

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.015



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物激发加固土的剪切特性大型直剪试验研究

刘阿强, 谢浏洋, 肖杨, 黄晓利, 郜逸鸣, 缙瑞楠, 崔昊

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:微生物诱导碳酸钙沉淀是一种新兴的、可持续发展的土体加固技术,其包含生物强化法和生物激发法。然而,现有研究大多局限于生物强化法,而对于生物激发法的研究相对较少,特别是大尺寸试验方面的研究更为匮乏。以重庆嘉陵江沿岸表层土为研究对象,基于生物激发法探究不同加固程度对大尺寸试样剪切特性的影响,并测定了碳酸钙含量沿不同方向的分布情况。结果表明:加固前后试样的应力-应变关系由应变硬化转变为脆性破坏和应变软化;加固前试样呈现剪缩现象,加固后试样先出现微小的剪缩,然后呈现剪胀现象;加固后试样的抗剪强度得到了大幅度提升;试样中的碳酸钙含量随着距试样顶面距离的增加而减小,并且试样的碳酸钙含量呈现外围高、中间低的分布特征。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;土壤加固;生物激发法;大型直剪试验;碳酸钙分布

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-07

Large-scale direct shear test study on shear characteristics for MICP-treated soil using biostimulation approach

LIU Aqiang, XIE Liuyang, XIAO Yang, HUANG Xiaoli, GAO Yiming,
GOU Ruinan, CUI Hao

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Microbially induced calcium carbonate precipitation is a new and sustainable technology, which includes bioaugmentation and biostimulation approaches. However, the existing related research is mostly limited to bioaugmentation approach, while research on biostimulation approach remains relatively limited, especially large-scale experiments. In this study, the surface soil along Jialing River in Chongqing is taken as the research object, and the influence of different reinforcement degrees on the shear characteristics of large-scale samples is explored based on biostimulation approach. In addition, the distribution of calcium carbonate content in different directions was also determined. The results show that the stress-strain relationship of the specimen before and after strengthening has changed from strain hardening to brittle fracture and strain softening. In terms of dilatancy, the specimen shows a phenomenon of shear shrinkage before reinforcement, while the specimen shows a slight shear shrinkage first and then a phenomenon of shear expansion after reinforcement. After

收稿日期: 2024-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(52078085)

作者简介: 刘阿强(1996-), 男, 博士生, 主要从事微生物土力学特性研究, E-mail: 20231601037@stu.cqu.edu.cn。

崔昊(通信作者), 男, 博士, 助理研究员, E-mail: cqcuilhao1@163.com。

Received: 2024-12-24

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078085)

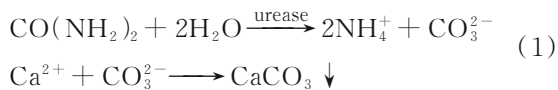
Author brief: LIU Aqiang (1996-), PhD candidate, main research interest: mechanical properties of biotreated soils, E-mail: 20231601037@stu.cqu.edu.cn.

CUI Hao (corresponding author), PhD, assistant research fellow, E-mail: cqcuilhao1@163.com.

reinforcement, the shear strength of the specimen has been greatly improved. The calcium carbonate content in the sample decreases with the increase of the distance from the top surface of the sample, and the calcium carbonate content in the sample presents a distribution pattern of high in periphery part and low in middle part. The results of this study can provide reference for the application of biostimulation approach in field tests.

Keywords: large-scale direct shear test; soil reinforcement; microbially induced calcium carbonate precipitation; biostimulation approach; calcium carbonate distribution

微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially induced calcium carbonate precipitation, 简称 MICP) 是一种新兴、绿色低碳技术, Boquet 等^[1]首次在土壤中观测到微生物矿化现象。MICP 技术的基本原理^[2]是利用某些微生物自身代谢过程中生成的脲酶与尿素反应, 生成碳酸根离子和铵根离子, 与外部添加的钙离子进行反应生成碳酸钙沉淀以达到胶结砂颗粒的作用, 其化学方程式如式(1)所示。



