

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.008

微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用

谈叶飞¹,郭张军²,陈鸿杰³,陈舟⁴

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所,江苏 南京 210029; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西 西安 710100;
3. 华能澜沧江水电股份有限公司,云南 昆明 650214; 4. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210024)

摘要: 利用微生物固结对岩土体进行防渗透加固,在安徽滁州大洼水库黏性土堤防3个区段开展防渗透试验,通过培养巴氏芽孢杆菌对尿素进行水解产生大量碳酸根离子并和钙镁离子结合生成碳酸钙沉积,从而堵塞坝体内部孔隙/裂隙。利用坝体内部测压管对内部水头进行监测,同时监测渗漏部位的渗漏量,试验结果表明,该技术能迅速降低黏性土堤坝段渗透系数2个数量级。整个试验过程中,试验段微生物固结过程分为3个主要阶段:0~80 h为微生物固结发展期;80~120 h为高峰转折期;120 h以后为封闭拖尾期。处理后土体渗透系数为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s,同时土样平均强度提高约13%(不固结不排水剪切试验结果)。利用电子显微镜和EDS能谱仪对土体孔隙内部生成物进行成分检测,结果表明碳酸钙是其主要组成物质。

关键词: 微生物固结技术;追踪防渗;堤防;土坝防渗;固结加固;巴氏芽孢杆菌;滁州大洼水库

中图分类号: TV871 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)06-0521-06

Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank

TAN Yefei¹, GUO Zhangjun², CHEN Hongjie³, CHEN Zhou⁴

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China;
3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China;
4. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Bio-clogging is a novel technology in soil seepage prevention and consolidation, and this technology was applied in 3 bank sections of Dawa Reservoir in Chuzhou, Anhui Province. *Bacillus pasteurii* was chosen as the agent to generate carbonate ions, which could precipitate with calcium/magnesium ions to clog pores and fractures inside the earth bank. In these applications, inside water heads were monitored using installed piezometers and the flow rate of leakage was also measured. Results showed that the reduction rate of the bank soil conductivity can reach 99% in a short time. The whole process of in-situ test can be divided into three main stages: 0~80 h is the development period of bio-clogging; 80~120 h is the peak period and then followed by the tailing period. The soil conductivities were around $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s after bio-clogging treatment, meanwhile the soil strength increased by 13% according to UU tests. Samples inside of the pores were detected using electronic microscope and EDS detector, and main composition was proved to be calcium carbonate.

Key words: bio-clogging; tracing seepage prevention; dike; seepage prevention of dike; soil consolidation; *Bacillus pasteurii*; Chuzhou Dawa Reservoir

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC04050,2016YFC0402807);南京水利科学研究院院基金(Y118015)

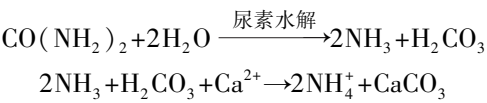
作者简介: 谈叶飞(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事岩土体渗流安全研究。E-mail:tan8112@gmail.com

引用本文: 谈叶飞,郭张军,陈鸿杰,等. 微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):521-526.

TAN Yefei, GUO Zhangjun, CHEN Hongjie, et al. Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(6):521-526.

渗漏是水利、岩土及环境工程中常见的棘手问题,通常会造成工程运行成本升高、水资源浪费及污染等后果,严重的甚至直接威胁工程安全^[1-5]。在水利工程中,许多堤防、大坝溃决都是由于坝体本身的渗漏引起。目前对于堤防坝体内部隐蔽的渗漏通道的治理主要还是以灌注水泥浆或化学浆等传统手段为主,这些技术固然有其优点,然而也存在施工难度大、注浆孔深度及位置难以把握等缺点^[6-7]。

微生物导致的生物堵塞是微生物在其繁殖及新陈代谢过程中形成复杂生化作用的结果^[8-10],其对土体的直接作用就是导致土体颗粒间的孔隙减小,从而降低土体的渗透性。生物堵塞作用通常分为生物膜作用和生物矿化作用,常见的微生物诱导钙质沉积作用即是生物矿化作用的一种。自然界中的生物堵塞往往是生物膜和生物矿化共同作用的结果,对微生物的这种自然属性进行优化并加以利用是近年来新出现的一种岩土工程手段^[11]。该技术最初被用来处理垃圾填埋场的渗漏问题,利用特定微生物(例如巴氏芽孢杆菌等)对尿素进行水解产生大量碳酸根离子,进而与水中的钙镁离子结合,形成碳酸盐沉积覆于土体颗粒表面,堵塞土体孔隙并黏结土体颗粒,使土体渗透性下降的同时能提升其强度^[12],其主要作用步骤可简化为^[13-15]



