

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.036



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统的 开发与应用

燕江, 吴焕然, 肖杨, 刘汉龙
(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 微生物加固技术是一种利用微生物代谢活动固化岩土体的新型环保加固技术。目前微生物胶结力学特性研究多聚焦于单元或现场尺度, 颗粒尺度的微生物胶结强度研究较少, 传统岩土测试仪器难以满足颗粒尺度微生物胶结强度的精确测量需求。为精确测试颗粒尺度微生物胶结力学特性, 开发了颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统, 并使用该系统开展了颗粒尺度微生物胶结的拉伸强度测试。该系统由位移控制模块、拉力测量模块、试样固定模块及影像观测记录模块组成。位移控制模块控制加载端稳定运行, 拉力测量模块精确测量并记录拉伸力变化, 试样固定模块稳固试样以避免滑动或偏移, 影像观测记录模块实时记录试样拉伸过程中的破坏行为。详细介绍了典型试样制备、测试过程及测试结果分析, 测试结果表明: 颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统具有精度高、稳定性好的特点, 能有效量化颗粒尺度微生物胶结的抗拉强度, 并清晰捕捉拉伸过程中粒间胶结的破坏特征, 为微生物加固岩土体的力学性能研究提供可靠的试验系统支持。

关键词: 微生物加固技术; 粒间微生物胶结; 抗拉强度; 测试系统; 力学特性; 破坏过程

中图分类号: TU415 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-06

Development and application of a particle-scale tensile strength testing system for biocemented bond

YAN Jiang, WU Huanran, XIAO Yang, LIU Hanlong

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

Abstract: Biocementation technology is an emerging eco-friendly cementation technology that utilizes the metabolic activity of microorganisms to cement geomaterials. The particle-scale studies on the strength of biocemented bonds remain rare, although extensive research have been conducted on the mechanical properties of biocemented bonds at the element or field scale. Traditional geotechnical testing equipment is insufficient for accurately measuring the strength of biocemented bonds at the particle scale. To precisely measure the mechanical properties of biocemented bonds at the particle scale, a particle-scale tensile testing system for

收稿日期: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(52425806、42377155、52108303)

作者简介: 燕江(1999-), 男, 主要从事微生物胶结的颗粒尺度力学特性研究, E-mail: yanjiang8_21@163.com。

吴焕然(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: hwucqu@163.com。

Received: 2025-01-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52425806, 42377155, 52108303)

Author brief: YAN Jiang (1999-), main research interests: particle-scale mechanical properties of biocemented bonds, E-mail: yanjiang8_21@163.com.

WU Huanran (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: hwucqu@163.com.

biocemented bonds was developed and the tensile strength tests for particle-scale biocemented bonds was carried out with this system. This testing system was comprised of a displacement control module, a tension measurement module, a specimen fixing module, and an imaging observation and recording module. The displacement control module ensures the stable operation of the loading stage, while the tension measurement module accurately measures and records the evolution of tensile force. The specimen fixing module securely holds specimens to prevent slippage or misalignment. The imaging observation and recording module captures and records the failure behavior of the specimen during the tensile process in real time. Detailed descriptions of specimen preparation, the testing process, and tensile test results were provided. The test results demonstrate that the testing system exhibits high precision and excellent stability. It effectively measures the tensile strength and clearly captures the failure characteristics of biocemented bonds upon tensile loading, providing reliable experimental system for the study of the mechanical properties of biocemented geomaterials.

Keywords: biocementation technology; interparticle biocemented bond; tensile strength; testing system; mechanical properties; failure process

微生物加固技术是一种利用微生物代谢活动增强岩土体性能的绿色加固技术^[1-3]。该技术通过引导特定微生物在环境中进行一系列生物化学反应,促使碳酸钙等矿物质沉积于岩土体孔隙中,起到胶结或填充作用,改善土体物理力学性能^[4-6]。近年来,学者们开展了大量试验,探究微生物加固技术的应用效果。试验结果表明,微生物加固技术能有效提高土体的强度与刚度^[7-9]、降低渗透性^[10]、增强抗侵蚀能力^[11]及液化抵抗性能^[12],同时减少颗粒破碎^[13],降低可压缩性^[14],并改善土体的导热性能^[15]等。

