

巨大芽孢杆菌改良邯郸强膨胀土试验研究^①

覃永富, 卢望, 袁梦祥, 沈泰宇, 李贤, 汪时机

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 膨胀土是一种分布广, 对环境的湿热变化敏感的高塑性黏土, 容易产生胀缩裂隙; 为降低膨胀土的自由膨胀率, 提高其抗剪强度, 利用巨大芽孢杆菌诱导方解石沉积(MICP)技术, 搭配不同的固结溶液对膨胀土进行固化改良室内试验. 通过 5 组自由膨胀率试验筛选出了两组效果最明显的改良组合: 巨大芽孢杆菌+1.0 M 胶结液($\text{CaCl}_2 + \text{Urea}$)的混合溶液、巨大芽孢杆菌+1.0 M CaCl_2 的混合溶液. 通过三轴剪切试验和三向膨胀力试验研究了改良前后土样的自由膨胀率、抗剪强度和膨胀力. 结果表明, 对比于未改良的重塑膨胀土, 改良后的膨胀土表现出来的各项参数均有不同程度的改善. 其中, 巨大芽孢杆菌+1.0 M CaCl_2 溶液改良组膨胀土自由膨胀率下降了 85.4%, 内摩擦角提高了 5.2%, 黏聚力提高了 11.5%, 垂直方向膨胀力下降了 20%、水平方向膨胀力平均下降 23%; 巨大芽孢杆菌+1.0 M 胶结液($\text{CaCl}_2 + \text{Urea}$)的混合溶液改良组膨胀土自由膨胀率下降了 87.7%, 内摩擦角提高了 18.5%, 黏聚力提高了 32.1%, 垂直方向膨胀力下降了 29%、水平方向膨胀力平均下降了 32%; 巨大芽孢杆菌和胶结液复合改良强膨胀土的方法是可行的.

关键词: 膨胀土; 巨大芽孢杆菌; 自由膨胀率; MICP; 三向膨胀力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)08-0087-09

膨胀土是一种典型的区域性特殊黏性土, 主要由伊利石和蒙脱石等强亲水性矿物组成. 膨胀土吸水时膨胀软化, 失水时又会收缩开裂, 随含水率不同反复胀缩^[1], 使土体不稳定. 膨胀土在我国广泛分布, 对路基、边坡和建筑物有灾难性的影响, 甚至造成巨大的经济损失^[2]. 膨胀力是土体在不允许侧向变形下充分吸水而保持其不发生竖向膨胀所需施加的最大压力^[3], 是反映膨胀土膨胀特性的指标. 土的抗剪强度是土的强度指标, 膨胀土的胀缩都会使抗剪强度降低. 国内外许多学者对膨胀土的膨胀力和抗剪强度机理的研究取得了一系列成果^[4-10], 目前研究改良膨胀土对工程建设具有实际意义. 刘清秉等^[11]用河南安阳地区膨胀土进行 ISS 固化剂改性试验, 研究发现在 ISS 与水配比为 1:350 时, 膨胀力降低了 53.76%, ISS 加固作用后的膨胀土黏聚力增大 74.96%, 内摩擦角增加 7.7%. 沈泰宇等^[12]通过使用不同配比的石灰(CaO)、氯化钾(KCl)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯纤维的不同组合对膨胀土进行复合改良, 发现 4% CaO +0.8%PVA 的配比组合可提高膨胀土抗剪强度约 110%, 5% KCl +0.8%PVA 配比溶液降低强度约 20%, 5% KCl +0.8%PVA+0.6%聚丙烯纤维配比溶液可提高约 15%的抗剪强度. 刘洪伏^[1]等通过对膨胀土添加 0.8%PVA+4% CaO 的混合溶液、0.8%PVA+5% KCl 的混合溶液, 并添加 0.6%聚丙烯纤维进行改性研究, 发现膨胀土的膨胀力明显下降, 而后者下降更多. 以往研究多数是物理、化学改性, 对微生物改良膨胀土的研究报道较少.

① 收稿日期: 2019-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(11572262), 国家大学生创新创业训练计划项目(201810635046), 中央高校基本业务费专项资金(XDJK2018AB003), 重庆市教委科学基金(CY180212).

作者简介: 覃永富(1996—), 男, 本科, 主要从事微生物固化土体方面的研究.

通信作者: 汪时机, 教授, 博士生导师.