目前,国内外已有诸多研究人员对该技术进行了一些较深入的研究^[6, 16-19],与传统的灌浆防渗技术相比,利用微生物进行防渗能够实现地下隐蔽渗漏通道的自动追踪,即无须知道渗漏通道的确切位置,菌液和固结液以溶液形式从灌注孔进入地下后,能跟随渗漏水流动而自动进入渗漏通道并在通道内繁殖固结,实现防渗加固,极大地简化防渗施工流程,对堤防大面积漫渗漏具有良好的修复效果。由于该技术使用的微生物为自然界中普遍存在的环境菌种^[20-21],对环境不产生污染。该技术在水利、岩土、环境等领域有着广阔的应用前景,对提高堤防安全系数、减少渗漏浪费、提升水资源利用效率具有重要意义。

1 试验研究区概况

试验实施地河东村大洼水库位于滁州市琅琊山西北,距滁州市区直线距离约7 km,地貌类型属岗地地貌单元。场地地面黄海高程为13.51~15.39 m,最大相对高差为1.88 m。场地内有若干水塘及排水渠等,水面标高约12.60 m,水深约0.4 m。根据现场钻探、原位测试及室内土工试验综合分析,拟建场地勘探深度范围内岩土体自上而下分为2个工程地质层(编号①、②)。①为素填土,灰黄色,湿~很湿,松散,以粉质黏土为主,顶部含少量块石及植物根茎;②为粉质黏土,灰黄色,可塑,局部硬塑,无摇振反应,稍有光泽,韧性中等,干强度中等,含少量铁锰质结核及高岭土条带。

勘察期间实测地下水初见水位埋深0~1.95 m,水库下游左岸山脚处有泉水溢出,稳定水位埋深0.38~1.99 m。根据本地区区域水文地质资料,地下水位季节性变化明显,丰水期与枯水期年变化幅度1.00 m左右。

该地层情况在长江下游区域具有一定的代表性,同时,相对于相对松散的砂性土条件,此种地质条件并不利于自动追踪防渗技术的应用,因为其内部孔隙/空隙之间的互通性不如砂性土,在相同渗漏条件下,单孔灌注固结的影响范围可能低于砂性土,即要达到相同的防渗效果,黏性土条件下可能需要更多灌注孔。

2 试验材料及方法

2.1 巴氏芽孢杆菌浓缩液制备

利用陶瓷珠吸附,将巴氏芽孢杆菌菌株冻存于-80℃冰箱进行保存。使用时,需首先将菌株进行平板复苏培养。为了将其进行数量扩增,将所得悬浊液均分后注入8个1 L容量的三角烧瓶中,每个烧瓶中装有约300 mL的DSMZ配方培养液并预先经高温灭菌处理。将烧瓶放置于恒温摇床内,保持30℃恒温振荡约10 h后取出。将其转移至高速离心机中进行分离(转速约为6 000 r/min),然后倒掉多余液体,并用移液器吹匀,最终得到巴氏芽孢杆菌浓缩液约1.5 L,其OD600吸光度约为2.077,折合细菌密度约为2.60×10⁹ cells/mL。将其置于4℃环境冷藏备用,并同时制备DSMZ配方营养液以供现场激活细菌使用。

2.2 固结液及营养液的现场配制

根据前期室内试验的结果,将现场使用的固结营养液配方浓度进行了适当调整,其质量浓度配方如下:

胰蛋白酶 10 g/L,大豆蛋白胨 2 g/L,无水氯化钙 50 g/L,尿素 35 g/L。

为降低应用成本,方便现场施工,配制用水则利用现场清洁水源,进行过滤后使用。普通自来水因其中残留次氯酸,对微生物有抑制作用,不宜作为水源。过滤装置如图 1 所示,滤层从上往下分别为粗粒石英砂层、细粒石英砂层和过滤纤维层组成。为防止水从桶壁下渗,将出水管的进口端延长至过滤纤维层内部,并进行包裹。

