

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.129



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 钙源对微生物矿化胶结砂土材料均匀性的影响

徐溪晨<sup>a,b</sup>, 郭红仙<sup>a</sup>, 程晓辉<sup>a</sup>, 乔婧<sup>a</sup>, 杜鉴航<sup>a</sup>  
(清华大学 a. 土木工程系; b. 基建规划处, 北京 100084)

**摘要:**微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术可以改善砂土材料的力学性质,但MICP胶结砂土材料的均匀性问题是目前存在的重要问题,且严重影响了MICP技术的工程应用。进行小尺寸(直径3 cm、高度11 cm)和细长(直径5 cm、高度100 cm)砂柱试样的MICP一批次灌浆试验和溶液环境试验,探究氯化钙和乙酸钙两种钙源对MICP矿化反应过程和MICP胶结砂土材料均匀性的影响。MICP胶结砂土试样的碳酸钙含量和单轴抗压强度试验结果表明,与氯化钙作为钙源相比,乙酸钙作为钙源可以增加砂柱胶结长度,改善碳酸钙在灌浆方向的均匀性,减少MICP胶结砂土材料沿灌浆路径的强度差异;乙酸钙作为钙源可减缓MICP矿化反应过程,降低营养液中尿素的分解速率,进而提高营养液中未分解尿素和游离钙离子在MICP胶结砂土材料中的传输距离,有利于提高MICP胶结砂土材料的均匀性。

**关键词:**微生物诱导碳酸钙沉积(MICP);MICP胶结砂土材料;钙源;碳酸钙含量;单轴抗压强度  
**中图分类号:** TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0057-07

## Effect of calcium sources on uniformity of bio-cemented sand materials

XU Xichen<sup>a,b</sup>, GUO Hongxian<sup>a</sup>, CHENG Xiaohui<sup>a</sup>, QIAO Jing<sup>a</sup>, DU Jianhang<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Office of Construction and Campus Planning, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

**Abstract:** Microbially induced carbonate precipitation (MICP) technique is one of the promising methods that can improve the mechanical behaviors of the sand materials via the precipitated calcium carbonate crystals. However, the uniformity of bio-cemented sand materials is a vital problem and hinders the engineering applications of MICP technique. This study explores the effects of calcium chloride and calcium acetate on the MICP process and the uniformity of bio-cemented sand columns (3 cm in diameter and 11 cm in height, 5 cm in diameter and 100 cm in height) treated one batch of MICP injection. The calcium carbonate content and unconfined compressive strength results of bio-cemented sand samples demonstrate that the calcium acetate can enhance the length of the cementation path, improve the calcium carbonate distribution along the grouting direction, and reduce the strength differences among the bio-cemented sand materials. Combining with the results of ammonium and calcium ion concentration in the solution environment, when the calcium acetate acts

**收稿日期:** 2023-06-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(51978381)

**作者简介:** 徐溪晨(1994-),女,博士,主要从事岩土工程研究, E-mail: xuxichen2017@163.com。

郭红仙(通信作者),女,副研究员,博士生导师, E-mail: guohx@tsinghua.edu.cn。

**Received:** 2023-06-29

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978381)

**Author brief:** XU Xichen (1994-), PhD, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: xuxichen2017@163.com.

GUO Hongxian (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: guohx@tsinghua.edu.cn.

as the calcium source, the rate of MICP reaction is slower than that by calcium chloride, benefitting the transmission path of the undecomposed urea and the free calcium ions, thereby improving the uniformity of bio-cemented sand materials.

**Keywords:** microbially induced carbonate precipitation (MICP); bio-cemented sand materials; calcium source; calcium carbonate content; unconfined compressive strength

