

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250423001

羧甲基纤维素钠改进 MICP 固化效果的试验研究*

郭子豪¹, 白兰兰², 张丽瑶¹, 朱琪¹, 罗晨玮¹, 彭劼¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: 为提升微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术在土体加固中的应用效果, 引入羧甲基纤维素钠(CMC-Na)作为外加剂, 通过室内试验, 探究 CMC-Na 掺量(0~0.8%)对 MICP 加固砂土的力学特性和微观结构的影响。试验结果表明: 当 CMC-Na 掺量为 0.2% 时, 效果最优。其作用机制在于, CMC-Na 能增加胶结液黏度, 延缓下渗速度, 从而使钙离子利用率提高 11.6%, 碳酸钙生成量增加 1.5 倍。宏观性能测试表明, 此掺量下的砂柱无侧限抗压强度达 3 157.5 kPa(为空白对照组的 9.8 倍), 渗透系数降低 61.2%, 且碳酸钙纵向分布更为均匀。微观分析进一步揭示, 此时生成的碳酸钙晶型为球霏石, 相较于未添加 CMC-Na 形成的方解石, 能更均匀地填充砂粒间孔隙, 形成致密胶结结构, 为 MICP 技术的优化及实际应用提供了新思路。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉积; 外加剂; 羧甲基纤维素钠; 石英砂; 土体加固

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0454-13

Experimental Study on Improvement of MICP Reinforcement Effect by Sodium Carboxymethyl Cellulose

GUO Zihao¹, BAI Lanlan², ZHANG Liyao¹, ZHU Qi¹, LUO Chenwei¹, PENG Jie¹

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. JSTC Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: To enhance the application effectiveness of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology in soil reinforcement, this study introduced sodium carboxymethyl cellulose (CMC-Na) as an additive, and conducted laboratory experiments to investigate the influence of CMC-Na content (0-0.8%) on the mechanical properties and microstructure of MICP-treated sandy soil. The experimental results showed that the optimal effect was achieved when the CMC-Na content was 0.2%. The mechanism lay in the fact that CMC-Na could increase the viscosity of the cementation solution and slow the infiltration rate, thereby increasing calcium ion utilization by 11.6% and increasing calcium carbonate production by 1.5 times. Macroscopic performance tests showed that at this content, the sand column achieved an unconfined compressive strength of 3 157.5 kPa (9.8 times that of the blank control group), the permeability coefficient decreased by 61.2%, and the longitudinal distribution of calcium carbonate became more uniform. Microscopic analysis further revealed that the calcium carbonate crystals formed under this condition were vaterite, which, compared with the calcite

* 收稿日期: 2025-04-23; 修回日期: 2025-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51578214)、江苏省交通运输厅科技成果转化项目(2021QD07)资助

作者简介: 郭子豪(2001—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程应用的研究工作。E-mail: gzh02252001@163.com

通信作者: 白兰兰(1982—), 女, 高级工程师, 硕士。主要从事道路设计工作。E-mail: bailanlan@tom.com

formed without CMC-Na, filled the pores between sand particles more uniformly and formed a denser cementation structure. This study provides new insights for the optimization and practical application of MICP technology.

Keywords: microbially induced calcium carbonate precipitation; additive; sodium carboxymethyl cellulose; quartz sand; soil reinforcement

0 引言

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术利用微生物代谢反应生成碳酸钙^[1-3],经 MICP 处理的土壤强度高、压缩性小、渗透系数低^[4-5],该技术可应用于土体加固^[6-8]、遗址修复^[9]、生态防护^[10-13],能降低土壤液化危害^[14],具有较好的工程应用前景。与传统加固方法相比,它具有环境污染少、能耗低、排放低等优势^[15]。

然而, MICP 技术在实际应用中仍存在加固周期长、经济性差等问题。为提高其工程适用性,程瑶佳等^[16]采用 MICP 联合铺砂技术,相比纯 MICP 能进一步提高黄土的抗侵蚀能力;郑俊杰等^[17]将玄武岩纤维掺入砂土中进行微生物固化,发现玄武岩纤维掺量为 0.3%,纤维长度为 20 mm 时试样的强度和韧性较好;彭萌等^[18]以 NH_4Cl 、 NaHCO_3 为添加剂,砂柱孔隙率减小 15.93%,改善 MICP 固化效果;张宽等^[19]调节 pH 的单相胶结方法对于提升土体胶结的深度和均匀性有明显积极作用。

已有研究^[20-22]尝试在 MICP 过程中引入聚合物外加剂(如聚乙烯醇、壳聚糖等),通过改变胶结液性质来优化加固效果。但现有研究多集中于宏观现象观察,对强度增长的微观机理探讨不足,且对灌浆加固的可行性研究较少。因此,本研究结合文献资料调研^[23-24],并综合经济性、可操作性等因素,选择水溶性聚合物羧甲基纤维素钠(Sodium Carboxymethyl Cellulose,简称 CMC-Na)作为外加剂,其易于在水中溶解形成具有一定黏度的透明胶体溶液,在灌浆流动性调控方面具有潜在优势,作为食品添加剂、污水处理絮凝剂等在各领域有着广泛应用^[25-26]。已有研究表明 CMC-Na 应用于土体改良中^[27-30],提高黏土黏聚力、抗压强度及黄土抗冻融性,但其与 MICP 技术的协同增效机制尚不明确。作为一种环境友好、无毒无害且成本低廉的天然纤维素衍生物,羧甲基纤维素钠(CMC-Na)因其具备优异的聚合物特性(如良好的吸附性能与絮凝作

用),且 CMC-Na 能溶于 MICP 材料中的胶结液,无需改变 MICP 主要流程或增加工程量,同时工业化生产的 CMC-Na 成本较低,因此 MICP 联合 CMC-Na 加固土体的工程可行性较高。

基于此,本研究将 CMC-Na 作为外加剂引入 MICP 体系,通过室内试验,系统研究不同 CMC-Na 掺量(0~0.8%)对砂土力学性能、渗透性及碳酸钙分布均匀性的影响,并结合微观测试揭示其改性机理,为实际工程应用提供理论依据和技术支持。

1 试验材料

1.1 砂土

本研究使用的砂土为标准砂,砂样比重 $D_s=2.65$,干密度 $\rho_d=1.61\text{g}/\text{cm}^3$,不均匀系数 $C_u=3.60$,曲率系数 $C_c=1.24$,颗粒的级配如图 1 所示。

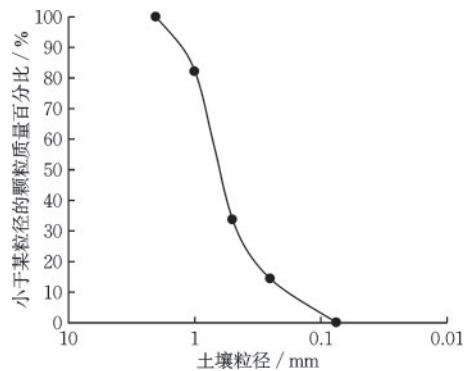


图1 标准砂颗粒级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve of standard sand

1.2 微生物

本研究选用巴氏芽孢杆菌(*Bacillus Pasteurii*,菌株编号为 ATCC 11859),该菌种能产生脲酶水解尿素,环境适应性强,对环境影响小。试验使用去离子水配制液体培养基进行培养。培养细菌的液体培养基各成分及用量见表 1。微生物处理后的平均脲酶活性为 $8\pm 0.5\text{ mmol}/\text{L urea hydrolysed}/\text{min}$, $\text{OD}_{600}=1.3\pm 0.2$ 。

