

# 颗粒级配优化方式对砂土MICP固化效果的影响研究\*

郭博研<sup>1,2</sup>, 邓华锋<sup>1,2</sup>, 肖瑶<sup>1,2</sup>, 李焯芬<sup>1,2</sup>, 程雷<sup>1,2</sup>, 朱作祥<sup>1,2</sup>, 彭萌<sup>1,2</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 为了提升微生物诱导碳酸盐沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, 简称MICP)加固砂土的效果, 在以往研究的基础上, 对天然级配的标准砂分别进行了均匀设计和连续设计两种方案的颗粒级配优化。综合宏观物理力学试验和微观检测, 对比探究了不同颗粒级配优化方案下标准砂的MICP固化机理。结果表明:(1)与天然级配相比, 不同颗粒级配优化方案均能够不同程度地提升标准砂的密度, 降低试样的孔隙率并改善孔隙结构。均匀设计和连续设计方案的碳酸钙生成量分别提高了11.19%和24.95%, 渗透系数分别降低28.07%和38.07%, 固化后孔隙率降幅分别达9.23%和11.86%, 表明连续设计方案下试样整体密实性和抗渗性得到更大幅度的提升;(2)连续设计方案下破坏时应力和应变最大分别为3.15MPa和2.86%, 相比均匀设计分别提升了16.11%和15.32%, 表明连续设计方案能够更好的提升试样固化后的强度和抗变形能力;(3)2种级配优化方法均能使砂颗粒的不均匀系数增大、孔隙率减小。相比均匀设计方案, 连续设计方案下颗粒级配的不均匀程度更高、孔隙平均尺寸更大、孔隙结构更为合理, 保证了菌液及胶结液的有效入渗, 为碳酸钙的生成提供了更好的沉积、聚集环境, 因此对提升试样密实度、碳酸钙生成量、力学性能及抗渗性能等方面具有更好的效果。相关研究思路可为砂土地基加固提供参考。

**关键词:** 微生物诱导碳酸盐沉淀; 级配优化; 力学特性; 微观结构; 增强机制

**中图分类号:** TU44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(XXXX)XX-0001-12

## Influence of Particle Grading Optimization Methods on the MICP Improvement Effect of Sandy Soil

GUO Boyan<sup>1,2</sup>, DENG Huafeng<sup>1,2</sup>, XIAO Yao<sup>1,2</sup>, LI Zhuofen<sup>1,2</sup>, CHENG Lei<sup>1,2</sup>,  
ZHU Zuoxiang<sup>1,2</sup>, PENG Meng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To enhance the effect of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) in reinforcing sandy soil, this study optimizes the particle gradation of standard sand with natural gradation using both

\* **基金项目:** 国家自然科学基金项目(U22A20600, 42507231); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2025AFA015); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金项目(No. 2025KDZ06); 三峡大学人才科研启动基金项目(2024RCKJ021)资助

**作者简介:** 郭博研(1997-), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程方向的研究。E-mail: guoboyan2023@163.com

**通信作者:** 肖瑶(1992-), 女, 讲师, 博士。主要从事岩土工程、库区地质灾害治理等研究。E-mail: xiaoyao@ctgu.edu.cn

uniform design and continuous design schemes based on previous studies. The solidification mechanism of the MICP-treated sand under different particle gradation optimization schemes was evaluated by integrating macroscopic physical and mechanical tests and microscopic detection. The results showed that: (1) Both optimization schemes were able to increase the density of the standard sand, decrease the porosity of the specimens, and improve the pore structure to varying degrees. The calcium carbonate yield increased by 11.19% and 24.95% under the uniform design and continuous design schemes, respectively; the permeability coefficient decreased by 28.07% and 38.07%, respectively; and the porosity after solidification was reduced by 9.23% and 11.86%, respectively. The above results indicated that a more significant improvement in overall density and impermeability. (2) Under the continuous design, the maximum failure stress and strain reached 3.15 MPa and 2.86%, respectively. This result represented an improvement of 16.11% and 15.32% compared to the uniform design, respectively, indicating that the continuous design scheme more effectively enhanced the strength and deformation resistance. (3) Both schemes could increase the coefficient of nonuniformity and reduce the porosity of standard sand. Compared to the uniform design, the continuous design resulted in a higher degree of the coefficient of nonuniformity, a larger average pore size and a more reasonable pore structure. The structure ensured the infiltration of bacterial and cementation solutions, provided a better environment for calcium carbonate deposition, and had better effects on improving the density, calcium carbonate production, mechanical performances and impermeability. The related research approach can provide a reference for the reinforcement of sandy soil foundations.

**Keywords:** MICP; gradation optimization; mechanical property; microstructure; enhancement mechanism

## 0 引言

为满足工程安全和经济要求,一般需要对砂土地基进行改良,以解决其不均匀沉降、渗透性过大、承载力不足或液化风险等不良工程特性。传统地基处理方法主要有排水固结法、挤密法、换填法、桩基法、强夯法、灌浆法等<sup>[1]</sup>,这些方法虽能提升承载力、改善沉降,但是面临工期长、能耗大、适用性受限以及影响生态环境等方面的问题<sup>[2]</sup>。为响应国家“3060”双碳战略目标,新型低能耗、绿色无污染的地基处理技术亟待研究应用。

近年来,微生物诱导碳酸盐沉淀技术又称MICP技术在岩土工程领域展现出巨大优势,该技术利用特定微生物的代谢活动分泌脲酶、分解尿素,进而在提供钙离子的前提下生成具有胶结作用的碳酸钙沉积<sup>[3]</sup>,以此改善待改良对象的物理力学性能,在砂土地基固化、污染土治理、混凝土裂缝及裂隙岩体修复等方向具有广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。

目前,已有研究表明,MICP技术能够有效提升砂土的强度、刚度、抗渗性等特性<sup>[6-7]</sup>,为进一步提

升MICP加固后砂土的物理力学性能,相关学者从多方面、多维度开展了试验研究,主要分为外部因素和内部因素两个方面。在外因方面主要有尿素浓度、钙源种类、胶结液配比、温度调控、pH调节等,典型的如,余清鹏等<sup>[8]</sup>研究发现改变尿素浓度可以将砂土的渗透系数降至 $9.5 \times 10^{-5}$  cm/s,显著提升抗渗性能;曾庆杰等<sup>[9]</sup>发现将乙酸钙作为钙源可以改善碳酸钙晶体的分布,从而提高水泥土的强度和韧性;Zheng<sup>[10]</sup>、Chen<sup>[11]</sup>等通过对比研究发现,当氯化钙和尿素等体积混合溶液浓度为1 mol/L时,碳酸钙的沉淀率可达18%,试样的抗剪与抗压强度增强效果显著;彭劫等<sup>[12]</sup>研究在10℃~25℃范围内,温度升高对固化体抗渗性能、抗压强度以及碳酸钙生成等方面有正向促进作用;Wang等<sup>[13]</sup>研究发现,将pH控制在7.5时,碳酸钙晶体较大且呈片状,能够在颗粒之间形成有效的桥接,固化后的抗压强度最大;在内因方面主要有提高菌种的生存繁殖能力、脲酶活性或提升加固对象本身密实性等,Hu等<sup>[14]</sup>在培养基中加入3%柠檬酸钠,有效延长了细菌的存活时间,提高了后期菌液浓度;张建伟等<sup>[15]</sup>采用紫外诱变技术改良产脲酶菌株,发现对比未改良菌株