现有微生物加固土体的力学特性研究大多集中于单元尺度或现场尺度^[16-18],颗粒尺度微生物胶结的相关研究尚不多见。为揭示微生物胶结土的多尺度力学特性,学者们开始关注颗粒尺度的微生物胶结特性。Ham等^[19]开展了颗粒尺度微生物胶结的拉伸和剪切试验,发现粒间胶结存在3种不同的破坏模式,结合碳酸钙含量分析了不同破坏模式下强度的差异原因。Xiao等^[20]基于自主设计的胶结压缩试验装置,开展微生物胶结的颗粒尺度压缩试验,研究了胶结材料、颗粒间距和胶结程度等因素对粒间胶结压缩力学行为与破坏模式的影响。然而,传统岩土试验设备通常针对单元尺度试样的力学测试设计,试样尺寸较大;设备运行过程伴随着较大的机械振动;传感器量程也相对较大,测量范围为N到kN量级,绝对精度不足。针对颗粒尺度微生物胶结试样而言,传统岩土力学测试仪器存在适应性差、振动干扰强、传感器精度不足等问题,无法直接用于颗粒尺度试样的力学测试,亟需开发精密高效的颗粒尺度力学测试系统,以满足颗粒尺度微生物胶结力学特性测试需求。

为便于测试颗粒尺度微生物胶结力学特性,笔

者自主研发了颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统,并通过实验验证了系统的可靠性。

1 抗拉强度测试系统的组成

颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统是一套高精度的试验系统,其测试原理如图1所示,通过轻质高强夹具与精密位移加载器的配合,实现颗粒间微生物胶结在拉伸荷载作用下的力学性能测试。如图2所示,测试系统由4个核心模块组成:位移控制模块、拉力测量模块、试样固定模块及影像观测记录模块。通过精准的位移控制与力学测量,结合实时影像观测记录,能全面、动态地观测粒间微生物胶结的拉伸力学行为。

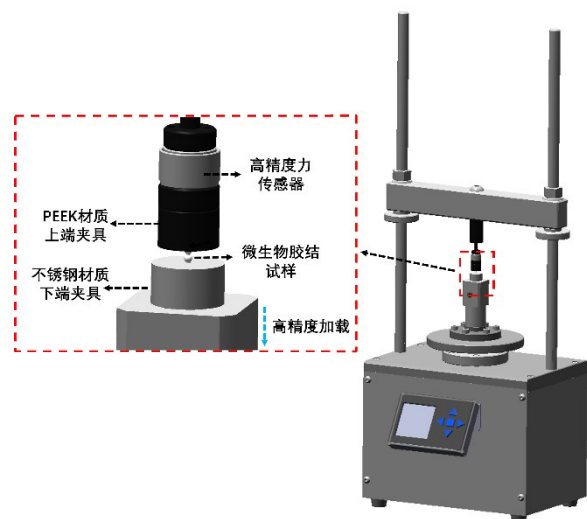


图1 拉伸强度测试系统的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile strength testing system

1.1 位移控制模块

位移控制模块负责精确控制试样在加载过程中的位移,确保试验按照预定的速率平稳进行。为提高试验效率与数据质量,基于市场上成熟的小型

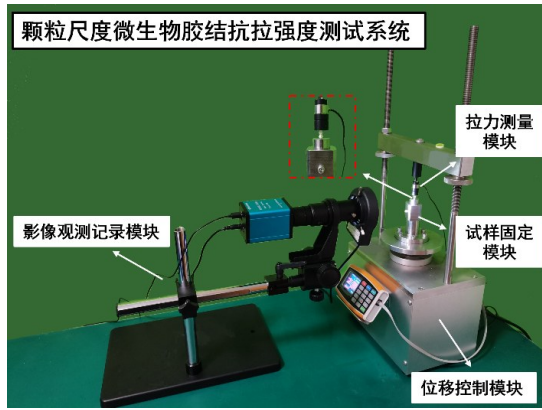


图2 颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统

Fig.2 Particle-scale tensile strength testing system for biocemented bond

位移控制设备设计位移控制模块。位移控制模块能实现力控制、位移控制,控制精度在万分之一,速度可实现 0.0001 mm/min 到 18 mm/min 无级变速调节。如图3所示,位移控制模块包括主机、加载端、两侧立柱及立柱之间的横梁。主机上配置数控键盘,具备自动化调节功能,控制加载端以设定的速度开展拉伸试验。两侧立柱对称设置,横梁通过左右螺母固定在立柱上。对于不同高度的试样,调节螺母位置,实现试验空间高度的调节,调节过程中,利用水平仪严格校准横梁水平。系统通过高精度伺服驱动装置,按照预设的拉伸速度或位移范围进行实时调整,实现试样位移的精细调节,确保试验数据的准确性与可重复性,为后续的力学分析提供可靠基础。



