

DOI: 10.11779/CJGE2023S10050

基于 MICP 技术的膨胀土变形控制机理研究

魏 然¹, 张丽雅², 肖智睿³, 严 俊², 王 波²

(1. 北京航空航天大学, 北京 102206; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

3. 中电建建筑集团有限公司, 北京 100120)

摘 要: 膨胀土因强亲水性遇水浸泡变形迅速增大对渠道及边坡工程等岩土构筑物造成极大安全隐患。基于微生物诱导碳酸钙沉积技术 (MICP) 固化和改善土体结构的性能特点, 开展了巴氏芽孢八叠球菌抑制膨胀土胀变特性试验和机理研究。研究表明, 使用巴氏芽孢八叠球菌治理膨胀土, 可有效控制膨胀土膨胀变形, 其在最优菌液条件下抑制膨胀变形能力可达到 99.8%, 表明其可行有效。此外膨胀土矿物中游离的钠、钙、锰、铝以及水分子等与菌液的综合化学作用形成的钙化颗粒起到了胶结充填与包裹作用, 以及微生物作用促成的膨胀土中蒙脱石向伊利石明显转变, 抑制了膨胀土遇水膨胀的能力, 降低了膨胀土遇水膨胀变形程度。

关键词: 膨胀土; MICP 技术; 变形控制; 膨胀机理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0092-05

作者简介: 魏 然(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程材料力学性质与本构、微生物改性技术等方面的计算与试验研究工作。E-mail: rwei21@buaa.edu.cn。

Deformation and control mechanism of MICP-treated expansive soil

WEI Ran¹, ZHANG Liya², XIAO Zhirui³, YAN Jun², WANG Bo²

(1. Beihang University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Power China Construction Group Ltd, Beijing

100120, China)

Abstract: Due to its strong hydrophilicity, the expansive soil will show significant volume expansion when soaked in water, which can cause hazard to the structures such as channels and embankments. Based on the capability of microbial induced calcite precipitation (MICP) to stabilize and improve the structure of soil body, the experimental and mechanism researches are conducted on the expansive soil treatment by *Sporosarcina pasteurii* through MICP. The results show that treating the expansive soil with *Sporosarcina pasteurii* can effectively suppress the swelling deformation of the expansive soil. The swelling inhibition can be up to 99.8% under the optimized microbial solution dosage. The free ions such as sodium, calcium, manganese and aluminum from the expansive soil mineral will form calcite particles through the reactions with the bacteria solution which can cement the soil particles, while the bacteria activities will induce the transformation of montmorillonite in the expansive soil into illite, which significantly inhibits the swelling capability and volume deformation of the expansive soil.

Key words: expansive soil; MICP; deformation control; swelling mechanism

0 引 言

膨胀土由于具有强烈亲水性, 在遇水浸泡后变形显著增大及脱水后回缩变形开裂, 当其作为边坡工程、路基工程和土工构筑物填筑结构时, 膨胀变形将对工程安全带来潜在隐患与失稳风险^[1], 因此对膨胀土进行改性和固化治理是保证工程安全的重要措施, 而控制膨胀变形的大小成为判断治理效果的一个重要指标。

膨胀土胀缩性强弱与其所含的蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物含量密切相关, 蒙脱石含量越

高, 膨胀性越大^[2-3]。在高温和高压力条件下, 蒙脱石具有通过形成伊蒙混层向伊利石转变的特性^[4-5]。膨胀土治理方法主要包括换填法、力学作用抑制膨胀变形以及膨胀土改性等^[6]。近年来, 传统膨胀土治理方法在工程建设中发挥了重要作用, 也积累了很多成功经验, 但由于膨胀土自身的复杂特性以及治理方法因施工工艺问题、防治持久性问题或环境

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFC1509800); 引江济淮公司科研项目 (YJH-ZT-ZX-20221130515)

收稿日期: 2023-07-06

问题等种种不足, 膨胀土治理和变形控制的新方法、新技术研究等具有广泛的客观需求。微生物作为地球上最古老生物类型, 成矿作用在沉积类矿物形成过程中扮演了重要角色, 通过微生物诱导碳酸钙对土体进行改性和加固, 改善膨胀土力学性能的作用受到学者的越来越多的关注。覃永富等^[7]采用巨大芽孢杆菌治理膨胀土, 微生物处理后膨胀土自由膨胀率降低了80%以上, 其它力学指标也有不同程度改善; Neupane^[8]利用巴氏芽孢八叠球菌处理膨胀率土, 虽然试验结果存在一定不稳定性, 但整体而言微生物处理后膨胀土的力学性质均有一定改善。