在众多新型技术的研究中,以微生物诱导碳酸钙沉积(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)为核心的微生物成矿学技术的产生和发展给土木工程领域带来了新的机遇和挑战。其原理是利用自然界中细菌自身生命代谢活动产生的脲酶水解环境中的尿素,后与钙源物质发生矿化反应生成碳酸钙沉淀<sup>[1]</sup>。与化学过程产生的碳酸钙晶体不同,微生物矿化过程生成的碳酸钙具有胶结作用,可将松散颗粒胶结起来<sup>[2]</sup>,且具有胶结强度可调控、环境污染少、能耗低、排放低等优点。微生物诱导碳酸钙沉积技术创造性地利用丰富的天然无毒害微生物资源改变并控制土的工程力学性质<sup>[3-4]</sup>,在岩土工程中有广阔的应用前景,是岩土工程领域最具革新性的技术之一<sup>[5-6]</sup>,已在水土流失治理<sup>[7-8]</sup>、地基加固<sup>[9-10]</sup>、岩土与砖石文物修复<sup>[11-12]</sup>等领域有一定的研究和应用。

目前对微生物矿化碳酸钙技术的研究主要集中在实验室内,在材料尺度上,实验室MICP胶结砂土材料的不均匀性问题并不明显。但当试验尺度扩大时,碳酸钙在MICP胶结砂土材料中的不均匀分布问题将严重影响胶结材料的整体强度。如, van Paassen等<sup>[13]</sup>用MICP固化体积为100 m<sup>3</sup>的砂土,发现不同区域的碳酸钙含量差距较大,最低为0.8%,最高为23.5%。为解决碳酸钙在MICP胶结砂土材料中分布的不均匀性问题, Harkes等<sup>[14]</sup>提出分步灌浆法,先将菌液注入砂土中,然后注入固定液(低浓度的钙离子溶液),最后注入营养液,结果表明,砂柱的均匀性明显改善。其原因是,一方面带正电荷的固定液可以使带负电的细菌固定在砂颗粒表面,另一方面固定液的注入可以使先前已分布的细菌重新分布。Won等<sup>[15]</sup>发现表面带负电的高岭土(100 mg/L)可以吸附钙离子,在注入营养液前注入高岭土悬浊液可有效提高微生物砂浆中碳酸钙分布的均匀性,也使得试样的整体强度得到了提高。Cui等<sup>[16]</sup>、Yang等<sup>[17]</sup>尝试用低浓度盐酸和乙酸延缓微生物矿化碳酸钙的反应过程,使游离的钙离子和碳酸根离子可以传输到距离灌浆口更远的位置,进而提高MICP胶结砂土材料的均匀性。相关研究中并未注意到钙源不同对胶结砂土均匀性的影响。而钙源对MICP胶结砂土材料影响的研

究主要集中在强度方面。为避免氯离子的腐蚀,研究人员尝试采用乙酸钙和其他钙源来为微生物矿化反应提供钙离子。研究表明,使用不同钙源固化形成的MICP胶结砂土材料的力学性质也有区别。如,Zhang等<sup>[18-19]</sup>研究发现,在相同制备条件下,以乙酸钙作为钙源制备的MICP胶结砂土材料强度高于以氯化钙和硝酸钙作为钙源的情况;王铖<sup>[20]</sup>研究氯化钙、乙酸钙和乙酸镁对砂颗粒胶结效果的影响,发现乙酸钙的胶结效果最好;程瑶佳等<sup>[21]</sup>用乙酸钙、氯化钙和石灰石3种钙源分别固化砂颗粒,结果表明,以乙酸钙作为钙源的胶结效果略高于石灰石,二者均高于氯化钙的胶结效果。但Abo-El-Enain等<sup>[22]</sup>发现,在进行裂缝填充修复时,氯化钙效果优于乙酸钙和硝酸钙的修复效果。朱磊<sup>[23]</sup>用多种钙源对粉砂、粉土和粉质黏土进行固结,结果表明,氯化钙和乙酸钙的胶结效果明显好于硝酸钙和乳酸钙,且使用氯化钙矿化生成的碳酸钙含量和制备的MICP胶结砂土材料的单轴抗压强度均优于乙酸钙。付佳佳等<sup>[24]</sup>以氯化钙和乙酸钙为钙源分别对砂土材料拌和固化,发现氯化钙的胶结效果较好。研究人员对氯化钙和乙酸钙的胶结效果所得结论有所不同,这可能与试验条件和试剂质量有关,但总体可确定氯化钙和乙酸钙的胶结效果相对较好。

