

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.011

MICP胶结液中尿素过量的影响研究*

刘志明^{1,2}, 孙益成^{1,2}, 冯清鹏^{1,2}, 彭 劼^{1,2}

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

摘要: 分析了研究人员对于胶结液中尿素对MICP影响的不同认识之间存在的分歧, 利用水溶液试验及一维砂柱加固试验, 对比研究了胶结液中尿素过量(双倍浓度)对MICP的影响。在水溶液和砂柱中, 进行了三种氯化钙浓度(0.25 M, 0.5 M, 1.0 M)条件下尿素过量与否的对比试验。测试对比了水溶液试验过程中 NH_4^+ , Ca^{2+} 变化规律、砂柱试验中 Ca^{2+} 消耗, CaCO_3 生成情况和砂柱无侧限强度等。研究结果表明:(1)水溶液试验中, 过量的尿素在反应初期不利于尿素水解与碳酸钙沉积;(2)在砂柱试验中, 过量的尿素也对MICP不利, 加固后土体强度较低, 加固效果较差;(3)砂柱试验中这一现象与注浆方式(间隔12 h直灌式注浆)和较短的胶结液停留时间有关;(4)在水溶液和砂柱两种环境下, 低氯化钙浓度(0.25 M)情况下尿素过量对MICP的影响都最为明显。

关键词: MICP; 胶结液; 尿素过量; 直灌式灌浆

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0574-07

Study on Influence of Excess Urea in MICP Cementation Solution

LIU Zhiming^{1,2}, SUN Yicheng^{1,2}, FENG Qingpeng^{1,2}, PENG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The controversy of researchers on the effect of urea in cementation solution on MICP was analyzed. The effects of excess urea (double concentration) on MICP were compared and studied through a series of aqueous tests and cemented tests on one-dimensional sand column. Comparison tests were carried out on the aqueous solution and the sand column under the condition of three concentrations of CaCl_2 (0.25M, 0.5M, 1.0M). Changes of NH_4^+ , Ca^{2+} in the water solution, Ca^{2+} consumption, CaCO_3 formation and compression strength of the sand samples in the sand column tests were compared and analyzed. The results show that: (1) In aqueous test, excess urea has an adverse effect on urea hydrolysis and calcium carbonate deposition at the early stage of the reaction; (2) In sand column test, excess urea is also unfavorable to MICP and leads to lower strength of soil sample; (3) The phenomenon in the sand column test is related to injection method and short retention time of the cement (direct grouting at intervals of 12h); (4) The negative effect of excess urea on MICP under low calcium chloride concentration (0.25M) is most pronounced in both aqueous and sand column environments.

Keywords: MICP; cementation reagent; excess urea; direct grouting

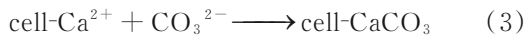
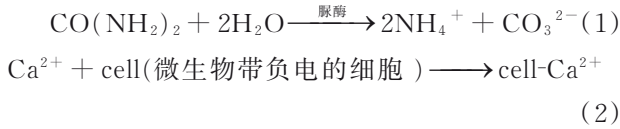
* 收稿日期:2018-05-23;修回日期:2018-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51578214)资助

作者简介:刘志明(1994-),男,硕士研究生。主要从事微生物岩土工程研究。Email:lzm@hhu.edu.cn

引言

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)是一种新兴的土体加固技术^[1-4],其基本原理是通过尿素水解菌的新陈代谢作用,析出并沉积碳酸钙^[2,5-6],在土颗粒间胶结填充,从而改善土体的物理力学特性。



MICP反应的原材料主要为尿素水解菌液与含尿素、氯化钙的胶结液,其中巴氏芽孢杆菌是尿素水解菌中使用最广泛的一类细菌^[7-8],胶结液中尿素为细菌生长提供能量来源,氯化钙为MICP过程提供钙源^[5]。

