

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.140

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究

吴超传, 郑俊杰, 赖汉江, 崔明娟, 宋杨

(华中科技大学 岩土与地下工程研究所, 武汉 430074)

摘要:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)可以显著改善砂土的工程力学特性,但其固化效果易受诸多因素影响。基于不同胶结水平微生物固化砂土试样,开展固结排水三轴剪切试验和扫描电镜测试,探讨了MICP技术的固化效果及其相关机理;在此基础上,研究了胶结液浓度、砂土初始密实度、胶结液浓度配比等因素对微生物固化砂土抗剪强度的影响。结果表明:随着胶结水平的提高,微生物固化砂土试样强度提高,试样的脆性也越显著。微生物固化砂土强度的增长主要源于碳酸钙晶体对土体黏聚强度的提高。微生物固化砂土的强度主要包括土骨架强度和碳酸钙晶体胶结强度两部分,前者受土体性质及相关参数影响,后者主要取决于碳酸钙晶体的含量。采用合适的砂土初始密实度,适当提高胶结液浓度以及胶结液中尿素的浓度占比,均可提高微生物固化砂土试样的胶结强度。

关键词:微生物固化砂土;碳酸钙含量;峰值强度;三轴试验

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)01-0031-08

Experimental study of the strength enhancing mechanism of bio-cemented sand and its influential factors

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

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

Abstract: Microbial curing (MICP) can significantly improve the mechanical properties of sand. However, the curing effect is affected by many factors. In this study, the consolidated drained triaxial shear tests and electron microscope scanning tests were carried out to investigate the curing effect and the related mechanism of MICP. On this basis, the effects of cementation concentration, relative density and the proportion of cementation liquid's composition on the shear characteristics of bio-cemented sand were

收稿日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800200); 国家自然科学基金(51478201, 51708243, 51878313); 中国博士后科学基金(2016M600595, 2018M632862, 2018T110769)

作者简介: 吴超传(1995-), 男, 主要从事软土地基处理研究, E-mail: wuchaochuan1@hust.edu.cn.

郑俊杰(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

Received: 2019-06-27

Foundation items: National Key Research and Development Program(No. 2016YFC0800200); National Natural Science Foundation of China(No. 51478201, 51708243, 51878313); China Postdoctoral Science Foundation(No. 2016M600595, 2018M632862, 2018T110769)

Author brief: Wu Chaochuan (1995-), main research interest: soft soil foundation, E-mail: wuchaochuan1@hust.edu.cn. Zheng Junjie(corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

studied. The results show that with the increase of cementation level, the strength and brittleness of bio-cemented sand samples are increased. The increase of the strength of the bio-cemented sand is mainly due to the increase of the cohesive strength provided by the calcium carbonate crystal. The strength of the bio-cemented sand consists of the strength of the soil skeleton and the cementation strength of calcium carbonate. The former is influenced by the properties of sand and related parameters, while the latter mainly depends on the content of calcium carbonate crystals. The strength of the bio-cemented sand sample can be improved by using appropriate initial relative density of sand, increasing the concentration and the molar concentration ratio of urea in the cementation liquid.

Keywords: bio-cemented sand; calcite content; peak strength; triaxial test

微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbial induced calcite precipitation, 简称 MICP) 作为自然界中广泛存在的生物矿化过程之一, 其机理是通过向特定微生物提供诸如尿素和钙盐溶液等胶结物质, 利用微生物产生水解酶的催化作用, 分解胶结物质产生碳酸根离子, 并与周围环境中的钙离子结合生成碳酸钙晶体^[1]。目前, 该技术已应用于修复石质材料、混凝土裂缝自愈以及防风治沙和建筑扬尘防治^[2-4]。微生物固化技术在其他领域的成功应用^[5]及其高效、绿色、经济的优势为该技术在岩土工程中的应用奠定了坚实基础。