表1 液体培养基成分

Table 1 Composition of liquid culture medium

液体培养基成分	摩尔质量/ (g·mol ⁻¹)	用量/ (g·L ⁻¹)
酵母提取物(Yeast Extract)	—	20.00
氯化铵(NH ₄ Cl)	53.49	10.00
一水合硫酸锰(MnSO ₄ ·H ₂ O)	169.01	0.01
氢氧化钠	40.00	1.60

1.3 外加剂-羧甲基纤维素钠

羧甲基纤维素钠(CMC-Na,黏度=1 500~3 000 (mPa·s), $D_s=0.8\sim 1.2$),化学分子式为 $[C_6H_7O_2(OH)_2OCH_2COONa]_n$,是一种由天然纤维素经化学改性得到的水溶性阴离子多糖,通常以白色至淡黄色

粉末存在,具有优异的亲水性、增稠性及成膜性^[29]。CMC-Na由天然纤维素(如木浆、棉短绒)化学改性制得,可在自然环境中被微生物降解为二氧化碳和水^[31],对环境友好。其分子结构中的羧酸钠基团赋予其良好的水溶性和离子敏感性,而纤维素主链则提供结构稳定性,能与多价金属离子形成凝胶^[32-33]。

1.4 胶结液

本试验设计1个空白对照组和6个不同CMC-Na掺量的处理组。已有研究发现,胶结液浓度对碳酸钙产量和均匀性有显著影响^[34-35],因此本试验所有组别使用相同摩尔浓度的胶结液,胶结液中尿素与钙离子浓度均为0.5 mol/L,CMC-Na预先溶解于胶结液中。具体各组胶结液成分见表2。

表2 各组别胶结液成分

Table 2 Composition of cementation solutions of each group

组别	尿素/mol	氯化钙/mol	每轮胶结液中外加剂掺量/g	灌注轮次	总掺量与干土质量百分比/%
空白对照组	0.5	0.5	0	5	0
0.1% CMC-Na	0.5	0.5	1	5	1.61
0.2% CMC-Na	0.5	0.5	2	5	3.23
0.3% CMC-Na	0.5	0.5	3	5	4.84
0.4% CMC-Na	0.5	0.5	4	5	6.45
0.6% CMC-Na	0.5	0.5	6	5	9.68
0.8% CMC-Na	0.5	0.5	8	5	12.91

注:表中各成分用量为配置1 L胶结液所需量;0.1% CMC-Na指每轮灌注的胶结液中掺加CMC-Na的质量与胶结液的质量比为0.1%。为方便文中表达,文中“掺量”均指的是每轮胶结液中外加剂掺量

1.5 试验模具

试验模具采用带底座的双瓣膜式有机玻璃,底座上设有排水孔,如图2所示。模具内径为5 cm,全高为13 cm,砂样高10 cm。制作砂柱首先将石英砂用去离子水冲洗后烘干,之后装填砂样并压实,砂样总质量为310 g。

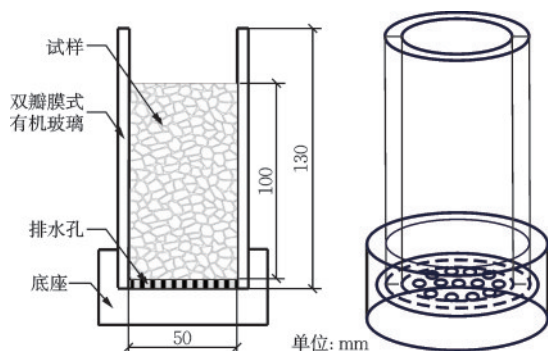


图2 砂柱试验模具结构

Fig.2 Structure of sand column test mold

2 试验方法

2.1 溶液试验

为初步分析CMC-Na对MICP反应的影响,在烧杯中进行溶液试验。本试验设置1个空白对照组与6个不同CMC-Na掺量的外加剂组,选取CMC-Na掺量分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.6%与0.8%,胶结液中尿素与氯化钙的摩尔浓度均为0.5 mol/L。

试验中以细菌液:胶结液体积比为1:10的比例设计水溶液试验,将10 mL菌液分别与100 mL不同外加剂掺量组的胶结液直接混合,混合后溶液中初始钙离子含量为50 mmol,期间采用《水质钙的测定EDTA滴定法》(GB 7476-87)^[36],测定钙离子浓度。反应结束后,滤洗、烘干烧杯中的产物,并称量其与烧杯质量 m_2 ,减去空烧杯质量 m_1 即为生成物总质量。

2.2 不同外加剂掺量下胶结液的性质

CMC-Na 溶解于水溶液中膨胀扩散导致溶液黏度增加,改变胶结液的流动性及在砂柱中的留存率^[37]。因此,对不同 CMC-Na 掺量下胶结液在砂柱中的留存率进行测试。

将干砂装入模具完成制样后,不灌注菌液,直接将 70 mL(约一倍孔隙体积)胶结液灌入砂柱,静置 1 h 等待胶结液完全流出后,收集并测量流出液体积,用灌入胶结液的总体积减去砂柱底部流出液体积,得到胶结液在砂柱中的留存量,并记胶结液留存量与初始灌注量的百分比为留存率。

2.3 注浆试验

砂样制备后进行 5 轮 MICP 注浆:先灌注 70 mL(1 倍孔隙体积)0.05 mol/L 氯化钙溶液(提升细菌吸附率^[41]),再灌注 70 mL 菌液并静置 6 h;随后每 12 h 滴灌 1 轮 70 mL 胶结液(微流泵滴灌,速度 6 mL/min),共 5 轮。

2.4 流出液钙离子浓度

在 MICP 注浆试验进行的同时,收集从砂样底部流出的胶结液,并通过 EDTA 滴定法测定流出液的钙离子浓度,分析胶结液的利用程度。

2.5 生成物含量

注浆试验结束后,用去离子水冲洗砂柱以去除可溶性物质,随后于 60 °C 下烘干至恒重。生成物含量通过计算烘干后砂柱质量增量与初始质量(310 g)的百分比确定。

2.6 无侧限抗压强度试验

称量每个砂柱质量后,对其进行无侧限抗压强度的测试。试样的高度为 10 cm,直径为 5 cm。测试仪器为 TKA-WXY-5 型全自动无侧限压力仪,其最高压力为 50 kN,仪器采用应变控制模式,加荷时应变速率设定为 1 mm/min。

2.7 砂柱渗透系数

对完成注浆试验后的砂样,用去离子水冲洗过后,采用常水头法,试验参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[38],测量各组砂柱的渗透系数。

2.8 碳酸钙的纵向分布

加固后的砂样经过无侧限抗压强度试验后,将砂样沿长度方向平均划分为上、中、下三个部位,自上而下从每个部位随机取共 5 g 左右的小块,称量其质量并记为 m_3 。然后将 5 g 样品浸泡于足量稀盐酸充分溶解,用去离子水稀释溶液至固定体积,再通过 EDTA 滴定法测定其钙离子浓度,计算出该小块所含碳酸钙的质量 m_4 ,则该部位碳酸钙的生成量为 m_4 与 m_3 的百分比,进而可以得到砂柱在不同位置处的碳酸钙分布情况。

2.9 微观试验

为探究 MICP 联合 CMC-Na 加固砂柱的强度变化规律,利用压汞试验(MIP)检测加固烘干后砂样的孔隙分布。之后进行 SEM 与 XRD 试验,分析参加 CMC-Na 对 MICP 生成物形态的影响。

