DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.081
开放科学(资源服务)标识码OSID:

干湿循环作用下生物激发加固砂的剪切特性

张婷婷,方青云,崔昊
(重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘　要:降雨蒸腾和水位循环涨落引起的干湿循环会导致河/湖岸边坡土体强度降低,进而引发滑坡,亟需发展环境友好的岸坡加固技术。为了探究生物激发MICP技术加固岸坡砂在干湿循环作用下的力学性能演化规律,首先通过原位激活土中土著产脲菌诱导碳酸钙沉积对岸坡砂进行加固,随后对未加固及加固试样开展不同次数(0、2、4次)的干湿循环试验,并采用直剪试验、剪切波速测试、质量损失率测定及SEM微观观察等手段,系统研究加固程度与干湿循环次数对试样抗剪强度、剪切波速及质量损失率的影响。结果表明:生物激发MICP能显著提升砂的峰值剪应力与黏聚力;干湿循环导致加固试样剪切波速下降、质量损失率增加,峰值强度降低,且弱胶结试样劣化更为显著。微观分析结果表明,干湿循环初期以弱胶结碳酸钙结构断裂与剥离为主,随循环进行残余结构趋于稳定。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;生物激发;干湿循环;剪切特性
中图分类号:TU411.7　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Shear behaviors of biostimulated MICP-treated sand under dry-wetting cycles

ZHANG Tingting, FANG Qingyun, CUI Hao
(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Dry-wetting cycles caused by rainfall, evapotranspiration, and fluctuating water levels reduce the strength of river and lake bank slopes, leading to landslides. Therefore, environmentally friendly reinforcement techniques are needed. This study aims to investigate the mechanical evolution of biostimulated MICP-treated sand under dry-wetting cycles. In the tests, bank sand was first reinforced by activating indigenous ureolytic bacteria in situ to induce calcium carbonate precipitation. Then, treated and untreated specimens were subjected to dry-wetting cycles (0, 2, and 4 times). Direct shear tests, shear wave velocity measurements, mass loss rate tests, and SEM observation were used to study the effects of cementation degree and cycle number on shear strength, shear wave velocity, and mass loss rate. Results show that biostimulation significantly enhances the peak shear stress and cohesion of sand. Dry-wetting cycles reduce shear wave velocity and peak strength, while

收稿日期:2026-06-05
基金项目:国家自然科学基金(52408354);重庆市建设科技计划(城科字2024第6-17号)
作者简介:张婷婷(2001-),女,主要从事微生物土力学研究,E-mail:zhangtingt6191@163.com。
崔昊(通信作者),男,特聘副研究员,E-mail:cqucuihao1@163.com。

Received: 2026-06-05
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52408354); Chongqing Construction Science and Technology Plan Project (No. Chengkezi 2024 No. 6-17)
Author brief: ZHANG Tingting (2001-), main research interest: mechanical properties of biotreated soils, E-mail: zhangtingt6191@163.com.
CUI Hao (corresponding author), assistant research fellow, E-mail: cqucuihao1@163.com.

increasing mass loss rate. The degradation is more pronounced in weakly cemented specimens. Microstructural analysis indicates that early cycles mainly cause fracture and detachment of weakly cemented calcium carbonate structures. As cycles proceed, the residual structure tends to stabilize.

Keywords: microbially induced carbonate precipitation (MICP); biostimulation; dry-wetting cycles; shear characteristics

周期性水位涨落与降雨蒸腾引发的干湿循环作用是影响岸坡稳定性的重要环境因素。在此类反复干湿交替条件下,岸坡土体往往表现出黏聚力低、结构性差及渗透性强等特点,加之河水冲刷与地表径流的协同作用,极易发生强度衰减,进而诱发岸坡侵蚀、坍塌等失稳问题[1]。因此,亟需对岸坡土体采取有效的防护措施。传统的混凝土护坡方法虽应用广泛,但存在高能耗、自然相容性差等不足[2]。

微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation,MICP)技术作为一种新兴的岩土体加固技术,具有环境友好、绿色低碳等优势。MICP是利用产脲酶微生物的新陈代谢作用产生大量的脲酶并将环境中的尿素水解成NH_4^+和CO_3^{2-},生成的CO_3^{2-}与环境中Ca^{2+}结合生成碳酸钙沉淀($CaCO_3$),这些碳酸盐沉淀胶结土颗粒和填充土体孔隙,从而改善岩土体的工程性能。目前,学者针对干湿循环作用下MICP加固砂的力学特性开展了相关试验研究。多数研究一致表明,干湿循环会导致MICP加固砂的强度发生不同程度的衰减。Ahenkorah等[3]发现,随着干湿循环次数增加,碳酸钙含量与无侧限抗压强度逐渐降低,同时质量损失增大;田亚坤等[4]对MICP加固金属尾矿砂的三轴剪切试验表明,强度随干湿循环次数增加逐渐降低;Xu等[5]指出,低胶结试样因方解石结晶度差更易崩解,15次干湿循环后强度衰减达63.7%。此外,部分学者关注了MICP加固材料的优化与耐久性提升:Sharma等[6]采用不同的矿化细菌加固可液化砂土,证实其在经历20次干湿循环后仍能保持优异耐久性,并能有效抑制液化发生;Kou等[7]联合MICP与回收椰壳纤维加固钙质砂发现,提高初始相对密度可有效缓解干湿循环的劣化过程。朱文羲等[8]对微生物加固改良花岗岩残积土的劣化规律研究则表明,改良土的强度劣化表现出先快后慢的特性。上述研究为理解干湿循环对MICP加固砂的力学影响提供了重要基础,但仍存在以下不足:上述试验主要基于生物强化法开展,即在实验室培养外源矿化细菌后再注入土体,该方法存在菌种培养成本高、外源菌环境适应性差、加固均匀性欠佳和工程应用成本高等问题[9-10]。

为克服生物强化法的上述不足,近年来学者提出了生物激发MICP方法。该方法通过向土体中加入激发液,将土体中天然存在的矿化细菌进行激活和富集,之后加入胶结液后进行矿化和胶结[11]。研究表明,生物激发法具有操作简单、成本较低、矿化细菌的环境适应性强、矿化能力稳定和加固均匀性好等优点[12-14]。目前,已有学者对生物激发加固砂的力学性能开展了相关研究,证实该技术可有效提高土体的强度、刚度、抗液化性,降低可压缩性[15-17]。然而,对于生物激发MICP加固砂在干湿循环作用下的剪切力学特性,尤其是直剪条件下的强度演化规律与微观劣化机理,目前尚缺乏系统研究。

笔者采用生物激发MICP方法对砂土进行加固处理,对加固试样进行不同次数的干湿循环,系统测定试样的质量损失率与剪切波速变化,对试样开展直剪试验,探究干湿循环作用对微生物加固试样力学行为的影响规律,并通过微观分析探究干湿循环对加固试样微观结构的损伤机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