学者们对微生物固化开展大量的试验研究。赵茜^[6]对巴氏芽孢杆菌的培养以及脲酶活性进行了研究, 发现该菌种最适宜的培养温度为 30 °C, pH 值为 8~9。Paassen 等^[7]、Harkes 等^[8]、Chu 等^[9]以及程晓辉等^[10]将 MICP 技术应用于砂土固化, 发现微生物固化可显著改善砂土的强度、刚度、渗透性以及抗液化性等一系列力学特性。郑俊杰等^[11]和 Xiao 等^[12]将纤维加筋技术应用于微生物固化中, 显著降低了固化土体的脆性, 提高了拉伸强度。以上研究均为微生物固化技术应用于砂土地基处理的可行性提供了依据。此外, 微生物固化过程较为复杂, 涉及生物、物理、化学等方面, 故易受诸多因素影响, 如菌液注射方式^[13]、砂土颗粒粒径^[14]、钙源的种类^[15-16]、环境因素^[17](雨水冲刷、冻融循环)等。故深入分析多因素对微生物固化土体工程力学特性的影响及其强度增长的内在机理是目前微生物固化技术应用于实际岩土工程的关键。

笔者基于微生物固化砂土试样开展固结排水 (CD) 三轴试验, 研究不同因素 (包括: 胶结液浓度、砂土密实度以及胶结液浓度配比) 对微生物固化砂土剪切强度的影响; 分析不同胶结水平固化砂土试样的抗

剪强度参数等指标, 并结合扫描电镜图所示的微观结构特征, 探究固化砂土试样强度增长的内在机理。

1 微生物固化及测试

1.1 试验材料

试验用砂为厦门 ISO 标准砂。试验用菌为巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*, 编号 ATCC 11859), 细菌的培养基成分为: 酵母提取物 20 g/L, (NH₄)₂SO₄ 10 g/L, Tris 缓冲液 (用以调节液体培养基的 pH 值, pH=9.0) 0.13 mol/L。对培养基各单一成分高温灭菌以及紫外灭菌后, 于无菌操作台上均匀混合, 并将活化后的细菌接种至培养基中, 最后移至转速为 150 r/min 的摇床中, 在 30 °C 条件下培养至出现浑浊。利用分光光度计测定细菌光密度 (OD₆₀₀) 值为 1.0。试验用胶结液为尿素氯化钙混合溶液, 浓度和配比按表 1 中的试验方案选用。

1.2 试验方案及试样制备

表 1 给出了不同工况的试验方案。试验采用聚氯乙烯预制对开模 (如图 1) 制备直径 × 高度为 39.1 mm × 80.0 mm 的标准三轴试样。

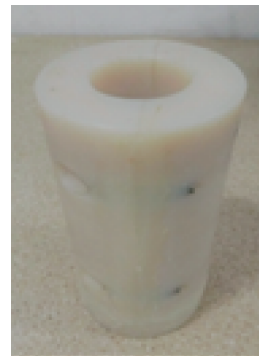


图 1 预制对开模具
Fig.1 Prefabricated mould

表 1 试验方案
Table 1 Test plan

所研究的影响因素	灌浆次数	胶结液浓度/(mol·L ⁻¹)	尿素和氯化钙浓度配比	相对密实度/%	围压/kPa
灌浆次数	0、2、4、6、8、10	0.5	1:1	30	100、200、300
胶结液浓度	8	0.5、1.0、1.5	1:1	30	100
尿素和氯化钙浓度配比	8	0.5	1:1、1:2、2:1	30	100
相对密实度	8	0.5	1:1	30、50、80	100

MICP 试样制备过程:1)模具内放入 1 张油膜纸贴壁,并用一透水石置底;为保证试样的初始状态,采用落雨法在模具内装入高度为 80.0 mm 的标准砂(根据试样密实度装填相应质量的砂土),并以另一透水石封顶。2)从试样顶端注入超过 1 倍试样初始孔隙体积的蒸馏水以排除试样中的多余气泡。3)为提高试样固化的均匀性,采用纯/混注射方式^[13]进行注菌,即将细菌悬浮液与浓度为 0.05 mol/L 的 CaCl₂ 溶液混合(以下简称混合菌液),采用蠕动泵以 5 mL/min 的速率从试样顶端先注入 0.4 倍孔隙体积的纯菌液,随后立即注射 0.6 倍孔隙体积的混合菌液,静置 4~6 h。4)用蠕动泵以 10 mL/min 的速率从试样顶端注入 1 倍孔隙体积的胶结液,间隔 12 h 灌浆一次,达到预定灌浆次数后(见表 1)停止注浆,并向试样中多次注入自来水以终止 MICP 过程。

