

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1708

微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析

支永艳, 邓华锋, 肖 瑶, 段玲玲, 蔡 佳, 李建林

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 裂隙岩体的防渗加固是影响工程稳定和安全的 key 技术问题之一。在以往微生物加固砂土技术基础上, 将微生物加固技术应用于裂隙岩体灌浆加固, 研究表明, (1) 加固前围压对裂隙岩样的水力开度影响很大, 加固后裂隙被碳酸钙沉积物充填, 岩样的渗流由裂隙渗流转变为孔隙渗流, 单位渗流量和渗透系数由围压和渗透水压共同控制; (2) 微生物灌浆加固后, 不同围压和渗透水压力作用下裂隙岩样的单位时间渗流量减小了 80.12%~90.04%, 渗透系数可达到 10^{-6} cm/s 数量级; (3) 裂隙岩样灌浆加固过程中微生物诱导产生的 CaCO_3 沉积物具有较好胶结作用, 将劈裂岩样胶结为一个整体, 达到了加固防渗效果。研究成果可为裂隙岩体的灌浆加固提供较好的参考。

关 键 词: 裂隙岩体; 微生物; 灌浆加固; 渗流; 钙华

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2019) 增 1—0237—08

Analysis of seepage characteristics of fractured rock mass reinforced by microbial grouting

ZHI Yong-yan, DENG Hua-feng, XIAO Yao, DUAN Ling-ling, CAI Jia, LI Jian-lin

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education,

China Three Gorges University Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The seepage prevention and reinforcement of fractured rock mass is one of the key technical problems that affects engineering stability and safety. In this study, the microbial reinforcement technology is applied to grouting reinforcement of fractured rock mass on the basis of the previous technology of microbial reinforcement of sandy soil. The results show that the confining pressure before the reinforcement has a great influence on the hydraulic opening of the fractured rock sample. After the reinforcement, the fracture is filled with calcium carbonate sediments and the seepage of rock sample changes from fissure seepage to pore seepage, and the unit seepage flow and seepage coefficient are controlled by confining pressure and seepage water pressure. After the reinforcement of microbial grouting, the percolation rate per unit time of fractured rock samples decreases by 80.31%~90.04%, and the percolation coefficient can reach the order of 10^{-6} cm/s. In the process of grouting and reinforcement of fractured rock samples, CaCO_3 deposit induced by microorganism during grouting reinforcement of fractured rock samples have good cementation effect, and the splitted rock samples are cemented as a whole to achieve the effect of reinforcement and seepage prevention. The research results can provide a good reference for grouting reinforcement of fractured rock mass.

Keywords: fractured rock mass; microbe; grouting reinforcement; seepage; calc-sinter

1 引 言

由于长期的地质作用、风化作用和工程施工的影响, 自然界的岩体存在着节理裂隙等大量微观或

宏观的缺陷, 一方面影响岩体结构的稳定, 另一方面相对于低渗透性的完整岩石本身, 岩体中的节理、裂隙网络通常主导着地下水的运移方向。在大坝坝基、隧洞等岩体工程中, 为了满足渗透稳定或者控

收稿日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51679127, No.51439003); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室 (三峡大学) 开放研究基金项目 (No.2018KDZ04); 三峡大学硕士学位论文培优基金项目 (2017 级)。

This work was supported by the National Nature Science foundation of China (51679127, 51439003), the Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University) and the Ministry of Education Open Fund Project (2018KDZ04), and Master's Thesis Peiyou Fund Project of China Three Gorges University (2017).

第一作者简介: 支永艳, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 1635724527@qq.com

通讯作者: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

制渗漏量,需要对裂隙岩体进行灌浆加固,相关裂隙岩体的灌浆加固材料、技术和方法一直岩土工程领域研究的热点。

目前裂隙岩体工程中应用较为广泛的灌浆加固材料和方法主要有普通水泥浆^[1-2]和化学浆体^[3-4]等,果丽等^[5]、朱跃求等^[6]、谭勇等^[7]比较系统地介绍了水泥灌浆材料在堤坝、隧洞裂隙岩体加固工程中的应用,取得良好的工程效果。有学者在普通水泥浆基材基础上提出了掺粉煤灰、羟基高聚物、膨润土、硅化物、纤维材料等外加剂^[8-11]方法对灌浆料进行改性,以改善浆体的物理、力学性能,这些加固方法在裂隙岩体加固中起到较好的作用。

