

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.047



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



黄原胶联合微生物加固改善混合砂蓄水特性 试验研究

刘志¹, 杨阳²

(1. 中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116033;

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:随着海洋事业的发展,海岸砂土保水成为岛礁生态恢复的重要技术环节。为研究黄原胶(XG)联合微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对石英粉-钙质砂混合砂保水性中能的影响,通过黄原胶与MICP联合处理混合砂,探讨不同黄原胶和MICP浓度下固化混合砂的保水特性、体积变化特性、剪切波速变化特性和微观孔隙特性。试验结果表明,随着黄原胶含量和MICP浓度的增加,固化土的蓄水特性提升显著。与未处理砂土7d产生72.59%的质量损失率相比,5% 2.0XG-MICP固化土的质量损失率仅13.1%,约降低81.95%。7d试验时间内,XG-MICP固化土的体积变化率小于XG固化土,XG-MICP固化土具有更高的体积稳定性。随着黄原胶浓度的增加,XG固化土的剪切波传递时间延长,剪切波速降低。相较于XG固化土,受水分含量影响,XG-MICP固化土呈现更久的剪切波传递时间和更小的剪切波速,XG-MICP样品孔隙中呈现菱形的方解石沉淀。试验验证了用黄原胶联合MICP技术改善混合砂土蓄水性的可行性,可为海岸地区的砂土改良提供参考。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP);黄原胶;混合砂;蓄水特性;剪切波速测试

中图分类号:TU411.91 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)03-0049-09

Improvement of water retention characteristics of mixed soils using XG-MICP

LIU Zhi¹, YANG Yang²

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd, Dalian 116033, Liaoning, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: With the development of marine industry, coastal sand and soil water retention has become an important technical link in the ecological recovery of islands and reefs. The effect of synergising xanthan gum (XG) with Microbially Induced Calcium Precipitation (MICP) on the water retention properties of silica sand-calcium carbonate mixed sand was investigated by treating the sand with both XG and MICP simultaneously. A series of experiments including water retention, volume change, shear wave velocity and microscopic analysis were carried out to evaluate the treated sand at different concentrations of XG and MICP. The results showed

收稿日期:2024-04-30

基金项目:国家自然科学基金(52108300)

作者简介:刘志(1981-),男,高级工程师,主要从事市政工程研究,E-mail:34111811@qq.com。

杨阳(通信作者),男,博士,E-mail:yyyoung@cqu.edu.cn。

Received: 2024-04-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52108300)

Author brief: LIU Zhi (1981-), senior engineer, main research interest: municipal engineering, E-mail: 34111811@qq.com.

YANG Yang (corresponding author), PhD, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

that the water storage characteristics of the cured soil improved significantly with increasing xanthan gum content and MICP concentration. Compared with the untreated sandy soil that produced a mass loss rate of 72.59% over 7 d, the mass loss rate of 5% 2.0 XG-MICP cured soil was only 13.1%, which was reduced by a factor of about 81.95%. The rate of change in volume of the XG-MICP cured soil over the 7 d test days was less than that of the XG cured soil, and the XG-MICP cured soil had a higher volumetric stability. With the increase of xanthan gum concentration, the shear wave transmission time of XG-cured soil was prolonged and the shear wave velocity decreased. Compared with XG-cured soil, XG-MICP-cured soil showed greater shear wave transmission time and smaller shear wave velocity as affected by moisture content. The pores of XG-MICP samples showed rhombic calcite precipitation. The experiment verified the feasibility of using xanthan gum combined with MICP technique to improve the water storage of mixed sandy soils, which is expected to provide a reference for improvement of sandy soils in coastal areas.

Keywords: microbially induced calcium precipitation (MICP); xanthan gum; mixed sand; water retention characteristics; shear wave velocity test

在全球范围内,海岸地区正面临着复杂的气候变化和强风侵蚀的挑战^[1-2],其水土保持至关重要。在热带和亚热带地区海岸,珊瑚礁碎片和海洋生物贝壳在海浪作用下与石英砂混合,形成了一种混合砂^[3-4]。这种自然形成的混合砂土在海滩和海岸沙丘上广泛存在。提高海岸地区砂土的水分保持能力,能够减少侵蚀并提高土地的生产力和生态稳定性^[5],进而有效提高海岸处植被的生长潜力,这对海岸岸坡抗侵蚀和保护生物多样性意义重大。

海岸地区水资源的管理和海岸砂蓄水是农业生产与生态恢复的关键挑战之一^[6]。当黄原胶(XG)与砂土混合时,砂土孔隙中会形成凝胶状网络结构,以储存和锁定水分。Shi等^[7]研究表明,与未加固钙质粉土相比,5%XG固化钙质粉土的保水性显著提升。此外,XG的存在能有效提升砂土强度和物理性质。Bozyigit等^[8]通过无侧限抗压试验研究了不同时间和含水量对XG固化土无侧限抗压强度的影响,试验结果表明,25%含水量、养护90 d时,2%XG固化土的强度增幅最大。凝胶状的网络结构能有效减少水分过快地通过蒸发或渗透从砂土中流失。陈海雁等^[9]证明了1.5 g/L的XG含量能有效缓解高盐环境对植物生长的危害,进一步验证了XG能有效促进植物生长。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)加固砂土是利用微生物代谢活动产生碳酸钙,以充填砂土孔隙,从而降低水分流失的速度^[10-11]。Xiao等^[12]的试验结果表明,MICP技术生成的碳酸钙沉淀通常以方解石存在于砂土孔隙之间。砂土具有高孔隙率和低团聚性等特点,MICP生成的碳酸钙沉淀能促进形成更稳定的砂土结构,减少水分通过大孔隙的蒸发或渗透流失,提高砂土毛细作用力,增加保水性^[13]。此外,MICP能有效增强砂土强度,碳酸钙沉淀胶结