所用土样取自重庆嘉陵江岸坡。已有研究表明[18-20],土壤中有机质含量、营养物质浓度和氧气含量等微生物生长所必需的环境因子均随土壤深度增加呈降低趋势,导致土壤中的微生物多样性和数量随土体深度增加呈现明显递减,因此,为确保所采集的土样中含有足够数量且活性良好的土著脲酶菌,以满足生物激发MICP方法对微生物来源的需求,在采集土样时,先将地表草根杂物去除,之后采集地表下深度5~10 cm的土体[21]。采集土样的天然含水在11%~12%之间,先在阴凉通风处自然晾晒48 h,直到含水率为3%~4%。之后,将晾晒后的土样使用2 mm孔径的标准筛进行过筛处理以去除掉其中残留的杂草、碎石及其他杂质。最后,将采集到的土样放入4 ℃的冰箱中密封保存以便土体中的微生物保持活性[21]。测得土体的比重为2.67,最大干密度、最小干密度分别为1.59、1.27 g/cm^3[21]。通过动态图像分析仪(QICPIC)得到土体的平均粒径d_{50}为0.12 mm,不均匀系数C_u为2.79,曲率系数C_c为1.28。土样的颗粒级配曲线如图1

所示。

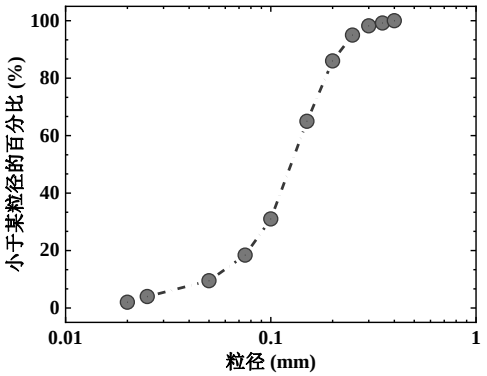


图 1　土体级配曲线

Fig. 1　Particle size distribution curve of tested soil

1.2　激发液与胶结液

已有学者对生物激发 MICP 技术的激发液配方、激发时间等因素对脲酶活性和矿化效果的影响进行了研究,发现激发液中存在营养物质和氮源的情况下,土壤中的土著脲酶菌可以被很好地激发出来[9, 15, 20-23]。激发液配方参考 Fan 等[21]的配方:0.01 g/L 的 $NiCl_2 \cdot 6H_2O$、10 g/L 的尿素、20 g/L 的酵母提取物和 10 g/L 的 NH_4Cl。激发液配置完成后使用氢氧化钠溶液将 pH 值调整到 9.1 左右,激发液无须进行灭菌处理。所用胶结液采用浓度均为 1 mol/L 的尿素和氯化钙等体积混合而成,并添加等体积的浓度为 0.2 g/L 的酵母提取物溶液,最终胶结液中尿素和氯化钙的实际浓度均约为 0.333 mol/L,酵母提取物浓度约为 0.067 g/L,未对混合后的胶结液进行额外 pH 值调节,测得其 pH 值为 6.0~7.0。添加微量酵母提取物的目的是提供进一步的营养,以维持胶结阶段的细菌活性,但考虑到在胶结过程中如果加入过量的酵母提取物,则厌氧发酵可能会产生有机酸,因此添加酵母提取物浓度为 0.2 g/L。

1.3　试样制备

生物激发 MICP 加固试样在内部尺寸为 69 mm×69 mm×69 mm 的正方体亚克力模具中进行制备,模具下方打孔。装样时在模具底部先放置一块百洁布,防止装样过程中砂的泄露。将砂样分 3 层装入模具,控制总装样高度为 25 mm,每层装样结束后先刮毛再进行下一次装样,装样结束后将顶部压平并再放置一层百洁布。装样结束后试样的初始相对密实度为 40%。加固过程分为生物激发和胶结两个阶段,两阶段均采用表面渗透法施加溶液[24]。在生物激发阶段,将 2 倍土样孔隙体积(PV)的激发液从样品顶部缓慢倒入,多余溶液从模具底部小孔排出。

此外,脲酶活性可以反映生物激发后土著脲酶菌水解尿素的能力,这直接影响后续的矿化胶结能力。为了探究不同生物激发时间对激发效果的影响,采用电导率检测法测量溶液中细菌的脲酶活性[25],并分别测定了 24、48、72、96、144 h 生物激发后流出废液的电导率变化速率,其随生物激发持续时间的变化如图 2 所示。从图中可以发现,溶液电导率变化速率在 96 h 时达到最高值(0.1767 mS/min),之后开始出现略微下降。同时可以发现,从 24 h 到 48 h 时,电导率变化速率从 0.027 mS/min 迅速增长到 0.1267 mS/min,增长幅度达 369.26%,而从 48 h 到 72 h 期间,电导率变化速率从 0.1267 mS/min 增长到 0.1517 mS/min,增长幅度为 19.73%,从 72 h 到 96 h 时电导率变化速率增长幅度进一步减小到 16.48%。可以看出,电导率变化速率在 72 h 后增长已明显放缓,表明脲酶活性的上升趋势已进入平台阶段。综合考虑电导率变化速率的增长趋势以及 Wang 等[26]的研究结论(48~72 h 为生物激发 MICP 的最佳处理时间),选择在激发 72 h 后加入胶结液进行后续的胶结处理。在 MICP 加固试样制备过程中,激发液仅加入 1 次。激发阶段完成后,通过表面渗透每 24 h 注入 1.5 PV 的胶结液,此为一次处理完成。根据试验方案,设置了 3 次和 6 次胶结程度。设定的胶结次数完成后,用大于 5 PV 的去离子水冲洗试样,以去除残留的可溶性盐,并在 105 ℃下烘干 24 h。图 3 所示为生物激发 MICP 加固并经过打磨的试样,试样尺寸为 60 mm×60 mm×20 mm。

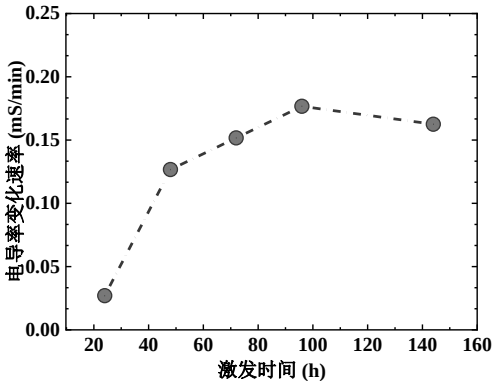


图 2　电导率随激发时间的变化

Fig. 2　Variation of electrical conductivity with biostimulated time

1.4　钙离子利用率及碳酸钙含量测定

被加固试样在加入胶结液之前已经注入 2 倍试样孔隙体积的激发液,可认为试样的孔隙大部分已经被填充,每次加入胶结液的体积基本等于胶结结束后流出废液的体积。收集每次胶结处理结束后

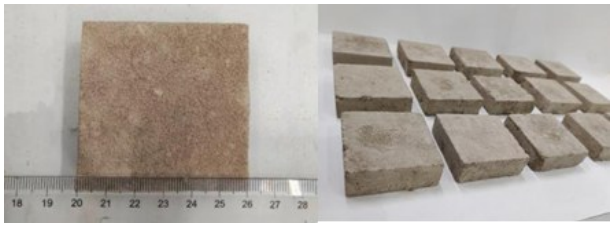


图3 生物激发MICP加固试样

Fig. 3 Biostimulated MICP treated specimens

流出的废液,采用EDTA(乙二胺四乙酸)滴定法测定流出液中钙离子浓度[27-28]。采用钙离子利用率$\eta_{Ca^{2+}}$评估每个胶结处理周期中钙离子的消耗量,其计算过程为[28]

$$\eta_{Ca^{2+}}=\left(\frac{C^{0}_{Ca^{2+}}-C^{e}_{Ca^{2+}}}{C^{0}_{Ca^{2+}}}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中:$C^{0}_{Ca^{2+}}$为每个胶结周期开始时施加的钙离子浓度,约为0.333 mol/L;$C^{e}_{Ca^{2+}}$为每个胶结处理结束后流出废液的钙离子浓度。

