

基于低 pH 一相注浆法的微生物固化土体试验研究

崔广芹,张航*,朱巩硕,张成志,公衍德

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:针对微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcite precipitation, MICP)技术在固化土体的过程中存在碳酸钙分布不均匀的问题,采用低 pH 一相注浆法对微生物固化土体试样过程中碳酸钙的分布情况开展试验研究。通过正交试验,确定最优培养方案为:pH=3.0、 O_{D600} =4.0、胶结液浓度 c_s =2.00 mol/L。基于最优注浆方案研究微生物固化土体试样中碳酸钙的分布情况和试样强度变化特性,并通过扫描电镜测试,观察固化试样的微观结构特征。结果表明:低 pH 一相注浆法有助于促进微生物反应过程中碳酸钙的均匀性分布,相较于两相注浆法,低 pH 一相注浆法固化试样的内摩擦角增大 17.9%,黏聚力增大 46.3%,压缩模量增大 22.4%。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;注浆方法;低 pH;土工试验;微观结构

中图分类号:TU144.3

文献标志码:A

引用格式:崔广芹,张航,朱巩硕,等.基于低 pH 一相注浆法的微生物固化土体试验研究[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):117-124.

CUI Guangqin, ZHANG Hang, ZHU Gongshuo, et al. Experimental study on microbial solidification of soil based on low pH one-phase grouting method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):117-124.

Experimental study on microbial solidification of soil based on low pH one-phase grouting method

CUI Guangqin, ZHANG Hang*, ZHU Gongshuo, ZHANG Chengzhi, GONG Yande

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven distribution of calcium carbonate in the process of soil solidification by microbial induced calcite precipitation (MICP), low pH one-phase grouting method was used to study the distribution of calcium carbonate in soil samples solidified by microorganisms. The optimal culture conditions were determined as pH=3.0, O_{D600} =4.0 and c_s =2.00 mol/L by orthogonal test. Based on the optimal grouting scheme, the distribution of calcium carbonate and the strength of soil samples were studied, and the microstructure of soil samples was observed by SEM. The results indicated that the low pH single-phase grouting method helped promote the uniform distribution of calcium carbonate during microbial reaction processes. Compared to the two-phase grouting method, the low pH single-phase grouting method resulted in a 17.9% increase in the internal friction angle, a 46.3% increase in cohesion, and a 22.4% increase in compressive modulus of the solidified specimens.

Keywords: microbial-induced calcium carbonate precipitation; grouting method; low pH; soil test; microstructure

0 引言

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)技术是目前较有前景的生物介导土体改良技术之一^[1],相较于传统的化学

注浆、电渗固结、真空预压等土体改良方法,其具有土体扰动小、节约资源以及保护环境等优点。微生物矿化作用广泛存在于自然界中,是指某些微生物通过自身新陈代谢活动形成矿物结晶的现象。碳酸钙是分布较广的一类碳酸盐,性质稳定、强度和耐久性能好,因此微生物诱导碳酸钙沉淀技术一直

是微生物矿化的研究热点课题^[2]。文献[3]在2004年率先将MICP技术运用于土体改良领域,研究表明该技术可在砂土中诱导生成碳酸钙沉淀,显著提高固化土体的力学性能;文献[4]通过微观分析进一步确定矿化产物中起胶结作用的物质主要为方解石型碳酸钙。之后,学者们又研究了不同类型的微生物^[5]、钙源种类^[6]和胶结液^[7]等相关因素对其反应的影响。目前MICP技术在土体改良方面的应用依然存在很多问题,其中如何保证固化土体强度的均匀性是该技术的关键问题之一^[8],即在注浆过程中碳酸钙会优先在注浆口附近生成,使土体改良效果呈现明显的区域性差异^[9]。文献[10]指出,实现目标处理区域内碳酸钙的均匀分布已确定为微生物注浆技术升级所面临的主要挑战之一。

在早期,文献[11]采用一相注浆法,将细菌和胶结液的混合液直接注入土体,由于细菌的凝聚作用和碳酸钙的快速生成,堵塞注浆口,反应难以深入土体内部;文献[12]提出两相注浆法,在一定程度上改善了注浆口堵塞的问题,但由于先注入胶结液的地方细菌与胶结液先接触反应,试样不同位置的强度仍呈现明显差异;文献[13]在两相注浆法的基础上提出了一种改进的两相注浆法,试样不同位置的强度差异情况有所改善,但在注入胶结液的过程中存在细菌被带出的问题,不同部位的细菌量难以确定,从而影响了碳酸钙的均匀分布。部分学者尝试采用其他方法改善碳酸钙分布的均匀性,文献[14]通过蒸馏水把菌液中的菌体重悬,研究了不同脲酶活性对砂柱强度的影响,发现砂柱顶部的抗压强度大约是传统注浆方式结果的1/5,但碳酸钙的分布得到了明显改善;文献[15]通过对比不同浓度的菌液对石英砂固化效果的影响,发现菌液浓度越高,碳酸钙的生成量和力学性能提高的越多;文献[16]采用控温法改善碳酸钙分布的均匀性,在6℃温度下将菌液与胶结液混合,由于低温下微生物活性受到抑制,碳酸钙沉淀在土体中的分布情况得到了明显改善;文献[17]通过小尺寸砂柱试验,探究了氯化钙和乙酸钙2种钙源对胶结试样均匀性的影响,发现乙酸钙作为钙源可以改善试样中碳酸钙分布的均匀性。