土体中存在着各种微生物^[13]，它们在土体中进行一系列的生命活动，促进许多生化反应的发生，包括矿化作用^[14]、生成分泌物^[15]等。通过给特定微生物提供钙源和氮源，会析出具有胶结作用的碳酸钙晶体沉淀，这种微生物成矿作用常被称为微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial Induced Calcium carbonate Precipitation, 简称 MICP)技术^[16]，该技术早期可被用来堵塞多孔介质材料和石材文物修复^[17-18]。重金属对土壤危害极大^[19]，应用其氧化还原、甲基化和去甲基化的能力来转化重金属，改变金属的价态，使其从有毒变无毒或者成为一个稳定态^[20]，还可以应用其分泌物来吸附石油烃、染料等多种污染物质，净化土壤^[21]，应用该技术可以修复混凝土表面的裂缝^[22]，还能提高混凝土表面抗碳化能力^[23]。自 Whiffin 博士^[24]提出采用微生物沉淀碳酸钙技术胶结松散砂颗粒以来，应用该技术加固土体已经成为岩土工程研究的热门课题，该技术生产出来的具有胶结作用的碳酸钙可胶结土颗粒，提高土体强度、刚度^[25-27]，这种液体材料具有流动性好，渗透性强等特点，该技术具有反应速率和胶结强度可控，不污染环境等优势。巨大芽孢杆菌可催化尿素产生碳酸根离子，是一种无毒的环境友好型土壤细菌，在给定钙源和营养液后，可诱导生成有胶结作用的碳酸钙晶体。

本试验利用巨大芽孢杆菌菌液加钙源、营养液的混合液体浸泡邯郸膨胀土，诱导碳酸钙胶结膨胀土。通过试验探究了不同的胶结溶液在改良过程中的膨胀土自由膨胀率变化规律，在此基础上选取改良效果好的试验组，探究其改良膨胀土的常规三轴抗压试验和膨胀力试验的力学性能，得到改良土的强度指标和膨胀时程曲线。

1 试验材料

1.1 试验土样

试验采用南水北调中线工程河北邯郸段膨胀土，重塑制样，测得其基本物理力学性质见表 1、表 2^[12]。土样自由膨胀率大于 90%，为强膨胀土，塑性指标大，含有大量的蒙脱石、伊利石等矿物。

表 1 邯郸膨胀土基本物理指标

天然含水率(ω)/%	比重(G_s)	液限(ω_L)/%	塑限(ω_P)/%	塑性指标(I_P)	自由膨胀率(δ_{ef})/%
13.4	2.75	81.9	47.3	34.6	130

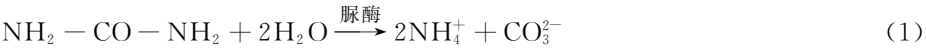
表 2 邯郸膨胀土的粒度成分

粒径/mm	<2.0	<1.0	<0.5	<0.25	<0.075	<0.05	<0.01	<0.005	<0.001
粒度组成/%	100.00	99.17	89.07	76.48	64.82	48.83	11.67	7.56	1.90

1.2 试验用菌及其活性测定

试验用菌为巨大芽孢杆菌(BNCC 336739)，菌种以冻干粉状态真空干燥保存于冻干管内。培养基分析纯级别为 AR。基础液体培养基(Basic liquid medium, BLM)(g/L)：牛肉膏 3、蛋白胨 10、NaCl 5，PH 7.0，溶剂为蒸馏水。基础固体培养基(Basic solid medium, BSM)在 BLM 基础上添加 15g/L 的琼脂。基础培养条(Basic culture condition, BCC)：接种量 1%(V/V)，瓶装量 30 mL/250 mL，在 30℃ 恒温振荡培养箱中以 200 r/min 的转速培养 48 h^[28]。

根据脲酶催化尿素水解反应发现，随着反应的发生，原本不导电的尿素水解成可导电的铵根离子和碳酸根离子，溶液中的离子数量逐渐增加，同时溶液的导电性也逐渐增强。Whiffin(2004)提出了测量每分钟电导率变化来衡量脲酶活性的方法，并证明尿素水解量与溶液电导率变化量成正比。在本研究中，在烧杯中加入菌液 190 mL 和 1.5 mol/L 的 Urea 溶液 380 mL，将烧杯放入 30℃ 恒温水浴锅中，每 20 min 用电导率仪(DDB-303A)测定溶液电导率，用每分钟内 Urea 平均水解量来反应细菌活性(mmol/L/min)，190 mL 菌液在一天的活性变化见图 1。



由图 1 可知，细菌活性随时间呈衰减趋势，衰减速度越来越慢，最初为 3.655(mmole/L/min)，10 h 时

仍然大于 1.4(mmol/L/min), 1 d 后保持在 0.8(mmol/L/min)左右, 活性良好.

