

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.122



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 微生物结合碳纤维加固钙质砂的高强度试验研究

蒋钊, 彭劼, 许鹏旭, 卫仁杰, 李亮亮

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 南京 210098)

**摘要:** 为了研究微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)结合碳纤维固化钙质砂的效果及机理, 先通过低轮次注浆试验探究碳纤维对 MICP 加固钙质砂效果的影响, 并确定碳纤维的最佳掺量及长度, 然后开展高轮次注浆试验, 研究 MICP 胶结液无法再注入时的砂柱强度, 通过试验结果对比和扫描电镜等分析, 分析了微生物、碳纤维及钙质砂之间的作用机理。试验结果表明, 掺加碳纤维能显著提高微生物加固钙质砂的强度。在低轮次注浆试验中, 掺加碳纤维能有效提高碳酸钙的生成量及试样强度, 纤维组的碳酸钙生成量比无纤维对照组提高了 15%~34%, 试样强度提高了 135%~217%; 高轮次注浆试验中, 在 MICP 胶结液无法再注入砂柱的情况下, 由于两组试样注浆轮次的差异, 纤维组最终的碳酸钙生成量对比无纤维对照组减少了 4%, 试样强度提高了 11%。

**关键词:** 微生物诱导碳酸钙; 钙质砂; 碳纤维; 地基加固

中图分类号: TU441; TU411.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)05-0064-10

## High strength test study on coral sand reinforced by microbe and fiber

JIANG Zhao, PENG Jie, XU Pengxu, WEI Renjie, LI Liangliang

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering; Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, the effect and mechanism of microbial induced carbonate precipitation (MICP) combined with carbon fiber for curing calcareous sand were investigated. The effect of carbon fiber on the effect of MICP on the consolidation of calcareous sand was investigated by a low-round grouting test, and the optimal amount and length of carbon fiber was determined. Subsequently, high-round grouting tests were carried out to study the sand column strength when MICP consolidation fluid could no longer be injected. Through comparative analysis of experimental results and scanning electron microscopy (SEM), the interactions among microorganisms, carbon fibers, and calcareous sand were analyzed. The test results show that the addition of carbon fiber can significantly improve the strength of microbial reinforced calcareous sand. In the low-round grouting test, the addition of carbon fiber can effectively improve the calcium carbonate production and specimen strength, and the calcium carbonate production in the fiber group increase by 15%-34% and the specimen strength increase by 135%-217% compared with the control group without fiber. In high-cycle

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51578214)

作者简介: 蒋钊(2000-), 男, 主要从事微生物岩土工程研究, E-mail: jiangzhao@hhu.edu.cn。

彭劼(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn。

Received: 2022-08-08

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.51578214)

Author brief: JIANG Zhao(2000-), main research interest: microbial geotechnical engineering, E-mail: 1972394553@qq.com.

PENG Jie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn.

grouting tests, when MICP consolidation fluid could no longer be injected into the sand column, due to differences in the number of grouting cycles between the two groups, the final calcium carbonate generation of the fiber group decrease by 4% compared to the control group without fiber, while the specimen strength increase by 11%.

**Keywords:** microbially induced calcium carbonate precipitation; calcareous sand; carbon fiber; ground reinforcement

钙质砂是一种海洋沉积物,在红海、波斯湾、南海中的岛礁中分布广泛<sup>[1]</sup>。钙质砂常被用作建筑地基、道路路堤、机场跑道的回填材料<sup>[2-5]</sup>。近年来中国大力推动南海的岛礁建设<sup>[6]</sup>,由于南海人工吹填岛礁所处环境比较复杂,包括海水的长期腐蚀作用,复杂的地质构造特征,以及各类极端环境条件等<sup>[7]</sup>,同时由于钙质砂本身的孔隙率高、硬度低、易破碎等性质<sup>[8-11]</sup>,未经处理可能会产生砂土液化<sup>[12]</sup>、过量的沉降变形<sup>[13]</sup>等,必须对其进行加固处理<sup>[14]</sup>。南海岛礁远离大陆,受到建筑材料运输的制约,岛礁建设需结合自有资源。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术,是一种利用微生物诱导调控无机矿物生长以胶结砂土颗粒、填充土体孔隙来达到固化土体、降低砂土体渗透系数等目的的新型岩土加固技术<sup>[15]</sup>,可直接从岛礁上获取胶结材料并具有节能环保等重要优势,在南海岛礁建设中有着潜在的工程应用意义和广阔的应用前景<sup>[16-18]</sup>。采用MICP技术对钙质砂进行加固,可以有效提高土体抗渗性能、增强地基稳定性<sup>[14,19-21]</sup>。

在已有的研究中,生物水泥的固化效果还无法完全与常规矿物质水泥的强度相媲美,完全达到工程化要求的更不多见。为此,有部分学者将纤维加筋与MICP相结合,并开展了有关土体加固的试验研究。试验发现,掺加纤维确实能够有效提高试样的强度,同时添加纤维还会改善微生物固化土体的脆性<sup>[22-24]</sup>,但纤维掺量的不同会引起加固效果的差异<sup>[25-26]</sup>。此外,谢约翰等<sup>[27]</sup>采用浸泡的处理方法,发现纤维的掺入极大提高了试样的残余强度,其试样残余强度与纤维掺量呈正相关。马福全等<sup>[28]</sup>采用不同的纤维长度,发现试样的无侧限抗压强度与纤维强度呈正相关。除了改善静力学特性外,林胜强等<sup>[29]</sup>分析发现经MICP加固后的钙质砂,其动力特性会受到纤维掺量的影响,试验发现纤维掺量的增加,强化了试样抗变形的水平,同时放缓了试样轴向动应变的增长。同时,包承纲等<sup>[30]</sup>发现由于纤维本身有高拉伸模量的特征,加筋土拥有一定的延展性。Prabakar等<sup>[31]</sup>以及 Akbulut等<sup>[32]</sup>研究了纤维加筋土的最优纤维掺量,试验发现当纤维掺量超过0.75%时,黏聚力( $c$ 值)开始减小;当纤维掺量超过