目前针对MICP技术固化土体均匀性的研究主要集中在注浆步骤、菌液浓度、营养液配置等方面。文献[18]提出一种低pH一相注浆法,即在注浆前先降低一相浆液(菌液和胶结液的混合溶液)的

pH,抑制前期反应的发生。控制浆液在低pH状态下进行注浆对提高碳酸钙在固化土体中的均匀分布有很好的效果,为解决注浆口淤堵的难题提供一个新方向。然而相关方面的研究较为缺乏,针对该条件下多因素对MICP固化土体的影响及其强度增长的内在机理研究还未见报道。本研究通过开展正交水溶液试验确定最佳注浆方案,对注浆固化试样中碳酸钙分布的均匀性、力学性能开展试验研究,探究不同影响因素(菌液浓度、pH、胶结液)对碳酸钙生成量和砂柱力学性能的影响,为MICP技术在实际工程中的应用提供理论依据和参考。

1 试验材料及装置制备

1.1 试验材料

试验前用去离子水去除原状土中杂质,土样pH调至中性,置于100℃的恒温鼓风箱中完全烘干。按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[19]对试验土样进行颗粒筛分试验,颗粒级配曲线如图1所示。该土样 $d_{60}=0.77\text{ mm}$, $d_{30}=0.13\text{ mm}$, $d_{10}=0.02\text{ mm}$,土的不均匀系数 $C_u=38.5$,曲率系数 $C_c=1.1$,级配良好。

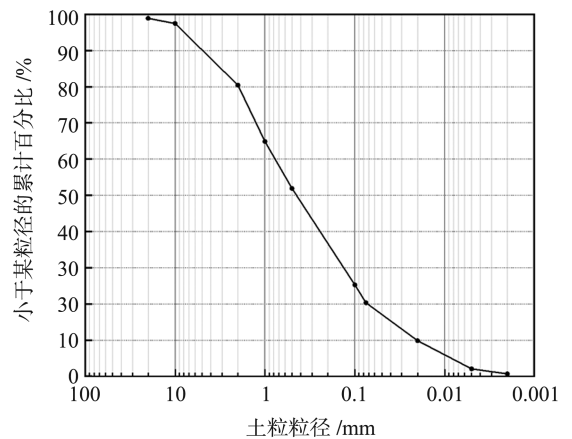


图1 粒径累计曲线

Fig.1 Cumulative particle size curve

1.2 微生物菌种及培养

试验用菌为巴氏芽孢杆菌,是革兰氏阳性好氧菌,可通过新陈代谢分泌大量脲酶。将活化后的细菌按1:100的体积比接种到液体培养基,置于恒温震荡培养箱(28℃,180 r/min)培养36~48 h,培养基质量浓度配方为蛋白胨10 g/L、氯化钠5 g/L、酵母浸粉3 g/L。试验前用V-1100D型可见光分光计测量菌液的吸光度,并以 O_{D600} 表征细菌在培养液中的生长情况,采用文献[20]提出的电导率法测得菌液脲酶活性,微生物生长曲线与

脲酶活性曲线如图 2 所示。根据测试结果选用培养 48 h 的巴氏芽孢杆菌,此时微生物数量和脲酶活性均达到最高。将制备好的菌液在 4 °C 左右低温保存,防止环境温度影响细菌的活性^[21]。

