

DOI: 10.11779/CJGE20231014

微生物加固渠基粉土的冻融特性及微细观机理研究

朱 锐^{1,2,3,4}, 邢 玮¹, 郭万里⁴, 黄英豪⁴, 周 峰¹, 王旭东¹

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 陆军工程大学土木工程博士后科研流动站, 江苏 南京 210007; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 4. 南京水利科学研究院水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 渠基土性能冻融劣化是中国季冻区渠道结构损坏的主要原因, 渠基土加固是保障供水渠道安全运行的重要手段。结合微生物岩土加固技术, 开展微生物加固渠基粉土系列宏微观室内试验, 刻画不同胶结液浓度、养护龄期、冻融循环下加固渠基粉土的体变率、渗透系数、孔隙率等宏微观指标的发展规律及其定量联系。结果表明: 在不同胶结液浓度、养护龄期下, 微生物加固可使得渠基粉土的冻融体变量削减约 70%, 渗透系数至少降低一个数量级、抗压强度提升约 220.17%, 抗剪强度指标最高增长约 65.50%; 当胶结液浓度为 1.00 mol/L, 养护龄期为 28 d 时, 冻融循环下渠基粉土的微生物加固效果最优。此外, 微生物诱导生成的碳酸钙沉淀通过填充、胶结、包裹等系列方式重塑了渠基粉土的微细观结构, 使其在冻融风化作用下仍然保持整体性和完整性, 这是微生物加固渠基粉土在冻融环境下仍然展现出良好工程特性的主要原因。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 粉土; 渠道边坡; 冻融循环; 微观结构

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)02-0376-12

作者简介: 朱 锐(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事桩土相互作用、特殊土边坡安全与防护方面研究工作。E-mail: zhurui@njtech.edu.cn。

Freeze-thaw performance and micro-mechanism of canal foundation silt treated by MICP

ZHU Rui^{1,2,3,4}, XING Wei¹, GUO Wanli⁴, HUANG Yinghao⁴, ZHOU Feng¹, WANG Xudong¹

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Postdoctoral Station of Civil Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Key Laboratory of Dam Reservoir Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The freeze-thaw deterioration characteristics of foundation soil are the main cause for damages of canal slopes in seasonally frozen areas. The soil treatment is an important means to ensure the safe operation of canals. Based on the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique, a series of laboratory tests on treated silt with different concentrations, curing ages and freeze-thaw cycles are conducted. The macro-and micro-indices of treated silt, such as volumetric rate, permeability coefficient and porosity, are described, and their quantitative relationships are established. The results show that under different concentrations and curing ages, the treatment can reduce the freeze-thaw deformation by 70%, decrease the permeability coefficient by at least one order of magnitude, increase the compressive strength by 220.17%, and improve the shear strength index by 65.50%. As the concentration is 1.00 mol/L and the curing age is 28 days, the treatment effects of silt under freeze-thaw cycles are the most significant. In addition, the calcium carbonate precipitation induced by the MICP reshapes the microstructure of silt through a series of processes such as filling, cementation and encapsulation, which ensures the integrity of silt subjected to freeze-thaw cycles. It is also the main reason for the good engineering properties of treated silt in freeze-thaw environments.

Key words: MICP; silt; canal slope; freeze-thaw; micro-structure

0 引 言

渠基土性能冻融劣化是中国季冻区渠坡结构损坏的主要原因。季节性冻土地区冬夏两季气温差异悬殊,

基金项目: 新疆自治区中央引导地方科技项目 (ZYYD2024CG20); 国家自然科学基金项目 (52408372); 中国博士后科学基金面上项目 (2023M744276); 江苏省自然科学基金项目 (BK20220356); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放课题 (IWHR-SKL-F202319); 水利部水库大坝安全重点实验室项目 (YK324009)
收稿日期: 2023-10-15

致使渠基土每年经历反复的冻融作用, 由此造成土体物理力学性能显著退化^[1-2]。例如, 黑龙江引嫩工程等地处季节性冻土地区的输水渠道, 在冻融等劣化因素下均出现了显著的劣化致灾现象^[3]。

渠基土加固是保障季冻区供水渠道安全运行的重要手段^[4]。微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术是近年发展起来的生态友好型加固方法, 所生成的碳酸钙沉淀可有效填充土颗粒间的间隙, 增强土体密实度, 进而强化浅层土体的防渗性能、力学性能等^[5-6]。在此背景下, 大量学者针对微生物加固土的宏微观物理力学特性展开了研究, 成果丰硕^[7-8]。刘璐等^[9]开展了微生物加固堤坝的水槽试验, 测试表明加固体渗透系数则下降了约两个数量级; Gao 等^[10]证明了微生物加固技术用于岩土体防渗处理的有效性。由于实际工程现场环境十分复杂, 部分学者分别又从干湿和冻融两个角度探索了复杂环境下微生物加固土的工程特性, Jin 等^[11]探索了冻融循环下微生物加固土的作用机制, 发现循环次数超过一定阈值后, 胶结体表面会出现明显的剥落现象; Ahenkorah 等^[12]发现温湿度变化会诱发试样出现碳酸钙含量减少、强度衰减等现象。总的来讲, 干湿作用会削弱颗粒表面粗糙度与粒间胶结强度, 而冻融作用会造成土体表观损伤特征及内部微结构变化, 宏观上表现为微生物加固土物理力学性能下降。相关科学研究与工程实践佐证了微生物加固在岩土体强化增韧方面的显著成效, 而针对季冻区环境下微生物加固土的工程特性及其随冻融循环的变化规律, 尤其是冻融循环下加固土宏微观特性的定量关联仍需进一步研究, 这对于微生物加固技术在季冻区渠系工程中的应用至关重要。

鉴于此, 本文以北疆某供水渠道为工程背景, 开展微生物加固渠基粉土系列宏微观室内试验, 研究加固渠基粉土的物理力学特性随胶结液浓度、养护龄期的变化过程, 刻画微生物加固渠基粉土宏微观指标的发展规律及其定量关联, 以期揭示微生物加固提升渠基粉土物理力学性能的微细观机理。

1 试验方法与试验过程

1.1 试验材料

(1) 试验土料

试验所用土料取自北疆某供水渠道施工现场 (图 1), 通过系列土的基本特性试验发现该土料属于粉土, 相关基本指标如表 1 所示。同时, 将取自现场的渠基粉土翻晒、碾碎并过 0.50 mm 筛, 以供后续试样制备。

表 1 试验土料的基本参数

Table 1 Fundamental properties of soil materials					
相对质量密度	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/ %	塑限/ %	塑性指数
2.67	1.86	14.2	38.0	19.3	18.7



图 1 试验所用渠基土料

Fig. 1 Soil materials for laboratory tests

(2) 试验胶凝溶液

菌种选用巴氏芽孢杆菌^[13], 结合国内外相关研究以及微生物培育试验, 确定了培养基基本组分, 如表 2 所示。培养基制备完毕后进行高温灭菌处理 (121℃, 20 min), 完成后置于超净工作台冷却至室温; 使用移液枪将低温保存的菌种移接至培养基中, 并置于恒温振荡培养箱内进行菌体活化 (30℃, 180 rpm, 24 h); 活化期间, 测得细菌数量 OD600=0.8~1.2, 测定菌液的脲酶活性为 12~15 mmol/L urea hydrolysed·min⁻¹。

表 2 培养基具体成分与用量

Table 2 Specific ingredients and dosages of culture medium	
成分	用量
蛋白胨	10 g/L
牛肉浸粉	3 g/L
NaCl	5 g/L
去离子水	1000 ml
pH	8.0~9.0 (NaOH 溶液)

