

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020110917

## MICP技术对遗址土开裂抑制作用的试验探究\*

岳建伟, 李嘉乐, 刘东鹭, 王思远, 邢旋旋, 陈颖

(河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** 遗址土长期经受干湿循环作用, 土体表面产生的裂隙对其保存构成威胁。为了探究MICP技术在土遗址修缮中的应用, 基于巴氏芽孢杆菌开展微生物矿化作用的前期研究, 确定了微生物最佳培养时间、菌液的最佳菌胶比、最佳胶结液浓度和拌合菌液的最佳体积分数; 利用最优条件的研究结果对遗址土干缩开裂抑制作用进行研究, 设置纯水拌合的对照组, 对比观察初次干湿循环下烘干过程中的裂隙发育情况, 分析三次干湿循环后裂隙的二值化图像, 对比裂隙率, 证明了MICP技术对遗址土干缩开裂的有效抑制; 结合电镜扫描图像, 分析碳酸钙胶结物的作用机理。通过试验研究和电镜图像的拟合分析, 证明MICP技术对减缓遗址土开裂具有积极作用, 为土遗址的修缮和维护提供了新思路。

**关键词:** 微生物矿化; 遗址土; 干缩裂隙; 微观结构

**中图分类号:** TU411   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0455-08

## Study on Crack Prevention of Earthen Sites Using MICP Technology

YUE Jianwei, LI Jiale, LIU Donglu, WANG Siyuan, XING Xuanxuan, CHEN Ying

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** Site soil has been subjected to dry and wet cycles for a long time, and the cracks on the soil surface pose a threat to its preservation. In order to explore the application of MICP technology in the restoration of earthen sites, the preliminary study of microbial mineralization is carried out using *Bacillus pasteurii*. The optimal cultivation time, bacterial gum ratio, concentration of cementing fluid and the best volume fraction of mixed bacteria liquid are determined. Based on the research results of optimal conditions, the dry shrinkage cracking of earthen sites is studied. According to the binary images and fracture rates after three dry-wet cycles, MICP technology is proved to be effective in suppressing dry shrinkage cracking of the site. The mechanism of the calcium carbonate binder was analyzed by scanning electron microscope. By means of experimental research and fitting analysis of electron microscope images, it is proved that MICP technology has a positive effect on slowing down soil cracking and provides a new idea for repairing and maintaining site soils.

**Keywords:** microbial mineralization; site soil; desiccation crack; micro-structure

\* 收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-11-09

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿研究项目(162300410012)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A560048, 14B560019)资助

作者简介: 岳建伟(1972—), 男, 教授, 博士。主要从事遗址土力学性能和工程安全评价。E-mail: yjwchn@126.com

## 引言

我国土遗址分布众多,这些土遗址是中华民族古建筑艺术的集大成所在,为考古学者研究我国古代城垣文化和建筑技术提供了丰富的实物资料。但土遗址多露天营造,在时空演变进程中,这些暴露在自然环境中的遗址遭受了不同程度的破坏,呈现出复杂的病害特征。在环境因素的反复交替中,土遗址遭受的破坏不断叠加,逐步经历了从病害发育到消亡殆尽的过程<sup>[1-3]</sup>,因此,土遗址的修复技术研究快速发展。

近年来,得益于环保高效、施工方便的优点,微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术得到了广泛研究<sup>[4]</sup>。目前较为主流的MICP方式是尿素水解型<sup>[5-6]</sup>,这种技术的原理是微生物表面的负电荷吸附溶解在水中的钙离子,在碱性培养环境下,钙离子和碳酸根离子生成碳酸钙沉淀<sup>[7]</sup>。对MICP技术的研究前期多用在粗粒土的加固,目前国内外开始尝试将其适用于粉土等细粒土的研究上,A.Qabany等<sup>[8]</sup>和J.Chu等<sup>[9]</sup>等利用MICP技术对砂土进行了固化,通过无侧限抗压试验验证了固化效果。R.Cardoso等<sup>[10]</sup>使用MICP技术处理了高岭土和砂的混合土,也得到了预期结果。邵光辉等<sup>[11]</sup>利用成熟的MICP技术对粉土进行灌浆处理并取得了良好的效果。遗址土多由粉土和粉质粘土组成,而目前利用MICP技术固化遗址土的研究才刚刚起步,对固化效果也缺乏微观层面的阐述。