3 试验结果与分析

3.1 溶液试验及分析

在烧杯中进行溶液试验,反应 12 h 后,如图 3 所示,空白对照组(图 3(a))溶液呈现上部清澈,底部有絮状物的分层状态。CMC-Na 掺量为 0.3% 试验组(图 3(b))溶液呈白色半透明状,底部有少量沉积物,但分层情况较空白组明显减轻,掺量为 0.6% (图 3(c))时,溶液更浑浊且生成物分布均匀,底部无沉积物,呈现稳定的悬浊状态。

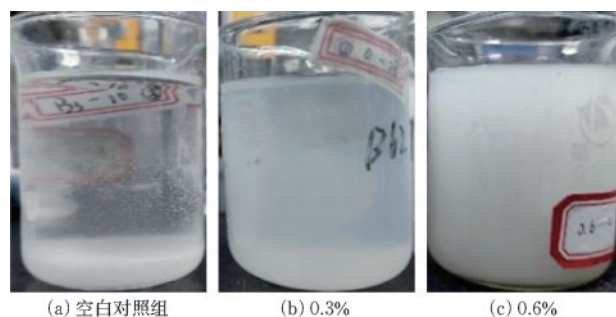


图 3 12 h 后不同 CMC-Na 掺量下各组烧杯中生成物状态
Fig.3 State of products in beakers with different CMC-Na contents after 12 h

水溶液试验中反应消耗的钙离子量随时间变化曲线如图 4 所示。未掺加 CMC-Na 的空白对照组,经过 168 h 的反应后仅消耗 21 mmol 钙离子,而 0.1%~0.3% CMC-Na 掺量下的试验组最终钙离子

消耗量相近,约为 31 mmol,约为空白对照组的 1.5 倍;0.4%~0.6% CMC-Na 掺量下,钙离子消耗量进一步增加,但增长幅度有所减少;0.8% 掺量钙离子最终消耗量为 47 mmol。总体规律表现为,在细菌活性、数量相同且充分反应时,随着 CMC-Na 掺量的增加,溶液中最终的钙离子消耗量随之增加,但增长幅度逐渐减缓。

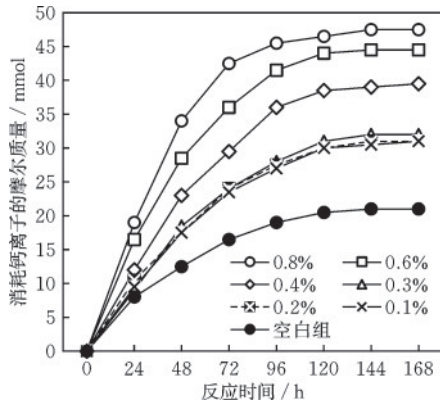


图4 各组溶液中的钙离子消耗量

Fig.4 Calcium ion consumption in solutions of each group

3.2 不同外加剂掺量下的胶结液性质

由于 CMC-Na 本身的特性使得溶于胶结液中使胶结液黏度增加,因此为了验证胶结液黏度的增加是否能提高其在砂柱中的留存率,分别测试各组胶结液的黏度与其在砂柱中的留存率,并将黏度与留存率的关系曲线绘制于图 5。

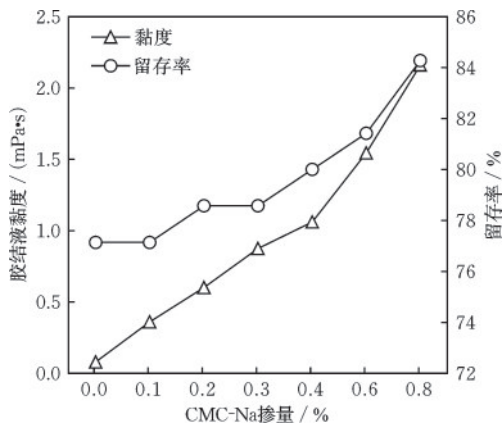


图5 不同 CMC-Na 掺量下砂柱中胶结液留存率

Fig.5 Retention rates of cementing solutions in sand columns with different CMC-Na contents

从图 5 可以看出,CMC-Na 掺量逐渐增高时,胶结液黏度的增加,砂柱中胶结液的留存量也逐渐增加。在 CMC-Na 掺量较低时,掺量增加对溶液黏度

的提升并不明显,从 0% 增加到 0.3% 时,胶结液的黏度仅从 1.2 (mPa·s) 增加到 7.5 (mPa·s),提升了约 5 倍,其在砂柱中的留存率增加了 1.4%;当 CMC-Na 掺量增加到 0.4% 及以上时,胶结液的黏度开始显著提升,其在砂柱中的留存率也随之增加,0.4%、0.6%、0.8% CMC-Na 掺量下对比空白对照组的胶结液,其在砂柱中的留存率分别提高了 2.9%、4.3% 和 7.1%。由后续试验结果可知,黏度增加可有效延缓胶结液下渗,促进更多钙离子参与 MICP 反应。后文与微观试验结合,进一步探讨不同 CMC-Na 掺量下碳酸钙沉淀的空间分布特征。

3.3 流出液钙离子浓度

进行注浆试验时,每轮灌注胶结液后收集流出液并测量钙离子浓度,每轮注浆之间的间隔为 12 h,得到数据如图 6 所示。

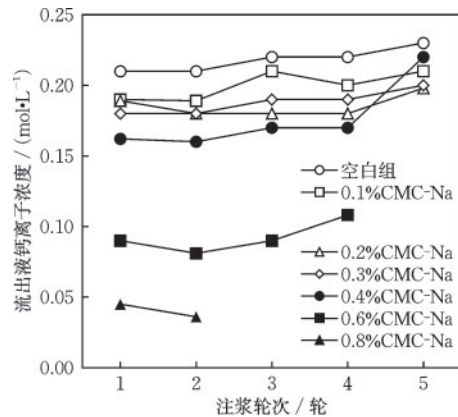


图6 不同 CMC-Na 掺量下流出液钙离子浓度的变化

Fig.6 Changes in calcium ion concentration in effluent with different CMC-Na contents

掺加 CMC-Na 后,各组流出液钙离子浓度整体低于空白对照组,反映了胶结液利用率的提高:空白对照组在 5 轮注浆过程中,流出液钙离子浓度稳定在 0.21~0.23 mol/L,未出现明显波动,反映出胶结液在砂柱中反应时间较短,钙离子未充分参与反应便随流出液排出;0.1%~0.4% CMC-Na 掺量组,流出液钙离子浓度维持在 0.16~0.22 mol/L,与空白组相比利用率分别提升了 6.5%、11.6%、10.6% 和 14.8%,说明掺加 CMC-Na 后能够增加胶结液黏度,减缓下渗速度,延长反应时间,从而提高胶结液的利用率。

当 CMC-Na 掺量为 0.6%~0.8%,虽前期流出液钙离子浓度较低(0.036~0.09 mol/L),但 0.8% 掺量组在第 3 轮注浆后便无法检测到流出液,0.6% 掺量

组在第5轮注浆时也停止下渗,结合后续砂柱试验,表明高掺量导致胶结液黏度过度增大,引发砂柱上部堵塞,后续胶结液无法向下渗透,反而影响整体加固效果。

3.4 砂柱渗透系数

图7展示了砂柱渗透系数与生成物含量的反比关系。5轮注浆后,空白对照组渗透系数为 1.89×10^{-3} cm/s(降幅50.6%);0.1%~0.3%掺量组渗透系数为 1.12×10^{-3} ~ 1.75×10^{-3} cm/s(降幅54.1%~70.6%);0.4%~0.6%掺量组下降约一个数量级(4.05×10^{-4} ~ 1.35×10^{-4} cm/s);0.8%掺量组因两轮后堵塞,渗透系数降至 1.71×10^{-5} cm/s(降幅约两个数量级)。