近年来, MICP 技术已经逐渐成为岩土工程的研究热点, 其在提高土体强度和刚度^[3-4]、土体抗渗流^[5-6]、土体抗侵蚀^[7-8]、提高松散土体抗液化能力^[9-10]等领域已经得到了广泛的研究。然而, 上述研究大多是基于生物强化法 (bioaugmentation approach) 开展的试验研究。生物强化法需要将大量具有矿化能力的细菌 (如巴氏芽孢杆菌、反硝化假单胞菌等) 注入土体内部来完成生物矿化过程。生物强化法具有以下缺点: 首先, 细菌的培育和运输需要非常严格的条件, 操作过程异常烦琐^[11]; 其次, 引入的大量非本地细菌对当地的生态环境的影响尚未可知, 同时由于对环境的相容性较差, 引入的非本地细菌的脲酶活性可能会下降^[12]。近年来, 生物激发法 (biostimulation approach) 逐渐受到了学者的关注。生物激发法是通过向土体中加入合适的营养液或激发液, 激发土体内的本地脲酶菌来完成生物矿化过程。生物激发法具有以下优点: 1) 不需要严格控制细菌培育和运输的条件, 仅需要激发土体中的本地脲酶菌; 2) 对于野外场地, 生物激发法的适用性更强^[13]。Graddy 等^[13]对生物强化法和生物激发法进行了比较发现, 通过生物强化法引入的菌株与本地细菌的竞争能力较差。Chen 等^[11]发现生物激发法可以用于加速土壤中铜的固化, 为土壤重金属污染治理提供了新的方法。Kiasari 等^[14]采用 6 种不同激发物对土体中的脲酶菌进行激发并通过直接剪切试验、无侧限抗压强度试验、渗透试验和碳酸钙含量来衡量不同激发物对脲酶菌的激发能力, 结果表明酵母浸膏的激发效果最佳。Wang 等^[15]研究了酵母提取物 (YE)、麦芽提取物 (ME) 和肉汁 (NB) 对钙

质砂中矿化细菌的激发能力, 并进一步研究了尿素浓度的影响。结果表明, 高氮源 YE 和 NB 的激发效率高于 ME, 尿素浓度较高会抑制细菌的繁殖, 在 50 mmol/L 浓度的尿素中活细胞数保持稳定。Islam 等^[16]通过对 8 种不同塑性的土从宏观和微观尺度上研究生物激发法对于低塑性至高塑性黏土的适用性, 结果表明生物激发法可以作为处理黏土工程问题的一种有效的手段。综上可知, 目前针对生物激发法加固土体的研究主要局限于单元尺度的试验, 该方法应用于大尺度的试验研究很少在报道中发现。因此, 开展基于生物激发法加固土体大型直剪试验以探究该方法在加固大尺度土体时的适用性是非常必要的。

笔者以重庆嘉陵江沿岸表层土为研究对象, 通过大型直接剪切试验研究基于生物激发法加固大尺寸土体的剪切行为, 探究试样加固前后的强度和变形特性。此外, 还研究了碳酸钙在大尺寸试样中的分布规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用的砂土取自中国重庆市嘉陵江沿岸的表层土 (5~10 cm), 由于表层土壤富含丰富的微生物, 适用于作为生物激发法^[17]。将取回的土壤剔除杂草、树枝等杂物并过筛, 土样的基本物理参数如表 1 所示^[17]。

表 1 试验用土的主要物理参数^[17]

Table 1 Main physical parameters of the test soil^[17]

最大干密度/ (g/cm ³)	最小干密度/ (g/cm ³)	平均粒 径/mm	不均匀 系数	曲率 系数	比重
1.58	1.27	0.15	2.71	1.34	2.67

1.2 激发液与胶结液

参考 Fan 等^[17]研究中的激发液配方进行试验研究。其中, 激发液中包含: 20 g/L 酵母提取物, 10 g/L 尿素, 10 g/L 氯化铵和 0.01 g/L 六水氯化镍。利用 1 mol/L 的 NaOH 溶液将配置好的生物激发液 pH 值调节至 9.0。参考 Xiao 等^[18]研究中胶结液的配方进行试验研究。胶结液中包含: 1 mol/L 的尿素、1 mol/L 的氯化钙和 0.2 g/L 的酵母提取物。