鉴于此,研究利用芽孢杆菌开展对遗址土干缩裂隙的改良试验。通过测定不同培养时间下脲酶活性得到了最佳培养时间,利用对碳酸钙沉淀质量的测定选出最优菌胶比和最佳胶结液浓度,通过直剪试验确定了拌合菌液的最佳体积分数。基于上述基础试验的结果,在最优条件下对土样拌合,通过烘干和水分补充模拟干湿循环,在多次循环过程中观察裂隙发展规律,并基于扫描电镜图像从微观条件下揭示MICP技术对遗址土干裂的抑制机理。

## 1 最优培养条件的基础试验

### 1.1 最佳培育时间

在pH值为9.0,培养温度为30℃的恒定条件下培育巴氏芽孢杆菌,在48h的培育期内,每间隔2h

在波长600nm条件下的OD值和35℃条件下测定菌液电导率,共计得到12个时间节点的数据,通过公式(1)<sup>[12]</sup>换算得到微生物浓度。1ml菌液和9ml尿素溶液混合后测定了电导率变化量,进而推导出尿素水解量,将尿素水解量和OD值的比值定为单位脲酶活性<sup>[13]</sup>。

$$Y = 8.59 \times 10^7 \times X^{1.3627} \quad (1)$$

式中,Y为微生物浓度(cells/mL);X为测得的OD<sub>600</sub>数值。

对上述三个指标的数据进行拟合后得到微生物生长曲线和脲酶活性曲线如图1所示,由图可知微生物数量在0~10h内缓慢增加,10~30h内微生物分裂速度加快,数量增加较快,30h后数量趋于稳定,而单位脲酶活性呈现先增再减最后稳定的趋势。试验中以OD值和脲酶活性曲线为主要参考,最终确定菌液的培养时间为30~48h。

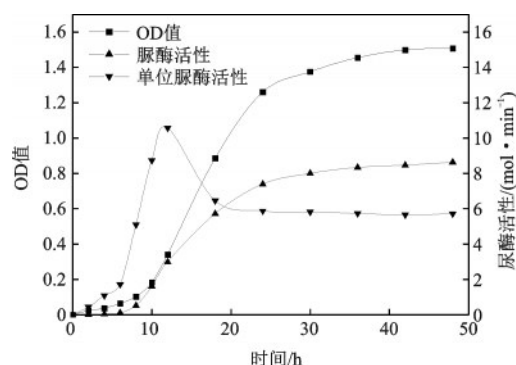


图1 微生物生长曲线和脲酶活性曲线

Fig.1 Microbial growth and pyrexenzyme activity curves

### 1.2 最佳菌胶比和胶结液浓度

试验采用正交法开展,目的是通过碳酸钙生成量来确定菌胶比和胶结液浓度的最优值。试验中菌液、胶结液的混合液体积为25ml,对菌液和胶结液的体积比设置9个对照组,分别为3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6、1:7,同时每组中设置胶结液浓度分别为0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 mol/L。将混合液在试管中摇匀静置24h后,用盐酸溶液稀释沉淀物,并使用EDTA滴定法检测钙离子物质的量,进而推导出碳酸钙沉淀质量。

碳酸钙生成情况如图2所示,5种胶结液浓度下的碳酸钙生成量随着菌胶比的递减呈现出先增后减的趋势,在菌胶比1:1时均达到了最大沉淀量,同时在胶结液浓度为1.5 mol/L时,沉淀量最大。碳酸钙生成量越大,对遗址土的加固效果也将越明