由反应式(1)~(3)可见,理论上1 M尿素与1 M氯化钙最终可转化为1 M碳酸钙,因而胶结液中尿素与氯化钙的溶质浓度比例一般为1:1^[9]。但为了提高碳酸钙沉淀效率,有一些研究者选择在胶结液中提高尿素-氯化钙的溶质浓度比,即胶结液中尿素过量,但由于注浆方式和注浆间隔等试验条件存在差异,试验所得结论不尽相同。例如G.D.Ok-wadha等^[9]进行了胶结液浓度因素的水溶液试验,发现提高尿素-氯化钙的溶质浓度比增加了碳酸钙最终沉积量,提出MICP反应较优的胶结液浓度为尿素0.666 M、氯化钙0.25 M。B.C.Martinez等^[10]进行了高度为0.5 m的砂柱试验,研究了胶结液中尿素-氯化钙溶质浓度比的影响,结果表明在0.05 M的氯化钙条件下,尿素-氯化钙以3:1溶质浓度比的试样内尿素分解量更多,碳酸钙沉淀效率高出23%。与以上试验结果不同的是,B.M.Mortense等^[11]进行了两组不同溶质浓度比(尿素-氯化钙溶质浓度比分别为7:1与1:1)的砂柱试验,通过砂样间剪切波的波速变化,动态监测碳酸钙的沉积情况,发现提高溶质浓度比对碳酸钙沉积影响较小。

以上研究对于尿素-氯化钙溶质浓度比的探讨均只限于单独的水溶液试验或砂柱试验,尚无较为系统的研究。因此,本文在水溶液环境及渥太华砂直灌式灌浆条件下分别进行了试验,以探究胶结液中尿素过量(即尿素-氯化钙浓度比为2:1)对MICP反应的影响。同时,水溶液和砂柱环境试验的对比分析对加深MICP固化机理的认识有一定的意义,

对未来MICP的应用也具有实际意义。

1 试验材料

1.1 试验用菌

本试验用菌为巴氏芽孢杆菌(美国国家菌种库编号 ATCC11859),该菌为土壤无害菌。每升细菌培养液中,含20 g酵母提取物、10 g NH₄Cl、20 mL浓度为2.4 g/L的NiCl₂·6H₂O、20 mL浓度为1 g/L的MnSO₄·H₂O。用1 M的NaOH溶液调节培养液PH至8.5。将细菌接种到培养液中,置于震荡培养箱(30 °C, 121 r/min)培养30~40 h,测定其细菌浓度和活性后使用。其中菌液活性参考文献[7]中的测算方法进行测定,细菌浓度参考文献[12]中稀释、测定和换算方法进行测定。水溶液试验和砂柱试验中细菌活性和浓度见表1。

表1 试验细菌参数

试验环境	脲酶活性/(mM rea hydrolysed·min ⁻¹)	OD ₆₀₀	细菌浓度/(×10 ⁸ cfu·mL ⁻¹)
水溶液试验	4.62	1.16	1.05
砂柱试验	5.72	1.65	1.55

1.2 胶结液的配置

试验中采用的胶结液为尿素-氯化钙混合液,在水溶液和砂柱试验环境下,进行了尿素过量对MICP反应的影响对比试验,具体配方及试验分组见表2。

表2 试验胶结液浓度及分组

试验分组编号		胶结液	
水溶液试验	一维砂柱试验	尿素/M	氯化钙/M
W1	S1	0.25	0.25
W2	S2	0.50	0.25
W3	S3	0.5	0.5
W4	S4	1.0	0.5
W5	S5	1.0	1.0
W6	S6	2.0	1.0

1.3 砂样制备

一维砂柱灌浆加固试验用砂为渥太华砂,主要

成分为二氧化硅。加固试验模具槽身高为 13 cm, 内径为 5 cm, 砂样基本性质和级配曲线分别见表 3 和图 1。

表 3 砂样基本性质

Table 3 Basic properties of sand

砂样种类	$D_{50}/$ mm	C_u	C_c	G_s	$P/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	e	主要成分
渥太华砂	0.33	2.07	0.91	2.667	1.59	0.68	石英