1.3 试样制备及生物激发法流程

图1为试样制备及生物激发法的过程。针对加固试样,采用亚克力材质定制一个 $290\text{ mm}\times 290\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的长方体模具,在模具底面均匀布置直径为 10 mm 的孔洞,以便激发液和胶结液能够从模具底面流出。土体装样前,在亚克力模具底面铺设一层 5 mm 厚的百洁布,以防止土颗粒在加固过程中被激发液和胶结液冲走。将土样进行预先称量并分为4等份,将称量好的土样分4层(每层 100 mm),采用欠压实法^[19]按照 20% 的相对密度装入亚克力模具中,每层土样之间进行刮毛处理,如图1(a)所示。第4层土样装填完成后,将土样压实至 400 mm 的高度,如图1(b)所示。采用亚克力的材质制作一个 $290\text{ mm}\times 290\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的长方体与试样模具连接在一起并密封处理,如图1(c)所示。在土样上表面铺设一层 5 mm 厚的百洁布,以防液体冲坏试样表面。针对未加固试样,试样的上下面不需要铺设一层百洁布,且制样模具底部不布置孔洞,制样方法与上述加固试样相同。

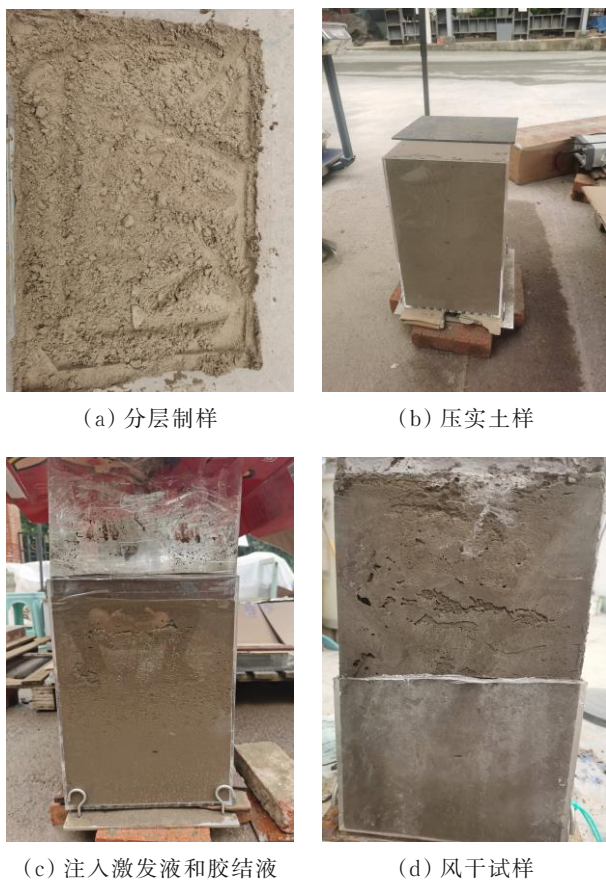


图1 试样制备及生物激发法的过程

Fig. 1 Sample preparation and biostimulation process

参考Fan等^[17]的表面渗透法对试样进行加固。具体试验步骤为:1)按照配方配置1.5倍孔隙体积的激发液,将激发液倒入试样的上表面(如图1(c)

所示),利用激发液自身重力进行渗透,并将试样激发 6 d ;2)试样激发完成后,按照配方配置1.5倍孔隙体积的胶结液,将胶结液倒入试样上表面,利用胶结液自身的重力进行渗透,在室温条件下反应 24 h 。步骤1)~2)视为完成一次加固试验;3)重复上述两个步骤,对试样共进行6次加固。加固试验完成后,将试样静置 12 d 进行风干试样,如图1(d)所示。

1.4 试验设备及步骤

试验采用的ZY50-2G大型直剪仪器来自四川大学华西岩土仪器研究所,如图2所示。剪切盒的尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的长方体,其中下剪切盒尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,上剪切盒是由4块尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的钢叠环构成。垂直加载系统的最大轴向荷载为 700 kN ,水平加载系统的最大水平荷载为 700 kN ,力的分辨率为 0.01 kN 。水平和垂直位移采用两个位移传感器量测,最大位移量程为 150 mm ,位移分辨率为 0.01 mm 。试验采用恒定剪切速率加载,剪切速率设定为 3 mm/min ,当剪切位移达到 60 mm 时试验结束^[20]。