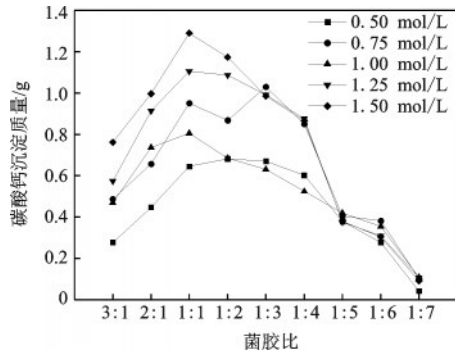


图2 碳酸钙沉淀质量对比

Fig.2 Comparison of calcium carbonate precipitation quality

显,因此最终确定最佳菌胶比为1:1,最佳胶结液浓度为1.5 mol/L。

### 1.3 最佳体积比

对土体使用微生物矿化时受限于菌液的培养时间和造价,不可能完全使用菌液替代水分,因此试验利用菌液和水的混合液对土样进行拌和,根据菌液体积不同设置了7个对照组,每组4个土样,用以探究不同菌液浓度混合液的矿化效果。试验选取开封城墙附近的土进行分析,结合《土工试验方法标准》<sup>[14]</sup>对土样的基本物理指标测定,得到最优含水率为12%,最大干密度为1.67 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率为37.4%,孔隙体积为22.5 cm<sup>3</sup>。在最优含水率条件下配置干密度为1.60 g/cm<sup>3</sup>的土样,配置过程中的水分来自菌液和水的混合液,混合液分组见表1。

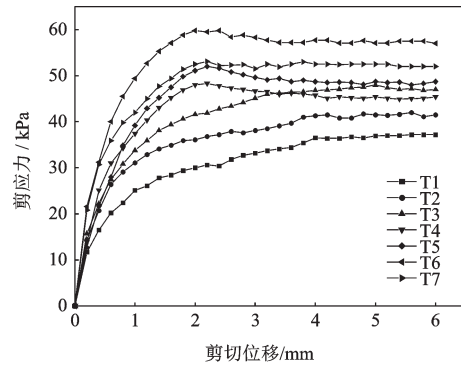
土样静置后对其进行抗剪试验,分别在法向应力为50、100、150、200 kN的条件下进行,得到的剪切位移和剪应力曲线图、黏聚力和摩擦角关系如图3、4所示。

在图3中可以发现,T6土样的剪应力在四个法向应力下均大于其他试验组,结合图4可知,T1组土样未经矿化技术处理,因此其黏聚力、内摩擦角

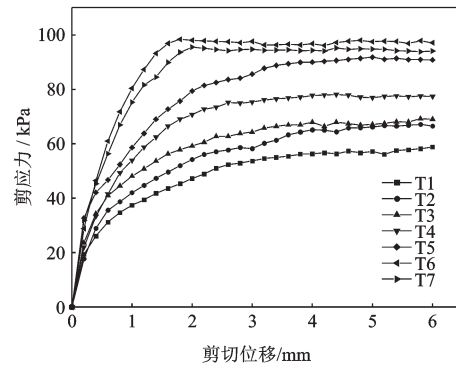
表1 混合液分组

Table 1 Grouping of the mixed liquid

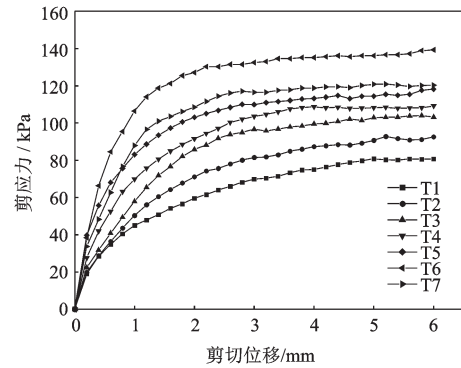
编号	菌液在混合液中的体积比/%
T1	0(未混合菌液)
T2	5
T3	10
T4	15
T5	20
T6	25
T7	30