注: 细菌培养过程中, 必要时可加入 2% 溶液体积的尿素或 10 mg/L MnSO₄·H₂O 可促进产胞。

胶结液由氯化钙 (CaCl₂) 和尿素 (CO(NH₂)₂) 按相同摩尔量 1:1 制备而成, 主要为细菌生长繁殖提供适宜环境和营养物质^[14], 胶结液浓度分别设为 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 mol/L。胶凝溶液为菌液和胶结液混合而得。具体步骤如下: 将活化后的菌液置于离心机内进行菌体离心处理 (8000 rpm, 10 min), 以去除培养基的杂质和保证充足的菌体量; 将离心处理后的菌体全部洗入空白培养基中, 按照目标浓度称量胶结液并直接溶于掺有菌体的培养基中, 混合而得的胶凝溶液即可供后续试验直接使用。

1.2 试样制备

(1) 单元试样制备

为了控制微生物加固均匀性, 采用拌和法制备试样, 即将渠基粉土与胶凝溶液直接拌合进行制样, 胶凝溶液掺入量即认为是加固试样含水率。具体步骤如下: 参照试样目标含水率 (13.3%) 和压实度 (95%), 分别于烘干土料中掺入纯净水和 MICP 胶凝溶液制备未加固和加固试样, 随即快速、均匀的搅拌土料, 试样尺寸分别为 φ 39.1 mm×80 mm (无侧限抗压强度试验)、φ 61.8 mm×20 mm (直剪试验)、φ 61.8 mm×40

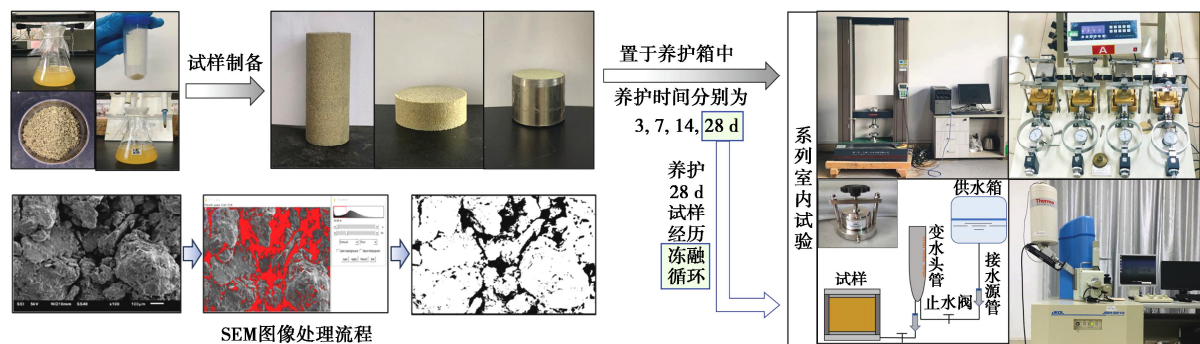


图2 试样制备及试验流程

Fig. 2 Specimen preparation and testing processes

mm（渗透试验）。需要说明的是，拌合土料在搅拌、静置期间，其内部微生物与钙源间就已开始发生化学反应，为了保证同一批试样加固程度的均匀性，需控制试样制备时间在1 h以内。将制备完毕的试样置于恒温恒湿养护室内（温度设定为25℃，相对湿度95%）^[15]，养护龄期设为3，7，14，28 d。每组试样均进行3组平行试验，所得试验数据取其平均值，平行试样误差在5%以内。

（2）冻融循环过程

为探究微生物加固渠基粉土的冻融特性，待加固试样养护至28 d后经历冻融循环过程，课题组已有研究成果^[2]表明，所用土料物理力学特性在3~7次冻融循环后即趋于稳定，故循环次数设定为0，3，7，15次。为防止冻融过程中的水分损失，密封试样后再通过冻融循环箱施加温度场，冻融温度分别设为-20℃和20℃，对应渠道现场冻结期间和融化期间的平均温度，冻融时间均设为24 h。待试样冻融至目标循环次数后，分别开展渗透试验、无侧限抗压强度试验、直剪试验以及微细观试验。试验流程如图2所示。

1.3 试验方法与过程

在冻融循环过程中，试样易出现胀缩变形现象，开展微生物加固渠基粉土的体变量测试。具体步骤如下：以无侧限抗压强度试样为观测样，在每次冻结和融化结束后，采用游标卡尺量测试样高度和直径，得到冻融循环下试样体积变化率，即试样体积相对于初始体积的变化量与初始体积的百分比。

依据土工试验方法标准^[16]，待冻融循环至目标次数后分别开展以下试验：①渗透试验。采用变水头渗透仪测试试样渗透系数，每种工况设置5组平行样，渗透系数取平行试验均值；②无侧限抗压强度试验。采用无侧限压力仪测试试样无侧限抗压强度，控制轴向应变速率为1 mm/min，待轴向应变达10%时停止加载；③直剪试验。采用直剪仪测试试样抗剪强度，设置法向应力分别为100，200，300，400 kPa，剪切速率设为0.8 mm/min，待剪切位移达到6 mm时停止试

验；④微细观试验。采用扫描电镜仪观察试样内部结构形貌，放大倍数为100倍，图像处理流程如图2所示；采用X射线仪分析试样物相组成，控制额定功率和扫描角度分别为3 kw和20°~80°；采用颗粒筛分方法进行试样级配分析。试验方案如表3所示。

表3 试验方案

Table 3 Test scheme

工况	胶结液浓度/(mol·L ⁻¹)	养护龄期/d	冻融循环次数
未加固	—	—	0, 3, 7, 15
加固	0.5, 0.75, 1.0, 1.25	0, 3, 7, 14, 28	0, 3, 7, 15

2 试验结果与分析

2.1 体积变化规律

冻融体变是造成季冻区渠基土损伤的重要原因。图3为未加固与加固试样体积变化率随冻融循环的发展曲线。可以看出，无论胶结液浓度为多少，试样均呈“冻胀融缩”的体积变化特征。随着冻融循环次数的增长，试样体积变化率呈先上升、后下降的趋势，加固试样体积变化率下降趋势于8~10次循环后逐渐趋于稳定，而未加固试样则始终处于衰减过程。无论是冻结过程还是融化过程，相较于未加固试样，加固试样平均体变量仅为未加固试样体变量均值的30%左右，表明微生物加固可使得渠基粉土冻融体变量削减约70%。

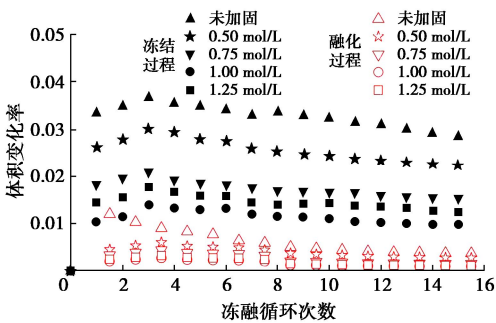
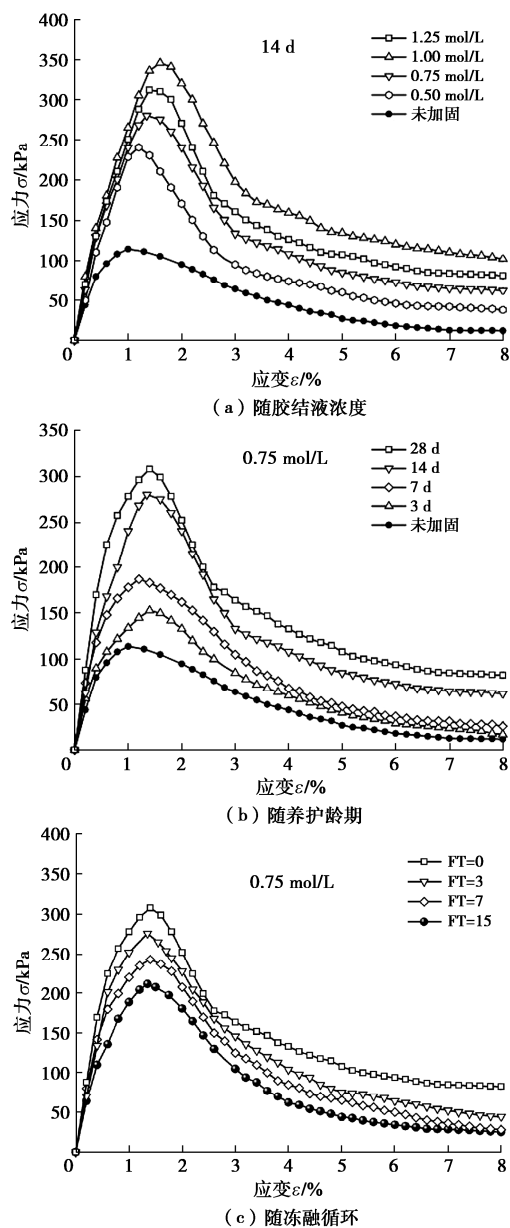


