形曲线上升较慢,随着压力的增大,变形曲线上升趋势加快;溶蚀后,压缩曲线斜率整体增大,表明土体对压力的敏感性增加,且在低压力下变形量增幅尤为明显,说明溶蚀后土体结构在较低压力下即开始发生显著变形。②当垂直压力为 800 kPa 时,溶蚀前,含盐量为 1%的试样稳定时的变形量为 0.66 mm,含盐量为 7%时变形量增至 1.05 mm,增幅为 59.1%,这表明低含盐量的土样抵抗上覆荷载变形的能力较强;溶蚀后,当含盐量由 1%增至 7%时,变形量由 1.04 mm 增至 2.50 mm,增幅达 140.3%,表明水动力作用下土体结构破坏严重,抗变形能力大幅降低,且含盐量越大影响越大。

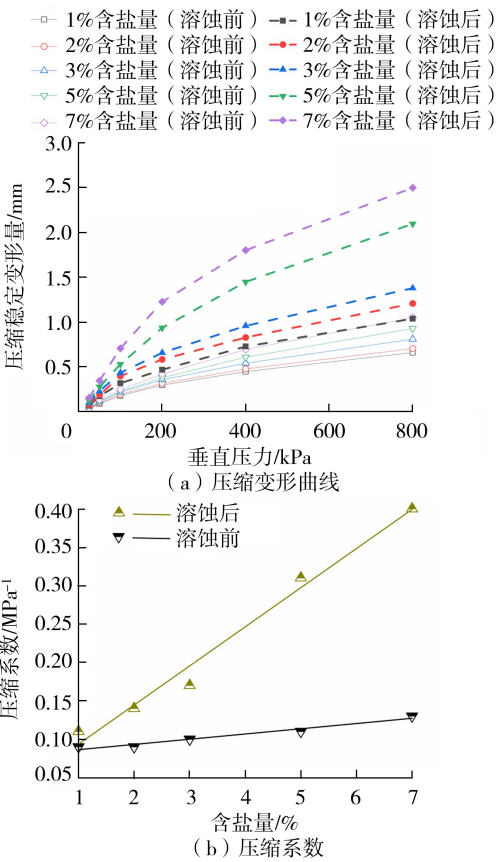


图 4 溶蚀前后试样的压缩变形曲线及压缩系数

选取 100~200 kPa 垂直压力区间内的压缩系数作为评估压缩性的依据,图 4(b)为溶蚀前后不同含盐量试样的压缩系数,可知溶蚀前后试样的压缩系数变化规律一致,均随着含盐量增大而线性增大,溶蚀后试样的压缩系数大于溶蚀前;溶蚀前,当含盐量

小于 3%时,试样的压缩系数均小于 0.1 MPa^{-1} ,表现为低压缩性土,当含盐量大于 3%时表现为中压缩性土;溶蚀后,当含盐量为 1%时,试样的压缩系数已大于 0.1 MPa^{-1} ,表现为中压缩性土;当含盐量由 1%增加到 7%时,溶蚀前后压缩系数的增幅分别为 44.4%和 263.6%。综上可知,溶蚀作用对盐渍土的压缩性具有很大影响,在设计和施工时应充分考虑渗流溶蚀的影响。

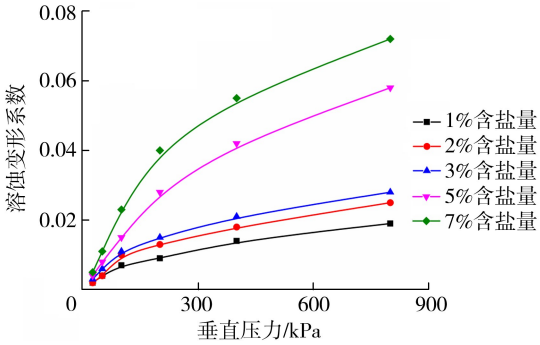


图 5 溶蚀变形系数随垂直压力的变化曲线

2.3.2 渗流作用下的溶蚀变形特性

为了更加直观地评估盐渍土在渗流溶蚀条件下的变形特性,采用溶蚀变形系数来评价不同含盐量试样溶蚀作用下的变形特性:

$$\delta = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \tag{1}$$

式中: δ 为溶蚀变形系数; h_p 为溶蚀前试样在各级压力下达达到稳定时的高度; h'_p 为溶蚀后试样在各级压力下达达到稳定时的高度; h_0 为试样的初始高度。