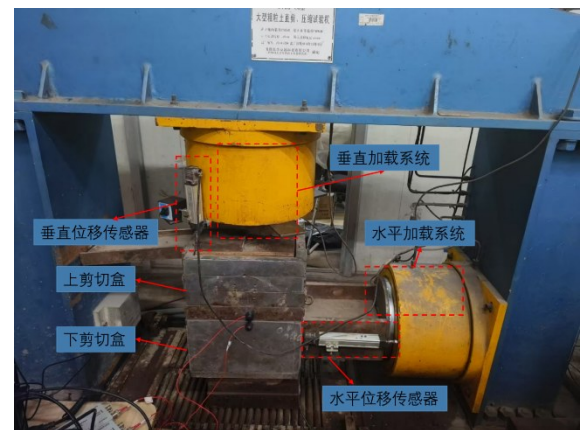


图2 大型直剪仪

Fig. 2 Large-scale direct shear device

试验的具体操作步骤:1)制备试样,对于加固试样,将其放入剪切盒正中央位置,此时加固试样与剪切盒之间有 5 mm 间隙,然后采用未加固土对这一间隙进行填充,并压实至最大干密度,对于未加固试样,直接在剪切盒中进行装样;2)启动大型直剪仪器的数据采集系统,并进行试样的预接触和位移传感器的安装,在进行预接触时,应先进行垂直预接触,再进行水平预接触;3)在数据采集系统中输入试样的尺寸,法向应力设定为 100 kPa ,然后进入试验;4)待轴向加载稳定后,开始进行对应的剪切试验阶段,当剪切变形达到 60 mm 时,表示试验结束;5)试验结束后,在数据采集系统中卸除水

平荷载和垂直荷载。

1.5 碳酸钙含量的测定

为了探究碳酸钙在加固试样中的分布规律,待剪切结束后,将加固试样分为3层,分别在距离试样上顶面5 cm、20 cm、35 cm处,每层取9个加固土样,采用酸洗法^[21]进行碳酸钙含量的测定,如图3所示。具体试验操作步骤:1)称取烘干后的加固土样若干并称量其质量,记为 M_1 ;2)将加固土样放入烧杯中,并倒入过量的盐酸,使加固土样内碳酸钙充分溶解,待无块状土样且无气泡冒出即认为酸洗完成;3)称取烧杯和滤纸的质量,记为 M_2 ,将酸洗后的土样用滤纸过滤,并使用过量的去离子水进行反复冲洗;4)将过滤后的土样放入105℃烘箱中烘至质量恒定,烘干时间不得少于8 h,测量烘干后土样和烧杯与滤纸的质量,记为 M_3 。土样的碳酸钙含量CCC计算公式如式(2)所示。

$$CCC = \frac{M_1 + M_2 - M_3}{M_1} \quad (2)$$

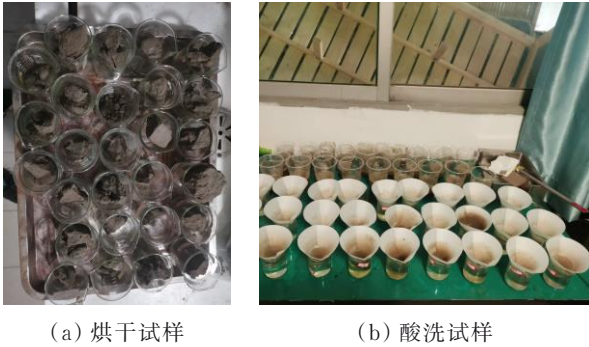


图3 酸洗法测定试样中的碳酸钙

Fig. 3 Determination of calcium carbonate in samples by the acid-washing method

2 试验结果与讨论

2.1 剪切应力-剪切位移曲线

图4为法向应力为100 kPa时,未加固试样与生物激发法加固试样的剪切应力-剪切位移关系曲线。从图4可以看出:针对未加固试样,剪切应力随着剪切位移的增大而快速增加至45.55 kPa左右,之后剪应力随着剪切位移的增大而缓慢增加至51.25 kPa,未加固试样呈现出明显的应变硬化现象。加固试样的剪切应力随着剪切位移的增大而迅速增至峰值强度255.55 kPa,之后剪切应力随着剪切位移的增大先快速陡降至222.44 kPa,而后逐渐减小直至达到恒定值188.77 kPa,故加固后的试样呈现明显的脆性破坏和应变软化行为,这一现象与Wang等^[22]和赵煜鑫等^[23]的研究结果类似。剪切应力在达到峰值强度后发生陡降这一现象可能是由