图3 未加固与加固试样体积变化率

Fig. 3 Volumetric rates of untreated and treated specimens

2.2 应力-应变关系

图4为微生物加固渠基粉土的典型应力-应变关系曲线。可以看出,未加固与加固试样的应力-应变关系均呈明显软化性特征。随着胶结液浓度和养护龄期的增长,加固试样应力-应变关系逐渐由弱软化型发展为一般软化型。同时,相较于未加固试样,加固试样应力-应变关系受冻融循环作用的影响较小,即冻融循环下其应力-应变关系曲线的变化趋势并无较明显改变。笔者推测原因在于,微生物诱导生成碳酸钙沉淀填充了渠基粉土内部的孔隙结构,同时将土颗粒胶结在一起,使得加固试样密实度逐渐提升,由此在一定程度上削弱了土体的塑性特征,强化了土体力学性能。



护龄期为 3, 7 d 时, 试样破坏强度提升幅度约在 82%~103%, 而当养护龄期达到 14 d 以后, 试样破坏强度提升幅度最高可达到 305%。同时, 可以发现试样破坏强度随着胶结液浓度增长呈先上升后下降的趋势, 胶结液浓度为 1.25 mol/L 试样的破坏强度略小于胶结液浓度 1.00 mol/L 试样的破坏强度, 两者破坏强度差值约为 4%~13%。究其原因: 高浓度胶结液与细菌发生尿素水解反应时, 细菌的活性受到了一定的抑制, 成矿物数量也随之降低, 由此土体加固效果受到影响, 造成试样破坏强度的衰减。除此以外, 微生物加固试样破坏强度的冻融衰减显著小于未加固试样, 而不同胶结液浓度试样的破坏强度衰减也主要发生于冻融循环初期, 即前 7 次循环过程, 表明冻融作用对微生物加固试样结构损伤存在一个临界频次。

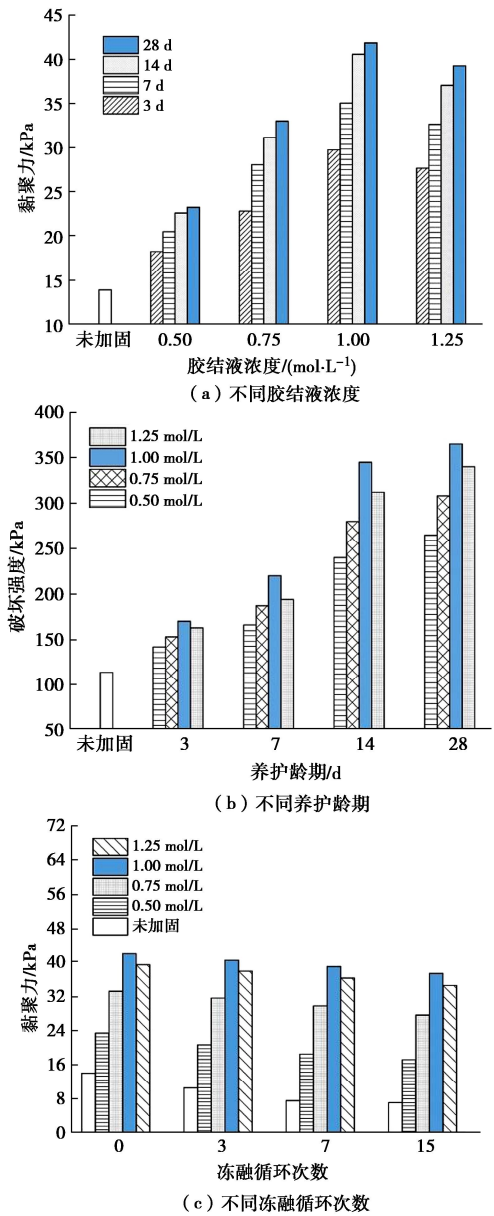


图 6 未加固与加固试样破坏强度对比图
Fig. 6 Failure strengths of untreated and treated specimens

2.5 抗剪强度指标

图 7, 8 分别为不同胶结液浓度、养护龄期、冻融循环下未加固与加固渠基粉土的黏聚力和内摩擦角的变化曲线。可以看出, 加固试样黏聚力和内摩擦角也均大幅高于未加固试样, 且受胶结液浓度、养护龄期等影响显著; 另外, 相较于未加固试样, 微生物加固试样的抗剪强度指标均明显提升, 其增幅约为 65.50%。对于这一现象, 主要原因在于: 微生物诱导碳酸钙沉淀填充了渠基粉土内部的孔隙结构, 土颗粒间接触点显著增多导致加固试样黏聚力大幅增长^[17], 同时碳酸钙晶体堆积生长也在一定程度增强了土颗粒间的摩擦力和互相嵌入挤压产生的咬合力, 间接提升了土体的内摩擦角。

