

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.018



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 弯曲元布置形式和注浆方法对 MICP 胶结砂土小应变剪切模量的影响

张雷<sup>1</sup>, 郑延龙<sup>2</sup>, 徐涛<sup>3</sup>, 李浩玉<sup>1,4</sup>, 胡健<sup>1</sup>, 史金权<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000;  
3. 东南大学 交通学院, 南京 211892; 4. 中建西南咨询顾问有限公司, 成都 610041)

**摘要:**在岩土工程应用中, 砂土的小应变剪切模量  $G_{\max}$  是重要的力学参数。以人工玻璃砂替代天然砂土材料, 结合多方向弯曲元测量进行 MICP 加固玻璃砂各向同性固结排水试验, 探究 MICP 加固方法、弯曲元布置形式对玻璃砂水平面 ( $G_{\text{HH}}$ ) 和垂直平面 ( $G_{\text{HV}}$  和  $G_{\text{VH}}$ ) 上剪切模量的影响。结果表明: 不同方法加固玻璃砂的剪切波速  $V_s$ 、小应变刚度  $G_{\max}$  和刚度各向异性  $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$  发展规律不同。经 MICP 加固后, 玻璃砂的  $G_{\max}$  均有提高, 其中, “低 pH 一相法 + 注入反应液后直接反压”,  $G_{\max}$  提升最大, 小应变刚度比 ( $G_{\max}^{\text{unload}}/G_{\max}^{\text{load}}$ ) 下降幅度最大。由于加固的不均匀性, 弯曲元在侧壁上的布置高度也有一定的影响。在探讨 MICP 对小应变刚度各向异性的影响时, 应在同一水平面布置 HH 和 HV 方向的弯曲元传感器, 否则, 加固不均匀性将引起较大试验误差。

**关键词:** 多方向弯曲元; 小应变剪切模量; 刚度各向异性, MICP 加固; 低 pH 一相法

**中图分类号:** TU441    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0041-08

## Effects of bender element arrangement and grouting method on small strain shear modulus of MICP-cemented sand

ZHANG Lei<sup>1</sup>, ZHENG Yanlong<sup>2</sup>, XU Tao<sup>3</sup>, LI Haoyu<sup>1,4</sup>, HU Jian<sup>1</sup>, SHI Jinquan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. No. 92493 Troops of PLA, Huludao 125000, Liaoning, P. R. China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211892, P. R. China; 4. China Construction Southwest Consulting Co., LTD, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** In geotechnical engineering, the small-strain shear modulus of sand  $G_{\max}$  is an important mechanical parameter. The isotropic consolidation tests were carried out on artificial glass sand, combined with multi-direction bender element tests. The effects of MICP reinforcement methods and bender element arrangement on  $G_{\max}$  of glass sand were investigated. The test results show that the development pattern of shear wave velocity  $V_s$ , small strain stiffness  $G_{\max}$  and stiffness anisotropy  $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$  of glass sands reinforced by different methods are different. After MICP reinforcement, the  $G_{\max}$  of glass sand is increased. Among them, “low pH one-phase method + direct back pressure after injection of reaction solution” has the greatest  $G_{\max}$  increase, and the small-

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(52108301)

作者简介: 张雷(2000-), 男, 主要从事生物岩土工程研究, E-mail: zl12010034@163.com。

史金权(通信作者), 男, 博士, 副研究员, E-mail: jinquan\_shi@163.com。

Received: 2023-12-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52108301)

Author brief: ZHANG Lei (2000-), main research interest: bio-geotechnical engineering, E-mail: zl12010034@163.com.

SHI Jinquan (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: jinquan\_shi@163.com.

strain stiffness ratio ( $G_{\max}^{\text{load}} / G_{\max}^{\text{unload}}$ ) has the maximum decrease. Due to the nonuniformity reinforcement, the placement height of bender element on the side wall also has a certain influence. Based on the test results in this study, it is recommended to arrange the HH and HV bender elements at the same plane to further discuss the effect of MICP on small strain stiffness anisotropy. Otherwise, the test error caused by reinforcement inhomogeneity can not be avoided.