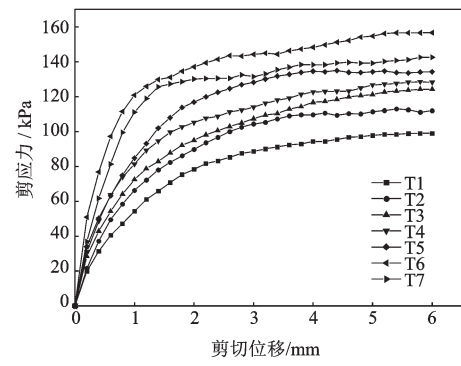
(a) 50 kN法向应力



(b) 100 kN法向应力



(c) 150 kN法向应力



(d) 200 kN法向应力

图3 土样的剪切位移和剪应力关系

Fig.3 Shear displacement-shear stress relationship of soil samples

最小,经矿化处理后的土样抗剪强度均有不同程度的提升。同时,T3~T6组土样黏聚力和内摩擦角不断提高,T6~T7组二者开始降低,即菌液体积为0~25%时,土体的抗剪强度随菌液体积的增加而提高,当菌液体积超过25%,随菌液体积的增加,土体抗剪强度有所下降。初步推断是微生物生成的碳酸根和溶液中的钙离子生成的碳酸钙胶结物增加了土体颗粒间的联结力,使其抗剪强度提升,菌液越多提供的碳酸根也就越多,因此胶结物也会越多。而当菌液体积大于25%时,一方面菌液多的土样短时间内生成的胶结物较多,迅速填充土体孔隙,产生了一定的体积膨胀力,对土体强度产生影响;另一方面,碳酸钙胶结物占据了孔隙,也就是封闭了水分运移的通道,微观上水敞开和水封闭状态的切换受阻,基质吸力出现不稳定的状态,这些情况在一定程度上可以解释土体抗剪强度降低的现象。结合试验数据最终认为拌合遗址土的混合液中,菌液的最合适体积比为25%。

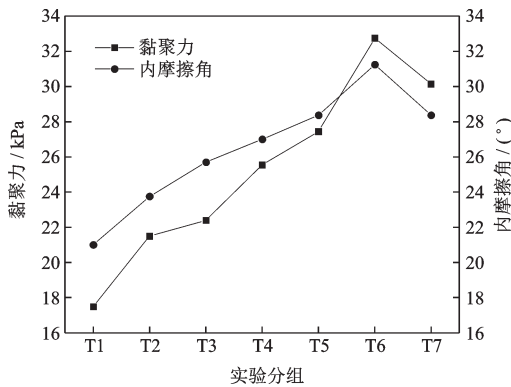


图4 土样的黏聚力和摩擦角关系

Fig.4 A diagram of soil-like viscosity and friction angle

## 2 干湿循环试验

### 2.1 试样制备及方案

试验用土取自河南省新乡市卫辉共城遗址,鉴于文物保护的要求,土样来自城墙周围散落的粉土。利用轻型击实试验方法测定5组土样的含水率和干密度,拟合得到该遗址土的最大干密度为1.75 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为18.4%。本试验拟在最优含水率下,制备干密度为1.65 g/cm<sup>3</sup>的土样,遗址土风干后用2 mm筛提取土样,将土分为两组,每组三个试样,SA组与蒸馏水拌合,SB组与菌液和水的混合液拌合,混合液的各项指标均参照上述最优条件。将

配置好的土样在密闭阴凉环境下养护24 h,之后将适量土样放入环刀模具压制,最终得到直径61.8 mm,高20 mm的圆柱土样。

将养护好的两组土样放入烘箱,在85℃的条件下烘干6 h,在第一次烘干时每间隔1 h观察土样表面裂隙的发育情况,并对含水率进行测定,直至含水率为0,对比两组土样水分完全蒸发时间和裂隙发育情况。烘干后对土样再次配备18.4%的含水率,静置24 h后再次烘干,将模拟的干湿循环过程重复3遍,记录每次循环后裂隙的发展情况。