1.3 固结排水试验

取真空饱和后微生物固化砂土试样,采用 GDS 三轴仪,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[18]进行三轴压缩固结排水(CD)试验。试验过程为:1)利用仪器的反压系统,对试样进行水头饱和;2)待步骤 1)完成后,利用仪器的围压与反压系统,对试样进行反压饱和($B \geq 0.9$);3)根据试验方案将围压加至预定值对试样进行固结,并确保孔隙水压力消散 95% 以上;4)以 0.033 mm/min 的加载速率^[19]进行加载,至轴向应变达到 20% (即 16 mm)停止试验,并取峰值偏应力作为该试样的剪切强度。

1.4 碳酸钙含量测定

取 CD 试验破坏后试样,放入烘箱中烘干至恒重(记为 M_1),并通过酸洗法测定碳酸钙含量。使用过量的、浓度为 1 mol/L 的盐酸进行溶解,而后采用过量的蒸馏水进行多次冲洗,并再次放入烘箱中烘干至恒重(记为 M_2)。通过溶酸前后试样的质量,可计算出试样中碳酸钙含量 C_{CaCO_3} 。

$$C_{CaCO_3} = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100\% \quad (1)$$

2 强度增长机理分析

2.1 破坏模式及应力-应变特性

微生物固化技术在土颗粒间孔隙引入了具有胶结与填充作用的碳酸钙晶体^[1,14],从而改善了土体的强度等工程特性;由于孔隙间堆积的碳酸钙含量不同,不同胶结水平试样的破坏模式及应力-应变特性必然存在差异。

图 2 为微生物固化砂土试样 CD 试验典型破坏模式图。

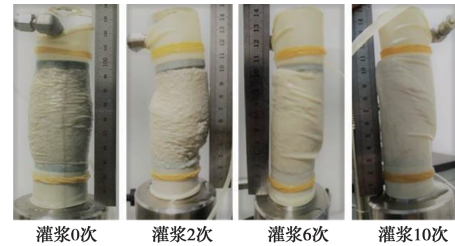


图 2 围压 100 kPa 微生物固化砂土试样破坏模式
Fig.2 Failure mode of bio-cemented sand samples at confining pressure of 100 kPa

从图 2 可知,随着胶结水平的提高,试样的破坏模式从鼓胀型破坏(灌浆 0 次试样)逐渐转变为剪切破坏(灌浆 10 次试样);且胶结水平越高,发生剪切破坏的范围越小。

各围压条件下,不同胶结水平试样的应力-应变曲线($q-\epsilon_a$)变化规律基本一致,故以围压 100 kPa 条件下的 $q-\epsilon_a$ 曲线为例进行分析(图 3)。

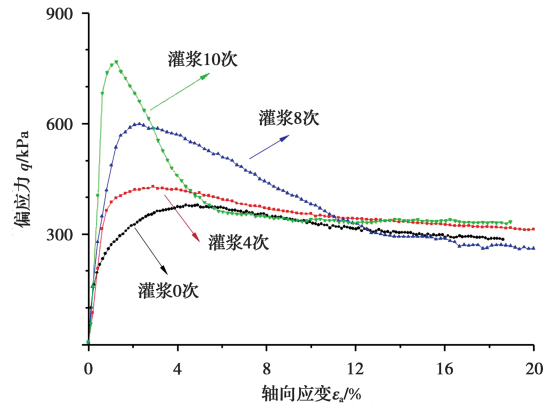


图 3 不同胶结水平试样偏应力 q 与轴向应变 ϵ_a 关系曲线
Fig.3 The relation curve between deflection stress q and axial strain ϵ_a of samples with different cementation levels

从图 3 可见,纯砂试样(灌浆 0 次)的 $q-\epsilon_a$ 曲线呈现出弱应变变化特性;而对于微生物固化试样,随着胶结水平的提高, $q-\epsilon_a$ 曲线的应变软化现象呈逐渐显著趋势。此外,还可发现:随着灌浆次数的提高,峰值偏应力(即峰值强度)越高;而峰值强度所对应的轴向应变越小。这也说明了随着胶结水平的提高,微生物固化砂土试样强度提高,试样的脆性也越显著。