**Keywords:** multidirectional bender element; small-strain shear modulus; stiffness anisotropy; MICP reinforcement; low pH one-phase method

微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced carbonate precipitation, 简称 MICP)是一种新兴的固化砂土方法,已经成为土体加固领域中备受关注的技术之一。它通过微生物代谢作用产生的碳酸钙沉淀胶结砂颗粒和填充孔隙,从而有效地提高土体的强度和刚度。与传统的加固方法相比,MICP 具有绿色环保、扰动小、原位性等优点<sup>[1-2]</sup>,且已被广泛应用于岛礁地基加固<sup>[3]</sup>、文物修复<sup>[4]</sup>、重金属污染<sup>[5]</sup>、堤坝防渗<sup>[6]</sup>等众多领域。

小应变剪切模量( $G_{\max}$ )是反映土体小应变刚度特性的一个重要力学参数,在数值模拟计算、预测土体变形和液化势等方面也有着重要的作用。因此,了解小应变剪切模量在 MICP 加固砂土中的变化规律对 MICP 技术在实际工程上的进一步应用具有重要意义。微生物胶结砂颗粒的过程十分复杂,在此过程中剪切波速受许多因素影响。Lin 等<sup>[7]</sup>发现,MICP 加固砂土的碳酸钙分布是理想的覆盖砂颗粒表面和颗粒间胶结键的组合,且剪切波波速一般随着碳酸钙含量的增加而增加。Feng 等<sup>[8]</sup>发现,MICP 胶结砂土的剪切波速受碳酸钙含量和颗粒接触间的碳酸钙沉淀分布共同影响,剪切波速越大,抗液化能力越强。Shi 等<sup>[9]</sup>发现,在相同 MICP 胶结程度下,不均匀系数  $C_u$  越高,胶结砂的  $G_{\max}$  越大,刚度各向异性越小,且刚度各向异性随着生物胶结水平的提高而降低。Xiao 等<sup>[10]</sup>发现,在相同 MICP 胶结程度下,平均粒径  $D_{50}$  越大,胶结砂的  $G_{\max}$  越小,  $G_{\max}$  对有效应力的敏感性逐渐减小,  $D_{50}$  对刚度各向异性影响不明显。

尽管 MICP 技术取得了一定的成果,但仍面临一些挑战,在众多影响因素中,不同的加固方法对土体胶结效果和加固均匀性的影响尤为显著。目前,最常见的 MICP 加固砂土方法为两相法<sup>[11]</sup>,但利用该方法得到的试样均匀性较差,灌浆口易出现堵塞现象。因此,学者们尝试了许多改进方法,如三相法(添加固定溶液)<sup>[12]</sup>、生物泥浆<sup>[13]</sup>、原位激发<sup>[14-15]</sup>等。但上述方法没有足够的长距离渗透时间,且不易控制。基于此,Cheng 等<sup>[16]</sup>和 Xiao<sup>[17]</sup>等利用低 pH 值、低温环境下细菌和脲酶的活性较低,可以延缓

反应时间,提出了低 pH 一相法(盐酸为缓冲液)和温控法。Yang 等<sup>[18]</sup>进一步提出用乙酸代替盐酸缓冲液的低 pH 一相法,发现处理的均匀性更好,滞后反应的时间显著增加。张锦程等<sup>[19]</sup>对比了 3 种加固方法(传统一相法、低 pH 一相法和温控法)的均匀性、钙离子利用率和无侧限抗压强度,发现温控法综合表现最优,在高加固时强度比一相法略高。

目前,对采用单一加固方法进行 MICP 加固砂土的研究较为充分,但鲜有学者聚焦于多种方法加固砂土小应变剪切模量的横向对比。且由于土体和加固的不均匀性,弯曲元安放位置对测试结果也有一定影响。基于此,笔者结合多方向弯曲元测量装置,开展 MICP 加固玻璃砂三轴各向同性固结试验研究,通过测量水平和垂直方向上的剪切波速,探讨 MICP 加固方法、弯曲元布置形式对 MICP 加固玻璃砂小应变剪切模量  $G_{\max}$  及其刚度各向异性  $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$  的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 玻璃砂

由于天然砂土参数难以控制,为了减少形状参数之外的土体性质对试验结果的影响,用球体玻璃珠和棱角形玻璃碴替代传统砂,约含 98% 的二氧化硅。为了减小砂颗粒级配和粒径对试样强度和变形的影响,所用玻璃珠和玻璃砂均采用单一级配,粒径范围为 0.6~0.8 mm,并控制两者尺寸相同(平均粒径  $D_{50}=0.7$ )。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[20]</sup>测量了玻璃砂的基本物理参数,如表 1 所示。其中:A100R0 表示 100% 玻璃碴,A50R50 表示玻璃碴和玻璃珠质量占比各 50%,A0R100 表示玻璃珠。