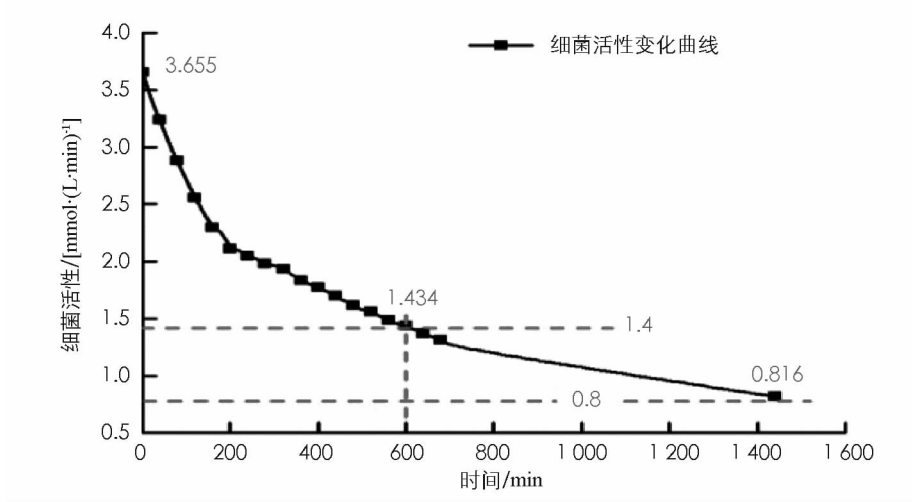


图 1 细菌活性随时间变化关系

2 试验方法

2.1 土样固化方法

采用浸泡法固结土样: 取 5 组重塑膨胀土试样于烧杯中, 每组 300 g, 分别编号 1,2,3,4,5, 具体见表 3. 取母液扩大培养后的菌液, 加蒸馏水按体积稀释一倍, 每组土样加入 360 mL(与土样的质量比为 6 : 5) 稀释后的菌液, 加入后用玻璃棒搅拌均匀, 静置 2 h. 2 h 后, 先用注射器吸出菌液, 然后根据影响土样固化效果的因素, 每组土样加入不同的溶液 360 mL(与菌液等体积)继续固化, 每组加入的菌液种类以及溶液种类见表 3. 加入后同样用玻璃棒搅拌均匀, 静置 22 h, 则一天固化完成, 第二天吸出第一天固化使用的菌液、胶结液, 按第一天的方法重复固化, 一共持续 7 d.

表 3 土样固化试验试样处理方法

编号	菌液种类	添加溶液
1	巨大芽孢杆菌	0.5 M CaCl ₂ + 0.5 M Urea
2		1.0 M CaCl ₂ + 1.0 M Urea
3		蒸馏水
4		0.5 M CaCl ₂
5		1.0 M CaCl ₂

2.2 自由膨胀率试验

在 2.1 所述的土样固化过程中, 从第一天固化完成开始, 每天用四分法取 30 g 代表性土样, 放入电热鼓风干燥箱内, 110 ℃ 下烘干, 碾细并过 0.5 mm 筛, 做自由膨胀率试验. 试验的具体方法见 GBT 50123-1999 土工试验方法标准第 20 条. 每组土样做 2 次平行试验, 2 次结果相对误差控制在 1% 以内, 以此得到 5 组土样在 7 d 内的自由膨胀率变化情况.

2.3 三轴压缩剪切试验

根据自由膨胀率的试验结果, 选取固化效果最好的两组继续做三轴压缩剪切试验. 为了对比固化效果, 本试验一共设置 3 个试验组, 分别是添加 1.0 M CaCl₂ + 1.0 M Urea(以简称菌 + 1.0 M 胶结液)的第 2 组, 添加 1.0 M CaCl₂(以下称菌 + 1.0 M 氯化钙)的第 5 组和添加清水的第 3 组, 每个试验组下设置 3 组试验, 得到围压 150, 200, 250 kPa 时土样的固结排水三轴剪切试验结果.

2.3.1 试样制备

本文着重于巨大芽孢杆菌改良邯郸强膨胀土试验研究, 且考虑实际路基土改良后不能直接路基受力, 需碾压至一定的密实度, 故可将重塑膨胀土以及改良的膨胀土碾碎后过 2 mm 筛, 用 110 ℃ 烘箱烘干 24 h,

取出土样密封,等待土样冷却.完全冷却后,称量土样质量,根据质量取适量蒸馏水均匀喷洒,使土样含水率达 20%.配置好的土应放置湿润 24 h,然后开始制作试样,试样直径为 39.1 mm,高为 80 mm.根据土样基本参数(含水率 20%,相对密度 2.72,干密度 1.65 g/cm³)计算得到每个试样质量为 190.00 g.制作试样时土样应分 5 次添加进制样器,每次添加 38.00 g,添加后用液压千斤顶击实,在添加下一层土样前,将接触面刨毛,待最后一层土样击实后,将试样两端整平,取出试样.

2.3.2 剪切过程

本试验仪器为 FLSY30-1 型应力应变控制式非饱和土三轴剪切仪.每个试验组均设置 150,200,250 kPa 3 个围压梯度,气压均为 100 kPa.在开始排水剪切前,每个试样均在相应净围压及吸力 100 kPa 下固结,待排水量和体变稳定后在不同围压下开始剪切试验.判定稳定的标准为排水量和体积应变每 2 h 不超过 0.012 cm 和 0.063 cm³[29].剪切开始后控制速率为 0.08 mm/min,轴向应变大于 15% 时或偏差应力不再增加时剪切完成.仪器与计算机相连,将自动记录轴力、轴向位移、进排水和体变.