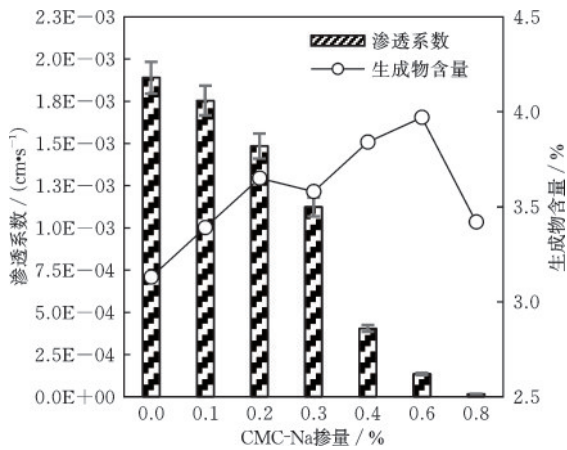


图7 不同CMC-Na掺量下的砂柱渗透系数

Fig.7 Permeability coefficients of sand columns with different CMC-Na contents

在CMC-Na掺量较低(0.1%)时,砂柱的渗透系数变化不大,因为需要更多的沉淀物来堵塞孔隙。但掺量增至0.4%及以上时,渗透系数显著降低,主要由于高掺量CMC-Na在注浆过程中在砂柱表面形成堵塞,尤其是第二轮注浆后。随着注浆轮数增加,堵塞加剧。虽然0.4% CMC-Na掺量的砂柱能完成所有注浆轮次,但堵塞导致碳酸钙在上部沉积更多,使得上部强度和防渗性优于下部,这种不均匀性在后续检测中得到证实。

3.5 无侧限抗压强度

对各组砂柱进行无侧限抗压强度试验,并将其在加载过程中直至断裂的轴线应力-应变曲线绘制于图8,可观察到空白对照组砂柱与外加剂组砂柱分别达到应力峰值时的轴向应变有明显差异。

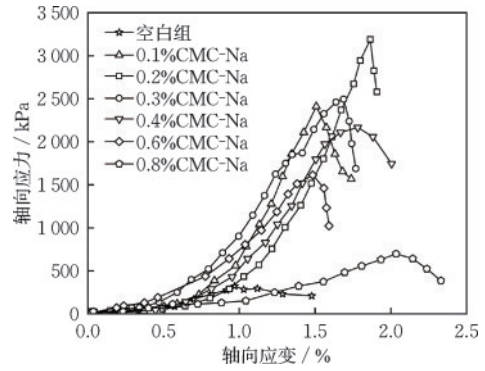


图8 不同CMC-Na掺量下的轴向应力-应变曲线

Fig.8 Axial stress-strain curves with different CMC-Na contents

试验结果表明,掺加CMC-Na后,砂柱受压时的轴向应变明显增加,在不发生脆性断裂前的最大轴向应变提升了约50%~100%不等,当CMC-Na掺量增加到0.2%,此时砂柱的无侧限抗压强度最高,其轴向应力峰值及其对应的轴向应变分别为3157.5 kPa和1.86%。之后随着CMC-Na掺量的进一步增加,砂柱的轴向应力峰值逐渐减小至683.5 kPa。0.8% CMC-Na组砂柱虽因胶结液堵塞仅完成2轮加固,但其应力峰值仍大于经5轮加固的空白对照组砂柱,应力峰值处对应的轴向应变为2.04%,是空白对照组0.98%的两倍多。

将不同组别砂柱的无侧限抗压强度与生成物含量一同绘制于图9,CMC-Na的掺加显著提升了砂柱的强度和生成物含量。在加固5轮后,空白对照组砂柱的强度仅为292.7 kPa,而0.1%掺量时砂柱的强度达到了2394.6 kPa,提升7.2倍,0.2%掺量时强度最高,为3157.5 kPa,提升9.8倍。但掺量继续增加会导致强度下降。随着外加剂掺量的提升,砂柱中的生成物含量呈上升趋势。结合注浆过程

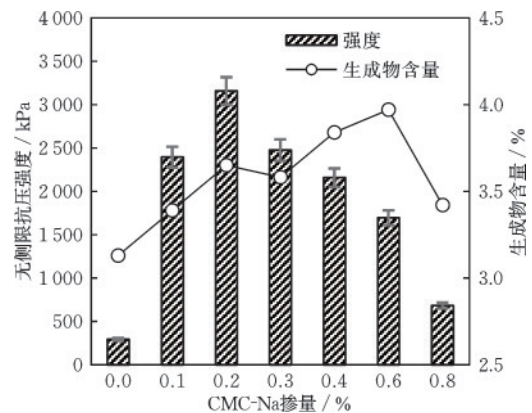


图9 不同CMC-Na掺量下的无侧限抗压强度

Fig.9 Unconfined compressive strength with different CMC-Na contents

中胶结液的下渗情况,当CMC-Na的掺量为0.4%及以上时,在第二轮胶结液灌注时会在砂柱表面发生明显堵塞,这种堵塞会导致碳酸钙更多地在砂样上部沉积,导致砂样上部的强度与渗透系数均小于下部,整体砂柱的受力情况不均匀,导致高掺量时强度降低,这在后续均匀性检测中得到了证实。

如图10所示,砂柱的破坏模式可归类为三种类型:上部破坏,整体劈裂,下部崩裂。其中空白对照组砂柱主要在上部发生破坏,且破坏断面处砂粒呈松散状剥落;0.2% CMC-Na组砂柱整体表现更好,其表现出纵向劈裂式的破坏特征,且破坏后断面处的砂粒仍然保持着较好的胶结,没有出现大面积剥落;当CMC-Na的掺量达到0.4%、0.6%时,砂柱的下部首先发生崩裂,且CMC-Na掺量为0.6%的砂柱下部破坏时砂粒更加松散。随着CMC-Na掺量的增加,胶结液的黏度也逐渐增加,其在砂柱中的下渗速度逐渐减缓,这虽然有利于提高胶结液生成物含量,但也会引起堵塞和不均匀加固等问题。结合无侧限抗压强度及砂柱的破坏模式方面来看,CMC-Na的最优掺量为0.2%。