0.2%时,无侧限抗压强度开始减小。李昊等<sup>[33]</sup>采用模拟暴雨条件的方法,发现纤维的掺入提高了胶结试样的抗雨蚀能力。Zhao等<sup>[34]</sup>、Lei等<sup>[35]</sup>针对纤维类别的影响展开了研究,发现选用的无机及合成纤维中,碳纤维具有更好的微生物的吸附能力和桥连作用。除上述两种纤维外,Spencer等<sup>[36]</sup>还研究了天然黄麻纤维对MICP固化砂土性能的影响,结果表明:黄麻纤维的掺入刺激了细菌活性,添加0.75%黄麻纤维的试样无侧限抗压强度远高于未添加纤维试样。在应用方面,Li等<sup>[37]</sup>利用MICP技术开发生物砂砖,并添加聚丙烯纤维对其进行增强。考虑了纤维添加量的影响,进行了四点弯曲测试。结果表明:生物砖的最大弯曲强度随着纤维含量的增加而增加,0.3%的纤维添加量达到了峰值。

目前对纤维结合MICP加固土体已经有一些研究,但尚无针对钙质砂高强度加固要求的相关研究。笔者先选用不同的碳纤维长度及纤维掺量在低注浆轮次下对钙质砂进行微生物处理,通过对比处理后的无侧限抗压强度、渗透率、碳酸钙含量等,确定最优参数。之后增加纤维试样的注浆轮次,确定纤维试样在达到注浆极限时所能达到的强度,以探究利用纤维进行高强度加固的可行性。并观察纤维试样的力学性能随注浆轮次增加的改变,总结相关规律,分析其机理,为MICP结合纤维在类似高强度要求情况下的应用提供参考。

## 1 试验材料

### 1.1 试验用菌

选用巴氏芽孢杆菌(美国国家菌种库编号ATCC11859)作为试验菌种,其能通过自身脲酶对尿素进行分解,较其他微生物对环境具有较强的适应性。选用液体培养基对细菌进行扩大培养,表1为液体培养基的配方,选用去离子水进行培养基的配置,并调节pH值至9.0左右。灭菌后的培养基放置于无菌操作台中冷却至室温( $20\pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,之后将细菌接种于其中,并置于35 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温振荡培养箱中(121 r/min)进行12 h的培养,最后取出备用。

### 1.2 试验砂样

试验选用取自中国南海某岛礁的钙质砂,其组

表 1 液体培养基配方表

Table 1 Formula list of liquid media

液体培养基成分	摩尔质量/(g/mol)	用量/(g/L)
酵母提取粉(Yeast extract)		20
氯化铵(NH <sub>4</sub> Cl)	103.80	10
氯化镍(NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	129.60	2.4×10 <sup>-3</sup>
硫酸锰(MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O)	169.01	1.0×10 <sup>-3</sup>

成以珊瑚碎屑和贝壳碎片为主,碳酸钙为主要化学成分,砂样颗粒级配如图 1 所示。根据级配曲线计算得到该钙质砂不均匀系数为 4.06,曲率系数为 1.50。钙质砂土粒比重为  $G_s=2.7$ ,初始干密度为  $1.45 \text{ g/cm}^3$ 。

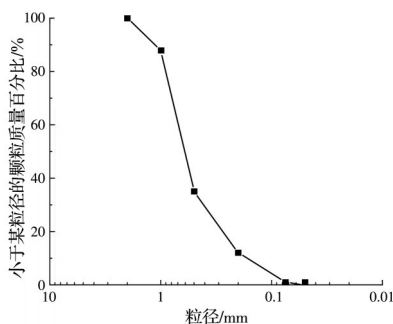


图 1 钙质砂砂样的颗粒级配图

Fig. 1 Grain gradation curve of calcareous sand samples

### 1.3 试验纤维

经对比后选用碳纤维进行微生物纤维结合作用下的钙质砂加固试验研究。与其他纤维相比,碳纤维表面粗糙,且在力学特性方面,碳纤维具有高于一般纤维的抗拉强度和弹性模量,图 2 为微观视角下的碳纤维。由于碳纤维是有机纤维在惰性环境中经高温碳化加工而成的纤维状碳化物,其化学性质与碳相似,除能被强氧化剂氧化外,对一般的有机溶液、酸、碱都具有良好的耐腐蚀性,不溶不胀,能良好地适应工程环境并维持自身特性。试验选用的碳纤维各项指标见表 2。

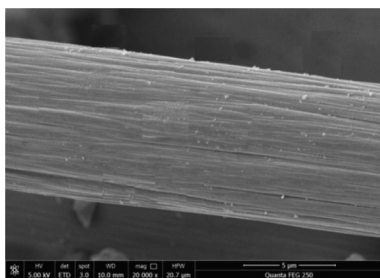


图 2 纤维扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron microscopy of fibers

### 1.4 试验装置

模具构造示意图如图 3 所示。模具为有机玻璃材质,模具选用圆柱筒,内径 50 mm,高 130 mm,模

表 2 碳纤维主要技术指标

Table 2 Main technical indicators of carbon fiber

碳含量/%	颜色	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	纤维直径/ $\mu\text{m}$	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	截面形状
>95	黑色	1.75	7	4 900	500	圆形

具壁厚 5 mm。模具纵向开缝,制作成双瓣膜的形式,以方便固化后试样的取出。为固定双瓣膜,模具设有内径 60 mm、高 60 mm 的底座,同时为方便胶结液体的流出,在底座中部设置圆形排水孔洞的隔板,板厚 3 mm,板上孔洞直径 4 mm。放尼龙纱网于底座隔板上,纱网选用 300 目,以防砂颗粒从隔板孔洞中漏出。