2.4 三向膨胀力试验

本试验仪器为 SPY-1 型岩土三向膨胀仪.首先制样,试样为 40 mm×40 mm×40 mm 标准立方体试样,制作试样时先将改良后的膨胀土和重塑膨胀土烘干,分别碾碎过 2 mm 筛,取 2 mm 筛以下部分配置含水率 20% 的土样并密封,放置润湿 24 h.然后根据土样干密度(1.65 g/cm³)和含水率计算出单个试样的质量,用制样器与液压千斤顶压制而成,然后开始装样试验.将土样装入三向膨胀仪,安装反力架,施加预应力使读数显示为 0.01 kN,以保证试样与连接荷载传感器的板紧密接触,试验过程中三向变形量限制为零,且高水头水箱中一直有水,点击开始后计算机自动记录数据,当膨胀力读数变化 3 h 小于 0.01 kN 时,试样已达到稳定,停止记录.

3 试验结果及分析

3.1 自由膨胀率分析

搭配不同的固结溶液对膨胀土进行固化改良室内试验,自由膨胀率改良效果如图 2.

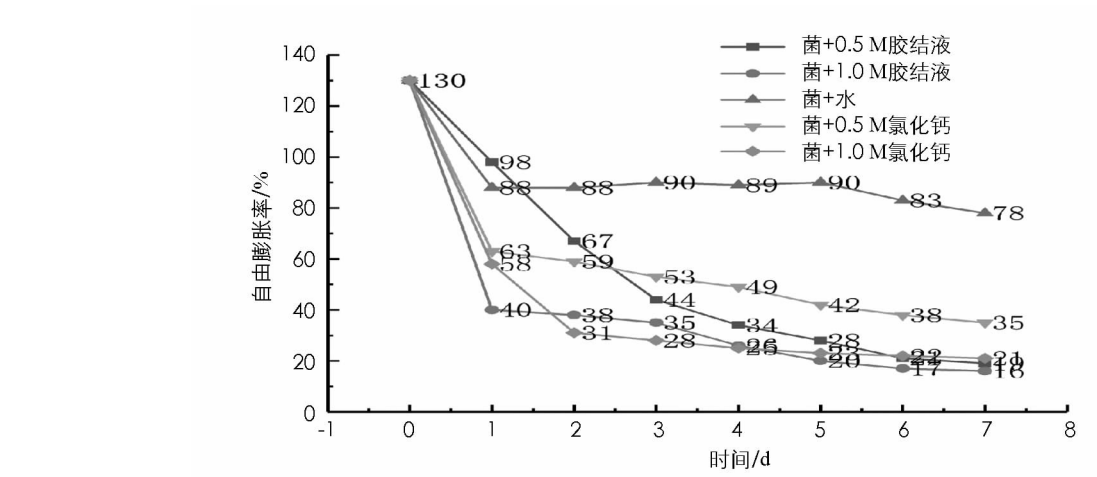


图 2 各参数下改良膨胀土自由膨胀率

菌+水溶液组膨胀土,1 d 后自由膨胀率由原来的 130% 下降到 88%,降低了 42%,随后 6 d 的连续改良其自由膨胀率保持在 88% 左右,不再降低,其原因是巨大芽孢杆菌的生物膜吸附在蒙脱石、伊利石等表面,使矿物表面物理化学性质发生改变,从而改变其吸水的性质,增强其疏水性,降低孔隙的毛细压力,破坏或减小结合水膜,降低自由膨胀率,改良 1 d 后的矿物表面被巨大芽孢胞杆菌膜完全包裹,生物膜达到饱和,随后改良的膨胀土自由膨胀率不再降低.

菌+0.5 M 氯化钙和菌+1.0 M 氯化钙溶液组膨胀土自由膨胀率随着改良天数增加而不断降低,第 7 d 时分别下降了 73.1%,85.4%,且改良效果随着钙离子量的增加越明显,主要原因在于黏土形成过程

中, 黏土矿物晶体产生电荷并显负电, 矿物晶体表面吸附带有相反电荷的水化阳离子, 形成双电层(水化膜)。遵循电中性原理, 如有等量的异性离子吸附在粘土表面, 由于原有吸附的无机阳离子(Na^+ , Mg^{2+} 等)易被吸附力更强的 Ca^{2+} 所取代, 从而发生交换吸附现象, 使土粒间的结合水膜变薄, 胀缩性减小, 自由膨胀率降低。

菌+0.5 M 胶结液和菌+1.0 M 胶结液混合溶液组在第 7 d 时自由膨胀率分别下降了 83.9%, 87.7%, 其中菌+1.0 M 胶结液混合溶液组改良效果最明显, 主要因为改良的膨胀土在 Ca^{2+} 交换作用的改良基础上, 尿素在巨大芽孢杆菌作用下分解产生碳酸根, 碳酸根跟钙离子结合析出具有胶结作用的碳酸钙晶体固化土体, 两种机理交叉作用降低膨胀土的自由膨胀率。

3.2 三轴剪切试验

由固结排水三轴试验测得素土、菌+1.0 M 氯化钙和菌+1.0 M 胶结液三组试样的破坏峰值强度见表 4 和表 5 及图 3—图 8。

表 4 最大破坏偏差应力表

参数	围压 150 kPa 下 峰值强度/kPa	围压 200 kPa 下 峰值强度/kPa	围压 250 kPa 下 峰值强度/kPa
素土	486.36	616.86	743.31
菌+1.0M 氯化钙	542.84	684.84	828.84
菌+1.0M 胶结液	686.71	863.13	1 046.24