膨胀土胀缩性强弱与其所含的蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物含量密切相关, 蒙脱石含量越高, 膨胀性越大^[1]。膨胀土治理方法主要包括换填法、力学作用抑制膨胀变形以及膨胀土改性等。近年来, 传统膨胀土治理方法在工程建设中发挥了重要作用, 也积累了很多成功经验, 但由于膨胀土自身的复杂特性以及治理方法因施工工艺问题、防治持久性问题或环境问题等种种不足, 膨胀土治理和变形控制的新方法、新技术研究等具有广泛的客观需求。微生物作为地球上最古老生物类型, 成矿作用在沉积类矿物形成过程中扮演了重要角色, 通过微生物诱导碳酸钙对土体进行改性和加固, 改善膨胀土力学性能的作用受到学者的越来越多的关注。覃永富等^[7]采用巨大芽孢杆菌治理膨胀土, 微生物处理后膨胀土自由膨胀率降低了80%以上, 其它力学指标也有不同程度改善; Neupane^[8]利用巴氏芽孢八叠球菌处理膨胀率土, 虽然试验结果存在一定不稳定性, 但整体而言微生物处理后膨胀土的力学性质均有一定改善。

基于微生物诱导碳酸钙改性膨胀土抑制膨胀变形作用的良好环境特性, 本文依托引江济淮工程江淮沟通段施工J007-2标段膨胀土边坡治理工程, 选取典型膨胀土进行微生物抑制膨胀变形试验研究, 探讨了不同巴氏芽孢八叠球菌用量条件下抑制膨胀土变形的效果, 分析了膨胀土遇水膨胀变化的变化规律, 揭示了巴氏芽孢八叠球菌治理膨胀土降低膨胀率的变形机理, 为今后膨胀土的微生物治理应用提供了技术支持。

1 试验设计

1.1 膨胀土与微生物

膨胀土选自引江济淮工程施工J007-2标段, 属中等膨胀土, 其基本物理力学性质见表1。微生物选取水解机制简单、自由能变化量低以及脲酶产量高的巴氏芽孢八叠球菌作为试验菌种。

表 1 基本力学性质指标

Table 1 Basic mechanical characteristics of expansive soil

土样名称	最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最优含水率 $w / \%$	塑限 $w_p / \%$	液限 $w_L / \%$
J007-2 标段膨胀土	1.52	20	21.6	49.5

1.2 微生物溶液和试样制备

(1) 微生物菌液制备

试验用巴氏芽孢八叠球菌细胞为杆状, 长度2~3 μm , 为革兰氏阳性化能异养菌, 芽孢形状为圆形, 直径0.5~1.5 μm 。菌液制作完成后经测定, 试验用菌液OD₆₀₀为1.82, 脲酶活性为0.78 mS/cm/min。

(2) 营养液制备

营养液使用等摩尔浓度钙源 (试验中选用CaCl₂) 和尿素混合溶液, 试验营养液浓度为1.5 mol/L。

(3) 试样制备

采用一次性拌和法进行试样制备。首先将膨胀土烘干并碾成细粉, 过2 mm筛, 然后将菌液和营养液配成所需浓度, 按不同菌液掺入量与膨胀土样混合于容器中搅拌均匀, 最后按照控制干密度1.30 g/cm³ (最大干密度的85%) 将土样制成2 cm高环刀样, 放入保湿缸内, 控制缸内温度为23.8℃, 湿度为88.5%RH。

1.3 试验设计

初始含水率、菌液用量以及养护龄期等对膨胀土的膨胀变形有直接影响, 同时为了解营养盐和尿素等在抑制变形过程中所占程度, 具体试验方案设计如下:

(1) 单水组: 即单独由水处理膨胀土产生的膨胀变形组。设计10%, 15%, 20%, 25%共4个不同试样含水率, 研究不同含水率情况下膨胀土的膨胀变形程度及规律。

(2) 菌液组: 即使用营养盐、尿素和菌液等混合形成的菌液处理试样而产生的膨胀变形组。将营养盐、尿素和巴氏芽孢八叠球菌按比例配制制成10%, 15%, 20%, 25%共4个不同的菌液, 研究不同菌液用量条件下膨胀土的膨胀变形效果及规律。试验考虑1, 2, 3, 7 d等4个不同养护龄期。