脲酶活性提高了30%~45%，且在连续传代10次后仍能维持高产脲酶的能力；肖瑶等<sup>[16]</sup>引入表面活性剂 Triton X-100，通过增强细胞膜通透性，将胞内脲酶释放至胞外并促进尿素进入细胞，大幅提高了脲酶活性；此外，Mortensen<sup>[17]</sup>、梁仕华<sup>[18]</sup>等发现通过人为筛分去掉大于2mm的砂土颗粒且级配良好的试样，可提供更多碳酸钙沉积位点，碳酸钙生成效率更高，加固效果更优异；在此基础上，靳贵晓等<sup>[19]</sup>证实全级配的土颗粒密实度大级配良好，固化后在碳酸钙生成量和无侧限抗压强度方面有显著提升；兰凤<sup>[20]</sup>通过均匀设计配比得到15组密度较大的砂颗粒，对比发现固化后砂浆的抗压强度最大提升了29.9%，渗透系数降低9.5%；劳国峰等<sup>[21]</sup>发现连续设计显著强化了土体的承载骨架结构，抗剪强度随不均匀系数呈现出近似幂函数的正相关关系。目前研究成果表明，外因和内因两方面均能有效地提升砂土的加固效果，特别是良好的颗粒级配对MICP加固效果提升显著。

然而已有研究大多通过人为设定或采用单一方案制定不同粒径的含量配比，较少系统开展多种级配方案下MICP固化效果的对比研究。基于此，本文根据天然砂土颗粒存在级配不良、粒径分布不合理导致固化效果差的问题，将均匀设计与连续设计的思想应用于MICP砂土固化，通过调控不同粒径范围内砂颗粒的配比，从而提升其级配连续性与密实度，达到颗粒级配优化的目的。并在此基础上进行MICP加固，分析不同优化方案对砂土固化体的物理力学性能以及微观结构形态的差异，探究对微生物固化砂土效果的影响，进而为MICP技术在天然砂土地基改良中的应用提供参考。

## 1 砂土颗粒级配优化方法

试验用砂为ISO厦门标准砂，密度为1.78g/cm<sup>3</sup>，初始孔隙率31.19%，根据颗粒筛分结果得到其天然级配曲线，如图1所示。筛分计算可知其不均匀系数Cu=10.90，曲率系数Cc=0.78，属级配不良砂。

### 1.1 颗粒级配优化均匀设计方案

均匀设计方法的核心原理是在试验范围内均匀布设少量试验点，以实现对各实验条件的均衡考察，用最少的试验次数挖掘更多的信息。相较正交

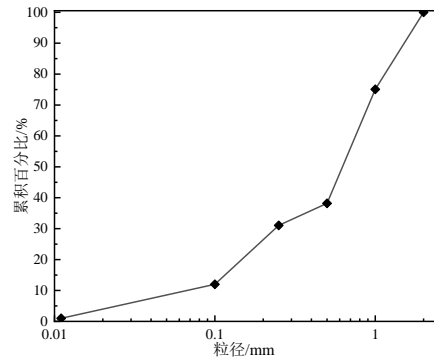


图1 ISO厦门标准砂级配曲线

Fig.1 Grading Curve of ISO Xiamen Standard Sand

设计其大幅降低了试验次数，可满足多因素多水平的试验需求<sup>[20]</sup>。据此，将天然级配的标准砂颗粒筛分为四种粒径，即0~0.25 mm、0.25~0.50 mm、0.50~1 mm和1~2 mm。为方便对比不同颗粒大小对碳酸钙生成量的影响，分别设计0~1mm和0~2mm两种粒径范围的优化方案。依据均匀设计调整优化每种粒径占比，并筛选出其中级配良好且密度高的一组进行后续MICP改良试验。具体步骤如下：

首先，参考方开泰等<sup>[22]</sup>对均匀设计算法定义的描述，令s=4(s代表试验因素)即为四种粒径(0~0.25 mm、0.25~0.50 mm、0.50~1 mm、1~2 mm)，根据s=4并结合均匀设计表确定当n=11(n代表试验次数)时试验均匀性最好；然后，根据给定的s与n，以向量的形式生成均匀设计表U<sub>n</sub>(n<sup>s</sup>)，其中q<sub>ki</sub>表示均匀设计表U<sub>n</sub>(n<sup>s</sup>)中的元素，X<sub>ki</sub>表示每组粒径占比。那么对于每个i，计算：

$$C_{ki} = \frac{2q_{ki} - 1}{2n}, k=1, \dots, n \quad (1)$$

$$X_{ki} = \left(1 - C_{ki}^{\frac{1}{i}}\right) \sum_{j=1}^{i-1} C_{kj}^{\frac{1}{i-j}}, i=1, \dots, n \quad (2)$$

当s=4, n=11时，每组粒径占比如下：

$$\begin{cases} X_{k1} = 1 - \sqrt[3]{C_{k1}} \\ X_{k2} = \left(1 - \sqrt{C_{k2}}\right) \sqrt[3]{C_{k1}} \\ X_{k3} = \left(1 - C_{k3}\right) \sqrt[3]{C_{k1}} \sqrt{C_{k2}} \\ X_{k4} = \sqrt[3]{C_{k1}} \sqrt{C_{k2}} C_{k3} \end{cases} \quad (3)$$

均匀设计表如表1所示。

通过调整4种粒径的占比，制备得到11种组合砂，并按照标准圆柱体试样尺寸(直径50mm、高度100mm)计算密度，绘制不同组合条件下密度的变化情况，结果如图2所示。同理，依据均匀设计原理

表 1 均匀设计表  $U_{11}(11^4)$

Table 1 Uniform design table  $U_{11}(11^4)$

分组编号	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1	9/22	13/22	21/22
2	19/22	3/22	19/22
3	5/22	17/22	17/22
4	15/22	7/22	15/22
5	1/22	21/22	13/22
6	1/2	1/2	1/2
7	21/22	1/22	9/22
8	7/22	15/22	7/22
9	17/22	5/22	5/22
10	3/22	19/22	3/22
11	13/22	9/22	1/22