不同的砂土颗粒,能有效增强砂土的强度和稳定性,减少砂土的侵蚀^[14]。延长砂土保持水分的时间能为植物根系提供更持续的水分供应^[15-16]。

XG与MICP联合应用以改善混合砂的保水性能是一种新兴的砂土改良方法。作为一种天然高分子聚合物,XG具有显著的水吸附能力和黏结性^[17]。砂土中的黄原胶能够迅速吸收并储存水分,从而显著提高砂土的保水性能^[18]。此外,其黏性特性可增强砂土颗粒间的黏结力,有效减少水流引起的侵蚀和颗粒流失^[19]。生物聚合物提供的阳离子吸引力能促进砂土中矿化菌的代谢活动^[20-21]。XG和MICP产生的碳酸钙共同作用于砂土的孔隙结构,能提高砂土的强度和毛细保水能力,减少水分的快速流失。XG与MICP生成的碳酸钙具有环境友好和可持续性等优点^[22-23],其联合应用有助于改善砂土性质,对于海岸地区的农业生产、植物生长以及生态恢复具有较为重要的现实意义。

针对联合XG和MICP固化的海岸地区混合砂,笔者通过蒸发试验、体积涨缩试验和剪切波速测试试验,研究海岸地区混合砂28 d固化时间内的蓄水特性与剪切波速变化,以期为海岸地区的砂土改良提供科学依据和技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 混合砂制备

试验所用石英粉的主要成分为 SiO_2 ,呈浅灰色,粒径0.015~0.15 mm,颗粒形状规则。试验所用钙质砂取自中国南海,主要成分为 CaCO_3 ,颗粒形状不规则,其中夹杂有贝壳和珊瑚残片等。将40%石英粉和60%钙质砂配制成为试验所用的混合砂,其粒径级配如图1(a)所示,石英粉形貌如图1(b)所示,钙质砂形貌如图1(c)所示。

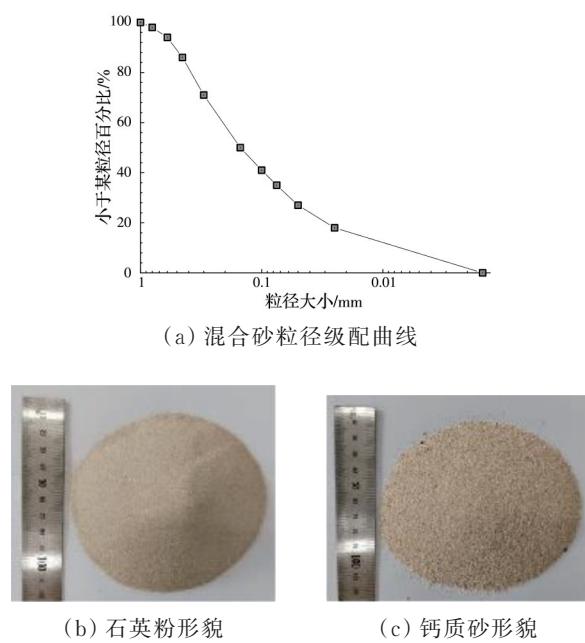


图1 混合砂级配形貌特性

Fig. 1 Morphology characteristics of mixed sand gradation

1.2 矿化菌培养

选用巴氏芽孢杆菌进行矿化。液体培养基的制备包括:1 L去离子水、20 g酵母提取物、15 g氯化铵、20 mL硫酸锰、20 mL氯化镍溶液、1 mol/L的NaOH溶液30 mL,在30 °C的摇床中以200 r/min的速度培养18 h,菌液如图2(a)所示。胶结液(BS)的制备需要尿素和氯化钙,混合液浓度分别为1.0、1.5、2.0 mol/L。

一次培养的菌液量无法满足所有试样的消耗,因而进行了3次矿化菌培养。为确保菌液浓度恒定,使用可见分光光度计进行菌体浓度测试,3次培养的菌液OD₆₀₀值见图2(b),分别为1.216、1.229、1.231。利用尿素水解法对细菌活性进行测试,具体方法为,将2 mL的细菌溶液与18 mL浓度为1.1 mol/L的尿素混合,置于25 °C的恒温水浴中,计算20 min内每分钟电导率平均增长值。3次培养的细菌活性如图2(c)所示,分别为0.115、0.116、0.115 ms/(cm·min)。

1.3 黄原胶

黄原胶是一种天然多糖类聚合物,由野油菜黄单孢杆菌产生,作为增稠剂和稳定剂,广泛应用于食品、制药和工业等领域。试验所用黄原胶在水中溶解后可形成高黏度溶液,具有优越的稳定性和水溶性。