图 5 为不同含盐量试样溶蚀变形系数随垂直压力的变化曲线,大多呈双曲线变化趋势。随着含盐量的增大,土体的渗流溶蚀变形系数相应增大,且增幅不断增大(当含盐量小于或等于 3%时,增幅较小;当含盐量大于 3%时,增幅较大)。这是因为含盐量较小时,结晶盐溶解引起的变形不明显,而当含盐量大于 3%后,试样中的结晶盐数量显著增多,溶蚀后产生的变形较为显著。

根据图 5,拟合得到计算溶蚀变形系数的通式:

$$\delta = \frac{aP}{b + P} \tag{2}$$

其中

$$a = \lim_{P \rightarrow +\infty} \delta$$

式中: a 为试样在特定含盐量下垂直压力趋于无穷大时的溶蚀变形系数; b 为曲线形态参数; P 为垂直压力。

5 种含盐量下 δ - P 拟合公式参数如表 3 所示。由表 3 可知,不同含盐量试样的 b 值差异较小,因此将 b 设为常数 322.4。进一步分析 a 值发现, a 随含盐量的增大而增大,两者间的关系可表示为

$$a = m_1 S + m_2 \quad (3)$$

式中: S 为含盐量; m_1 、 m_2 为拟合参数。

表 3 5 种含盐量下的 δ - P 拟合公式参数

含盐量/%	a	b	相关系数
1	0.026 14	325.78	0.988
2	0.034 04	313.95	0.985
3	0.038 95	309.98	0.976
5	0.076 96	320.95	0.985
7	0.102 78	341.32	0.996

令 $m_1 = 0.0134$, $m_2 = 0.00745$ 及 $b = 322.4$, 将数值代入式(2), 可得盐渍土溶蚀变形经验公式:

$$\delta = \frac{(0.00745 + 0.0134S)P}{322.4 + P} \quad (4)$$

为了验证经验公式的预测精度, 将不同含盐量、垂直压力下溶蚀变形系数的试验值与公式计算值进行对比, 结果表明二者整体吻合度高, 仅有少量数据点存在偏离且偏离幅度较小, 表明该经验公式具有较高的预测精度。

2.4 渗流溶蚀作用机制分析

2.4.1 溶蚀前后微观结构

土体的微观结构决定了宏观特性, 为深入了解溶蚀作用对土体变形的影响, 对比分析了溶蚀前后土体的微观结构。以含盐量 1%、3%、7% 的试样为研究对象, 结合微观分析需求, 统一选取 1000 倍放大倍数的 SEM 图像进行分析。结果表明: ①溶蚀前, 含盐量较低时土体以团聚体为主, 结构密实且孔隙不贯通, 因此强度高、压缩性低; 含盐量增大时, 盐晶参与土体骨架构成, 导致颗粒间接触点减少, 大孔隙增多, 结构变得松散, 这使得颗粒在外力下更易滑移, 宏观上表现为压缩性增强和变形量增大。②溶蚀会破坏盐-土胶结结构, 促使团聚体解体, 土体结构由密变疏, 片状大颗粒转化为中小颗粒, 形态趋于圆形; 同时原有孔隙转化为架空的贯通裂隙, 致使孔隙率显著增大。随着含盐量的增大, 溶蚀作用加剧, 颗粒接触方式由面-面接触变为点-点接触, 接触面积减小且表面更光滑, 架空孔隙和镶嵌孔隙转变为晶体溶孔, 最终导致土体在外力作用下更易滑移与

压密, 宏观变形量进一步增大。

2.4.2 溶蚀劣化机制

渗流溶蚀作用下, 胶结体的解体与物质流失是盐渍土压缩特性变化的主要原因。图 6 为试样溶蚀过程示意图(以 7% 含盐量为例)。由图 6 可知, 初始状态下, 土体结构较为密实, 土颗粒通过黏粒胶结及盐土团聚体相互连接, 形成团聚体作为骨架, 部分盐分溶于孔隙水中, 以离子形式存在, 其余大部分盐分以结晶盐形式存在于孔隙中, 从而填充土体孔隙, 形成较稳定的结构。渗流溶蚀引发的试样表面变化与其压缩变形之间存在明确的关联: ①渗流溶蚀作用促使盐渍土孔隙发育, 即初始小孔隙发育为中孔隙, 进而演变为贯通裂隙, 导致土体的压缩性能逐渐降低。②在水动力作用下, 颗粒间胶结作用降低, 盐土团聚体解体, 颗粒间的连接发生不可逆转的破坏, 土颗粒重新排列, 土骨架发生变化, 从而导致受力体系改变, 力学性质也随之变化。③随着渗流溶蚀作用不断进行, 土体内部孔隙盐溶液转变为水溶液, 有效应力降低, 同时由于纯水的润滑作用, 导致颗粒间的摩擦因数降低, 在荷载作用下土体更易发生变形。