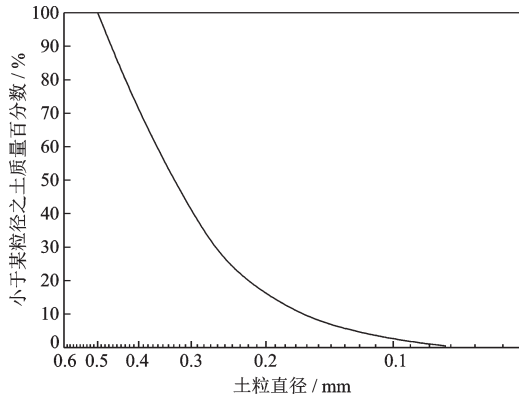


图 1 渥太华砂颗粒分曲线

Fig.1 Distribution curve of Ottawa sand

2 试验方法

2.1 水溶液试验

在 250 mL 锥形瓶中将巴氏芽孢杆菌菌液与不同浓度的胶结液以体积比例 1: 9 混合, 配成 W1~W6 共 6 组试样, 置于磁力搅拌器上搅拌反应, 反应过程中保持环境温度为 25 °C(图 2)。

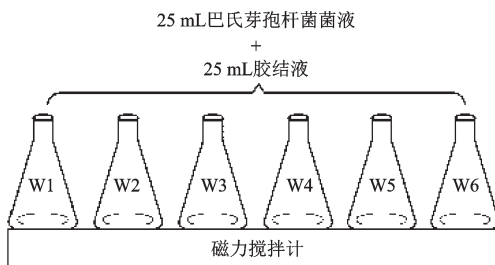


图 2 水溶液试验示意

Fig.2 Schematic plan of water tests

2.2 砂柱灌浆加固试验

为研究胶结液中尿素过量的影响, 在室内 25 °C 条件下进行砂柱灌浆加固对比试验。试验分组见表 2, 每组试验取 3 个平行试样。加固方法采用二次

灌浆法^[7]。砂样装样完毕后, 预先用去离子水过水饱和。然后用蠕动泵以 2 mL/min 的速率泵入 1 孔隙体积菌液 (V_v 约 85 mL), 静置 24 h 后以相同速率泵入 1 孔隙体积固定液 (0.05 M 氯化钙溶液) 以将菌株吸附于砂粒表面^[11]。再静置 24 h 后开始每 12 h 灌入 1 孔隙体积胶结液, 直至砂柱中 MICP 反应停止。胶结液灌入速率为 1.5~6 mL/min, 不同试样灌浆速率根据氯化钙浓度而定, 以保证单位时间内灌入的氯化钙物质的量相当。灌浆完毕后, 泵入 2 孔隙体积去离子水去除砂柱中残余未反应的溶质。试验示意如图 3 所示。

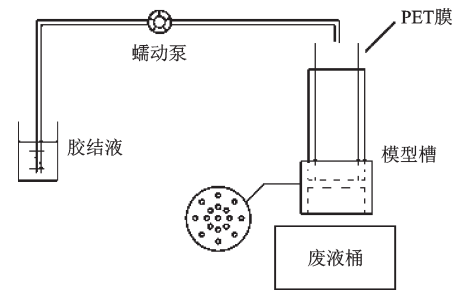


图 3 砂柱试验示意

Fig.3 Schematic plan of sand tests

2.3 Ca^{2+} 与 NH_4^+ 离子浓度测定

从锥形瓶水溶液及砂柱试验模型槽底部的流出液中分别取样, 依据标准《水质钙的测定 EDTA 滴定法》^[13], 将待测溶液稀释至量程范围内, 测定其 Ca^{2+} 浓度。同时, 依据标准《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》^[14], 将锥形瓶水溶液中的样本稀释至量程范围内, 测定水溶液中的 NH_4^+ 浓度。

2.4 无侧限抗压强度测试

将砂柱带模具放入烘箱中在温度 60 °C 下烘干, 等温度降至室温后将烘干的砂柱试验试样从模具中取出, 刮去上部松散颗粒, 平整上表面。砂柱处理好后, 即按《土工试验方法标准》^[15] 测试砂样无侧限抗压强度, 加载速率为 1.0 mm/min。