1.4 试验方法

试验所用样品为φ39.1 mm×80 mm的圆柱形样品,利用静力压样模具和千斤顶进行压样,压样模具如图3所示。CS-MICP样品的制备方法为:将

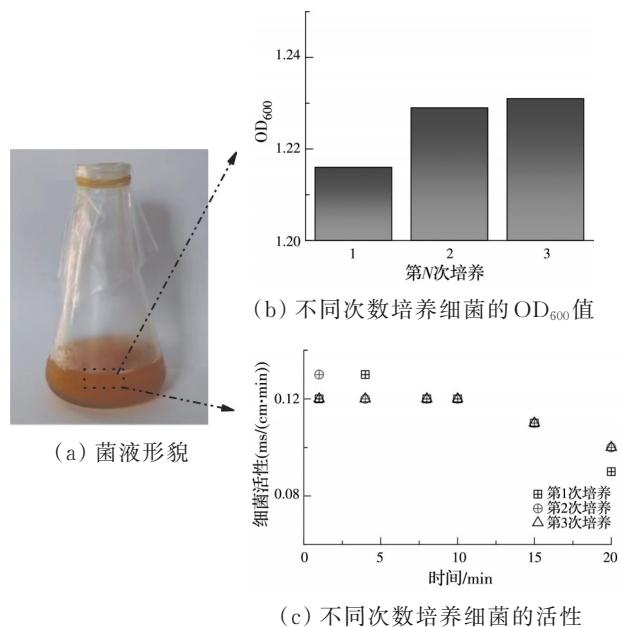


图2 菌液制备及菌液均一性检测

Fig. 2 Preparation of bacterial solution and testing of bacterial solution uniformity

水和胶结液1:1混合后掺入到不同XG含量的混合砂中;XG-MICP样品的制备方法为:将MICP和胶结液1:1混合后掺入到不同XG含量的混合砂中,制样含水量为12%,密度为1.86 g/cm³。

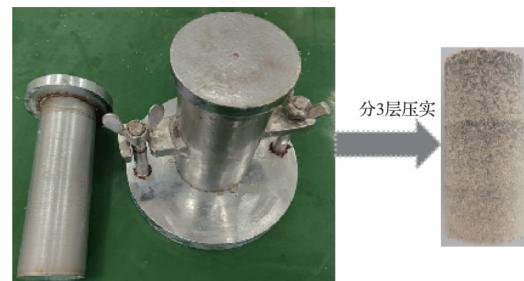


图3 制样模具及样品

Fig. 3 Preparation mold and sample

压样时,样品分3层压实,每压一层进行下一层前进行抛毛。为防止土体与压样器粘连,在压实模具底部和顶部垫有圆片状影印纸。样品中XG的含量分别为1%、3%、5%。胶结液浓度分别为1.0、1.5、2.0 mol/L,制样模具及样品如图3所示。

将不同条件下的样品放置在室温环境中,避免阳光直射。不考虑28 d时间内黄原胶的降解,记录每个样品的初始质量,在试验开始后的第1、7、14、21、28天称量并计算不同样品的质量损失率,即水分损失率。比较不同样品在不同时间点的质量损失率变化趋势,评估不同条件下的样品保水性能。利用游标卡尺测量试验开始后第1、7、14、21、28天试样的直径和高度,计算不同试验天数下样品的体积膨胀率。

利用剪切波速仪对砂柱进行波速测量,采用 tip to tip 测量方法^[19],剪切波如 4 所示。Shi 等^[24]的研究表明,随着正弦波频率的增加,波在样品中的传播时间略有减少,且电压大小不会对传播时间产生影响。因此,为了得到较为清晰的波形和准确的波速数据,采用仪器最大电压 20 V,折中频率 15 kHz 作为所有样本的信号激励电压与频率。取具有代表性的土体样品,将其切割成 1 cm×1 cm×1 cm 的立方体,为增加样品导电性,对样品表面喷金 120 s 后进行 SEM 拍摄。



图 4 波速测量图

Fig. 4 Wave velocity measurement diagram

2 试验结果与讨论

2.1 混合砂蓄水特性

通过不同天数下 XG-MICP 混合砂的质量损失率对混合砂保水性能进行讨论。图 5(a)为不同 XG 浓度固化土的质量损失率。可以看出,未固化土 7 d 产生了 72.59% 的质量损失率,与未固化土的质量损失率相比,添加 XG 的固化土质量损失率较低,这

是由于生物聚合物 XG 含量的提升使混合砂中形成更多的类似网状结构或凝胶状物质,填充砂土孔隙空间,阻止水分的流失^[7]。与土体自身水分含量有关,随着试验天数的增加,所有样品产生质量损失率的速率均下降。XG 和胶结液(CS)的联合应用显著降低了砂土的质量损失率。由图 5(b)可知,随着 CS 浓度的提高,1% XG 含量的固化土保水性能提高。随着试验天数的增加,1% XG 固化土产生质量损失率的速率呈明显下降趋势。这是由于溶液中盐溶液对空气中水分子的吸引增加了砂土中的水分含量。由于氯化钙和尿素的吸水性能较强,1% XG 氯化钙浓度高的固化土会吸收更多的水分,相同时间内质量损失率更低。由图 5(c)可知,相较于 1% 固化土,5% XG 含量固化土保水性能更好,7、14 d 对应的 5% XG 固化土的质量损失率更小,且产生质量损失的速率更低。此外,随着 CS 中钙离子和尿素浓度的提升,5% XG 固化土的质量损失得到了进一步改善。