(3) 单盐组: 即单独由营养盐溶液处理膨胀土产生的膨胀变形组。取营养盐制备成10%, 15%, 20%, 25%共4组不同含盐量的试样, 研究单盐条件下膨胀土的膨胀变形改变效果。

(4) 单尿素组: 取不同尿素加入试验用水, 制备10%, 15%, 20%, 25%共4组不同尿素含量的试样, 研究单尿素条件下膨胀土的膨胀变形改变效果。

试样养护完成后, 测量试样含水率, 然后进行无荷载膨胀试验, 测量膨胀变形和计算膨胀率。试验结束后, 再次测量试样含水率。

2 试验与分析

2.1 不同试验条件下试样的膨胀变形分析

绘制了单水组、菌液组(7 d)、单盐组和单尿素组试样的无荷载稳定膨胀变形量变化关系,如图1所示。

采用单盐、单尿素和菌液对膨胀土进行改性处理,其稳定膨胀变形值均低于不处理试样的稳定膨胀变形值,说明采用单盐、单尿素和菌液处理膨胀土对膨胀土的膨胀变形均有抑制效果,只是抑制程度有所不同。将单盐、单尿素和菌液处理后试样的稳定膨胀量与不处理试样的稳定膨胀量进行对比,采用菌液处理膨胀土抑制膨胀变形的效果最好,其在10%, 15%, 20%, 25%条件下的膨胀变形从处理前的2.82, 2.51, 1.74, 1.27 mm分别降低到处理后的1.42, 1.01, 0.22, 0.03 mm,降低幅度分别为50.4%, 59.8%, 87.4%, 97.6%,表明菌液用量越多抑制变形的效果越好;而单盐、单尿素处理膨胀土的抑制膨胀变形效果较差,其在10%, 15%, 20%, 25%条件下降低膨胀变形的幅度分别为17.4%, 23.9%, 5.7%和22.3%, 34.7%, 5.8%, 22.3%。

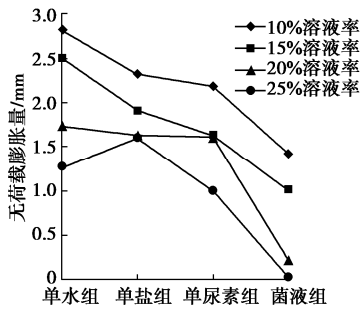


图1 不同试验条件下膨胀变形量

Fig. 1 Vertical swelling under different experimental situations

2.2 菌液用量对膨胀变形的抑制效果

统计绘制了无荷载条件下不同龄期时试样的稳定膨胀变形量与菌液用量之间的关系,如图2所示。为反映菌液抑制膨胀变形的效果,在图2中添加了未进行菌液处理(无菌组)的稳定膨胀变形试验数据。

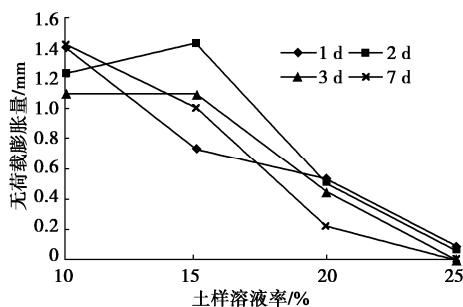


图2 不同菌液用量对膨胀变形的影响

Fig. 2 Effects of different microbial solution dosage on vertical swelling

从图2可以看出,未添加菌液时试样在10%, 15%, 20%, 25%条件下的膨胀变形量分别为2.82, 2.51, 1.74, 1.27 mm,随着菌液用量的增加,膨胀变形量显著降低,其在7 d龄期时的稳定变形量分别为1.42, 1.01, 0.22, 0.002 mm,与未添加菌液试样比较,其稳定膨胀变形的降低幅度分别为49.4%, 59.8%, 81.4%, 99.8%,表明菌液用量越多抑制膨胀变形的效果明显。

2.3 养护龄期对膨胀变形的影响

整理绘制了不同龄期与稳定膨胀变形量关系,如图3所示。巴氏芽孢杆菌对膨胀变形的抑制作用主要发生在试验前期,即1~2 d期间,随着时间增加,抑制作用逐渐消失。试验结果表明,在10%, 15%, 20%, 25%条件下,2 d时间的膨胀变形量分别为1.39, 0.73, 0.52, 0.09 mm,降低幅度分别为56.4%, 43.1%, 71.7%, 93%。