采用酸洗法对生物激发加固过程中生成的碳酸钙含量进行测定,该碳酸钙含量被定义为碳酸钙沉积含量(C_C)。生物激发MICP加固的碳酸钙沉积含量的计算方法为加固试样中碳酸钙总含量与未加固样品的碳酸钙含量之差[21]:

$$C_C=\left(\frac{m_{Cai}}{m_i}-\frac{m_{Ca0}}{m_0}\right)\times 100\% \tag{2}$$

式中,m_{Cai}为第i个加固试样中碳酸钙的质量;m_i为酸洗后加固试样中干燥不溶物的质量;m_{Ca0}为未加固土体中碳酸钙的质量;m_0为酸洗后未加固土体中干燥不溶物的质量。

酸洗试验所用的盐酸浓度为1 mol/L,酸洗的具体操作步骤为:针对200 kPa法向应力下每组加固程度及干湿循环条件下的3个平行试样,分别从每个破坏试样的剪切面附近(4个角及中心)各取1个等质量小样(质量记为m_1),共计15个小样。将小样分别置于烧杯中,加入过量1 mol/L盐酸直至完全淹没,静置至土样完全崩解且无气泡产生。随后使用已称重的滤纸(滤纸与烧杯总质量记为m_2)对酸洗液进行过滤,并用过量去离子水冲洗滤渣3次。将滤渣连同滤纸放置于烧杯中置于105 ℃烘箱中烘干24 h,冷却至室温后称量(总质量记为m_3)。对于每一个小样,其酸洗后干燥不溶物的质量为m_3-m_2,溶解的碳酸钙质量为$m_1+m_2-m_3$,碳酸钙含量即为溶解的碳酸钙质量与酸洗前小样质量m_1的比值[29]。计算出15个小样各自的碳酸钙含量后取平均值,作为该加固程度及干湿循环次数下的试样碳酸钙总含量。同时,取3份未加固松散砂,按相同步骤进行酸洗,测得未加固土中的原有碳酸钙含量,用于计算加固试样中由生物激发MICP生成的碳酸钙沉积含量。本文中测得未加固松散砂的碳酸钙含量为8.26%。

1.5 干湿循环处理和剪切波速测量

干湿循环试验前,先对烘干后的生物激发MICP加固砂样进行剪切波速测量。根据Shi等[30]的方法进行剪切波速测量,使用一对弯曲元件(发射器和接收器)在激励幅度和频率为20 V和15 kHz的条件下测量试样上下底面之间的信号。剪切波速V_s的计算原理为

$$V_s=\frac{L}{T-T_0} \tag{3}$$

式中:L为两个弯曲元之间的距离,即试样高度;T为信号从发射到接收的有效传播时间,一般定义为接收端波峰对应的时间与发射端波峰对应的时间之间的差值;T_0为在没有放置试样时波的延迟,即仪器的系统误差所延迟的时间。

根据ASTM D559/D559M-15[31],进行干湿循环试验时,先将不同胶结次数的生物激发MICP加固砂样完全浸没在蒸馏水中12 h,湿化过程中保持水面高于试样顶面20 mm左右。之后,将试样放在室温下自然风干1 h。风干结束后,将试样在105 ℃的烘箱中干燥12 h,然后将试样从烘箱中取出并在室温下冷却2 h。上述过程为一个干湿循环周期。在每个干湿循环结束时,记录样品的干质量(当质量在干燥过程中变为恒定时)以评估质量损失。同时,对每次干湿循环结束后的试样进行剪切波速度测量。本试验研究设置的干湿循环次数分别为0、2、4次。此外,设置了4组未进行生物激发加固的试样(S-100~S-400),这些试样也未进行干湿循环。表1为所有干湿循环和直剪试验的试验方案,共计28组。以J3-DW4-100和S-100试样为例说明试样编号的定义,其中J3代表加固次数为3次,DW4代表干湿循环次数为4次,S代表未加固试样,100代表直剪试验的法向应力σ_n为100 kPa。为确保试验结果的可靠性,每组工况制备3个平行试样。

1.6 直剪试验

使用南京泰克奥科技有限公司生产的液晶微控美标直剪仪TKA-DDS-10进行直剪试验,该仪器包含上下剪切盒、加载系统和数据采集与控制系统。加载系统包括水平加载和垂直加载系统,水平加载采用步进式电机推动下剪切盒在滑轨上移动,并通过荷载传感器计算水平剪切力,水平位移则通过步进电机自动计算;垂直加载系统为杠杆和砝码加载,可提供恒定的法向应力,同时竖向位移采用分辨率为0.01 mm的数显千分表测量。控制系统

表 1　试验方案

Table 1　Experimental protocol

试样编号	加固次数	干湿循环次数	法向应力 σ_n/kPa
S-100、S-200、S-300、S-400	0	0	100、200、300、400
J3-DW0-100、J3-DW0-200、J3-DW0-300、J3-DW0-400	3	0	100、200、300、400
J3-DW2-100、J3-DW2-200、J3-DW2-300、J3-DW2-400	3	2	100、200、300、400
J3-DW4-100、J3-DW4-200、J3-DW4-300、J3-DW4-400	3	4	100、200、300、400
J6-DW0-100、J6-DW0-200、J6-DW0-300、J6-DW0-400	6	0	100、200、300、400
J6-DW2-100、J6-DW2-200、J6-DW2-300、J6-DW2-400	6	2	100、200、300、400
J6-DW4-100、J6-DW4-200、J6-DW4-300、J6-DW4-400	6	4	100、200、300、400

软件可设置剪切速率和终止剪切位移等试验参数。设置了 4 个法向应力水平,即 100、200、300、400 kPa,剪切速率设定为 0.6 mm/min,剪切水平位移设定为 6 mm。为了进一步研究干湿循环对生物激发 MICP 加固试样微观结构的影响,采用扫描电子显微镜(SEM)对试样进行观测分析。

2　试验结果与讨论

2.1　钙离子利用率、碳酸钙沉积含量及剪切波速

图 4 所示为胶结阶段的钙离子利用率,从图 4 可以观察到,随着胶结次数的增加,钙离子利用率逐渐降低,这与大部分 MICP 过程中的钙离子利用率变化规律一致[28, 32]。在注入胶结液的前 3 个胶结加固循环中,胶结液中大部分钙离子都转化为了碳酸钙,6 次胶结加固处理结束后钙离子利用率约为 65%。Lai 等[28]采用生物强化 MICP 加固砂样时,在只注入一次菌液并利用 1 mol/L 胶结液进行 6 次加固处理后钙离子利用率几乎为 0,而在试验条件下采用生物激发 MICP 方法进行 6 次胶结加固处理后的钙离子利用率仍然高达 65%,说明生物激发产生的天然脲酶菌具有更持久的矿化能力[10, 21]。