图3 位移控制模块

Fig.3 Displacement control module

1.2 拉力测量模块

拉力测量模块负责精确测量试样在拉伸过程中所受的拉力。如图4所示,拉力测量模块包括转接件、高精度力传感器。转接件是高精度力传感器与横梁之间的连接枢纽。对于颗粒尺度微生物胶结试样,其抗拉能力较弱,一般在 N 到 mN 量级^[21]。为了准确测量粒间微生物胶结的抗拉力,系统采用量程为 5 N 的高精度力传感器,测量精度为 1 mN ,满足测量精度要求。传感器适合在荷载变化较小、加载速率不高的条件下进行测量,可精确捕捉微小的拉力变化,确保拉伸试验数据的准确性与可靠性。

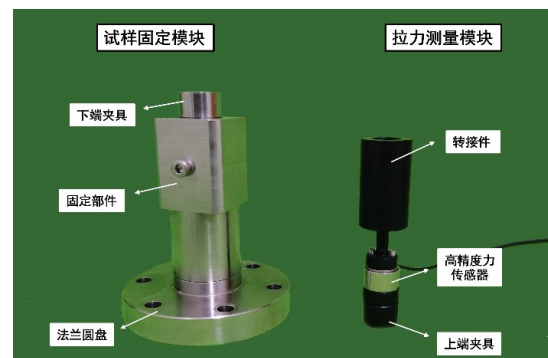


图4 拉力测量模块及试样固定模块

Fig.4 Tension measurement and specimen fixation modules

考虑到不同颗粒材料对微生物胶结强度的影响,拉力测量模块的力传感器采用模块化方案,配备量程为 20 N 和 100 N 的高精度传感器,测量精度分别为 10 mN 和 100 mN 。通过更换不同量程的传感器,增强测量系统的灵活性。实际试验中,可以根据试样条件快速更换传感器,满足不同测试条件下的精确测量需求。

1.3 试样固定模块

试样固定模块负责稳固试样,确保试样在拉伸试验过程中的稳定性与精确对位。如图4所示,试样固定模块包括法兰圆盘、固定部件、上端夹具及下端夹具。法兰圆盘通过螺栓与加载端连接,上端夹具通过螺杆与高精度力传感器连接。考虑到高精度力传感器的低量程特性,减小连接至传感器的上端夹具的重量是设计的关键。上端夹具采用轻质高强的 PEEK 材料(聚醚醚酮, Polyether ether ketone),其密度为 1.3 g/cm^3 ,拉伸强度为 112 MPa ,弯曲强度可达 191 MPa ^[22]。该材料具有优异的机械性能与耐腐蚀性,能有效满足夹具在实验中的使用需求^[23]。PEEK 材质的上端夹具质量仅为 2.39 g ,在保证传感器安全的前提下,尽可能减小上端夹具重量对传感器量程的占用。

由于颗粒尺度微生物胶结的低强度和易损性,

常规刚性夹具夹持极易对试样造成损伤。系统采用环氧树脂固定颗粒尺度试样,最大程度降低夹持过程中夹具对试样的损伤,确保试验结果的可靠性。上端夹具为直径为 15 mm 的圆柱形结构,一侧为圆盘用于固定试样,另一侧设置螺杆连接至上端高精度力传感器。下端夹具为直径为 20 mm 的圆柱形结构,一侧为圆盘用于固定试样,另一侧设置螺纹孔,通过螺栓与下端固定部件连接。试验中颗粒尺度微生物胶结试样的两个颗粒通过环氧树脂分别固定在上、下端夹具的圆盘表面,有效传递施加的拉伸力,避免偏心加载,确保试验数据的准确性与一致性。该试样固定模块的设计充分考虑了试样的尺寸、形态以及材料特性,适应于不同类型颗粒尺度微生物胶结试样的固定需求。

