

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.046

营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究

王绪民¹, 郭伟^{1,2}, 余飞², 易朝¹, 孙霖¹

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 采用 2 次注入菌液方式, 制备不同浓度营养盐处理的微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 胶结砂样。通过固结排水三轴试验和碳酸钙定量化学试验测定试样强度参数及碳酸钙 (CaCO₃) 含量, 分析了营养盐浓度对胶结砂物理力学特性的影响及碳酸钙沉淀量试样强度指标间的关系。结果表明, 同等反应时间、同等体积营养盐溶液条件下, 随着营养盐浓度的提高试样强度逐渐升高, 且达到一定峰值后再下降; 碳酸钙晶体分布形态较好条件下, 变形模量随着试样干密度的增加而增加; 碳酸钙晶体分布形态和沉淀含量共同影响 MICP 试样强度的提高, 试验中 0.5 M 试样强度提高效果最好, 碳酸钙含量、黏聚力、内摩擦角分别为 6.03%、46.9 kPa 和 41.31°。

关键词: 微生物诱导碳酸盐沉淀; 胶结砂; 物理力学指标; 营养盐浓度

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 2 - 0363 - 07

Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand

WANG Xu-ming¹, GUO Wei^{1,2}, YU Fei², YI Zhao¹, SUN Lin¹

(1. School of Civil Engineering & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Preparation of microbial induction of calcium carbonate precipitation (MICP) cemented sand samples injected twice bacteria solution with different concentrations of nutrient salt treatment, triaxial tests and CaCO₃ quantitative chemical tests are conducted on cemented sand to analyze the effect of nutrient concentration on the mechanical properties of cemented sand and the relationship between the calcium carbonate content and the strength indexes of calcium carbonate precipitation samples. The results show that: The strength of the sample increase gradually with the increase of nutrient concentration; and then decrease after reaching a certain peak value under the same reaction time and volume of nutrient solution. The deformation modulus increases with the increase of dry density of samples under the condition of good distribution of calcium carbonate crystals. The distribution of calcium carbonate crystals and calcium carbonate content affected the increase of MICP specimen strength. The strength of 0.5 M is the highest in the experiment, and the content of calcium carbonate, cohesion and internal friction angle are 6.03%, 46.9 kPa and 41.31° respectively.

Keywords: microbial induced carbonate precipitation; cemented sand; physico-mechanical index; nutrient concentration

1 引言

随着我国社会发展, 农村的城镇化建设, 亟需更多的基础设施建设来满足国民的生产生活需求, 因而产生较大的建设用地需求, 但建设用地资源十分有限, 需要对不能满足工程要求的土地进行改良。

传统的土壤改良方法是通过添加一系列污染性较强的化学材料诸如微细水泥、环氧树脂、丙烯酰胺、酚醛树脂、聚氨酯等进行灌浆加固。化学材料中含有的不良成分不仅会对周边土壤、地下水等造成污染甚至会对动植物以及人产生危害, 为此, 亟需一种环境友好的土壤固化技术。

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 湖北省自然科学基金 (No.2014CFB601)

This work was supported by Natural Science Foundation of Hubei Province (2014CFB601).

第一作者简介: 王绪民, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程胶结土力学特性方面研究。E-mail: wxumin@163.com

通讯作者: 郭伟, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程胶结土力学特性方面研究。E-mail: 527158676@qq.com

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)的现象在土壤、海水等全球各种环境中都非常普遍^[1],近年来,国内外研究机构基于MICP机制开展了大量的室内试验研究和尝试性的现场应用研究。DeJong等^[2-3]根据尿素水解的MICP机制发现,微生物诱导产生的碳酸盐会填充在土壤颗粒之间,将其胶结为一体。并通过SEM和CT图像证明方解石要分布在土颗粒相互接触的附近。砂颗粒中方解石的沉积是微生物胶结成效的关键,但方解石空间分布状态也会影响着胶结砂样力学性质的不同。van Paassen等^[4]应用巴氏芽孢杆菌控制灌浆速度、灌浆时间、菌液与营养盐的量等因素,在砂土地基加固方面做了深入的研究。微生物固化土壤起主要作用的是土颗粒间沉积的方解石,研究发现砂样的强度与方解石含量具有较好的相关性。方解石沉积较多时砂样强度会得到显著提高^[5-7]。