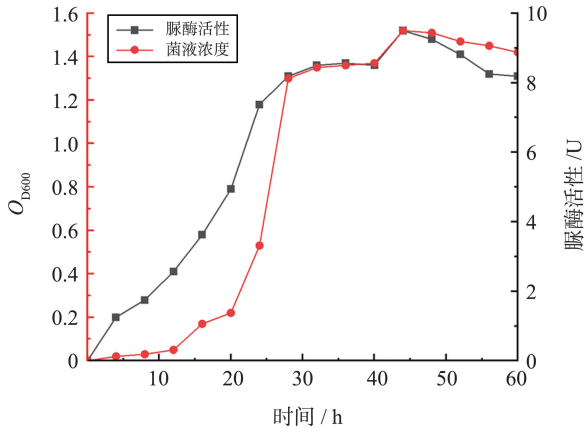


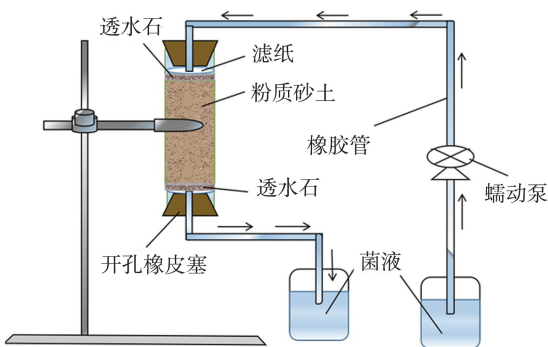
图 2 微生物生长曲线和脲酶活性曲线

Fig.2 Microbial growth curve and urease activity curve

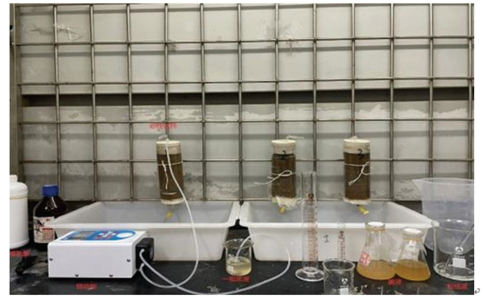
试验时取恒温培养 48 h 的细菌配置 4 组不同浓度的菌液, O_{D600} 由高到低分别为 4.0、2.0、1.0、0.5; 胶结液(cementation solution, CS)为微生物反应提供营养物质,胶结液为等摩尔氯化钙和尿素的混合液,试验时设置 0.75、1.00、1.50、2.00 mol/L 4 种浓度。参考文献[18]的配置方法配置低 pH 一相浆液,具体配制过程如下:(1)将等体积的菌液和胶结液混合置于锥形瓶中;(2)用盐酸分别将混合液的 pH 调至 6.0、5.0、4.0、3.0。

1.3 砂柱试样制备

砂柱试样所用模具为内径 61.8 mm, 长度 182.0 mm 的透明 PC 圆柱筒。试验时模具两端放透水石和滤纸以防止反渗,试验装置如图 3 所示。为保证砂柱试样装填的均匀性,参考文献[22]的装填方法,分 3 层装入砂样,控制砂柱试样的干密度为 $(1.8 \pm 0.5) \text{ g/cm}^3$,装填完毕后,向试样通入去离子水排除试样中多余气泡。



(a) 装置示意图



(b) 装置实物图

图 3 注浆固化试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of grouting solidified sample

2 试验方法

2.1 水溶液试验

选取三因素、四水平的正交试验研究不同影响因素下微生物诱导生成碳酸钙的能力。正交试验设置 16 组平行试验,以碳酸钙的有效生成量为评价指标,通过回归分析确定影响因素的敏感性程度和最优培养方案。正交试验水平与因素如表 1 所示,正交试验设计如表 2 所示。

表 1 正交试验水平与因素表

Table 1 Orthogonal test levels and factors table

水平	O_{D600}	$c_s / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
1	0.5	0.75	3.0
2	1.0	1.00	4.0
3	2.0	1.50	5.0
4	4.0	2.00	6.0

表 2 正交试验设计表

Table 2 Orthogonal experimental design table

试验编号	O_{D600}	$c_s / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
A ₁	0.5	0.75	3.0
A ₂	0.5	1.00	4.0
A ₃	0.5	1.50	5.0
A ₄	0.5	2.00	6.0
A ₅	1.0	0.75	4.0
A ₆	1.0	1.00	3.0
A ₇	1.0	1.50	6.0
A ₈	1.0	2.00	5.0
A ₉	2.0	0.75	5.0
A ₁₀	2.0	1.00	6.0
A ₁₁	2.0	1.50	3.0
A ₁₂	2.0	2.00	4.0
A ₁₃	4.0	0.75	6.0
A ₁₄	4.0	1.00	5.0
A ₁₅	4.0	1.50	4.0
A ₁₆	4.0	2.00	3.0

2.2 低 pH 一相注浆固化砂柱试验

本研究设置低 pH 一相注浆法固化砂柱试验和两相注浆法固化砂柱试验进行对照分析。

2.2.1 低 pH 一相注浆法固化砂柱试验

(1)使用蠕动泵向试样中通入去离子水至饱和,排出试样内部气体;(2)每次配置 40 mL 低 pH 一相浆液,保证浆液在较短时间内使用完毕;(3)使用蠕动泵以 60 mL/h 的速度泵入 1.2 倍砂柱体积的浆液;(4)注浆结束将砂柱试样在 26 ℃ 恒温培养箱静置 12 h,即完成首次注浆;(5)重复上述步骤累计进行 3 轮注浆以强化加固效果,结束后将试样在恒温箱中培养 24 h 并拆模。

2.2.2 两相注浆法固化砂柱试验

(1)使用蠕动泵向试样中通入去离子水至饱和,排出试样内部气体;(2)以 0.5 mol/L CaCl₂ 溶液为固定液与菌液混合注入砂柱固定细菌;(3)使用蠕动泵以 60 mL/h 的速度泵入 1.2 倍砂柱体积的胶结液(采用目前 MICP 研究中常设 pH,即 pH = 8.5);(4)注浆结束将砂柱试样在 26 ℃ 恒温培养箱静置 12 h,即完成首次注浆;(5)重复上述步骤累计进行 3 轮注浆以强化加固效果,结束后将试样在恒温箱中培养 24 h 并拆模。