综上所述,胶结砂土材料的不均匀性问题极具研究价值,但针对不同钙源在MICP胶结砂土材料均匀性方面的研究基本还未开展。笔者将考虑胶结效果较好的氯化钙和乙酸钙两种钙源(单一及混合),展开钙源对MICP胶结砂土材料均匀性的影响研究。在对两种规格的砂柱进行MICP一批次灌浆的基础上,以沿灌浆路径的碳酸钙含量的分布和强度变化作为指标,衡量评估MICP胶结砂土材料均匀性。同时,为进一步解释不同钙源对胶结砂土材料均匀性影响的机理,还进行了氯化钙和乙酸钙条件下溶液环境MICP矿化过程的探究。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

所用细菌为巴氏芽孢八叠球菌菌株,编号ATCC 11859,购于美国菌种保藏中心。细菌培养基为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-YE培养基,主要成分为:20 g/L酵母提

取物、10 g/L  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 和10  $\mu\text{mol}$   $\text{NiCl}_2$ 。培养过程为:用氢氧化钠溶液将培养基pH值调整为8.5~9.0。将配好的培养基置于高压蒸汽灭菌锅中,在120  $^\circ\text{C}$ 温度下灭菌20 min。冷却至常温后,于单人超净工作台中接种,每200 mL培养基接种1 mL种子液。随后在振荡培养箱中在30  $^\circ\text{C}$ 条件下以180 r/min转速培养16 h以获得微生物菌液。

试验所用砂颗粒为中国ISO标准砂,图1为所用硅质砂颗粒的XRD图谱,Q为二氧化硅,XRD定量分析表明砂颗粒中二氧化硅含量大于96%。对标准砂进行筛分,选取粒径范围为0.075~0.4 mm砂颗粒作为试验材料,相应粒径级配曲线见图2,砂颗粒 $d_{50}$ 为0.23 mm。

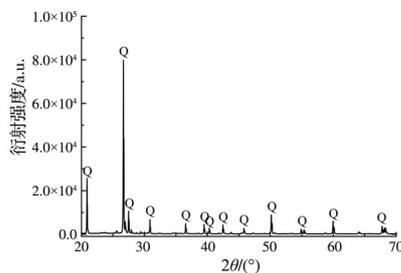


图1 硅质砂XRD图谱

Fig. 1 The XRD pattern of silica sands

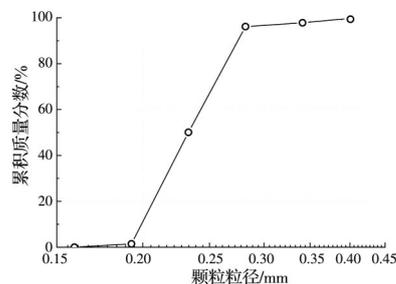


图2 硅质砂颗粒粒径级配曲线

Fig. 2 The particle size distribution curve of silica sands

营养液由钙源和尿素组成,其中,钙源用氯化钙或(和)乙酸钙来提供游离钙离子,尿素被细菌分泌的脲酶水解后提供碳酸根。采用的试剂均为分析纯级,由上海泰坦科技股份有限公司提供。

## 1.2 试验方案及测试方法

### 1.2.1 试验方案及试验步骤

进行小尺寸砂柱试样(直径为3 cm、高度为11 cm)和细长砂柱试样(直径为5 cm、高度为100 cm)的灌注固化试验和溶液环境下的矿化试验。试验方案见表1,表中给出了各试验组的钙源种类及浓度。

#### 1)溶液环境

试验为试管中静置溶液环境试验,1 mL菌液与100 mL营养液混合。所用细菌的酶活为18.89 (mmol/L)/min,  $\text{OD}_{600}$ 为2.16。营养液为0.5 mol/L尿素和0.5 mol/L钙源(见表1)。

表1 钙源种类及浓度

Table 1 Type and concentration of calcium source

反应条件	试样尺寸	组别	氯化钙/ (mol/L)	乙酸钙/ (mol/L)
溶液 (静置)		I-A	0.5	0
		I-F	0	0.5
砂柱 (灌浆)	直径为3 cm、 高度为11 cm	II-A	0.5	0
		II-B	0.4	0.1
		II-C	0.3	0.2
		II-D	0.2	0.3
		II-E	0.1	0.4
		II-F	0	0.5
砂柱 (灌浆)	直径为5 cm、 高度为100 cm	III-A	0.5	0
		III-F	0	0.5