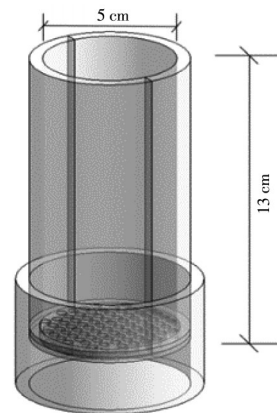
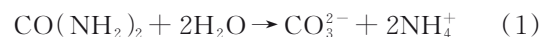


图 3 试验模具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test mould

### 1.5 胶结液的配置

胶结液为尿素和氯化钙混合液,尿素既提供氮源为细菌生长繁殖所需,又可通过细菌自身脲酶将尿素水解,以获得  $\text{CO}_3^{2-}$ ,如式(1)、式(2)所示,氯化钙提供所需的钙源。试验配置胶结液中尿素与  $\text{CaCl}_2$  的浓度比为 1:1,尿素及氯化钙的浓度均选用  $0.5 \text{ mol/L}$ ,溶液未进行消毒处理。



## 2 试验方法

### 2.1 试样制备

先将碳纤维与干砂进行混合,混合均匀后采用砂雨法分 5 次加入模具中,保证试样中纤维随机分布,每次加入模具后都需进行压实,并对压实后的表面进行刮花处理,防止试样出现断层。

### 2.2 注浆试验

注浆过程分为低轮次注浆试验和高轮次注浆试验,低轮次注浆试验为 12 轮次注浆试验,探究掺加纤维对比无纤维组的各种物理、力学指标变化,以及用于确定合适的纤维掺入参数。高轮次注浆

试验中,利用低轮次注浆试验得到的最优纤维掺入参数,增加注浆轮次,直至本文试样无法注浆(即达到注浆极限),其中纤维组为36轮次,无纤维组为48轮次,用来探究利用碳纤维提高微生物固化钙质砂强度的可行性。

先使用0.05 mol/L的氯化钙溶液注入试样,并静置1 h,目的是利用低浓度的钙离子提高砂柱中细菌的吸附率。静置后,使用蠕动泵将培养好的菌液泵入砂样,泵入后静置6 h,使细菌充分吸附在试样中。然后将配置好的0.5 mol/L胶结液泵入砂柱中,之后重复多次泵入胶结液,每次间隔12 h,直至细菌反应效率大幅度减小,开始新一轮菌液注入。试验过程中每次泵入试样的溶液(包括0.05 mol/L氯化钙溶液、菌液和0.5 mol/L胶结液)均为90 mL(1倍砂柱孔隙体积),注浆速度均控制为6 mL/min。

按照表3的设置掺入纤维,根据低轮次注浆试验得到的碳酸钙含量、无侧限抗压强度等各项指标确定纤维的较优掺量。在确定纤维的较优掺量后,再进行高强度MICP砂柱试验,即高轮次注浆试验,仍采用上述注浆加固方法,增加注浆轮次。设定不同加固轮次,同时设置相同加固轮次下的未掺加纤维试样,通过对比探究MICP结合纤维的加固效果。各加固轮次设置3个平行试样,不同加固轮次试验组的相关参数见表4。

表3 不同纤维长度及掺量设置

Table 3 Different fiber length and content settings

掺量(质量分数)/%	长度/mm
0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4	3、6、9、12

表4 不同轮次试验参数

Table 4 Different rounds of test parameters

组别	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙体积/mL	加固轮次
纤维组	1.45	90	12、24、36
无纤维组	1.45	90	12、24、36、48

### 2.3 菌液活性及浓度测定

细菌培养完成后采用可见光分光计测定细菌吸光度(波长600 nm)。细菌活性采用电导率法测定:在常温条件下,将待测菌液与1.1 mol/L urea以1:9比例混合,使用电导率仪测定混合液5 min的电导率变化值,采用此数值来表征菌液活性<sup>[38]</sup>。细菌的平均脲酶活性为(7.7±0.5)mmol/L urea hydrolysed min<sup>-1</sup>。

### 2.4 细菌留存率测算

细菌菌液留存率的测定,既可反映注入细菌在砂柱中的吸附情况,又因留存状况会对固化过程产生影响,可依次预测加固效果。在菌液泵入完成

后,从底部收集流出液,测定所收集流出液的OD<sub>600</sub>数值 $v_1$ ,计算出其浓度值 $Y_1$ ,与注入前所测定的OD<sub>600</sub>数值 $v_0$ 计算出的菌液浓度 $Y_0$ 相比较。

利用式(3)计算后取平均值得到砂柱的细菌吸附率 $S$ 。

$$S = \left(1 - \frac{Y_1}{Y_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

### 2.5 无侧限抗压强度测定

将拆模后清洗干净的砂样放入烘箱烘干后取出进行无侧限抗压强度试验,试验采用无侧限压力仪器(TKA-WXY-5),采用应变控制式,速率设定为1 mm/min,压力范围设置为0~50 kN,砂样直径和高度为: $D=5.0$  cm, $H=10.0$  cm。

### 2.6 碳酸钙含量测定

由于钙质砂无法使用酸洗法测定砂样的碳酸钙含量,试验中采用称重差值法测定钙质砂砂柱的碳酸钙含量。测定注浆前干砂的质量 $m_0$ 及注浆后的试样质量(除去模具烘干后) $m_i(i=1,2,\dots)$ ,利用式(4)计算得到碳酸钙含量 $M$ 。

$$M = \frac{m_i - m_0}{m_i} \times 100\% \quad (4)$$

### 2.7 渗透系数测定

采用常水头试验测定各组试样的初始渗透系数与固化后的渗透系数,试样制备过程中,为避免传统试样中滤纸的渗透系数过低,影响试样整体的透水能力,试验采用渗透性较高的250目铁丝网代替滤纸。