2.3 砂柱均匀性试验

试件脱模烘干,用砂纸打磨表面防止析出的碳酸钙晶体干扰试验结果。将砂柱试样分为等质量的上中下 3 份,分别取其外圈部分和内部核心部分。对所取各部分砂土进行碳酸钙生成量测定,对比分析胶结后砂柱各部位碳酸钙生成量,评价固化砂柱中碳酸钙的均匀性。固化砂柱取样情况如图 4 所示。

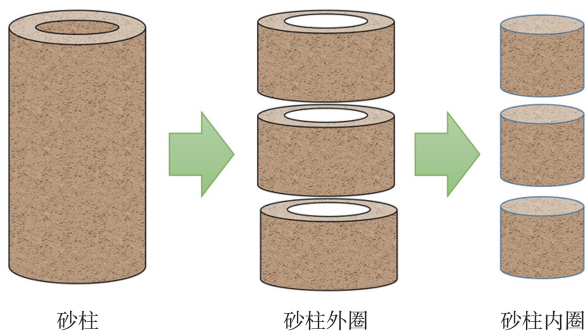


图 4 固化砂柱取样示意图

Fig.4 Schematic diagram of sampling of solidified sand column

2.4 碳酸钙生成量检测

采用酸洗法^[23]测定试样中碳酸钙生成量,将微生物处理后的试样烘干至恒等质量(记为 m_1)。加入 4 mol/L 盐酸搅拌浸泡,使用真空抽滤装置过滤,再次向土样中加入盐酸搅拌并重复以上步骤,直至土样中无碳酸钙残留(记为 m_2)。烘干后土样的质量损失即为碳酸钙生成量,用 m 表示,即

$$m = m_1 - m_2. \quad (1)$$

2.5 土工试验

主要土工试验包括直剪试验和固结试验,均按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[19]进行测定。固结压力分别为 50、100、200、300、400 kPa。直剪试验剪切速率是 0.01 mm/min,垂直压力为 50、100、150 和 200 kPa。

3 试验结果与分析

3.1 水溶液试验分析

水溶液试验以碳酸钙的生成量(m_3)为指标,通过 K 值法确定最优培养方案,极差指标 R 越大,结果评价越好,如表 3、4 所示。由表 3、4 可知,正交试验的 3 个因素对钙离子的利用率有不同程度的影响。按照对试验结果的影响程度排序为: $c_s > O_{D600} > \text{pH}$ 。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test 单位:g

试验编号	m_3	试验编号	m_3
A ₁	0.053	A ₉	0.054
A ₂	0.069	A ₁₀	0.091
A ₃	0.099	A ₁₁	0.133
A ₄	0.171	A ₁₂	0.204
A ₅	0.055	A ₁₃	0.075
A ₆	0.065	A ₁₄	0.085
A ₇	0.108	A ₁₅	0.157
A ₈	0.169	A ₁₆	0.356

表 4 正交试验极差分析

Table 4 Range analysis of orthogonal experiment

因素	O_{D600}	$c_s / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
k_1	0.098	0.059	0.152
k_2	0.099	0.078	0.121
k_3	0.121	0.124	0.102
k_4	0.168	0.225	0.111
R	0.070	0.166	0.050

不同影响因素下生成碳酸钙的均值效应如图 5 所示。由图 5(a)可知,碳酸钙的生成量与 O_{D600} 呈现正相关,与文献[24]和文献[25]的结论相吻合, O_{D600} 从 0.5 到 4.0,碳酸钙的生成量增加了 71.43%;由图 5(b)可知,碳酸钙的生成量与 c_s 呈正相关,高浓度的胶结液促进了碳酸钙生成,胶结液从 0.75 mol/L 增加到 2.00 mol/L,碳酸钙的生成量增长了 281.36%;由图 5(c)可知,随着一相浆液 pH 的升高,碳酸钙的生成量呈现先下降后升高的趋势,碳酸钙总体生成量降低了 32.90%。低 pH 条件下细菌活性受到抑制,延缓了细菌的絮凝现象,使细菌在溶液中均匀分布,提高了细菌与溶液的接触面积,碳酸钙生成量增加;当 pH 达到 5.0 左右,酸性环

境虽抑制了大部分细菌的活性,但细菌絮凝现象逐渐增多^[18],延缓了碳酸钙的生成。当 pH 持续升高达到 6.0 左右,溶液环境趋于碱性,细菌活性快速增

加,碳酸钙的生成量增大,呈上升趋势。通过图 5 可以直观得出因素组合为 $\text{pH} = 3.0$ 、 $O_{\text{D}600} = 4.0$ 、 $c_s = 2.00 \text{ mol/L}$,即最优培养方案。