反应进行至6 h、24 h、3 d、7 d、14 d和28 d时,收集试管中的菌液和营养液混合溶液,进行铵根离子和钙离子浓度测试。

#### 2)小尺寸砂柱试样

使用内径为3 cm、高度为11 cm的注射器作为模具,模具中填充质量为(115.5 $\pm$ 0.5)g的砂颗粒。灌浆入口和灌浆出口处分别用双层纱布作为过滤片防止砂颗粒在灌浆过程中被冲出模具。采用一批次灌浆,灌浆具体步骤如下:

①以1.2 mL/min速度向试样中灌入50 mL菌液,灌浆结束后静置约2 h,所用细菌的酶活为20.88 (mmol/L)/min,  $\text{OD}_{600}$ 为2.30。

②以1.2 mL/min速度向试样中灌入10 mL固定液,固定液由0.05 mol/L氯化钙组成。

③以0.4 mL/min速度向试样中灌入400 mL营养液,营养液为0.5 mol/L尿素和0.5 mol/L钙源(详见表1)。

#### 3)细长砂柱试样

使用内径为5 cm、高度为100 cm的模具,试样制备过程与小尺寸试样制备一致。灌浆具体步骤如下:

①以15 mL/min速度向试样中灌入1 L菌液,灌浆结束后静置约2 h,所用细菌的酶活为19.55 (mmol/L)/min,  $\text{OD}_{600}$ 为2.01。

②以5 mL/min速度向试样中灌入10 L营养液,营养液为0.5 mol/L尿素、0.5 mol/L钙源(详见表1)。

对于砂柱试样,在完成一批次灌浆后,用纯净水将砂柱中存留的可溶性盐冲洗掉,将MICP胶结砂柱从模具中取出,随后进行切割。

将直径为3 cm、高度为11 cm的砂柱切割成两部分,靠近灌浆口的一端记为a端,远离灌浆口的一端记为b端;直径为5 cm、高度为100 cm的细长砂

柱,切割成长度为 10 cm 的试样,沿灌浆方向分别记为-1、-2...-10 试样。将切割后的试样放置于 70 °C 烘箱 48 h,烘干后再进行碳酸钙含量和单轴抗压强度测试。

### 1.2.2 测试方法

#### 1) 钙离子浓度和铵根离子浓度

在设定的反应时间取试管中溶液,将收集到的溶液过 0.45 μm 水系滤膜,再将待测溶液稀释到合适的浓度进行钙离子浓度和铵根离子浓度测试。

钙离子浓度由清华大学环境学院通过电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP)法(仪器型号为 ICAP PRO)测得。铵根离子浓度由清华大学环境学院通过阳离子色谱法测得。

#### 2) 碳酸钙含量

采用质量差法进行碳酸钙含量的测试,对未成型的试样采用盐酸法进行碳酸钙含量的测试。

①质量差法:试样的质量增长主要由微生物矿化生成的碳酸钙晶体导致,未发生碳酸钙胶结前砂土颗粒质量记为  $m_1$ ,经过 MICP 胶结过程后的 MICP 结砂土材料质量记为  $m_2$ ,因此碳酸钙含量为

$$C_{\text{CaCO}_3} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%$$

②盐酸法:对于未成型的试样,取重约 5 g 干燥样品,测量样品的和干燥滤纸的总质量  $m_3$ 。然后,将 1 mol/L 的盐酸滴到样品中以溶解碳酸钙,直到样品中没有气泡产生为止。最后,将溶解后的样品用纯净水冲洗干净后在 70 °C 烘箱中干燥 24 h。盐酸溶解冲洗后样品及滤纸干燥后的干重为  $m_4$ ,干燥滤纸质量为  $m_5$ 。碳酸钙生成量为  $C_{\text{CaCO}_3} = \frac{m_3 - m_4}{m_4 - m_5} \times 100\%$ 。