## 3 试验结果分析与讨论

### 3.1 低轮次注浆试验结果

低轮次注浆试验通过12轮次注浆试验,得到不同长度及掺量纤维试样的加固效果,如表5所示。

从表5可以看出,与无纤维试样相比,掺加纤维后试样的各项性能都有所提升。纤维填充于砂样之中增加了细菌生长和依附的位置,减少了一部分细菌的流失,这使得细菌吸附率明显提高,从而使得碳酸钙含量提高<sup>[35,39-40]</sup>。由于所掺纤维对渗流路径的阻塞,以及纤维试样更高效的碳酸钙结晶生成效率,纤维试样的渗透系数显著降低。

纤维的加入增加了砂柱的细菌留存率使试样的碳酸钙含量提高,同时纤维的“桥接”作用使砂柱整体性更强,显著提升了试样的抗压强度。表中无纤维组试样的抗压强度为0.99 MPa,在9-1.2组纤维加筋效果达到最优,其强度达到2.33 MPa,提高了135%。

表 5 不同长度及掺量纤维试样加固效果

Table 5 Reinforcement effect of fiber samples with different length and content

纤维参数	细菌吸附率/%	碳酸钙含量/%	渗透系数/(m/s)	无侧限抗压强度/MPa
0-0	55.43	5.47	$1.76 \times 10^{-5}$	0.99
9-0.2	59.89	$8.56 \times 10^{-6}$	1.39	
9-0.4	60.25	5.81	$6.43 \times 10^{-6}$	1.40
9-0.6	60.17	5.79	$5.57 \times 10^{-6}$	1.48
9-0.8	61.47	6.19	$4.11 \times 10^{-6}$	1.63
9-1.0	61.02	6.22	$2.16 \times 10^{-6}$	1.60
9-1.2	63.92	6.88	$1.32 \times 10^{-6}$	2.33
9-1.4	62.13	6.65	$2.68 \times 10^{-6}$	1.98
3-1.2	60.68	6.12	$3.26 \times 10^{-6}$	1.45
6-1.2	61.59	6.39	$2.51 \times 10^{-6}$	1.64
9-1.2	63.92	6.88	$1.32 \times 10^{-6}$	2.33
12-1.2	61.78	6.61	$3.54 \times 10^{-6}$	2.07

注:纤维参数中第 1 个数字为纤维长度,mm;第 2 个数字为掺量, %。

利用扫描电镜,以微观的视角探究掺加纤维后碳酸钙结晶的分布与形态。图 4 展示了胶结在砂颗粒间的碳酸钙晶体。经微生物固化处理后的试样,在钙质砂表面及颗粒间生成了大量的棱柱碳酸钙晶体,结晶将砂颗粒胶结起来,从而产生了强度。而在掺加纤维后,部分细菌吸附于纤维上,在纤维表面也生成了碳酸钙结晶,如图 5 所示在微生物的作用下,少量的碳酸钙在纤维表面生成,随着反应进程的加深,碳酸钙形成了一层薄壳覆盖在纤维表面。对比图 4、图 5,同样在 20 000 的放大倍数下,与砂间形成的立方体状的大颗粒结晶不同,在纤维表面生成的碳酸钙要更加细小、致密,结晶更加紧密地分布,将纤维包裹在其中。

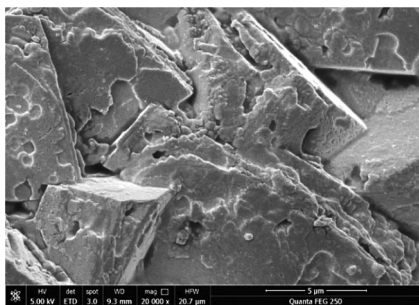


图 4 砂颗粒间碳酸钙结晶图

Fig. 4 Crystal diagram of calcium carbonate between sand particles

从表 5 中可以看出,固化土体的强度总体上随纤维掺量、纤维长度的增加而增加,但到一定程度后又会有所下降。图 6 为试样破坏后微观视角下聚集成簇的纤维,更长的纤维其锚固长度也 longer,能够充分发挥纤维的抗拉强度,但纤维超过一定长度后,其作用有所减弱。

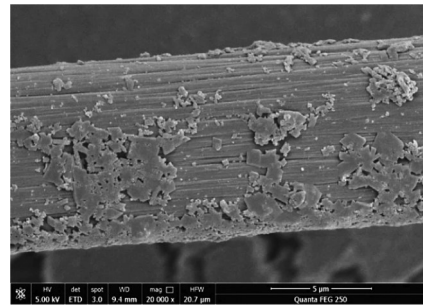
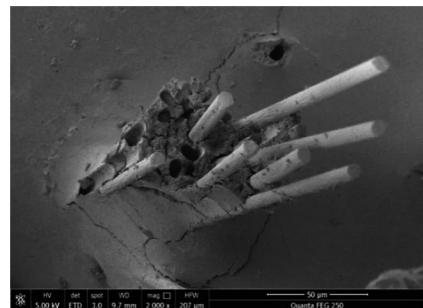
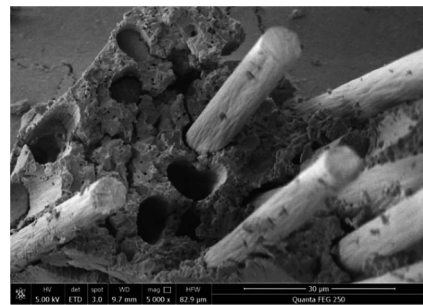