#### 1.1.2 菌液和胶结液制备

微生物加固采用的细菌为巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, ATCC 88159)。细菌培养基成分包括酵母提取物 20 g/L、NH<sub>4</sub>Cl 10 g/L、MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 0.5 g/L、NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 1.2 g/L、NaOH 溶液 1 mol/L 和琼脂 15 g/L(用于配置平板培养

表1 玻璃珠、玻璃碴及其混合物的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of crushed glass, glass beads and mixtures

材料	相对密度 $G_s$	平均粒径 $D_{50}/\text{mm}$	不均匀系数 $C_u$	最大孔隙比 $e_{\max}$	最小孔隙比 $e_{\min}$
A100R0	2.5	0.7	1.21	1.218	0.799
A50R50	2.5	0.7	1.21	0.941	0.680
A0R100	2.5	0.7	1.21	0.685	0.692

基)。将活化后的菌液接种到高压灭菌后的固体培养基中,在温度25℃、湿度90%以上恒温恒湿培养48 h。将固体培养基中的菌群接种到液体培养基中,在30℃的恒温振荡箱中以200 r/min的转速扩培24 h,最终培养好的菌液浓度OD<sub>600</sub>=0.8~1.2,脲酶活性为(11±1)U/mL。胶结液为MICP过程提供尿素和钙源,由尿素溶液和氯化钙溶液混合制成,两者体积比为1:1。试验选择微生物轻胶结,采用反应液浓度为0.5 mol/L。

## 1.2 弯曲元试验和微生物加固

### 1.2.1 多方向弯曲元设备

试验采用英国GDS公司生产的三轴仪器,并对其进行改进,加装了弯曲元测量装置,便于测量砂柱垂直方向和水平方向上的剪切波速。垂直方向的弯曲元传感器分别嵌入仪器的顶帽和底座,水平方向的弯曲元传感器则采用摩阻式(frictional

bender element)安装形式<sup>[21]</sup>,可以保证试样的气密性良好,文献[21]已证实这种布置形式的可靠性。在该安装方式下,弯曲元传感器并非与土体直接接触,而是依靠弯曲元和砂柱间的金属铜片传递振动,产生和接受剪切波信号。该铜片粘连在橡胶膜上,两侧的弯曲元固定在铜片上。具体的操作步骤为:制样前,在砂柱高度1/3、1/2、2/3处对应的橡胶模(厚度为0.3 mm)上切割出两对相互对称的3 mm×7 mm开口,将比开口尺寸略大的铜片通过502胶水粘合在橡胶膜内侧,封堵住开口,得到特制的橡胶膜。用该橡胶膜制备完砂柱后,再将弯曲元传感器通过502胶水固定在铜片外侧。

### 1.2.2 弯曲元布置形式和信号分析

为了研究弯曲元在水平方向上布置位置的影响,设计4种不同布置形式,如图1所示。其中,T<sub>E</sub>是弯曲元传感器,D<sub>A</sub>是横波传播的方向,D<sub>B</sub>是横波激振的方向。在水平方向上,按照激励方向的不同,摩阻式弯曲元分为水平激振和垂直激振,波速分别表示为V<sub>HH</sub>和V<sub>HV</sub>,垂直方向的横波速度表示为V<sub>VH</sub>。3个横波对应的剪切模量G<sub>max</sub>可以表示为G<sub>HH</sub>、G<sub>HV</sub>和G<sub>VH</sub><sup>[22]</sup>。第1个下标字母表示横波传播的方向,第2个下标字母表示横波的激振方向,H和V分别表示水平和垂直方向。