#### 3) 单轴抗压强度测试

单轴抗压强度试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),使用 MTS 810 电液伺服系统进行测试,采用位移控制方式,荷载精度为 ±0.5%,加载速率为 0.3 mm/min(直径 3 cm 试样)和 1 mm/min(直径 5 cm 试样)。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 溶液试验

#### 2.1.1 钙离子浓度

图 3 为不同反应时间下溶液中钙离子浓度的变化,图中百分数代表此时溶液中的钙离子利用率。整体来看,在 MICP 矿化反应过程中,乙酸钙作为钙源时,溶液中钙离子浓度比氯化钙作为钙源时要

高,即相同时刻乙酸钙为钙源时钙离子利用率低。这说明乙酸钙为钙源时,MICP 矿化反应比较慢。

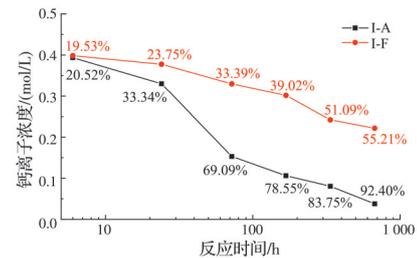


图 3 钙离子浓度

Fig. 3 The concentration of calcium ions

具体来看,矿化反应发生 6 h,氯化钙和乙酸钙作钙源 I-A 和 I-F 试样的钙离子利用率分别为 20.52% 和 19.53%,两者差别不大。当矿化反应时间增加时,两种钙源试样钙离子利用率均提高。由于乙酸钙做钙源的矿化反应较慢,氯化钙试样的钙离子利用率一直较高。其中,在反应时间为 3 d 时,氯化钙试样 I-A 的钙离子利用率上升最快,是 I-F 的 2.07 倍。当反应时间为 28 d 时,I-A 钙离子利用率达到 92.40%,而 I-F 为 55.21%。

#### 2.1.2 铵根离子浓度

图 4 是不同反应时间下溶液中铵根离子浓度的变化,图中百分数是尿素水解率。整体来看,随着反应时间的增加,溶液中的铵根离子浓度增加,即越来越多的尿素被分解,氯化钙 I-A 试样与乙酸钙 I-F 试样的铵根离子浓度上升规律相同,均在 6~24 h 内上升最快。

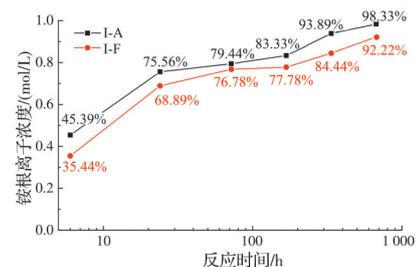


图 4 铵根离子浓度

Fig. 4 The concentration of ammonium ions

相较于氯化钙 I-A 试样,乙酸钙 I-F 试样中铵根离子浓度和尿素分解率较低。在反应时间为 6 h 和第 28 天时,I-F 的尿素分解率分别为 35.44% 和 92.22%,均低于 I-A 相应时刻的尿素分解率 45.39% 和 98.33%。

由图 3 和图 4 可知,同一时刻,两组试验的尿素分解率均大于钙离子利用率。可见,碳酸钙的沉积较尿素水解滞后,钙源为乙酸钙时更突出。

## 2.2 砂柱试验(直径为3 cm、高度为11 cm)

### 2.2.1 单轴抗压强度

图5给出了砂柱a、b两部分的单轴抗压强度测试结果。

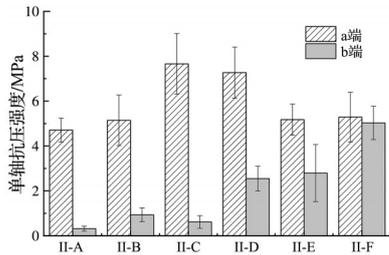


图5 直径为3 cm、高度为11 cm试样单轴抗压强度测试结果  
Fig. 5 The UCS results of bio-cemented sand samples with 3 cm in diameter and 11 cm in height