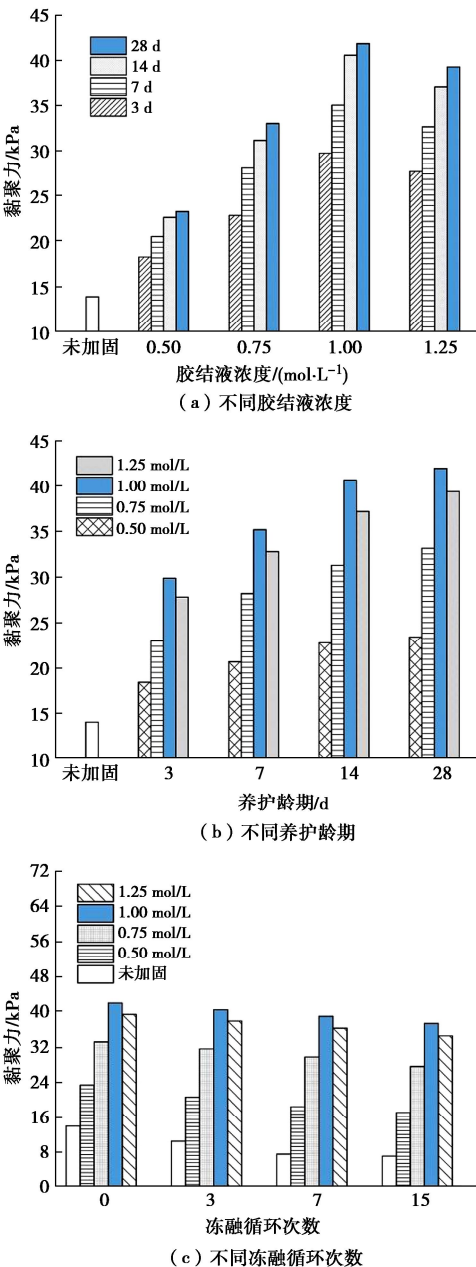


图 7 未加固与加固试样黏聚力对比图
Fig. 7 Cohesions of untreated and treated specimens

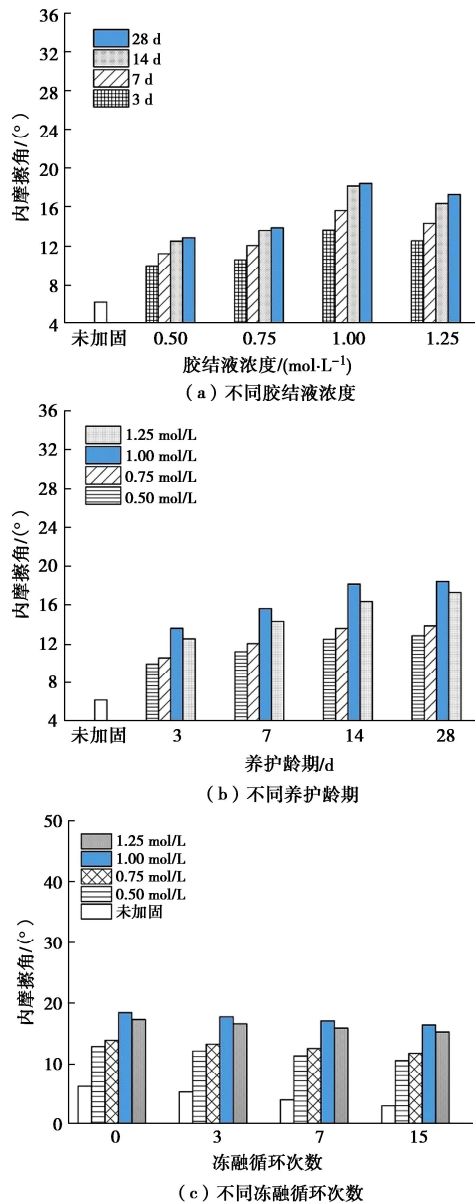


图8 未加固与加固试样内摩擦角对比图

Fig. 8 Internal friction angles of untreated and treated specimens

另外, 试样的黏聚力和内摩擦角在冻融循环下均略微衰减。在 15 次冻融循环后, 加固试样黏聚力和内摩擦角较初始值分别下降了 4.1%~7.2%和 3.9%~6.9%, 显著低于未加固试样衰减幅度, 分析原因在于: 冻融循环作用会造成岩土体内部出现液相水的重分布、分凝冰穿刺等现象, 由此诱发渠基粉土微裂隙的生成、拓展、连通并破坏土体结构性, 土体颗粒间的咬合摩擦力由于裂隙拓展而逐渐下降, 宏观表现为冻融循环下渠基粉土抗剪强度指标的下降; 而微生物加固使得渠基粉土内部孔隙颗粒被碳酸钙填充、附着以及胶结, 故加固试样抗剪强度指标受冻融影响被削弱。

2.6 渗透系数

图 9 为不同胶结液浓度、养护龄期、冻融循环下试样渗透系数的变化曲线。可以看出, 加固试样渗透系数大幅低于未加固试样, 微生物加固可使得渠基粉土的渗透系数至少降低一个数量级, 加固后其渗透系

数普遍低于 10^{-5} cm/s。加固试样渗透系数随胶结液浓度增长呈先减小后缓增的趋势, 且随养护龄期增长呈先急剧下降后趋于稳定的特征。推测原因在于: 微生物诱导生成的碳酸钙晶体逐渐填充渠基粉土内部渗流通道, 并最终发生通道堵塞, 宏观上表现为微生物加固试样的渗透系数逐渐减小。同时, 试样渗透系数受冻融循环影响会有一定的增长, 在 15 次冻融循环后, 未加固试样渗透系数增长了 45%左右, 而加固试样渗透系数则仅增加了不到 22%, 且当胶结液浓度为 1.00 mol/L 时的增长幅度最小, 约为 10%。笔者推测原因在于: 过低或过高胶结液浓度均会对微生物矿化反应存在一定制约作用, 而在中等胶结液浓度下, 微生物矿化加固效果最为显著, 经历冻融作用后的加固渠基粉土不会出现渗流优势通道, 因而 1.00 mol/L 浓度下加固渠基粉土的渗透系数受冻融作用影响较小。

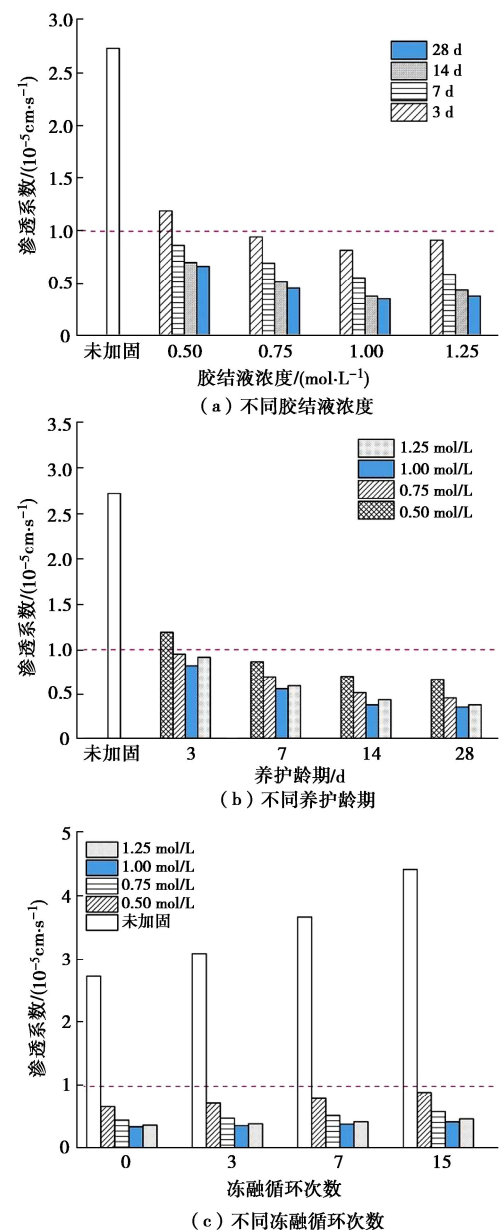


图9 未加固与加固试样渗透系数对比图

Fig. 9 Permeability coefficients of untreated and treated specimens

3 损伤特性分析

渠基粉土在冻融作用下冻融劣化显著,具体表现在弹性模量衰减、破坏强度下降等方面,因而冻融循环可看作是对渠基粉土的一种损伤行为。此处定义无量纲量(损伤度)表征微生物加固渠基粉土的冻融损伤程度^[2],即未损伤试样弹性模量减去 n 次循环后试样弹性模量与未损伤试样弹性模量之比。

图 10(a)为冻融循环下试样损伤度的变化曲线。可以看出,对于未加固试样,前 3 次冻融循环过程造成试样损伤度迅速增长至 30.56%左右,在随后冻融循环过程中试样损伤度增幅逐渐减小,但仍在缓慢增长,说明渠基粉土冻融损伤主要发生于前 3 次循环过程中,但反复冻融作用会持续对渠基粉土造成损伤。对于微生物加固试样,其变化趋势与未加固试样相似,但冻融循环下其损伤度仅为未加固试样的 50%左右,表明微生物加固后的渠基粉土可有效抵御冻融损伤。

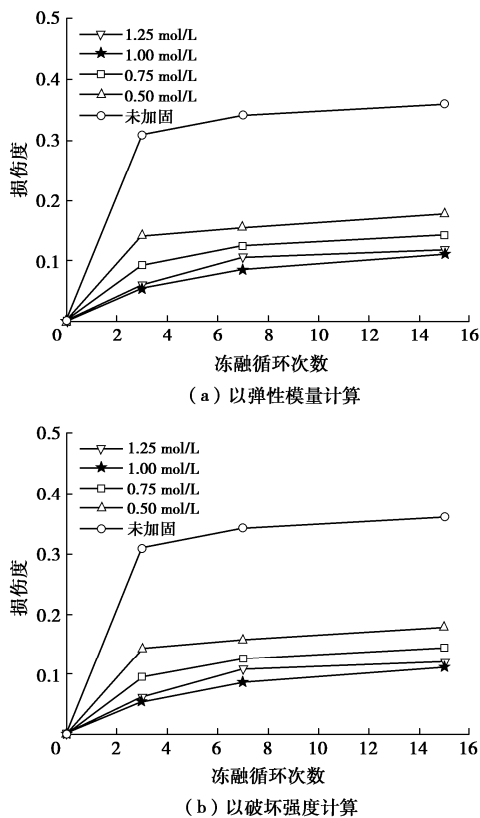


图 10 试样损伤度随冻融循环的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of damage degree with freeze-thaw cycles