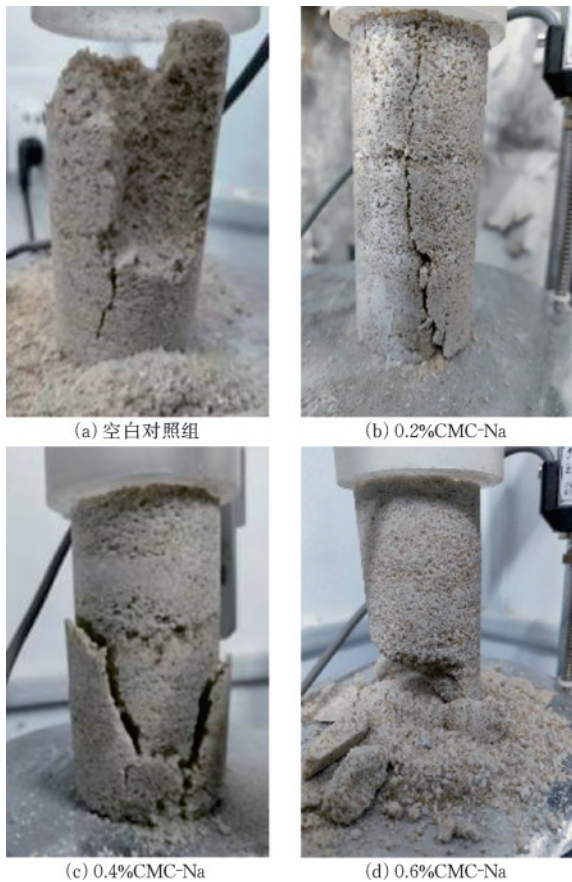


图10 砂柱破坏模式

Fig.10 Failure modes of sand columns

3.6 碳酸钙的纵向分布

将加固好的砂柱平均分为上、中、下三个部分,并计算其碳酸钙含量,得到不同组别砂柱的碳酸钙分布如图11所示。

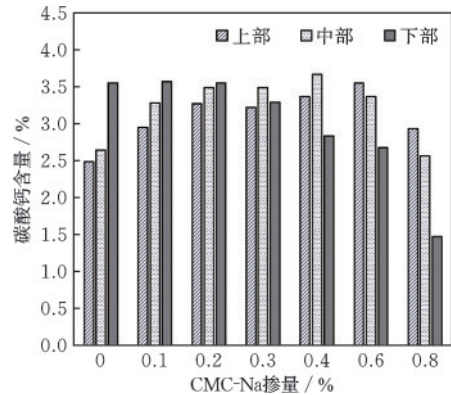


图11 不同CMC-Na掺量下砂柱的碳酸钙分布

Fig.11 Calcium carbonate distribution of sand columns with different CMC-Na contents

未参加CMC-Na的空白对照组,碳酸钙主要在下部生成,含量为3.5%,在上部和中部的含量较低,含量分别为2.48%和2.64%,这是由于当灌浆速度过快、砂柱孔隙较大时,生成的游离碳酸钙被冲刷到砂柱底部才得以沉积。掺加0.1%的CMC-Na后,砂柱上部和中部的碳酸钙含量明显提升,上升为2.95%和3.28%,而砂柱下部的碳酸钙含量几乎没有改变,含量为3.57%,总碳酸钙生成量增加。随着CMC-Na掺量增加,砂柱上部和中部的碳酸钙含量逐渐增加,而下部的碳酸钙含量逐渐减少。

当CMC-Na掺量从0.1%增加到0.3%时,上部的碳酸钙含量从2.95%增加到3.22%,中部从3.28%增加到3.49%,下部从3.57%降至3.29%;当CMC-Na掺量为0.4%开始时,其下部的碳酸钙含量发生了较大幅度的下降,这是因为随着胶结液中CMC-Na掺量的增加,胶结液黏度增大,下渗速度减慢,反应时间增加,使得更多钙离子在砂柱的中上部反应,从而导致生成的碳酸钙更多地在砂柱的中上部发生沉积,其中0.6% CMC-Na组砂柱在第五轮注浆时几乎无法下渗。而CMC-Na掺量为0.8%时,碳酸钙含量减少是由于在第二轮注浆时胶结液发生了严重堵塞,导致大量碳酸钙在砂柱的中上部沉积,因此砂柱虽然渗透系数极小,却不具有很高的强度。

结合砂柱强度、胶结液利用率和加固均匀性等方面综合分析,胶结液在砂柱中的利用率与钙离子

消耗量反映胶结液在砂柱中的整体消耗比例,而强度不仅与利用率有关,还取决于碳酸钙在砂柱中的分布。CMC-Na 掺量大于 0.2%,胶结液利用率逐渐提高,但强度反而降低,这是因为 CMC-Na 在胶结液中的浓度增加,胶结液黏度增大,下渗速度减慢,在砂柱中上部反应时间更长,胶结液利用率与钙离子消耗量在中上部增加,导致胶结液在砂柱下部供应不足;因此生成的碳酸钙更多集中在砂柱中上部区域(图 11),形成局部致密层,而下部碳酸钙含量仅约为中上部的 50%~70%。这种不均匀分布在砂柱受力时,下部因强度不足难以承载荷载(图 10(c))。反观 0.2% CMC-Na 掺量组,碳酸钙在纵向上分布均匀性高于 0.3%~0.8% CMC-Na 组,尽管利用率较低,但生成的碳酸钙在砂柱中形成更加均匀有效的胶结,相较于其他组具有更高的力学强度。因此,当 MICP 联合 CMC-Na 加固砂柱时,CMC-Na 的最优掺量确定为 0.2%。

3.7 外加剂对于 MICP 加固效果的提升

为进一步分析 CMC-Na 对 MICP 加固周期的改善,设计试验组与空白对照组进行对比。依据上述试验结果,试验组 CMC-Na 掺量为 0.2% 的胶结液,注浆试验材料、设备与步骤仍上述试验步骤相同,仅灌注一轮菌液,之后重复多次灌注胶结液,至 10 轮左右停止,研究注浆次数与无侧限抗压强度增长规律。

将试验组和空白对照组的数组整理如图 12 所示。空白对照组的砂柱经过 3 轮加固后砂柱开始成形,并具有 80.0 kPa 的强度,在 11 轮加固后砂柱强度达到了 977.0 kPa。观察试验组砂柱,在第 1 轮加固后就得以成形,并具有 231.2 kPa 的强度,3 轮后其强度达到了 1 139.3kPa,是同轮次下空白组的

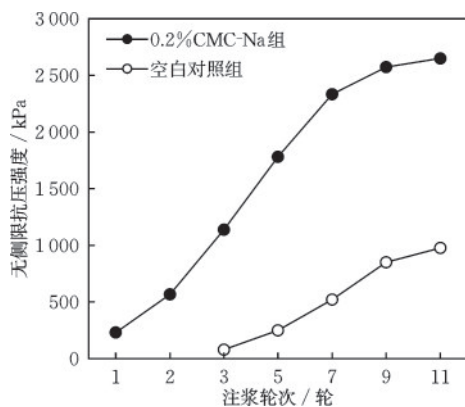


图 12 砂柱强度增长曲线

Fig.12 Strength growth curves of sand columns

14 倍,一直到第 7 轮加固时其强度增长较快,达到了 2 333.4 kPa,第 11 轮时强度为 2 650.3 kPa。为进一步分析 CMC-Na 对 MICP 的改善效果,接下来分别从 SEM、XRD 和 MIP 测试观察其微观形态与结构,解释微观机理。

3.8 生成物微观形态分析结果

根据上述试验结果,本试验选择空白对照组砂柱与 0.2% 掺量 CMC-Na 组砂柱,从砂柱中部取约 2 g 试样,分别对其进行压汞试验,编号见表 3。砂柱压汞试验的孔径分布如图 13 所示,选取孔径为 10 μm 及以上的大孔隙为主要研究对象。掺加 0.2% CMC-Na 相比空白对照组,其孔径分布曲线向下偏移,即孔径不变时孔隙体积不断减小,砂样孔隙中的碳酸钙多,孔隙逐渐被填充、压缩。虽然 B、C 两组的表观密度相近,但 C 组的最可几孔径(一定范围内出现几率最高的孔径)均小于 B 组,最可几孔径从 B 组的 198 μm 和 223 μm 到 C 组的 179 μm,降幅为 20%~40%。因此,胶结液中掺加 CMC-Na 可有效地降低砂样中最发达孔径的大小,在相同加固轮次下其对孔隙的填充效果更好。结合后续电镜等微观试验可知,MICP 生成物的结晶形态与分布情况导致了这样的孔隙变化,且宏观上有利于增强加固效果。