对于a端,当氯化钙为钙源时,II-A组强度均值为4.71 MPa,随着营养液中乙酸钙浓度增加氯化钙浓度降低,试样a端强度先增加,氯化钙与乙酸钙浓度之比为2:3的II-C组,a端强度达到试验峰值7.66 MPa,随后呈现下降趋势,只有乙酸钙为钙源的II-F组试样a端试样强度为5.29 MPa。

与a端规律不同,b端强度随营养液中乙酸钙浓度的增加(氯化钙浓度降低)而显著增加。强度由II-A组试样的0.32 MPa增加至II-F组试样的5.03 MPa。

由此可见,氯化钙作为钙源时II-A组的a、b两端强度差较大,a端为4.71 MPa,而b端仅为0.32 MPa,砂土固化很不均匀。而乙酸钙作为钙源时II-F组的a、b两端强度相近,a端为5.29 MPa,b端为5.03 MPa,两者差异较小,砂土固化均匀。

### 2.2.2 碳酸钙含量

图6为a、b两端碳酸钙含量的测试结果。氯化钙作为钙源的II-A组,靠近灌浆口和远离灌浆口的试样碳酸钙含量相差较大,分别为31.40%和6.17%。这是碳酸钙的沉积更多集中在灌浆口附近所致。

随着营养液中乙酸钙浓度增加(氯化钙浓度降低),a端碳酸钙含量呈下降趋势,b端则呈增大

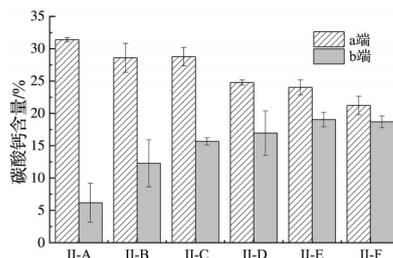


图6 直径为3 cm、高度为11 cm试样碳酸钙含量测试结果  
Fig. 6 The calcium carbonate content results of bio-cemented sand samples with 3 cm in diameter and 11 cm in height

趋势。乙酸钙浓度为0.5 mol/L(氯化钙浓度为0 mol/L)的II-F组,a、b端碳酸钙含量相近,分别为21.22%和18.69%,说明仅用乙酸钙作为钙源时试样中的碳酸钙分布较为均匀,沿灌浆路径方向上变化较小。

结合图5与图6可知,当氯化钙作为钙源时,所生成的碳酸钙主要集中在a端灌浆口附近,导致a端强度较高;而远离灌浆口的b端,碳酸钙含量较低,强度也降低。而乙酸钙作为钙源时a、b端强度和碳酸钙含量均相近。

上述差异可以通过不同钙源MICP矿化过程中钙离子和铵根离子浓度变化来解释。由图3和图4可知,当乙酸钙为钙源时,钙离子的消耗速率和尿素的水解速率均较慢,营养液中游离的钙离子和未分解的尿素可以传输更远,因此,可以扩大MICP胶结材料中碳酸钙的沉积范围,使碳酸钙分布更均匀,进而缩小灌浆路径上材料的强度差异。

### 2.3 砂柱试验(直径为5 cm、高度为100 cm)

图7为直径为5 cm、高度为100 cm的细长砂柱经MICP胶结后的效果图。氯化钙作为钙源的III-A试样,沿灌浆路径完整胶结80 cm,末端20 cm处的胶结效果较差。而由乙酸钙作为钙源的III-F试样,沿着灌浆路径100 cm全部胶结。

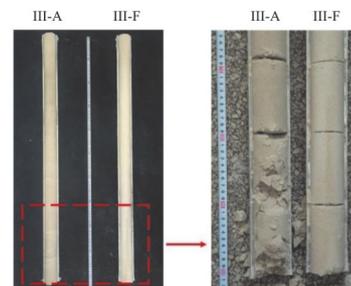


图7 直径为5 cm、高度为100 cm试样胶结效果图

Fig. 7 The picture of bio-cemented sand samples with 5 cm in diameter and 100 cm in height