1.4 影像观测记录模块

在颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试中,影像观测记录模块实时观测并记录试样在拉伸过程中的破坏过程,为试验数据分析提供可视化支持。粒间微生物胶结的尺寸微小,通常在毫米级尺度,拍摄时需使用高倍率显微镜头,以清晰呈现其破坏过程。同时,为确保相机与镜头在拍摄过程中稳定无位移,需配置高稳定性的辅助支架进行固定支持,防止因震动或偏移导致图像失真。

影像观测记录模块可自行搭配零件组装,但可能出现兼容性差、性能不佳等问题。系统采用 GAOPIN 显微镜 GP-300C,并搭载稳定性辅助支架。如图 5 所示,影像观测记录模块由光学显微镜头、高清相机及固定支架组成。系统拥有 20~50 倍电子放大倍率,支持动态拍摄,配有可调节固定支架,能精确捕捉试样在拉伸负荷作用下的形变与破裂过程。通过高效的图像采集与精确的后处理,系统能够分析并提取关键的破坏特征,例如裂纹扩展、材料断裂等失效现象。影像观测记录模块能提

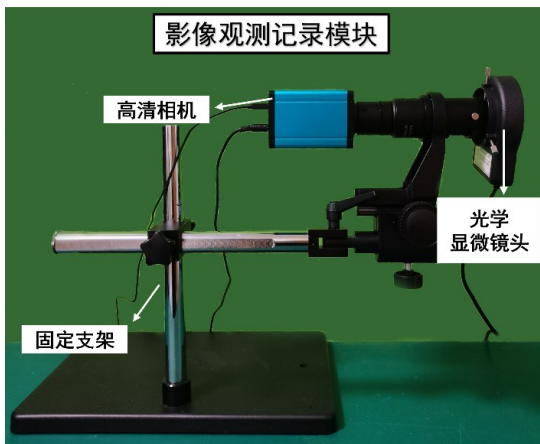


图 5 影像观测记录模块

Fig.5 Imaging observation and recording module

供精确的视觉支持,辅助解析拉伸过程中的颗粒尺度力学机制,为微生物胶结拉伸力学行为研究提供重要的图像分析依据。

2 典型测试结果与分析

2.1 试样制备

为测量单元试样中粒间胶结的抗拉强度特性,直接从微生物胶结单元试样中获取粒间胶结试样。测试所用材料为高精度玻璃珠,平均直径为 4 mm,用去离子水洗净烘干后备用。试样加固模具为圆柱形,上部开口,下部设置注浆口。装样前,在圆柱模具底部放置圆形百洁布,周围放置一层激光打印纸,紧贴模具内壁,避免试样与模具内壁粘连,方便取样。将干燥玻璃珠放入圆柱模具中,按照相对密度为 70% 进行装样^[24]。装样完成后,在试样上部放置圆形百洁布。圆柱试样的高度和直径均为 50 mm。

试样加固采用巴氏芽孢八叠球菌 (*Sporosarcina Pasteurii*) 作为脲酶菌。菌液脲酶活性为 1.2~1.4 mmol/min,吸光度 OD₆₀₀ 值为 0.9~1.6。反应液由 2 mol/L 的氯化钙溶液与 2 mol/L 的尿素溶液按照体积比 1:1 混合,最终反应液中氯化钙和尿素的浓度均为 1.0 mol/L。试验采用低 pH 一相法注浆加固砂柱试样^[25]。将菌液与反应液按照体积比 1:1 混合,然后将混合溶液从模具底部注浆口注入,注入体积为试样孔隙体积的 1.2 倍,封闭注浆口,静置反应 12 h。反应完全后,打开注浆口排出废液,然后注入去离子水清洗,清洗完成后重复以上操作,开始下一次注浆加固。试验中试样的注浆加固次数为 15。完成微生物加固后,取出试样并放入去离子水中浸泡,烘干备用。随后,利用破碎锥破坏微生物加固的单元试样^[19],获取微生物胶结的双颗粒试样。