于微生物固化土中胶结碳酸钙的破坏所致^[24]。从图4可以看出,加固后试样的抗剪强度较未加固试样提升了4.99倍,说明生物激发是一种可行的MICP加固方法。

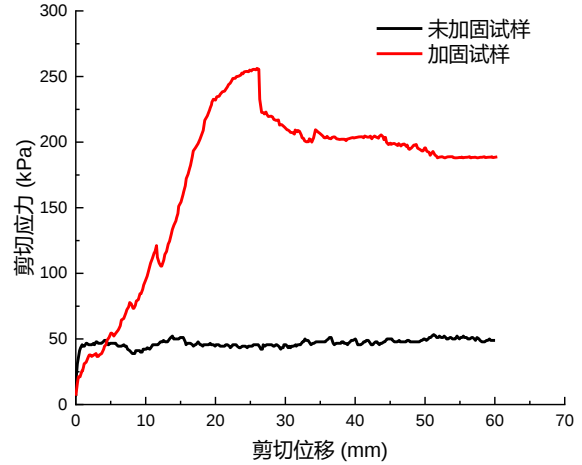


图4 基于生物激发法的不同加固程度土的剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Shear stress and shear displacement curve of soil with different reinforcement degrees based on biostimulation approach

2.2 竖向位移-剪切位移曲线

图5为法向应力为100 kPa时,未加固土与生物激发加固土的竖向位移-剪切位移关系曲线。从图5可以看出:针对未加固试样,随着剪切位移的增加,竖向位移先快速减小,然后随着剪切位移的继续增加,竖向位移缓慢减小,试样呈现剪缩现象。而对于加固试样,在很小的剪切位移条件下,试样首先经历了一个轻微的剪缩阶段,这可能是颗粒间弱胶结的破坏导致的,这一现象同样被Pakbaz等^[25]观察到。然后,随着剪切位移的继续增加,竖向位移开始增加,试样表现出剪胀现象,这可能是由于颗粒间碳酸钙的胶结、颗粒间的互锁以及颗粒的重排。综上所述,针对未加固试样,体积减小,呈现剪缩现象;针对加固试样,试样体积先减小后增大,呈现先略微剪缩后剪胀的现象。

2.3 碳酸钙含量分布规律

在进行微生物固化土的大型直剪试验时,研究试样高度方向和剪切方向土壤中碳酸钙含量的均匀性是非常重要的^[26]。图6为基于生物激发法的固化土试样的碳酸钙含量分布。从图6(a)中可以看出,碳酸钙含量随着距试样顶部的距离的增加而减小,顶部的碳酸钙含量比底部的碳酸钙含量高约9.32%,这与Mahawish等^[27]的研究结果一致。产生上述现象的主要原因为:生物激发过程中,采用表面渗透法向试样中加入激发液,激发液在试样上部

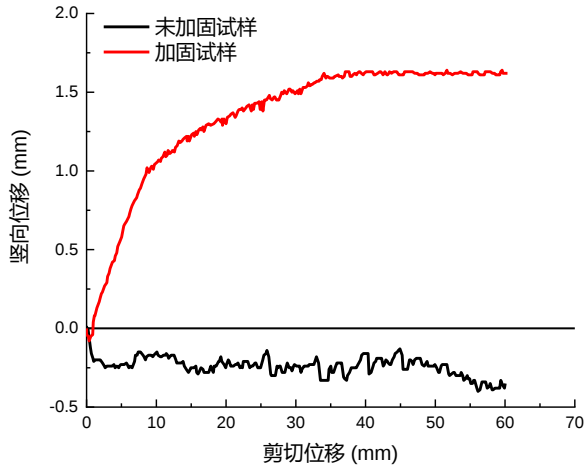
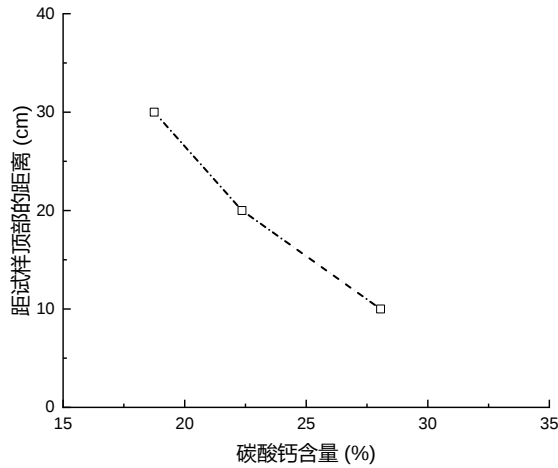