2.2 碳酸钙含量与峰值强度

现有研究表明,当砂土中的碳酸钙含量达到一定水平时,砂土试样的强度可以得到显著提高^[20]。图 4 给出了不同胶结水平试样的碳酸钙含量。

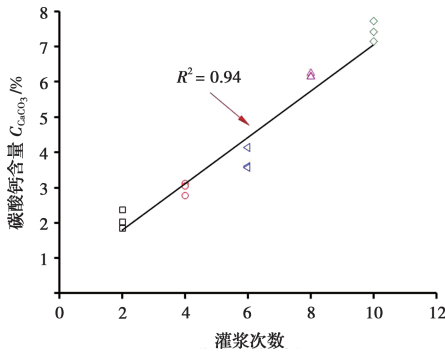


图 4 不同胶结水平试样碳酸钙含量

Fig.4 Calcite content of samples with different cementation levels

从图 4 中看出,微生物固化试样的碳酸钙含量随灌浆次数增加呈线性规律增长;从各组试样中的碳酸钙含量来看,每组 3 个试样碳酸钙含量离散性较小,最大、最小碳酸钙含量之间仅相差 0.58%。由此可见,研究中的微生物固化试样的均匀性较好。

现有研究表明,碳酸钙含量是影响微生物固化砂土强度的重要因素,固化土体的强度随碳酸钙含量的增加而增加^[21]。图 5 给出不同围压条件下试样的峰值强度与碳酸钙含量的关系。从图 5 可以看出,试样的峰值强度随碳酸钙含量的增加呈指数关系曲线增长。可见,随着胶结水平的提高,强度发展的效率越高,强度增长也越显著。强度增长非线性的现象将结合抗剪强度指标和微观结构进行进一步分析。

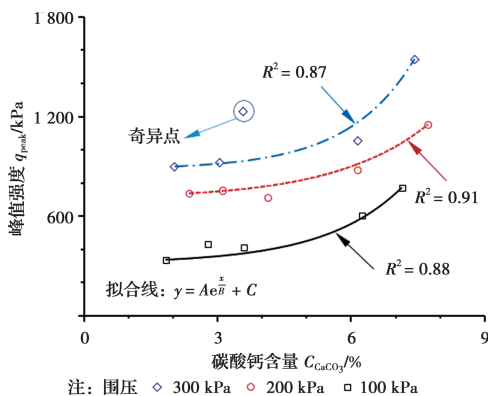


图 5 不同胶结水平试样峰值强度随碳酸钙含量的变化
Fig.5 The peak strength varies with calcite content

2.3 抗剪强度指标与微观结构分析

图 6 为不同胶结水平试样的 $p-q$ 曲线。从图 6 可看出,各试样在不同围压条件下的 $p-q$ 值基本上呈线性关系。因此,可采用摩尔-库伦强度准则计算各组试样的抗剪强度指标 c, φ 。

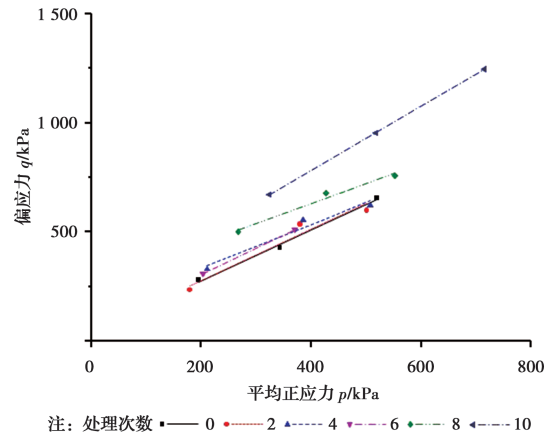


图 6 不同胶结水平试样 $p-q$ 曲线

Fig.6 The $p-q$ curves of samples with different cementation levels

图 7、图 8 分别给出不同胶结水平试样的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 随碳酸钙含量变化情况。从图中可看出,随着碳酸钙含量的增加,微生物固化砂土试样的内摩擦角基本上呈线性规律增长,且增长幅度较小;而黏聚力则呈指数形式增长。可见,微生物固化砂土黏聚强度的提高是其剪切强度提高的主要原因。