由于交叉学科快速发展,一些新的灌浆材料和方法也逐渐得到应用,如微生物灌浆加固技术就是近年发展起来的一种新型加固方法。该法主要利用微生物在多孔介质中生长、运移和繁殖等特性进行岩土体改性,主要有尿素水解、反硝化作用、三价铁还原和硫酸盐还原等 4 种方法,其中反硝化细菌生长周期较长、繁殖速度较慢、前期培养费用高;硫酸盐还原会产生硫化氢有毒气体,尿素水解机制相对简单,微生物种类为巴氏芽孢杆菌,反应过程容易控制,且在较短时间可以产生大量碳酸根离子,因此尿素水解微生物矿化技术应用较多。1995 年 Gollapudi 等^[12]研究发现,巴氏芽孢杆菌和砂混合后诱导矿化作用产生的 CaCO_3 能有效地填充空隙。1999 年 Shannon 等^[13]对巴氏芽孢杆菌诱导的 CaCO_3 沉积进行 X 射线衍射分析量化成分,确定 CaCO_3 沉积为方解石。2010 年 Jonkers 等^[14-15]发现微生物通过自身的新陈代谢将一些有机钙转化为方解石。Jiang 等^[16-17]、Whiffin 等^[18]、Harkes 等^[19]基于尿素水解原理进行了砂土、砾石土的微生物灌浆加固,发现加固后的力学性能明显改善。Chu 等^[20-21]、Anthony 等^[22]、Jianyun 等^[23]发现,微生物灌浆加固后砂土的渗透性能也得到了明显改善,渗透系数可以降低至 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。沈道健等^[24]、杨哲瀚等^[25]、金勇等^[26]、程晓辉等^[27-28]、钱春香等^[29-30]、郑俊杰等^[31-32]、刘汉龙等^[33-34]研究了巴氏芽孢杆菌加固对砂土强度、刚度、渗透性、抗液化性能的影响。

综合研究成果来看,微生物灌浆加固可以有效地改善砂土的力学性能和渗透性能,但加固对象主要是砂土,微生物加固技术在裂隙岩体灌浆加固中的研究很少。本研究将微生物加固技术应用于裂隙岩体灌浆加固,设计制备了单裂隙岩样,采用尿素水解微生物技术进行灌浆加固,通过对比分析加固

前、后裂隙岩样的渗透特性,研究了微生物技术在裂隙岩体灌浆加固中的效果和可行性。

2 试验方案设计

2.1 试样制备及基本参数

试验取样地点为某水利枢纽地下施工洞,由于坝址区岩体节理、裂隙比较发育,在施工过程中对两岸坝肩及坝基进行了帷幕灌浆,运行多年后局部位位置裂隙岩体出现了比较明显的渗漏情况。从现场取回的岩样为茅口组灰岩,制备的典型岩样见图 1(a)。由于包含天然裂隙岩样的制备难度很大,试验中用巴西劈裂法制备单裂隙岩样,见图 1(b)。岩样矿物成分以方解石、石英为主,其次为伊利石、白云石和黄铁矿等,具体矿物成分及含量(质量分数)见表 1。



(a) 完整岩样

(b) 单裂隙试样

图 1 典型岩样照片

Fig.1 Photos of typical rock samples

表 1 岩样矿物成分及含量

Table 1 Mineral composition and content of rock sample

矿物	伊利石	石英	方解石	白云石	黄铁矿
含量/%	8	41	46	4	1

2.2 微生物加固方案

在微生物灌浆加固试验中采用巴氏芽孢杆菌水解尿素,该细菌在酸碱和高盐度等恶劣环境中能保持较强的生物活性^[24]。巴氏芽孢杆菌在此反应过程中起到两个核心作用,一个是为水解尿素提供脲酶,另一个是为碳酸钙沉积提供成核点。该杆菌能以尿素为能源,通过自身新陈代谢活动产生大量的活性脲酶,将尿素水解生成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} 。灌浆加固所需药品见表 2。

表 2 微生物灌浆加固材料

Table 2 Microbial grouting reinforcement materials

试验所需溶液	名称	浓度/(mol/L)	一次加入的量/mL
固定液	CaCl_2	0.5	10
营养液	CaCl_2 、 $\text{Co}(\text{NH}_2)_2$	0.5	30
细菌溶液	巴氏芽孢杆菌		20

参考类似微生物加固砂土的经验^[27-28], 裂隙岩样灌浆加固的步骤: ① 将单裂隙岩样用蒸馏水浸泡 24 h, 清除试样表面杂质。② 将单裂隙岩样两瓣对齐后推入内径为 50 mm 的自制套筒中, 试样底部垫一块透水石, 与套筒底端平齐, 见图 2。③ 通过吊针滴管以 0.33 mL/min 的速率向套筒中滴入 10 mL 的固定液。④ 待固定液滴完后, 以 0.33 mL/min 的速率向套筒中滴入 20 mL 的细菌溶液, 后静置 2 h, 以保证细菌在试样内充分扩散并吸附。⑤ 向试样中以 0.5 mL/min 的速率滴入 30 mL 的营养液, 而后静置 12 h, 完成一次灌浆。