得到 3 种粒径不同占比的组合砂,不同组合砂的密度如图 3 所示。4 种粒径和 3 种粒径组合下,密度最大分别为  $1.882\text{g}/\text{cm}^3$  和  $1.940\text{g}/\text{cm}^3$ ,分别命名为级配 A 组和 B 组,绘制 A 组、B 组级配曲线如图 4 所示。

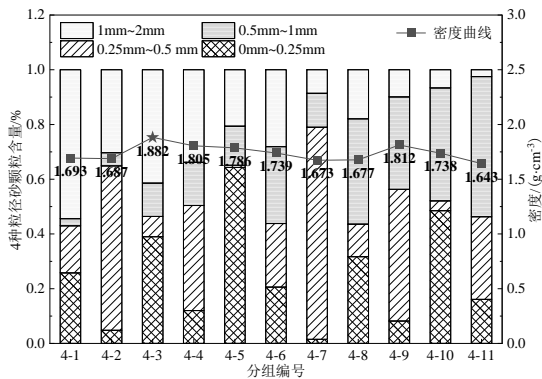


图 2 4 种不同粒径砂颗粒配比图

Fig.2 Gradationchart of four sand particle sizes

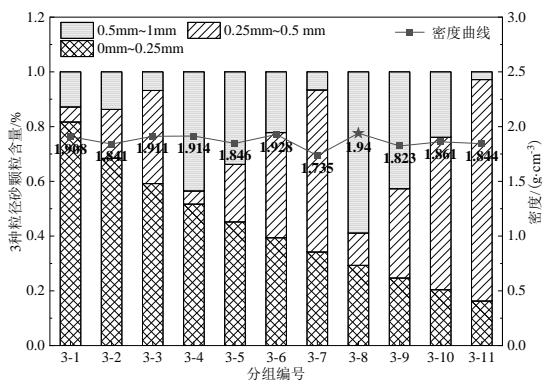


图 3 3 种不同粒径砂颗粒配比图

Fig.3 Gradationchart of threesand particle sizes

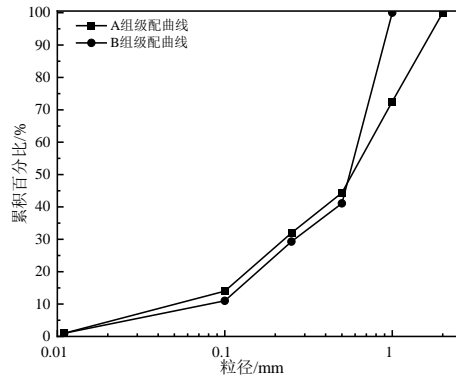


图 4 均匀设计方案不同粒径组合优化级配曲线

Fig.4 Optimized gradation curves for different particle size combinations in the uniform design scheme

### 1.2 颗粒级配优化连续设计方案

根据张克恭等<sup>[23]</sup>对  $C_u$ 、 $C_c$  的相关定义,  $C_u$  反映了不同尺寸粒径分布的均匀性,  $C_c$  衡量了级配曲线的平滑程度和连续性, 当满足  $C_u \geq 5$  且  $C_c = 1 \sim 3$  时, 级配良好。由前述可知, 天然级配标准砂颗粒的不均匀系数  $C_u = 10.90$ , 曲率系数  $C_c = 0.78$  (级配不良), 天然砂颗粒的曲率系数较小, 结合级配曲线发现粒径  $0.25 \sim 0.50\text{mm}$ 、 $1 \sim 2\text{mm}$  的砂颗粒占比较少, 砂颗粒整体连续性较差。因此, 本文基于连续设计的方式提升天然砂颗粒的连续性。

相比均匀设计, 连续设计颗粒级配曲线更加平滑连续, 颗粒大小搭配连续且合理, 且曲线形态越接近抛物线密实度越大。该方法最早由 W.B.Fuller 根据实验提出理想级配的抛物线表达式, A.N.Talbol 进一步将抛物线改成通式<sup>[24]</sup>, 也就是最常用的泰波公式, 如式 (4) 所示。

$$P_x = 100 \left[ \frac{d}{D} \right]^n \quad (4)$$

式中:  $P_x$  为某粒径  $d$  的通过百分率 (%);  $d$  为计算的某集料粒径 (mm);  $D$  为集料的最大粒径 (mm);  $n$  为泰波公式系数 (当  $n$  取 0.5 时, 即 Fuller 抛物线表达式)。

何兆益、曹建新等<sup>[25-26]</sup>通过研究连续级配碎石材料的最大干密度和 CBR 值, 发现当  $n$  取  $0.45 \sim 0.55$  时, 混合料具有较高干密度和较好的透水性; S. F. Brown<sup>[27]</sup>认为当  $n$  值稍大时集料粒径偏粗, 透水性更为良好。参考已有研究并考虑胶结液充分入渗, 本文取  $n = 0.55$ 。则基于连续级配优化方式的颗粒级配调整方式如下: 分别取 450g 标准砂, 一组增

加 50g 粒径为 0.25~0.50mm 砂颗粒,命名为级配 C 组;另一组各增加 25g 粒径为 0.25~0.50mm 和 1~2 mm 的砂颗粒,命名为级配 D 组。优化后颗粒级配曲线如图 5 所示。

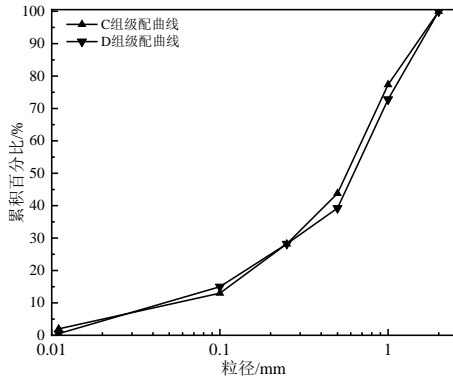


图 5 连续设计方案不同粒径组合优化级配曲线  
Fig.5 Optimized gradation curves for different particle size combinations in the continuous design scheme

此外,将天然级配的标准砂作为对照组 T 组,不同优化方案下各组颗粒级配参数见表 2。

表 2 不同优化方案下各组颗粒级配表  
Table 2 Particle gradation for different groups under various optimization schemes

优化方案分组	$C_u$	$C_c$	级配	固化前密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	固化前孔隙率/%	
均匀设计组	A	14.55	1.38	良好	1.88	27.16
连续设计组	B	7.81	1.36	良好	1.94	25.51
连续设计组	C	12.69	1.91	良好	1.82	29.33
	D	16.70	2.22	良好	1.87	28.58
对照组	T	10.90	0.78	不良	1.78	31.19