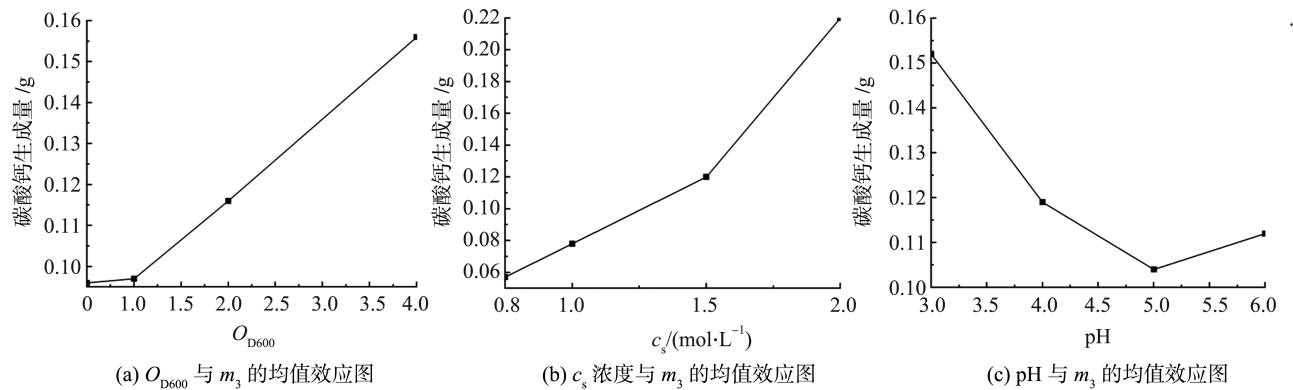


图 5 不同因素对碳酸钙生成量影响的均值效应图

Fig.5 Mean effect diagram of different factors on calcium carbonate production

3.2 砂柱均匀性试验分析

为评价低 pH 一相注浆法加固砂土试样的均匀性,取固化试样不同部位等质量的砂土进行酸洗试验,测得各部分碳酸钙生成量,如表 5 所示。由表 5 可知,两相注浆法和低 pH 一相注浆法固化试样中碳酸钙生成量从试样上部到底部呈减小趋势。采用低 pH 一相注浆法固化试样内圈和外圈各部位碳酸钙生成量最大相差分别为 0.51 g 和 0.44 g,采用两相注浆法固化试样内圈和外圈各部位碳酸钙生成量最大相差分别为 1.13 g 和 1.21 g,差值越小碳酸钙分布越均匀。对比可知,低 pH 一相注浆法固化试样中各部分碳酸钙生成量相差较小,与两相注浆法相比,其内圈和外圈碳酸钙生成量的最大差值分别减小了 54.9% 和 63.6%。故低 pH 一相注浆法固化试样中碳酸钙分布更均匀。由于低 pH 状态对微生物活性的抑制,细菌凝絮减少,延缓了碳酸钙的前期反应,浆液有充分的路径向下渗透,之后尿素水解逐渐参加反应,环境 pH 升高,微生物活性复苏,砂柱各部位围绕土颗粒发生的原位凝絮反应和碳酸钙生成反应开始同步进行,使得试样中各部位的碳酸钙分布均匀。

表 5 试件不同部位碳酸钙生成量

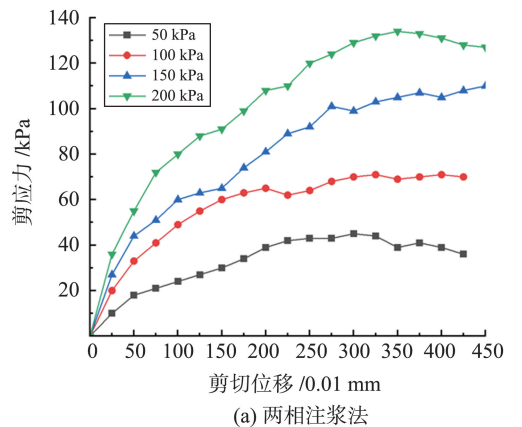
Table 5 Calcium carbonate content in different parts of the test specimen 单位:g

部位	试样上部	试样中部	试样下部
低 pH 法试样外圈	7.41	6.97	7.00
低 pH 法试样内圈	6.75	6.50	6.24
两相法试样外圈	7.72	7.20	6.51
两相法试样内圈	7.76	7.10	6.63

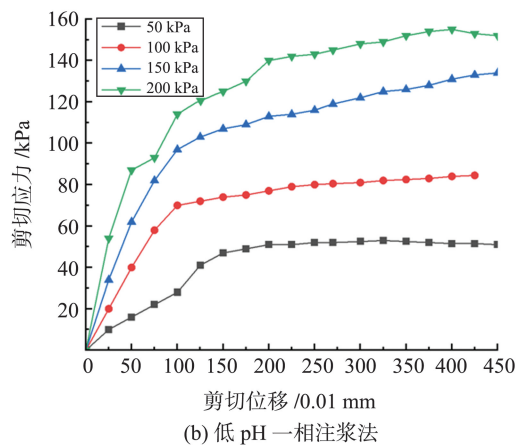
3.3 直剪试验结果分析

试样直剪试验的剪应力与剪切位移关系曲线

如图 6 所示,在剪切过程中,随着剪切位移的增加,试样的剪应力逐渐增大,且增速逐渐趋于平缓。剪切位移相同时,采用低 pH 一相注浆法固化的试样比两相注浆法固化的试样峰值强度高 20%~35%。由于低 pH 一相注浆法提高了碳酸钙在试样中分布的均匀程度,均布的碳酸钙结晶在试样中形成了三维碳酸钙网络结构,带动周围土颗粒共同受力,使得荷载分布更加广泛,进而提高了试样强度。