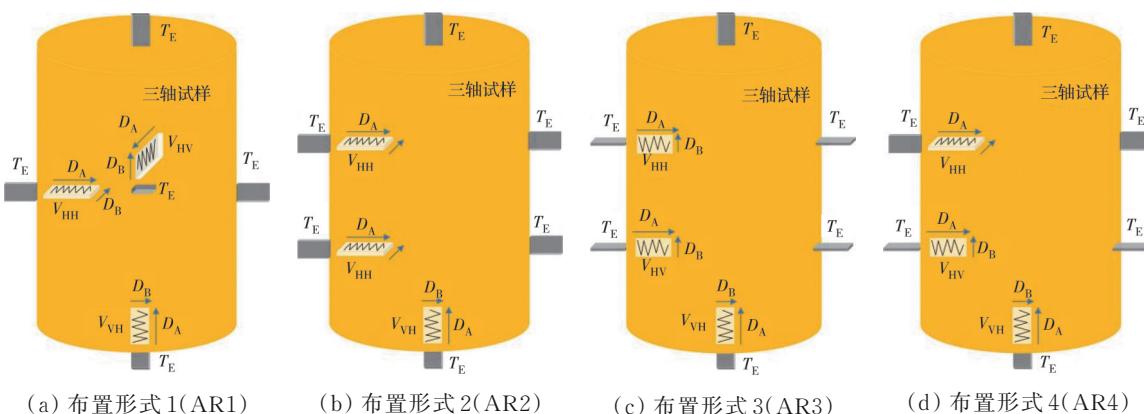


图1 弯曲元传感器不同布置形式示意图

Fig. 1 Diagram of different layout of bending element sensors

图2为横波波形示意图,采用发射波第1个峰到接收波第1个峰的时间作为横波的传播时间。试验采用的横波波形为单次触发正弦波,激振频率设置为15 kHz,振幅为20 V,触发速率为5 Hz。水平方向横波的传播距离可认为是两个相互对称的金属铜片间的距离<sup>[21]</sup>,垂直方向的传播距离为三轴仪底座和顶帽的弯曲元元件之间的距离,并且考虑弯曲元系统的延时性及封装弯曲元的环氧树脂和加载过程中体变对传播距离的影响。为了排除孔隙比对试样的影响,用孔隙比函数关系式f(e)=e<sup>-b</sup>

对G<sub>max</sub>进行归一化处理<sup>[23]</sup>。考虑到试验组数的限制,不讨论经验参数b,Altuhafi等<sup>[24]</sup>采用试验材料为硅砂,与玻璃砂的组成成分相同,因此参照采用的b值为1.3。

### 1.2.3 MICP加固方法

采用AR1弯曲元布置形式,对A100R0玻璃砂开展3种不同的MICP加固方法,包括不同的微生物注浆方式和反压饱和顺序,分别为:1)低pH一相法+注入反应液后直接反压<sup>[25]</sup>,将微生物菌液和胶结液混合,用稀盐酸调节pH值为4,微生物生成碳

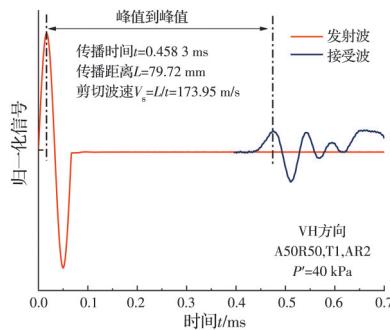


图 2 剪切波示意图

Fig. 2 Shear wave diagram

酸钙反应可延迟 30 min, 通完菌液后立即施加反压饱和, 保证 MICP 过程和反压过程同时进行, 此阶段持续 12 h(简称 T1); 2) 低 pH 一相法 + 加固后施加反压, 此方法和 T1 不同的是, 待 MICP 加固结束后, 再施加反压饱和(简称 T2); 3) 两相法 + 直接反压, 在微生物注浆阶段, 先通完菌液, 随后通入胶结液, 待注浆完成后, 立即进行反压饱和(简称 T3)。

### 1.3 试验方案

考虑到轻胶结加固的砂柱强度较低, 很难安装到三轴底座上, 以及安装过程中, 对试样的扰动较大, 因此, 在三轴仪上直接进行 MICP 加固。如图 3 所示, 将制备完成试样安装好, 还未进行加固。所有试样直径 50 mm、高度 95 mm, 采用干装法<sup>[26]</sup>和 Ladd 欠压实方法<sup>[27]</sup>制备, 将所需质量的玻璃砂平均分成 5 份依次倒入模具中, 每层的高度按照欠压实百分比 9% 用圆环击实器锤实。试样先进行  $\text{CO}_2$  饱和, 随后进行反应液饱和与反压饱和( $B$  值不小于 0.95 可认为试样完全饱和), 在此阶段, 有效围压均保持在 40 kPa。待 MICP 及饱和阶段结束后, 对试样进行逐级各向同性固结和逐级卸载, 加卸载的有效应力分别为 50、100、150、200、250、300、350、400 kPa。每一级测量横波波速的同时, 记录反压体变。具体试验方案如表 2 所示, 为了对比试验结果, 与 Shi 等<sup>[25]</sup>研究中低 pH 一相法 AR1 工况下的试验结果进行了比较。

