

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.019

微生物固化尾矿砂注浆方法优化设计研究

陈晓波¹, 查甫生¹, 康博¹, 刘争宏²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘要:微生物注浆加固技术是近些年兴起的一项土体加固方法,对尾矿库的加固有着极佳的效果,可有效降低尾矿库溃坝的风险。由于注浆不均匀导致该技术在应用中发展较为缓慢。目前微生物加固技术在实验室内常用的方法有单向注浆和双向注浆,两者均存在固化不均匀的问题。为提高微生物加固土体的均匀性,文章提出交叉-双向注浆的方法,同时控制注浆速率;交叉注浆使细菌菌液和胶结液分别从生物柱两端进入土体中,固化生物柱中间部位;双向注浆使细菌菌液和胶结液从生物柱同一端进入土体中,固化生物柱两端。研究表明:同等注浆条件下,交叉-双向注浆法较双向注浆法制备的试样无侧限抗压强度提高了329 kPa,将砂柱中间部位碳酸钙质量分数由18.98%提高到22.08%;交叉-双向注浆过程中在菌液和胶结液注入速率分别为1.2、1.4 mL/min时,砂柱无侧限抗压强度达到最大值1 211 kPa,同时砂柱中间部位碳酸钙质量分数也提高到了24.31%。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP);尾矿砂;交叉注浆;双向注浆;无侧限抗压强度;碳酸钙质量分数

中图分类号:TU441.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0701-07

Optimization design of microbial solidified tailings sand grouting method

CHEN Xiaobo¹, ZHA Fusheng¹, KANG Bo¹, LIU Zhenghong²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, China)

Abstract: Microbial grouting reinforcement technology is a newly developed soil reinforcement method in recent years, which has excellent effects on the reinforcement of tailings ponds and greatly reduces the risk of tailings dam failure. Due to uneven grouting, the development of this technology in practical applications is relatively slow. At present, the commonly used methods for microbial reinforcement technology in the laboratory are unidirectional grouting and bidirectional grouting, both of which have the problem of uneven solidification. To improve the uniformity of microbial reinforcement of soil, this paper proposes a cross bidirectional grouting method while controlling the grouting rate. Cross grouting allows bacterial liquid and cementitious liquid to enter the soil from both ends of the biological column, solidifying the middle part of the biological column. Bidirectional grouting allows bacterial liquid and cementitious liquid to enter the soil from the same end of the biological column, solidifying both ends of the biological column. It was shown that under the same grouting conditions, the unconfined compressive strength of specimens prepared by the cross bidirectional grouting method increased by 329 kPa compared to that of specimens prepared by the bidirectional grouting method, and the calcium carbonate mass fraction in the middle part of the sand column increased from 18.98% to 22.08%. During the cross bidirectional grouting process, the unconfined compressive strength of the sand column reached a maximum value of 1 211 kPa at the injection rates of 1.2 mL/min for bacterial liquid and 1.4 mL/min for cementitious liquid, respectively. At the same time, the calcium car-

收稿日期:2023-04-27; **修回日期:**2023-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42030710)

作者简介:陈晓波(1997—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

查甫生(1978—),男,安徽枞阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

康博(1988—),女,河北武安人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者, E-mail: kangbo@hfut.edu.cn.

bonate mass fraction in the middle part of the sand column also increased to 24.31%.

Key words: microbially induced calcite precipitation(MICP); tailings sand; cross grouting; bidirectional grouting; unconfined compressive strength; calcium carbonate mass fraction

随着国家科技、经济等快速发展,人口的急剧增长,人们对于矿产资源的需求日益增长。虽然人们的生活品质有明显的提高,但是由于开采技术限制以及矿产资源开采后对于污染物未处理或处理不当导致环境受到了严重污染。尾矿库中的尾矿砂是引起地质灾害的一大主要原因,处理不当容易引起泥石流。尾矿砂处理不当一旦引发地质灾害,对于人类的生命财产和环境造成的冲击是不可估量的。尾矿库溃坝所引起的人员伤亡和经济损失时刻提醒着人们对于尾矿库建设要加强管理。