加固 3 次和 6 次的碳酸钙沉积含量随干湿循环次数的变化如图 5 所示。从图中可以看出,在未进行干湿循环时,随着加固次数增加,碳酸钙生成量明显增多,这主要是由于 3 次胶结加固后钙离子利用率仍然随加固次数增加而显著降低,更多的钙离子转化为碳酸钙沉淀。此外,随着干湿循环增加,碳酸钙沉积含量减少幅度较为有限,胶结 3 次试样经过干湿循环碳酸钙沉积含量最高下降 0.24 个百分点,胶结 6 次试样则下降了 0.92 个百分点,这是因为碳酸钙难溶于水,干湿循环过程中仅为碳酸钙胶结结构的断裂和剥离。

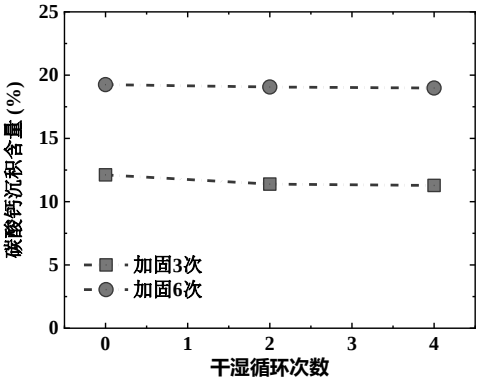


图 5　碳酸钙沉积含量随干湿循环的变化

Fig. 5　Variation of calcium carbonate content with dry-wetting cycles

为了进一步研究干湿循环对生物激发 MICP 加固试样的影响,分析了经历不同干湿循环次数的加固试样的质量损失率。从图 6 可以看出,虽然干湿循环作用对加固试样碳酸钙沉积含量的影响较小,但对质量损失的影响不可忽视。加固 3 次的试样经过 4 次干湿循环后质量损失率可达 3.67%,尤其第 1 次干湿循环造成的质量损失率最大,达到了

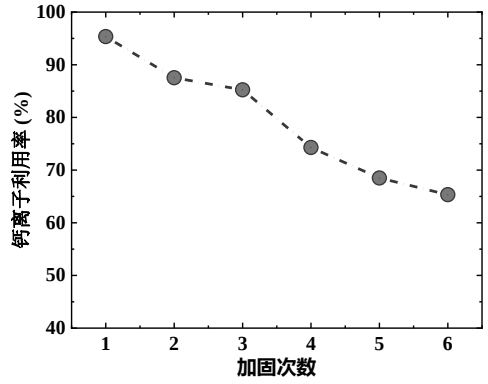


图 4　胶结阶段钙离子利用率

Fig. 4　Calcium ion utilization efficiency during the cementation stage

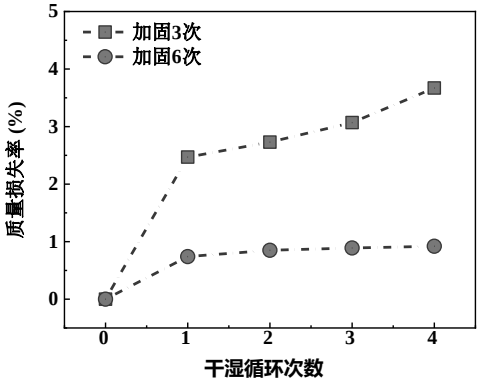


图 6　试样质量损失率随干湿循环的变化

Fig. 6　Variation of mass loss rate with dry-wetting cycles for samples

2.47%;而胶结6次的试样经过4次干湿循环后质量损失率为0.92%,同样表现出第1次干湿循环后的质量损失率最大(0.74%),但随着干湿循环次数增加,质量损失率基本不再增加。可以看出,随着加固次数的增大,生物激发MICP加固试样对干湿循环的抵抗能力明显增强。通过图5和图6可知,加固3次的试样虽然碳酸钙沉积含量随干湿循环次数增加降低不明显,但质量损失率变化较明显,这可能是由于加固3次的试样生成的碳酸钙较少,一些未被胶结或胶结较为松散的砂颗粒在干湿循环过程中损失。

剪切波速作为一种无损检测方式,可以表征土体内部情况。Lin等[33]发现横波速度的变化与碳酸钙形式相关,且不同碳酸钙接触形式对剪切波速的增加也存在影响。因此,常用剪切波速来衡量MICP的胶结程度[33-35]。对每次干湿循环后的试样测量剪切波速度,结果如图7所示。可以看到,加固3次的试样在未进行干湿循环时剪切波速为356.5 m/s,加固6次试样未进行干湿循环时的剪切波速为741.3 m/s,这是由于随着加固次数的增加,碳酸钙生成量增加,增强了土体的密实度,波速传播速度增加。同时,随着干湿循环次数的增加,两种加固程度下的试样的剪切波速逐渐下降,经历四次干湿循环后加固3次和6次的试样剪切波速分别为208.2 m/s和580.6 m/s。此外,剪切波速的下降主要集中在第1次干湿循环后,加固3次和6次的试样经历1次干湿循环后剪切波速分别下降了20%和16%,这与图6中加固试样的质量损失率增加主要集中在第1次干湿循环后的结果对应,说明第1次干湿循环对加固土体内部结构的改变最为明显,这和Gowthaman等[36]观察到的微生物加固试样的劣化主要发生在干湿循环早期的试验结果相似。

2.2 直剪试验的力学响应分析

图8所示为未加固试样和生物激发加固试样直剪试验的剪应力-剪切位移关系。从宏观力学响应来看,未加固试样在4种法向应力水平下均呈现硬化特征,即剪应力随着剪切位移的增加而增加并逐渐保持平稳。经过生物激发MICP加固后的试样的剪切行为出现显著变化:对于加固3次未进行干湿循环的试样,其剪应力-剪切位移曲线在低法向应力水平下(100和200 kPa)表现出明显的软化特征,即剪应力随着剪切位移的增加先达到峰值状态,随后减小,表明碳酸钙的胶结作用可使土体表现出一定的脆性破坏特征;在高法向应力水平下(300和400 kPa),由于法向约束的增强抑制了胶结结构的脆性破坏,试样表现出硬化特征。对于加固6次未进行干湿循环的试样,其剪应力-剪切位移曲线在4种法向应力下均表现出变形的软化特征,说明随着胶结程度的增加,土体的整体性增强,破坏模式更趋近于脆性破坏。