(a) 两相注浆法



(b) 低 pH 一相注浆法

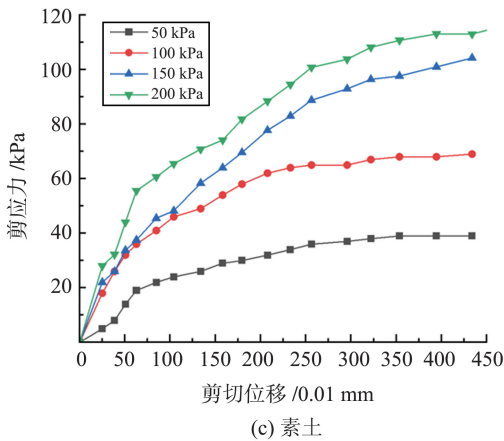


图6 剪切位移与剪应力对应关系曲线

Fig.6 The corresponding curve of shear displacement and shear stress

库伦强度拟合包线如图7所示,由拟合结果可知素土的黏聚力为9.63 kPa,内摩擦角为 29.8° ,经两相注浆法固化后试样的黏聚力为13.27 kPa,增加了37.8%,内摩擦角为 31.7° ,增大了6.4%;经低pH一相注浆法固化后试样的黏聚力为19.42 kPa,增加了101.6%,内摩擦角为 37.4° ,增大了25.5%。两种注浆方法均使试样的内摩擦角和黏聚力得到改善,相较于两相注浆法,低pH一相注浆法固化试样的黏聚力增强46.3%,内摩擦角增大17.9%。低pH一相注浆法固化试样中碳酸钙均匀填充土体孔隙,强化了土颗粒间的咬合力,增大了土体间的黏聚力,碳酸钙形成的立体网状骨架分担了剪应力,使土体的结构薄弱面得到了强化。

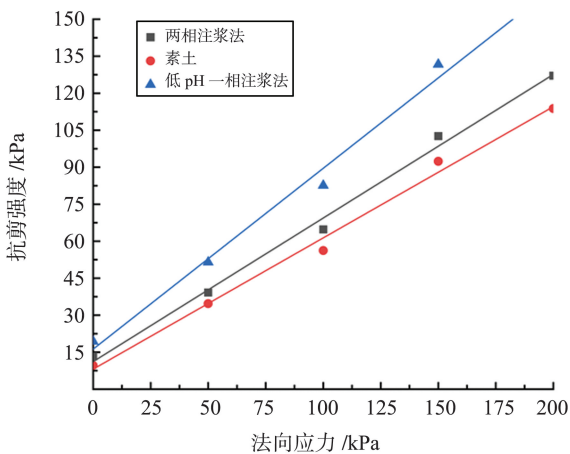


图7 库伦强度拟合包线图

Fig.7 Contour plot for Coulomb strength fitting

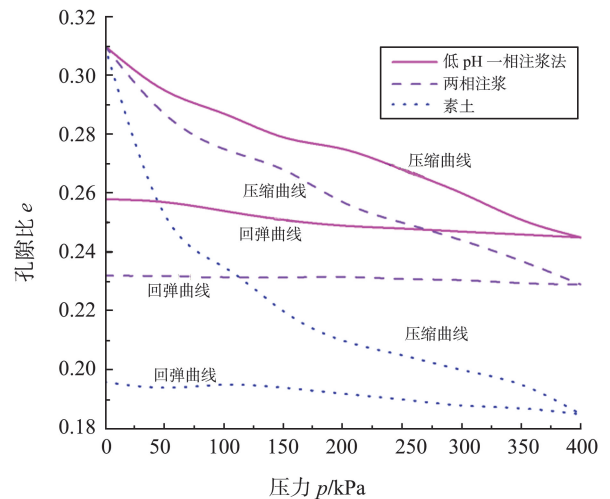
3.4 固结试验结果分析

试样压缩阶段,压缩曲线斜率表示压缩系数,计算公式为

$$a = 1000 \times \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2}, \quad (2)$$

式中: a 为土的压缩系数, MPa^{-1} ; p_1 、 p_2 为固结压力,kPa; e_1 、 e_2 为对应 p_1 、 p_2 时的孔隙比。实际工程中评价土体的压缩性,一般取 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ 、 $p_2 = 200 \text{ kPa}$,并将相应的压缩系数记为 a_{1-2} 。

回弹曲线斜率表示回弹指数,表征土体回弹能力的强弱,如图8所示。由图8可知,土体的回弹性能变化较小,各曲线近乎平行。

图8 不同固化方式 $e-p$ 曲线图Fig.8 $e-p$ curves of different curing methods

不同注浆方式下孔隙比与竖向荷载关系如图8所示,可知素土的压缩系数 $a_{1-2} = 0.239 \text{ MPa}^{-1}$,低pH一相注浆法固化试样的压缩系数 $a_{1-2} = 0.138 \text{ MPa}^{-1}$,压缩系数减小了42.3%;两相注浆法固化试样的压缩系数 $a_{1-2} = 0.175 \text{ MPa}^{-1}$,压缩系数减少了26.8%。相较于两相注浆法,采用低pH一相注浆法固化试样的压缩系数减小了21.1%,因为均匀分布的碳酸钙填补胶结了土颗粒间较大的孔隙通道,减小了土体的孔隙比。

