

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.002



微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究

郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 崔明娟, 吴超传
(华中科技大学 岩土与地下工程研究所, 武汉 430074)

摘要:微生物固化(MICP)技术能显著提高土体的抗剪强度,但微生物固化土体也存在脆性破坏特征显著的缺陷。向待固化砂土中掺入一定量的纤维,以改善微生物固化砂土的脆性破坏特性,并基于固结排水三轴试验研究了微生物固化纤维加筋砂土的抗剪强度特性,在此基础上探讨胶结次数、纤维含量、纤维长度以及试样初始相对密实度等参数对微生物固化纤维加筋砂土剪切特性的影响。最后,结合电镜扫描测试探究纤维加筋对微生物固化砂土剪切特性影响的内在机理。结果表明:MICP过程中,碳酸钙晶体能有效沉积在纤维表面,提高其表面粗糙度,且碳酸钙与砂的混合体能对纤维提供锚固作用,从而在一定程度上提高微生物固化砂土抗剪强度,并改善其应变软化特性,纤维具备改善微生物固化土体脆性破坏特征的潜力。

关键词:微生物固化技术;纤维加筋;抗剪强度;试验研究;参数分析

中图分类号:TU472.99;TU411.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0015-07

Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced bio-cemented sand

Zheng Junjie, Song Yang, Lai Hanjiang, Cui Mingjuan, Wu Chaochuan

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: Microbial-induced calcite precipitation (MICP) has the prominent advantage of significant improving the shear strength of soil, while MICP sand also has the obvious shortcoming of brittle failure. A certain amount of fiber was added into MICP sand in order to improve the brittleness, and based on consolidated drained triaxial compression tests, the shear strength characteristics of fiber-reinforced bio-cemented sand was studied. And then, the effects of fiber content, fiber length and initial relative compactness of samples on the shear characteristics of fiber-reinforced bio-cemented sand were discussed. Finally, the corresponding mechanisms of strength enhancement and ductility improvement were also investigated through scanning electron microscope. The results show that during the process of MICP, calcium carbonate crystals deposited on the fiber surface effectively improve the roughness of fibers surface, while the mixture of calcium carbonate and sand provides anchorage to the fibers, enhancing the shear

收稿日期:2019-02-01

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0800200);国家自然科学基金(51478201、51708243);中国博士后科学基金(2018M632862、2018T110769)

作者简介:郑俊杰(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程与隧道研究,E-mail:zhengjj@hust.edu.cn.

Received:2019-02-01

Foundation item:National Key Research and Development Program Funding (No. 2016YFC0800200); National Natural Science Foundation of China (No. 51478201, 51708243); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M632862, 2018T110769)

Author brief:Zheng Junjie (1967-), professor, doctoral supervisor, main research interests: geotechnical engineering and tunnel engineering, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

strength of MICP sand and improving the strain softening characteristic, and it is concluded that fiber has the potential to improve brittleness of MICP sand.

Keywords: MICP; fiber reinforcement; shear strength; experimental study; parametric analysis

微生物固化 (Microbially Induced Calcite Precipitation, 简称 MICP) 技术是近年来岩土工程领域新兴起的一种地基处理技术, 该技术利用细菌诱导产生的碳酸钙, 将松散的土体颗粒胶结成整体, 进而达到改善土体力学性能的目的。

MICP 技术因具备经济、高效和对环境无危害等特点, 受到大量学者的广泛关注。Whiffin^[1] 和 DeJong 等^[2] 发现 MICP 技术能显著改善砂土的强度和刚度; Yang 等^[3] 指出 MICP 技术可以应用于历史砌体建筑修复; 程晓辉等^[4] 将 MICP 技术应用于液化砂土地基加固; 但与此同时, Cui 等^[5] 发现微生物固化砂土具有明显的脆性破坏性质, 在一定程度上制约了 MICP 技术在实际岩土工程领域应用的进程。

纤维加筋技术是一种新型土体改良技术, 该技术通过向土体中均匀掺入一定量的纤维, 以提高土体的工程力学性能。Gray 等^[6] 通过向砂土中掺入纤维, 提高了砂土的强度, 减小了峰值强度后的强度损失; Yetimoglu 等^[7] 通过室内试验发现纤维加筋对抗剪强度峰值没有明显影响, 但可通过增加纤维掺量来增大土样的残余剪切强度, 改善砂土剪切脆性破坏的性质; Shao 等^[8] 指出纤维对于砂土的剪切强度有显著影响, 可以减少峰后强度损失, 从而改善土体的延展性。上述研究均表明, 纤维的掺入能够减小土体峰值应力后的强度损失, 进而改善土体的脆性破坏特征。