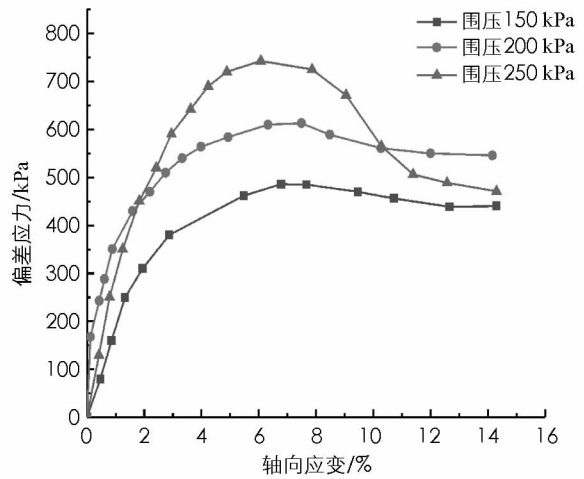


图 3 素土偏差应力-轴向应变关系

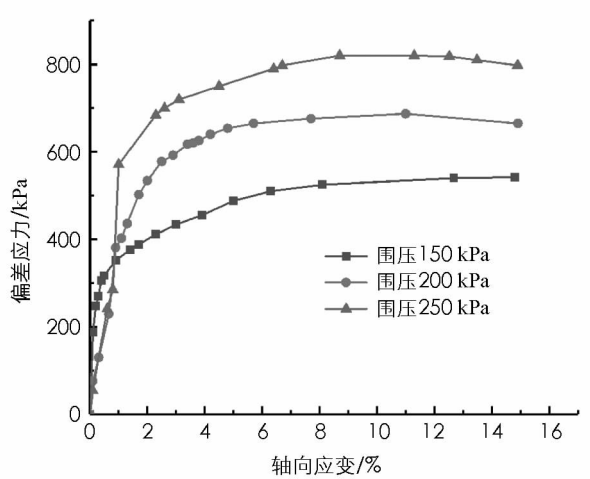


图 4 菌+1.0 M 氯化钙偏差应力-轴向应变关系

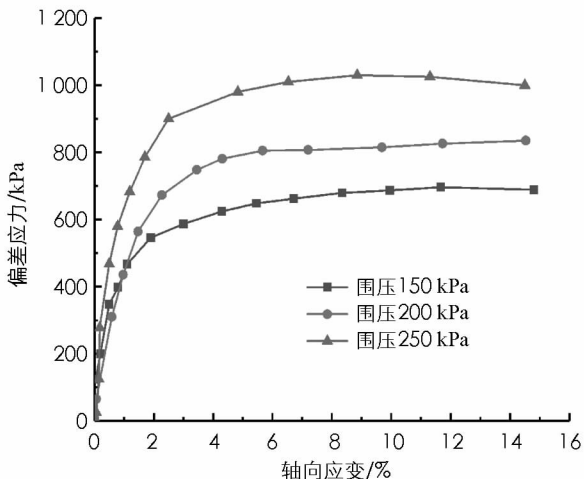


图 5 菌+1.0 胶结液偏差应力-轴向应变关系

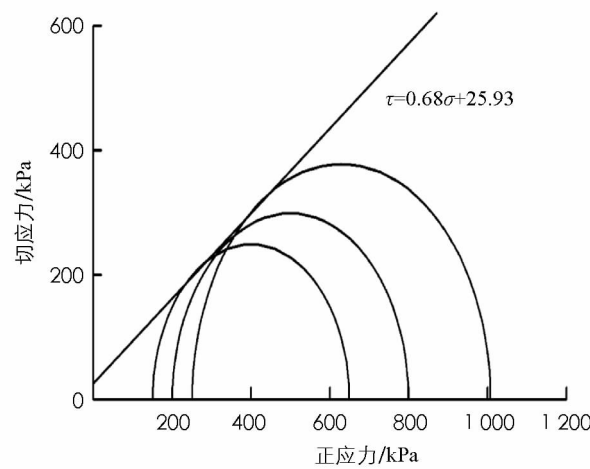


图 6 素土三轴剪切应力莫尔圆

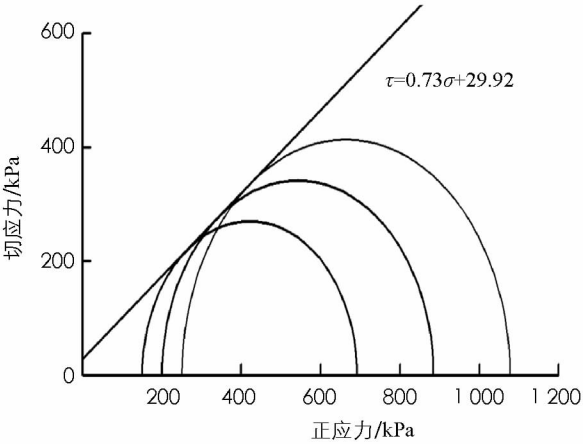


图 7 菌+1.0 M 氯化钙三轴剪切应力莫尔圆

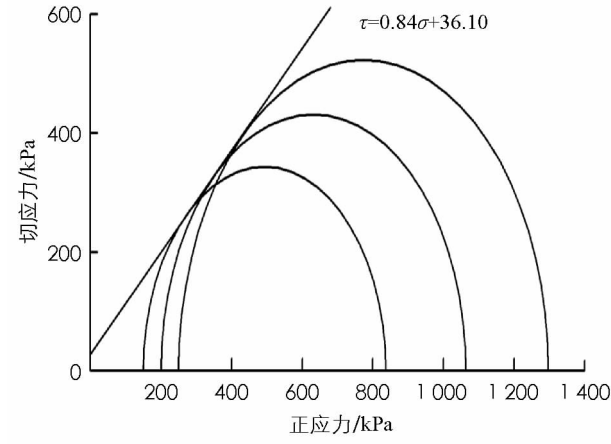


图 8 菌+1.0 M 胶结液三轴剪切应力莫尔圆

表 5 膨胀土抗剪强度指标

抗剪强度指标	素土	菌+1.0 M 氯化钙	菌+1.0 M 胶结液
c/kPa	25.93	29.92	36.10
φ/°	34.35	36.13	40.71

菌+1.0 M 氯化钙在不同围压下的峰值强度与素土相比较，均提高了 11%，内摩擦角提高了 5.2%，黏聚力提高了 11.5%。主要因为钙离子交换吸附作用，使水膜厚度变薄，抗剪强度的滑动摩擦系数增大，从而使峰值强度增大，φ 值变大。