基于扫描电镜测试,观察微生物固化砂土试样的微观结构,如图 9 所示。

从图 9 可看出,分布在砂颗粒表面的碳酸钙晶体出现多颗粒簇状集中和单颗粒分散的现象;此外,还可发现碳酸钙晶体多分布在颗粒间接触部位,这与 Dejong 等^[1]的发现相一致。现有研究表明,细菌的电负性是影响细菌吸附的重要因素^[13],吸附于颗粒表面与颗粒间接触的细菌以自身为成核位点^[1]生成碳酸钙晶体,并在其基础上不断累积产生新晶体,

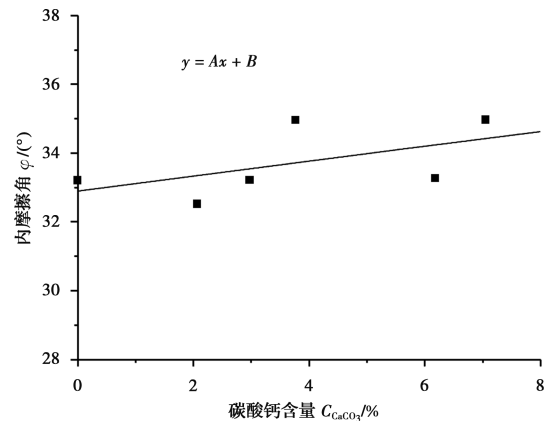


图 7 内摩擦角 φ 随碳酸钙含量变化

Fig.7 The internal friction angle varies with calcite content

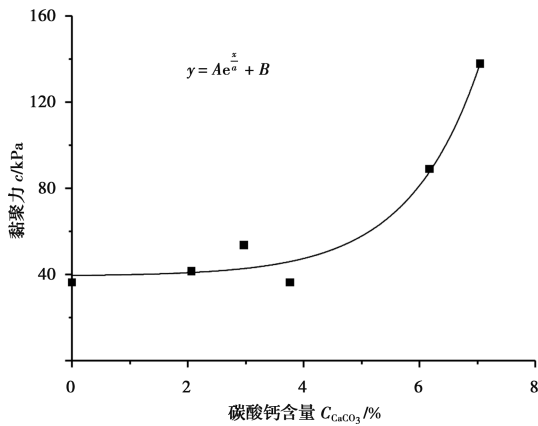


图 8 黏聚力 c 随碳酸钙含量变化

Fig.8 The cohesion varies with calcite content

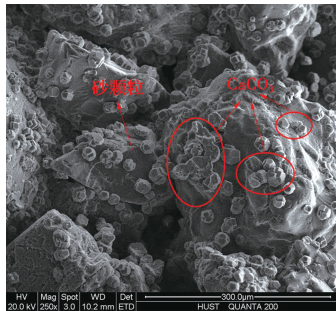


图 9 灌浆 8 次试样 SEM 图

Fig.9 SEM images of samples grouting for 8 times

相邻晶体由于体积扩大而合并,从而产生多颗粒簇状集中形态的晶体。

下面结合胶结过程示意图(见图 10)探讨微生物固化砂土试样剪切强度提高的原因。

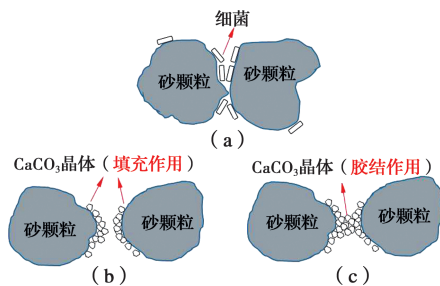


图 10 胶结过程示意图

Fig.10 Diagram of cementing process

从宏观上,起胶结与填充作用的碳酸钙提高了砂土试样的密实度,并将松散的砂颗粒黏结成一个整体^[1,14],从而提高了试样的剪切强度。从抗剪强度指标分析,起胶结与填充作用的碳酸钙提高了砂土颗粒表面的粗糙程度,碳酸钙晶体的嵌入与砂土颗粒间的联锁作用提高了咬合力,从而提高了试样的内摩擦角(见图 7);此外,颗粒间起胶结作用的碳酸钙晶体提供的胶结力显著提高了试样的黏聚力(见图 8)。从微观结构分析,空间上相互接触的砂