目前, 已有学者^[9-10] 尝试将纤维加筋技术与微生物固化技术相结合, 以改善微生物固化土体的脆性破坏性质, 但均仅考虑了纤维含量的影响。笔者基于固结排水三轴试验, 首次较为全面地探讨了胶结处理次数、纤维含量、纤维长度以及试样初始相对密实度等参数对微生物固化纤维加筋砂土剪切特性的影响, 并结合电镜扫描测试, 探究了纤维加筋对微生物固化砂土剪切特性影响的内在机理。

1 试验材料、试样制备及试验方案

1.1 试验用砂土及纤维

试验用砂土为厦门 ISO 标准砂, 砂土的平均颗粒粒径 D_{50} 为 0.52 mm, D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} 分别为 0.13、0.30、0.66 mm; 最大孔隙率 e_{\max} 为 0.59, 最小孔隙率 e_{\min} 为 0.38。试验用纤维为聚丙烯纤维, 其物理性质见表 1。

表 1 聚丙烯纤维的物理性质

Table 1 Physical properties of polypropylene fibers

密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	熔点/°C	燃点/°C
0.91	约 350	约 3 500	170	590

1.2 试验用菌液

试验用菌液为高脲酶活性的巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*, ATCC 11859)。细菌采用氨盐基与酵母提取物培养基 (ATCC 1376) 进行培养, 培养基溶液中各成分含量为: 酵母 20 g/L, 硫酸铵 10 g/L, Tris 缓冲剂 15.75 g/L。各单一成分分别灭菌后, 在无菌操作台上均匀混合, 用于细菌接种培养。细菌接种完成后, 在 30 °C 的恒温条件下, 放置在转速为 150 r/min 的振荡器上, 培养至出现絮凝状浑浊物。采用 721 可见分光光度计, 测得本次试验用菌液浓度 OD₆₀₀ 约为 1.0。

1.3 试样制备及试验方案

试验用试样 (尺寸为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) 采用如图 1 所示模具 (高 130 mm、内径 39.1 mm) 制备。试样制备步骤: 1) 在拼装好的模具底部水平放置一直径为 39.1 mm 的透水石; 2) 根据砂土及制样参数, 称取一定量砂土及纤维, 均分成 4 份, 分别搅拌均匀, 分层装入模具内, 分别击实至预定高度 (每层 20 mm), 完成装样后, 在试样顶端放置另一透水石; 3) 根据崔明娟等^[11] 提出的纯/混菌液注射方式, 采用蠕动泵以 5 mL/min 的速率, 先注射 0.4 倍孔隙体积的纯菌液, 之后立即注射 0.6 倍孔隙体积的混合菌液 (在纯菌液中引入浓度为 0.05 mol/L 的氯化钙溶液), 静置 6~8 h, 以保证细菌在试样内充分扩散并吸附于砂土颗粒表面; 4) 采用蠕动泵以 10 mL/min 的速率, 间隔 12 h 向试样内注入 1 倍孔隙体积的胶结液 (即浓度为 0.5 mol/L 的尿素与氯化钙混合溶液), 达到预定处理次数后停止注射, 用蒸馏水冲洗并浸泡试样, 以终止 MICP 过程。

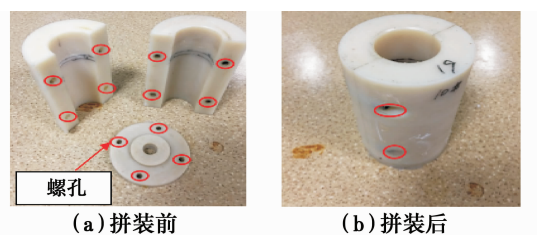


图 1 预制对开模具

Fig. 1 Prefabricated mould

共设计 4 组试验,以分析纤维加筋对微生物固化砂土(Bio-cemented Sand,简称 Bio-S)的影响,并对微生物固化纤维加筋砂土(Bio-cemented Fiber-Sand,简称 Bio-FS)进行参数分析,具体试验方案见表 2。常规三轴固结排水试验根据《土工试验方法标准》^[12]实施,围压设定为 100 kPa,试验加载速率取 0.033 mm/min。