### 2.2 试验结果与分析

整理第一次烘干过程中所捕捉的土体表面裂隙发展图像,SA和SB两组分别选取一个土样描述其裂隙发展,分别如图5、图6所示。

由图5和图6可以看到,在初始状态下土样表面保持完整状态,在烘干1 h后,土样表面颜色由深

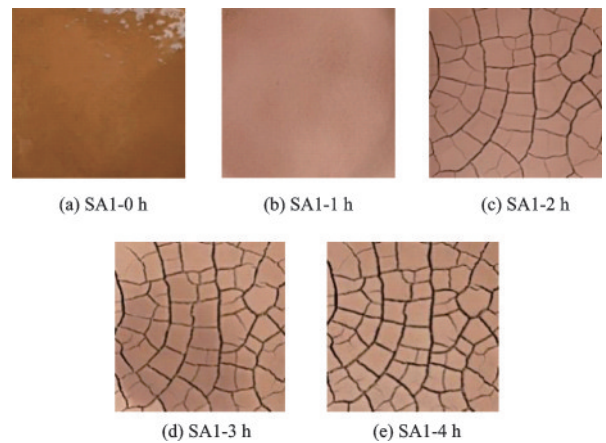


图5 SA组裂隙发展

Fig.5 Crack development of the SA Group

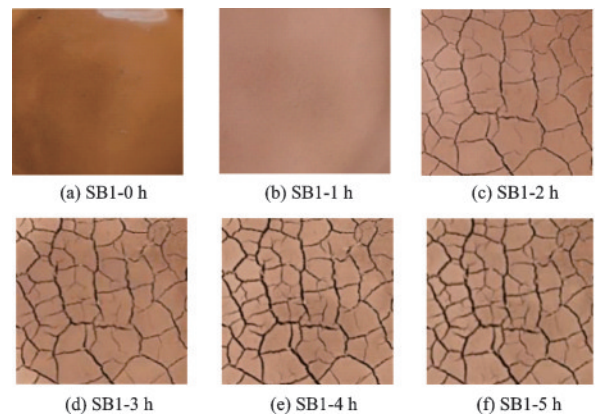


图6 SB组裂隙发展

Fig.6 Crack development of the SB Group

转浅,表明在烘干状态下,水分开始蒸发,此时土体内部含水率降低;烘干2 h后,土样表面发展出裂隙,垂直裂隙整体发育较多,横向多呈现微裂隙发展,裂隙网发育成型,SA组裂隙的宽度和深度相比SB组较大,随着裂隙的拓展,SA组的贯穿性裂隙明显,而SB组裂隙大部分处在发育初期,微裂隙分布较多,个别裂隙的深度宽度发育较明显,但未出现大范围的贯穿裂隙;烘干3 h后,两组土样表面裂隙都进一步发展,但SB组的裂隙发育相比SA组依然较为缓慢,SA组裂隙原有裂隙网经一步加深加宽,同时从大裂隙上又延伸出微裂隙,此时土样表面的片块状分离较为明显,SB组只是在原有裂隙网继续发育的情况下形成少量的新裂隙,且裂隙的发展程度较小;烘干4 h后,SA组表面裂隙深度和宽度继续延伸,但已经没有新生裂隙发育,此时可认为SA组土样已经完全干缩,SB组土样原有裂隙发育的同时,仍在产生新的微裂隙,且裂隙呈相互贯通的趋势,此时表面部分区域已经形成了片块状分离;烘干5 h后,SB组表面裂隙的发育基本稳定,未产生新的微裂隙,此时可认为水分蒸发完全。通过对比可知,未经菌液处理的SA组在失水阶段裂隙发育相比微生物矿化处理的SB组较快,且失水也较快,失水速率越快,裂隙发展也越快。

在单次干湿循环的基础上,重复三遍循环过程,将记录的裂隙发展图像利用通过二值化处理后,整理如图7和图8所示。

横向对比同组间三次干湿循环后裂隙的二值化图像可以看到,裂隙网的形态均发生了改变,裂

隙的形态和位置在相邻的循环过程中均发生了不同程度的改变,这是由于烘干过程中水分蒸发,土体产生了干缩裂隙,但随着加湿过程补充水分,土体吸水发生膨胀,致使裂隙发生愈合,而随着再一次水分丧失,新的裂隙又会产生。但经历干湿循环后的土体强度已经有所降低,愈合过程仅仅是土体膨胀所带来的表现现象,与裂隙消失不是同一概念<sup>[16]</sup>,也就是说干缩开裂后的土体补水后强度并不会恢复。