除了应用广泛的弹性模量表征方法外,将未损伤试样的破坏强度减去 n 次循环后试样的破坏强度与未损伤试样的破坏强度之比,可以获取以破坏强度计算而得损伤度,如图 10(b)所示。可以发现,与以传统弹性模量所得损伤度变化趋势相似,以破坏强度所得加固试样的平均损伤度不足未加固试样损伤度的 50%。也就是说,无论以何种力学性能指标定量分析渠基粉土

的冻融损伤程度,冻融循环下未加固渠基粉土的损伤程度均显著高于微生物加固渠基粉土,表明微生物加固是抑制季冻区渠基粉土冻融损伤的有效手段。

4 微细观结构演化规律

4.1 扫描电镜试验结果

(1) 微观结构演化特征

图 11 为不同胶结液浓度、养护龄期下微生物加固试样的微观结构图像。可以发现,相较于未加固试样,加固试样微观结构更为紧密,且内部孔隙随着胶结液浓度升高、养护龄期增长愈发减小,同时加固试样内部裂隙及孔隙明显减少,表明微生物诱导生成的碳酸钙填充其原有的大孔隙,同时将土颗粒胶结在一起,使得加固试样密实度逐渐提升、整体性逐渐增强,这也是加固试样物理力学性能随着胶结液浓度提高、养护龄期增长而显著提升的主要原因。

图 12 为不同冻融循环下未加固与加固试样的微观结构图像。可以发现,随着冻融循环的增加,未加固试样内部逐渐出现絮凝和蜂窝絮凝结构,反复冻融作用使得冰晶不断重塑生长从而破坏了土颗粒间的联结作用,使得试样孔隙结构得以重分布,即使冰晶的消散也不能使得骨架结构得以恢复,因此冻融循环作用对试样结构的破坏损伤是不可逆的。而加固试样虽在冻融循环下也呈现出一定的微观结构变化现象,如微裂隙生成、孔隙增大、孔隙形态变化等,但其整体性仍然较好,表明微生物加固可以在一定程度上抑制冻融循环下试样内部骨架重分布的现象,这也较好地解释了冻融循环下未加固试样结构软化效应和加固试样宏观性能提升机理。

(2) 微观参数定量分析

为了对微生物加固渠基粉土的微观结构进行定量分析,采用 ImageJ 软件对微观结构图像进行二次处理,进而合理区分加固试样颗粒或孔隙的边界,最终提取加固试样孔隙的相关参数。

a) 孔隙面积

图 13 为未加固与加固试样孔隙面积对比图。可以发现,相较于未加固试样,加固试样的孔隙面积明显减小。随着胶结液浓度的升高,加固试样的孔隙面积呈先下降后轻微回升的趋势,而随养护龄期则呈不断下降的趋势。同时,不同胶结液浓度、养护龄期下加固试样的孔隙面积降幅在 12.79%~83.71%,表明微生物加固可使得渠基粉土内部大孔隙逐渐转变为小孔隙,进而使得土颗粒更为紧密。另外,冻融作用对未加固和加固试样孔隙面积均有明显影响,但在 3 次冻融循环后,加固试样的孔隙面积逐渐趋于稳定,而未加固试样的孔隙面积仍持续增长,表明微生物加固可有效抑制渠基粉土内部孔隙面积扩张。

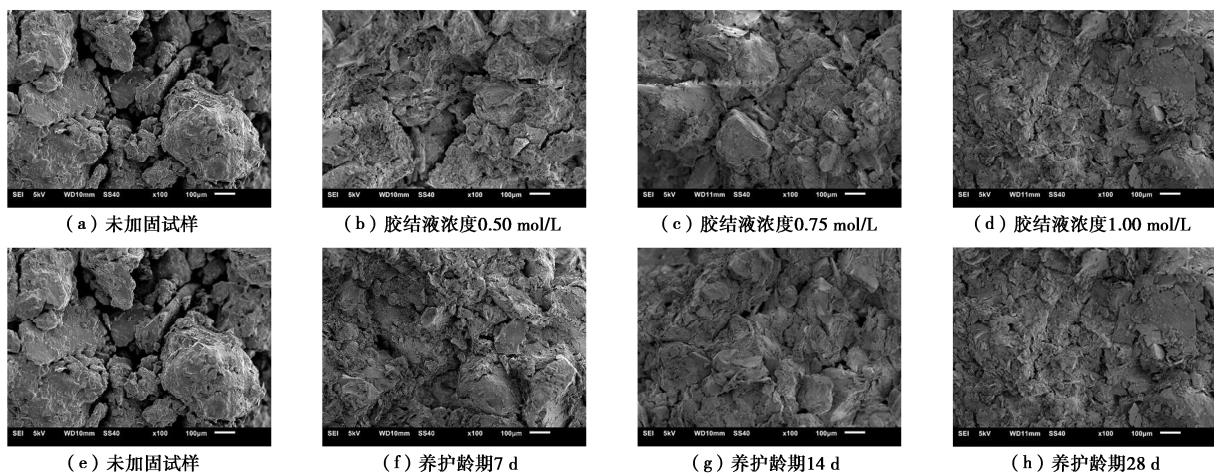


图 11 不同胶结液浓度、养护龄期下加固试样微观形态对比图（未经历冻融）

Fig. 11 Microstructures of treated specimens under different concentrations and curing ages (freeze-thaw cycle of 0)

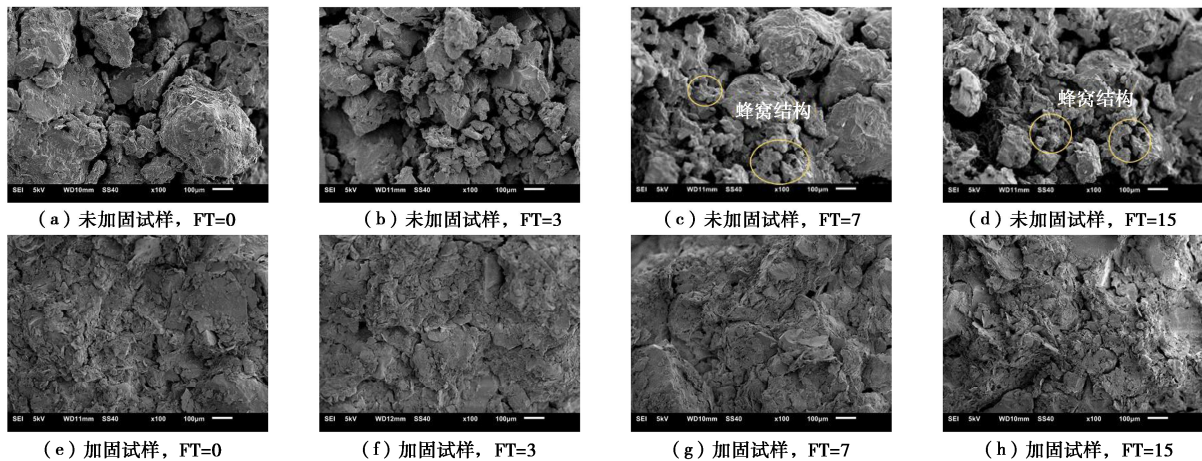


图 12 冻融循环下未加固与加固试样微观形态

Fig. 12 Microstructures of untreated and treated specimens subjected to freeze-thaw cycles