本试验设计进行了 15 次循环灌浆。参考文献[31-32]试验经验, 灌浆结束后将试样放在烘箱中, 控制温度为 60 °C, 烘干 24 h, 进行渗流试验。



图 2 微生物加固试验
Fig.2 Microbial reinforcement test

烘干后的试样见图 3。裂隙试样顶面附着一层 CaCO_3 沉积物, 在打磨机上打磨之后可见裂隙为 CaCO_3 沉积较好的粘结、充填。



(a) 烘干后试样 (b) 打磨后试样

图 3 微生物加固单裂隙岩样
Fig.3 Single fracture rock samples reinforced by microbe

为了对比分析微生物裂隙岩体灌浆加固的防渗效果, 同时制备了一组水泥浆体的灌浆加固试样, 典型试样见图 4。

2.3 裂隙岩样渗流试验方案

渗透试验时考虑不同深度岩体和不同渗透水压力情况, 其中轴向渗透水压力考虑 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 MPa 等 5 种情况, 为了避免渗流试验时水从岩样侧面流出, 侧向围压选取了 3.0、3.5、4.0、

4.5、5.0、5.5 MPa 六种。渗流试验在 HYS-4 型岩石渗透分析仪上进行, 见图 5。单裂隙岩样加固前后分别进行渗流试验, 以对比分析加固效果。



图 4 水泥浆加固单裂隙岩样
Fig.4 Single fracture rock sample reinforced by cement slurry



图 5 HYS-4 型岩石渗透分析仪
Fig.5 HYS-4 type rock penetration analyzer

3 加固前后渗流试验结果分析

3.1 加固前后裂隙岩样渗透速率比较分析

加固前后典型单裂隙岩样的单位时间渗流量与围压、渗透水压关系曲线如图 6、7 所示。从两个图中可以看出, (1) 加固前, 裂隙面是主要渗流通道, 围压一定时渗流量随渗透水压力的增大逐渐增大。围压为 3.0 MPa、渗透水压为 0.5~2.5 MPa 时单位时间渗流量为 1.80~3.34 mL/s, 围压为 5.5 MPa 时对应的单位时间渗流量为 0.72~1.61 mL/s, 围压由 3.0 MPa 增加到 5.5 MPa 时单位时间渗流量减小了 60.00%~51.79%, 说明随着围压增大, 渗透水压对渗流量的影响逐渐减小, 总体呈“喇叭型”分布, 渗透水压一定时渗流量随围压的增大逐渐减小。比较而言, 围压较低情况下裂隙岩样的渗流量相对较大, 相同渗透水压力变化导致的渗流量变化越明显, 随着围压逐渐增大, 渗流量逐渐减小并逐渐趋于平稳; (2) 微生物灌浆加固后裂隙被 CaCO_3 沉积密实封堵, 在围压和渗透水压力变化情况下岩样单位时存在明显区别, 一方面单位时间渗流量大幅度减小, 围压为 3.0 MPa 时不同渗透水压下的单位时间渗流量从加固前的 1.80~3.34 mL/s 减小到 0.18~