两组土样的裂隙率情况见表2,可以看到,初次干湿循环后裂隙率的变化最为明显,随干湿循环次数的增加,裂隙率呈现出增长的趋势,表明初次干湿循环对裂隙发育的影响比较大,因裂隙发育致使土体强度降低,同时也为水分迁移提供了大量的通道,因此土体在后期的干湿循环过程中会不断受到破坏,裂隙率也就呈现出增长的趋势;菌液渗入土体间的孔隙,生成的碳酸钙胶结物在土颗粒间起到了联结作用,结合图5可知,胶结物的存在提高了土体的抗剪强度,即提高了土体抵抗干缩变形的能力,因此SB组的裂隙率在同阶段均小于SA组。

表2 干湿循环后的土样裂隙率  
Table 2 Soil crack rates after wet and dry cycle

单位: %

循环次数	SA	SB
1	15.31	13.37
2	15.89	14.72
3	16.17	15.54

### 3 微观分析

为了进一步探究微生物矿化对遗址土性能改善的机理,利用扫描电镜对两组土样进行扫描,通过干湿循环试验和微观图像的拟合分析,来揭示碳酸钙胶结物改善遗址土性能的机理。

微生物矿化作用下产生的碳酸钙胶结物通常有方解石、球霏石和方石三种<sup>[15]</sup>,其中方解石的性质最为稳定且生成量较高,因此在矿化产物中对土体强度改善起到了主要作用。图9为SB组土样在1000倍视角下微观图像,白框中集聚了大量碳酸钙晶体,多成菱形或球形的形态,同时也有零散的碳酸钙晶体集聚在土颗粒表面。

总的来说,土体裂隙主要来自两个方面<sup>[16]</sup>,一方面是土体内部矿物成分与水发生物理化学反应,

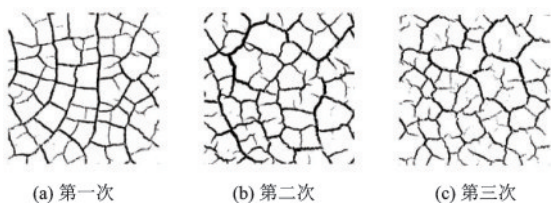


图7 SA组三次干湿循环裂隙

Fig.7 Cracking of the SA group after three wet and dry cycles

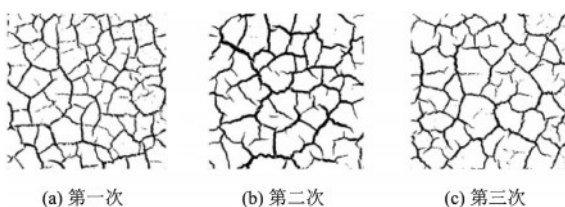


图8 SB组三次干湿循环裂隙

Fig.8 Cracking of the SB group after three wet and dry cycles

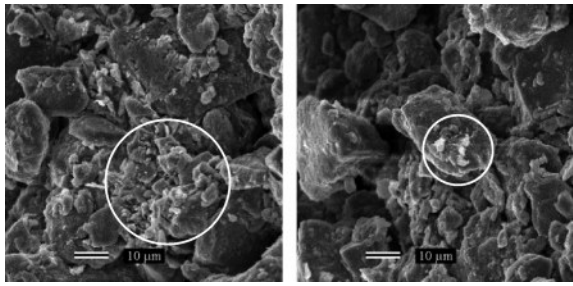
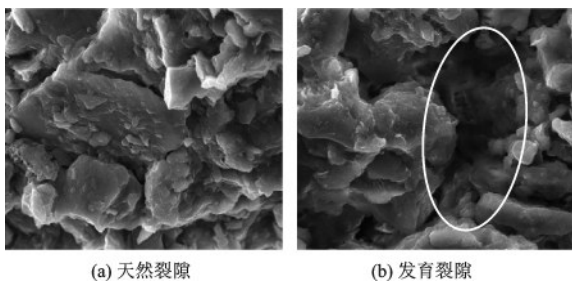