2.5 碳酸钙含量测定

完成无侧限抗压强度测试后, 将压坏的砂样保存为上下两部分装好, 用酸洗称重法^[5] 测定上下各部位的碳酸钙含量。

2.6 微观结构测试

对土样进行冷冻真空升华干燥法处理, 并使用

FEI Quanta200 环境扫描电子显微镜进行电镜扫描分析,观察 MICP 加固后砂样及产物微观形貌。

3 结果与讨论

3.1 水溶液试验数据整理

图 4、5 分别是反应开始后溶液中的 Ca^{2+} 浓度与 NH_4^+ 浓度的变化曲线。由图 4 可知, W1~W5 试验组在反应 30~70 h 后,溶液中 Ca^{2+} 浓度降低至 0.05 M 左右, Ca^{2+} 基本消耗完毕,而 70 h 时刻 W6 中仍剩余 0.22 M,反应缓慢。比较发现,反应初期(前 12 h),尿素过量的试验组(W2、W4、W6)中 Ca^{2+} 消耗速率均较慢。反应进行 12 h 后, W6 溶液中 Ca^{2+} 浓度仍然比 W5 高,反应较慢,而 W2 与 W4 中 Ca^{2+} 浓度在反应 12 h 左右时与 W1、W3 出现交叉, Ca^{2+} 浓度均较低,并趋于一致,溶液中 Ca^{2+} 基本耗尽。

由图 5 可知,反应开始后溶液中的 NH_4^+ 浓度持续上升,表明尿素分解量逐渐增多。对比可见,反应初始 12 h 内,尿素过量的试验组(W2、W4、W6)溶液中 NH_4^+ 浓度上升较慢。与 Ca^{2+} 浓度变化类似的

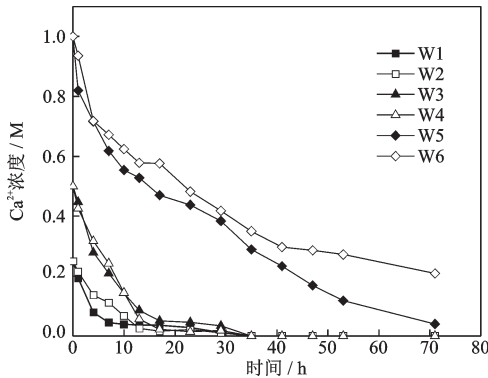


图 4 Ca^{2+} 浓度变化

Fig. 4 Change of calcium concentration

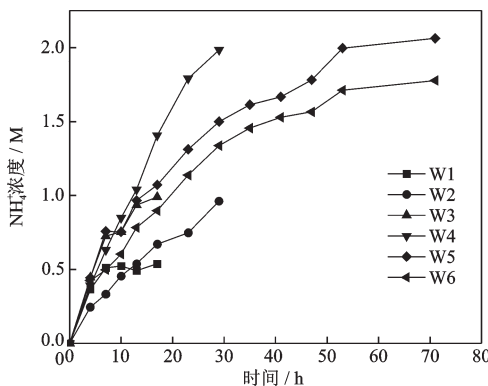


图 5 NH_4^+ 浓度变化

Fig. 5 Change of ammonia concentration

是, W2、W4 同样在反应 12 h 左右时与 W1、W3 出现交叉,而后出现交叉点。出现交叉点的主要原因是虽然反应初始 W1、W3 中尿素分解速率较快,但当反应一定时间后,由于溶液中大部分尿素已分解完毕,溶液中尿素浓度较低,反应速率放缓,而此时 W2、W4 仍有充足的尿素供给,可持续分解生成 CO_3^{2-} ,并不断消耗 Ca^{2+} , Ca^{2+} 消耗速率反而较快。