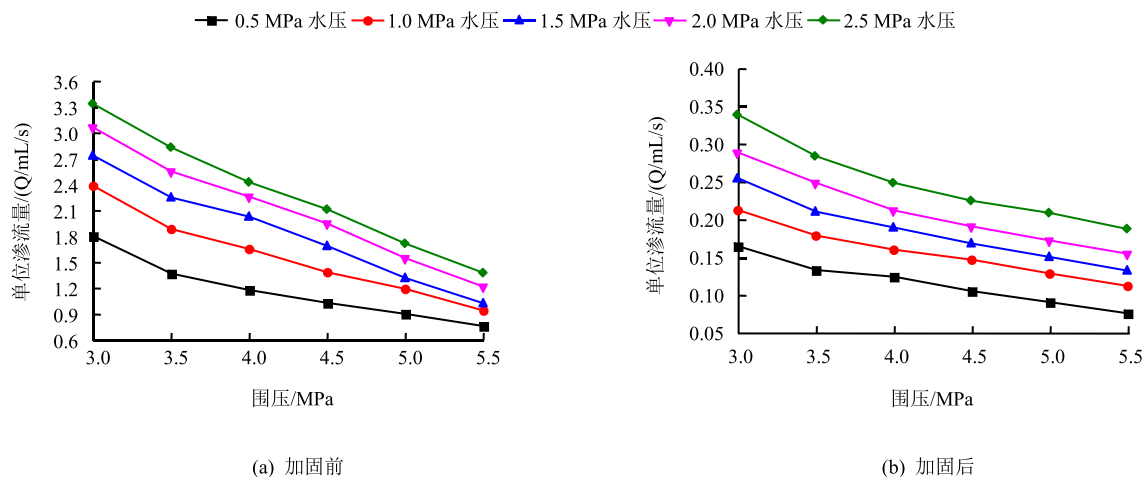


图 6 加固前后裂隙岩样渗流量随围压变化曲线

Fig.6 Variation of seepage flow of fractured rock sample with confining pressure before and after reinforcement

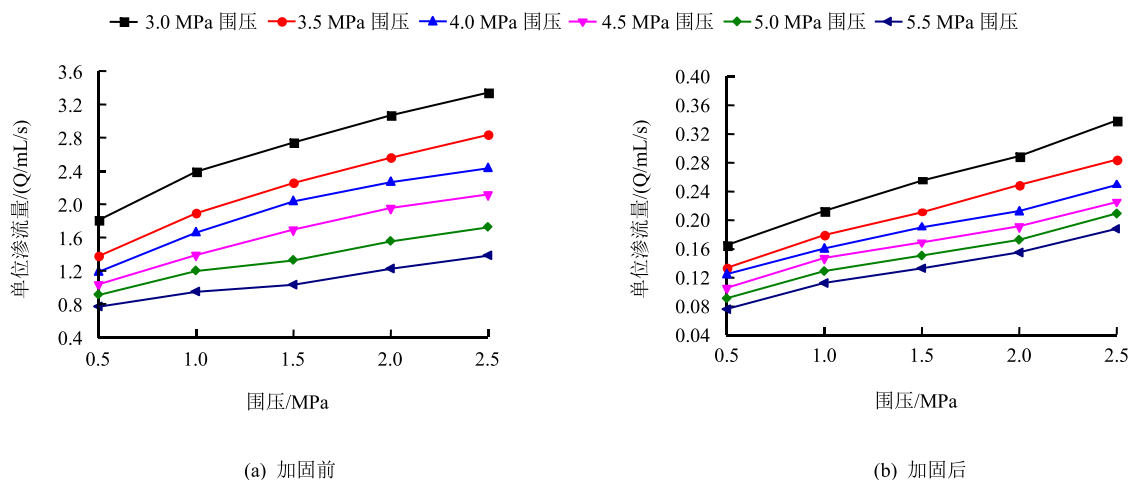


图 7 加固前后裂隙岩样渗流量随渗透水压变化曲线

Fig.7 Variation of seepage flow of fractured rock sample with osmotic water pressure before and after reinforcement

0.33 mL/s, 减小幅度为 89.31%~90.04%。围压为 5.5 MPa 时不同渗透水压下的单位时间渗流量减小幅度为 80.12%~82.01%, 比较而言, 围压越小, 单位时间渗流量减小幅度越大。另一方面, 加固后随着围压增大, 不同渗透水压力下的单位时间渗流量曲线由“喇叭型”分布转变为近似平行分布, 说明围压对渗流量的影响逐渐减弱, 主要是加固前围压对裂隙岩样的水力开度影响很大, 加固后裂隙被充填, 岩样的渗流由裂隙渗流转变为孔隙渗流, 围压主要影响岩样的整体侧向变形及孔隙压缩。

3.2 加固后裂隙岩样渗透系数分析

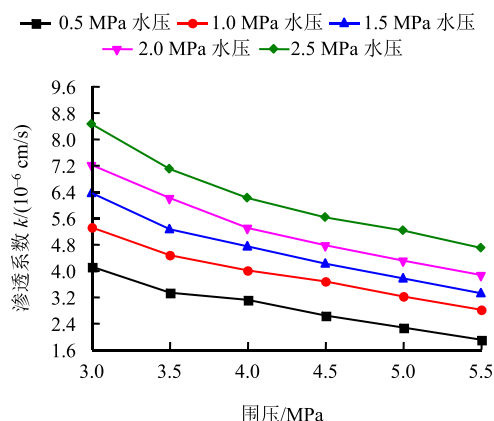
裂隙岩体灌浆加固后裂缝被 CaCO_3 沉积密实封堵, 在渗透水压作用下沿裂隙面的渗流量大幅度减小, 试验所用灰岩的渗透系数为 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。以往的研究表明^[16-19], 微生物加固后砂土的渗透系数可以达到 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$, 为了便于综合评价裂