此外,微生物能够去除某些金属离子和放射性元素^[8-9],降低土壤渗透性修复混凝土和其他材料裂缝^[10-11],有效提高砂土抗液化性能^[12],应用范围十分广泛。

以上研究结果表明了微生物对改善土体力学性能的潜力。在注液过程中,由于溶液的流动会冲走部分粘附在砂颗粒表面的菌株,本文中MICP试样采用2次注入菌液的方式,以增加试样内吸附的菌株数量,基于此操作研究营养盐浓度的变化对MICP试样强度的影响。

2 试验材料及试验方案

2.1 试验材料

试验采用厦门ISO标准砂(99.7%石英),最小干密度为 1.53 g/cm^3 ,最大干密度为 1.86 g/cm^3 其颗粒级配曲线如图1所示。试验菌种为巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*,编号ATCC 11859,购自美国菌种保

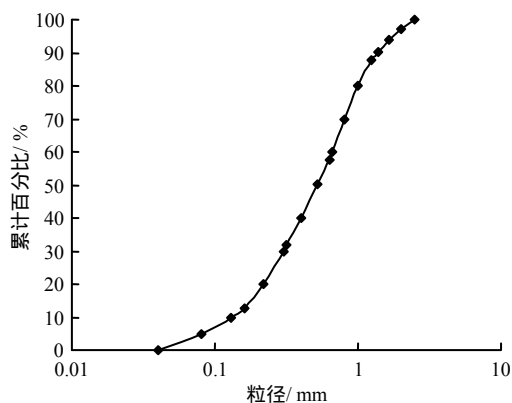


图1 标准砂样颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curve of ISO standard sand

藏中心。活化后的细菌接种至 $\text{NH}_4\text{-YE}$ 液体培养基。48 h后,待液体培养基出现浑浊,采用紫外可见分光光度仪测试细菌光密度(OD_{600}),将菌液稀释至1.0。

2.2 试验方案

2.2.1 试验目的

为研究营养盐浓度变化对微生物胶结砂土的物理力学特性影响。本文对微生物处理试样营养盐浓度 S_0 进行控制,分别采用浓度为0.3 M、0.5 M、0.7 M的同体积营养盐溶液(35 mL)对MICP试样进行灌注处理。试样制备的相关参数见表1。

表1 土样制备参数

Table 1 Preparation parameters of sand samples

参数	量值	参数	量值
试样相对密度 D_r	0.35	营养盐浓度/M	0.3 0.5 0.7
试样干密度 $P_d / (\text{g/cm}^3)$	1.64	营养盐反应时间/h	12
试样干质量/g	1.45	营养盐注入次数/次	8
菌液浓度 OD_{600}	1.0		

2.2.2 试样制作

采用内径 $D=38 \text{ mm}$ 的PVC管制备试样,制作过程:采用带孔的橡胶塞将PVC管底端塞住并放置滤纸和透水石。将145 g标准砂倾倒入PVC管,采用游标卡尺控制试样高度约80 mm。采用蠕动泵,以 5 mL/min 的速率将40 mL菌液($OD_{600}=1.0$)由PVC管底端注入^[13](较低的菌液注入速率(5 mL/min)可使砂颗粒中的微生物分布更加均匀),随即以 10 mL/min 速率在试样底端注入40 mL浓度为0.05 M的 CaCl_2 溶液。(试样内所注入菌液为同一批次培养,以此保证菌液浓度及细菌活性的统一性和试样间可比性)。将注入菌液和 CaCl_2 溶液后的试样静置2 h,使菌株充分吸附在砂颗粒表面,以 5 mL/min 速率注入35 mL营养盐(营养盐为等浓度的尿素和 CaCl_2 混合溶液,见表1),然后放入恒温箱(设置温度为 30°)中培养。每隔12 h向各试样底端注入35 mL营养盐。试样培养48 h后(即准备第4次注入营养盐溶液时)第2次注入菌液,操作步骤等同步~。