G.D.Okwadha 等^[9]进行了胶结液浓度因素的水溶液试验,比较参数为日均生成碳酸钙量(由反应 7 d 碳酸钙量除以 7 得到),因而未能明确第一个 24 h 内,尿素过量对 MICP 反应速率的影响。若在细菌尿酶活性较高的时间范围内(<10 d)^[9,16]使溶液中溶质充分反应,则无论溶质浓度比如何, Ca^{2+} 均可消耗完,比如 W1~W5,而 W6 中的 Ca^{2+} 也在反应 120 h 左右基本消耗完毕(图中未列出)。

3.2 砂柱灌浆试验数据整理

(1)砂柱灌浆加固试验中,将从试样底部收集得到流出液中的 Ca^{2+} 浓度与灌入的初始浓度比较,可判断试样内部的反应程度。图 6 是流出液中 Ca^{2+} 浓度的变化曲线。流出液 Ca^{2+} 浓度与流入浓度相同时,即说明反应停止。比较可知,相比于 S1、S3、S5,提高了胶结液中尿素浓度的试验组 S2、S4、S6,砂柱内反应停止的时间更早些。

累计每次灌浆流出液中的 Ca^{2+} 浓度,结合每次灌浆的胶结液体积(85 mL),可通过式(4)求得灌浆过程完毕时,胶结液中 CaCl_2 溶质的总消耗量,结果如图 7 所示。

$$N_{\text{总}} = \sum_1^n V_i \times (c - c_i) \quad (4)$$

式中, $N_{\text{总}}$ 为 CaCl_2 溶质总消耗量, mol; V_i 为单次灌浆使用的胶结液体积, mL; c 为胶结液中 CaCl_2 初始

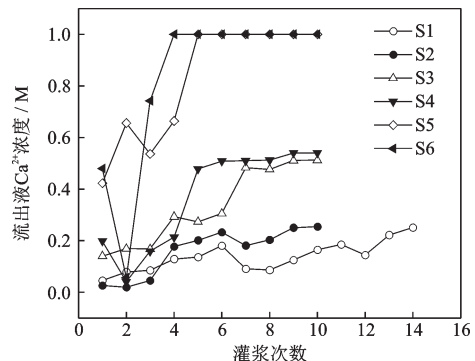


图 6 流出液 Ca^{2+} 浓度变化

Fig. 6 Change of calcium concentration in the effluent

浓度, M ; c_i 为灌浆流出液中 Ca^{2+} 浓度, M 。

由图 7 可知, 在胶结液中提供过量的尿素, 使得 0.25 M 与 0.5 M 两组氯化钙浓度试验中氯化钙的总消耗量明显下降, 而对 1.0 M 浓度条件下的试验无明显影响。

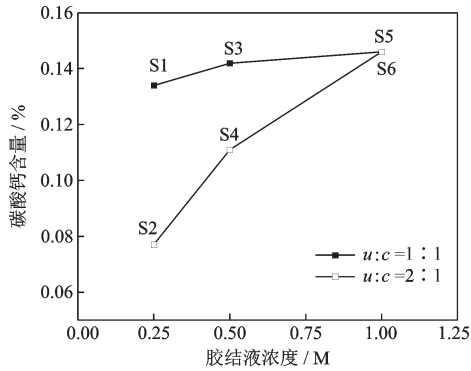


图 7 $CaCl_2$ 总消耗量

Fig.7 Total consumption of $CaCl_2$

注: $u:c$ 代表尿素与氯化钙的溶质浓度比(下同)

(2) 砂样处理前为松散状态, 无法进行无侧限试验, 其强度可视为 0 kPa。处理后砂柱的无侧限抗压强度测试结果如图 8 所示。由图 8 可见, S5 试样的强度最高, S2 最低。提供过量尿素的 S2、S4、S6 试样无侧限抗压强度均分别低于 S1、S3、S5 试样。其中在 0.25 M 的胶结液浓度下, 强度下降了 222.56 kPa, 强度和 $CaCl_2$ 总消耗量差异均最大。

图 9 为经 MICP 处理并烘干后, 砂样整体的碳酸钙含量, 其中碳酸钙含量是由砂样质量的变化值除以装样时的砂样质量得到。可见提供过量尿素的试样, 碳酸钙含量、氯化钙总消耗量及强度都较低, 整体加固效果较差。