## 2 不同优化方案砂土 MICP 固化试验

本试验采用菌种为课题组自主提取的高产脲酶细菌<sup>[28]</sup>,即蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*),此菌种具备活性高以及矿化能力强等优点。扩大培养细菌的培养基配方包括:牛肉膏 3g/L、氯化钠 5g/L、蛋白胨 10g/L 以及尿素 60g/L。培养完成后,测得细菌吸光度( $OD_{600}$ )为 1.82,电导率为 1.56  $ms/cm \cdot min$ 。试验前分别用 0.1mol/L 的盐酸溶液和氢氧化钠溶液依次浸泡 12h,以清除砂颗粒表面附着

的污染物,随后使用去离子水进行多次洗涤并干燥后,参考以往研究经验<sup>[29]</sup>,加固方法采用浸泡法,这里不再赘述。加固完成的典型标准砂试样如图 6 所示。

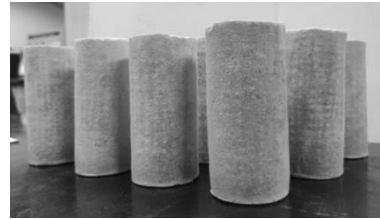


图 6 加固完成的典型标准砂试样  
Fig.6 Typical standard sand samples after reinforcement

## 3 不同级配优化方案固化效果研究

### 3.1 碳酸钙生成量

采用酸洗法测量试样固化后生成的碳酸钙沉淀:搅拌至无气泡产生直至碳酸钙溶解反应完全,将剩余砂颗粒充分水洗后置于 60°C 的烘箱烘干至恒重,比较溶解反应前、后样品的质量差,计算出不同优化方案下碳酸钙的生成量,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,级配优化后,各组试样中碳酸钙生成量均有不同程度的增加,均匀设计方案 A、B 组的碳酸钙生成量较 T 组分别增加 11.19% 和 3.92%,连续设计方案 C、D 组碳酸钙生成量更多,较 T 组分别增加 18.64% 和 24.95%,比较而言,连续设计方案下各组试样中碳酸钙的生成量均大于均匀设计方案。

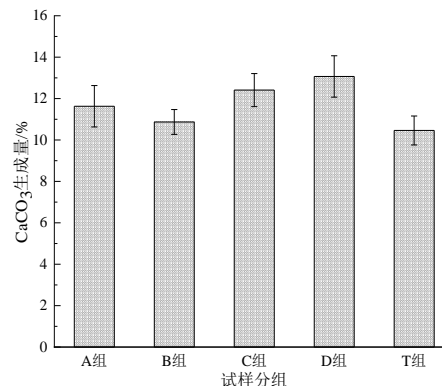


图 7 不同优化方案下  $CaCO_3$  生成量  
Fig.7 Amount of  $CaCO_3$  production under different optimization schemes

### 3.2 渗流特性

通过变水头法对经 MICP 固化后的砂柱试样进行渗流试验,测定其渗透系数。不同优化方案下固化后试样的渗透系数均值如图 8 所示。

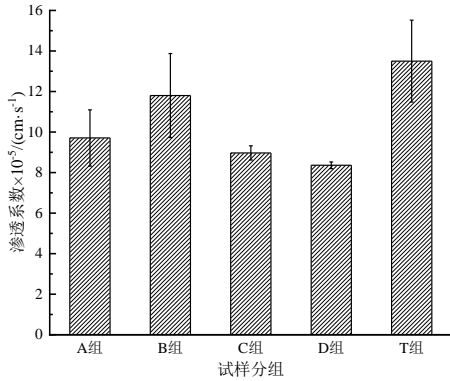


图 8 不同优化方案下砂柱试样渗透系数

Fig.8 Permeability coefficients of sand column samples under different optimization schemes

由图 8 可以看出,级配优化后的 4 组试样其渗透系数均呈减小的变化规律。根据前期预试验,固化前标准砂的渗透系数约为  $5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ <sup>[30]</sup>,固化后不同优化方案下砂柱的渗透系数约为  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ ,降低了 2~3 个数量级,表明 MICP 固化能够有效提升砂柱的抗渗性能;比较而言,渗透系数均值 D 组 < C 组 < A 组 < B 组,表明连续设计优化方案 C、D 组渗透系数均小于均匀设计优化方案 A、B 组,且相同优化方案下 A 组优于 B 组,D 组优于 C 组,其中 D 组抗渗性能最高。结合 D 组碳酸钙生成量最大,可以说明碳酸钙沉淀通过填充孔隙以及胶结砂颗粒使得渗流通道减少,从而提升砂柱的抗渗性能。

### 3.3 无侧限抗压强度

采用 RMT-150C 岩石力学试验系统对 5 组不同级配方案下试样进行无侧限压缩试验,每组 3 个试样,采用位移控制模式,加载速率为 0.50 mm/min 直至试样破坏。不同方案下典型试样的应力-应变曲线如图 9 所示,无侧限抗压强度统计结果如图 10 所示。

由图 9 和图 10 分析可知:

(1)不同优化方案下试样的应力-应变曲线形态基本一致,均表现出明显的弹性阶段、屈服阶段和峰后软化阶段。优化后各曲线均有不同程度上移,无侧限抗压强度明显提高、弹性阶段整体增长,即试样整体强度和延性均有一定提升。与 T 组试

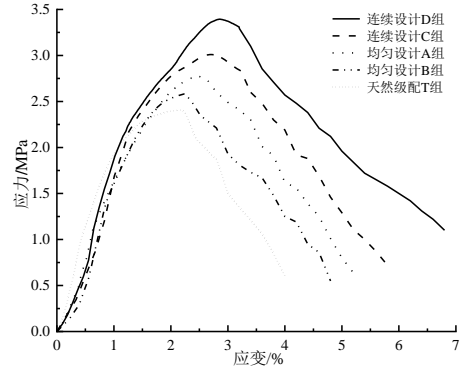


图 9 不同优化方案下典型试样应力-应变曲线图

Fig.9 Stress-strain curves of typical samples under different optimization schemes

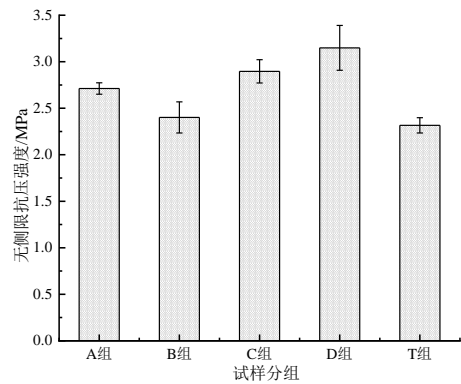


图 10 不同优化方案下试样无侧限抗压强度

Fig.10 Unconfined compressive strength of samples under different optimization schemes

样破坏时峰值应变(2.19%)相比,A、B、C、D 四组试样应变分别为 2.48%、2.24%、2.73%、2.86%,均有一定幅度增大,相同优化方案下 A 组 > B 组、D 组 > C 组,且连续设计方案表现整体优于均匀设计方案。