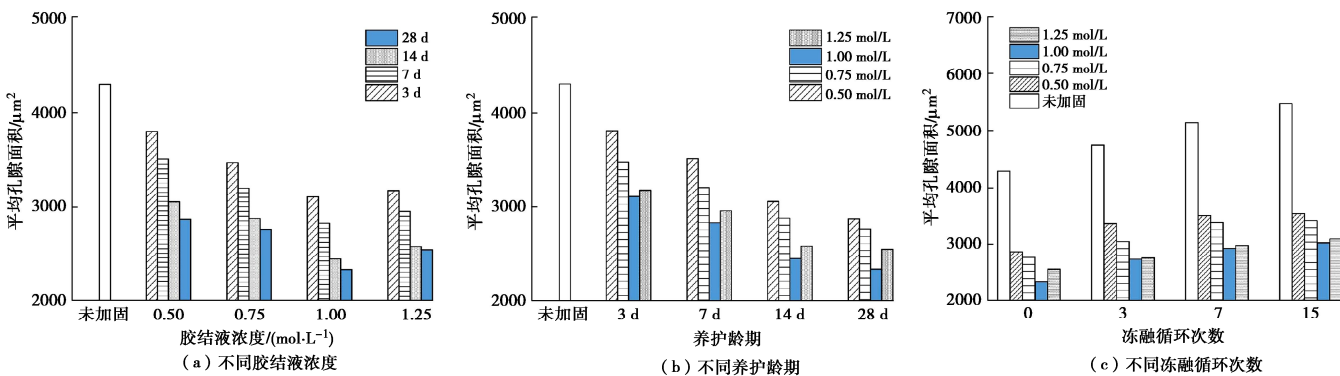


图 13 未加固与加固试样孔隙面积对比图

Fig. 13 Pore areas of untreated and treated specimens

b) 孔隙率

图 14 为未加固与加固试样孔隙率对比图。由图 14 可以看出,与孔隙面积变化特征较为相似,加固试样孔隙率同样显著低于未加固试样,不同胶结液浓度、养护龄期下加固试样孔隙率降幅在 38.65%~84.24%。同时,反复冻融循环也会促进试样孔隙率的增长,但在 15 次冻融循环后,未加固试样的孔隙率增长了约

27.68%,显著高于加固试样,这也从微观层面解释了微生物加固抑制渠基粉土冻融劣化的作用机理。

c) 分形维数

图 15 为未加固与加固试样分形维数对比图。可以看出,相较于孔隙面积、孔隙率,未加固与加固试样的分形维数差异相对较小。当养护龄期相同时,不同胶结液浓度下加固试样的分形维数仅略低于未加固试

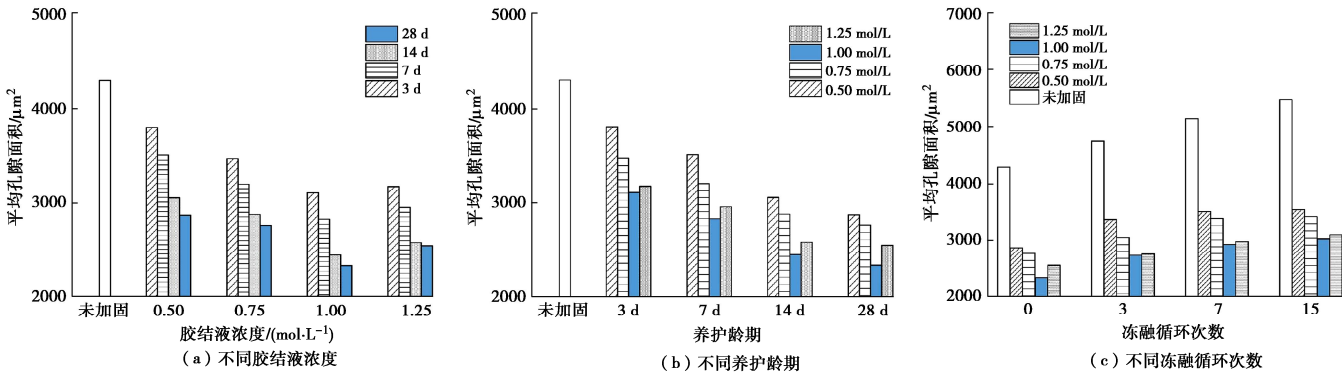


图 14 未加固与加固试样孔隙率对比图

Fig. 14 Porosities of untreated and treated specimens

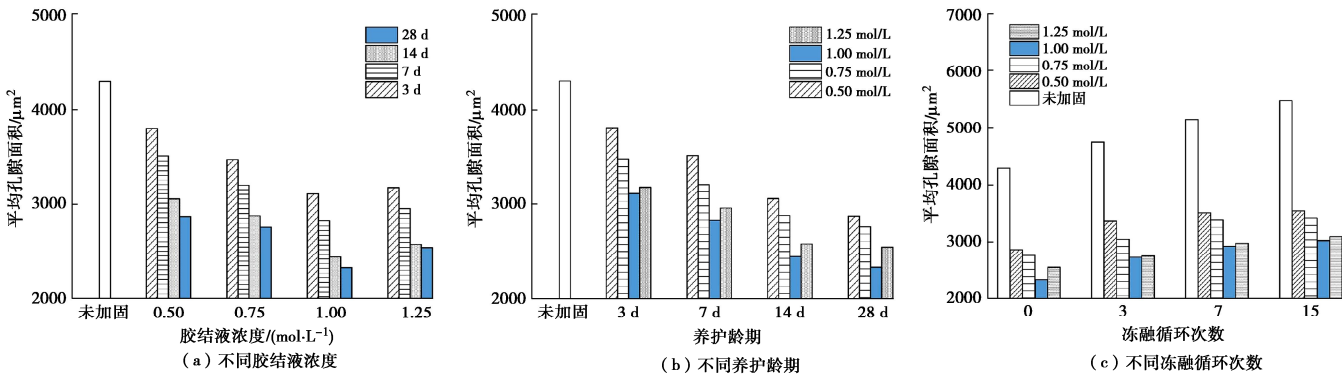


图 15 未加固与加固试样分形维数对比图

Fig. 15 Fractal dimensions of untreated and treated specimens

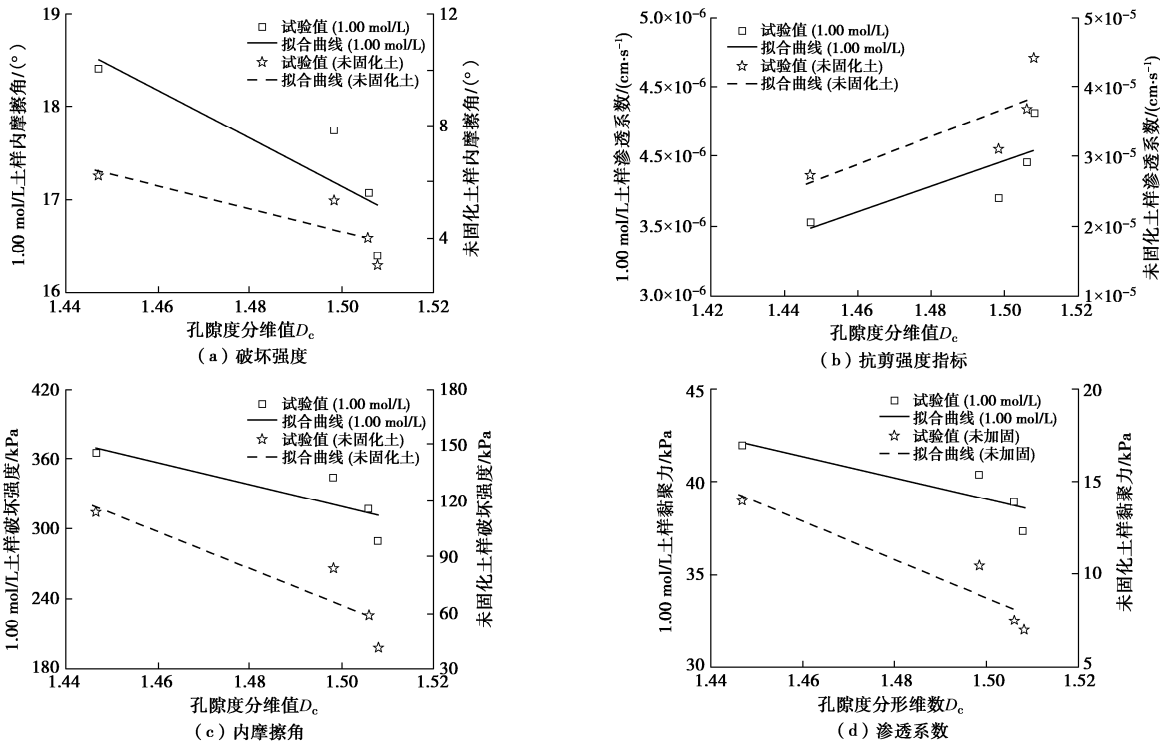


图 16 冻融循环下加固试样微观参数与宏观指标的定量联系

Fig. 16 Quantitative relationships between micro-parameters and macro-indices of treated specimens under freeze-thaw cycles