吸附在砂颗粒表面微生物以孔隙溶液中的尿素及可溶性钙盐为营养源,基于微生物诱导碳酸钙沉积作用,便会在砂颗粒间形成胶结物质(碳酸钙),碳酸钙凝胶在砂粒间充当桥梁作用,图3为0.3 M试样放大100倍后SEM图。最终如图2松散砂颗粒被胶结成具有一定力学性能的整体。

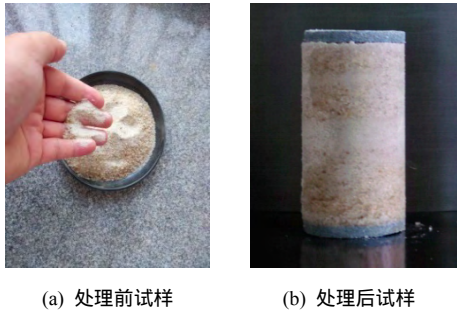


图 2 微生物处理前后试样
Fig.2 Specimens before and after MICP treatment

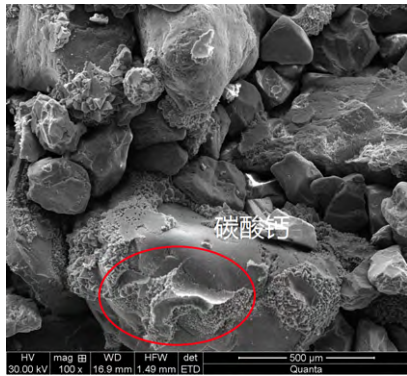


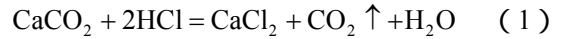
图 3 试样 SEM 图
Fig.3 SEM images of specimens

2.2.3 固结排水三轴压缩试验

本文对微生物处理试样营养盐浓度 S_v 进行控制,分别采用 0.3 M、0.5 M、0.7 M。培养后试样进行固结排水三轴压缩试验,三轴试验采用应变控制式压缩仪,每组试验取 4 个平行试样。试验前对试样真空抽气饱和,真空抽气时间不少于 3 h、浸水超过 24 h。为保证装样顺利,将试样放入冰箱冰冻后脱模,随后装于普通三轴剪切仪内进行固结,固结完成后开始剪切,轴向应变速率取 0.038 mm/min。

2.2.4 碳酸钙定量试验

根据公路土工试验规程^[14]中难溶性盐碳酸钙试验(气量法)对 CD 试验后的试样进行碳酸钙定量化学试验,其化学原理见式(1),试验中根据 CO_2 体积换算出试样中 $CaCO_3$ 质量。