图 5(d)为不同浓度 MICP 溶液条件下 1% XG 固化土的质量损失率,与图 5(a)相比,7 d 时间的 XG-MICP 固化土的质量损失率高于 XG-CS,这是菌液的存在导致的。细菌分解尿素溶液产生碳酸根离子,碳酸根离子与氯化钙结合生成碳酸钙沉淀,导致 7 d 时间内 XG-MICP 固化土中溶液的消耗增加,因而产生更高的质量损失率。14、21 d 时,随着菌液活性的降低,XG-MICP 固化土产生质量损

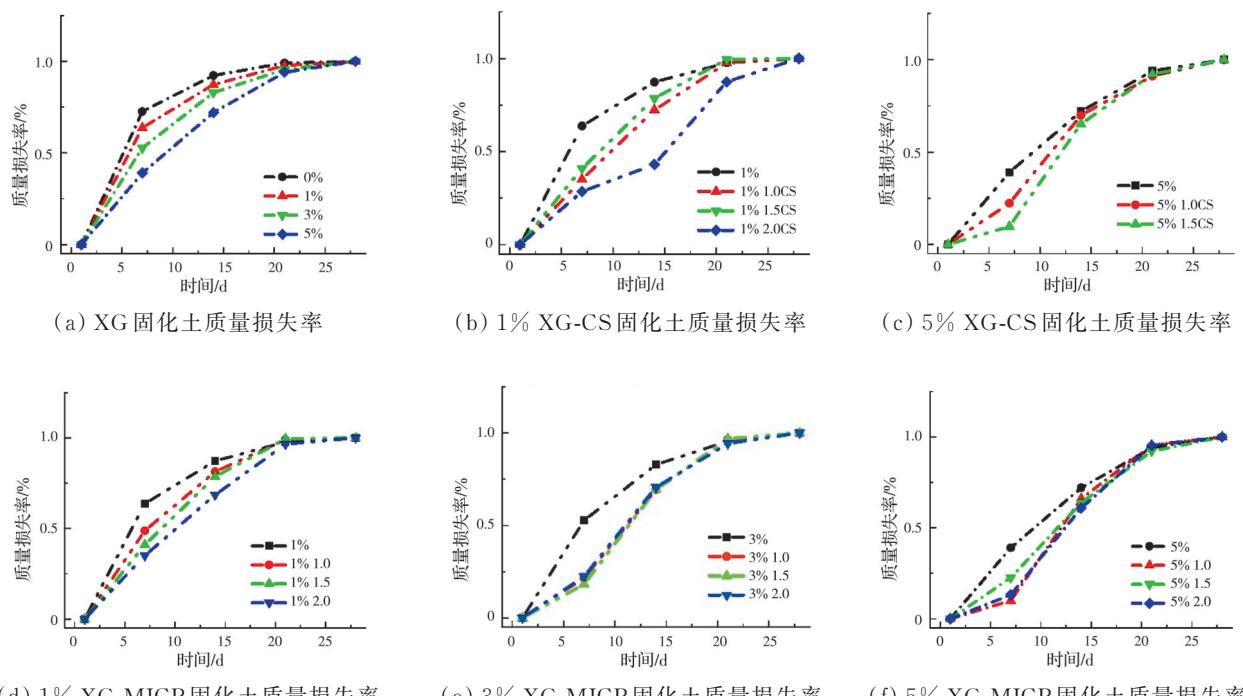


图 5 不同 XG 浓度、CS 浓度及 MICP 浓度下的质量损失率

Fig. 5 Mass loss rate under different XG concentration, CS concentration and MICP concentration

失率的速率下降。

与未添加MICP溶液的1%XG固化土相比, MICP溶液浓度越高, 相同时间产生的质量损失率越小。表明MICP和XG的联合作用对混合砂的蓄水性起着积极作用, 但其作用的充分发挥需要一定时间才能。随着试验天数的延长, MICP产生了更多的碳酸钙, 进一步填充砂土孔隙, 有效地减少了水分的流失, 从而降低了质量损失率。图5(e)为不同浓度MICP溶液条件下3%XG固化土的质量损失率。由试验结果可以看出, 3%XG条件下不同MICP浓度的固化土质量损失率相差不大。由于MICP浓度的提升, 相较于3%-1.5MICP固化土, 3%-2.0MICP固化土中细菌利用CS产生碳酸钙的速率较快, 因而在第7天产生了略高的质量损失率。图5(f)为不同浓度MICP溶液条件下5%XG固化土的质量损失率。可以看出, 第7天时, XG-MICP固化土的质量损失率出现波动, 与未处理砂土7 d产生72.59%的质量损失率相比, 5% 2.0XG-MICP固化土的质量损失率仅13.1%, 约降低81.95。随着试验天数的增加, 碳酸钙沉积完成, 质量损失率随着MICP溶液浓度的提升而降低。

2.2 混合砂体积涨缩特性

图6(a)为不同XG浓度固化土的体积变化率。可以看出, 由于XG失水体积会产生较大变化, 随着XG浓度的提升, 7 d时间内高XG浓度固化土的体积变化较大。随着试验时间的增加, 与未固化土相