不同注浆法固化试样压缩模量的变化曲线如图9所示。由图9可知,压力在0~25 kPa时,3条曲线变化趋势相似,试样无明显压缩变形;压力超过25 kPa时,土体内部原有结构逐渐发生破坏,试样竖向变形增大,压缩模量 E_s 迅速增加。相较于素土,两相注浆法和低pH一相注浆法固化试样的压缩模量分别增大10.4%和35.1%。相较于两相注浆法,采用低pH一相注浆法固化试样的压缩模量提升22.4%,低pH一相注浆法固化试样中碳酸钙的分布更均匀,大量碳酸钙结晶填充包裹在土颗粒周围,减小了土体孔隙,减小了土体压缩性,增加了土体密实度,增强了土体的抗变形能力。

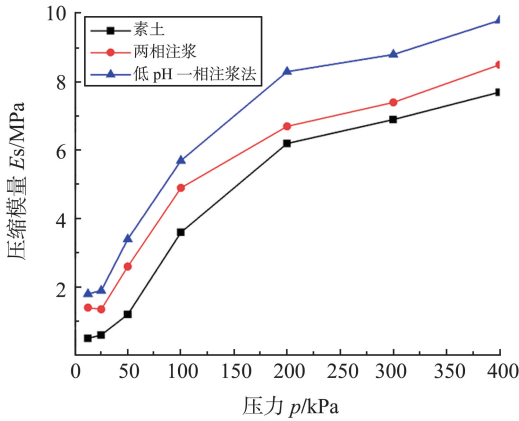


图 9 压缩模量曲线图
Fig.9 Compression modulus curve

通过上述直剪试验与固结试验,旨在探究低 pH 一相注浆法相较于传统注浆法对土体力学性能的影响,研究结论对该方法在较浅地层中的运用具有一定的指导性,但考虑到直剪试验与固结试验的局限性,当地层较深时,由于围压以及其他因素的存在,相关问题还有待进一步研究论证。

3.5 微观结构机理分析

上述分析表明,低 pH 一相注浆技术可以有效改善微生物固化土体的均匀性,提高其力学性能。为探究低 pH 一相注浆技术固化土体的作用机理,采用扫描电镜对固化试样的微观结构进行分析,如图 10 所示。

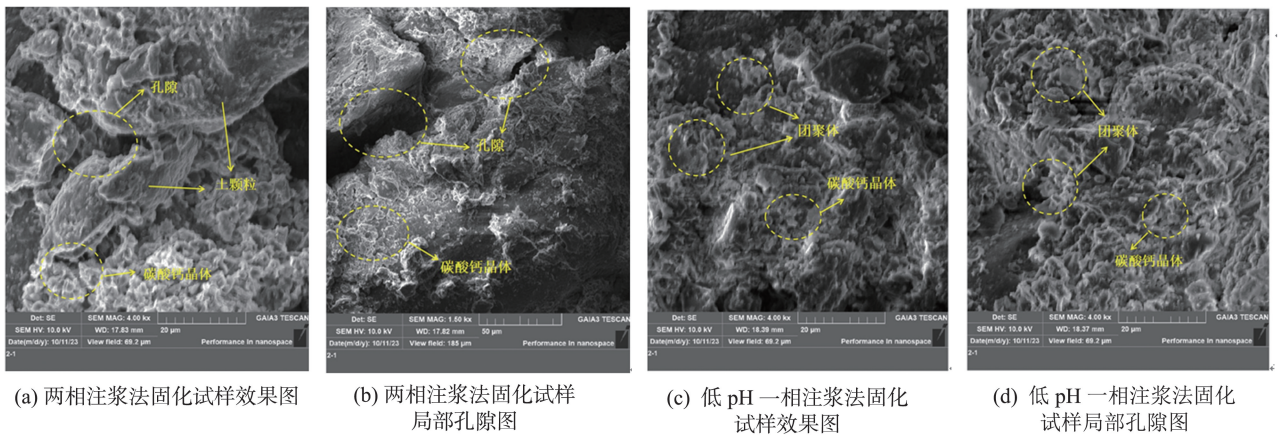


图 10 不同注浆法的电子显微镜扫描图
Fig.10 Scanning electron microscope of different grouting methods