表 2 试验方案
Table 2 Test plan

分析参数	胶结液处理次数	纤维含量/%	纤维长度/mm	相对密实度/%
胶结处理次数	2、4、6、8、10	0、0.5	6	30
纤维含量	8	0、0.1、0.3、0.5、0.7	6	30
纤维长度	8	0.3	6、9、12、15	30
相对密实度	8	0.3	6	30、50、80

2 试验结果分析

2.1 碳酸钙含量

图 2 为不同处理次数条件下, Bio-S 和 Bio-FS 试样碳酸钙含量。由图 2 可见,随着处理次数的增加,微生物固化试样内碳酸钙含量随之增加,但 Bio-S 和 Bio-FS 试样的碳酸钙含量差异很小。由此推断,纤维加筋并不是通过增加试样内的碳酸钙含量来影响微生物固化试样的性质。

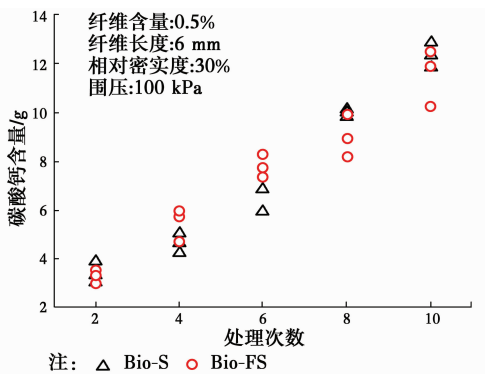


图 2 不同胶结处理次数下碳酸钙含量
Fig. 2 Calcium carbonate content under different cementation times

2.2 应力-应变曲线

各对照组的应力-应变曲线变化规律基本一致,为简便起见,以 8 次胶结处理条件下 Bio-S 和 Bio-FS 试样的应力-应变曲线(见图 3)为例进行分析。从图 3 可看出,加载初期, Bio-S 和 Bio-FS 试样的偏应力均随轴向应变的增加而快速增长;达到峰值后,

偏应力则逐渐减小,整体呈应变软化特性。从强度损失来看,以轴向应变为 15% 时的偏应力作为基准值计算峰后偏应力损失,发现 Bio-S 试样的峰后偏应力下降速度和下降幅度均明显高于 Bio-FS 试样(分别下降了 51% 和 30%);从峰值强度对应的应变值来看, Bio-FS 试样峰值强度所对应的应变显著大于 Bio-S 试样,提高了 62%。上述现象表明,纤维能有效改善微生物固化砂土的脆性破坏现象,提高微生物固化砂土的抗变形能力。需要说明的是,图 3 所示的 Bio-S 和 Bio-FS 试样均未表现出显著的脆性破坏特征,其原因可能是胶结水平较低,脆性破坏特征不明显^[5]。

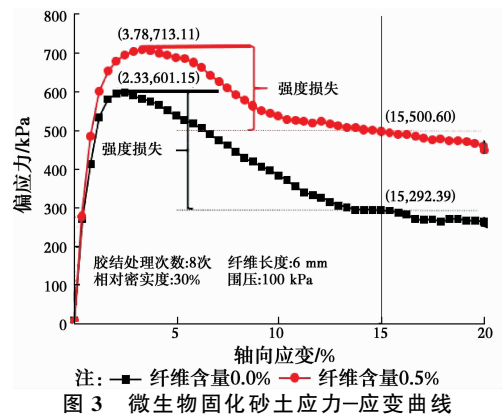


图 3 微生物固化砂土应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of MICP sand

图 4 为不同处理次数条件下 Bio-S 和 Bio-FS 试样的峰值偏应力(即峰值强度 q_u)。整体而言, Bio-S 和 Bio-FS 试样的 q_u 均随处理次数的增加而呈增大趋势。值得注意的是,随着处理次数的增加,纤维加筋对试样强度提高的效果呈减弱趋势。其原因可能是:在较高处理次数下,试样具有较高的强度值,当试样破坏时,破裂面上的纤维可能被拔出或者拉断,表现为加筋效果不显著。针对该问题,可采用较高抗拉强度的纤维进一步试验。