将压碎后的试样分为上下两部分, 按第 2.5 节

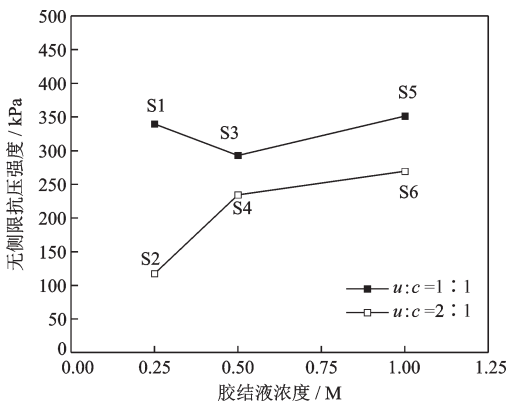


图 8 无侧限抗压强度试验结果

Fig.8 Results of unconfined compressive strength tests

方法测试砂样上下两部分的碳酸钙含量, 得到碳酸钙含量分布如图 10 所示。由图 10 可知, 试样整体均表现为上部低下部高, 较不均匀。而胶结液中尿素未过量的试样, 上下部碳酸钙含量均比尿素过量的试样高。碳酸钙含量出现上低下高的现象, 一方面是由于胶结液的冲刷, 上部附着的菌株受扰动而冲至下部; 另一方面由于下部排水不够迅速, 砂样底部受胶结液浸泡时间稍长, 因而碳酸钙含量较高。

(3) 图 11 为 MICP 处理后砂样的 SEM 电镜扫描图。各组试样砂粒表面与孔隙中均积聚了较多碳酸钙晶体, 并在一些晶体表面发现了孔洞的存在, 说明了以细菌为晶体核心的碳酸钙沉积机理^[12,17-18]。仔细观察发现各试样碳酸钙的分布存在一定的差别。反应生成的碳酸钙主要成方解石的晶型, 在尺寸上 S1~S4 多以 10~20 μm 的碳酸钙晶体积聚沉积, 而 S5 与 S6 除上述小尺寸碳酸钙晶体, 还出现了晶体堆叠的现象, 在土颗粒表面尤其是颗粒接触处形成了较大范围的致密的堆叠体。S5~S6 出现晶体堆叠, 碳酸钙尺寸较大, 多是胶结