3 试验结果与分析

3.1 应力-应变特性分析

图 4 为同围压下不同试样的固结排水试验的偏

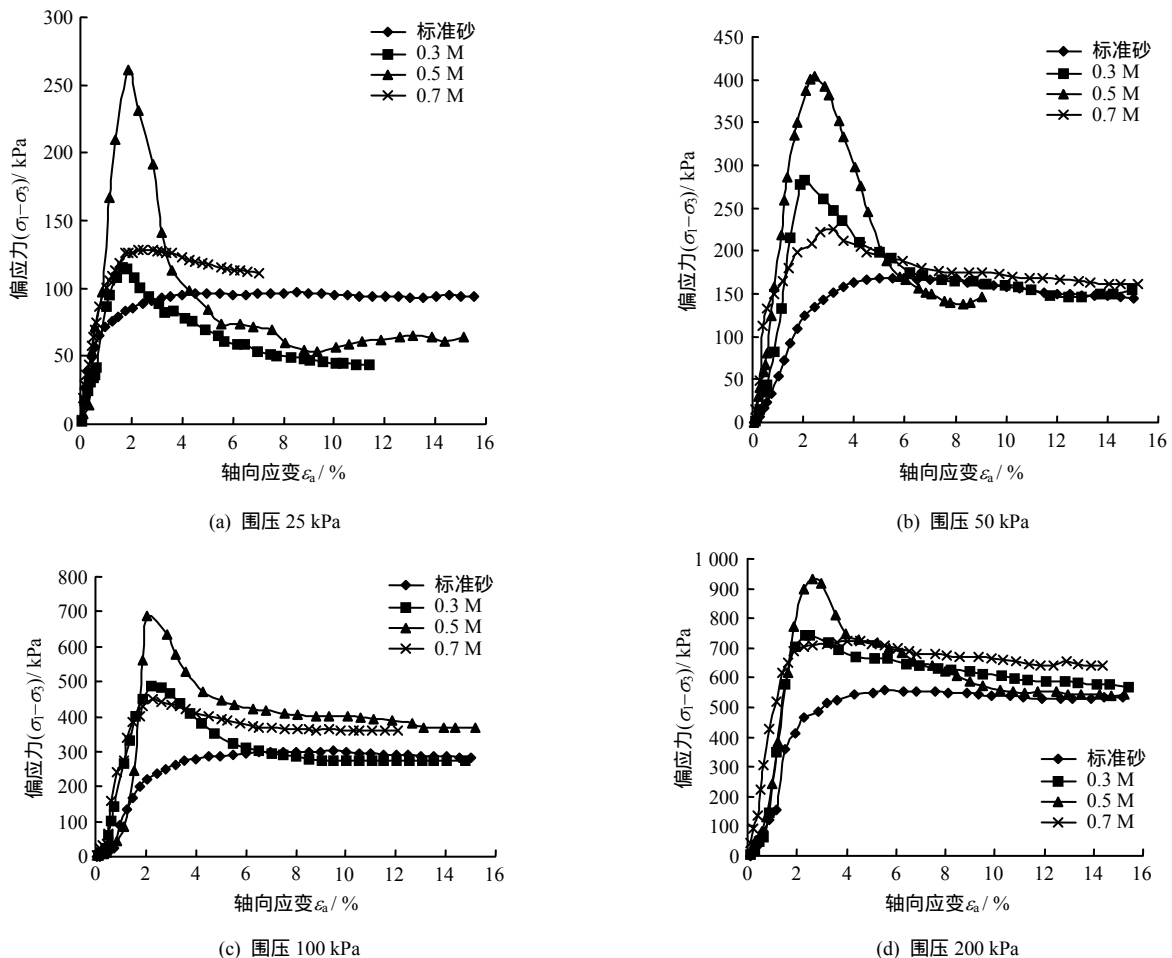


图 4 试样偏应力-轴向应变关系曲线
Fig.4 Curves of $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_a$ of specimens

应力-轴向应变关系曲线。从图中可以看出,标准砂试样在不同围压条件下达到偏应力峰值后开始趋稳,但 MICP 胶结试样曲线在达到峰值后快速下落最后趋稳,可见标准砂属于弱软化型, MICP 胶结试样应变软化表现明显, 25 kPa 围压下 0.7 M 试样比 0.3 M 稍大,但整体上是随着营养盐浓度由 0.3 M 增至 0.5 M 胶结试样的偏应力峰值也在增加,浓度达到 0.7 M 后其峰值却减小。由此可以分析得出尽管营养盐浓度的增大能提高偏应力峰值,但营养盐浓度过高胶结效果却适得其反。

试验通过微生物诱导产生的碳酸钙沉积于砂颗粒孔隙之间,致使砂土颗粒之间形成了不同的胶结作用和排列方式,使其形成结构性土。沈珠江^[15-16]把结构性岩土材料看成具有胶结特性的胶结块(胶结元)和摩擦特性的软弱带(摩擦元)组成的二元

结构体,在受荷过程中胶结块破损并向软弱带逐渐转化,二者共同抵抗外部作用。MICP 胶结试样在微生物的作用下改变了标准砂的单一摩擦特性,使其变为二元结构体。故当 MICP 胶结试样在抵抗外部作用下,胶结块被破坏,软弱带承担主要外部作用。假设以标准砂应力曲线峰值等同于 MICP 胶结试样残余强度,那么 MICP 胶结试样的强度峰值与残余强度的变化区间即为微生物对砂土胶结效果的具体数值表现。表 2 为试验结果。由表可见,等同围压情况下 0.5 M 试样的残余强度 q_r 与峰值强度 q_{max} 之比最小,土体强度在峰值后变化最大,说明试验中营养盐浓度为 0.5 M 时微生物对砂土胶结效果最好。