由图 10(a)、10(b)可知,两相注浆法固化试样中生成的碳酸钙晶体对土体孔隙有一定的填充作用,但填充效果有限,碳酸钙晶体在土颗粒周围的分布情况存在较大差异,土颗粒间存在较多孔隙。碳酸钙以细菌作为成核位点^[26],说明土颗粒之间的细菌量的附着量不同,分布不均匀,从而导致碳酸钙晶体对孔隙的填充效果及颗粒间的黏结作用不理想。由图 10(c)、10(d)可知,低 pH 一相注浆法固化试样内部孔隙明显减少,碳酸钙晶体包裹在土颗粒表面,并填充了土颗粒间的孔隙,形成了大量的土颗粒与碳酸钙晶体的团聚体。低 pH 一相注浆法使细菌在土体中分布更加均匀,给碳酸钙晶体提供了大量的成核点,从而减少了土颗粒间孔隙的数量和孔隙尺寸,使土体结构更加密实,较好地改善土体的微观孔隙结构^[27]。

4 结论

针对微生物注浆技术固化土体过程中生成碳酸钙的不均匀性问题,基于低 pH 一相注浆法进行

MICP 水溶液试验、砂柱注浆固化试验、直剪试验和固结试验,探究了多因素对低 pH 一相注浆固化土体试样力学特性的影响及其强度增长的内在机理,得出以下结论。

(1)通过水溶液试验得到了不同影响因素下碳酸钙的生成曲线,通过正交试验,确定了最优培养方案: $pH=3.0$ 、 $O_{D600}=4.0$ 、 $c_s=2.00$ mol/L。按照对试验结果影响程度的大小依次为: c_s 浓度 > O_{D600} 值 > pH。

(2)砂柱均匀性试验中,相较于两相注浆法,低 pH 一相注浆法固化砂柱中碳酸钙的分布更均匀。原因在于低 pH 状态抑制了细菌活性,延缓了碳酸钙的生成,使得浆液有充分的渗流时间和渗透路径流向试样底部。

(3)通过直剪试验与压缩试验可知,相较于两相注浆法,采用低 pH 一相注浆法固化试样的内摩擦角增大 17.9%,黏聚力增大 46.3%,压缩模量增大 22.4%,碳酸钙在试样中的均匀分布是砂柱强度增强的根本原因。

(4)通过电子显微镜扫描微观结构表明,低 pH

一相注浆法处理的试样中碳酸钙的分布更加均匀,大量碳酸钙包裹在土颗粒表面,优化了土体的孔隙结构,提升了固化试样的整体效果。

参考文献:

- [1] PHILLIPS A J, TROYER E, HIEBERT R, et al. Enhancing wellbore cement integrity with microbially induced calcite precipitation (MICP): a field scale demonstration [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 171:1141-1148.
- [2] 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 Jia, CHU Jian, LIU Hanlong, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4):643-653.
- [3] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [4] QIAN C X, YU X N, WANG X. A study on the cementation interface of biocement [J]. *Materials Characterization*, 2018, 136:122-127.
- [5] 王传旭, 赵爱华, 于慧瑛, 等. 淀粉酶高产菌株的筛选、紫外诱变及产酶条件优化 [J]. *微生物学通报*, 2022, 49(5):1759-1773.
WANG Chuanxu, ZHAO Aihua, YU Huiying, et al. Screening, UV mutagenesis, and production optimization of a strain with high yield of amylase [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(5):1759-1773.
- [6] 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.
- [7] MUJAH D, LIANG C, MOHAMED A S. Microstructural and geomechanical study on biocemented sand for optimization of MICP process [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(4):19-25.
- [8] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R. Biogeochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow [J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 58(20):1-13.
- [9] GOMEZ M G, GRADY C, DEJONG J T, et al. Biogeochemical changes during bio-cementation mediated by stimulated and augmented ureolytic microorganisms [J]. *Scientific Reports*, 2019, 7(9):115-163.
- [10] DAWOUD O, CHEN C Y, SOGA K. Microbial-induced calcite precipitation (MICP) using surfactants [C]// *Geo-Characterization and Modeling for Sustainability*. Atlanta, USA: Geo-Congress, 2014:1635-1643.
- [11] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11):1563-1571.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] NAYANTHARA P, DASSANAYAKE A, NAKASHIMA K, et al. Biocementation of Sri Lankan beach sand using locally isolated bacteria: a baseline study on the effect of segregated culture media [J]. *International Journal of Geomate*, 2019, 17(63):55-62.
- [15] ZHAO Qian, LI Lin, LI Chi, et al. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(12):401-409.
- [16] XIAO Y, WANG Y, DESAI C S, et al. Strength and deformation responses of biocemented sands using a temperature-controlled method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(11):191-201.
- [17] 徐溪晨, 郭红仙, 程晓辉, 等. 钙源对微生物矿化胶结砂土材料均匀性的影响 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 12(5):1-8.
XU Xichen, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui, et al. The influence of calcium sources on the uniformity of microbially induced carbonate precipitation (MICP) in cemented sand materials [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English)*, 2023, 12(5):1-8.
- [18] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil biocementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3):615-626.
- [19] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 土工试验方法标准: GB/T50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [21] 邵光辉, 侯敏, 刘鹏. MICP 固化粉土细菌的分布和固定规律研究 [J]. *林业工程学报*, 2019, 4(1):128-134.
SHAO Guanghui, HOU Min, LIU Peng. Distribution and immobilization of bacteria in solidified silty soil [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(1):128-134.