表 3 进行压汞试验的试样及其基本参数

Tab.3 Samples for mercury intrusion porosimetry tests and their basic parameters

编号	表观密度 / (g·cm ⁻³)	生成物含量 / %	强度 / kPa	最可几孔径 / μm
B-0-5	2.507	3.8	250.4	198
C-0.2-5	2.535	4.3	1 782.2	179

注: B-0-5 指不参加任何外加剂,经 5 轮加固后的试样; C-0.2-5 指 CMC-Na 掺量为 0.2%,经 5 轮加固后的试样

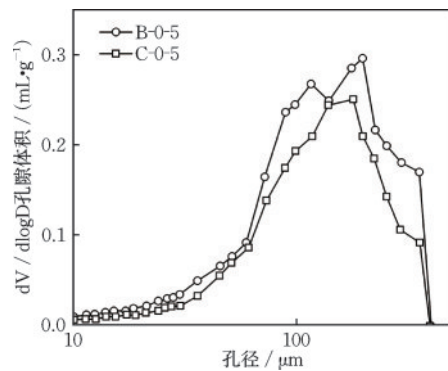


图 13 压汞试验结果

Fig.13 MIP test results

图 14 为砂样的 XRD 衍射图谱,经过对比可发现,图 14(a)空白对照组的碳酸钙晶型主要为方解石。图 14(b)0.2% CMC-Na 组砂样碳酸钙的晶型主要为球霏石,代表方解石的峰值显著降低,且出现了少量的文石。

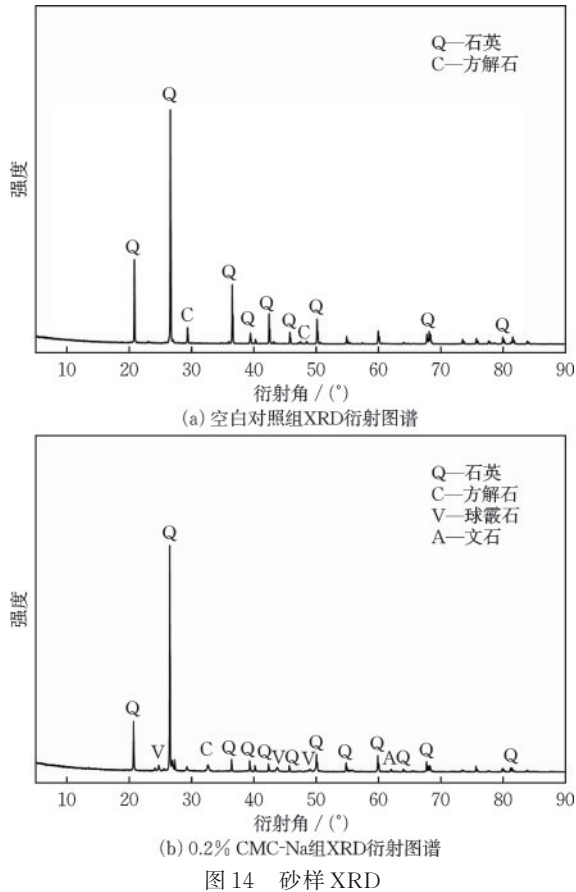


图 14 XRD patterns of sand samples

SEM 图像可观察由空白对照组到 0.1% CMC-Na 组,最后至 0.2% CMC-Na 组碳酸钙晶型变化的过程,三者砂粒表面都包裹着碳酸钙晶型,结合上述 XRD 试验结果,空白对照组的碳酸钙晶型为方解石(图 15(a)、(b)),形成了相互嵌套状态的方解石晶体,新生成的方解石会覆盖或者叠加在原来的方解石上,最终形成团状结晶,覆盖砂粒程度小。当 CMC-Na 掺量升高至 0.1% 后,碳酸钙的形态便发生了变化,由方解石为主转为球形球霏石为主,同时可以观察到纺锤状碳酸钙结晶(图 15(c)、(d)),放大后发现,这种纺锤状的碳酸钙结晶覆盖于方解石之上形成。0.2% CMC-Na 组碳酸钙晶型为球霏石(图 15(e)、(f)),多呈球形,平均尺寸在 20 μm 左右。这与 X. Wang 等^[35]用聚合物改性 MICP 所得到的结

果一致。生成的球霏石在砂粒表面分布比较均匀,覆盖范围较广。A. A. L. Qabany 等^[39]表明,较为均匀的碳酸钙沉淀更有益于 MICP 加固,原因在于均匀的碳酸钙能以更紧密的形式填充砂粒间的孔隙,形成更有效的胶结。

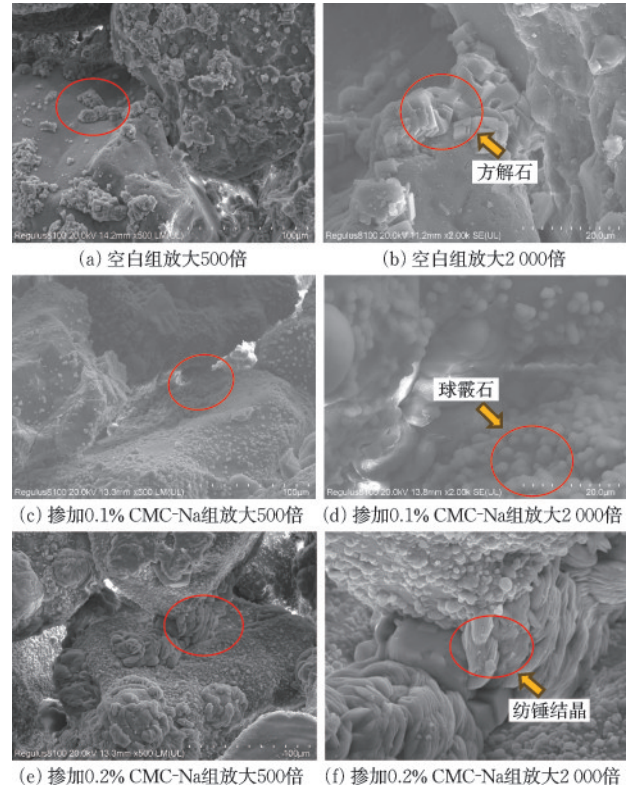


图 15 砂样 SEM 图像

Fig.15 SEM images of sand samples

根据安然等^[40]的研究,MICP 加固砂土作用机制示意如图 16(a)所示,细菌代谢产生的脲酶水解尿素产生碳酸根离子,并与钙离子结合生成碳酸钙沉淀,其晶型主要是方解石,已生成的碳酸钙会成为新生成碳酸钙的成核位点,最终形成的碳酸钙尺寸较大、分布分散。而加入 CMC-Na 后,CMC-Na 均匀地溶解于胶结液中,聚合物中的羧基官能团与钙离子螯合^[22]并形成钙离子富集如图 16(b)所示,为碳酸钙结晶提供额外且丰富的成核位点^[41],因此碳酸钙能够在砂柱中大量结晶并均匀地吸附、沉降于砂粒表面,进而促进碳酸钙沉淀,其原理如式(1)~(4)所示(COO⁻表示其含羧基官能团部分,R 代表羧甲基纤维素钠其余部分),同时富集作用使得反应离子浓度升高^[42],而高 Ca²⁺/CO₃²⁻ 浓度能够促成不稳定碳酸钙晶型即球霏石的产生^[43]。因此,碳酸钙尺寸较小,在砂柱中分布均匀、紧密,能够在