图 5 基于生物激发法的不同加固程度土的竖向位移-剪切位移关系曲线

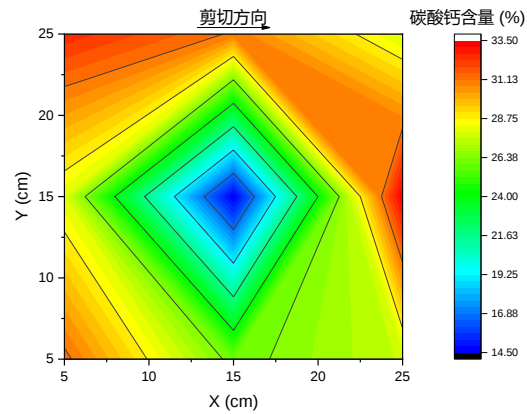
Fig. 5 Vertical displacement and shear displacement curve of soil with different reinforcement degrees based on biostimulation approach

的滞留时间更长,导致试样上部的脲酶菌活性更

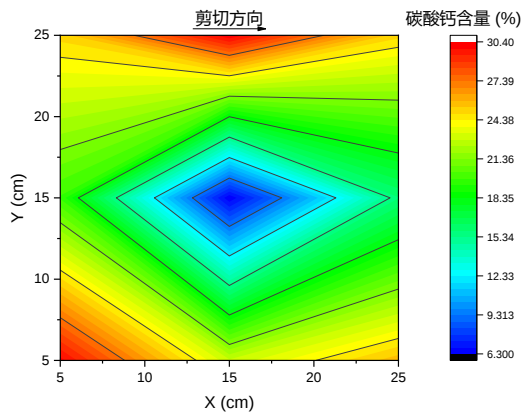
高;胶结过程中,胶结液同样采用表面渗透法加入试样内部,试样上部的微生物首先发生矿化反应产生碳酸钙沉淀对土颗粒进行胶结,土颗粒间的孔隙被堵塞和填充,使胶结液不能很好地渗透至试样下部,胶结液在试样上部的滞留时间增加,进一步导致试样上部碳酸钙生成量增加^[26, 28]。同时,试样上部的脲酶菌活性更高也会导致碳酸钙含量更高^[17]。从图 6(b)~(d)中可以看出,距离试样顶面的第 1 (10 cm)、2 (20 cm)、3 (30 cm) 层的碳酸钙含量分布基本呈现外围高,中间低的现象,即沿剪切方向的碳酸钙含量随着距离的增大,呈现先减小后增大的趋势。这一现象与 Shen 等^[29]、Li 等^[30]和 Deng 等^[31]的研究结果一致,Shen 等^[29]的研究结果表明,方解石胶结的径向不均匀性对于固化土样品的 UCS 影响不大。产生碳酸钙含量外围高,中间低现象的原因可能是由于渗流的边壁效应。在 MICP 的反应过程中由于产生碳酸钙堵塞了渗流通道,进一步增大了边壁效应。



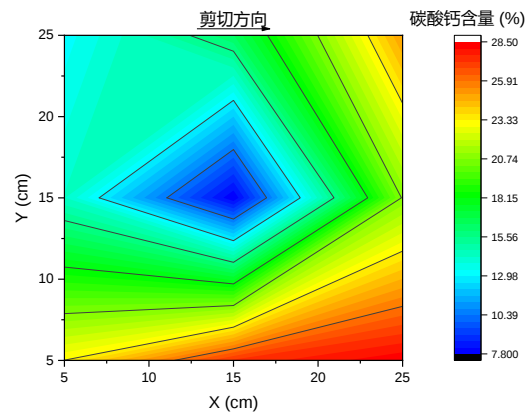
(a) 沿试样高度方向的碳酸钙含量分布



(b) 第 1 层 (10 cm) 碳酸钙含量分布



(c) 第 2 层 (20 cm) 碳酸钙含量分布



(d) 第 3 层 (30 cm) 碳酸钙含量分布

图 6 基于生物激发法的加固土试样的碳酸钙含量分布

Fig. 6 Distribution of calcium carbonate content in reinforced soil samples based on biostimulation approach

3 结论

进行了基于生物激发法的微生物加固土大型直剪试验,对加固前后试样的强度和变形进行了探讨与分析,并探讨了碳酸钙在大型试样中的分布规律,得到以下主要研究结论:

1)未加固试样呈现出应变硬化现象,生物激发法加固试样呈现出明显的脆性破坏和应变软化现象。加固后试样的抗剪强度较未加固试样提升了4.99倍,抗剪强度从51.25 kPa提升至255.55 kPa。