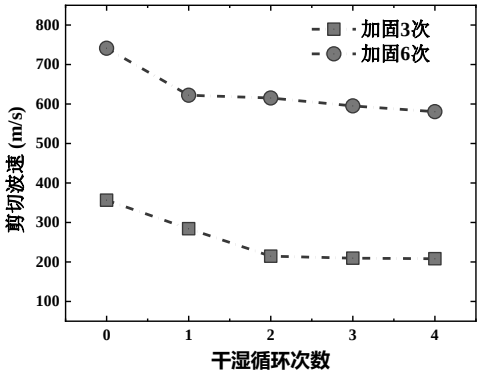
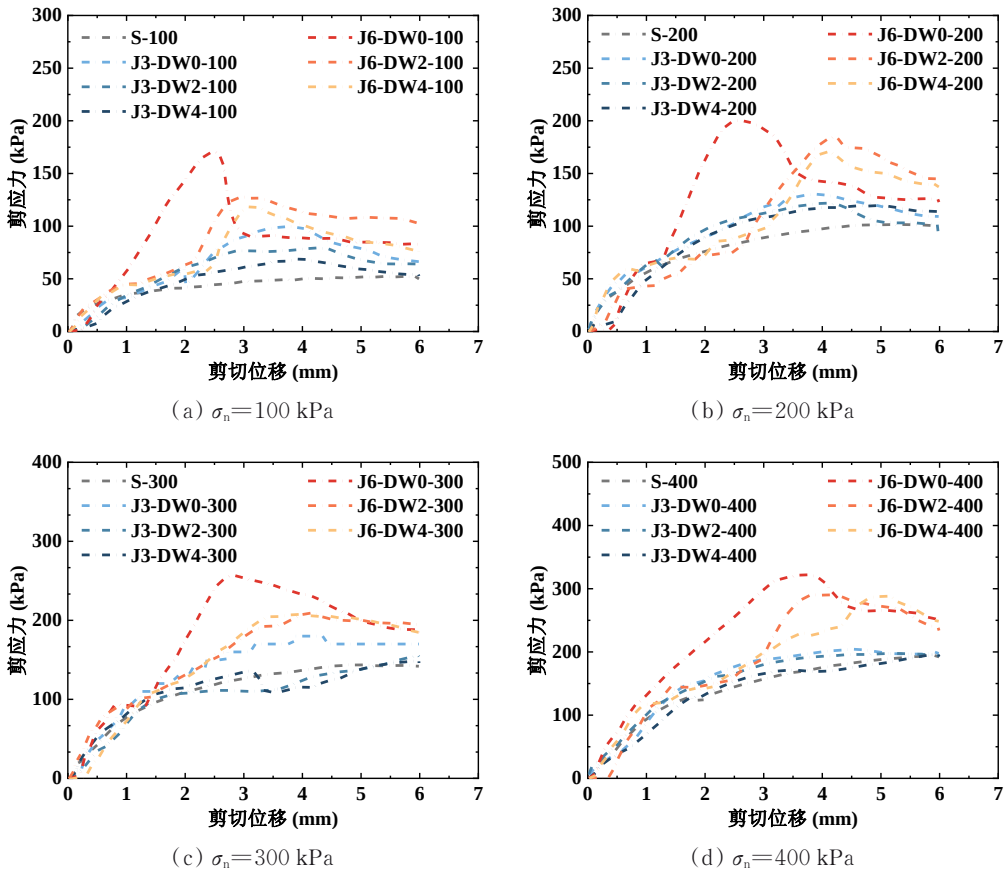


图7 剪切波速随干湿循环的变化

Fig. 7 Variation of shear wave velocity with dry-wetting cycles

此外,从图8中可以看出,干湿循环对生物激发加固效果的退化影响十分显著。经过生物激发加固的试样,即使经过4次干湿循环,其剪切强度也高于未加固砂,但其软化特征随着干湿循环次数的增加逐渐减弱,反映出胶结结构的损伤退化。特别是对于加固3次的试样,由于其胶结程度较低,经历多次干湿循环后试样的抗剪强度与未加固砂接近,说明在有限的加固条件下,干湿循环作用可几乎完全消除生物激发加固对土体剪切强度的增强效应。进一步对比可以发现,在同一法向应力水平和加固程度下,随着干湿循环次数的增加,试样的剪切强度明显降低,说明干湿循环可导致加固土体强度的衰减退化,这主要是水分反复侵入-蒸发导致胶结物质碳酸钙产生一些内部应力,进而胶结键产生断裂破坏,同时弱胶结的碳酸钙可能会从砂颗粒表面脱落[36]。

图9所示为直剪试验的法向位移-剪切位移曲线。从图中可以看出,对于未胶结砂,试样法向变形均呈现剪缩现象,这主要是由于松散、无黏性砂在剪切过程中发生了颗粒重排和孔隙压密。对于加固3次的弱胶结试样仅在低法向应力(100、200 kPa)和不进行干湿循环的情况下出现了剪胀现象,这主要是生物激发加固产生的胶结结构增强了砂颗粒间的连接,剪切过程中颗粒更难发生滑移和重排,砂颗粒的运动主要以翻越为主,导致试样出现剪胀现象。然而,在较高法向应力下(300、400 kPa),法向约束限制了剪胀行为,试样表现出剪缩现象。此外,经历4次干湿循环后,即使在低法向应力下,加固3次的试样同样表现出剪缩行为,且剪缩量大于未加固砂,这主要是干湿循环过程破坏了部



(a) σ_n=100 kPa　(b) σ_n=200 kPa

(c) σ_n=300 kPa　(d) σ_n=400 kPa

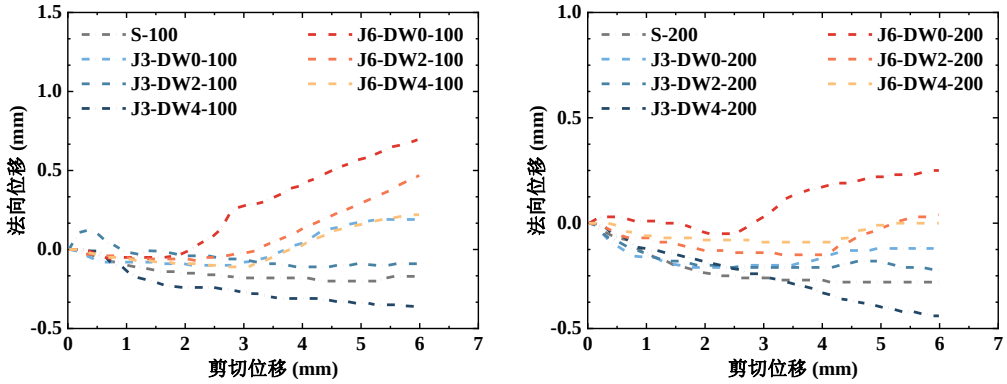
图 8　剪应力-剪切位移曲线

Fig. 8　Shear stress-shear displacement curves

分不稳固的碳酸钙胶结结构，并可能带走少量的松散颗粒，导致试样孔隙结构更加松散，试样整体性下降，在剪切过程中更易被压缩。加固 6 次的强胶结试样在未经历干湿循环时，低法向应力下表现出明显的剪胀行为，随着法向应力的增加，剪胀行为被抑制。这表明较高的胶结水平可在试样内部形成较强的颗粒骨架结构，剪切过程中表现出整体结构的抬升和试样体积膨胀。在同一法向应力和加固程度下，随着干湿循环次数的增加，加固试样的体积变化整体表现为剪胀现象减弱，且在高法向应力下干湿循环 4 次的试样表现为明显的剪缩现象，这表明反复干湿循环对胶结结构的累积损伤效应，导致其整体结构性和抗压缩能力减弱。