为避免尾矿库溃坝对人类带来的危险,文献[1]提出在尾矿库建设时,将土工合成材料应用到尾矿库坝基的加固中。为加固尾矿库,文献[2]对德兴铜矿斜槽地基破碎带进行水泥灌浆加固,以达到提高其地基承载力和降低地面沉降的目的;文献[3]为使尾矿库堆积坝更加稳定,对尾矿库进行加筋处理,使其具有更高的稳定性。

传统的土体加固技术已经无法在经济、效果、环境等方面达到一个平衡,为了解决该问题需要探索一种成本低、效果好、环境优的方法。微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)技术是一种利用微生物产脲酶的特点,结合有机物与无机物沉积碳酸钙^[4-6]。该技术具有反应高效、环境友好等特点。微生物加固技术是将菌液与营养物质注入到土体当中,使其在土体当中反应产生碳酸钙,碳酸钙充填在土体孔隙中,将土颗粒胶结在一起,从而提高土体强度、降低渗透性^[7-14]。

文献[15]研究表明 MICP 技术能够有效地提高尾矿砂的无侧限抗压强度;文献[16]研究发现, MICP 技术能够有效地固化铜尾矿砂,并能够在尾矿库的处理过程中生成生物外壳抵抗风蚀;文献[17]通过实验发现,采用混合巴氏芽孢杆菌和脱氮

卡斯特菌进行尾矿胶结,能够使得尾矿砂胶结的更加完整且具有更高的强度;文献[18]实验结果表明, MICP 能够通过相对复杂的生化和物理化学反应诱导碳酸钙沉淀,可以实现重金属和硫化物的固定,显著降低尾矿砂对周围环境的影响。

目前 MICP 加固土体的工艺手段主要是注浆法,但因其对土体加固不均匀使得土体强度降低。为解决微生物注浆固化土体不均匀问题,文献[19]进行一维土柱固化试验,将营养液从土柱顶部依次注入,结果表明柱顶部比柱底部强度更高;文献[20]通过微生物单点注浆加固土体,注浆口处碳酸钙质量分数远高于出浆口处碳酸钙质量分数;文献[21]通过注浆管法加固土体,结果表明砂柱的强度较高且比较均匀;文献[22]通过对比单向注浆法与双向注浆法可知,双向注浆法制备所得试样完整性更优;文献[23]研究发现菌液和胶结液同时注入试样时,碳酸钙主要集中于注入端口,而采用分步注入时,碳酸钙则分布的较为均匀。

分布注入法^[24-26]主要是先将菌液注入到试样当中,然后将胶结液注入试样当中。此为一次注浆,在单次养护后重复注浆,使得试样中碳酸钙更为丰富。为充分提高 MICP 固化试样的均匀性,本文提出交叉-双向注浆法,在定制模具中,将菌液和胶结液从试样的不同方向注入其中,固化试样中间部位,然后采用双向注浆,菌液和胶结液从试样同一端进入其中,固化试样两端,探究该方法下试样中碳酸钙分布的均匀性。

1 材料与方法

1.1 尾矿砂性质

实验采用的尾矿砂取自安徽省铜陵市铜官区水木冲尾矿库,其基本性质见表 1 所列。

表 1 尾矿砂基本性质

天然含水率/%	松散堆积密度/(g/cm ³)	比重	平均粒径 d_{50} /mm	不均匀系数	曲率系数
9.46	1.32	2.86	0.28	4.62	1.58

1.2 细菌菌液和胶结液

1.2.1 细菌菌液培养

实验采用的细菌为巴士芽孢杆菌,型号为

ATCC 11859。培养基采用官方推荐的 ATCC 1376 NH₄-YE 培养基,其成分见表 2 所列。

培养液经高温灭菌锅 121 °C 灭菌 30 min,灭菌

结束待培养液冷却,以1:100比例接种,接种完成后放入恒温振荡培养箱中(30℃,130 r/min)培养24 h。培养完成后使用分光光度计测试细菌菌液的OD₆₀₀,并计算其浓度。

表2 培养基成分及其质量浓度 单位:g/L

成分	液体培养基	固体培养基
酵母提取物	20.00	20.00
硫酸铵	10.00	10.00
0.13M Tris base	15.75	15.75
琼脂	—	20.00