#### 2.3.1 单轴抗压强度

图8为细长试样沿灌浆方向切割为10 cm试样后所测强度。氯化钙为钙源的III-A试件,结果为:III-A-1为3.47 MPa,III-A-2达9.40 MPa,III-A-3~III-A-6在7.17~8.74 MPa间波动,III-A-7下降至2.30 MPa,III-A-8下降至0.09 MPa,III-A-9和III-A-10未成功胶结未进行强度测试。

乙酸钙为钙源的III-F试件,结果为:III-F-1为3.24 MPa,III-F-2增至7.91 MPa,III-F-3~III-F-8范围为5.27~5.95 MPa,最后的两段为2.85、0.47 MPa。

对于1 m细长柱中间的60 cm,乙酸钙作为钙源

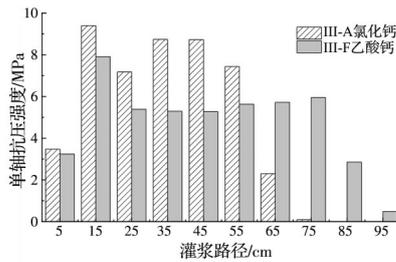


图8 直径为5 cm、高度为100 cm试样单轴抗压强度测试结果

Fig. 8 The UCS results of bio-cemented sand samples with 5 cm in diameter and 100 cm in height

时, III-F-3~III-F-8这6个分段试样的强度在5.27~5.95 MPa,标准差为0.25 MPa,而氯化钙作为钙源的 III-A-3~III-A-8的强度在2.30~8.74 MPa,标准差为3.33 MPa。前者的均匀性好于后者,与两种钙源的小尺寸砂柱(图5)的试验结果一致。

### 2.3.2 碳酸钙含量

碳酸钙含量测试结果见图9, III-A与III-F的碳酸钙含量与强度沿灌浆方向变化趋势基本一致。III-A各段,碳酸钙含量平均值为17.89%,标准差为9.94%。III-F碳酸钙含量的平均值为16.65%,与III-A的平均值相近;而标准差为5.83%,比III-A低不少。这也说明了乙酸钙为钙源时碳酸钙分布更为均匀,与小尺寸试样的结论一致。

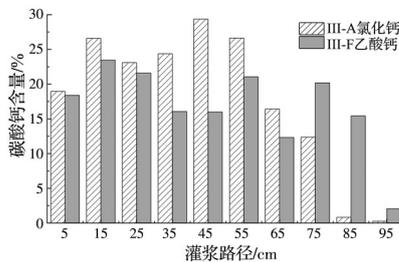


图9 直径为3 cm、高度为100 cm试样碳酸钙含量测试结果

Fig. 9 The calcium carbonate content results of bio-cemented sand samples with 3 cm in diameter and 11 cm in height

综上,无论是1 m细长砂柱试验,还是小尺寸砂柱试验,试验结果都说明乙酸钙作为钙源时,MICP胶结砂土材料在不同位置的碳酸钙含量与单轴抗压强度相差较小,胶结材料的均匀性较好。这是乙酸钙作为钙源时MICP矿化反应较慢所导致的。

## 3 结论

针对MICP胶结砂土材料的均匀性展开研究,重点讨论分析不同钙源(氯化钙和乙酸钙)造成的影响。以灌浆方式(一批次)制备了两种不同尺寸的MICP胶结砂柱,获得了沿灌浆方向材料的碳酸钙生成量和强度的变化规律,并结合溶液环境中钙离子和铵根离子的浓度变化进行了初步机理分析,得到如下结论:

1)与氯化钙相比,以乙酸钙为钙源制备的MICP胶结砂土材料碳酸钙分布更均匀、不同区域的材料强度相差较小,材料的整体均匀性较好。

2)乙酸钙作为钙源时,MICP矿化反应较缓慢,尿素分解率较低,钙离子利用率也较低。使得营养液中游离的钙离子和未分解的尿素可以被传输到更远处,胶结路径可更长,从而提高了MICP胶结砂土材料的整体均匀性。