(2)优化后的 4 组试样无侧限抗压强度均有提升,其中 D 组提升效应最显著,强度约为 3.15MPa,与对照组 T 组相比,提升幅度达 35.97%。这是由于优化后细小颗粒大量填充进粗颗粒间的孔隙,有利于碳酸钙的沉积,进而填充孔隙并胶结砂颗粒,提高了整体密实度与强度<sup>[31]</sup>。

(3)相较于 T 组,粒径范围较小的 B 组试样强度提升仅为 3.63%,结合表 2 中数据,虽然 B 组固化前密度较高、孔隙率较低,表现出较好的初始密实性,然而其较小的粒径范围(0~1mm)和较为均匀的级配可能导致孔隙连通性不足、有效渗流通道较少,限制了碳酸钙在颗粒间的沉积空间,影响了菌液与胶结液的均匀渗透,使得沉淀物难以形成连续、有效的胶结网络,从而导致整体加固效果提升有限。

### 3.4 无侧限压缩破坏模式

对无侧限抗压强度试验中,不同优化方案下典型试样破坏模式进行对比,如图 11 所示(实线为试样破坏的主裂纹,虚线为次生裂纹)。

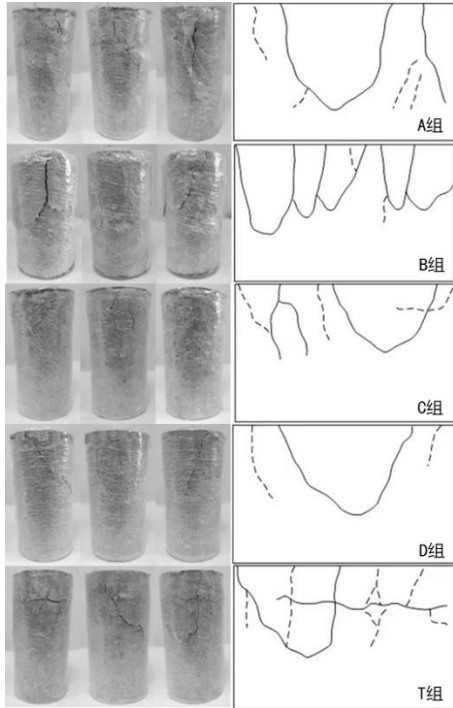


图 11 不同优化方案下典型试样破坏照片及裂纹展开图  
Fig.11 Failure photos and crack development diagrams of typical samples under different optimization schemes

对比图 11 中不同优化方案下试样的破坏特征可知,所有试样的破坏均为剪切破坏,存在明显的剪切滑移面。T 组试样上部具有明显的横向破坏特征,次生裂纹较密集,试样破坏严重,这是由于碳酸钙沉淀的空间分布不均匀,沿垂直方向向下逐渐增多,导致试样顶部强度相对较低;对比可见,A、B、C 三组试样强度较高,次生裂纹数量及破碎程度均有所减小;D 组试样剪切破坏特征更为显著,局部破坏程度减轻,次生裂纹数量最少,破坏后试样完整性较好,表明其整体均匀性更佳。

## 4 颗粒级配优化方式对砂土 MICP 固化效果影响机理

### 4.1 微观孔隙结构特征

综合上述测试结果分析发现,相同优化方案

下,A 组固化效果优于 B 组、D 组优于 C 组。基于此,后文分析主要对均匀设计方案 A 组、连续设计方案 D 组以及天然级配方案 T 组等 3 组不同方案下的典型固化后的标准砂试样进行对比。

为了分析固化后试样整体孔隙的分布情况,将 3 组不同颗粒级配试样分别进行核磁共振及  $T_2$  谱曲线测试:弛豫时间反映了孔隙的大小:0~10ms 为小孔隙、10~100ms 为中孔隙、大于 100ms 为大孔隙<sup>[32-33]</sup>。此外信号强度越大,表示孔隙分布数量越多。不同优化方案下典型试样  $T_2$  谱曲线及孔隙率均值如图 12 所示,孔隙率均值统计表如表 3 所示。

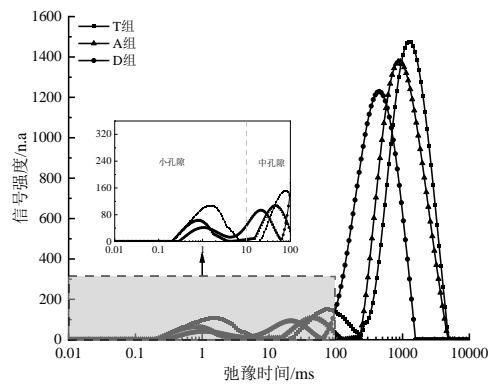


图 12 不同优化方案下典型试样  $T_2$  谱曲线

Fig.12  $T_2$  spectrum curves of typical samples under different optimization schemes

由图 12 及表 3 可知,

(1)天然级配 T 组试样  $T_2$  谱信号强度最高、长弛豫时间占比最多,说明其孔隙数量最多且孔隙尺寸较大。相较于 T 组,A、D 两组试样曲线均向左发生移动,且信号强度有不同程度的降低,其中连续设计方案 D 组试样明显优于 A 组,进一步说明连续设计方案下试样的固化效果较均匀设计方案更好。

(2)对比 A、D 组发现,固化后 2 组孔隙率分别降低 9.23% 和 11.86%,比较而言 D 组降低幅值明

表 3 不同优化方案下试样孔隙率均值统计表

Table 3 Statistical table of average porosity values for samples under different optimization schemes

试样分组	固化前孔隙率/%	固化后孔隙率/%	固化后孔隙率降幅/%
T 组	31.19	23.35	7.84
A 组	27.16	17.93	9.23
D 组	28.58	16.72	11.86

显大于A组,这是因为固化前D组试样不均匀程度较高、孔隙率较大,根据以往研究<sup>[34]</sup>发现,孔隙分布不均匀程度高、尺寸大越有利于菌液和胶结液的入渗、扩散,这对D组试样固化效果起到了积极的作用。因此,在级配良好的基础上,连续设计方案增大了不均匀系数,使得孔隙结构更为合理,固化效果更好。

对不同优化方案下试样核磁共振结果的孔喉占比进行统计,其分布情况如图13所示。

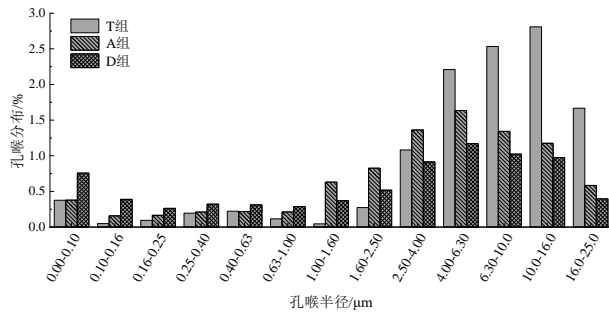


图13 不同优化方案下典型试样孔喉分布情况

Fig.13 Porethroat distribution in typical samples under different optimization schemes