1.2.2 胶结液配置

实验所用胶结液由Urea(尿素)和CaCl₂配置得到,其浓度为1 mol/L,Urea和CaCl₂配比为1:1。

1.3 实验方法

1.3.1 试样装置

本实验模具为内径为50 mm,高为110 mm的有机玻璃管(有机玻璃管两端分别记为A和B)。在实验过程中首先将厚度为5 mm透水石置于有机玻璃管底部;其次将314 g尾矿砂(土体密度为1.6 g/cm³)填入有机玻璃管中,使试样的高度为100 mm;然后将透水石置于试样顶部,其目的为防止尾矿砂从有机玻璃管两端漏出;最后将有机玻璃管置于定制的注浆模具当中,连接蠕动泵对尾矿砂进行微生物固化处理。注浆流程示意图如图1所示。

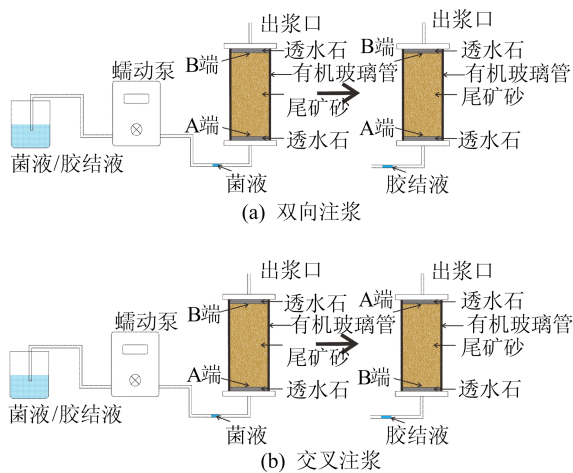


图1 注浆流程示意图

1.3.2 微生物注浆

为探究注浆方法对砂柱中碳酸钙分布的影响,本文选用2种注浆方法,双向注浆法和交叉-双向注浆法。每个试样依次注入50 mL菌液和50 mL胶结液。注入速率均为0.83 mL/min。

双向注浆法。将细菌菌液从模具底部通过有

机玻璃管A端注入砂柱当中(图1a),细菌菌液注入完成后将胶结液从模具底部通过有机玻璃管A端注入砂柱当中,注浆完成后将试样放入养护箱中养护24 h,之后放入60℃的烘箱中烘干24 h,此为1次完整注浆。第2次注浆同第1次注浆方式相同,不同的是细菌菌液和胶结液均从有机玻璃管B端注入砂柱。如此反复共8次即完成注浆。注浆完成后将试样放入养护箱养护3 d,然后脱模即可得到试样。

交叉-双向注浆法。此方法先进行交叉注浆(图1b)而后进行双向注浆(图1a)。将细菌菌液从模具底部注入有机玻璃管中(有机玻璃管A端朝下),注入完成后将有机玻璃管倒置(B端朝下),将胶结液从模具底部注入有机玻璃管中,注浆完成后将试样放入养护箱中养护24 h,之后放入60℃的烘箱中烘干24 h,此为1次完整注浆。第2次注浆同第1次注浆方式相同,不同的是细菌菌液从有机玻璃管B端注入砂柱,胶结液从有机玻璃管A端注入砂柱当中。第3次注浆和第4次注浆分别同第1次注浆和第2次注浆。4次注浆完成后即完成交叉注浆。交叉注浆完成后进行双向注浆,注浆方法与前文相同,不同的是仅需进行4次注浆。在注浆工作完成后将试样放入养护箱中养护3 d,即可脱模得到完整试样。

筛选出最佳注浆方法后,后续通过控制菌液及胶结液的注入速率以进一步提高砂柱中碳酸钙分布的均匀性。其中细菌菌液的注入速率分别为0.6、1.2、1.8 mL/min,胶结液的注入速率分别为0.6、1.0、1.4、1.8、2.2 mL/min。

1.3.3 无侧限抗压强度测试

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对脱模烘干后的试样进行无侧限抗压强度试验,仪器选用YSH-2应变控制式无侧限压力仪,加载速率为1 mm/min,记录数据。