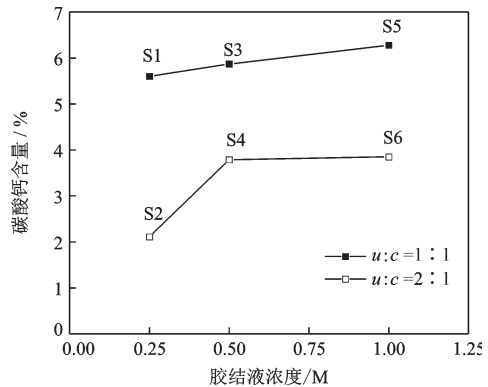


图 9 碳酸钙含量

Fig.9 Calcium carbonate content

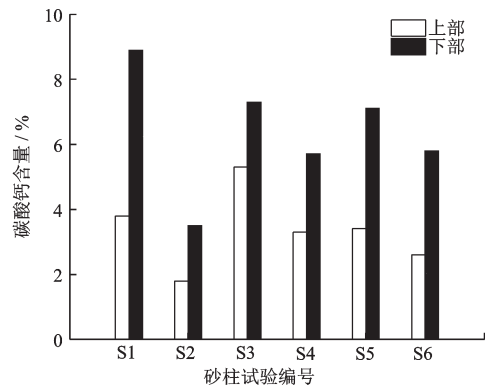


图 10 碳酸钙含量分布

Fig.10 Distribution of calcium carbonate

液浓度较高的缘故。

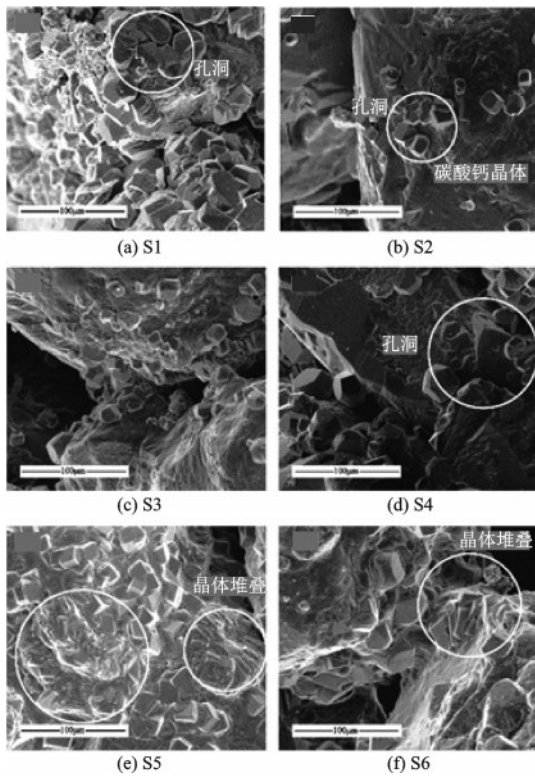


图 11 砂样 SEM 图像

Fig. 11 SEM images of sand samples

3.3 讨论

与本文灌浆方式类似的 B.M.Mortensen 等^[11]的试验,每隔 3 h 灌 2 个孔隙体积胶结液,尿素-氯化钙溶质浓度比为 7:1 与 1:1 的两组试样,固化过程中监控到的剪切波速增长情况差别很小。而在 B.M. Martinez 等^[11]的试验中,胶结液流入后浸泡 2 h,尿素-氯化钙溶质浓度比为 3:1 处理后试样的碳酸钙沉淀效率则较 1:1 的高出 23%。这与本文水溶液试验中反应 12 h 以后的情况类似,虽然在反应初期,提高溶质浓度比令 MICP 反应较慢,但由于可供分解的尿素量更充足,若反应时间较充足,最终尿素分解量会更高,碳酸钙转化率提高,可能会有较好的处理效果。

而本文采用直灌式灌浆的处理方式加固砂柱,无浸没时间,注浆间隔时间为 12 h,与水溶液环境下的反应初期(前 12 h)的条件较为接近。与水溶液试验相比,砂柱中 MICP 反应较为静态,反应物接触较为不充分,其单次反应水平(12 h)应低于水溶液 12 h 时的反应水平。这是砂柱试验中钙离子消耗和碳酸钙生成量差别较水溶液试验中更加明显的原因。

综合本文水溶液试验与砂柱试验的结果可知,在三种氯化钙摩尔浓度下(0.25 M、0.5 M、1.0 M),胶结液中尿素过量均对 MICP 反应较为不利。

对比其他研究^[16,20]中的 SEM 扫描图发现,高胶结液浓度条件下(S5~S6)大尺寸碳酸钙略少,仍分布有许多碳酸钙小颗粒。最为不同的是,S5~S6 中并没有像 A.Al Qabany 等^[19]的研究中那样分散性分布,而是形成了致密的堆叠体。这一现象应与试验的处理方式有关。A.Al Qabany 等^[19]采用的是“灌浆+浸泡”的方式,即令胶结液灌入后,在土体中浸没一段时间(3~48 h 不等),尺寸较大,且分布不均匀,未能连接成面,因而整体强度很低。赵茜^[16]采用的浸泡法,将标准石英砂填入全接触柔性模具后浸没于胶结液池中。试验表明相比于“灌浆+浸泡”的方式,浸泡法处理的砂样碳酸钙尺寸更大(100 μm),认为相对静态的处理方式令尿素水解 MICP 过程较为缓慢均匀,从而利于晶体的发育。