隙岩体的灌浆加固效果, 按照全断面均匀渗透近似考虑。渗透系数计算公式^[34]:

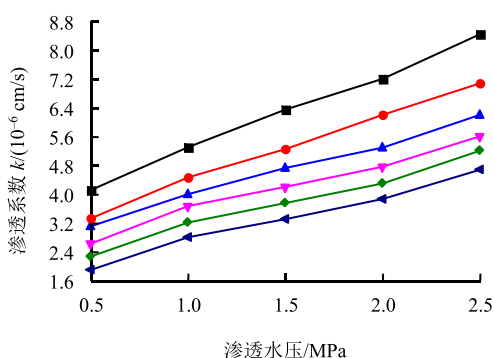
$$k = \frac{QL\gamma_w}{\Delta PA} \quad (1)$$

式中: k 为加固后裂隙岩样渗透系数; Q 为单位时间内通过岩样的流量; A 为岩样的截面积; γ_w 水的重度; L 为岩样的长度; ΔP 为岩样两端的压力差。

微生物加固后典型裂隙岩样渗透系数如图 8 所示, 微生物和水泥浆灌浆加固防渗效果比较如图 9 所示。从图 8、9 中可以看出, (1) 加固后同一渗透水压下渗透系数随围压的增大而减小, 相同围压情况下渗透系数随渗透水压的增大而增大, 但总体变化幅度不大。渗透系数在围压和渗透水压共同作用下总体呈线性变化, 说明微生物灌浆加固后裂隙被 CaCO_3 沉积粘结、充填, 裂隙渗流特性不再明显;



(a) 渗透系数随围压变化



(b) 渗透系数随渗透水压

图 8 加固后裂隙岩样渗透系数随围压和渗透水压变化曲线
Fig.8 Variation of permeability coefficient of fractured rock sample with confining pressure and osmotic pressure after reinforcement

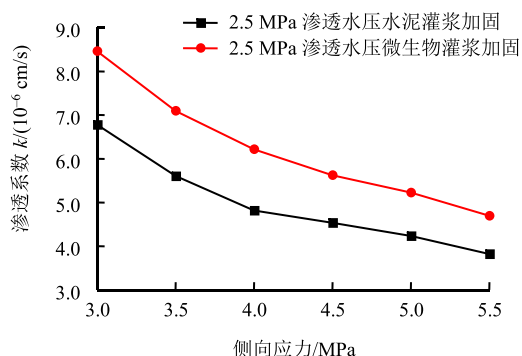


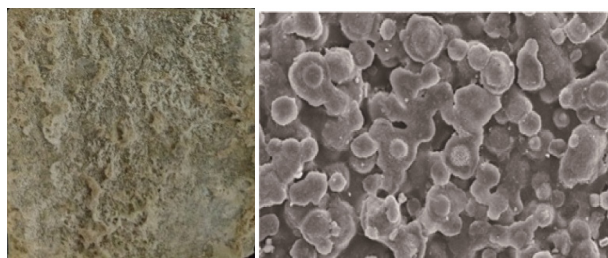
图 9 微生物和水泥浆灌浆加固防渗效果对比
Fig.9 Comparison of anti-seepage effect between microorganism grouting and cement slurry grouting

(2) 微生物灌浆加固后裂隙岩样的渗透系数为 $(1.91 \sim 8.46) \times 10^{-6}$ cm/s, 水泥浆灌浆加固试样后裂隙岩样的渗透系数为 $(1.01 \sim 6.78) \times 10^{-6}$ cm/s, 比较而言, 两种灌浆加固方法的防渗效果总体相当, 水泥浆的防渗效果略好一点。参考水利水电工程地质勘察规范^[35]附录 F 中岩土体渗透性等级分类, 渗透

系数小于 10^{-6} cm/s 为极微透水性, 说明微生物灌浆加固的防渗效果比较明显。碾压式土石坝设计规范^[36]要求一、二级坝和高坝坝基岩体灌浆后的透水率宜为 $3 \sim 5$ Lu (10^{-5} cm/s 数量级), 说明微生物灌浆加固可以满足工程岩体防渗要求的。