图 5 纤维处碳酸钙结晶分布图

Fig. 5 Calcium carbonate crystal distribution map at the fiber



(a) 放大 2 000 倍



(b) 放大 5 000 倍

图 6 不均匀分布的纤维图

Fig. 6 Fiber diagram with uneven distribution

3.2 高轮次注浆试验结果

高轮次注浆试验中,无侧限抗压强度以及碳酸钙含量与加固轮次关系的结果如图 7 所示。

试验中发现掺加纤维改变了试样的极限注浆轮次,未掺加纤维的试样在加固到第 48 轮时由于反

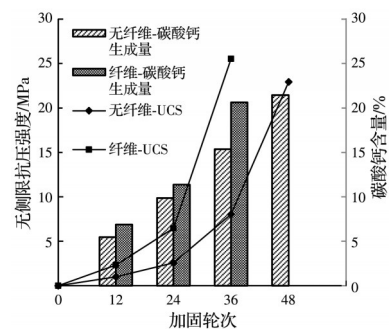


图 7 不同加固轮次试样碳酸钙含量及抗压强度关系图

Fig. 7 Relationship diagram of calcium carbonate production and compressive strength of samples of different reinforcement rounds

应液无法顺利流入,无法继续进行加固,此时加固结束,而掺入9 mm长、1.2%掺量的试样在加固到第36轮时就无法再进行灌注。这是由于纤维本身占据渗流通道加上细菌吸附率及碳酸钙含量的提高,占据试样孔隙的速率加快,致使掺加纤维组更快地达到了注浆极限。

从图7中可以看出,随着加固轮次的增加,砂柱中生成的碳酸钙含量不断上升,且随着加固轮次的增加,碳酸钙含量增长的速度在不断加快。同时,在相同的加固轮次下,纤维加筋处理的试样碳酸钙含量数值均高于未掺纤维的实验组,且随着加固轮次的增加差距在不断扩大。在经过12次注浆处理后掺加纤维要比未掺纤维多生成1.41%的碳酸钙,当加固到第36轮时两者之间的差距扩大到5.29%。产生这样的现象与上一章所得到的纤维为细菌提供了一定的生长和吸附空间,并增加了反应机会的结论有关。更多的细菌留存和更优越的反应条件,也就有更高的反应效率,同样的注浆次数下纤维组就会有更多的碳酸钙生成。

图7中,当注浆轮次达到极限时,两试验组最终的碳酸钙含量几乎相等,纤维组最终碳酸钙含量数值在20.64%,而无纤维组稍高,最终达到21.45%。当两试验组都达到注浆极限时,渗流通道几乎都被生成的碳酸钙阻塞,所以最终两试验组的生成量并不会存在太大差异。而纤维组略低于无纤维组,除了误差的因素外,掺加的纤维占据了试样孔隙也致使此差异产生。

对不同注浆轮次下的试样进行抗压试验,无侧限抗压强度数据也绘制于图7中。试样强度的提升整体呈现“前期缓慢后期加快”的规律,且纤维组的数据均处于无纤维组的上方。对比相同加固轮次下的加固效果,加固12次后纤维试验组的强度大约为无纤维组的2.3倍,加固24次后纤维组平均强度为6.47 MPa,为无纤维组的2.5倍,加固到36次倍数增加到3倍,此时无纤维组仅到达8.05 MPa。由此可见:相同加固轮次下掺加纤维能够有效提高试样抗压强度,且这种加固的提升效果随着加固轮次的增加逐渐放大。但当对比两试验组最终强度时,从图7可以看出,两试验组的数据点高度差异不大,此时试验测得纤维组平均强度为25.54 MPa,而未加纤维的试验组平均强度为22.94 MPa,从最终的无侧限强度来看掺加纤维提高了2.6 MPa,占无纤维组平均强度的11%左右。纤维加筋对提升试样的极限强度有一定的效果,但明显不如中等强度范围的提升程度。

从不同加固轮次下碳酸钙含量的数据可以看

出,相同轮次下纤维组抗压强度高于无纤维组。主要有两个因素的影响:一是碳酸钙含量的提升,二是纤维的加筋作用。为更清楚地对比两因素对强度的影响,以碳酸钙含量为横坐标将各试验组的抗压强度绘制于图8中。

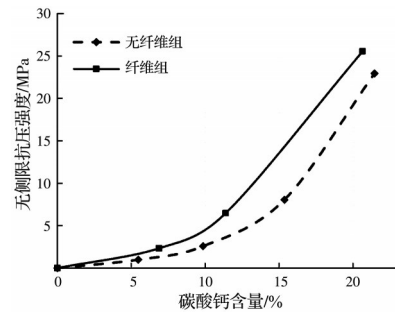


图8 碳酸钙与抗压强度关系图

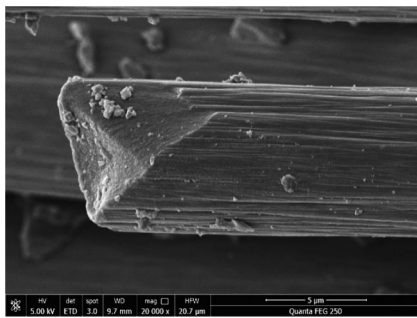
Fig. 8 Diagram of calcium carbonate vs. compressive strength

如图8所示,碳酸钙含量与抗压强度呈正相关,当碳酸钙含量低于10%时其强度提升速率较慢,曲线较为平缓,随着碳酸钙继续生成,强度提升加快。从图中可以看出掺加纤维后试样强度的变化趋势与无纤维组相似,但纤维的数据点所绘制的变化曲线位于无纤维组曲线的上方,作为与横坐标垂直的直线,将得到与两曲线相交的两点,而两点间的距离可近似看作相同碳酸钙含量下纤维加筋作用提供的强度提升。