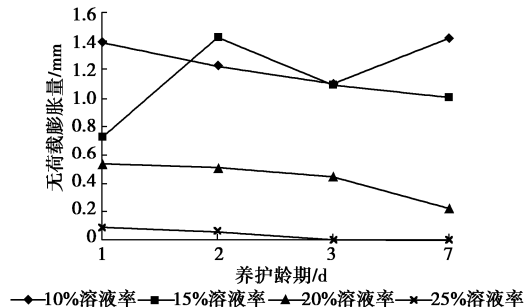


图3 不同龄期下试样无荷载膨胀率变化规律

Fig. 3 Effects of different curing time on vertical swelling

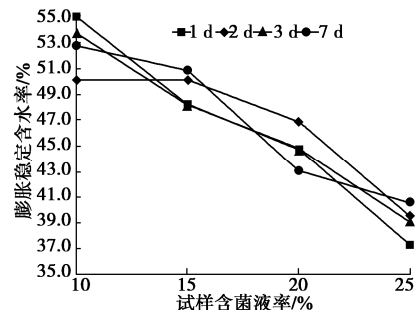


图4 不同龄期及含水率下试样膨胀稳定含水率变化

Fig. 4 Water contents after expansion stabilized under different curing time and water contents

2.4 膨胀稳定后含水率变化分析

图4为膨胀稳定后含水量变化曲线,可以看出,经MICP处理膨胀稳定后试样的含水率随菌液用量的增加均有明显降低,其含水率在1, 2, 3, 7 d龄期条件下从菌液用量为10%的51%, 50%, 54%, 53%降低到菌液用量为25%的37%, 40%, 39%, 41%,降幅明显,表明菌液用量越多,含水率降低越明显。

3 矿物成分测定与分析

3.1 矿物成分测定与分析

为了解膨胀土在微生物处理前后矿物成分转变及

规律, 采用X射线衍射技术 (XRD) 对膨胀试样微生物处理前后矿物组成进行了测定, 测定结果如表2和表3所示。

表 2 矿物成分测定结果表
Table 2 Test results of mineral components

样品号	组别	矿物含量/%					黏土矿物
		石英	钾长石	斜长石	方解石		
1	对照组 (无菌液)	55.5	2.5	3.8	—		38.2
2	10%菌液处理	50.7	2.0	4.1	—		43.2
3	15%菌液处理	47.0	1.1	3.3	1.5		47.1
4	15%菌液处理	48.4	3.3	3.3	—		45.0
5	20%菌液处理	58.6	1.0	3.7	1.0		35.7
6	20%菌液处理	52.1	1.2	4.8	1.2		40.7
7	25%菌液处理	52.2	1.1	3.0	1.8		41.9
8	25%菌液处理	47.3	1.7	3.6	1.9		45.5

由表2矿物成分测定结果可知, 试验用膨胀土矿物成分主要包括石英和黏土矿物, 两者含量约占总量的93%左右。对比无处理膨胀土和菌液处理膨胀土矿物成分结果, 采用菌液处理后的膨胀土其方解石的含量均有所增加, 表明在微生物治理膨胀土的过程中, 因巴氏芽孢杆菌诱导生成的碳酸钙主要是以方解石的方式存在。

从表3可以看出, 黏土矿物由伊蒙混层、伊利石和高岭石3类成分组成, 伊蒙混层占比最高, 占总量的35%~82%, 伊利石次之, 占总量的14%~59%, 高岭石最低, 占总量的3%~6%。对比微生物处理前后膨胀土中伊蒙混层和伊利石含量的变化, 伊蒙混层相对含量从未处理前的82%降低到处理后的35%~62%, 最大降幅47%, 菌液用量越高, 降幅越大; 伊利石相对含量则从未处理前的14%增大到处理后的34%~59%, 菌液用量越高, 增幅越大。

表 3 黏土矿物相对含量表
Table 3 Relative compositions of clayey minerals

样品号	组别	黏土矿物相对含量/%							混层比 (%S)	
		S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S	
1	对照组 (无菌液)	—	82	14	4	—	—	40	—	
2	10%菌液处理	—	62	34	4	—	—	25	—	
3	15%菌液处理	—	60	36	4	—	—	25	—	
4	15%菌液处理	—	46	50	4	—	—	20	—	
5	20%菌液处理	—	51	46	3	—	—	20	—	
6	20%菌液处理	—	41	54	5	—	—	20	—	
7	25%菌液处理	—	35	59	6	—	—	20	—	
8	25%菌液处理	—	46	48	6	—	—	20	—	