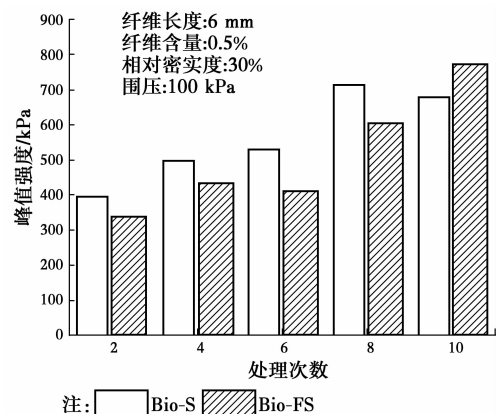


图 4 微生物固化砂土峰值强度
Fig. 4 Peak strength varying with cementation times

Fig. 4 Peak strength varying with cementation times

取 15% 轴向应变所对应的偏应力为试样的残余强度 q_{ur} ，并定义 $(q_u - q_{ur}) / q_u \times 100\%$ 为试样的强度损失率 α 。图 5 为 Bio-S 和 Bio-FS 试样的强度损失率 α 。计算结果显示，纤维的掺入降低了试样的 α ，当处理次数为 8 次时，效果最为明显，相对于不掺纤维的固化土，强度损失率下降了近 50%。整体而言，在较少处理次数时，纤维加筋能降低微生物固化砂土峰值应力后强度损失，应变软化特征得到了改善。由此可推测，在处理次数较多时，较高抗拉强度的纤维具备改善微生物固化土体脆性破坏的潜力。

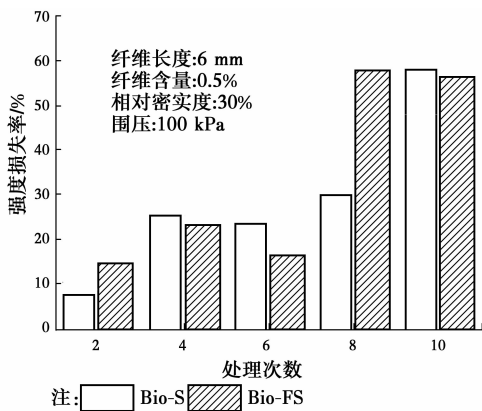


图 5 微生物固化砂土强度损失率

Fig. 5 Strength loss rate varying with cementation times

2.3 破坏模式分析

图 6 为 MICP 试样在三轴试验后的破坏形态。由 6 可见，当处理次数较少时，Bio-S 和 Bio-FS 试样均呈鼓胀破坏，但 Bio-FS 试样的水平变形明显小于 Bio-S 试样；当处理次数较多时，二者差异不明显，均呈剪切破坏。其原因为：在处理次数较少时，纤维加筋作用显著，形成的空间网架结构一定程度上限制了砂颗粒的位移。

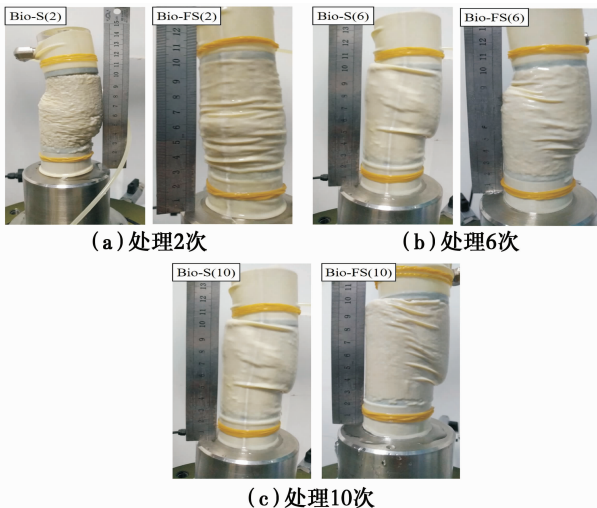


图 6 微生物固化试样破坏模式

Fig. 6 Failure modes of MICP sand

3 参数分析

3.1 纤维含量的影响

图 7 为不同纤维含量下 Bio-FS 试样的峰值强度 q_u 。整体而言，在所研究的纤维含量范围内，Bio-FS 试样的 q_u 随纤维含量的增加呈增大趋势。主要原因是纤维的加筋作用，随着纤维含量的增加，出现在试样剪切面上的纤维就越多，有利于试样的整体强度提升。