样;随着养护龄期增长,加固试样的分形维数逐渐下降,表明微生物加固可使得孔隙分布变得更为均匀。另外,在反复冻融作用下,未加固与加固试样分形维数均呈上

升趋势,且其增幅在前 3 次冻融循环过程中较为显著。推测原因在于:在冻融循环初期,渠基粉土内部孔隙受固-液相变转化影响逐渐变大,在这一过程中消磨了孔

隙中部分不平整内壁, 使得孔隙直径、孔隙周长等尺寸参数产生变化, 因而分形维数逐渐增大。

(3) 宏微观特性的定量联系

渠基土微观结构演化是其宏观物理力学性能变化的重要原因, 因而建立试样微观参数与宏观指标之间的定量联系对进一步揭示微生物加固渠基粉土冻融特性至关重要。图 16 为冻融循环下加固试样破坏强度、抗剪强度指标、渗透系数与分形维数之间的关系图。可以发现, 在冻融循环下, 加固试样破坏强度、抗剪强度指标、渗透系数与分形维数均呈一定的线性比例特征, 即加固试样宏观指标随着分形维数增长而呈下降的趋势, 表明冻融循环诱发土体孔隙结构非均匀性增强是加固试样工程特性不良的主要内因。

4.2 XRD 试验结果

微生物加固渠基粉土物相组成如图 17 所示。可以看出, 微生物在试样内部诱导生成的碳酸钙晶体矿物主要为方解石。具体而言, 当养护龄期为 3 d 时, XRD 图谱逐渐出现了大量的方解石特征峰, 表明试样内部方解石生成量随着胶结液浓度提高、养护龄期增长而增多; 而当养护龄期为 28 d 时, XRD 图谱已无明显的方解石特征峰升高现象, 表明试样内部碳酸钙晶体的生成主要集中于养护中前期, 这一规律也与加固试样物理力学性能演化趋势相吻合, 也就是当养护龄期达到 28 d 时, 加固试样的工程特性已趋于稳定。

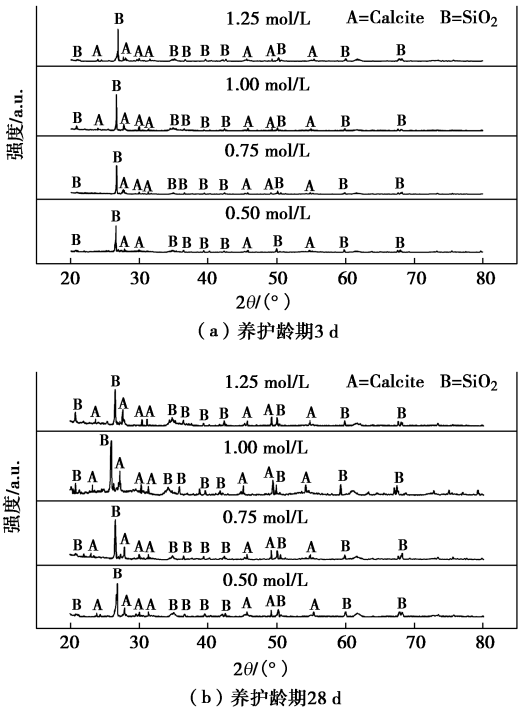


图 17 加固试样物相组成

Fig. 17 Phase compositions of treated specimens

4.3 颗粒级配分析

颗粒粒径是评价岩土体工程特性的重要指标之一。图 18 为未加固与加固试样颗粒级配随冻融循环的

变化曲线。由图 18 可以看出, 相较于未加固试样, 加固试样的细颗粒减少、粗颗粒增多, 表明加固试样内部诱导生成的碳酸钙晶体不断胶结微小土颗粒。同时, 反复冻融作用对未加固试样颗粒级配具有较大影响, 尤其是粒径小于 0.075 mm 的细颗粒, 原因在于: 该粒径范围内黏粒较多, 而黏粒被称之为敏感性粒组, 这也与郑郎等^[18]的研究结果较为一致; 反观加固试样, 冻融循环对其颗粒级配的影响则不甚显著, 表明微生物加固使得渠基粉土内部颗粒能够较好地抵御冻融风化作用, 提升渠基粉土中敏感性粒组的稳定性。

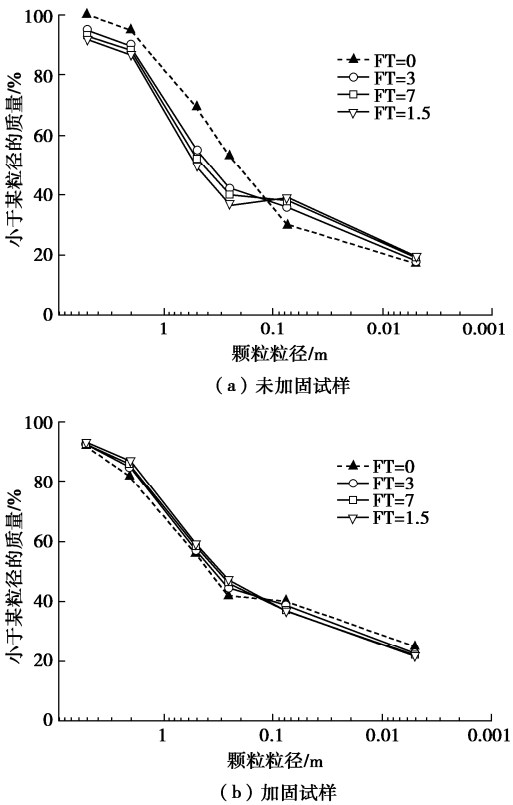


图 18 试样颗粒级配随冻融循环的变化曲线

Fig. 18 Variation curves of PSD with freeze-thaw cycles

4.4 微细观机理分析

冻融作用是季冻区岩土体出现损伤的重要诱因^[1-2]。前已述及, 反复冻融作用会造成未加固渠基粉土物理力学性能显著下降, 虽也会导致微生物加固渠基粉土抵抗外界荷载作用能力受到一定影响, 但其微细观结构仍然保持相对完整与稳定, 其原因主要在于: 土体孔隙中碳酸钙沉淀分布可分为裹附型、填充型、胶结型, 从微观结构图像中可以发现上述 3 种胶结形态在微生物加固渠基粉土中均有所体现, 如图 19 所示, 因而微生物诱导生成的碳酸钙沉淀晶体通过填充、胶结、包裹等系列方式重塑了渠基粉土的微细观结构, 如孔隙面积、孔隙率、分形维数等微观参数均出现了显著变化, 渠基粉土的微结构稳定性由此增强。在冻融循环下, 未加固渠基粉土内部孔隙水会在固-液之间反复转换, 导