2.3 试验布置

试验坝段主要有 3 段,分别为 1 号坝段、2 号坝段和 3 号坝段。其中 1 号坝段渗漏区长度约 10 m, 2 号坝段渗漏区长度为 12 m,是在原有排水渠基础上进行改造而成。为了测试生物防渗性能,在原有排水渠两端进行封闭,并留有固定高度的溢流口,利用水泵往其中泵水,使之成为能控制蓄水高度的蓄水池;此外,在排水渠一侧进行开挖,以便观测堤坝渗漏情况并测量渗漏量。堤坝内安装测压管,用以检测其内部水力状况(图 2、图 3)。3 号坝段为现场原有排水渠,深度为 1.8 ~ 1.9 m,渗漏区长度约 20 m,其南侧为蓄水池塘,坝段宽度呈喇叭口形,宽度为 2.7 ~ 5 m,安装 3 排测压管(图 4),测压管为内径 2.5 cm 有机玻璃管,下端钻孔制作作为花管,长度 1.5 m。安装后,测压管顶部高出坝段顶部 10 cm,其底部位于渠底以上 60 cm 处。测压孔为荷兰钻手工开孔,灌注孔则是在荷兰钻开孔基础上利用小型汽油机钻机进行扩孔处理并安装不锈钢过滤器,过滤尺寸为 0.5 mm。

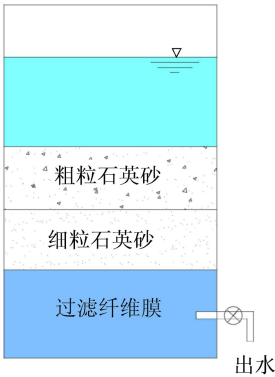


图 1 现场过滤装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the filter for situ use

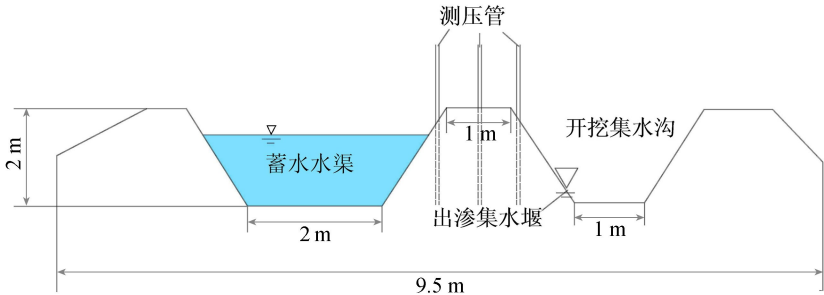


图 2 1 号、2 号坝段横截面示意图
Fig.2 Cross sections No.1 and No.2 of the dam

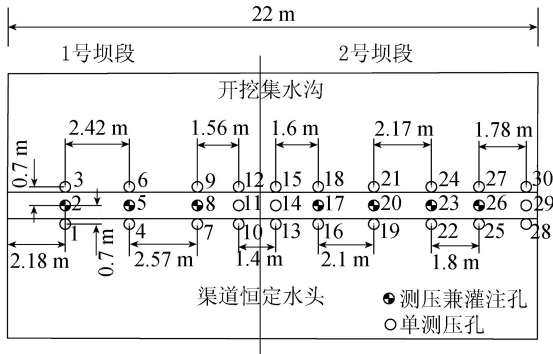


图 3 1 号、2 号坝段布置

Fig.3 Diagram of dam section No.1 and No.2

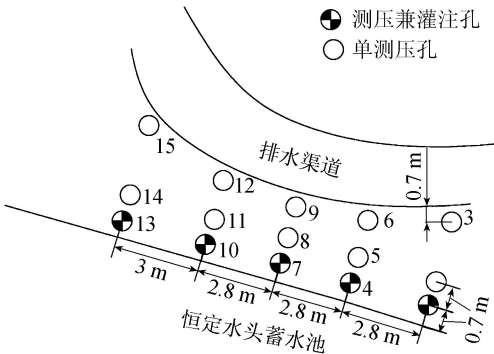


图 4 3 号坝段布置

Fig.4 Diagram of dam section No.3

2.4 现场试验步骤

本次应用试验中,1 号、2 号坝段最大水头差维持在 1.8 m,蓄水后,实测稳定渗漏量分别为 20.62 mL/s 和 33.96 mL/s。3 号坝段长 15 m,实测渗漏量 14.52 mL/s。试验现场自动追踪防渗操作流程如下:

- a. 确定灌注孔位置。观察渗漏情况,确保灌注液体能顺利进入渗漏通道,以提高防渗效率,降低施工成本。试验开始时,可先稀疏布置,在渗漏严重区域可适当加密灌注孔数目。
- b. 根据渗漏部位的实际渗漏情况,先将巴氏芽孢杆菌浓缩液灌入灌注孔过滤器中,并将事先准备好的

DSMZ 配方营养液也灌入其中。此步骤的主要目的是尽快激活巴氏芽孢杆菌及土壤原生微生物的生物活性,并利用灌注营养液产生的压力差将巴氏芽孢杆菌导入渗漏通道,避免细菌集中于灌注孔四周。进行营养液灌注时,应控制灌注孔内水头高度,其压力不宜长时间高于上游水头,以免营养液等进入上游水体。灌注营养液的同时需监测下游渗出液的性质变化情况(例如电导率等),如出现显著变化则停止注入营养液,并静待 5~10 h。如巴氏芽孢杆菌浓缩液不足,后期随时可进行补充添加。本次试验中,每个坝段均进行了 2 次细菌浓缩液的灌注,分别是试验开始时和 72 h 后进行补充。每个坝段 2 次共注入细菌浓缩液约 3 L。

c. 注入制备好的固结液。此步骤是为微生物提供水解物质及钙离子,注入时的注意事项与步骤 b 中营养液注入类似,应控制注入时的压力不宜过高,以免对渗漏通道产生破坏,增大渗漏量。制备的固结液应尽快使用,以免成分变质而影响效果。注意灌注孔过滤器的堵塞情况,如发现过滤器被碳酸钙堵塞造成灌注不畅,应及时取出并用稀盐酸进行清洗后再使用。本次现场试验中,24 h 内进行 2 次固结液灌注,时间分别为上午 6:00 和下午 5:00,间隔约 11 h。

d. 监测渗漏变化情况。通过定时测量渗漏量及各测压管水头来定量判断坝体内部的固结堵塞情况,达到预期目标后即停止试验。

2.5 防渗试验后期检测

防渗试验完成后,在 1 号坝段孔 4/5/6 处和 2 号坝段孔 17/20 之间进行了探槽开挖取样,样品经现场密封后,在实验室进行渗透系数测试及不固结不排水剪切试验,并利用电子显微镜及 EDS 能谱仪进行检测。

3 试验结果及分析

3.1 防渗试验结果及分析

首先对 1 号坝段开展防渗施工,以便与旁边的 2 号坝段进行对比。1 号坝段施工总时长为 125 h,2 号坝段持续施工时间为 257 h,3 号坝段持续施工时长 149 h。各坝段在上游侧稳定水头条件下渗漏量的变化情况如图 5 所示。从图 5 中可见,3 个试验坝段均能在较短时间内实现渗漏通道的堵塞,并且渗漏量下降幅度十分显著。其中 2 号坝段虽然施工时长达到 257 h,但实际上,其在 150 h 左右时渗漏量已经降低了 94% 以上,只有 2.08 mL/s。

各试验坝段在防渗处理施工期间典型剖面测压管中水位变化如图 6 所示(以渠底高程为基准面)。因测压管埋深限制,水位监测最小值为 60 cm。其中 1 号、7 号和 22 号孔因位于上游位置,初始时刻水位较同剖面其他 2 个孔更高,而在防渗施工过程中,其水位变化幅度较小,所有监测剖面中,上游测压管水位最大降幅仅 10 cm,这是由于灌注孔位于其下游位置,而且灌注过程中控制灌注压力不长时间超过上游水压力,使营养液及固结液主要往下游方向流动。下游孔在施工处理过程中,其内部水位迅速下降,说明在此过程中,其上游水流先被截断,导致此位置水流逐渐排出后无法得到上游供给。从各剖面水位监测数据来看,试验开始后 80~120 h 是固结淤堵的高峰期,说明此区间段内,相应的