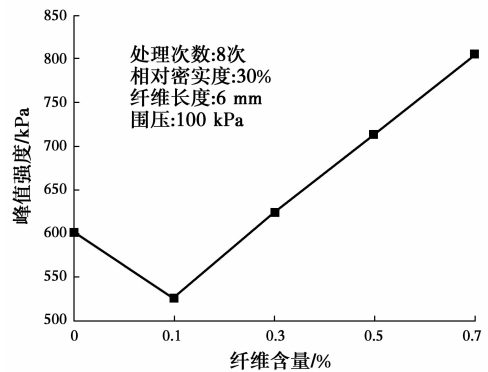


图 7 微生物固化砂土峰值强度

Fig. 7 Peak strength varying with fiber content

图 8 为不同纤维含量下 Bio-FS 试样的强度损失率 α 。由图 8 可见，纤维的加入改善了土体的峰后强度损失；当纤维含量不超过 0.3% 时，试样的 α 值随纤维含量的增加而减小；当纤维含量超过 0.3% 时，试样的 α 值缓慢上升。其原因是：纤维含量较低时，纤维丝能有效构成空间网架，减小强度损失；纤维含量较高时，纤维难以与砂拌合均匀，试样内存在纤维和碳酸钙分布较少的薄弱结构面，在试样出现破坏时，这些薄弱面的强度快速损失，导致试样整体强度出现较大下降。

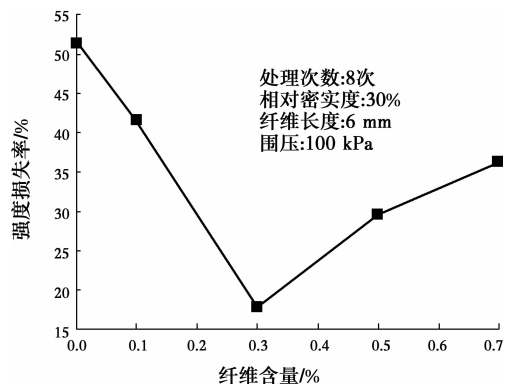


图 8 微生物固化砂土强度损失率

Fig. 8 Strength loss rate varying with fiber content

综合考虑 Bio-FS 的抗剪强度和峰后强度损失，在工程实际中，最优纤维含量为 0.3%~0.5%，以

尽可能高地提高土体的强度,并适度改善土体的脆性特征。

3.2 纤维长度的影响

图 9 为不同纤维长度下 Bio-FS 的峰值强度 q_u 对比。结果表明:当纤维长度较短时(15 mm 点为数据波动点),Bio-FS 试样的 q_u 较高。这可能是因为控制纤维含量相同时,纤维长度越短,则纤维数量越多,形成空间网架结构越密集,加筋效果更明显。

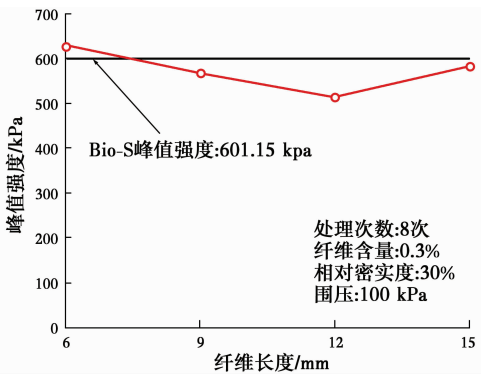


图 9 微生物固化砂土峰值强度

Fig. 9 Peak strength varying with fiber length

图 10 为 Bio-FS 试样的强度损失率 α 随纤维长度的变化。整体而言,当纤维长度较短时(即为 6 mm 时),Bio-FS 试样的 α 值较小,纤维长度增加后,Bio-FS 试样的 α 值增大到与 Bio-S 试样相同的水平。这可能是因为纤维含量相同的试验条件下,当纤维较短时,出现在单位剪切面上的纤维数量较多,加筋效果较为显著,能有效地抑制强度的损失。