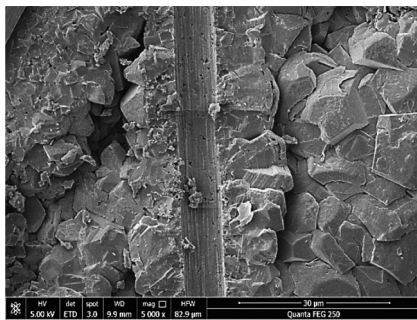
图8中每条曲线上从左至右的数据点分别代表随0、12、24、36、48次注浆后试样的强度及对应的碳酸钙含量,从图中可清晰地看出掺加纤维后纤维组的数据点均位于未掺纤维组的“右上方”,展现出纤维增加试样的碳酸钙含量并提升试样抗压强度的两个特性。若沿垂直于横坐标轴方向作一组平行线,每一条垂线上与曲线的两个交点的纵坐标即代表相同碳酸钙含量下的抗压强度,纤维组与无纤维组间的差值就是同一碳酸钙含量下纤维产生的强化效果,反应在图像上就是,垂线与两数据曲线相交的点之间的距离。从图中可以看出,两点间的距离即纤维的提升效果表现为先提升后略微减少。

为解释该现象,对高注浆轮次的试样进行扫描电镜分析,在试样破坏面处发现了在低注浆轮次试样没有出现的现象——纤维出现了断裂,图9(a)是某纤维的断裂面,这表明纤维提供拉应力阻止裂缝发展是存在极限的,高注浆轮次处理后的试样相应的强度也更大,但当荷载或形变突破某一数值时,纤维发生断裂而失效;除此之外,纤维存在另一种失效的形式,即在荷载作用下,纤维没有发生断裂,但纤维与钙质砂之间的碳酸钙胶结遭到破坏,导致

纤维被整根抽出,加筋作用失效,图9(b)展现了纤维被抽出后残留下的孔洞。通过微观层面的观察得出结论:纤维本身以及纤维与碳酸钙结晶间的胶结是存在极限的,这限制了纤维对试样的强度提升效果,在高强度或大形变下,纤维发生断裂或纤维被抽出,导致纤维的加筋作用失效,这也使得纤维的桥接作用存在上限,不能持续提升。



(a) 纤维断口



(b) 残留纤维孔洞

图9 纤维试样SEM图

Fig. 9 SEM images of fiber samples

另外,即使纤维的提升效果存在一端增长的区间,从图8可以看出,在后期其增长速度远不及碳酸钙增加所带来的强度提升,当碳酸钙含量低于10%时,由于试样强度较低,可以看出掺加纤维能够提升近乎1倍的强度,纤维的强化效果显著,但当碳酸钙含量进一步提升,试样强度快速增加,纤维强化所占比例持续降低,图中表现为两交点间的距离小于无纤维曲线上交点到横坐标轴的距离,加固后期碳酸钙增量在提高强度作用中占主导地位。上述两点限制了纤维在微生物高强度加固的应用。

综上,当碳酸钙含量较高时,纤维加筋所带来的强度提升仅占试样总强度很小的比例。当两组试样都到达注浆极限时,纤维组碳酸钙含量略低于无纤维组,最终提高了2.6 MPa的强度。达到注浆极限前,在相同注浆轮次下,掺加碳纤维会增加碳酸钙的生成,快速提高试样的强度,能在较短的时间内获得所需的强度,同时在相同的时间下能够获得更好的加固效果。试验过程中纤维组较无纤维

组减少了12次注浆处理,节省了大量的胶结材料,同时也大大减少了时间成本。

将现有文献中<sup>[19-21,24,27,41-42]</sup>微生物固化钙质砂强度数据进行汇总,绘制于图10中。

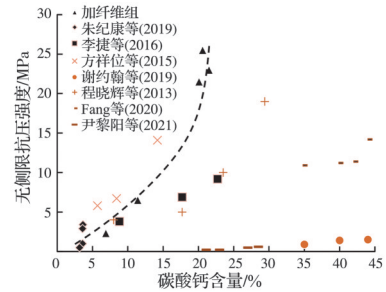


图10 微生物固化钙质砂碳酸钙与抗压强度关系图

Fig. 10 Relationship between microbially cured calcareous sand calcium carbonate and compressive strength

如图10所示,图中数据点与图8抗压强度与碳酸钙之间的变化关系曲线一致,且数据变化与李捷等<sup>[19]</sup>、程晓辉等<sup>[41]</sup>的试验结论相近。谢约翰等<sup>[27]</sup>以及Fang等<sup>[42]</sup>通过试验虽然获得了很高的碳酸钙含量,但对应试样的强度并不高,而方祥位等<sup>[20]</sup>在较低的碳酸钙生成的情况下获得了更高的抗压强度。朱纪康等<sup>[21]</sup>及尹黎阳等<sup>[24]</sup>采用常规的加固方式,在不同的碳酸钙含量情况下均未获得很高的强度。将数据点看作整体进行分析发现,抗压强度随着碳酸钙含量增加而提升,且碳酸钙含量越高强度提升也越快。得到的无侧限抗压强度与碳酸钙含量之间的关系符合规律,即砂柱的无侧限抗压强度随着碳酸钙含量的增长而增长。不过加纤维固化后的钙质砂试样所达到的抗压强度远高于已有文献,为现有文献资料中的最高值。

从图10可以看出,碳酸钙含量与无侧限抗压强度的关系曲线呈现出指数函数式的增长趋势,越在曲线段的后端数据增长越快。此时少量的碳酸钙结晶生成就能带来巨大的强度提升,效率极高。这是由于此时的碳酸钙结晶主要参与试样薄弱部分的弥合及填补,同时改善试样的均匀性及整体性,虽只有少部分碳酸钙参加,但能够发挥巨大的作用。故充分利用这个高效提升强度的阶段,能够获得更高的利益。

### 3.3 讨论

在钙质砂试样中掺入碳纤维大大提高了MICP加固钙质砂的效果。其作用机理主要有两个方面。

一方面,碳纤维的加入,增加了整个试样的比表面积,纤维能将一部分微生物吸附于其粗糙的表面,减少了一部分细菌的流失,提高了细菌吸附率<sup>[35]</sup>。在纤维掺量低于1.2%时,这种提高效果随