同样使用高浓度胶结液(1.0 M)处理,本文的灌浆方式与上述研究相比,较为动态,较不利于晶体的发育,这可能是砂样中小尺寸碳酸钙晶体数量较多的原因。因而与 A.Al Qabany^[19]试验中高浓度胶结液处理后的试样几乎无强度的现象不同,在本文高浓度胶结液条件下,较多小尺寸碳酸钙晶体,且在砂颗粒接触处形成了较大面积的致密的堆叠体。这种堆叠体很大程度上增强颗粒间的摩擦阻力和连接强度,从而宏观上提高的砂样的抗剪强度。

菌液在一定条件下消耗尿素的能力是有限的,因而 MICP 技术中胶结液浓度一般不会高于 1.0 M。本文中两个高胶结液浓度下的砂柱灌浆试验在 3 天内均反应完毕,而在水溶液试验中 MICP 反应还未结束,这说明砂柱试验中胶结液浓度为 1.0 M 对菌液来说是过剩的。高胶结液浓度下(1.0 M),尿素-氯化钙配比不同的两个砂柱试验中,钙离子消耗量、碳酸钙生成量和无侧限抗压强度都较高。高浓度下胶结液浓度过剩,是尿素浓度过量对 MICP 的影响较小的原因。

4 结论

(1)在 3 种氯化钙摩尔浓度条件下(0.25 M、0.5 M、1.0 M),尿素过量对 MICP 反应不利,水溶液试验中,钙离子初期消耗速率均降低;在本文的注浆

方式和上述3种氯化钙浓度下,砂柱试验中,处理后砂样强度较尿素不过量的情况分别降低了65.5%、20%和23.3%。其中,较低氯化钙浓度下(0.25 M),胶结液中尿素过量对MICP的影响最为明显。

(2)高浓度胶结液(1.0 M)处理砂样时,尿素过量与否对MICP的影响较小,高浓度下胶结液浓度过剩,是尿素浓度过量对MICP的影响较小的原因。

参考文献:

- [1] De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 118-136.
- [2] 李明东, Lin Li, 张振东, 等. 微生物矿化碳酸钙改良土体的进展、展望与工程应用技术设计 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(10): 80-87.
Li M D, Lin L, Zhang Zh D, et al. Review, outlook and application technology design on soil improvement by microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(10): 80-87. (in Chinese)
- [3] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 643-653.
He J, Chu J, Liu H L, et al. Reserach advances in biogeotechnologies [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [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): 1 486-1 495.
Cheng X H, Ma Q, Yang Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1 486-1 495. (in Chinese)
- [5] 彭劫, 何想, 刘志明, 等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1 769-1 774.
Peng J, He X, Liu Zh M, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1 769-1 774. (in Chinese)
- [6] Cheng L, Shahin M A, Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [7] Whiffin V S, Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiol Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [8] 程晓辉, 杨钻, 李萌, 等. 岩土材料微生物改性的基本方法综述 [J]. *工业建筑*, 2015, 45(7): 1-7.
Cheng X H, Yang Z, Li M, et al. Microbial geomateri-
- als : a methodology review [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(7): 1-7. (in Chinese)
- [9] Okwadha G D, Li J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation [J]. *Chemosphere*, 2010, 81(9): 1 143-1 148.
- [10] Martinez B C, Dejong J T, Ginn T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement [J]. *J Geotech Geoenviron*, 2013, 139(4): 587-598.
- [11] Mortensen B M, Haber M J, Dejong J T, et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 111(2): 338-349.
- [12] Dejong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [13] 水质钙的测定 EDTA 滴定法: GB/T 7476—1987 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Water quality-determination of calcium-EDTA titrimetric method: GB/T 7476—1987 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [14] 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Water quality-determination of ammonium-nessler's reagent spectrophotometry: HJ 535—2009 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 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, 2014.
Zhao Q. Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [17] 荣辉, 钱春香, 李龙志. 微生物水泥胶结机理 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(3): 314-319.
Rong H, Qian Ch X, Li L Zh. Cementation mechanism of microbe cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(3): 314-319. (in Chinese)
- [18] Dhami N K, Sudhakara R M, Abhijit M. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 314.
- [19] Al Qabany A, Soga K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(8): 992-1 001.
- [20] Qabany A A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(4): 331-339.

(本文责编: 池营营)