3 不同水力条件下的盐渍土变形演化过程

为了解盐渍土在渗流溶蚀作用下的变形机制, 现将其变形过程与干燥状态及浸水饱和状态下的变形进行比较, 如图 7 所示。在干燥状态下(图 7(a)), 试样含水量较低, 盐晶体分布在颗粒表面或填充在颗粒间隙, 并发挥胶结作用, 整体结构相对稳定。在荷载作用下, 土体中水分和空气排出, 颗粒发生重排, 孔隙逐渐被压缩, 该变形过程主要源于物理结构的重组, 不涉及物质状态的变化, 因此整体变形较小。浸水饱和状态下(图 7(b)), 试样压缩变形主要经历两个阶段。阶段 I: 物质状态变化阶段。土体孔隙被水完全填充, 部分可溶盐溶解, 孔隙溶液为盐溶液, 颗粒间的胶结作用减弱, 盐土团聚体解体, 形成更小的团聚体, 土体孔隙增加, 整体结构变得疏松。阶段 II: 结构变化阶段。在荷载作用下,

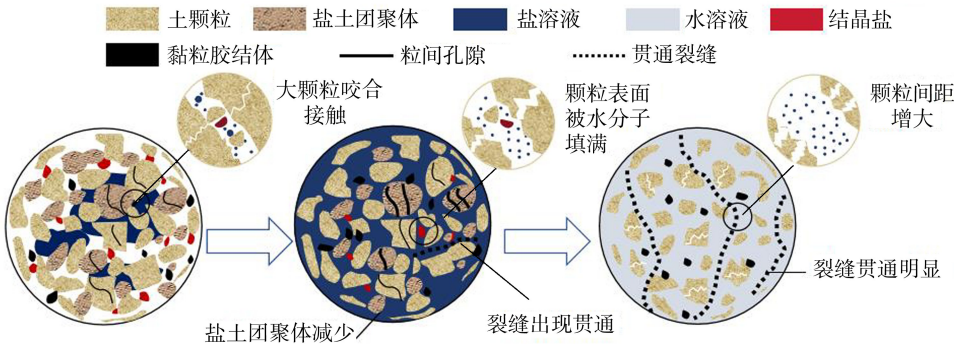


图 6 试样溶蚀过程示意图

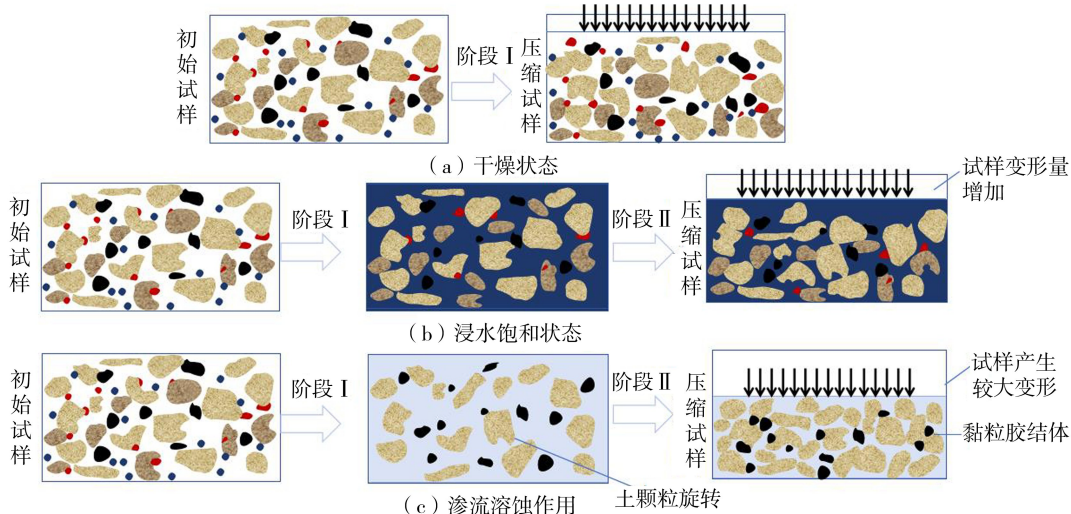


图7 试样变形过程示意图

土颗粒和小团聚体重排,孔隙被压缩,颗粒间摩擦力减小,颗粒更易发生相对滑移和重排,试样变形量增大。渗流溶蚀作用下(图7(c)),试样首先经历阶段Ⅰ:物质流失阶段。水流穿过土体,形成初始渗流通道,盐分快速溶解并被带出土体,土体孔隙增加。盐分溶解导致团聚体解体产生的小颗粒在水动力作用下发生转动和重新分布,进一步影响土颗粒间的胶结,导致整体结构变得更加疏松。在荷载作用下,试样进入阶段Ⅱ:结构变化阶段。土颗粒与小团聚体发生重排,孔隙被压缩,颗粒间接触面积增大,试样变形量较干燥状态和浸水饱和状态下更大。

4 结 论

a. 渗流溶蚀作用下试样的表面形貌变化与其初始含盐量密切相关。随着含盐量的增大,试样表面的孔隙显著增加;1%含盐量试样仅出现轻微溶蚀痕迹,3%含盐量试样表面出现明显新生溶孔和裂纹,而7%含盐量试样则呈现大量扩张的溶孔和裂纹网络。

b. 浸出液电导率随溶蚀时间先快速减小后逐渐趋于稳定。溶蚀初期前8h变化最为明显,溶蚀8h后5个含盐量试样浸出液电导率相比溶蚀2h后下降幅度为50.9%~60.9%,且试样初始含盐量越大,浸出液电导率趋于稳定所需时间也越长。

c. 渗流溶蚀显著提高了含盐试样的压缩性,溶蚀前中低压缩性的含盐阈值为3%,溶蚀后降至1%。压缩系数随含盐量的增大而线性增大,含盐量从1%上升至7%时压缩系数增幅达263.6%。基于溶蚀变形系数与垂直压力的关系曲线,建立了不同含盐量下溶蚀变形经验公式,经验证该公式具有较高的预测精度。

d. 在溶蚀作用下,团聚体解体,片状大颗粒转化为中小颗粒,形态趋于圆形;颗粒间的接触方式由边-边接触转变为点-点接触,孔隙结构由架空孔隙和镶嵌孔隙转变为晶体溶孔,土体宏观变形量进一步增大。

参考文献:

- [1] 张洪萍,杨晓华. 盐渍土溶陷特性的试验研究与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):95-100. (ZHANG Hongping, YANG Xiaohua. Experimental study and analysis of saline soil's collapsibility [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4):95-100. (in Chinese))
- [2] 张磊,张璐璐,程演,等. 考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1680-1687. (ZHANG Lei, ZHANG Lulu, CHENG Yan, et al. Slope stability under rainfall infiltration considering internal erosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9):1680-1687. (in Chinese))
- [3] 张彧,罗阳,徐安花,等. 含水量与抗剪强度关系影响下高盐量盐渍土路基边坡稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2020,40(3):22-32. (ZHANG Yu, LUO Yang, XU Anhua, et al. Stability of high salinity saline soil subgrade slope under influence of water content and shear strength [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(3):22-32. (in Chinese))
- [4] 胡江,马福恒,李子阳,等. 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性研究综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):87-94. (HU Jiang, MA Fuheng, LI Ziyang, et al. Review of spatial variability of mechanical properties of concrete dams impacted by leakage dissolution [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4):87-94. (in Chinese))