图 5 为 100 kPa 围压下试样轴向应变与体变间的关系曲线。从图中可以看出, MICP 胶结试样的

表 2 试验结果
Table 2 Results of tests

土样	围压 / kPa	试样干重(溶洗前/后) / g	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	CaCO ₃ 含量 / %	平均 CaCO ₃ 含量 / %	试样干密度 / (g/cm ³)	q_r/q_{max}
标准砂	25							0.97
	50							0.86
	100	145/145	1.32	36.69	0	0	1.640	0.95
	200							0.94
0.3 M	25	149.97/144.55	18.2	39.64	3.75	3.56	1.698	0.38
	50	149.86/144.51			3.70		1.697	0.52
	100	148.56/143.83			3.29		1.682	0.56
	200	149.69/144.65			3.48		1.695	0.77
0.5 M	25	152.60/144.40			5.68		1.728	0.23
	50	153.72/144.54			6.35		1.741	0.34
	100	152.99/144.48	46.9	41.31	5.89	6.03	1.732	0.54
	200	153.55/144.57			6.21		1.739	0.58
0.7 M	25	152.25/144.44			5.41		1.724	0.86
	50	153.58/144.26			6.46		1.739	0.71
	100	153.58/144.60	14.6	39.09	6.21	6.25	1.739	0.80
	200	154.27/144.29			6.92		1.747	0.89

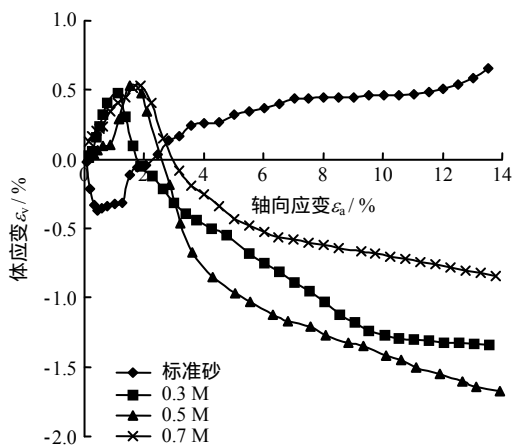


图 5 试样轴向应变-体应变关系曲线(100 kPa 围压)
Fig.5 Curves of ϵ_v - ϵ_a specimens (100 kPa confining pressure)

体变曲线明显不同与标准砂样的体变曲线,表现为应力软化。由此可以分析, MICP 试样胶结试样中碳酸钙的沉积对标准砂样的剪胀性具有明显的抑制作用。MICP 胶结试样中, 0.5 M 试样应力软化最为明显,这一变化规律与上述应力-应变曲线变化一致。

3.2 变形模量的变化规律

砂土密度变化,其变形性质必然改变。本节对 MICP 胶结试样的割线弹性模量进行分析和研究试样干密度对变形性质的影响。这里取三轴固结排水试验最大主应力差的 1/2 与其所对应的应变比值为变形模量 $E_{1/3}$, 点绘 MICP 处理前后试样干密度变化下的 $E_{1/3}$ - σ_3 关系,如图 6 所示。从图中可以看出,随着围压的增大其变形模量也在增大。