图9 遗址土电镜图

Fig.9 SEM image of the site soil

而矿物成分亲水性的差异导致矿物间存在变形差,进而产生拉应力;另一方面是土体失水收缩产生拉应力,一旦拉应力超过其抗拉强度就会发育出裂缝。试验证明了土体裂隙主要来自于干湿循环状态下失水收缩这一过程。图10为夯土的扫描电镜图,如图10(a)所示,土体内部空间在稳定状态下也是不均匀的,因为其内部存着了天然孔隙和节理裂隙<sup>[16]</sup>,同时遗址土在自然条件下以非饱和状态存在,正常状态下基质吸力处于稳定状态,当土体内部孔隙水蒸发时,孔隙中弯液面临界半径减小导致基质吸力变化,图10(b)中可以看到,在毛细力的作用下新的裂隙在天然裂隙周围开始发育,随着失水的进行,孔隙多出现弯液面状态,土体基质吸力不断增大导致土颗粒间发生相对移动,进而发育微裂隙。



(a)天然裂隙 (b)发育裂隙

图10 土样裂隙电镜图

Fig.10 SEM image of the soil

经过微生物矿化处理后的土体电镜图如图11所示,在圈选部分中可以看到土体中产生了碳酸钙胶结物,这些胶结物对土体内的裂隙和孔隙进行了有效的填充,同时也起到了胶结土体的作用,使原本分散的土颗粒经过胶结物的联结包裹成整体而存在,在联结作用和封堵裂隙的双重作用下,提高了土体的强度,也降低了土颗粒间的错动,对裂隙的发育起到了抑制作用。但这种作用是有限的,一旦土体干缩产生的拉应力超过了联结力,土体仍会发育出裂隙,此时土颗粒的联结也发生变化,土体强度降低,而土体吸水后呈现的裂隙愈合主要原因

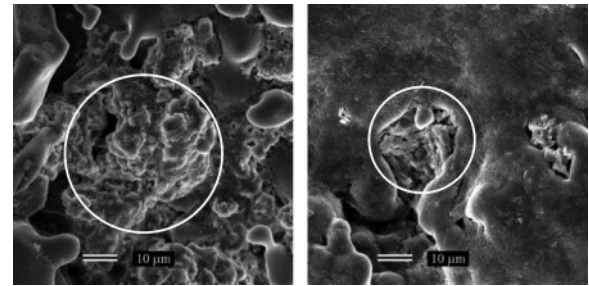
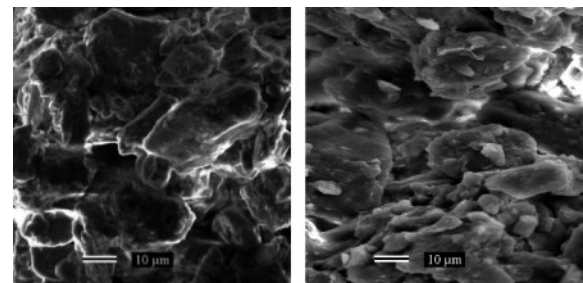


图11 MICP处理后的电镜图

Fig.11 SEM image of the soil after MICP treatment

就是土体吸水后体积膨胀开始向裂隙扩散,宏观上就会观察到裂隙愈合,但结合图10(b)分析,土颗粒间的孔隙过大已经致使联结键功能丧失,一旦再次失水,新的裂缝会不断产生。

在影响裂隙发育方面,含水率梯度<sup>[17-18]</sup>往往比含水率关键。基于双电层理论认为此时水分子作为极性分子在土颗粒的负电场影响下发生位移,贴合在矿物、晶层、团聚体间形成水化膜,水分蒸发引起的水化膜厚度减弱从而产生弯液面,土颗粒在表面张力作用下相互靠拢致使土体发生变形。土体在烘箱内,外表面与外部环境直接接触,高温状态下对水分蒸发的响应更为迅速,致使含水率在土体空间内分布不均匀,因此土体的变形也不均匀,逐渐形成拉应力,当拉应力大于土体的抗剪强度时也会发育出裂隙。而随着反复的干湿循环,土体裂隙不断发育,裂隙两侧产生了如图12(a)所示的临空面,临空面积的增加导致水分迁移加快,致使水力梯度不均匀程度加剧从而产生新的裂隙,在这样一个恶性循环作用下裂隙的发育也逐渐加重。而在图12(b)中可以看到,矿化产生的碳酸钙晶体集聚在土颗粒表面减少了水分迁移的接触面,碳酸钙晶体不溶于水的同时也封堵了颗粒间的孔隙,减少了水分运输的通道数量,特别是在临空面上有效封堵水分蒸发,能够适当降低水分蒸发速率,这也是SB