着掺量的增加而不断增强,此时纤维能够随机均匀地分布于砂粒间及孔隙中。当掺量超过1.2%时,纤维在试样中的分布变得不均匀,试样的渗透性发生变化,这种提高效果也开始减弱<sup>[42]</sup>。同时,纤维减缓了胶结液在砂柱中的渗流速度,留存了更多的胶结液在砂柱中。这使得菌液与胶结液的反应机会与反应效率有所提高,从而提高了碳酸钙的生成量。除此之外,纤维的存在为生成的碳酸钙晶体提供了更多的固定区域,减少了游离碳酸钙的数量,这也在一定程度上增加了最终留存于砂柱中的碳酸钙总量<sup>[39-40]</sup>。综上,碳纤维的掺入能够提高碳酸钙的生成量,这从图5及图7就能看出。

随着外界荷载的提高,纤维本身会发生断裂或纤维与钙质砂之间的锚固作用受到破坏,导致纤维与周围砂粒的摩擦作用大大减小,这使得纤维的加筋作用失效。

另一方面,碳纤维本身具有较高的抗拉强度及模量,在试样所受压力增大时,随着压力的增大试样会出现局部裂缝,此时纤维通过承受拉应力,有效抑制裂缝的延伸与发展,提高试样的抗压能力。但纤维超过一定长度时,较长的纤维在试样中易发生重合或弯折,纤维的传力效果受到抑制,进而影响试样的整体受力性能<sup>[43]</sup>。

## 4 结论

通过在砂柱中掺加碳纤维,并选用不同的长度及掺量,探究两个因素对加固效果的影响。为获得更高的加固强度,在确定好纤维最优参数后,通过增加注浆轮次,测定纤维试样的无侧限抗压强度。得到的结论如下:

1)微生物在砂颗粒和纤维表面诱导生成大小、形态不同的碳酸钙结晶,用以加固土体。试验中纤维掺量及长度的改变,会影响纤维在试样中分布的均匀性,从而改变试样的加固效果。选用长度为9 mm,掺量为1.2%的碳纤维掺入,能够获得最好的固化效果,抗压强度达到2.33 MPa,提高了135%。

2)通过掺加碳纤维可以提高微生物固化钙质砂强度。纤维主要通过提高试样碳酸钙生成量以及发挥桥接作用提升试样的强度,而纤维本身以及纤维与碳酸钙结晶间的胶结作用存在极限,高荷载和大变形下纤维会失效,致使其所能发挥的桥接作用存在上限。随着注浆次数的增加、试样强度的提高,碳酸钙增量所带来的强度增益占主导地位。而当达到注浆极限时,两组试样的碳酸钙含量差异不大,甚至因为纤维占据了部分孔隙使碳酸钙总量略

低于无纤维组,仅靠纤维加筋的作用,并不能使试样强度有很大的提升,试验结果显示平均提高了11.33%。

3)对比不同注浆轮次下的试样发现,相同注浆次数下纤维试样能够生成更多的碳酸钙结晶,更好地填充孔隙并获得更高的抗压强度。且随着注浆轮次的增加强度增长迅速,相较于无纤维组固化效果的提升也更加显著,经36次注浆处理后,掺加纤维能使试样抗压强度提升为未掺试样的3倍。故掺加纤维在提高加固效率、节省注浆材料以及时间成本方面的表现是显著的。

## 参考文献

- [1] LIU L, LIU H L, XIAO Y, et al. Biocementation of calcareous sand using soluble calcium derived from calcareous sand [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1781-1791.
- [2] JAFARIAN Y, JAVDANIAN H. Dynamic properties of calcareous sand from the Persian Gulf in comparison with siliceous sands database [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(2): 245-249.
- [3] LIU L, YAO X F, JI Z P, et al. Cyclic behavior of calcareous sand from the South China Sea [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(9): 1014.
- [4] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147-151, 156.  
WANG X Z, WANG R, MENG Q S, et al. Study of plate load test of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 147-151, 156. (in Chinese)
- [5] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831-1836.  
ZHU C Q, CHEN H Y, MENG Q S, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831-1836. (in Chinese)
- [6] 陈书鹏, 谢茜, 吴绍渊, 等. 南海岛礁安全预警决策云系统技术架构 [C]//第九届海洋强国战略论坛论文集. 北海, 2018: 187-193.
- [7] 黄云, 胡其高, 张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究 [J]. 国防科技, 2018, 39(3): 50-63.  
HUANG Y, HU Q G, ZHANG S Y. Research on the marine environmental impact on reef structures maintenance [J]. Defense Technology Review, 2018, 39(3): 50-63. (in Chinese)
- [8] KUANG D M, LONG Z L, GUO R Q, et al. Experimental and numerical investigation on size effect on crushing behaviors of single calcareous sand particles [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(5): 543-553.