土颗粒(见图 10(a)),在二维平面上存在着不接触的地方,此处产生的碳酸钙晶体仅起到填充的作用(见图 10(b))。当碳酸钙不断累积,不接触处的晶体不断扩大,从而相互接触,转而起到了胶结的作用(见图 10(c))。由于这一转变过程极短,故黏聚力和峰值强度随碳酸钙含量的变化呈现出非线性特征(见图 5、图 8)。

综上可知,碳酸钙晶体的胶结作用对试样剪切强度提高的贡献较大^[14]。随着碳酸钙含量的提高,颗粒间起胶结作用的碳酸钙不断增加,试样的胶结强度越大。

3 影响因素分析

3.1 密实度的影响

图 11 给出不同初始密实度固化砂土试样的碳酸钙含量与峰值强度。从碳酸钙含量来看,初始密实度 30% 试样的碳酸钙含量最高,50% 的次之,80% 的最低;而从峰值强度来看,各初始密实度试样的峰值强度相差不大。

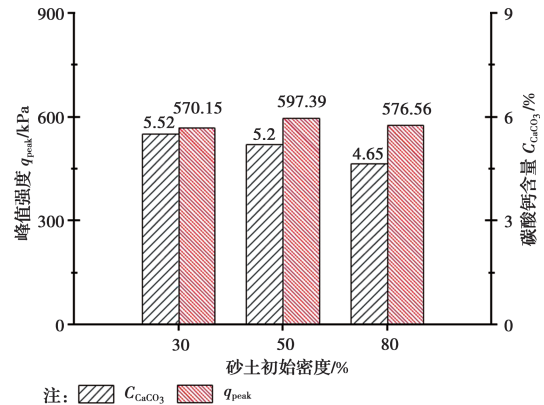


图 11 不同密实度试样的碳酸钙含量与峰值强度

Fig.11 Calcite content and peak strength of samples with different relative density

可从两方面解释上述现象:1)碳酸钙含量与注入的胶结液体积有关,砂土初始密实度越小、试样孔隙体积越大,因此,在相同灌浆次数条件下的碳酸钙沉积量越多;2)微生物固化砂土强度主要由砂土颗粒构成的骨架结构强度和碳酸钙晶体的胶结强度组成;砂土初始密实度小、骨架结构强度低,尽管碳酸钙含量高(即胶结强度较高),但其整体强度仍可能较低,如试验中初始密实度 30% 的试样;同理,砂土密实度大、骨架结构强度高,但因碳酸钙含量较低(即胶结强度较低),其整体强度仍可能较低,如试验中初始密实度为 80% 的试样。

3.2 胶结液浓度的影响

图 12 为不同胶结液浓度条件下,各微生物固化

试样的碳酸钙含量与峰值强度。

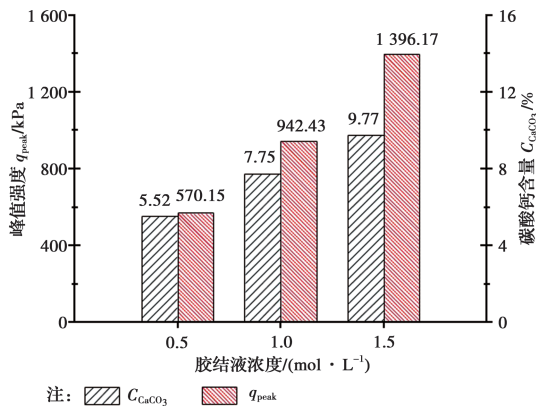


图 12 不同胶结液浓度处理试样碳酸钙含量与峰值强度

Fig.12 Calcite content and peak strength of the samples treated with different cementing fluid concentrations