由图13可知,固化后T组试样大孔喉( $>4\mu\text{m}$ )的总体占比为9.22%,A、D组试样大孔喉分别占比为4.74%、3.56%,较T组均有所下降,这是由于碳酸钙生成量对孔隙的填充、分割及颗粒胶结起到正向作用,从而降低了大孔喉占比。此外,固化后大孔喉占比呈现D组 $<$ A组的趋势,孔隙率同样为D组 $<$ A组,而碳酸钙生成量则为D组 $>$ A组。综合来看,D组试样碳酸钙生成量最多、大孔喉数量及尺寸最小,抗渗性能最强,固化效果最好。

对不同优化方案下试样MRI二维截面扫描图进行图像处理,如表4所示(亮点代表孔隙水的分布,亮度越高表明孔隙水含量越多)。

由表4可以看出,

(1)对照组T组试样显示出密集的亮点分布特征,尤其在试样顶端与中段截面的核心区域呈现团簇状聚集。反映出T组试样的固化效果从顶部至底部存在加固效果不均匀的问题;而A、D组试样亮点在顶部及中部呈均匀离散状态表明级配良好的试样经固化后,孔隙结构的连通性改善程度更为显著。

(2)相较于A组试样,D组整体亮点数量更少,是因D组试样不均匀系数较高,不仅促进菌液和胶

表4 不同优化方案下试样各部位成像汇总表

Table 4 Summary of imaging for sampleregions under different optimization schemes

分组	顶部	中部	底部
T组			
A组			
D组			

结液的入渗、扩散,也降低了碳酸钙沉淀对孔隙通道的阻塞,显著提升了孔隙填充与颗粒胶结的效果。

#### 4.2 基于SEM图像微观加固分析

采用PrismaE环境扫描电子显微镜(SEM)扫描可知上述3组试样内部颗粒间胶结状态和孔隙间填充程度,结果如图14~图16所示。

从图14~16可以看出,颗粒级配调整优化前后砂柱微观结构特征变化明显:

(1)颗粒级配优化前,如图14放大100倍时可以看到,天然级配不良试样T组固化效果较差,砂颗粒间孔隙较大,颗粒间碳酸钙沉淀、堆积、填充程度不足;放大500倍后,观察到细小的砂颗粒间仅有少量碳酸钙沉淀,且碳酸钙沉淀未能完全填充孔隙或将砂颗粒表面完全包裹,多呈零星片状或球状分散于孔隙内部,较少见于颗粒接触点,未能在颗粒间形成有效的桥接。

(2)颗粒级配优化后,如图15—16放大500倍观察到微小颗粒显著增加了骨架结构的填充密度。砂颗粒表面附着大量碳酸钙结晶沉积物,导致孔隙

率下降且孔径明显缩小。在均匀设计A组中,碳酸钙沉积量有所增加,部分区域的沉积开始逐渐积聚、联结但仍有部分孔隙未被有效封堵;而在连续设计D组中,碳酸钙明显倾向于在砂颗粒接触点处聚集,形成致密的“胶结桥”,晶体形态以块状和层状堆叠为主,块状与层状晶体提供 stronger 的机械咬

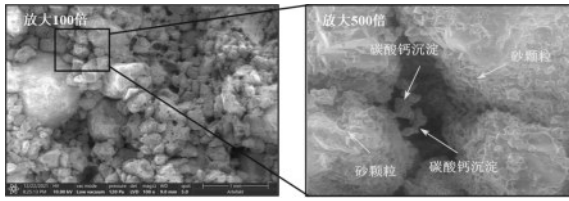


图 14 天然级配 T 组试样 SEM 图

Fig.14 SEM images of natural gradation Group T

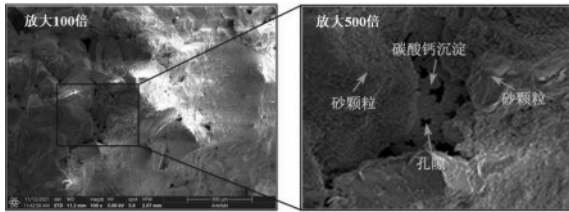


图 15 均匀设计方案 A 组试样 SEM 图

Fig.15 SEM images of uniform design Group A

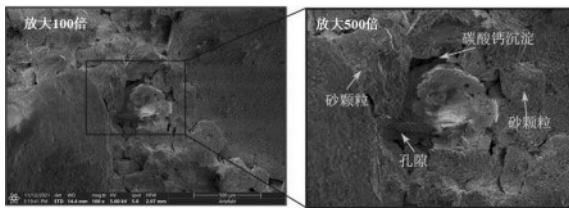


图 16 连续设计方案 D 组试样 SEM 图

Fig.16 SEM images of continuous design Group D

合与更广的覆盖区域。这表明连续设计优化不仅提高了  $\text{CaCO}_3$  生成量,更关键的是促使其优先沉积于颗粒接触区域,从而显著提升胶结效率。

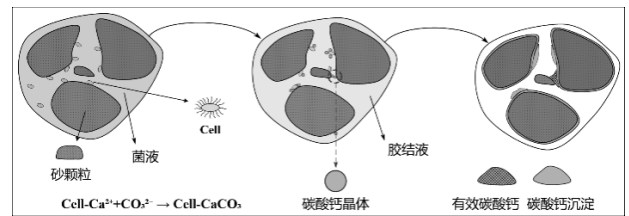
### 4.3 颗粒级配优化增强砂土 MICP 固化机制

综合上述分析发现,均匀设计方案与连续设计方案均能够有效地提升砂土的 MICP 固化效果。

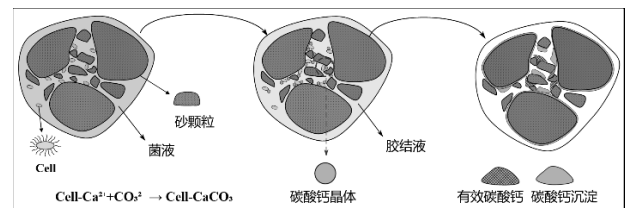
天然级配和连续设计方案增强砂土 MICP 固化效果示意图,如图 17 所示。不同级配优化方案下,试样的孔隙结构特征存在显著差异,进而影响了碳酸钙的沉积位置、形态与分布模式,最终表现为力学与抗渗性能的不同提升效果。颗粒级配优化对 MICP 固化效果增强机制主要体现在以下三个方面:

一是优化了初始孔隙结构,提供了最佳的碳酸钙沉积与填充环境。连续设计方案从空间上重构了砂颗粒的骨架结构,通过增加缺失的粒径颗粒,使级配曲线变得平滑连续,小颗粒能够更有效地填充大颗粒间的孔隙,提升密度(密度由  $1.78 \text{ g/cm}^3$  提高至  $1.87 \text{ g/cm}^3$ ,孔隙率由 31.19% 降至 28.58%)

的同时,改善了孔隙网络的连通性与分布均匀性。结合图 12—13 可知,(正交设计和)连续设计方案下试样中极端大孔隙( $>100 \text{ ms}$ )占比降低,孔隙尺寸分布更为集中,这种“结构合理化”的孔隙系统,既为碳酸钙提供了更多有效的沉积位点与连续的填充路径,为后续 MICP 过程构建了理想的反应空间,也保障了菌液与胶结液的均匀渗透,为碳酸钙的沉积预留了充足的填充与扩展通道,形成了一个兼具稳定性与反应活性的“矿化模板”,提升了砂颗粒间的胶结效率与固化体的宏观性能。



(a) 天然级配方案 T 组



(b) 连续设计方案 D 组

图 17 颗粒级配优化增强砂土 MICP 固化机制图

Fig.17 Mechanism diagram of MICP solidification enhanced by particle gradation optimization

二是改善了菌液和胶结液的运输路径,确保了反应物均匀、有效的渗透。MICP 反应的有效性高度依赖于菌液和胶结液能否均匀渗透到试样内部,如果孔隙过于细小,反应初期生成的少量碳酸钙就可能堵塞入渗通道,阻止溶液进一步进入试样内部,导致加固效果不均匀。连续设计方案下砂颗粒之间形成了连通性更好、尺寸更合理的孔隙网络,延缓了这种“过早堵塞”现象的发生,有效减少了溶液流动阻力,使胶结液更充分地渗透到试样各个部位。

三是增强了颗粒间胶结效果,提升了砂柱固化体的物理力学性能。天然级配方案(T组)因孔隙连通性差、分布不均,碳酸钙沉积效率低,难以形成有效胶结网络;均匀设计方案(A组)形成中等连通性、孔径分布较集中的孔隙结构,碳酸钙多沉积于孔隙内部,呈现“孔隙填充型”模式,虽能有效降低渗透

性,但颗粒接触点胶结不足、强度提升有限;连续设计方案(D组)则构建了连通性良好、孔径分布均匀的孔隙网络,促使碳酸钙优先在颗粒接触点沉积,形成“接触点胶结型”模式,不仅增强了抗渗性,更通过大量“胶结桥”显著提高了整体强度与变形能力,最终在微观上形成牢固的胶结结构,在宏观上同步提升了固化体的强度、抗变形能力以及抗渗性。

综上所述,通过连续设计方案,优化天然级配标准砂的孔隙结构、改善菌液及胶结液的入渗通道、增强砂颗粒间的胶结效果这三方协同机制,从而提升MICP技术对砂土的固化效率与效果。

## 5 结论

本文采用均匀设计和连续设计两种级配优化方案对天然级配标准砂进行级配优化调整,通过系列试验对比研究了不同颗粒级配优化方案下标准砂的MICP固化效果,主要结论如下:

(1)均匀设计(A组)与连续设计方案(D组)的碳酸钙生成量分别提高了11.19%和24.95%,同时渗透系数降低了28.07%和38.07%。相比均匀设计(A组),连续设计方案(D组)无侧限抗压强度与破坏时应变分别显著提升了16.11%和15.32%,说明连续设计方案通过优化沉积位置、改善晶体形态与增加有效胶结点,显著提升了胶结效率,从而在宏观上实现强度与抗渗性能的同时大幅提升。

(2)核磁共振与SEM分析表明,连续设计方案能显著增大砂土的不均匀系数( $C_u$ ),降低总孔隙率的同时形成平均尺寸更大、结构更合理的孔隙网络。

(3)连续设计优化方案下的级配重构了砂土体骨架结构,形成了连通性好、孔径平均的孔隙网络,这一结构保障了菌液与胶结液能均匀、有效地输运至试样各部,避免了局部堵塞,生成的胶结物碳酸钙不仅有效填充孔隙,更在颗粒间构筑起空间分布均匀、连接紧密的三维胶结网络,从而在宏观上实现了强度、抗变形能力和抗渗性的同步增强。

本研究初步探讨了级配优化对MICP固化效果的影响,后续研究可通过设计初始密度相同、级配不同的对照试验,进一步分析级配效应与密度效应对MICP加固效果的影响。

## 参考文献:

- [1] 王欣正,孔纲强,陈永辉,等.静压压实工艺对工程渣土固化土强度影响的试验研究[J].防灾减灾工程学报, 2025,45(02):375-383.  
Wang X Z, Kong G Q, Chen Y H, et al. Experimental Study on Effect of Static Compaction Technology on Strength of Stabilized Engineering Residual Soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025,45(02):375-383. (in Chinese)
- [2] 廖孟光,李贤琪,戴华阳,等.顾及硬化路面厚度的盾构施工地面沉降预测方法[J].防灾减灾工程学报, 2025,45(04):784-795.  
Liao M G, Li X Q, Dai H Y, et al. Ground Settlement Prediction Method for Shield Tunneling Considering Rigid Pavement Thickness [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025,45(04):784-795. (in Chinese)
- [3] 夏振尧,董欣慧,胡欢,等.微生物诱导碳酸钙沉积固化三峡库区黏性紫色土试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(05):91-100.  
Xia Z Y, Dong X H, Hu H, et al. Performance of microbial induced carbonate precipitation (MICP) for reinforcing cohesive purple soil in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024,46(05):91-100. (in Chinese)
- [4] 刘子健,黄明,崔明娟,等.基于纳米压痕技术的页岩土MICP结石体微观力学特性研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(05):1036-1045.  
Liu Z J, Huang M, Cui M J, et al. Investigation on the Micromechanical Properties of Bio-cement Shale Soil based on the Nanoindentation Technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(05):1036-1045. (in Chinese)
- [5] 卫仁杰,彭劼,陈泳,等.MICP结合南海岛礁资源加固珊瑚砂的方法及效果研究[J].防灾减灾工程学报, 2023,43(06):1255-1265.  
Wei R J, Peng J, Chen Y, et al. Study on Methods and Effects of Coral Sand Reinforcement by MICP Combined with Reef Resources in South China Sea [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023,43(06):1255-1265. (in Chinese)
- [6] Lim J X, Tanaka Y, Chong S Y, et al. Mechanistic comparisons of MICP-treated residual soil and sand Part I: microstructural formation and deformation behavior of soils [J]. Discover Geoscience, 2025, 3(1): 85-112.