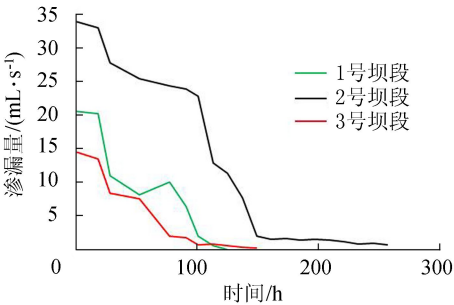


图5 各试验坝段渗漏量变化
Fig.5 Leak change of each section

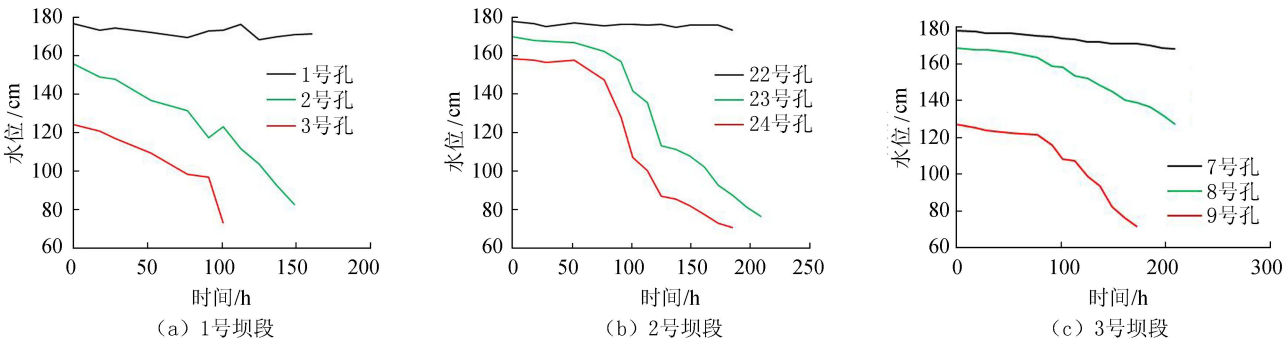


图6 各坝段施工期间典型剖面测压管水头变化情况
Fig.6 Changes of water heads in piezometers of dam sections

微生物最为活跃,灌注孔和下游监测孔中的水位从稳步下降转变为快速下降。之后,随着土体渗透系数降低,阻碍了营养物质的输送,使水位下降速度逐步放缓。从图 6 中可以看出,3 号试验段渗漏量出现了较长时间的拖尾现象。试验停止后的 3~4 d 内,维持上游水位不变,各测压管水头基本无明显变化(期间有出现降雨,试验坝段均用塑料薄膜覆盖保护)。

3.2 试验后期检测

防渗试验完成后,在 1 号和 2 号坝段进行了探槽开挖和取样,探槽宽度约 20 cm,贯穿整个坝体断面,在不同深度及位置进行了土体取样。开挖后坝体断面见图 7,其内部空隙被大量黑色和灰白色物质填充,坝体内部土体潮湿但无积水。



(a) 探槽揭露地下孔隙充填情况 (b) 充填后的土样

图 7 坝体内部空隙填充状况

Fig.7 Filled pores in the dam

由于坝体内部土体及孔隙分布等具有强烈的非均质各向异性特征,为了对比生物淤堵对土体强度造成的影响,探槽开挖时在 5 个显著固结部位进行了取样。同样,在坝段上层未固结部位也进行了 5 个土柱的采样。将这些样品进行室内不固结不排水剪切试验和渗透系数测量,试验结果如表 1 所示。固结部位抗剪切强度普遍比未固结部位高出约 13.6%,这也说明经微生物固结后的部位更能承受高水头压力。5 个固结部位土柱渗透系数分别为: 4.36×10^{-6} cm/s、 7.55×10^{-6} cm/s、 1.43×10^{-5} cm/s、 3.94×10^{-6} cm/s 和 6.70×10^{-5} cm/s。堤防平均渗透系数从 2.75×10^{-3} cm/s 降为 1.94×10^{-5} cm/s,下降幅度为 99.3%,该测试结果优于 SL274—2001《碾压式土石坝设计规范》^[22]中对均质坝防渗料的设计要求。

利用电子显微镜和 EDS 检测仪器对样品中孔隙内部灰白色物质进行了检测,检测结果表明碳酸钙是其主要组成成分。

4 结论与展望

现场防渗试验结果表明,利用微生物固结技术可实现方便快捷的野外地下防渗作业,无须侦测地下渗漏通道位置及走向,实现自动追踪防渗。试验段土体渗透系数下降幅度大,单孔灌注影响范围广,在防渗的同时能加强土体自身强度,相对于传统的一些加固及防渗方法具有独特的优势。根据现场试验结果,得出该技术应用中历经的 3 个主要发展阶段分别为生物固结发展期、高峰转折期和封闭拖尾期。在固结发展期,由于地下渗漏通道畅通,可根据下游渗出液成分调整营养液配制比例及灌注频率;在拖尾期间,由于渗漏通道封闭,营养液比例和灌注频率对渗透系数的影响逐步降低。由于微生物固结防渗技术出现时间短,虽然也有零星的工程应用,但对其机理等研究仍然处于起步阶段,若能将其成功应用于堤防等水利工程边坡的加固及防渗中,势必对加强工程运行安全和降低成本起到积极作用,继续开展该技术的规律及应用研究前景十分广阔。