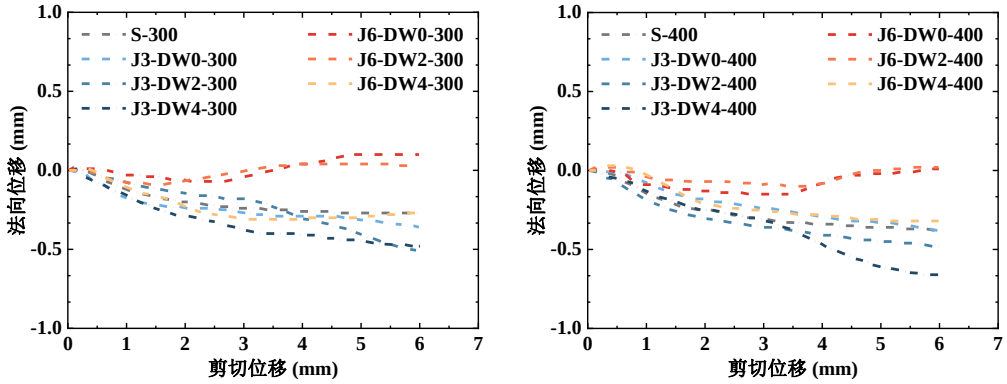
图 10 所示为生物激发加固试样的峰值强度随干湿循环次数的变化规律。整体而言，加固试样的峰值强度整体随干湿循环次数的增加呈现下降趋势，表明干湿循环削弱了生物激发产生的碳酸钙的胶结效应对土体强度的贡献。此外，干湿循环在低法向应力水平下对加固土体强度的损伤效应更加明显。以加固 3 次的试样为例，经历 4 次干湿循环后，其在 100 kPa 法向应力下的峰值强度由 100.1 kPa 下降至 69 kPa，降幅为 31.1%，而在法向应力为 400 kPa 时，峰值强度由 204.3 kPa 下降至 196.4 kPa，降幅减小为 3.87%。这种差异表现主要是因为经历相同干湿循环次数的加固试样的胶结键破坏程度相似，但在低法向应力下试样所受的约束较弱，剪切强度的发挥主要依赖被干湿循环削弱后的胶结力，因此峰值强度表现出对干湿循环次数的高度敏感性；而在高法向应力水平下，试样所受的约束增强，剪切过程中颗粒间的摩擦力对抗剪强度的贡献占比增加，使得干湿循环次数对峰值强度的削弱效应减弱。对于加固 6 次的强胶结试样，可以看出即使在经历 4 次干湿循环后，其峰值强度仍然高于同等法向应力水平下加固 3 次的试样，甚至高于未经过干湿循环的加固 3 次的试样。这表明，增加加固次数不仅提升了试样的初始强度，更重要的是通过形成更致密和稳定的胶结结构，有效地抵抗了干湿循环的劣化效应，从而在长期力学性能的提升上效果更加显著。

图 11 所示为生物激发加固试样残余强度随干湿循环次数的变化情况。整体来看，无论加固程度如何，试样的残余强度在经历干湿循环后均未表现出明显的下降趋势，残余强度随干湿循环次数的增加基本保持稳定或仅在小范围内波动。这表明干



(a) σ_n=100 kPa

(b) σ_n=200 kPa



(c) σ_n=300 kPa

(d) σ_n=400 kPa

图 9 法向位移-剪切位移曲线

Fig. 9 Normal displacement-shear displacement curves

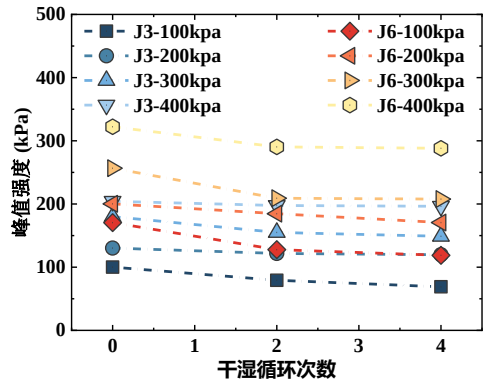


图 10 峰值强度随干湿循环的变化

Fig. 10 Variation of peak strength with dry-wetting cycles

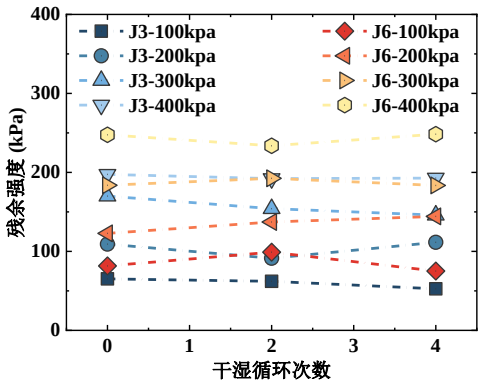


图 11 残余强度随干湿循环的变化

Fig. 11 Variation of residual strength with dry-wetting cycles

湿循环对生物激发加固试样剪切破坏后的残余强度影响有限,可能是由于剪切过程中试样达到峰值状态后胶结结构逐渐破坏,残余状态主要受试样破坏后剪切带内砂颗粒之间的摩擦力和咬合作用影响,而这些力学特性受干湿循环引起的胶结结构损伤劣化的影响较小。因此,与峰值强度相比,残余强度在干湿循环下表现出更好的稳定性。

基于 Mohr-Coulomb 破坏准则,通过线性拟合直剪试验的破坏包络线(图 12),可以确定各组试样的抗剪强度参数表观黏聚力 c 和表观摩擦角 φ,如表 2 所示。试验数据显示,生物激发加固可显著提高土体的表观黏聚力,其中加固 6 次未进行干湿循环的试样的表观黏聚力达到最高的 109.5 kPa。然而,随着干湿循环次数的增加,试样表观黏聚力呈现明显的减小趋势,特别是在前两次干湿循环后黏聚力的降幅最为明显,这一规律与前文提到的剪切波速和质量损失率的变化趋势一致。对于表观摩擦角,与未加固砂相比,加固 3 次试样的表观摩擦角降低,而加固 6 次的试样的表观摩擦角则出现一定程度的增加,表明在试验条件下观察到表观摩擦角随加固程度的增加呈现先减小后增加的趋势,这种现象与

Xiao 等[17]针对生物激发加固砂开展的三轴排水剪切试验的结果类似。Fu 等[37]认为，采用 Mohr-Coulomb 强度准则计算胶结砂的抗剪强度参数时，可能会高估表观黏聚力，而低估表观摩擦角，因此会导致低胶结程度的试样的表观摩擦角小于不考虑表观黏聚力的未加固砂的表观摩擦角，而随着胶结程度的增加，试样的峰值强度大大增加，此时即使表观摩擦角被低估，也会略高于未加固砂的表观摩擦角。

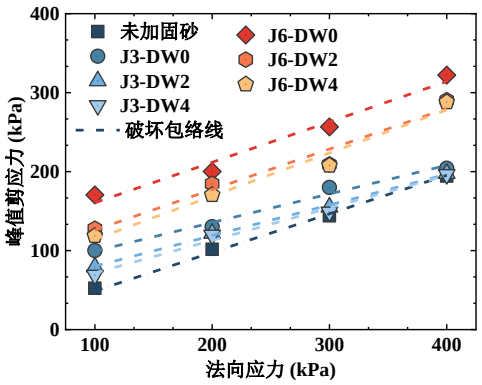


图 12　试样的破坏包络线

Fig. 12　Failure envelope of specimens

表 2　抗剪强度参数

Table 2　Shear strength parameters

编号	表观黏聚力 c/kPa	表观摩擦角 φ/(°)	R^2
未加固砂	0	26.04	0.99
J3-DW0	63.1	19.92	0.98
J3-DW2	41.4	21.21	0.99
J3-DW4	30.65	22.36	0.99
J6-DW0	109.5	27.09	0.97
J6-DW2	74.8	27.14	0.96
J6-DW4	59.95	28.61	0.98