4 裂隙岩体微生物加固原理

本次试验中采用巴氏芽孢杆菌水解尿素的原理, 在裂隙岩体灌浆过程中微生物细胞表面吸附 Ca^{2+} , 通过自身新陈代谢产生脲酶, 将尿素水解生成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} , 由于微生物代谢产物胞外聚合物 (EPS) 中含有羟基、胺基、酰胺基、羧酸等负离子基团, 细菌细胞壁的特殊结构使得细菌表面通常带有负电荷, 并不断吸附周围溶液中的 Ca^{2+} , 使其聚集在细菌细胞外表面, 同时扩散到细胞内部的尿素分子在细菌产生的脲酶作用下不断分解出 CO_3^{2-} , 并运输到细胞表面, 从而以细胞为核, 在细菌周围析出碳酸钙沉积物, 吸附在岩样表面上的微生物为成核点矿化沉积出大量的 CaCO_3 , 随着灌浆次数的增加, 矿化沉积逐渐覆盖堆积填充和胶结岩样裂隙。微生物诱导产生的 CaCO_3 沉积具有胶凝性质, 与一般的化学作用生成的 CaCO_3 不同^[23], 将劈裂岩样胶结为一个整体, 实现了灌浆加固的目的。图 10 为裂隙面上 CaCO_3 沉积照片。



(a) 裂隙面上的 CaCO_3 (b) CaCO_3 电镜扫描照片

图 10 裂隙面上 CaCO_3 沉积照片
Fig.10 Photos of CaCO_3 deposition on crack surface

加固后裂隙岩样很好的粘结在一起, 采用机械方法分开后可见裂隙面被 CaCO_3 沉积很好的充填。加固前裂隙开度较大, 围压控制裂隙的闭合, 对渗流量的影响较大, 加固后岩样近似完整岩样, 围压对渗透系数影响明显减少, 渗透特性由渗透水压和围压共同控制。微生物灌浆加固后, 一方面有效减小了裂隙岩样的渗透性, 另一方面也改变了裂隙岩样的渗透规律。

碳酸钙质矿物在自然界中分布广泛, 灰岩、大理石、砂岩等岩石中都含有大量的碳酸钙矿物, 成

矿学的研究发现,微生物在这类岩石的生成过程中发挥了重要作用,自然界中存在多种微生物可以在新陈代谢过程中诱导生成碳酸钙。本文将微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术应用于裂隙岩体防渗加固,效果比较显著。在该工程地下灌浆平洞现场调研中发现,隧洞中渗漏点的钙华现象非常明显,部分比较细小的裂缝被钙化自然封堵住,不再渗漏,见图 11。本文试验采用的微生物灌浆加固方法,相当于模拟了其钙华的形成过程,从另一方面来说,将微生物加固技术应用于裂隙岩体加固,利用生成的碳酸钙粘结、充填裂隙面是可行的。



图 11 灌浆平洞钙化现象
Fig.11 Calcification in grouting adit

5 结 论

(1) 微生物加固前裂隙岩样的单位时间渗流量随渗透水压的增大而增大,随围压的增大而减小,而且在低围压时变化大,高围压时变化小。主要由于裂隙面是主要渗流通道,围压控制裂隙的闭合程度,进而控制渗流量的变化。

(2) 微生物灌浆加固后不同围压和渗透水压情况下岩样单位时间渗流量下降了 80.31%~90.04%,渗透系数达 10^{-6} cm/s 数量级。裂隙被 CaCO_3 沉积密实封堵,以微生物为核的 CaCO_3 沉积与裂隙岩样接触面胶结牢固,裂隙岩样近似完整岩样,渗流量和渗透系数由围压和渗透水压共同控制。

(3) 微生物诱导碳酸钙沉积的生成速度和强度可控,在整个生物矿化过程中巴氏芽孢杆菌基本不产生毒性物质或其他副产物,具有较高的强度及破坏性小、环境友好等特点,在岩土工程领域具有广泛的应用前景。本次仅开展了裂隙岩体微生物灌浆加固后的渗透性能研究,加固后裂隙岩体的相关力学性能有待进一步的研究完善。