S: 蒙皂石类 I/S: 伊蒙混层 I: 伊利石 K: 高岭石 C: 绿泥石 C/S: 绿蒙混层

由表3中的伊蒙混层比测试结果看, 微生物处理后的膨胀土, 其伊蒙混层比为20%~25%, 比未进行微生物处理的膨胀土中的伊蒙混层比40%其绝对值降低了15%~20%。为了解微生物处理前后膨胀土中蒙脱石、伊利石和高岭石的实际含量, 计算了未处理膨胀土、按10%, 15%, 20%, 25%菌液量处理后膨胀土试样中蒙脱石、伊利石和高岭石的相对含量, 如图5所示。

从图5可以看出, 随着菌液用量的增加, 黏土矿物中伊利石相对含量由未处理时的63.2%增加至25%菌液用量时的87%, 蒙脱石相对含量由未处理时的32.8%降低至7%, 最大降幅达76.7%, 高岭石相对含量在3%~6%, 变化不大。

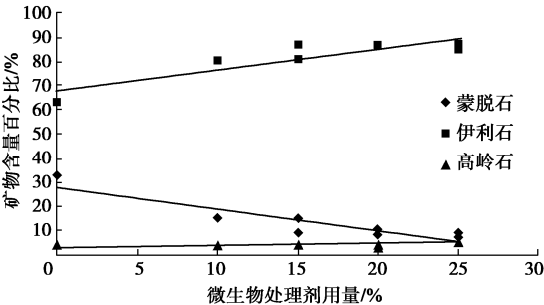


图 5 膨胀土中主要黏土矿物含量变化趋势
Fig. 5 Change of major clayey mineral composition in expansive soil

众所周知, 膨胀土的膨胀变形主要是其中的蒙脱石等强亲水性矿物引起, 蒙脱石含量越高, 膨胀性越大, 但在本试验膨胀土中, 并没有独立存在的蒙脱石层存在, 因此可以推断, 本试验膨胀土的膨胀变形应是来自于黏土矿物中占较高含量伊蒙混层中的蒙脱石成分。

对本试验而言, 巴氏芽孢八叠球菌在处理膨胀土时, 有效促进了黏土矿物中有膨胀性的蒙脱石向无膨胀性伊利石的转化, 显著降低了具有膨胀特性的蒙脱石含量, 进而降低了黏土矿物的亲水性和吸水性, 有效抑制了膨胀土的吸水膨胀。

3.2 扫描电镜分析

为了解微生物诱导沉积矿物晶体在膨胀土体中的分布, 采用扫描电镜对处理前后的膨胀土样进行了测试, 如图7所示。由图7可知, 微生物在处理膨胀土时, 会在土体颗粒表面诱导沉积约直径1 μm左右的方解石颗粒, 充填土体孔隙, 其生成的方解石颗粒在局部聚集并相互胶结, 形成一个粒径更大的胶结体, 胶结体与土体颗粒表面胶结, 对膨胀晶层的膨胀产生抑制作用, 如图6 (a) 所示。而未处理的膨胀土则因缺少这种胶结作用而具有较强的膨胀性, 如图6 (b)。

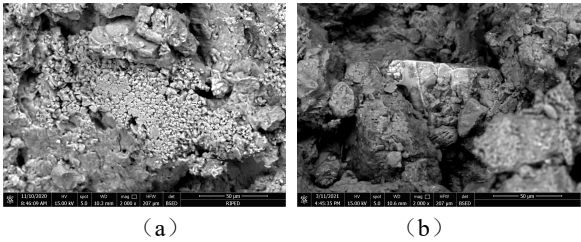


图 6 膨胀土微生物处理前后的碳酸钙结晶微观电镜测试图
Fig. 6 SEM images of expansive soil before and after MICP treatment

4 微生物抑制膨胀变形机理分析

基于上述试验结果,可以把巴氏芽孢八叠球菌抑制膨胀土变形机理分为物理作用机理、化学作用机理以及水化作用机理。

(1) 物理作用机理

在微生物诱导生成矿物颗粒过程中,生成的颗粒会以微生物细胞为核心向四周扩散,充填在土体孔隙中。随着诱导碳酸钙过程的发展,沉积的矿物颗粒一是会胶结其周围的黏土颗粒,抑制其膨胀变形;同时相互胶结的碳酸钙颗粒也会形成一定强度的较大尺度的胶结体,覆盖或包裹黏土颗粒,从而达到抑制膨胀土遇水膨胀的作用。