1.3.4 碳酸钙质量分数测定

为探究微生物对整个砂柱固化均匀性的影响,本实验对砂柱中碳酸钙质量分数进行测试。将砂柱横切均分为5段,每段高度为20 mm,取每段砂样不少于10 g,研磨至细粒状,烘干后称其质量,记为 m_1 ,后将砂样置于烧杯中,加入过量稀盐酸直至不再产生气泡,将砂样过滤清洗烘干称其质量,记为 m_2 。砂样的碳酸钙质量分数计算公式为:

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 基于强度及碳酸钙质量分数优选注浆方法

2.1.1 注浆方法对无侧限抗压强度的影响

微生物诱导产生的碳酸钙充填在土壤孔隙当中,将土颗粒粘连在一起,使得土体具有一定的强度。碳酸钙在砂柱孔隙中充填的均匀性对砂柱的强度起着重要作用。对通过双向注浆法和交叉-双向注浆法制备所得的砂柱进行无侧限抗压强度测试,结果如图 2 所示。

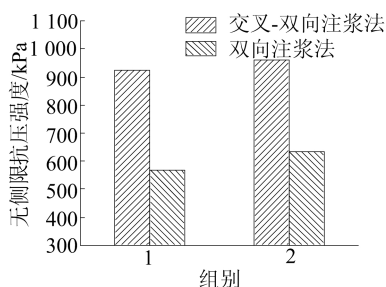


图 2 不同注浆方法所得砂柱的无侧限抗压强度

由 2 图可知,交叉-双向注浆法制备所得砂柱具有更大的无侧限抗压强度,最大达 963 kPa,而双向注浆法制备所得砂柱无侧限抗压强度最高仅为 634 kPa。其原因主要是双向注浆法的细菌菌液和胶结液从砂柱的同一端进入砂柱中,微生物诱导碳酸钙沉淀反应迅速使得碳酸钙迅速在注浆端口沉淀堆积,在后续的注浆过程中,菌液和胶结液难以进入到砂柱中间部位,难以达到胶结土颗粒的目的,从而使得整个砂柱中碳酸钙的充填极不均匀。而优化后的注浆方法相较于双向注浆法添加了交叉注浆,交叉注浆是为了解决双向注浆法的弊端提出的方法。细菌菌液和胶结液分别从砂柱两端进入到砂柱中,使碳酸钙充填在砂柱的中间部位,而后进行双向注浆使碳酸钙充填在砂柱两端,使得整个砂柱中碳酸钙分布的更加均匀,砂柱具有更高的抗压强度。

2.1.2 注浆方法对碳酸钙质量分数的影响

不同注浆方法所引起的最大改变是碳酸钙在砂柱中分布的均匀性。为探究不同注浆方法制备所得砂柱中碳酸钙的分布情况,将砂柱横向切割分成均匀的 5 段并测试每段的碳酸钙质量分数,结果如图 3 所示。

由图 3 可知:对于砂柱两端的碳酸钙质量分数,双向注浆法制备所得砂柱更高,而砂柱中间部位碳酸钙质量分数的较低;交叉-双向注浆法制备

的砂柱中间部位碳酸钙质量分数明显高于双向注浆法的砂柱。这主要是由于双向注浆法过程中细菌菌液和胶结液从砂柱同一端进入到砂柱中,快速产生碳酸钙充填砂柱两端,后续的注浆菌液和胶结液难以进入到砂柱中间部位,难以产生碳酸钙。而优化后的注浆方法提出的交叉注浆解决了双向注浆这一缺点。显然,交叉-双向注浆法将砂柱中间部位碳酸钙质量分数从 18.98% 提高到了 22.08%。交叉注浆在一定程度上提高了砂柱中间部位的碳酸钙质量分数,为提高微生物固化尾矿砂的均匀性提供了一种方法,使得微生物技术对砂柱固化的更加完整。