参 考 文 献

- [1] 孙辅庭. 张拉型硬岩节理三维形貌表征及其灌浆前后抗剪强度特性试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
SUN Fu-ting. Experimental research on three-dimensional joint morphology quantification and shear strength property of tensile hard rock joints with and without cement grouting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [2] 李召峰. 富水破碎岩体注浆材料研发与注浆加固机理研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
LI Zhao-feng. Research and development of grouting material and grouting reinforcement mechanism of water-rich fractured rock mass[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [3] 刘兵. LW/HW 化学灌浆在水工建筑结构补强加固修复中的应用[J]. 吉林水利, 2018, 38(1): 43—45.
LIU Bing. Application of LW/HW chemical grouting in reinforcement and repair of hydraulic structures[J]. **Jilin Water Conservancy**, 2018, 38(1): 43—45.
- [4] 肖力. 矿用超细水泥灌浆材料的制备及性能研究[D]. 安徽: 安徽建筑大学, 2015.
XIAO Li. Study on the preparation and properties of ultrafine cement grouting materials for mining[D]. Anhui: Anhui Architecture University, 2015.
- [5] 果丽. 水利工程中堤坝防渗加固技术的应用[J]. 科学技术创新, 2018, 22(4): 125—126.
GUO Li. Application of seepage prevention and reinforcement technology in hydraulic engineering[J]. **Scientific and Technological Innovation**, 2018, 22(4): 125—126.
- [6] 朱跃求. 黏土固化剂浆液灌浆在水库大坝防渗加固中的应用[J]. 低碳世界, 2017, 7(20): 24—25.
ZHU Yue-qiu. Application of slurry grouting with clay curing agent in seepage prevention and reinforcement of reservoir DAMS[J]. **Low-Carbon World**, 2017, 7(20): 24—25.
- [7] 谭勇, 丁剑波, 蒋厚良, 等. 可控挤入灌浆防渗堵漏施工工法在大坝水电站引水隧洞加固工程中的应用[J]. 湖南水利水电, 2016, 61(3): 43—45, 51.
TAN Yong, DING Jian-bo, JIANG Hou-liang, et al. Application of the construction method of controlled grouting anti-seepage and plugging leakage in the reinforcement project of diversion tunnel of dam hydropower station[J]. **Hunan Water Conservancy and Hydropower**, 2016, 61(3): 43—45, 51.
- [8] 赵宏海, 李磊, 秦福刚, 等. 裂隙岩体加固浆材的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(7): 77—81.

- ZHAO Hong-hai, LI Lei, QIN Fu-gang, et al. Experimental study on reinforced slurry of fractured rock mass[J]. **Journal of the Yangtze River Academy of Sciences**, 2012, 29(7): 77—81.
- [9] 宋梅梅, 张瑞萍, 杨振杰, 等. 玻璃纤维对硫铝酸钙水泥石力学性能的影响[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 192—196.
- SONG Mei-mei, ZHANG Rui-ping, YANG Zhen-jie, et al. Effects of glass fiber on mechanical properties of calcium sulphoaluminate cement[J]. **Petroleum Drilling Technology**, 2017, 39(2): 192—196.
- [10] 王来贵, 陈强, 潘纪伟, 等. 聚丙烯纤维增强水泥砂浆力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 870—877.
- WANG Lai-gui, CHEN Qiang, PAN Ji-wei, et al. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced cement mortar[J]. **Bulletin of Silicate**, 2007, 36(3): 870—877.
- [11] 邓华锋, 肖瑶, 胥焘, 等. 碳纤维水泥基复合材料加固节理岩体试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 242—251.
- DENG Hua-feng, XIAO Yao, XU Dao, et al. Joint rock reinforced by carbon fiber cement-based composite materials test[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(2): 242—251.
- [12] GOLLAPUDI U K, KNUTSON C L, BANG S S, et al. A new method for controlling leaching through permeable channels[J]. **Chemosphere**, 1995, 30(4): 695—705.
- [13] SHANNON S F, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. **Soil Biology and Biochemistry**, 1999, 31(11): 1563—1571.
- [14] JONKERS H M, SCHLANGEN E. Development of a bacteria-based self healing concrete[C]//Proceedings of International FIB Symposium. U.S.A.: CRC Press, 2008: 425—430.
- [15] JONKERS H M, THIJSSSEN A. Bacteria mediated remediation of concrete structures[C]//The Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructures. The Netherlands: [s. n.], 2010: 833—840.
- [16] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation(MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. **Géotechnique**, 2016, 67(1): 42—55.
- [17] JIANG N T, SODA K, DAWOUD O. Experimental study of the mitigation of soil internal erosion by microbially induced calcite precipitation[C]//Geo-Congress Technical, [S. l.]: [s. n.], 2014: 1586—1595.
- [18] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Western Australia: Murdoch University, 2004.
- [19] HARKES M P, BOOSTED J L, VAN PAASSEN L A, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method-bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs. strength[C]//Proceedings of 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering. Delft: Technische Universiteit Delft Press, 2008: 37—41.
- [20] CHU J, IVANOV V, HE J, et al. Development of microbial geotechnology in Singapore[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2011, 211: 4070—4078.
- [21] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(2): 227—285.
- [22] ANTHONY S, MARTIN P, ALAN E, SHAFKAT B. The reduction of the permeability of a lateritic soil through the application of microbially induced calcite precipitation[J]. **Natural Resources**, 2017, 8(5): 337—352.
- [23] WANG Jian-yun, TITTELBOOM K V, Nele De Belie, et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete[J]. **Construction and Building Materials**, 2011, 26(1).
- [24] 沈道健, 王照宇, 梅岭, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固地基技术研究进展[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 390—398.
- SHEN Dao-jian, WANG Zhao-yu, MEI ling, et al. Research progress on microbium-induced calcium carbonate precipitation and foundation reinforcement technology[J]. **Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)**, 2017, 31(3): 390—398.
- [25] 杨哲瀚. 微生物灌浆加固土体技术的发展[J]. 中国高新区, 2017, 17(23): 175—175.
- YANG Zhe-han. Development of microbiological grouting technology for soil reinforcement[J]. **China High Technology Zone**, 2017, 17(23): 175—175.
- [26] 金勇, 王照宇, 张楠. 微生物灌浆加固砂土堤岸研究进展[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 1—8.
- JIN Yong, WANG Zhao-yu, ZHANG Nan. Research progress of microbiological grouting on embankment reinforcement[J]. **Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition)**, 2017, 30(3): 1—8.
- [27] 李萌, 郭红仙, 程晓辉, 等. 土壤中产脲酶细菌的分离及对砂土固化效果的室内试验[J]. 工业建筑, 2015,