- [7] Abbasi M. Experimental Study on Strength Properties of MICP-Treated Silty Sand[J]. Contributions of Science and Technology for Engineering, 2025, 1(4): 28-34.
- [8] 余清鹏,李娜,符平,等.微生物灌浆加固砂土效果的试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(03):204-210.  
Yu Q P, Li N, Fu P, et al. Experimental study on reinforcement effect of microbial grouting on sandy soil[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(03): 204-210. (in Chinese)
- [9] 曾庆杰,李悦,黎金杭,等.微生物改性水泥土的制备与力学特性研究[J].长江科学院院报,2022,39(02):135-140.  
Zeng Q J, Li Y, Li J H, et al. Preparation and Mechanical Properties of Cement Soil Modified by Sporosarcina pasteurii[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(02): 135-140. (in Chinese)
- [10] Zheng X, Lu X, Zhou M, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Root - Soil Composite Reinforced by MICP[J]. Materials, 2022, 15(10): 3586-3597.
- [11] Chen M, Gowthaman S, Nakashima K, et al. High water content peat soil improved by MICP technique with fiber-reinforcement[C]//11th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment. Kyoto: GEOMATE International Society, 2021: 16-21.
- [12] 彭劼,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):1769-1774.  
Peng J, He X, Liu Z M, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1769-1774. (in Chinese)
- [13] Wang Y, Konstantinou C. A comprehensive optimization study of microbially induced carbonate precipitation for soil strength enhancement: impact of biochemical and environmental factors[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2024, 150(10): 04024101.
- [14] Hu L, Zheng H, Wu L, et al. Experimental study on the effect of an organic matrix on improving the strength of tailings strengthened by MICP[J]. Materials, 2023, 16(15): 5337-5361.
- [15] 张建伟,赵聪聪,尹悦,等.紫外诱变产脲酶菌株加固粉土的试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(12):2500-2509.  
Zhang J W, Zhao C C, Yin Y, et al. Experimental study on solidification of silt through urease-producing strains induced by ultraviolet mutagenesis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2500-2509. (in Chinese)
- [16] 肖瑶,邓华锋,李建林,等.利用Triton X-100提升巴氏芽孢杆菌脲酶活性的效果[J].材料导报,2024,38(01):209-215.  
Xiao Y, Deng H F, Li J L, et al. Effect of Triton X-100 on Improving Urease Activity of Sporosarcina pasteurii[J]. Materials Reports, 2024, 38(01): 209-215. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 梁仕华,曾伟华,龚星,等.颗粒级配对微生物固化砂土力学性能的影响[J].人民长江,2020,51(02):179-183.  
Liang S H, Zeng W H, Gong X, et al. Influence of particle gradation on mechanical properties of MICP-treated sand[J]. Yangtze River, 2020, 51(02): 179-183. (in Chinese)
- [19] 靳贵晓,张瑾璇,许凯,等.颗粒级配对残积土MICP灌浆效果的影响评价[J].地下空间与工程学报,2020,16(01):295-302.  
Jin G X, Zhang J X, Xu K, et al. Influence of Particle Gradation on Grouting Effect of Microbial Induced Calcite Precipitated of Residual Soil impact assessment. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(01): 295-302. (in Chinese)
- [20] 兰凤.基于均匀设计和SMPSO的细骨料配合比优化研究[D].保定:河北农业大学,2013.  
Lan F. Study on the Optimization of Fine Aggregate Mixture Ratio using Uniform Design and SMPSO[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [21] 劳国峰,阳军生,谢亦朋,等.基于骨架结构指标的连续级配颗粒土峰值抗剪强度模型研究[J].岩土力学,2025,46(08):2459-2470+2482.  
Lao G F, Yang J S, Xie Y P, et al. A peak shear strength model of continuously graded granular soils based on skeleton structure indices[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(08): 2459-2470+2482. (in Chinese)
- [22] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994:43-54.

- [23] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016:10-12.
- [24] 曹建新, 王哲人. 连续级配的级配碎石材料试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, (05):14-16+20.  
Cao J X, Wang Z R. Experimental Research of Continuous Grading Macadam Materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, (05):14-16+20. (in Chinese)
- [25] 何兆益, 黄卫, 谈长庆. 无粘结碎石材料级配研究[J]. 重庆交通学院学报, 1996, (03):18-22.  
He Z Y, Huang W, Tan C Q. Grading Studies on the Granular Material [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1996, (03):18-22. (in Chinese)
- [26] 曹建新. 级配碎石混合料组成设计的试验研究[J]. 公路, 2004, (02):107-110.  
Cao J X. Experiments and Research on Composition Design of Grade d Macadam Mixtures [J]. Highway, 2004, (02): 107-110. (in Chinese)
- [27] Brown S F, Pappin J W. Modeling of granular materials in pavements [J]. Transportation Research Board, 1985, 1022:45-51.
- [28] 程雷, 肖瑶, 邓华锋, 等. 一株本源产脲酶细菌的分离培养及其在裂隙岩体加固中的应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2):307-314.  
Cheng L, Xiao Y, Deng H F, et al. Isolation and culture of a native urease-producing bacterium and its application in the reinforcement of fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2):307-314. (in Chinese)
- [29] 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 Beijing, 2014. (in Chinese)
- [30] 熊雨, 邓华锋, 李建林, 等. 火山灰增强微生物固化砂土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12):3403-3415.  
Xiong Y, Deng H F, Li J L, et al. Experimental study of MICP-treated sand enhanced by pozzolan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12):3403-3415. (in Chinese)
- [31] 林久卿, 牛昊, 刘致延, 等. 水泥基砂土注浆材料抗海水侵蚀性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(03):551-559.  
Lin J Q, Niu H, Liu Z Y, et al. Study on Seawater Erosion Resistance of Cement-Based Silica Grouting Material [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(03):551-559. (in Chinese)
- [32] 高瑜, 姚德, 秦骁, 等. 盐蚀环境下微生物矿化岩土材料的冻融特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(05):787-794.  
GAO Y, YAO D, QIN X, et al. Study on Freeze-thaw Properties for Microbial Mineralization Geotechnical Materials in Salt Corrosion Environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(05):787-794. (in Chinese)
- [33] 任建喜, 刘政, 谷禹, 等. 三轴压缩冻融裂隙砂岩疲劳破坏机理与本构模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(03):680-687.  
Ren J X, Liu Z, Gu Y, et al. Study on Fatigue Failure Mechanisms and Constitutive Model of Freeze-thaw Fractured Sandstone under Triaxial Compression [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(03):680-687. (in Chinese)
- [34] 钱自卫. 孔隙砂岩化学注浆浆液渗透扩散机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
Qian Z W. Permeation and Diffusion Mechanism of Chemical Grout in Porous Sandstone [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)