参考文献:

[1] MICHELI E, RLARSEN E W. River channel cutoff dynamics, Sacramento River, California, USA[J]. River Research and

表 1 坝段内部固结与未固结部位不固结不排水试验结果对比

Table 1 UU test results for consolidated and unconsolidated soil samples in the dam

部位	抗剪切强度/kPa					
	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	试样 5	均值
固结部位	422	453	396	407	411	418
未固结部位	374	329	384	371	382	368

Applications, 2011, 27(3):328-344.

- [2] 毛昶熙,段祥宝,李思慎,等. 堤防工程手册[M]. 北京:水利水电出版社, 2009:2-10.
- [3] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1):16-22. (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1):16-22. (in Chinese))
- [4] 罗玉龙,孔祥峰,罗斌,等. 深厚覆盖层中型扩底防渗墙对防渗效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):140-145. (LUO Yulong, KONG Xiangfeng, LUO Bin, et al. Influence of a new cutoff wall of expanded base type on the seepage controlling in deep overburden foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2):140-145. (in Chinese))
- [5] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1):36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect-induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1):36-44. (in Chinese))
- [6] 谈叶飞,谢兴华,吴涛,等. 砂土体微生物固结的微观及力学特性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(9):112-117. (TAN Yefei, XIE Xinghua, WU Tao, et al. Study on they micro scale mechanical characteristics of bio cementation in sand columns [J]. Yellow River, 2017, 39(9):112-117. (in Chinese))
- [7] KALKANI E C. Geological conditions, seepage grouting, and evaluation of piezometer measurements in the abutments of an earth dam[J]. Engineering Geology, 1997, 46(2):93-104.
- [8] ERYÜRÜK K, YANG S, SUZUKI D, et al. Reducing hydraulic conductivity of porous media using CaCO_3 precipitation induced by *Sporosarcina pasteurii*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2015, 119(3):331-336.
- [9] AAL G Z A, ATEKWANA E A, ATEKWANA E A. Effect of bioclogging in porous media on complex conductivity signatures [J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2010, 115(G3):G00G07.
- [10] AL-THAWADI S. Consolidation of sand particles by aggregates of calcite nano particles synthesized by ureolytic bacteria under non-sterile conditions[J]. Journal of Chemical Science and Technology, 2013, 2(3):141-146.
- [11] SMITH A, PRITCHARD M, EDMONDSON A, et al. The reduction of the permeability of a lateritic soil through the application of microbially induced calcite precipitation[J]. Natural Resources, 2017, 8:337-352.
- [12] MALEKI M, EBRAHIMI S, ASADZADEH F, et al. Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2016, 13(3):937-944.
- [13] BROVELLI A, MALAGUERRA F, BARRY D A. Bioclogging in porous media: model development and sensitivity to initial conditions[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(5):611-626.
- [14] HAND V L, LLOYD J R, VAUGHAN D J, et al. Experimental studies of the influence of grain size, oxygen availability and organic carbon availability on bioclogging in porous media[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(5):1485-1491.
- [15] SINGH R K, DATTA M, NEMA A K. A new system for groundwater contamination hazard rating of landfills[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(2):344-357.
- [16] YEFEI T, XINGHUA X, SHIQIANG W, et al. Microbially induced CaCO_3 precipitation: hydraulic response and micro-scale mechanism in porous media[J]. Science Asia, 2017, 43(1):1-7.
- [17] 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.
- [18] YOSHIKO F, TINA G, MARK D, et al. Stimulation of microbial urea hydrolysis in groundwater to enhance calcite precipitation [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(8):3025-3032.
- [19] PHILLIPS A J, CUNNINGHAM A B, GERLACH R, et al. Fracture sealing with microbially-induced calcium carbonate precipitation: a field study[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 50(7):4111-4117.
- [20] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, et al. Bacteriogenic mineral plugging[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1996, 13(8):57-67.
- [21] VARENYAM A, MUKHERJEE A. A review of microbial precipitation for sustainable construction[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:1224-1235.
- [22] 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 碾压式土石坝设计规范:SL274—2001[S]. 北京:中华人民共和国水利部, 2002.