颗粒之间的孔隙间形成更好的加固^[39],在宏观上呈现出更优的加固效果。

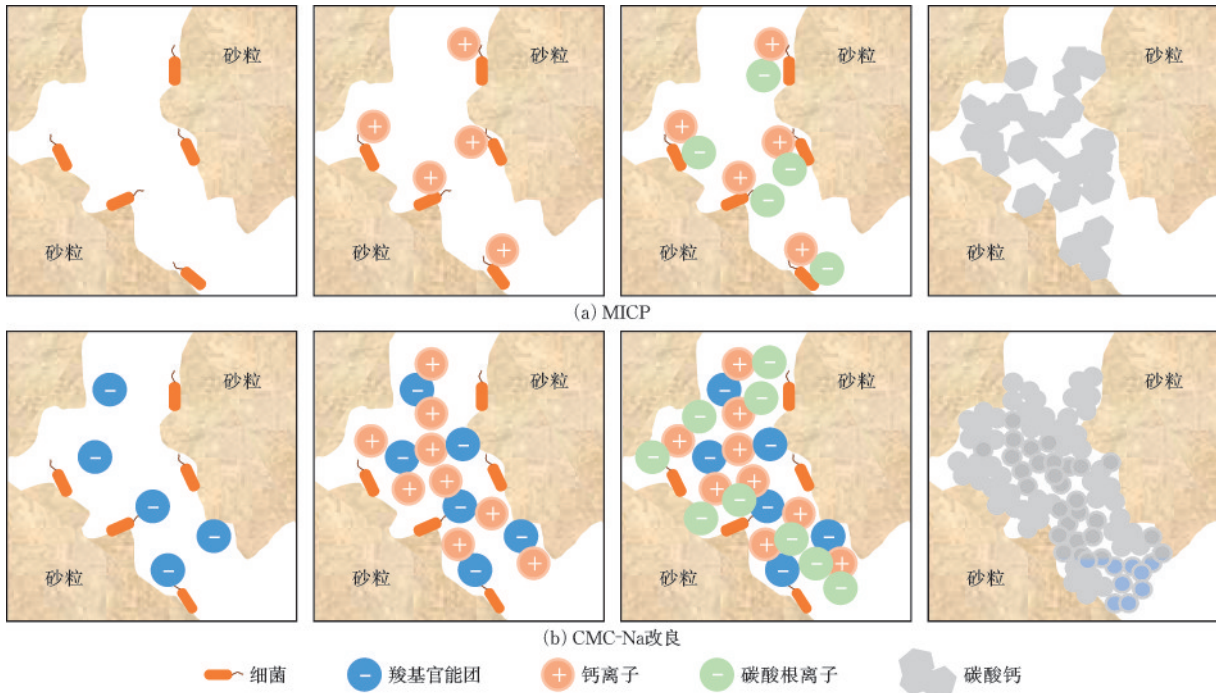
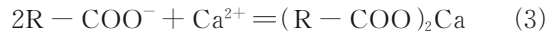
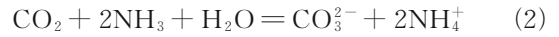
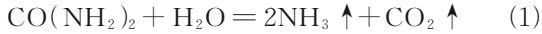


图 16 MICP 与 CMC-Na 改良 MICP 胶结砂土作用机制示意

Fig.16 Schematic diagram of mechanism of MICP and CMC-Na-modified MICP cemented sand

4 结 论

羧甲基纤维素钠(CMC-Na)作为外加剂,在微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)土体加固过程中显著提升了砂柱的整体力学性能,同时降低了渗透系数。研究表明,0.2%的最优掺量既能确保加固效果,又能避免因掺量过高而导致的不均匀性和强度下降。CMC-Na与MICP的协同作用是提高砂柱强度的关键因素。研究结论包括:

(1) 提高胶结液中 CMC-Na 掺量,能增加胶结液的黏度,适中的胶结液黏度能减缓胶结液的下渗速度,从而提高胶结液的利用率;同时,胶结液黏度的增加能提高碳酸钙生成量,但当掺量超过 0.4% 时,注浆时会出现严重堵塞从而影响砂柱的力学特性。

(2) 胶结液中加入 CMC-Na 能够提高砂柱的力学强度。当 CMC-Na 掺量为 0.2% 时,生成的碳酸钙在砂柱内纵向分布均匀,并且砂柱强度达到的峰值为 3 157.5 kPa,较空白对照组强度提升约 9.8 倍,

砂柱的渗透系数与加固前相比降低 61.2%,而空白对照组与加固前相比降低 50.6%。

(3) 由压汞试验发现,相比空白对照组,掺加 CMC-Na 后砂柱的孔隙体积更小。通过 X 射线衍射分析和扫描电镜试验发现掺加 CMC-Na 后,生成的碳酸钙晶型为球霏石,相比 MICP 产生的方解石,球霏石分布更均匀、致密,更易在颗粒接触面间起填充、胶结作用,因而宏观上的强度更高。

(4) 通过加固机理分析,CMC-Na 中的羧基官能团与钙离子螯合并形成钙离子富集,为碳酸钙结晶提供额外且丰富的成核位点,使得钙离子在一定区域内浓度升高,产生均匀致密的球霏石填充孔隙,增强砂柱的强度。

综上所述,CMC-Na 与 MICP 技术的联合应用为提高土体加固的效率和质量提供了一种新的方法。然而,精确控制 CMC-Na 的掺量是实现最佳加固效果的关键。未来的研究需要进一步探索 CMC-Na 的最优掺量以及其在不同土体条件下的应用效果,以优化加固工艺并提高工程应用的可行性。

参考文献:

- [1] Anbu P, Kang C H, Shin Y J, et al. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications[J].SpringerPlus, 2016, 5: 250.
- [2] 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.
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)
- [3] 裴迪,刘志明,胡碧茹,等.巴氏芽孢杆菌矿化作用机理及应用研究进展[J].生物化学与生物物理进展,2020, 47(6): 467-482.
Pei D, Liu Z M, Hu B R, et al. Progress on mineralization mechanism and application research of *Sporosarcina pasteurii* [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2020, 47(6): 467-482. (in Chinese)
- [4] Liu Z W, Beng J P, Wu Y, et al. Microbial induced calcite precipitation for improving low-cohesive soil: mechanisms, methods and macroscopic properties [J]. Low-carbon Materials and Green Construction, 2024, 2(1): 30.
- [5] 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 Z 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)
- [6] 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(增2): 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)
- [7] 何稼,吴敏,孟浩,等.生物固土用于防风固沙的研究进展[J].高校地质学报,2021, 27(6): 687-696.
He J, Wu M, Meng H, et al. Research progress of bio-cementation for sand stabilization and wind erosion control [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 687-696. (in Chinese)
- [8] 林文彬,程晓辉,由爽,等.微生物注浆加固沙漠风积砂试验研究[J].工程力学,2025, 42(12): 169-180.
Lin W B, Cheng X H, You S, et al. Experimental study on reinforcement of desert aeolian sand by MICP technology [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(12): 169-180. (in Chinese)
- [9] 刘士雨,俞缙,曾伟龙,等.微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究[J].岩石力学与工程学报,2020, 39(1): 191-204.
Liu S Y, Yu J, Zeng W L, et al. Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 191-204. (in Chinese)
- [10] 李驰,刘世慧,周团结,等.微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J].力学与实践,2017, 39(2): 165-171, 184.
Li C, Liu S H, Zhou T J, et al. The strength and porosity properties of micp-treated aeolian sandy soil [J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(2): 165-171, 184. (in Chinese)
- [11] 邵光辉,孔祥泰,陈海涛,等.微生物砂浆与岩石界面的剪切强度及胶结特性[J].岩土工程学报,2025, 47(6): 1142-1151.
Shao G H, Kong X T, Chen H T, et al. Shear strength and cementation characteristics of interface between microbial mortar and rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(6): 1142-1151. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 杜加明,毛佳玲,赵蒙,等. MICP 技术固化矿山边坡复绿基材的优化调控研究[J/OL]. 安全与环境工程, 1-12 [2025-04-21]. <https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20250077>.
Du J M, Mao J L, Zhao M, et al. Optimisation and regulation of MICP for consolidation of re-greening substrates on mine slopes [J]. Safety and Environmental Engineering, 1-12 [2025-04-21]. <https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20250077>. (in Chinese)
- [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] Dejong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeo-

- chemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(4): 287-301.
- [16] 程瑶佳,唐朝生,泮晓华,等. 微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 1010-1018.
Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Experimental study on erosion resistance improvement in loess through coupled microbial mineralization (MICP)-sand paving[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5): 1010-1018. (in Chinese)
- [17] 郑俊杰,宋杨,吴超传,等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 73-78.
Zheng J J, Song Y, Wu C C, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced MICP-treated sand [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2019, 47(12): 73-78. (in Chinese)
- [18] 彭萌,邓华锋,熊雨,等. 添加剂对微生物胶结砂渗流特性的影响研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 999-1009.
Peng M, Deng H F, Xiong Y, et al. Effect of chemical agents on seepage characteristics of microbial cemented sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5): 999-1009. (in Chinese)
- [19] 张宽,唐朝生,刘博,等. 基于新型单相MICP技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 306-316.
Zhang K, Tang C S, Liu B, et al. Mechanical behavior of clayey soil treated by new one-phase micp technique [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 306-316. (in Chinese)
- [20] Nawarathna T H K, Nakashima K, Kawasaki S. Chitosan enhances calcium carbonate precipitation and solidification mediated by bacteria [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 133: 867-874.
- [21] Wu L Y, Miao L C, Sun X H, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation combined with polyvinyl alcohol to solidify aeolian sand [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(12): 04021373.
- [22] Miyake M, Kim D, Hata T. Casein-assisted enhancement of the compressive strength of biocemented sand [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 12754.
- [23] Raval H, Jasani N, Srivastava A. Hydrophilic surface modification of TFC reverse osmosis membrane using blends of sodium carboxymethyl cellulose and chitosan [J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, 62(2): 218-230.
- [24] Guarnizo-Herrero V, Torrado-Salmerón C, Torres Pabón N S, et al. Study of different chitosan/sodium carboxymethyl cellulose proportions in the development of polyelectrolyte complexes for the sustained release of clarithromycin from matrix tablets [J]. *Polymers*, 2021, 13(16): 2813.
- [25] 杨世琦,邢磊,刘宏元,等. 羧甲基纤维素钠对黄土高原新造耕地土壤改良效果 [J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(4): 185-191.
Yang S Q, Xing L, Liu H Y, et al. Effects of sodium carboxymethyl cellulose application on soil properties of new cultivating farmland in Loess Plateau [J]. *Journal of China Agricultural University* 2021, 26(4): 185-191. (in Chinese)
- [26] 牛生洋,郝峰鸽. 羧甲基纤维素钠的应用进展 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(15): 3574-3575.
Niu S Y, Hao F G. Application progress in the carboxymethyl cellulose sodium [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(15): 3574-3575. (in Chinese)
- [27] 李熙,江世雄,陈垚,等. 羧甲基纤维素钠改良土强度影响因素研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(6): 55-60.
Li X, Jiang S X, Chen Y, et al. Strength influencing factors of sodium carboxymethyl cellulose modified soil [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2022, 20(6): 55-60. (in Chinese)
- [28] 马奇,马宏旺,杨朔,等. 羧甲基纤维素钠改性生土力学性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(12): 60-62, 83.
Ma Q, Ma H W, Yang S, et al. Study on mechanical properties of sodium CMC stabilized soil [J]. *New Building Materials*, 2016, 43(12): 60-62, 83. (in Chinese)
- [29] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固粉砂土水稳性及稳定机理分析 [J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(12): 107-112, 120.
Yang Q W, Pei X J, Huang R Q. Siltsand stabilized by modified carboxymethylcellulose: Water stability and mechanism of stabilization [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(12): 107-112, 120. (in Chinese)
- [30] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固土冻融性能及损伤机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增1): 3102-3113.
Yang Q W, Pei X J, Huang R Q. Study on freeze-thaw performance and damage mechanism of modified sodium carboxymethyl cellulose reinforced soil [J]. *Chinese*

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (Sup1): 3102-3113. (in Chinese)
- [31] Suryadi H, Sutriyo S S, Fauziah G. Characterization sodium carboxymethyl cellulose from alpha cellulose be-tung bamboo (*dendrocalamus asper*)[J]. Pharmacogno-sy Journal, 2019, 11(5): 894-900.
- [32] Uyanga K A, Iamphaojeen Y, Daoud W A. Effect of zinc ion concentration on crosslinking of carboxymethyl cellulose sodium-fumaric acid composite hydrogel [J]. Polymer, 2021, 225: 123788.
- [33] 邵丽娟. 羧甲基纤维素: 铜离子复合纤维的制备及抗菌性研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
Shao L J. Preparation of carboxymethyl cellulose-cop-per ions composite fiber and study on its antibacterial property [D]. Shanghai: Donghua University, 2016. (in Chinese)
- [34] Tao H, Sun C, Qu J, Huang Y. Study on the effect of cementation solution concentration on sand fixation by fiber reinforced MICP[J]. PLoS ONE, 2025, 20(8): e0329673.
- [35] Wang X, Tao J. Polymer-modified microbially induced carbonate precipitation for one-shot targeted and local-ized soil improvement[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14 (4): 657-671.
- [36] 水质钙的测定EDTA 滴定法:GB 7476—87[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [37] 温智力. 颗粒尺寸及黄原胶对 MICP 加固效果影响的试验研究[D]. 南京: 河海大学.
Wen Z L. Experimental study on the effect of particle size and xanthan gum on the reinforcement effect of MICP[D]. HohaiUniversity. (in Chinese).
- [38] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [39] Qabany A A L, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 331-339.
- [40] 安然, 邓成, 张先伟, 等. 黄原胶协同 MICP 加固珊瑚砂的力学特性和微观机制研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-12 [2025-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20240920.0943.002>.
An R, Deng C, Zhang X W, et al. Study on mechanical properties and microscopic mechanism of Xanthan gum enhanced microbial solidification of coral sand [J]. Ad-vanced Engineering Sciences, 1-12 [2025-09-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20240920.0943.002>. (in Chinese)
- [41] Greer H, Zhou W Z, Guo L. Reversed crystal growth of calcite in naturally occurring travertine crust[J]. Crystals, 2017, 7(2): 36.
- [42] Svenskaya Y, Fattah H, Inozemtseva O, et al. Key pa-rameters for size- and shape-controlled synthesis of vaterite particles[J]. Crystal Growth & Design, 2017, 18.
- [43] Trushina D, Bukreeva T, Kovalchuk M, et al. CaCO₃ vaterite microparticles for biomedical and personal care applications [J]. Materials science & engineering C, Materials for biological applications, 2014, 45: 644-658.

(本文编辑: 张艺)