- 45(7): 8—12, 18.
- LI Meng, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, et al. Isolation of urease bacteria from soil and indoor experiments on curing effects of soil[J]. **Industrial Architecture**, 2015, 45(7): 8—12, 18.
- [28] 韩智光, 程晓辉. 营养盐对微生物加固可液化砂土效果的探讨[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 19—22, 35.
- HAN Zhi-guang, CHENG Xiao-hui. Effects of nutrient salts on microorganism strengthening of liquefiable sand soil[J]. **Industrial Architecture**, 2015, 45(7): 19—22, 35.
- [29] 钱春香, 任立夫, 罗勉. 基于微生物诱导矿化的混凝土表面缺陷及裂缝修复技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 619—631.
- QIAN Chun-xiang, REN Li-fu, LUO Mian. Research progress on surface defects and fracture repair technology of concrete based on microbium-induced mineralization[J]. **Journal of Silicate Science**, 2015, 43(5): 619—631.
- [30] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537—1548.
- QIAN Chun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Research progress of microbiological grouting in soil reinforcement[J]. **Geotechnical Mechanics**, 2015, 36(6): 1537—1548.
- [31] 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(增刊 2): 397—402.
- CUI Ming-juan, ZHENG Jun-jie, LAI Han-jiang. Experimental study on the influence of particle size on the strength of solidified sandy soil of microorganisms[J]. **Geotechnical Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 397—402.
- [32] 崔明娟, 郑俊杰, 章荣军, 等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 392—396.
- CUI Ming-juan, ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, et al. Effect of chemical treatment on strength of solidified sandy soil of microorganisms[J]. **Geotechnical Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 392—396.
- [33] 刘璐, 沈扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3410—3416.
- LIU Lu, SHEN Yang, LIU Han-long, et al. Application of microbial cementation in the prevention of dike failure[J]. **Geotechnical Mechanics**, 2016, 37(12): 3410—3416.
- [34] 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 Jian, CHU Jian, LIU Han-long, et al. Research progress of microbial geotechnical technology[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 643—653.
- [35] 水利水电规划设计总院. GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Huanghe Water Resources Commission Survey Planning and Design Institute. GB 50487-2008 Specification for geological survey of water conservancy and hydropower engineering[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2008.
- [36] 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Huanghe Water Resources Committee Survey Planning and Design Institute. SL 274-2001 Design code for roller compacted earth-rock dam[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2001.
- 上接第 236 页
- [11] 边学成, 程翀, 王复明, 等. 高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后动力性能及长期耐久性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 562—568.
- BIAN Xue-cheng, CHENG Chong, WANG Fu-ming, et al. Experimental study on dynamic performance and longterm durability of highspeed railway subgrade rehabilitated by polymer injection technology[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 562—568.
- [12] 河南省建筑材料研究院, 上海市建筑科学研究院. JC 936—2004 单组分聚氨酯泡沫填缝剂[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- Henan Institute of Building Material, Shanghai Research Institute of Building Science. JC 936-2004 One-component polyurethane foam[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2004.
- [13] 张克恭, 刘松玉, 等. 土力学(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- ZHANG Ke-gong, LIU Song-yu, et al. Soil mechanics(third edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [14] 南京水利科学研究院. SL 237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.