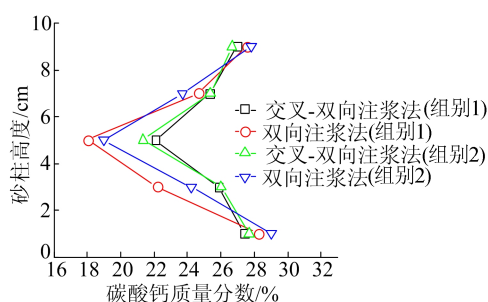


图 3 不同注浆方法所得砂柱各部位碳酸钙质量分数

2.2 注入速率对强度及碳酸钙质量分数的影响

2.2.1 注入速率对无侧限抗压强度的影响

由上述结果可知,交叉-双向注浆法较双向注浆法能够使砂柱更加完整。由于交叉注浆过程中菌液和胶结液分别从砂柱的两端注入其中,为使菌液和胶结液更加充分地在砂柱中间部位相遇发生反应固化土体,控制两者的注入速率使碳酸钙在砂柱中的分布更加均匀,具有更高的抗压强度。测试不同注浆速率下砂柱的无侧限抗压强度,结果如图 4 所示。

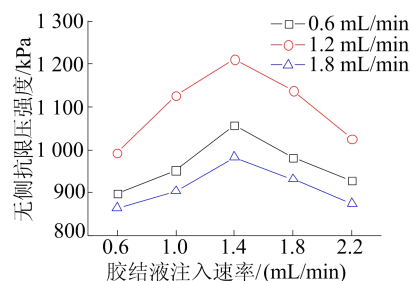


图 4 不同菌液注入速率下砂柱无侧限抗压强度变化情况

通过测试结果可以得出:当细菌菌液注入速率为 1.2 mL/min 时,试样的无侧限抗压强度大于菌液注入速率为 0.6、1.8 mL/min 的试样;且

在胶结液注入速率为 1.4 mL/min 时,无侧限抗压强度达到最大,为 1 211 kPa。在交叉注浆过程中,当细菌菌液注入速率过慢时,细菌菌液堆积在试样端口位置,胶结液注入速率过慢时,很难将胶结液从砂柱一端输送到砂柱的另一端,而速率过快时,胶结液从一端输送到另一端端口位置与细菌菌液反应产生碳酸钙充填孔隙,后续的双向注浆很难将细菌菌液和胶结液注入到砂柱当中,中间部位得不到固化使得整个砂柱固化不均匀。在交叉注浆过程中,当细菌菌液注入速率过快时,菌液从 A 端到达 B 端口位置,而后将胶结液从 B 端注入时,菌液和胶结液快速反应产生碳酸钙充填在端口位置,从而未达到固化砂柱中间部位的目的,

使得砂柱固化不均匀。当细菌菌液注入速率为 1.2 mL/min 时,其充分分布在砂柱中间部位,而当胶结液注入速率为 1.4 mL/min 时,产生的碳酸钙充分填充在砂柱中间部位。当交叉注浆结束后进行双向注浆,菌液和胶结液在端口位置充分反应固化砂柱两端,使整个砂柱固化更加均匀。

2.2.2 注入速率对碳酸钙质量分数的影响

为了砂柱中碳酸钙分布更加均匀,通过控制交叉-双向注浆法的注入速率以提高砂柱中间部位的碳酸钙质量分数,对不同注入速率制备的砂柱中碳酸钙质量分数进行测试,结果如图 5 所示。结果表明砂柱中间部位的碳酸钙质量明显低于砂柱两端的碳酸钙质量分数。