(a)SA组 (b)SB组

图12 裂隙临空面电镜图

Fig.12 SEM image of the free surface of the cracks

组裂隙发展较慢的原因之一,封堵作用对土体的水利梯度起到了一定的稳定作用,从源头上降低了恶性循环的影响。

## 4 结 论

利用普通粉土研究了微生物矿化前的最佳培养条件和最佳使用条件,在基础试验之后研究了微生物矿化作用对遗址土干湿循环作用下裂隙发育的影响,得到了以下结论:

(1)巴氏芽孢杆菌的最佳培育时间为30~48 h,最佳菌胶比为1:1,最佳胶结液浓度为1.5 mol/L,对遗址土拌合的最佳菌液体积分数为25%。

(2)利用最佳条件下配置的混合液对遗址土拌合后,在干湿循环过程中裂隙发育速度明显减缓,且含水率的下降速度也会放缓,在多次干湿循环后,土体表面的裂隙率相比未处理的遗址土也明显减小。

(3)通过扫描电镜结合试验数据,发现矿化作用生成的碳酸钙胶结物起到了填充孔隙、联结土颗粒的作用,提高了土体强度,抑制了裂隙发育,试验结果对遗址土性能的改善具有一定的指导作用。

## 参考文献:

[1] 孙满利,李最雄,王旭东,等.干旱区土遗址病害的分类研究[J].工程地质学报,2007,15(6):772-778,765. Sun M L, Li Z X, Wang X D, et al. Classification of deteriorations associated with many earthen heritage sites in arid areas of northwest china [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6): 772-778, 765. (in Chinese)

[2] 崔凯,谌文武,韩琳,等.干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应[J].岩土工程学报,2011,33(9):1412-1418. Cui K, Chen W W, Han L, et al. Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthen ruins in arid region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1412-1418. (in Chinese)

[3] 唐洪敏,石玉成,刘琨,等.丝绸之路明长城遗址的病害性态研究[J].地震工程学报,2018,40(6):1278-1286. Tang H M, Shi Y Ch, Liu K, et al. Study on the disease behavior of the Great Wall of the Ming Dynasty along the silk road [J]. China Earthquake Engineering

Journal, 2018, 40(6): 1278-1286. (in Chinese)

[4] Dejong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges [J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 287-301.

[5] 程晓辉,杨钻,李萌,等.岩土材料微生物改性的基本方法综述[J].工业建筑,2015,45(7):1-7. Cheng X H, Yang Z, Li M, et al. Microbial modified geomaterials: a methodology review [J]. Industrial Construction, 2015, 45(7): 1-7. (in Chinese)

[6] 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 Ch X, Wang A H, Wang X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)

[7] Jiang N J, Soga K, Kuo M. Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(3): 04016100.1-04016100.14.

[8] Qabany, A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils [J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 331-339.

[9] Chu J, Ivanov V, Naeimi M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand [J]. Acta Geotechnica, 2013, 9(2): 1-9.

[10] Rafaela Cardoso, Inês Pires, Sofia O D. Duarte, et al. Effects of clay's chemical interactions on biocementation [J]. Applied Clay Science, 2018, 156 (MAY): 96-103.

[11] 邵光辉,侯敏,刘鹏. MICP固化粉土细菌的分布和固定规律研究[J].林业工程学报,2019,4(1):128-134. Shao G H, Hou M, Liu P. Distribution and fixation characteristics of microorganism in MICP treated silt column [J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(1): 128-134. (in Chinese)

[12] Ramachandran S K. Remediation of concrete using micro-organisms [J]. American Concrete Institute Material Journal, 2001, 98(4): 3-9.

[13] 彭劫,何想,刘志明,等.低温条件下微生物诱导碳酸钙沉淀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 Zh 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)

[14] 土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