2.2 测试过程

在下端夹具旁布置两个激光水平仪,以十字交叉方式放置。将微生物胶结试样的一端置于下端夹具圆盘表面,通过环氧树脂固定。在环氧树脂固化期间,参考激光水平仪的竖向激光,调整试样,使试样长轴方向与轴向加载方向平行,防止试样倾斜。固化完成后,调节位移控制模块的加载端位置,使试样上端接近上端夹具的圆盘表面,并用环氧树脂固定试样上端,等待环氧树脂完全固化(20~30 min),完成试样的固定。

调节影像观测记录模块的固定支架,确保试样位于镜头视野中央,同时根据试样尺寸与测试要求,适当调整光学显微镜的倍率与位置,使试样处

于最佳焦距范围内。在试样旁边放置标尺,为后续图像分析提供尺寸标定。调整完毕后,固定镜头与支架位置,确保影像观测记录模块在试验过程中的稳定。

在主机操作界面设定加载模式与加载速度,该测试采用匀速加载,速度设置为 0.2 mm/min ,打开影像观测记录模块,开始摄像。在加载过程中,观察粒间胶结的力-位移曲线及粒间胶结的变化,判断试验是否结束。试验结束后,取下拉伸夹具的上、下端夹具,利用除胶剂清除夹具圆盘表面的环氧树脂,收集破坏试样的两端颗粒分别保存。待环氧树脂清除后,将上、下端夹具重新安装回原位置,完成颗粒尺度微生物胶结的拉伸测试。

2.3 结果与分析

图6为微生物胶结试样抗拉强度测试的典型力-位移曲线。在加载初期,拉力随着位移的增加逐渐增大,呈线性关系;随着轴向位移逐渐增加,拉力达到峰值(1.748 N);峰值拉力后,拉力迅速下降,呈脆性破坏特征。

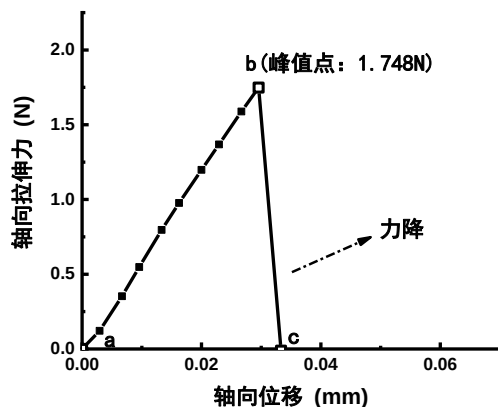


图6 粒间微生物胶结试样抗拉强度测试典型力-位移曲线

Fig.6 Typical force-displacement curves for tensile strength testing of particle-scale biocemented specimen

图7展示了微生物胶结试样在抗拉强度测试中的典型破坏过程,破坏过程对应的受力状态已在图6中标明。在拉伸加载的初期阶段(a)至峰值点间(b),随着轴向拉伸位移的增加,粒间胶结表面未发生明显变化,试样表现出较高的刚度,能够持续承受逐步增加的拉伸力。在峰值点后,试样内部积累的应力迅速释放,粒间胶结处瞬间出现一条贯穿裂纹,其方向大致与加载方向垂直,直接导致试样破坏(c),没有经历明显的裂纹扩展过程。这一破坏过程表明,颗粒尺度微生物胶结试样在拉伸作用下的脆性特征极为显著,裂纹快速贯穿胶结导致试样破坏,表现为粒间微生物胶结的直接断裂,且贯穿裂