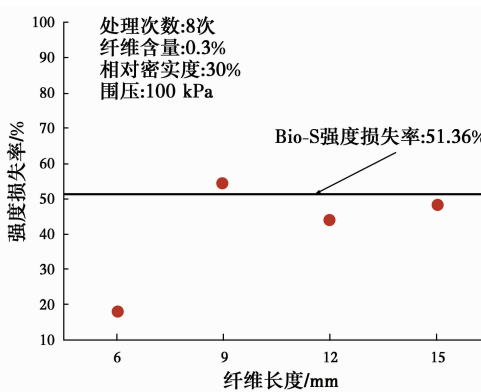


图 10 微生物固化砂土强度损失率

Fig. 10 Strength loss rate varying with fiber length

综上所述,当纤维长度较短时,Bio-FS 的强度提升幅度较大,破坏过程中的强度损失也得到显著的改善。

3.3 相对密实度的影响

对比分析不同相对密实度下 Bio-FS 的峰值强度 q_u (如图 11 所示)可以发现,当相对密实度较高和

较低时,试样均具有较高的强度。这是因为当试样为稍松状态(相对密实度为 30%)时,试样内的孔隙体积较大,利于碳酸钙的生成,碳酸钙含量较高(30%、50%、80%相对密实度所对应的碳酸钙含量依次为 9.91、9.61、9.01 g),为试样提供了更高的黏结强度;当试样处于密实状态时,砂颗粒间较难发生错列,具有较高的摩擦强度。

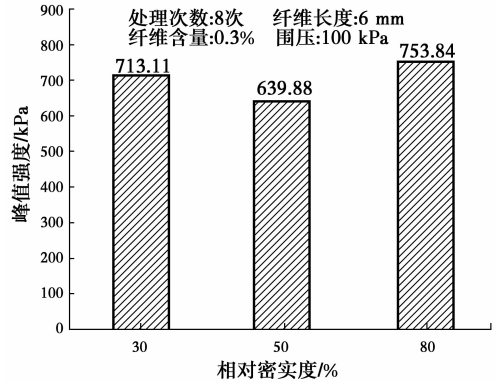


图 11 微生物固化砂土峰值强度

Fig. 11 Peak strength varying with relative compactness

图 12 为不同相对密实度下试样 α 值的对比。结果表明:当相对密实度较低时 α 较低,当相对密实度较高时 α 较高。这是因为当试样处于稍松状态时,碳酸钙晶体(含量为 9.91 g)提供给纤维更强的锚固作用,纤维的拉伸作用得以体现,使试样具有较好的整体受力性能,有效抑制了抗剪强度值的下降,提高了试样的延性;而当试样较为密实时,尽管 Bio-FS 试样有着较高的抗剪强度,一旦开始破坏,摩擦强度会迅速减小,纤维的加筋作用不显著, α 值较大。

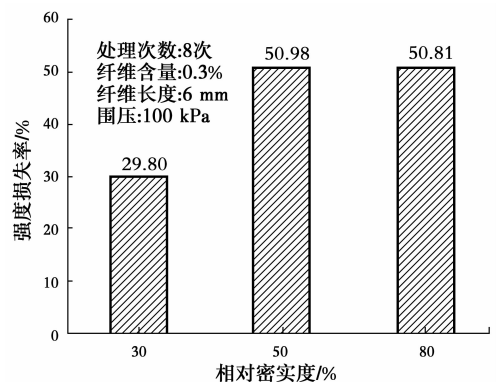


图 12 微生物固化砂土强度损失率

Fig. 12 Strength loss rate varying with relative compactness

尽管增大密实度能提高强度,但峰后强度损失较大,且经济性较差;而稍松密实状态的 Bio-FS 抗剪强度较高,且在完全破坏时仍具有较高的强度,更适用于实际工程。

4 纤维加筋对微生物固化砂土的影响机理

图 13 为 Bio-FS 电镜扫描测试结果。从图中可看出,碳酸钙主要沉积在纤维表面、纤维与砂颗粒接触处、砂颗粒表面以及砂颗粒间接触处等。同时,结合 Bio-S 和 Bio-FS 试样的宏观力学试验结果,可推测纤维加筋对微生物固化砂土强度影响的机制主要包括两方面:

1)空间网架结构。纤维在 Bio-FS 中形成的空间网架结构,一定程度上约束了砂颗粒的位移与变形,当试样出现剪切面时,出现在剪切面上的纤维中产生拉应力,弥补了由附近土体破坏导致的强度损失,同时,抑制了剪切面的进一步发生;而当土体内强度较高时(即胶结处理次数较多时),纤维可能出现黏结失效,加筋效果不明显。

2)碳酸钙对纤维加筋效果的强化。MICP 过程中沉积的碳酸钙附着在纤维表面,增加了表面的粗糙度,提高了纤维与砂土间的咬合力;纤维借助附着的碳酸钙,间接增大了与砂颗粒间的摩擦接触面积;同时,碳酸钙与砂的混合胶结体能为纤维提供一定的锚固作用,增大了纤维的粘结失效极限力,从而改

善加筋效果。

另外,本研究涉及的处理次数较少,微生物固化砂土的脆性破坏特征不显著;同时,可能由于所用纤维的抗拉强度较低,在微生物固化砂土强度较高时的加筋效果不明显。因此,后续将针对处理次数较多、纤维抗拉强度较高的 Bio-FS 试样进行试验,以进一步探究纤维加筋技术在改善微生物固化土体脆性破坏特征方面的可行性和有效性。

5 结论

对掺入纤维的砂土进行微生物固化,并对试样进行了一系列固结排水三轴试验,得到以下主要结论:

1)纤维的掺入改善了微生物固化砂土的强度和应变软化特性,并具有改善脆性破坏特征的潜力。当处理次数较少时,纤维的掺入能有效限制微生物固化砂土材料的变形。

2)工程实际中应用纤维加筋微生物固化砂土时,应选择最优纤维含量(本研究为 0.3%~0.5%)和较短的纤维长度,以经济高效地改善土体的力学性能。

3)微生物固化过程中生成的碳酸钙能增大纤维表面粗糙度,提高纤维与土体间为摩擦接触的面积,同时提供纤维在砂土内的锚固力,强化加筋效果。

参考文献:

- [1] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [2] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197-210.
- [3] YANG Z, CHENG X H, LI M. Engineering properties of MICP-bonded sandstones used for historical masonry building restoration [C]// Geo-Frontiers Congress 2011, March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA, 2011.
- [4] 程晓辉,麻强,杨钻,等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1486-1495.
CHENG X H, MA Q, YANG Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by biogrouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [5] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(5):

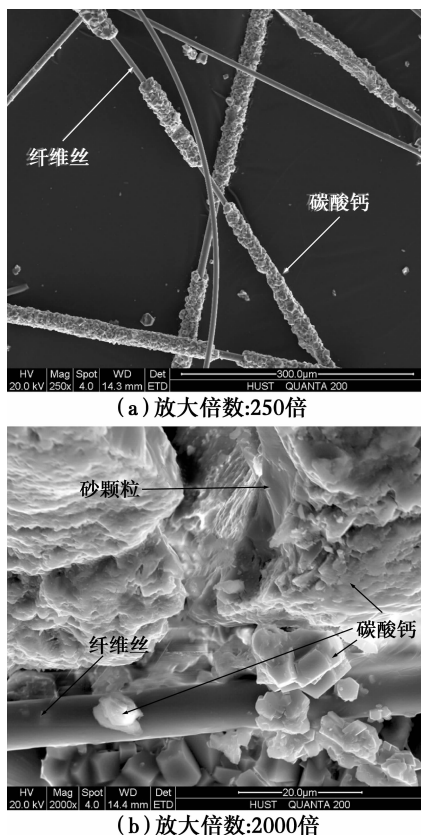


图 13 纤维加筋微生物固化砂土 SEM 图

Fig. 13 SEM images of fiber reinforced MICP sand

- 971-986.
- [6] GRAY D H, AL-REFEAI T. Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(8): 804-820.
- [7] YETIMOGLU T, SALBAS O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(2): 103-110.
- [8] SHAO W, CETIN B, LI Y D, et al. Experimental investigation of mechanical properties of sands reinforced with discrete randomly distributed fiber [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(4): 901-910.
- [9] 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.
- [10] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 623-629.
- [11] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江, 等. 菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3173-3178.
- CUI M J, ZHENG J J, LAI H J, et al. Effect of method of biological injection on dynamic behavior for bio-cemented sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3173-3178. (in Chinese)
- [12] 南京水利科学研究所. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. *Geotechnical test method standard: GB/T 50123-1999* [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)