比, 5%XG固化土产生体积变化的速率逐渐降低。第21天和第28天时不同XG浓度的固化土体积变化率相近。图6(b)、6(c)为添加不同CS浓度的XG固化土的体积变化率。与未添加CS的XG固化土相比, XG-CS固化土出现了体积先缩小再膨胀的过程。具体来说, 在试验的第14~21天, 添加CS的试验样品出现了较大的体积变化。这可能是由于CS中的金属阳离子与XG产生了化学交联反应, 导致体积变化。图6(d)、(e)为添加不同MICP浓度的XG固化土的体积变化率。可以看出, 与未添加MICP的XG固化土相比, 添加MICP溶液的固化土均在第14~21天产生了较大的体积变化。

图6(f)为添加不同MICP浓度的5%XG固化土的体积变化率。可以看出, 在7天时, 相较于5%XG固化土, 加入MICP的固化土体积变化率显著降低, 但在第21天时, 产生了较大的体积变化。刘浩林等^[25]利用MICP加固膨润土发现, MICP可抑制膨润土体积变化的进一步发展。同理, 由于前7 d的MICP菌液活性较高, 细菌介导的矿化作用促进了土体中碳酸钙的形成, 从而增加了土体的稳定性和密实度。这种稳定性和密实度的提高降低了土体的体积变化率, 使其呈现出较低的体变率。随着试验时间的增加, MICP菌液逐渐失去活性, 随着固化土中水分的变化, XG开始出现失水收缩现象, 固化土体积变化增大。XG-MICP技术在改善混合砂膨胀率方面具有一定的复杂性。调节MICP和XG浓度可以实现对膨胀率的部分控制, 但为提高联合

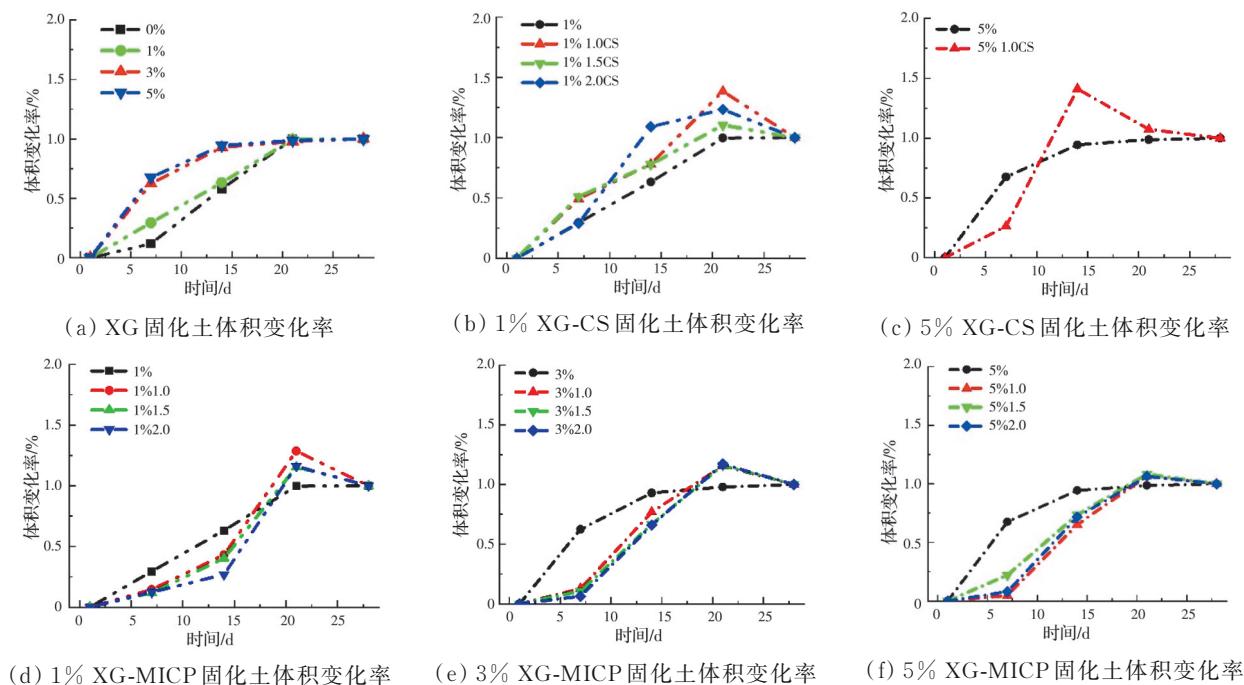


图6 不同XG浓度、CS浓度及MICP浓度下的体积变化率

Fig. 6 Volume change rate under different XG concentration, CS concentration and MICP concentration

应用的效果和稳定性,其相互作用机制仍需进一步研究和探讨。

2.3 混合砂剪切波速

图 7(a)~(d) 为不同 MICP 浓度下 1% XG 固化土剪切波的传递时间。可以看出,随着试验时间的增加,不同 MICP 浓度下 1% XG 固化土的剪切波传递时间缩短。第 1 天和第 12 天剪切波传递时间与 MICP 浓度成正比,即 MICP 浓度越高,剪切波传递时间越长。这是由于更高浓度的 MICP 溶液具有更好的保水性,水分导致了砂柱剪切波传递时间的延长。随着水分的散失,第 21 天和第 28 天剪切波传递时间较为相似。图 7(e)~(h) 为不同 MICP 浓度