2.3　微观结构分析

通过对未加固及不同干湿循环处理后的生物激发加固试样的 SEM 图像分析（如图 13 所示），可直观揭示生物激发 MICP 胶结砂的微观结构演化及其在干湿循环下的劣化过程。从图 13(a)可以看出，未加固砂颗粒表面本身存在一定的粗糙度，且颗粒形状不规则，棱角度高，且存在少量的天然团聚体，这可能是由于酸洗试验得出未加固砂中存在一定的碳酸钙所致。经生物激发加固 3 次未进行干湿循环时，砂颗粒间被大量碳酸钙沉淀紧密填充和桥接，孔隙显著减小，如图 13(b)所示。随着干湿循环进行，试样微观胶结结构逐渐破坏，经历 2 次干湿循环后（图 13(c)），可见试样中的孔隙增多增大，部分砂颗粒间的碳酸钙桥接丧失，胶结结构变得松散细碎，砂颗粒表面附着的碳酸钙晶体减少，并出现侵蚀孔洞；经历 4 次干湿循环后（图 13(d)），可以观察到在经历更多干湿循环的试样中存在较多的长条形孔隙，说明碳酸钙胶结结构被进一步破坏，同时可以看到砂颗粒表面附着的松散碳酸钙几乎已经被完全剥离，仅剩较大的碳酸钙晶体连接砂颗粒，且侵蚀孔洞进一步增多。试样在加固 6 次未进行干湿循环时（图 13(e)），可以观察到碳酸钙晶体更加发育、棱角分明，颗粒间形成碳酸钙桥接更加紧密，且颗粒表面附着的碳酸钙沉淀更为致密；但在经历 2 次（图 13(f)）和 4 次（图 13(g)）干湿循环后，同样可观察到试样呈现孔隙增多、胶结结构疏松与脱落的现象，且劣化形态与加固 3 次的试样经历干湿循环后类似，只是加固程度越高，形成的致密碳酸钙晶体越多，同样干湿循环后得到保留的胶结结构更多。

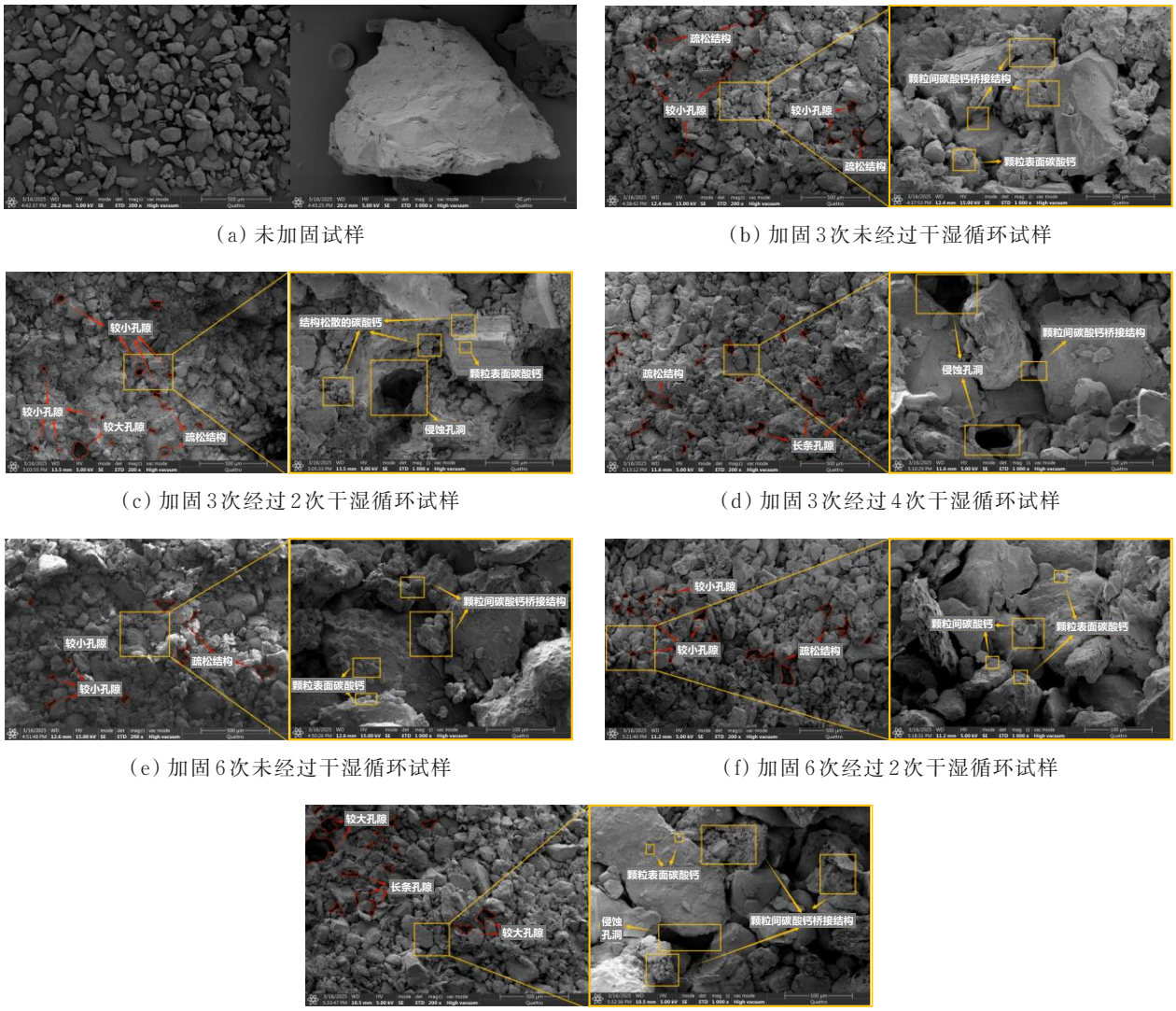
上述微观结构变化与干湿循环的物理-化学作用机制密切相关。在润湿阶段，水侵入孔隙通道，带走未结合及松散结合的细颗粒，形成悬浮液并沿通道侵蚀，此过程在循环初期尤为显著，导致质量明显损失与孔隙发展[36]。在干燥阶段，水分蒸发产生收缩应力，使较弱胶结键发生断裂[36]。研究表明[38]，干湿循环初期试样的损伤以侵蚀机制为主，因碳酸钙在短时润湿条件下溶解相对较低，而内部应力的重复作用进一步加剧胶结结构的疲劳破坏。随着循环进行，松散及弱胶结细颗粒逐步被冲刷带走，残余结构趋于稳定，故质量损失与强度退化在后续循环中逐渐减缓，最终试样中仅保留较强的碳酸钙连接，宏观上表现为强度退化和质量损失趋缓。

3　结论

通过干湿循环试验探讨了生物激发 MICP 技术加固砂的碳酸钙含量、剪切波速、质量损失率和剪切特性随干湿循环的变化规律，揭示了干湿循环对生物激发加固试样性能劣化的影响机制，主要结论如下：

1）生物激发加固会显著提高土体的强度，且随着加固次数的增加，强度提升越明显。根据 Mohr-Coulomb 破坏准则计算得到加固试样的黏聚力随加固程度的增加逐渐增加，但摩擦角表现出先减小后增加的变化趋势。

2）干湿循环会降低生物激发加固试样的峰值强度和剪切波速，同时增加试样的质量损失率，低胶结程度下的试样受干湿循环的影响更为显著。此外，碳酸钙沉积含量随干湿循环次数的增加而下降的幅度相对有限，这是因为碳酸钙难溶于水，干