2)未加固试样呈现出剪缩现象,而生物激发法加固试样先出现微小的剪缩,然后出现明显的剪胀现象。

3)试样中的碳酸钙含量随着距试样顶面距离的增加而减小,顶部的碳酸钙含量比底部的碳酸钙含量高约9.32%,并且试样的碳酸钙含量呈外围高,中间低的分布特征。

参考文献

- [1] BOQUET E, BORONAT A, RAMOS-CORMENZA NA A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon [J]. *Nature*, 1973, 246(5434): 527-529.
- [2] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(7): 1347-1358.
LIU H L, ZHAO C, XIAO Y. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: Progress and challenges [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [3] XIAO Y, YUAN Z X, LIN J, et al. Effect of particle shape of glass beads on the strength and deformation of cemented sands [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(6): 2123-2131.
- [4] XIAO Y, XIAO W T, WU H R, et al. Particle size effect on unconfined compressive strength of biotreated sand [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 42: 101092.
- [5] ZHANG J K, SU P D, LI L. Microbial induced carbonate precipitation modified steel slag: Mechanical improvement and erosion resistance to sulfate attack [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136982.
- [6] 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.
- [7] WANG Y N, LI S K, LI Z Y, et al. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(6): 3273-3285.
- [8] LIU K W, JIANG N J, QIN J D, et al. An experimental study of mitigating coastal sand dune erosion by microbial- and enzymatic-induced carbonate precipitation [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 467-480.
- [9] XIAO Y, HU J, SHI J Q, et al. Undrained cyclic responses of biocemented calcareous silty sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(10): 6683-6690.
- [10] XIAO P, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(12): 1849-1862.
- [11] CHEN X Y, ACHAL V. Biostimulation of carbonate precipitation process in soil for copper immobilization [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 705-713.
- [12] 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.
- [13] GRADDY C M R, GOMEZ M G, KLINE L M, et al. Diversity of sporosarcina-like bacterial strains obtained from meter-scale augmented and stimulated biocementation experiments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(7): 3997-4005.
- [14] KIASARI M A, PAKBAZ M S, GHEZELBASH G R. Comparison of effects of different nutrients on stimulating indigenous soil bacteria for biocementation [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(6): 4019067.
- [15] 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.
- [16] ISLAM M T, CHITTOORI B C S, BURBANK M. Evaluating the applicability of biostimulated calcium carbonate precipitation to stabilize clayey soils [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(3): 04019369.
- [17] 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.
- [18] XIAO Y, WU B Y, JIANG X, et al. Avalanches and failures in bio-stimulated soils [J]. *Acta Geotechnica*, 2025, 20: 1911-1920.
- [19] LADD R S. Preparing test specimens using undercompaction [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, 1(1): 1-11.

- 16-23.
- [20] 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)
- [21] 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.
- [22] WANG Y J, JIANG N J, HAN X L, et al. Shear behavior of biochar-amended biocemented calcareous sand treated by biostimulation [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(1): 04022260.
- [23] 赵煜鑫, 张禄乾, 李旭, 等. 宽饱和度范围非饱和粗细混合土的强度演化规律: 试验现象[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(11): 2278-2288.
- ZHAO Y X, ZHANG L Q, LI X, et al. Unsaturated shear strength characteristics of coarse-fine mixed soils in a wide range of degree of saturation: Experimental phenomena [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(11): 2278-2288. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] PAKBAZ M S, BEHZADIPOUR H, GHEZELBASH G R. Evaluation of shear strength parameters of sandy soils upon microbial treatment [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2018, 35(8): 721-726.
- [26] XIAO Y, WANG Y, WANG S, et al. Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1417-1427.
- [27] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates [J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(4): 1019-1025.
- [28] WU C Z, CHU J, WU S F, et al. Microbially induced calcite precipitation along a circular flow channel under a constant flow condition [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14 (3): 673-683.
- [29] SHEN J W, WANG H B, ZHOU B, et al. Investigation of the effect of microbial-induced calcite precipitation treatment on bio-cemented calcareous sands using discrete element method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 158: 105365.
- [30] LI M D, LI L, OGBONNAYA U, et al. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(4): 04015166.
- [31] DENG X J, LI Y, LU D, et al. Cementing mechanism of MICP-treated mortar and performance improvement by innovative molds [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2024, 36(7): 04024150.
- (编辑 XXX)