下 3% XG 固化土剪切波的传递时间。与 1% XG 固化土相比,3% XG 固化土剪切波的传递时间更长,这是由于 XG 充填于砂土孔隙中,XG 的存在阻碍了剪切波的传播,增加了波速在土体中的传播损失。由图 7(i)~(l) 可以看出,与 1% 和 3% XG 固化土相比,5% XG 固化土剪切波的传递时间更长。此外,28 d 时间范围内 XG-MICP 联合固化土土的水分无法完全蒸发散失,对 5% XG 固化土柱剪切波速的影响较为显著。

图 7(m)~(l) 为不同 MICP 浓度下 1% XG 固化土的剪切波速变化。剪切波速计算公式见文献[19]。可以看出,剪切波速随试验时间的增加呈线性增加。1% XG

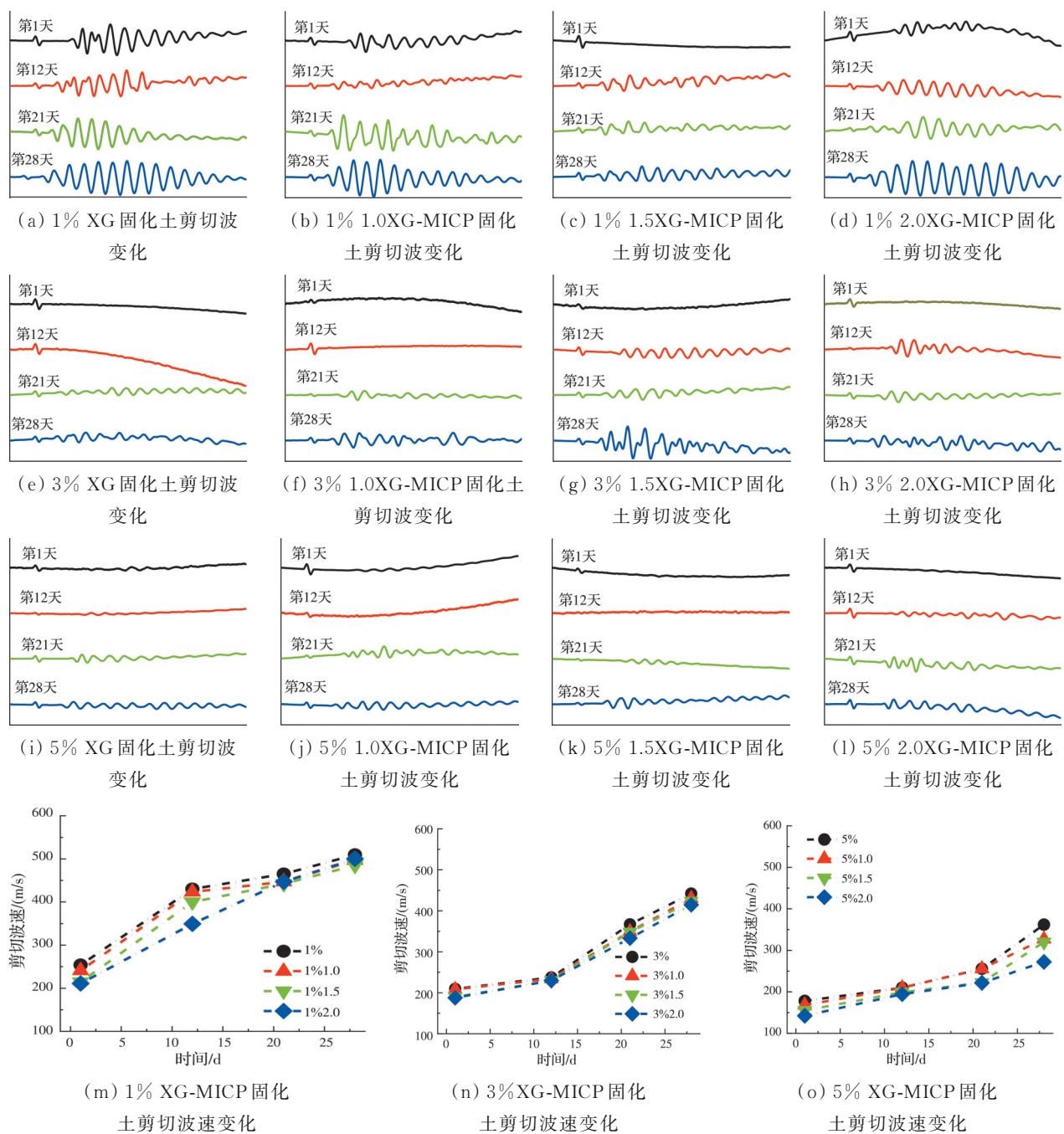


图 7 不同 XG 含量及 MICP 浓度下的剪切波速变化

Fig. 7 Shear wave velocity changes under different XG concentration and MICP concentration;

固化土的剪切波速由第1天的253 m/s增加至第28天的509 m/s,增加了约1倍。固化土的剪切波速与MICP浓度成反比,这与砂柱的保水性能有关。此外,由图7(n)、(o)可知,随着XG浓度的提高,固化土的剪切波速降低,但随着试验时间的增加,不同浓度固化土的剪切波速均呈现增长趋势。

2.4 微观机理

为揭示XG-MICP技术在提高土体蓄水性方面的微观反应机理,对不同XG含量和MICP浓度的样品进行SEM测试,结果见图8。由图8可以看出,随着XG浓度的升高,XG固化土颗粒间的胶体增