## 参考文献

- [1] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of  $\text{CaCO}_3$  [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11): 1563-1571.
- [2] QIAN C X, YU X N, WANG X. A study on the cementation interface of bio-cement [J]. *Materials Characterization*, 2018, 136: 122-127.
- [3] XIAO Y, ZHAO C, SUN Y, et al. Compression behavior of MICP-treated sand with various gradations [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1391-1400.
- [4] MA G L, HE X A, JIANG X A, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(7): 969-981.
- [5] 唐朝生, 泮晓华, 吕超, 等. 微生物地质工程技术及其应用[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 625-654.
- [6] TANG C S, PAN X H, LYU C, et al. Bio-geoengineering technology and the applications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 625-654. (in Chinese)
- [7] 曹光辉, 刘士雨, 俞缙, 等. 酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术及其在岩土工程中的应用[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 754-768.
- [8] CAO G H, LIU S Y, YU J, et al. Enzyme-induced calcium carbonate precipitation(EICP) and its application in geotechnical engineering [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 754-768. (in Chinese)
- [9] JIANG N J, TANG C S, YIN L Y, et al. Applicability of microbial calcification method for sandy-slope surface erosion control [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(11): 04019250.
- [10] SALIFU E, MACLACHLAN E, IYER K R, et al. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation [J]. *Engineering Geology*, 2016, 201: 96-105.
- [11] 肖鹏, 刘汉龙, 史金权, 等. 微生物加固钙质砂地基动力响应特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(6): 1303-1313.
- [12] XIAO P, LIU H L, SHI J Q, et al. Dynamic responses of calcareous foundation reinforced by microbially

- induced calcite precipitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(6): 1303-1313. (in Chinese)
- [10] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展 [J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548.  
QIAN C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [11] 杨阳, 刘汉龙, 张良帅, 等. 不可移动石质文物岩石理化性质研究: 以重庆市石佛寺遗址摩崖造像区为例 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(3): 1-8.  
YANG Y, LIU H L, ZHANG L S, et al. Physicochemical properties of immovable stone relics: A case study of Moya statue area of Shifosi Site in Chongqing [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(3): 1-8. (in Chinese)
- [12] 何建宏, 郭红仙, 谭谦, 等. 微生物诱导碳酸钙修复汉白玉石梁裂缝试验研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(6): 46-53.  
HE J H, GUO H X, TAN Q, et al. Experiment research on the restoration of white marble beams using microbially-induced carbonate precipitation [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, 31(6): 46-53. (in Chinese)
- [13] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [14] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.
- [15] WON J, JEONG B, LEE J, et al. Facilitation of microbially induced calcite precipitation with kaolinite nucleation [J]. Géotechnique, 2021, 71(8): 728-734.
- [16] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. Modified one-phase-low-pH method for bacteria or enzyme-induced carbonate precipitation for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(7): 2931-2941.
- [17] YANG Y, CHU J, LIU H L, et al. Improvement of uniformity of biocemented sand column using CH<sub>3</sub>COOH-buffered one-phase-low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(1): 413-428.
- [18] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(Sup2): S279-S284.
- [19] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 160-167.
- [20] 王铖. 不同钙源及营养盐浓度对MICP胶结的影响研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.  
WANG C. Study on the influence of different calcium sources and nutrient concentrations on MICP cementation [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] 程瑶佳, 唐朝生, 刘博, 等. 基于石灰石粉钙源的微生物固化砂土试验研究 [J]. 高校地质学报, 2021, 27(6): 746-753.  
CHENG Y J, TANG C S, LIU B, et al. Experimental study on microbial solidified sand based on calcium source extracted from limestone powder [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 746-753. (in Chinese)
- [22] ABO-EL-ENEIN S A, ALIAH, TALKHANFN, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation [J]. HBRC Journal, 2012, 8(3): 185-192.
- [23] 朱磊. 颗粒级配对酶诱导碳酸钙沉淀加固遗址土的影响研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.  
ZHU L. Effect of particle size distribution on enzyme-induced calcium carbonate precipitation to strengthen site soil [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese)
- [24] 付佳佳, 姜朋明, 纵岗, 等. 微生物拌和固化海相粉土的抗压强度试验研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(1): 167-172, 189.  
FU J J, JIANG P M, ZONG G, et al. Experimental study on compressive strength of solidified marinesilty soil mixed with microorganism [J]. Yangtze River, 2021, 52(1): 167-172, 189. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)