菌+1.0 M 胶结液在不同围压下的峰值强度与素土相比较，均提高了 40%，内摩擦角提高了 18.5%，黏聚力提高了 32.1%。主要由于改良的膨胀土在钙离子交换作用的改良基础上，尿素在巨大芽孢杆菌作用下分解产生碳酸根，碳酸根跟钙离子结合析出具有胶结作用的碳酸钙晶体固化土体，同时使土体颗粒变大，颗粒间互嵌产生的咬合力提高，从而使内摩擦角和黏聚力提高。

3.3 三向膨胀力试验

由三向膨胀力试验得到素土、菌+1.0 M 氯化钙和菌+1.0 M 胶结液三者的典型三向膨胀力时程曲线图(如表 6，图 9—图 11)，试验过程中为区分三向膨胀力，规定平行于压实方向为垂直方向，垂直于压实方向为左右方向和前后方向，每组参数典型三向膨胀力时程曲线图中垂直方向膨胀力远大于左右和前后方向膨胀力，左右与前后方向膨胀力较为接近，主要因为制样压实过程为单方向压实，制样中导致材料各向异性，与土体在自然沉积作用下产生的各向异性相似，所以使得垂直方向膨胀力与左右方向和前后方向膨胀力的值差异较大，垂直方向膨胀力将明显大于左右方向和前后方向膨胀力，而左右方向与前后方向膨胀力基本相同^[1]。

菌+1.0 M 氯化钙垂直、水平方向的膨胀力分别下降了 20%，23%；菌+1.0 M 胶结液垂直、水平方向的膨胀力分别下降了 29%，32%，膨胀力改良效果良好。

表 6 三向膨胀力

参 数	垂直方向 膨胀力/kPa	左右方向 膨胀力/kPa	前后方向 膨胀力/kPa
素土	150.08	83.33	93.75
菌+1.0 M 氯化钙	120.00	63.25	72.32
菌+1.0 M 胶结液	106.23	55.74	64.21