- [5] 王珺,常立君. 温度和含水率影响下盐渍土力学特性试验研究[J]. 青海大学学报, 2023, 41 (3): 80-87. (WANG Jun, CHANG Lijun. Experimental study on the mechanical properties of saline soil under the influence of temperature and water content [J]. Journal of Qinghai University, 2023, 41 (3): 80-87. (in Chinese))
- [6] 牛丽思,张爱军,王毓国,等. NaCl 含量对伊犁原状黄土湿陷和溶陷特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (增刊 2): 67-71. (NIU Lisi, ZHANG Aijun, WANG Yuguo, et al. Effects of NaCl content on water collapsibility and salt collapsibility of undisturbed Yili loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (Sup2): 67-71. (in Chinese))
- [7] ZHANG Shasha, YANG Xiaohua, XIE Shanjie, et al. Experimental study on improving the engineering properties of coarse grain sulphate saline soils with inorganic materials [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102909.
- [8] 蒋坪临,张建新,王楚楚,等. 循环振动荷载下氯盐渍土的溶陷特性[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018, 35 (1): 62-69. (JIANG Penglin, ZHANG Jianxin, WANG Chuchu, et al. Collapsibility of chlorine saline soil under cyclic vibration load [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2018, 35 (1): 62-69. (in Chinese))
- [9] 宋通海. 氯盐渍土溶陷特性试验研究[J]. 公路, 2007 (12): 191-194. (SONG Tonghai. Test and research on collapsibility of chlorine saline soil [J]. Highway, 2007 (12): 191-194. (in Chinese))
- [10] 杨晓华,张志萍,张莎莎. 高速公路盐渍土地基溶陷特性离心模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30 (2): 5-9. (YANG Xiaohua, ZHANG Zhiping, ZHANG Shasha. Centrifugalize model test on dissolve collapse of saline soil under expressway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30 (2): 5-9. (in Chinese))
- [11] 高树森,师永坤. 碎石类土盐渍化评价初探[J]. 岩土工程学报, 1996, 18 (3): 96-99. (GAO Shusen, SHI Yongkun. Evaluation of salinization of gravelly soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (3): 96-99. (in Chinese))
- [12] MA Deliang, FENG Huaiping, YUAN Yaxian, et al. Dissolution load-settlement behaviour of saline soil and compression criterion for the natural foundation of high-speed railways [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81 (9): 366.
- [13] 张爱军,王毓国,邢义川,等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (6): 1040-1049. (ZHANG Aijun, WANG Yuguo, XING Yichuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (6): 1040-1049. (in Chinese))
- [14] 颜荣涛,赵续月,于明波,等. 盐溶液饱和黏土的等向压缩特性[J]. 岩土力学, 2018, 39 (1): 129-138. (YAN Rongtao, ZHAO Xuyue, YU Mingbo, et al. Isotropic compression characteristics of clayey soil saturated by salty solution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (1): 129-138. (in Chinese))
- [15] GARAKANI A A, HAERI S M, CHERATI D Y, et al. Effect of road salts on the hydro-mechanical behavior of unsaturated collapsible soils [J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17: 77-90.
- [16] RAHIL W M, RAHIL F H, AL-NEAMI M A. Characteristics of artificial, gypsified and natural gypseous soils under leaching condition [J]. Engineering and Technology Journal, 2019, 37 (8): 313-325.
- [17] FATTAH M Y, OBEADB I H, OMRAN H A. A study on leaching of collapsible gypseous soils [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16 (1): 44-54.
- [18] 高英,马艳霞,张吾渝,等. 西宁地区黄土增湿变形特性及微观结构分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27 (4): 803-810. (GAO Ying, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. Analysis of humidifying deformation characteristics and microstructure of loess in Xining Area [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27 (4): 803-810. (in Chinese))
- [19] 色麦尔江·麦麦提玉苏普,陶士超. 改良盐渍土强度变形及其微观特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39 (6): 113-119. (SEMERJAN M, TAO Shichao. Experimental study on strength deformation and micro-characteristics of improved chloride saline soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39 (6): 113-119. (in Chinese))
- [20] CHEN Qimin, GHIMIRE B, SU Libin, et al. Micro-scale investigations on the mechanical properties of expansive soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 219: 104128.
- [21] SUN Xun, SONG Shengyuan, NIU Cencen, et al. Evolution characteristics of microscopic pore structure of saline soil profile in Qian'an country, Northeastern China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82 (5): 191.
- [22] NIE Yongpeng, NI Wankui, TUO Wenxin, et al. Collapsibility deterioration mechanism and evaluation of compacted loess with sodium sulfate under drying-wetting cycles [J]. Natural Hazards, 2023, 115 (1): 971-991.
- [23] 王绅皓,谢婉丽,常一伦,等. 浸水作用下湿陷性黄土微观结构及分形特征研究[J]. 高校地质学报, 2023, 29 (2): 280-288. (WANG Shenhao, XIE Wanli, CHANG Yilun, et al. Microstructures and fractal characteristics of collapsible loess subjected to water immersion [J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29 (2): 280-288. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 11 - 05 编辑: 骆超)