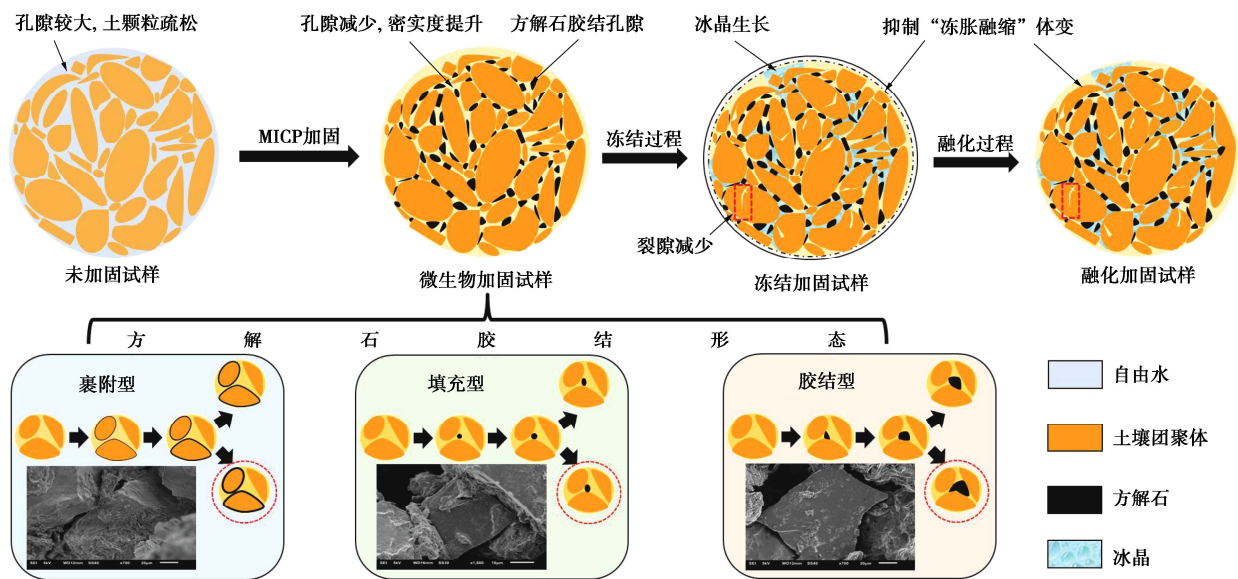


图 19 微生物加固提升渠基粉土冻融性能的微细观机理

Fig. 19 Micro-mechanism of improvement of freeze-thaw performance of treated silt

致渠基粉土物理力学性能劣化，而加固试样内部孔隙存在大量方解石，其在孔隙间起到了“桥接”作用，有效抑制了孔隙开裂、冻胀融缩等冻融诱发的损伤行为，使得加固渠基粉土微观结构在冻融风化作用下仍保持整体性和完整性，这也是微生物加固渠基粉土在冻融环境下仍展现出良好工程特性的原因。

前已述及，反复冻融作用也会在一定程度上削弱微生物加固渠基粉土物理力学性能，对此，笔者推测原因在于：冻胀力驱动下碳酸钙沉淀-土颗粒可能存在一定相互作用，也就是当碳酸钙沉淀填充土颗粒孔隙时，其填充的密实程度及其与土颗粒间的胶结强度深刻影响着加固土的冻融劣化特性；当冻融循环过程中孔隙水相变成冰产生的冻胀力大于胶结强度时，沉淀-土颗粒之间的胶结作用削弱，不同胶结形态下方解石内部及其与土颗粒之间也会出现些许微裂隙，并出现表观脱落现象，由此造成宏观加固体抗冻融能力衰减。

5 结 论

(1) 在不同胶结液浓度、养护龄期下，微生物加固可使得渠基粉土冻融体变量削减约 70%，渗透系数至少降低一个数量级，加固后其渗透系数普遍低于 10^{-5} cm/s。

(2) 微生物加固促使渠基粉土的抗压强度提升了约 220.17%，黏聚力增长了约 65.50%，当胶结液浓度为 1.00 mol/L、养护龄期为 28 d 时，渠基粉土的微生物加固效果最优。

(3) 微生物加固使得渠基粉土内部整体结构更加密实，具体表现在加固渠基粉土内部孔隙面积减小、孔隙率下降、分形维数降低。冻融循环诱发土体

孔隙结构非均匀性增强是渠基粉土工程特性不良的主因。

(4) 微生物诱导生成的碳酸钙沉淀通过填充、胶结、包裹等方式重塑了渠基粉土的微细观结构，增强了整体性和完整性，这是微生物加固渠基粉土在冻融环境下仍然展现出良好工程特性的主要原因。

参考文献：

[1] 蔡正银, 朱 锐, 黄英豪, 等. 冻融过程对膨胀土渠道边坡劣化模式的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 915-923. (CAI Zhengyin, ZHU Rui, HUANG Yinghao, et al. Influences of freeze-thaw process on the deterioration mode of expansive soil canal slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 915-923. (in Chinese))

[2] 邢 玮, 朱 锐, 张 晨, 等. 高寒地区供水渠道水热特征及其长期演化规律[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 93-102. (XING Wei, ZHU Rui, ZHANG Chen, et al. Hydrothermal characteristics and its long-term evolution of canals in cold regions[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2024, 46(1): 93-102. (in Chinese))

[3] 汪恩良, 姜海强, 付 强, 等. 冻融对饱和渠基土物理力学性质的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 287-294. (WANG Enliang, JIANG Haiqiang, FU Qiang, et al. Experiment on effect of freezing and thawing on physical and mechanical properties of saturated channel foundation soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 287-294. (in Chinese))

[4] 黄英豪, 陈 永, 朱 洵, 等. 相变材料改良膨胀土冻融性能

- 试验研究及微观机理分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(11): 1994-2002. (HUANG Yinghao, CHEN Yong, ZHU Xun, et al. Experimental study and micro-mechanism analysis of freeze-thaw performance of expansive soils improved by phase-change materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(11): 1994-2002. (in Chinese))
- [5] 何 稼, 楚 剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 643-653. (HE Jia, CHU Jian, LIU Hanlong, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 643-653. (in Chinese))
- [6] 刘汉龙, 肖 杨. 微生物土力学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022. (LIU Hanlong, XIAO Yang. Biocemented Soils Mechanical Principles and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese))
- [7] TANG C S, YIN L Y, JIANG N J, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, **79**(5): 94.
- [8] 邵光辉, 侯 敏, 刘 鹏. MICP 固化粉土细菌的分布和固定规律研究[J]. 林业工程学报, 2019, **4**(1): 128-134. (SHAO Guanghui, HOU Min, LIU Peng. Distribution and fixation characteristics of microorganism in MICP treated silt column[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, **4**(1): 128-134. (in Chinese))
- [9] 刘 璐, 沈 扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(12): 3410-3416. (LIU Lu, SHEN Yang, LIU Hanlong, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(12): 3410-3416. (in Chinese))
- [10] GAO Y F, TANG X Y, CHU J, et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil[J]. Geomicrobiology Journal, 2019, **36**(4): 366-375.
- [11] JIN G X, XU K, XU C S, et al. Cementation of shale soils by MICP technology and its damage characteristics due to freeze-thaw weathering processes[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2020, **34**(4): 04020023.
- [12] AHENKORAH I, RAHMAN M M, KARIM M R, et al. Unconfined compressive strength of MICP and EICP treated sands subjected to cycles of wetting-drying, freezing-thawing and elevated temperature: Experimental and EPR modelling[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, **15**(5): 1226-1247.
- [13] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(10): 1502-1513.
- [14] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, **24**(5): 417-423.
- [15] OLIVEIRA P J V, FREITAS L D, CARMONA J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, **29**(4): 04016263.
- [16] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [17] ZHANG W C, JU Y, ZONG Y W, et al. In situ real-time study on dynamics of microbially induced calcium carbonate precipitation at a single-cell level[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(16): 9266-9276.
- [18] 郑 郇, 马 巍, 郅 慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1282-1287, 1294. (ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1282-1287, 1294. (in Chinese))