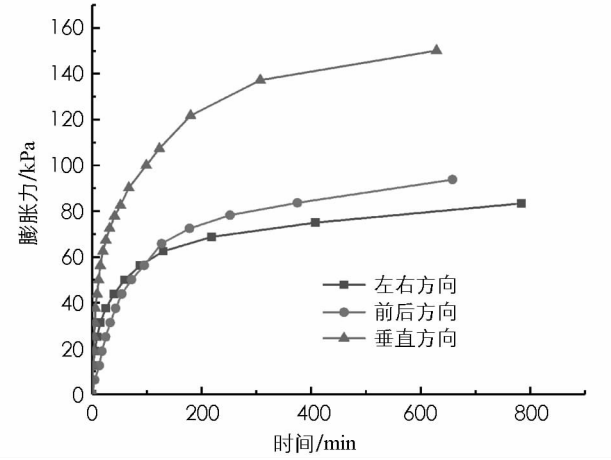


图 9 素土典型三向膨胀力时程曲线

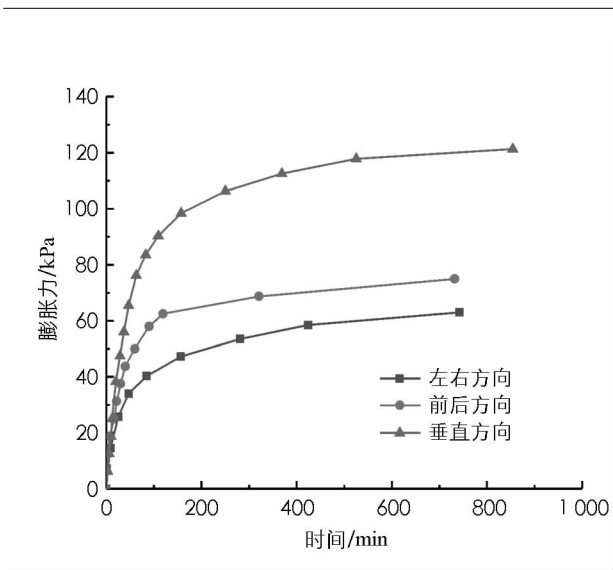


图 10 菌+1.0 M 氯化钙
典型三向膨胀力时程曲线

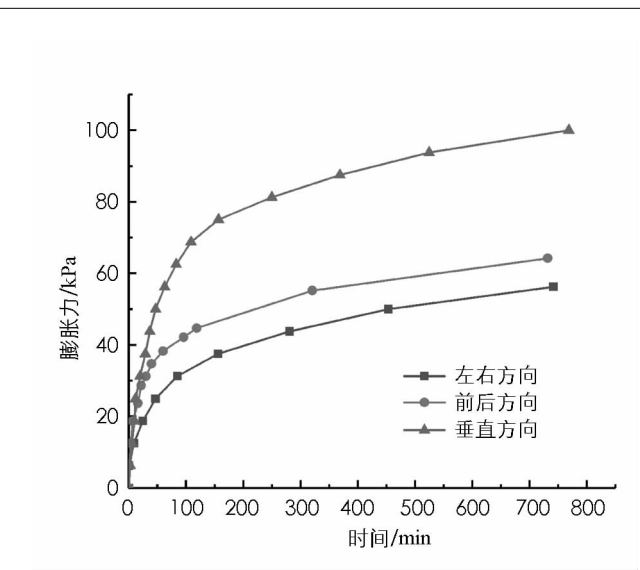


图 11 菌+1.0 M 胶结液
典型三向膨胀力时程曲线

4 结论与讨论

本文采用不同的固结溶液对膨胀土进行了固化改良室内试验,通过 5 组自由膨胀率试验筛选出了两组效果最明显的改良组合:巨大芽孢杆菌+1.0 M 胶结液(CaCl_2 +尿素)的混合溶液、巨大芽孢杆菌+1.0 M CaCl_2 的混合溶液.再利用不同围压条件下的三轴剪切试验和三向膨胀力试验进行改良前后自由膨胀率、抗剪强度和膨胀力的对比研究.结果表明,对比于未改良的重塑膨胀土,改良后的膨胀土表现出来的各项参数均有不同程度的改善.

搭配不同的固结溶液对膨胀土进行固化改良室内试验中,菌+1.0 M 胶结液和菌+1.0 M 氯化钙两组参数对膨胀土自由膨胀率的改良效果最佳,分别降低了 87.7%和 85.4%;菌+1.0 M 氯化钙在不同围压下的峰值强度与素土相比较,均提高了 11%,内摩擦角提高了 5.2%,黏聚力提高了 11.5%,垂直、水平方向的膨胀力分别下降了 20%,23%;菌+1.0 M 胶结液在不同围压下的峰值强度与素土相比较,均提高了 40%,内摩擦角提高了 18.5%,黏聚力提高了 32.1%,垂直、水平方向的膨胀力分别下降了 29%,32%.两种参数对膨胀土的抗剪强度的提高和膨胀力的降低都较为有效,改良效果明显,尤其是菌+1.0 M 胶结液.

从试验结果分析得,菌+1.0 M 胶结液对膨胀土自由膨胀率、抗剪切强度、膨胀力的改良效果良好.但考虑不同土质环境的复杂性,微生物改良膨胀土的时效性有待进一步研究,本文提出的膨胀土复合改良方法可以为今后工程建设中膨胀土的改良提供参考.

参考文献:

[1] 刘洪伏,汪时机,李 贤,等. 邯鄲强膨胀土三向膨胀力特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 789-796.
[2] DAY R W, MEEHAN R L, KARP L B. Discussion and Closure: California Housing Damage Related to Expansive Soils [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(3): 243-247.
[3] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程基本术语标准: GB/T 50279—98 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
[4] VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, LLORET A. Experimental Investigation Into Temperature Effect on Hydro-Mechanical Behaviours of Bentonite [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(1): 71-78.
[5] 杨果林,滕 珂,秦朝辉. 膨胀土侧向膨胀力原位试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2326-2332.
[6] 池泽成,陈善雄,戴张俊,等. 合肥重塑膨胀土三向应力-应变规律探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(A01):

3659-3665.