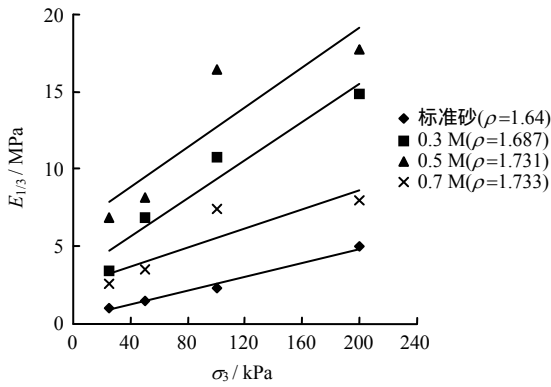


图 6 割线模量 $E_{1/3}$ 与 σ_3 的关系
Fig.6 Relationships between $E_{1/3}$ and σ_3

Qabany 等^[16]研究发现, 较低浓度的营养盐能促进沉淀晶体较均匀的分布, $S_v=0.3$ M 试样的离散性较弱, 但总体上可见随着干密度的增加, MICP 试样的割线模量也有所增加。 $S_v=0.7$ M 试样由于其营养盐浓度较高, 尽管其干密度增加最多, 但碳酸钙晶体的不均匀分布抑制割线模量的变化。 $S_v=0.5$ M 试样割线模量表现最高, 分析认为 (1) 0.5 M 试样比 0.7 M 试样的营养盐浓度低, 碳酸钙沉积较均匀; (2) 0.5 M 试样比 0.3 M 试样浓度高, 碳酸钙沉积量较多。

3.3 强度特性分析

为分析营养盐浓度对 MICP 试样强度性质的影响, 整理了不同围压 σ_3 下试样破坏偏应力比 $(\sigma_1-\sigma_3)_f/\sigma_3$ 与营养盐浓度 S_v 的关系, 如图 7 所示。图中, 曲线成抛物线形式, 营养盐浓度的不同对于试样破坏时的偏应力影响较大, 过高或过低的营养盐浓度都会产生较低的胶结效果。从图中可以看出, 随着围压的增大, 破坏偏应力比逐渐变小。这是由于较大的围压破坏了试样内部分胶结键而导致其强度的降低。同等围压下 MICP 试样破坏偏应力比表现为 $0.5\text{ M} > 0.3\text{ M} > 0.7\text{ M}$, 其中 0.3 M 破坏偏应力比大于 0.7 M, 表明在较低营养盐浓度下 MICP 试样表现较高的强度, 但在相同反应时间以及同等注液量下, 较低的营养盐浓度也限制了碳酸钙沉淀量, 故 0.5 M 试样大于 0.3 M。

本文运用摩尔-库仑强度理论公式, 式 (2) 拟合 MICP 试样 c' 、 ϕ' , 见表 2。

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \phi' \quad (2)$$

式中: c' 为有效黏聚力; ϕ' 为有效内摩擦角。

图 8 为 MICP 试样 CaCO_3 含量与 c' 、 ϕ' 的关系曲线。从图中可以看出, 随着 CaCO_3 含量的增加, c' 、 ϕ' 值增大的趋势是显著的, 其中 0.5 M 试样

CaCO_3 含量为 6.03%, c' 、 ϕ' 分别增加到 46.9 kPa、 41.31° , 强度提高明显; $S_v=0.7$ M 试样的碳酸钙含量最高 (达到 6.249%)。 c' 、 ϕ' 却分别为 14.6 kPa、 36.09° , 试样胶结效果不如 $S_v=0.5$ M。这一结果与上述内容相对应。

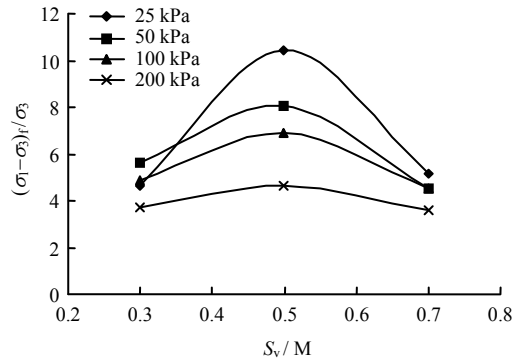


图 7 不同围压下 $(\sigma_1-\sigma_3)_f/\sigma_3-S_v$ 关系曲线
Fig.7 Relationships between $(\sigma_1-\sigma_3)_f/\sigma_3$ and S_v

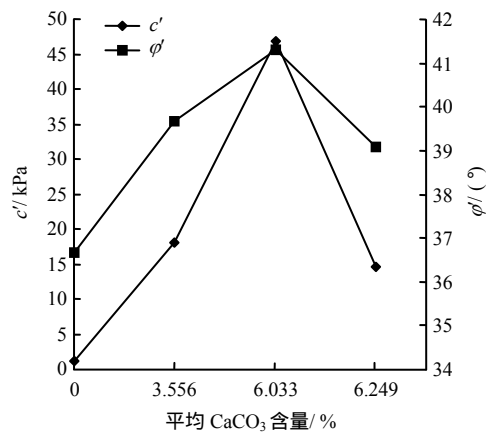


图 8 平均 CaCO_3 含量与 c' 、 ϕ' 关系
Fig.8 Relationships among calcite content and c' 、 ϕ'