(2) 化学作用机理

膨胀土在通过微生物处理后,易吸水膨胀的蒙脱石相对含量明显降低,而无膨胀性的伊利石含量明显上升,表明微生物极大促进了伊蒙混层的含量降低和伊蒙混层中蒙脱石向伊利石的转化,导致黏土矿物的亲水性降低和吸水能力减弱,从而抑制了膨胀土的整体膨胀性。在自然条件下,膨胀性蒙脱石矿物向无膨胀性伊利石矿物转化需要高温高压环境,并将经历长期过程,而对于微生物处理膨胀土而言,这种转化过程及其简单,体现了微生物治理膨胀土的巨大优势。

(3) 水化作用机理

巴氏芽孢杆菌在治理膨胀土时,脲酶水解在诱导生成碳酸盐过程中会消耗膨胀土中的水分,菌液用量越大,对膨胀土中的耗水作用越强,因此导致黏土矿物能够吸取的水分越小,间接的起到了抑制膨胀变形的效果。

5 结 论

(1) 试验结果表明,采用巴氏芽孢八叠球菌处理膨胀土菌液用量效果显著,其抑制膨胀变形的能力明显好于单盐和单尿素条件,表明了菌液在抑制膨胀变形方面的重要作用。本试验条件下,菌液用量达到25%时与未处理膨胀土相比无荷载膨胀变形量降低幅度达到99.8%,抑制膨胀变形效果明显。

(2) 巴氏芽孢八叠球菌处理膨胀土时,其水化作用会有效促进黏土矿物中有膨胀性的蒙脱石向无膨胀性伊利石的转化,显著降低了蒙脱石含量,有效抑制了膨胀土的吸水膨胀。

(3) 巴氏芽孢八叠球菌抑制膨胀土变形机理可以分为物理作用机理、化学作用机理以及水化作用机理,反映了微生物诱导碳酸钙颗粒对黏土的胶结和包裹作

用、微生物促进蒙脱石向伊利石的转化作用以及微生物作用对黏土水分的消耗作用,其中以化学作用机理为主。

(4) 巴氏芽孢八叠球菌抑制膨胀土的作用过程主要集中在处理前期,一般在7 d左右趋于稳定,因此保持较长的养护时间可确保膨胀治理的效果。

参考文献:

- [1] 古家文. 浅析公路特殊土路基的病害及防治措施[J]. 四川建材, 2020, 46(9): 136-137. (Gu Jiawen. Analysis on diseases and prevention measures of highway special soil subgrade[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(9): 136-137. (in Chinese))
- [2] 刘伟, 梁栋, 杨仲田, 等. 蒙脱石含量对膨润土膨胀行为影响的试验研究[J]. 辐射防护, 2018, 38(6): 511-516. (LIU Wei, LIANG Dong, YANG Zhongtian, et al. Experimental study on influence of montmorillonite content on expansion behavior of bentonite[J]. Radiation Protection, 2018, 38(6): 511-516. (in Chinese))
- [3] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (JIA Jingchao. Study on expansion Mechanism and Meso-Expansion Model of Expansive Soil[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [4] HOWER J, MOWATT T C. The mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites[J]. American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials, 1966, 51(5/6): 825-854.
- [5] 周张健. 蒙脱石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述[J]. 地质科技情报, 1994, 13(4): 41-46. (ZHOU Zhangjian. Summary of the study for illitization of the smectite on its controlling factors, transformation mechanism and models[J]. Geological Science and Technology Information, 1994, 13(4): 41-46. (in Chinese))
- [6] PETRY T M, ARMSTRONG J C. Stabilization of expansive clay soils[J]. Transportation Research Record, 1989(1219).
- [7] 覃永富, 卢望, 袁梦祥, 等. 巨大芽孢杆菌改良邯郸强膨胀土试验研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(8): 87-95. (QIN Yongfu, LU Wang, YUAN Mengxiang, et al. An experimental study of handan strong expansive soil enhanced by bacillus megaterium[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 45(8): 87-95. (in Chinese))
- [8] NEUPANE S. Evaluating the Suitability of Microbial Induced Calcite Precipitation Technique for Stabilizing Expansive Soils[D]. Boise: Boise State University, 2016.

(编校: 黄贤沙)