多。XG作为一种黏性生物聚合物,在砂土颗粒间形成了稳定的连接结构,填充了砂土颗粒孔隙,增强了颗粒间的连接力,在SEM图像中呈现出更加均匀和稳定的结构特征。此外,由图8可知,XG-MICP的联合应用对改善砂土颗粒孔隙具有显著效果。随着MICP浓度的增加,SEM图像呈现出更多菱形状的方解石沉淀。微生物诱导的碳酸钙沉淀和XG进一步结合,填充砂土孔隙,促进土体颗粒间的结合。因此,随着MICP浓度的增加,SEM图像中的孔隙度减少,颗粒间的连接间表现为更加致密的结构。

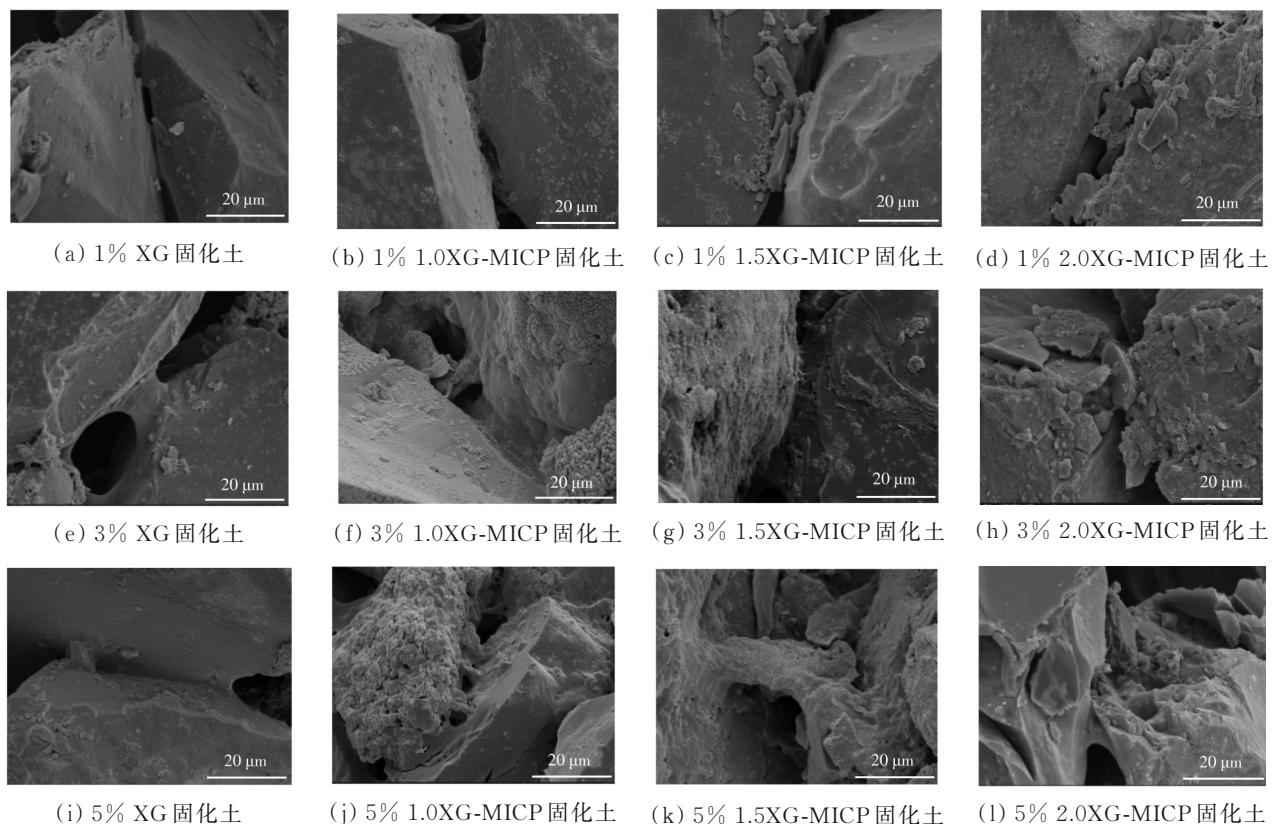


图8 XG和XG-MICP固化混合砂的扫描电镜图(放大倍数6 000)

Fig. 8 SEM images of XG and XG-MICP cured mixed sand (Magnification 6 000)

3 结论

通过蓄水试验,体积涨缩试验和剪切波速测试试验对不同XG含量和不同MICP浓度的XG-MICP固化混合砂的蓄水特性进行研究。挑选出典型截面,利用SEM对固化混合砂的微观结构进行研究,得到以下主要结论:

1)XG-MICP技术能够显著改善混合砂的蓄水性。混合砂蓄水性随着XG含量的增加而增加。相同浓度的XG含量,随着MICP浓度的增加,混合砂蓄水性增加。与相同浓度的XG-CS固化土相比,14 d试验时间内,XG-MICP固化土的蓄水性相对

较弱。

2)随着XG含量的提升,7 d时间内5%XG浓度固化土的体积变化较大,与未添加MICP的XG固化土相比,细菌介导的矿化作用促进了混合砂中碳酸钙的形成,增加了土体的稳定性。