4 营养盐浓度对强度影响机制分析

相关研究发现, 微生物胶结砂样的无侧限抗压强度与其碳酸钙沉积量具有较强的线性相关性, 即 CaCO_3 含量的增加其强度提高明显^[17], 这就是标准砂、0.3 M、0.5 M 试样随着碳酸钙含量的增加其强度也在增加的理论依据。

相关试验结果同时也表明, 随着方解石含量的增加, 固化砂土的力学性能也可能存在较大差异。从 CaCO_3 含量来看, 随着营养盐浓度的增加其沉积的碳酸钙含量也在增加, 但并未持续提高试样的力学特性, 说明 CaCO_3 的分布形态对试样强度提高也有较大影响^[3]。研究发现, 胶结液浓度对微生物诱导产生的碳酸钙晶体尺寸的影响较大。胶结液浓度较低时 (0.5 M), 细菌诱导产生尺寸较小、分布

较均匀的碳酸钙晶体;胶结液浓度较高时(0.5 M),诱导产生尺寸较大、分布较不均匀的碳酸钙晶^[18]。0.5 M、0.3 M 试样在注浆过程中产生的较小碳酸钙晶体,一方面可以较为均匀地分布在砂土颗粒表面,另一方面不易导致堵塞试样内的孔隙(注浆通道),保证了后续注浆过程中吸附于砂土颗粒表面的细菌能够充分汲取营养盐诱导产生碳酸钙晶体,并使碳酸钙晶体均匀地沉积在砂土颗粒表面,随着营养盐浓度的提高微生物诱导沉积碳酸钙的速率也会提高^[19]。当注入营养盐浓度较高时(0.7 M),微生物诱导产生的碳酸钙晶体较快较大的沉积,靠近注液口一端的细菌由于营养充足产生较多的 CaCO₃,容易封堵砂土颗粒孔隙而导致较少的营养盐成分流动到远离注液口一端,进而从整体上使得碳酸钙分布不均。试验过程中也可以明显发现,0.7 M 试样注液端胶结强度较高整体性较好,远离注液端散砂颗粒较多胶结效果较差,因此 0.7 M 试样在宏观整体上虽然碳酸钙含量较多,但强度提高不明显。

由此可知, MICP 试样的强度不仅依赖于试样内产生的碳酸钙晶体含量,同时碳酸钙晶体的分布形态也是影响胶结效果的重要原因,注入一定的营养盐溶液时应考虑到碳酸钙晶体较优分布及其较高的沉淀量,作为基础选择较优的营养盐浓度进行试验。

5 结 论

(1) 营养盐浓度的不同对微生物胶结砂土的物理力学特性有极大的影响。在同等注液量和反应时间下,随着营养盐浓度的增加其强度变化呈凸字形态。

(2) MICP 胶结试样均表现为应力软化,且 CaCO₃ 的沉积对砂样的剪胀性具有抑制作用。在 CaCO₃ 分布形态较好的情况下,随着碳酸钙沉积量的增加,变形模量随着 MICP 胶结试样干密度的增加而增加。

(3) 微生物处理砂样的 c' 、 ϕ' 的增大取决于较优 CaCO₃ 的分布形态以及较高碳酸钙晶体的沉积量。

(4) MICP 胶结试样的强度依赖于试样内产生的碳酸钙晶体量及其分布形态。试验中 0.5 M 试样碳酸钙晶体分布较好同时含量也较多,故其强度表现最好。

参 考 文 献

[1] BOQUET E, BORONAT A, RAMOS-CORMENZANA.

A production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon[J]. *Nature*, 1973, 246: 527 - 529.