纹的方向与加载方向大致垂直。

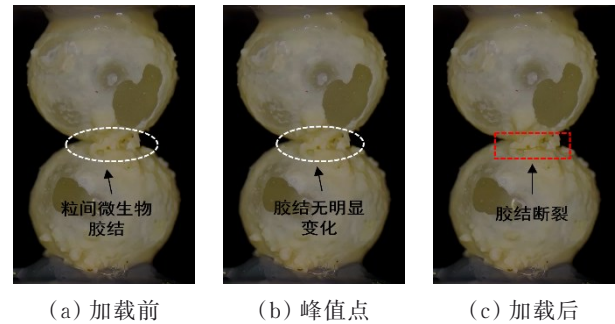


图7 粒间微生物胶结试样的典型破坏过程

Fig.7 Typical failure process of particle-scale biocemented specimen

3 结论

针对微生物胶结颗粒尺度力学特性研究不足、缺乏精密高效的颗粒尺度力学测试系统等问题,通过多模块集成,开发了一套颗粒尺度微生物胶结抗拉强度测试系统,并通过试验验证了该系统的测量精度与稳定性。结果表明,该系统能全面、精确地观测微生物胶结材料在拉伸过程中的力学响应;位移控制模块能精准调节拉伸位移,其控制精度达到万分之一,速度可实现 0.0001 mm/min 到 18 mm/min 的无级变速;拉力测量模块采用模块化力传感器方案,测量精度最高可达 1 mN ,保证拉力测量的精度与可靠性;试样固定模块选用轻质高强 PEEK 材料,减少了对传感器量程的占用,保证了测量精度,并确保试样在拉伸过程中的稳定性;影像观测记录模块可清晰捕捉粒间胶结的破坏过程,为机理分析提供可视化支持。该系统能精确捕捉粒间微生物胶结在颗粒尺度拉伸力学特性及断裂行为,为深入理解微生物胶结力学特性与失效机制提供有效的设备支持;该系统的测量结果能为颗粒离散元等数值模型提供精确的细观输入参数,为微生物胶结岩土体的离散元模拟提供重要的数据支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [3] LAI H J, DING X Z, CUI M J, et al. Factors affecting the effectiveness of biocementation of soil [J]. Biogeo-

- technics, 2024, 2(3): 100087.
- [4] 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.
- [5] THOMAS O' DONNELL S, KAVAZANJIAN E Jr. Stiffness and dilatancy improvements in uncemented sands treated through MICP [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 02815004.
- [6] WU H R, SHI J Q, XIAO Y, et al. Microbial mineralization: A promising approach for stone cultural relics restoration [J]. Biogeotechnics, 2023, 1: 100053.
- [7] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [8] WHIFFIN V S, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [9] VENDA OLIVEIRA P J, COSTA M SDA, COSTA J N P, et al. Comparison of the ability of two bacteria to improve the behavior of sandy soil [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1): 06014025.
- [10] VANDEVIVERE P, BAVEYE P. Relationship between transport of bacteria and their clogging efficiency in sand columns [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(8): 2523-2530.
- [11] XIAO Y, MA G L, WU H R, et al. Rainfall-induced erosion of biocemented graded slopes [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(1): 04021256.
- [12] 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.
- [13] XIAO Y, CHEN H, STUEDLEIN A W, et al. Restraint of particle breakage by biotreatment method [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(11): 04020123.
- [14] VAN PAASSEN L A, DAZA C M, STAAL M, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 168-175.
- [15] VENULEO S, LALOUI L, TERZIS D, et al. Microbially induced calcite precipitation effect on soil thermal conductivity [J]. Géotechnique Letters, 2016, 6(1): 39-44.
- [16] MA G L, XIAO Y, FAN W J, et al. Mechanical properties of biocement formed by microbially induced carbonate precipitation [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(11): 4905-4919.
- [17] MINTO J M, LUNN R J, MOUNTASSIR GEL. Development of a reactive transport model for field-scale simulation of microbially induced carbonate precipitation [J]. Water Resources Research, 2019, 55(8): 7229-7245.
- [18] GOWTHAMAN S, KOIZUMI H, NAKASHIMA K, et al. Field experimentation of bio-cementation using low-cost cementation media for preservation of slope surface [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02086.
- [19] HAM S M, MARTINEZ A, HAN G, et al. Grain-scale tensile and shear strengths of glass beads cemented by MICP [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(9): 04022068.
- [20] XIAO Y, XIAO W T, WU H R, et al. Fracture of interparticle MICP bonds under compression [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(3): 04022316.
- [21] XIAO Y, YAN J, WU H R, et al. Tensile strength and fracture of interparticle MICP bonds [J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(10): 06024019.
- [22] LI T, SONG Z Y, YANG X F, et al. Influence of processing parameters on the mechanical properties of peek plates by hot compression molding [J]. Materials, 2023, 16(1): 36.
- [23] GUO Z C, HE J J, GAO R X, et al. Molding of polyether ether ketone (PEEK) and its composites: A review [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2024, 25(10): 788-823.
- [24] 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.
- [25] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.

(编辑 XXX)