为进一步量化胶结液浓度对碳酸钙含量及试样峰值强度的影响,如图 13 所示,分别采用胶结液浓度及碳酸钙含量,对碳酸钙含量及峰值强度进行归一化处理。

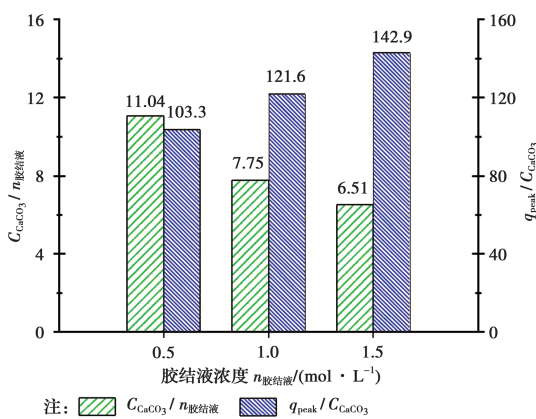


图 13 不同胶结液浓度处理试样的 q_{peak}/C_{CaCO_3} 、 $C_{CaCO_3}/n_{胶结液}$

Fig.13 The q_{peak}/C_{CaCO_3} and $C_{CaCO_3}/n_{胶结液}$ of samples treated with different cementing fluid concentrations

从图 12 可以看出,胶结液浓度越高,试样的碳酸钙含量及峰值强度均越高。从图 13 可以看出,胶结液浓度越高,微生物固化试样的单位碳酸钙含量对峰值强度的贡献(q_{peak}/C_{CaCO_3})越高;而消耗单位胶结液浓度产生的碳酸钙含量($C_{CaCO_3}/n_{胶结液}$)越低。这是因为,提高胶结液浓度,细菌可以产生更多的碳酸钙,原先仅起填充作用的碳酸钙晶体,由于新产生晶体的不断累积,而逐渐承担起胶结的作用,故试样的单位碳酸钙含量对强度的贡献变高;而当浓度较高时,由于高浓度的胶结液对酶的活性起抑制作用^[6],试样的碳酸钙转化效率($C_{CaCO_3}/n_{胶结液}$)则不高。

3.3 胶结液浓度配比的影响

图 14 给出不同 $CaCl_2$ 和尿素浓度配比的胶结液处理试样的碳酸钙含量与峰值强度。

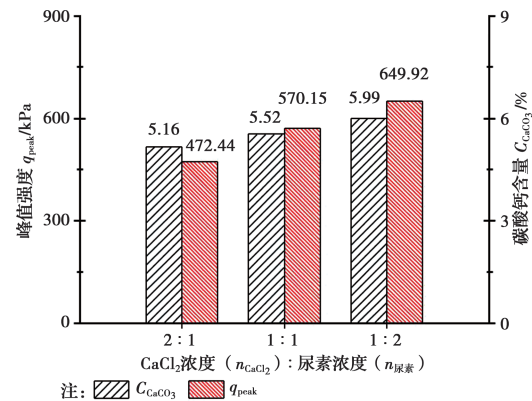


图 14 不同浓度配比处理试样碳酸钙含量与峰值强度

Fig.14 Calcite content and peak strength of samples treated with different concentration ratio

从图 14 可见, $CaCl_2$ 和尿素浓度配比为 1:2 试样的碳酸钙含量及峰值强度最高;浓度配比为 1:1 的次之,浓度配比为 2:1 的最低。可见,胶结液中尿素浓度占比越高,试样的碳酸钙含量及峰值强度越高。

为进一步量化 $CaCl_2$ 和尿素浓度对比对碳酸钙含量及试样峰值强度的影响,分别采用 $CaCl_2$ 和尿素浓度总和以及碳酸钙含量对碳酸钙含量及峰值强度进行归一化处理,如图 15 所示。

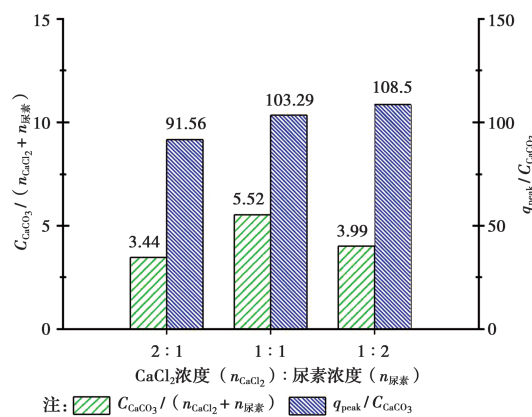


图 15 不同浓度配比试样 q_{peak}/C_{CaCO_3} 、 $C_{CaCO_3}/(n_{CaCl_2} + n_{尿素})$

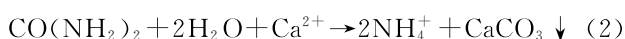
Fig.15 The q_{peak}/C_{CaCO_3} 、 $C_{CaCO_3}/(n_{CaCl_2} + n_{尿素})$ of Samples treated with different concentration ratios