- [7] 沈宇鹏, 张 哲, 张雪东, 等. 蒙巴萨膨胀土抗剪强度衰减特性研究 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 1-6.
- [8] 戴福初, 董文萍, 黄志全, 等. 南水北调中线段原状膨胀土抗剪强度试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 123-131.
- [9] MITCHELL J K. Fundamentals of Soil Behavior [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 40(4): 827-866.
- [10] MESRI G, SHAHIEN M. Residual Shear Strength Mobilized in First-Time Slope Failures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 12-31.
- [11] 刘清秉, 项 伟, 张伟锋, 等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2286-2290.
- [12] 沈泰宇, 邢书香, 汪时机, 等. 降低强膨胀土膨胀率提高抗剪强度的复合改良剂筛选 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 109-115.
- [13] DĄBEK-SZRENIAWSKA M, HAJNOS M, STOTZKY G, et al. Numbers of Culturable Bacteria in Soil Under Mineral or Organic Cultivation; Comparison of Hattoris for and Standard Dilution Plate Methods [J]. International Agrophysics, 2006, 20(4): 277.
- [14] WANG X, LI Y, LU A, et al. Bacterially Induced Mineralization of Jarosite and Schwertmannite Assisted by a Photochemical Pathway [J]. Geomicrobiology Journal, 2012, 29 (3): 206-212.
- [15] 张博凡, 熊 鑫, 韩 卓, 等. 菌糠强化微生物降解石油污染土壤修复研究 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1139-1146.
- [16] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [17] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, et al. Bacteriogenic Mineral Plugging [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1996, 35(8): 56-61.
- [18] LIU Q, ZHANG B, SHEN Z, et al. A Crude Protective Film on Historic Stones and Its Artificial Preparation Through Biomimetic Synthesis [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2625-2632.
- [19] 贾中民, 冯汉茹, 鲍丽然, 等. 渝西北土壤重金属分布特征及其风险评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 106-114.
- [20] 钱春香, 王明明, 许燕波. 土壤重金属污染现状及微生物修复技术研究进展 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 669-674.
- [21] WU J, ZHANG T, CHEN C, et al. Spent Substrate of *Ganodorma Lucidum* as a New Bio-Adsorbent for Adsorption of Three Typical Dyes [J]. Bioresource Technology, 2018, 266: 134-138.
- [22] 练继建, 王昶力, 闫 玥, 等. 微生物修复混凝土裂缝的试验观测 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019(7): 669-679.
- [23] 李沛豪, 屈文俊. 细菌诱导矿化保护历史建筑遗产的机理及效果 [J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(4): 497-505.
- [24] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 Precipitation for the Production of Biocement [D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [25] 李明东, Lin Li, 张振东, 等. 微生物矿化碳酸钙改良土体的进展、展望与工程应用技术设计 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 80-87.
- [26] IVANOV V, CHU J, STABNIKOV V, et al. Strengthening of Soft Marine Clay Using Bioencapsulation [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(4): 325-329.
- [27] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER L T J M, et al. Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale BiogROUT Experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [28] 沈泰宇, 汪时机, 薛 乐, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2907-2913.
- [29] 汪时机, 陈正汉, 李 贤, 等. 土体孔洞损伤结构演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 150-154.

An Experimental Study of Handan Strong Expansive Soil Enhanced by *Bacillus Megaterium*

QIN Yong-fu, LU Wang, YUAN Meng-xiang,
SHEN Tai-yu, LI Xian, WANG Shi-ji

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Expansive soil is a kind of widespread highly-plastic clay soil that is sensitive to the wet and heat changes of environment, which easily causes cracks due to the swell and shrink. To reduce the free swelling ratio of expansive soil and improve its shear strength, the microbially induced carbonate precipitation (MICP) has been used in this paper, and the soil been treated with bacillus megaterium (BM) and different kinds of consolidating fluid by laboratory tests. Based on the results of 5 free swelling ratio tests, BM with 1.0 M $\text{CaCl}_2 + \text{Urea}$ solution and BM with 1.0 M CaCl_2 solution are the best two groups. The free swelling ratio, shearing strength and swelling pressure of treated soil and not treated soil have been investigated by triaxial shear test and three-dimensional swelling pressure test. The results show that the treated soil shows different levels of improvement in various aspects. The method of BM with 1.0 M CaCl_2 solution shows that the free swelling ratio decreased by 85.4%, internal friction angle increased by 5.2%, cohesive force increased by 11.5%, vertical swelling pressure decreased by 20% and horizontal swelling pressure decreased by 23%. In addition, the method of bacillus megaterium with 1.0 M $\text{CaCl}_2 + \text{Urea}$ solution shows that the free swelling ratio decreased by 87.7%, internal friction angle increased by 18.5%, cohesive force increased by 32.1%, vertical swelling pressure decreased by 29%, and horizontal swelling pressure decreased by 32%. It is feasible that the composite treatment of bacillus megaterium and consolidating fluid to improve highly expansive soil.

Key words: expansive soil; bacillus megaterium; free swelling ratio; MICP; three-dimensional swelling pressure

责任编辑 汤振金