(a) 未加固试样　(b) 加固3次未经过干湿循环试样

(c) 加固3次经过2次干湿循环试样　(d) 加固3次经过4次干湿循环试样

(e) 加固6次未经过干湿循环试样　(f) 加固6次经过2次干湿循环试样

(g) 加固6次经过4次干湿循环试样

图13　不同加固次数和干湿循环次数下的试样SEM图

Fig. 13　SEM images of specimens under different biotreatment cycles and dry-wetting cycles

湿循环过程中仅为碳酸钙胶结结构的断裂和剥离。

3)微观分析表明,生物激发加固后的试样在砂颗粒间及表面会形成大量的碳酸钙沉淀,高胶结程度下的碳酸钙桥接更加稳定。干湿循环早期,弱胶结碳酸钙结构断裂脱落,形成侵蚀空洞,造成质量损失和强度退化显著;随着循环进行,松散胶结物逐步被冲刷,残余结构趋于稳定,强度退化和质量损失随之减缓。

4)需要说明的是,105 ℃烘干制度属于室内加速试验条件,所得结论反映了生物激发MICP加固砂在特定加速干湿循环下的性能劣化规律,可为岸坡土体加固提供试验参考,但与实际工程中长期耐久性尚不能直接等同。

参考文献

[1] de Holanda S F, Vargas L K, Granada C E. Challenges for sustainable production in sandy soils: a review[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025, 27(1): 53-66.

[2] Daraei A, Herki B M A, Sherwani A F H, et al. Slope stability in swelling soils using cement grout: a case study [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2018, 4(1): 10.

[3] 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.

[4] 田亚坤, 伍玲玲, 禹雪阳, 等. 干湿循环作用下金属矿尾砂MICP加固体的宏观性状与细观力学特性[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9): 3104-3116.
Tian Y K, Wu L L, Yu X Y, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of metal mine tailings

with MICP solids under drying-wetting cycles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(9): 3104-3116. (in Chinese)

[5] Xu K, Huang M, Liu Z J, et al. Mechanical properties and disintegration behavior of EICP-reinforced sea sand subjected to drying-wetting cycles[J]. Biogeotechnics, 2023, 1(2): 100019.

[6] Sharma M, Satyam N. Strength and durability of biocemented sands: wetting-drying cycles, ageing effects, and liquefaction resistance[J]. Geoderma, 2021, 402: 115359.

[7] Kou H L, He X, Li Z D, et al. Effect of drying-wetting cycles on the durability of calcareous sand reinforced by MICP and recycled shredded coconut coir (RSC)[J]. Biogeotechnics, 2023, 1(3): 100038.

[8] 朱文羲, 邓华锋, 李建林, 等. 干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2): 482-491.
Zhu W X, Deng H F, Li J L, et al. Study on the deterioration law of microbial improved granite residual soil under dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(2): 482-491. (in Chinese)

[9] Gat D, Ronen Z, Tsesarsky M. Soil bacteria population dynamics following stimulation for ureolytic microbial-induced $CaCO_3$ precipitation[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 616-624.

[10] Gomez M G, Anderson C M, Graddy C M R, et al. Large-scale comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(5): 04016124.

[11] Burbank M, Weaver T, Lewis R, et al. Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(6): 928-936.

[12] Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control[J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106387.

[13] Graddy C M R, Gomez M G, DeJong J T, et al. Native bacterial community convergence in augmented and stimulated ureolytic MICP biocementation[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(15): 10784-10793.

[14] Cheng L, Shahin M A, Cord-Ruwisch R. Surface percolation for soil improvement by biocementation utilizing in situ enriched indigenous aerobic and anaerobic ureolytic soil microorganisms[J]. Geomicrobiology Journal, 2017, 34(6): 546-556.

[15] Wang Y J, Jiang N J, Saracho A C, et al. Compressibility characteristics of bio-cemented calcareous sand treated through the bio-stimulation approach[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(2): 510-522.

[16] Xiao Y, Fan W J, Fang Q Y, et al. Undrained shear behaviors of biocemented sand treated through biostimulation approach[J]. Acta Geotechnica, 2025, 20(6): 2573-2582.

[17] Xiao Y, Fan W J, Cui H, et al. Drained shear strength and dilatancy of biocemented soil by biostimulation[J]. Acta Geotechnica, 2025, 20(6): 2683-2693.

[18] DeJong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197-210.

[19] Eilers K G, Debenport S, Anderson S, et al. Digging deeper to find unique microbial communities: the strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 50: 58-65.

[20] Gomez M G, Graddy C M R, DeJong J T, et al. Stimulation of native microorganisms for biocementation in samples recovered from field-scale treatment depths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144: 04017098.

[21] Fan W J, Xiao Y, Cao B F, et al. Comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation in soil column experiments[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108335.

[22] Wang Y J, Han X L, Jiang N J, et al. The effect of enrichment media on the stimulation of native ureolytic bacteria in calcareous sand[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 17(3): 1795-1808.

[23] Wang Y J, Chen W B, Yin J H, et al. Role of biochar in drained shear strength enhancement and ammonium removal of biostimulated MICP-treated calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(2): 04023140.

[24] Cheng L, Cord-Ruwisch R. Upscaling effects of soil improvement by microbially induced calcite precipitation by surface percolation[J]. Geomicrobiology Journal, 2014, 31(5): 396-406.

[25] Ma G L, He X, Jiang X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(7): 969-981.

[26] Wang Y J, Jiang N J, Han X L, et al. Shear behavior of bio-cemented calcareous sand treated through bio-stimulation under the direct shear condition[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81 (10): 413.

[27] Choi S G, Park S S, Wu S F, et al. Methods for calcium carbonate content measurement of biocemented

soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11): 06017015.

[28] Lai H J, Cui M J, Wu S F, et al. Retarding effect of concentration of cementation solution on biocementation of soil[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(5): 1457-1472.

[29] 刘阿强, 谢浏洋, 肖杨, 等. 生物激发加固土的剪切特性大型直剪试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英 文). https://link. cnki. net/urlid/50.1218. TU.20250331.0922.002.
Liu A Q, Xie L Y, Xiao Y, et al. Large-scale direct shear test study on shear characteristics for MICP-treated soil using biostimulation approach[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering. https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250331.0922.002. (in Chinese)

[30] Shi J Q, Xiao Y, Fu G Y, et al. Calcareous silt earthen construction using biopolymer reinforcement[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106571.

[31] ASTM D559/D559M-15. Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures[S].

[32] Soon N W, Lee L M, Khun T C, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5): 04014006.

[33] Lin H, Suleiman M T, Brown D G. Investigation of pore-scale $CaCO_3$ distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4): 944-961.

[34] Shi J Q, Li H Y, Xiao Y, et al. Small strain stiffness of graded sands with light biocementation[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(10): 5273-5284.

[35] Montoya B M, DeJong J T. Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(6): 04015019.

[36] Gowthaman S, Nakashima K, Kawasaki S. Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(4): 2309-2322.

[37] Fu T Z, Haigh S K. Biocementation of a well-graded gravelly soil and macromechanical characterization[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(8): 04024061.

[38] Ciantia M O, Hueckel T. Weathering of submerged stressed calcarenites: chemo-mechanical coupling mechanisms[J]. Géotechnique, 2013, 63(9): 768-785.

（编辑 XXX）