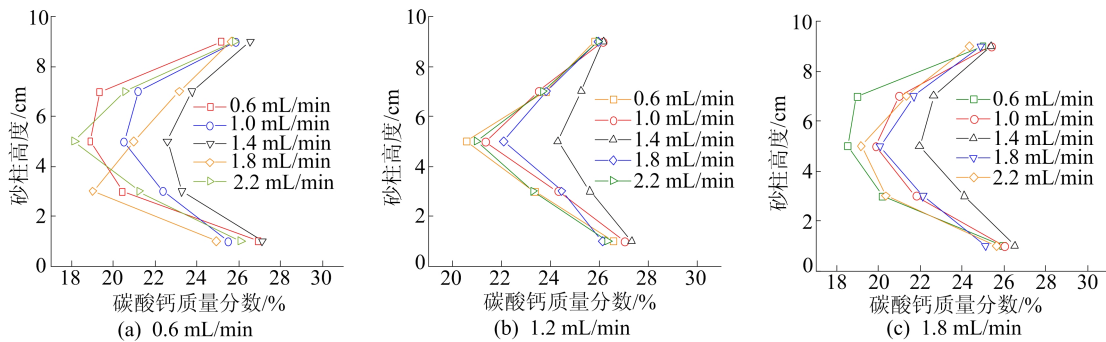


图 5 交叉-双向注浆下不同注入速率对砂柱各部位碳酸钙质量分数的影响

在细菌菌液注入速率为 1.2 mL/min、胶结液注入速率为 1.4 mL/min 时,砂柱中间部位与砂柱两端的碳酸钙质量分数变化最小,范围为 24.31%~27.33%。砂柱中间部位与两端碳酸钙质量分数差距较大,是由于交叉注浆时未能达到固化砂柱中间部位的效果。以第 1 次交叉注浆为例,在交叉注浆时,当细菌菌液注入速率过慢时,菌液主要分布在有机玻璃管端口 A 处,而胶结液从有机玻璃管 B 端注入,当注入速率过慢时,两者难以相结合达到产生碳酸钙充填土壤孔隙的效果,过快时则碳酸钙会充填在 A 端端口位置,后续难以将菌液和胶结液输送到砂柱当中;而当细菌菌液注入速率过快时,细菌菌液则主要分布在有机玻璃管的 B 端端口位置,进行胶结液注入时,胶结液与菌液在 B 端端口位置接触快速反应产生大量碳酸钙,难以达到固化砂柱中间部位,导致碳酸钙在砂柱中充填极不均匀,同一砂柱中间部位与砂柱两端碳酸钙质量分数相差最大,为 18.89%~26.91%。

将每个砂柱分段测得 5 个碳酸钙质量分数,取其平均值即为整个砂柱的碳酸钙质量分数,如

图 6 所示。

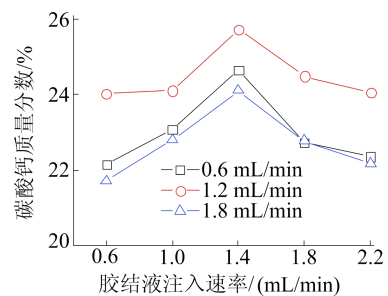


图 6 不同注入速率下砂柱碳酸钙质量分数的平均值

在菌液注入速率为 1.2 mL/min、胶结液注入速率为 1.4 mL/min 时,碳酸钙质量分数最高,达到了 25.74%。不同砂柱两端的碳酸钙质量分数相差较小,而砂柱中间部位碳酸钙质量分数则相差较大。提高砂柱中间部位碳酸钙的质量分数则会在总体上提高整个砂柱的碳酸钙质量分数。细菌菌液和胶结液的注入速率对交叉注浆使得碳酸钙充填砂柱中间部位起着决定性的作用。当注入速率过快或过慢时,碳酸钙则更多地充填在砂柱的两端,使得砂柱端口位置孔隙变小变少,而后

续的注浆工作很难进行,细菌菌液和胶结液很难进入到砂柱当中。当菌液和胶结液注入速率适中时,细菌菌液和胶结液在砂柱中间部位接触反应产生碳酸钙,砂柱中间部位碳酸钙的质量分数更加充盈,达到了交叉注浆的目的。

对每个砂柱不同部位碳酸钙质量分数进行整合计算,得到方差结果如图 7 所示。由图 7 可知,菌液注入速率为 1.2 mL/min、胶结液注入速率为 1.4 mL/min 时,方差最小,即此时砂柱中碳酸钙填充得更加均匀,菌液和胶结液注入速率适中时,充分发挥了交叉注浆的目的,碳酸钙在砂柱中间部位填充更为丰富,砂柱中间与砂柱两端碳酸钙质量分数差距更小,整个砂柱各部位碳酸钙质量分数更加相近,固化更加均匀。而细菌菌液和胶结液注入速率过快或过慢时,均难以达到交叉注浆的目的,砂柱中间部位与砂柱两端碳酸钙质量分数相差较大,整个砂柱固化显得极不均匀。