- [2] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381 - 1392.
- [3] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities sand challenges[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(4): 287 - 301.
- [4] van PAASSEN L A. Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation[M]. *Delft University of Technology*, 2009.
- [5] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology*, 2007, 24(5): 417 - 423.
- [6] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2013, 9(2): 277 - 285.
- [7] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology*, 2007, 24(5): 417 - 423.
- [8] ACHAL V, PAN X, ZHANG D. Bioremediation of strontium (Sr) contaminated aquifer quartz sand based on carbonate precipitation induced by Sr resistant *Halomonas* sp[J]. *Chemosphere*, 2012, 89: 764 - 772.
- [9] ACHAL V, PAN X, ZHANG D. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuriaflava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1601 - 1605.
- [10] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, et al. Bacteriogenic mineral plugging[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1997, 36(9): 56 - 61.
- [11] JONKERS H M, THIJSEN 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.
- [12] 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): 1487 - 1495.
- CHENG Xiao-hui, MA Qiang, YANG Zuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1487 - 1495.

- [11] 康永刚, 张秀娥. 基于 Burgers 模型的岩石非定常蠕变模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 424 - 427.
KANG Yong-gang, ZHANG Xiu-e. A non-stationary model for rock creep based on Burgers model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 424 - 427.
- [12] 刘小军, 刘新荣, 王军保, 等. 浅变质板岩非定常开尔文模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 975 - 979.
LIU Xiao-jun, LIU Xin-rong, WANG Jun-bao, et al. Study on non-stationary Kelvin model of low-grade metamorphic slate[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2015, 11(4): 975 - 979.
- [13] 唐皓, 王东坡, 段钊, 等. 基于分数阶微积分的变参数黄土蠕变损伤模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4248 - 4255.
TANG Hao, WANG Dong-po, DUAN Zhao, et al. Variable parameters creep damage model of loess based on fractional calculus[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2015, 46(11): 4248 - 4255.
- [14] 王军保, 刘新荣, 王铁行. 基于改进分数阶黏滞体的岩石非线性蠕变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1461 - 1467.
WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, WANG Tie-hang. A nonlinear creep model for rocks based on modified fractional viscous body[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2015, 46(4): 1461 - 1467.
- [15] 何志磊, 朱珍德, 朱明礼, 等. 基于分数阶导数的非定常蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 737 - 744.
HE Zhi-lei, ZHU Zhen-de, ZHU Ming-li, et al. An unsteady creep constitutive model based on fractional order derivatives[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 737 - 744.
- [16] 邱贤德, 姜永东, 阎宗岭, 等. 岩盐的蠕变损伤破坏分析[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(5): 106 - 109.
QIU Xian-de, JIANG Yong-dong, YAN Zong-ling, et al. Creep damage failure of rock salt[J]. **Journal of Chongqing University**, 2003, 26(5): 106 - 109.
- [17] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 398 - 403.
LI Dong-wei, WANG Ren-he, FAN Ju-hong. Nonlinear rheological model for frozen soft rock during Cretaceous period[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 398 - 403.
- [18] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机制[D]. 南京: 东南大学, 2014.
RONG Hui. Preparation and binding mechanism of microbe cement[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [19] 交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Highway Science Research Institute of Ministry of Communications. JTG E40-2007 Code for test of highway geotechnical engineering[S]. Beijing: People's Communication Press, 2007.
- [20] 沈珠江. 岩土破损力学与双重介质模型[J]. 水利水运工程学报, 2002, 23(4): 1 - 6.
SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics and double-medium model for geological materials[J]. **Hydroscience and Engineering**, 2002, 23(4): 1 - 6.
- [21] 沈珠江. 岩土破损力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 253 - 257.
SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics for geological materials: An ideal brittle-elasticplastic model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 253 - 257.
- [22] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2013, 9(2): 277 - 285.
- [23] ALQABANY A, KENICHISOGA, ASCE M, et al. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(8): 992 - 1001.
- [24] 李丽. 微生物酶促形成方解石胶结砂粒的试验与模型[D]. 南京: 东南大学, 2011.
LI Li. Experimental investigation of sand columns cemented by microbe inspired calcite and computational numerically modeling on one and two dimensions[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.

上接第 368 页