- [9] LV Y R, LI X, FAN C F, et al. Effects of internal pores on the mechanical properties of marine calcareous sand particles [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(10): 3209-3228.
- [10] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FREITAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. *Géotechnique*, 2004, 54(3): 157-163.
- [11] XIAO Y, LIU H, XIAO P, et al. Fractal crushing of carbonate sands under impact loading [J]. *Géotechnique Letters*, 2016, 6(3): 199-204.
- [12] 刘汉龙, 胡鼎, 肖杨, 等. 钙质砂动力液化特性的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(6): 707-711, 725.  
LIU H L, HU D, XIAO Y, et al. Test study on dynamic liquefaction characteristics of calcareous sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(6): 707-711, 725. (in Chinese)
- [13] 兰恒星, 赵晓霞, 伍宇明, 等. 钙质岛礁沉降变形过程分析 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10): 1-8.  
LAN H X, ZHAO X X, WU Y M, et al. Settlement and deformation characteristics of calcareous island-reef [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 1-8. (in Chinese)
- [14] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究 [J]. *地基处理*, 2019, 1(1): 26-31.  
LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. *Chinese Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [15] 刘汉龙, 马国梁, 赵常, 等. 微生物加固钙质砂的宏微观力学机理 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(4): 205-206.  
LIU H L, MA G L, ZHAO C, et al. Macro-and micro-mechanical regime of biotreated calcareous sand [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(4): 205-206. (in Chinese)
- [16] 吴创周, 楚剑, 成亮, 等. 微生物注浆地基处理技术研究进展 [J]. *地基处理*, 2020, 2(3): 181-186.  
WU C Z, CHU J, CHENG L, et al. Advances of ground improvement with MICP-based biogrouting [J]. *Chinese Journal of Ground Improvement*, 2020, 2(3): 181-186. (in Chinese)
- [17] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14.  
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [18] 沈道健, 王照宇, 梅岭, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固地基技术研究进展 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 31(3): 390-398.  
SHEN D J, WANG Z Y, MEI L, et al. Review of microbial induced calcite precipitation ground improvement technique [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 31(3): 390-398. (in Chinese)
- [19] 李捷, 方祥位, 张伟, 等. 菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响 [J]. *后勤工程学院学报*, 2016, 32(6): 88-91, 96.  
LI J, FANG X W, ZHANG W, et al. Influence of urease activity of bacteria liquid on coral sand biocementation [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(6): 88-91, 96. (in Chinese)
- [20] 方祥位, 申春妮, 楚剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(10): 2773-2779.  
FANG X W, SHEN C N, CHU J, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2773-2779. (in Chinese)
- [21] 朱纪康, 周杨, 王殿龙, 等. 基于微生物诱导矿化的钙质砂加固影响因素 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(6): 206-211.  
ZHU J K, ZHOU Y, WANG D L, et al. Affecting factors for calcareous sand reinforcement based on microbial induced mineralization [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 206-211. (in Chinese)
- [22] 骆晓伟. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)的砂土固化试验研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018.  
LUO X W. Experimental study on sandy soil solidification based on MICP technology [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. (in Chinese)
- [23] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 15-21.  
ZHENG J J, SONG Y, LAI H J, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 15-21. (in Chinese)
- [24] 尹黎阳, 唐朝生, 张龙. MICP联合纤维加筋改性钙质砂力学特性研究 [J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 679-686.  
YIN L Y, TANG C S, ZHANG L. Experimental study on mechanical behavior of MICP-fiber reinforce treated calcareous sand [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 679-686. (in Chinese)
- [25] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 623-629.

- [26] 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.
- [27] 谢约翰,唐朝生,尹黎阳,等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 675-682.  
XIE Y H, TANG C S, YIN L Y, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 675-682. (in Chinese)
- [28] 马福全,高建新,孙皓,等. 不同纤维长度加筋土无侧限抗压强度分析[J]. *山西建筑*, 2016, 42(9): 66-68.  
MA F Q, GAO J X, SUN H, et al. Analysis of unconfined compressive strength of reinforced soil with different fiber length [J]. *Shanxi Architecture*, 2016, 42(9): 66-68. (in Chinese)
- [29] 林胜强,雷学文,孟庆山,等. 纤维掺量对MICP固化钙质砂动力特性的影响[J]. *人民长江*, 2020, 51(7): 181-187.  
LIN S Q, LEI X W, MENG Q S, et al. Influence of fiber contents on dynamic behavior of MICP-treated calcareous sand [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(7): 181-187. (in Chinese)
- [30] 包承纲,丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. *土工基础*, 2012, 26(1): 80-83.  
BAO C G, DING J H. Researches and applications of fiber reinforced soils [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2012, 26(1): 80-83. (in Chinese)
- [31] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil [J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(2): 123-131.
- [32] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers [J]. *Applied Clay Science*, 2007, 38(1/2): 23-32.
- [33] 李昊,唐朝生,尹黎阳,等. MICP-FR协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1941-1949.  
LI H, TANG C S, YIN L Y, et al. Experimental study on surface erosion resistances and mechanical behavior of MICP-FR-treated calcareous sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1941-1949. (in Chinese)
- [34] ZHAO Y, XIAO Z Y, FAN C B, et al. Comparative mechanical behaviors of four fiber-reinforced sand cemented by microbially induced carbonate precipitation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(6): 3075-3086.
- [35] LEI X W, LIN S Q, MENG Q S, et al. Influence of different fiber types on properties of biocemented calcareous sand [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(8): 1-9.
- [36] SPENCER C A, VAN PAASSEN L, SASS H. Effect of jute fibres on the process of MICP and properties of biocemented sand [J]. *Materials*, 2020, 13(23): E5429.
- [37] LI L, WEN K J, BU C M, et al. Enhancement of bio-sandy brick through discrete randomly distributed fiber [C]//*Geo-Congress 2020*. February 25-28, 2020, Minneapolis, Minnesota. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2020: 39-45.
- [38] 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.
- [39] HAKAMY A, SHAIKH F U A, LOW I M. Microstructures and mechanical properties of hemp fabric reinforced organoclay-cement nanocomposites [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 298-307.
- [40] YAO D F, WU J, WANG G W, et al. Effect of wool fiber addition on the reinforcement of loose sands by microbially induced carbonate precipitation (MICP): mechanical property and underlying mechanism [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1401-1416.
- [41] 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)
- [42] FANG X W, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of fiber content and length on engineering properties of MICP-treated coral sand [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2020, 37(6): 582-594.
- [43] 郑俊杰,宋杨,吴超传,等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 73-78.  
ZHENG J J, SONG Y, WU C C, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced MICP-treated sand [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(12): 73-78. (in Chinese)