从图 15 可见,胶结液中尿素浓度占比越高,微生物固化试样的单位碳酸钙含量对强度的贡献(q_{peak}/C_{CaCO_3})越高。

现有研究表明,适量提高尿素浓度可以增强细菌脲酶活性^[6,22],而 $CaCl_2$ 浓度越高对脲酶的抑制作用越明显^[6,20]。因此,胶结液中较高的尿素浓度,

促进了细菌分泌脲酶的活性,可以水解产生较多的碳酸根离子,用以结合钙离子产生碳酸钙晶体,具有胶结作用的碳酸钙含量也越高,单位碳酸钙含量对强度的贡献越大。相反,当溶液中尿素浓度较低,而 CaCl_2 浓度较高,抑制了脲酶的活性,脲酶水解产生的碳酸根离子浓度低,因而结合产生的碳酸钙晶体量较少,单位碳酸钙含量对强度的贡献越低。

此外,从图15可见,在浓度配比为1:1时, $C_{\text{CaCO}_3}/(n_{\text{CaCl}_2} + n_{\text{尿素}})$ (即碳酸钙转化效率)最高。其结果是在 $(n_{\text{CaCl}_2} + n_{\text{尿素}})$ 一定的条件下,根据MICP固化方程式(2)得出。



作为生成碳酸钙原料的尿素和 Ca^{2+} 在方程中的系数均为1,故浓度配比为1:1时,碳酸钙转化效率最高。

4 结论

针对微生物固化过程中涉及的极为复杂的生理、化等过程,基于固结排水三轴剪切试验和电镜扫描测试,探究多因素对微生物固化砂土工程力学特性的影响及其强度增长内在机理。得出以下主要结论:

1) MICP处理可以提高砂土试样的剪切强度。随着碳酸钙含量的增加,试样的峰值强度 q_{peak} 呈指数关系曲线增长,试样的脆性也越显著。

2) MICP处理主要通过提高试样的黏聚力来提高试样的剪切强度。随着胶结水平的提高,仅起填充作用的碳酸钙晶体转而起到胶结的作用,碳酸钙的胶结强度越大。

3) 微生物固化砂土试样的峰值强度 q_{peak} 主要由砂土颗粒构成的骨架结构强度和碳酸钙晶体的胶结强度组成。采用30%砂土初始密实度,适当提高胶结液浓度或胶结液中的尿素浓度占比,均可提高试样的胶结强度。

参考文献:

- [1] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [2] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(1): 3-9.
- [3] JONKERS H M, THIJSSSEN A, MUYZER G, et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 230-235.
- [4] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机理[D]. 南京: 东南大学, 2014.
RONG H. Preparation and binding mechanism of microbe cement[D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
ZHAO Q. Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation (MICP) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] HARKES M P, BOOSTER J L, VAN PAASSEN L A, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs strength [C]// *International Conference on Bio-geo-civil Engineering*, 2008: 37-41.
- [9] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(10): 871-875.
- [10] 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)
- [11] 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, Architectural & Environment Engineering*, 2019, 41(1): 15-21. (in Chinese)

- [12] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basaltfiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019048.
- [13] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 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. Effect of method of biological injection on dynamic behavior for biocemented sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3173-3178.(in Chinese)
- [14] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 颗粒粒径对微生物固化砂土强度影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(Sup2): 397-402.
- CUI M J, ZHENG J J, LAI H J. Experimental study of effect of particle size on strength of bio-cemented sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup2): 397-402.(in Chinese)
- [15] 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): S2-79-S2-84.
- [16] 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.
- [17] CHENG L, SHAHIN M A, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123-1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Standard for soil test method: GB/T 50123-1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [19] MONTOYA B M, DEJONG J T. Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(6): 04015019.
- [20] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Murdoch: Murdoch University, 2004.
- [21] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 277-285.
- [22] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 砂土微生物固化过程中尿素的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 939-944.
- SUN X H, MIAO L C, TONG T Z, et al. Effect of methods of adding urea in culture media on sand solidification tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 939-944.(in Chinese)

(编辑 胡玥)