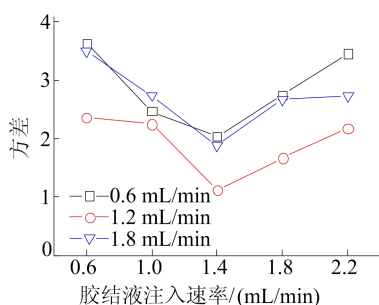


图 7 不同注入速率下砂柱碳酸钙质量分数的方差

3 结 论

本文利用微生物技术,通过交叉-双向注浆法和双向注浆法对尾矿砂进行固化,通过无侧限抗压强度、砂柱碳酸钙质量分数测试对比 2 种方法对砂柱固化的均匀性,并通过控制注入速率,进一步提高交叉-双向注浆法固化尾矿砂的均匀性,得到的结论如下:

1) 交叉-双向注浆法所得试样无侧限抗压强度达到了 963 kPa,而双向注浆法试样无侧限抗压强度仅为 634 kPa,砂柱的无侧限抗压强度提高了 51.9%。交叉-双向注浆法制备的砂柱中间部位碳酸钙质量分数达到了 22.08%,双向注浆法制备的砂柱中间部位碳酸钙质量分数则为 18.98%。

2) 通过控制注浆速率使得交叉-双向注浆法制备砂柱更完整。在菌液注入速率 1.2 mL/min、胶结液注入速率 1.4 mL/min 时,砂柱无侧限抗压强度达到了最大,为 1 211 kPa。此时砂柱中间部

位碳酸钙质量分数也提高到了最大值,为 24.31%;砂柱中间部位与砂柱两端碳酸钙质量分数变幅最小,为 24.31%~27.33%。

通过实验证明,交叉-双向注浆法能够使微生物技术加固的砂柱更加完整,碳酸钙分布更加均匀。为实际场地中尾矿库的固化处理提供了技术支持。对于降低尾矿库溃坝的风险具有实际意义。

[参 考 文 献]

- [1] 沈楼燕. 土工网格在尾矿库软弱坝基处理中的应用[J]. 有色冶金设计与研究, 1997, 18(3): 48-50.
- [2] 郭其青. 灌浆技术在斜槽地基加固工程中的应用[J]. 金属矿山, 2001, 300(6): 50-52.
- [3] 刘运思, 段仲沅. 某尾矿库加高扩容坝体加固处理[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(5): 9-21.
- [4] 陈溪海, 郭红仙, 程晓辉. 微生物矿化改善尾砂矿性质的试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 94-99.
- [5] LI H, SONG Y X, LI Q J, et al. Effective microbial calcite precipitation by a new mutant and precipitating regulation of extracellular urease[J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 269-275.
- [6] WANG Z Y, ZHANG N, CAI G J, et al. Review of ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP)[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(8): 1135-1146.
- [7] YANG Z, CHENG X H. A performance study of high-strength microbial mortar produced by low pressure grouting for the reinforcement of deteriorated masonry structures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 505-515.
- [8] 彭劼, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 733-740.
- [9] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(1): 15-21.
- [10] 梁仕华, 牛九格, 戴君, 等. 循环灌浆次数对微生物固化砂土效果的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 22-26.
- [11] CHENG L, SHAHIN M A, CORD-RUWISCH R. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments[J]. Geotechnique, 2014, 64(12): 1010-1013.
- [12] WHITAKER J M, VANAPALLI S, FORTIN D. Improving the strength of sandy soils via ureolytic CaCO₃ solidification by *Sporosarcina ureae*[J]. Biogeosciences, 2018, 15(14): 4367-4380.
- [13] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38-45.
- [14] ZHAO Y, YAO J, YUAN Z M, et al. Bioremediation of Cd by strain GZ-22 isolated from mine soil based on biosorption and microbially induced carbonate precipitation[J].

- Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 372-380.
- [15] KANG B, ZHA F S, LI H C, et al. Bio-mediated method for immobilizing copper tailings sand contaminated with multiple heavy metals[J]. Crystals, 2022, 12(4): 522.
- [16] DE OLIVEIRA D, HORN E J, RANDALL D G. Copper mine tailings valorization using microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113440.
- [17] JIN C Y, LIU H Y, GUO M X, et al. Experimental study on tailings cementation by MICP technique with immersion curing[J]. PLoS ONE, 2022, 17(8): e0272281.
- [18] KANG B, ZHA F S, DENG W H, et al. Biocementation of pyrite tailings using microbially induced calcite carbonate precipitation[J]. Molecules, 2022, 27(11): 3608.
- [19] 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.
- [20] 黄容聘, 邵光辉, 陈飞扬. 微生物单点注浆固土胶结区的形态演变特征[J]. 林业工程学报, 2019, 4(6): 158-164.
- [21] 彭劫, 黄慕凡, 谢高强, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 259-264.
- [22] 周杨, 张家铭, 朱纪康, 等. 基于原生微生物 MICP 的土体加固试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 132-139.
- [23] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 270-278.
- [24] CHENG L, CORD-RUWISCH R. In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 64-72.
- [25] HOANG T, ALLEMAN J, CETIN B, et al. Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP) [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(6): 808-822.
- [26] 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.

(责任编辑 吴亮)

采用接触算法的有限元计算结果表明,原吊耳结构能够满足钢箱梁结构的吊装安全,但对于拱肋结构,在吊耳孔内壁、加劲肋板上部、环板下缘均出现了高应力区,不能满足安全要求,需要进行加固设计。本文提出的加固方案能够很好地抵抗因面外分力而引起的弯矩,减小尺寸变化处的应力集中,能够满足吊装安全要求。

[参 考 文 献]

- [1] 邢启风, 邢硕. 施工现场用起重吊点的设计与应用[J]. 机械工程师, 2019(12): 129-131.
- [2] 阎慧杰, 李军, 段帅师, 等. 一种弹体吊具的结构设计与强度分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(3): 41-43.
- [3] 钟杰华, 史锐, 李晶, 等. 一种箭体吊具的结构强度有限元分析[J]. 机械, 2017, 44(7): 58-61.
- [4] 景玉, 黄勇, 毛立青. 有限元分析在吊耳设计中的应用[J]. 石油工程建设, 2021, 47(4): 61-63, 80.
- [5] 肖文勇, 余凯. 吊耳局部有限元建模技术分析[J]. 船舶工程, 2009, 31(增刊1): 94-97.
- [6] 王俊然, 程市, 曾超, 等. 基于有限元仿真的发动机吊耳强度分析[J]. 内燃机与动力装置, 2020, 37(6): 13-17.
- [7] 周齐齐, 袁正, 常亮. 重箱吊具力学性能有限元分析与研究[J]. 机械工程师, 2011(5): 76-78.
- [8] 朱成诚, 赵建平. 大型设备顶部板式工装吊耳的分析设计[J]. 压力容器, 2015, 32(7): 41-46.
- [9] 孙田鸽, 牛忠荣, 肖俊俊, 等. 窄基角钢输电塔结构力学性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 232-238.
- [10] 李兆峰, 牛忠荣, 吴健安. 超高层建筑高位转换层型钢混凝土转换节点强度分析与加固[J]. 建筑结构, 2020, 50(24): 61-68.
- [11] XU W L, WANG L C. Simplified model for static stress analysis of straight eccentric lug subjected to cosine distribution pressure[J]. Structures, 2021, 34: 2077-2086.
- [12] 陈跃. 大跨径钢管混凝土拱吊装施工技术研究[J]. 公路, 2021, 66(7): 165-169.
- [13] 赵凯, 庆光蔚. 一种多翼型吊具结构强度的分析及试验验证[J]. 工程机械, 2022, 53(8): 38-42.
- [14] 杨扬, 完海鹰, 高鹏, 等. 合肥新桥机场航站楼钢结构拼装桁架段施工仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(10): 1524-1527.
- [15] NICOLAE A, DORIN L B. An application to calculate the factors which are used to determine the tensile rupture load of a lug under axial, transverse or oblique loading[J]. INCAS Bulletin, 2013, 5(1): 19-28.
- [16] CHOI K S, KIM J J, CHOI J J. A study on the structural integrity of lifting lug without appendage[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2021, 20(11): 108-114.
- [17] 顾程磊, 王文龙, 刘晓欢. 方管接头吊耳结构设计方法讨论及规范比较[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(10): 81-83.

(责任编辑 吴亮)