3)由于砂柱含水量阻碍了剪切波传递速度,XG固化土中剪切波传递时间略短于XG-CS固化土和XG-MICP固化土。随着试验时间的增加,样品的剪切波速随试验进行时间呈线性增加趋势。相同试验时间,由于XG对砂柱剪切波传递的阻碍及较高的含水量,随着XG浓度的提高,固化土剪切波速降低。

4) 通过SEM观察发现,XG-MICP联合应用的SEM图像呈现出更多菱形状的方解石沉淀,对改善砂土颗粒孔隙具有显著效果。

参考文献

- [1] TOIMIL A, LOSADA I J, NICHOLLS R J, et al. Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 156: 103611.
- [2] 蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 等. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(10): 1093-1103.
- CAI F, SU X Z, LIU J H, et al. Coastal erosion in China under the background of global climate change and its preventive countermeasures [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(10): 1093-1103. (in Chinese)
- [3] BRANDES H G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(1): 113-126.
- [4] 李涛, 赵洪扬, 翁勃航, 等. 细颗粒形状和含量对钙质混合砂强度的影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(7): 1517-1525.
- LI T, ZHAO H Y, WENG B H, et al. Experimental study on effects of shape and content of fine particles on strength of calcareous mixed sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(7): 1517-1525. (in Chinese)
- [5] 黄馨平. 黄原胶及圆苞车前子壳胶改良砂质黏土的物理力学性能研究[D]. 西安: 西京学院, 2023.
- HUANG X P. Study on the physical and mechanical properties of sandy clay improved xanthan gum and the *Psyllium* husk gum [D]. Xi'an: Xijing University, 2023. (in Chinese)
- [6] 韩雪莹. 我国海岸带生态环境治理法律机制研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- HAN X Y. A research on the legal mechanism of ecological environment governance in China's coastal zone [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022. (in Chinese)
- [7] SHI J Q, XIAO Y, FU G Y, et al. Calcareous silt earthen construction using biopolymer reinforcement [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106571.
- [8] BOZYIGIT I, JAVADI A, ALTUN S. Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1160-1172.
- [9] 陈海雁, 张振粉, 靳振海, 等. 黄原胶对盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草原与草坪*, 2023, 43(5): 57-66.
- CHEN H Y, ZHANG Z F, JIN Z H, et al. Effects of xanthan on seed germination and seedling growth of alfalfa under salt stress [J]. *Grassland and Turf*, 2023, 43(5): 57-66. (in Chinese)
- [10] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019048.
- [11] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. *地基处理*, 2019, 1(1): 26-31.
- LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [12] XIAO Y, HE X, STUEDLEIN A W, et al. Crystal growth of MICP through microfluidic chip tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(5): 06022002.
- [13] 齐萌. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固土体的水力及力学特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- QI M. Study on hydraulic and mechanical properties of soil reinforced by microbial-induced calcium carbonate precipitation [D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [14] XIAO Y, ZHOU W, SHI J Q, et al. Erosion of biotreated field-scale slopes under rainfalls [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(3): 04022030.
- [15] LIU B, TANG C S, PAN X H, et al. Potential drought mitigation through microbial induced calcite precipitation-MICP [J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(9): e2020WR029434.
- [16] TANG C S, YIN L Y, JIANG N J, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: A review [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(5): 94.
- [17] 咸娜. 黄原胶复配及流变学特性和应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- XIAN N. The rheological characteristics and application of xanthan gum and its hydrocolloids mixtures [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [18] BERNINGER T, DIETZ N, LÓPEZ Ó G. Water-soluble polymers in agriculture: Xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics [J]. *Microbial Biotechnology*, 2021, 14(5): 1881-1896.
- [19] 付贵永, 肖杨, 史金权, 等. 干湿循环下EICP联合黄原胶加固钙质粉土劣化特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(11): 2341-2351. 1007.002.
- FU G Y, XIAO Y, SHI J Q, et al. Experimental study on the degradation of EICP and xanthan gum treated

- calcareous silt under dry-wet cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2341-2351. (in Chinese)
- [20] WANG Z, SU J F, ALI A, et al. Chitosan and carboxymethyl chitosan mimic biomineralization and promote microbially induced calcium precipitation [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 287: 119335.
- [21] 林泓民, 卫仁杰, 李亮亮, 等. 黄原胶改进MICP加固效果的试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 618-627.
- LIN H M, WEI R J, LI L L, et al. Reinforcement effect of MICP improved by xanthan gum [J]. Henan Science, 2022, 40(4): 618-627. (in Chinese)
- [22] AKPAN E U, ENYI G C, NASR G G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020, 10(5): 1933-1948.
- [23] RAJASEKAR A, WILKINSON S, MOY C K S. MICP as a potential sustainable technique to treat or entrap contaminants in the natural environment: A review [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2021, 6: 100096.
- [24] SHI J Q, HAEGERMAN W, CNUDDE V. Anisotropic small-strain stiffness of calcareous sand affected by sample preparation, particle characteristic and gradation [J]. Géotechnique, 2021, 71(4): 305-319.
- [25] 刘浩林, 李丹, 胡波, 等. 基于MICP技术改良的膨胀土膨胀特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 150-156.
- LIU H L, LI D, HU B, et al. Experimental study on improving the swelling characteristics of expansive soil using MICP technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(6): 150-156. (in Chinese)

(编辑 胡玲)