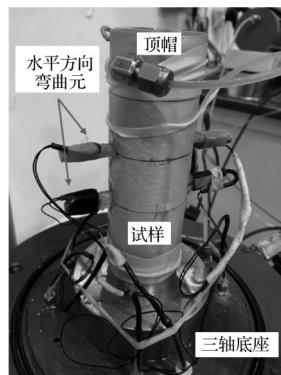


图 3 试样安装图

Fig. 3 Sample mounting diagram

表 2 试验工况

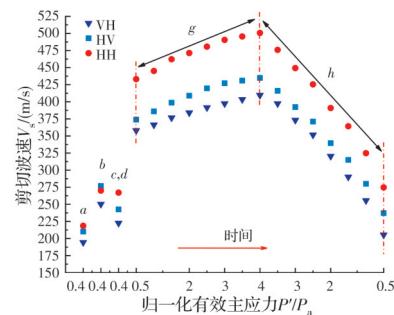
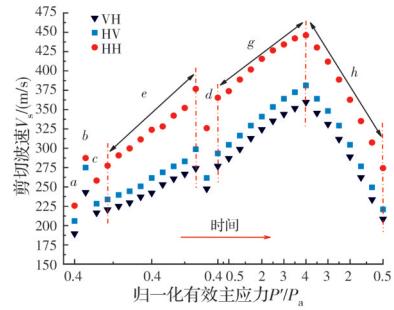
Table 2 Test program

材料	相对密实度/%	加固方法	反应液浓度/(mol/L)	弯曲元布置形式
A100R0	60±1	T2	0.5	AR1
A100R0	60±1	T3	0.5	AR1
A50R50	60±1	T1	0.5	AR2、AR3、AR4

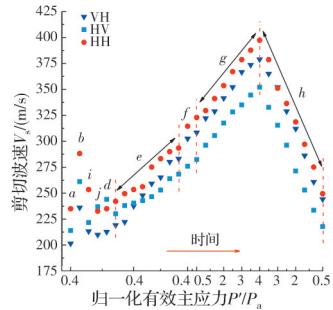
## 2 试验结果分析

### 2.1 加固方法的影响

图 4 显示了 3 种加固方法下从装样到卸载全过程 A100R0(玻璃砂)剪切波速  $V_s$  随有效应力的变化情况, 可以看出, 在 MICP 加固阶段, 剪切波速均显

(a) 低 pH 一相法 + 注入反应液后直接反压<sup>[25]</sup>

(b) 低 pH 一相法 + 加固后施加反压

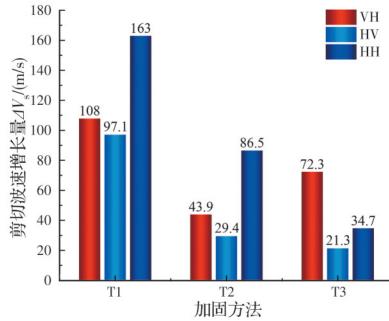


(c) 两相法 + 直接反压

注: a 为试样制备初始阶段; b 为通入  $\text{CO}_2$  饱和; c 为低 pH 一相法通入反应液; d 为施加反压饱和; e 为 MICP 加固阶段; f 为反应结束; g 为固结加载阶段; h 为卸载阶段; i 为注入微生物菌液; j 为注入胶结液。

图 4 3 种 MICP 加固方法下 A100R0 全过程剪切加速  
Fig. 4 Shear wave velocity during the whole process of  
three MICP reinforcement methods of A100R0

著增加,主要是由于颗粒间生成的碳酸钙胶结,提高了试样的强度和刚度。低pH一相法加固(T1<sup>[25]</sup>、T2)始终为 $V_{HH} > V_{HV} > V_{VH}$ ,而在MICP开始加固后,两相法(T3)下 $V_{VH}$ 逐步超过 $V_{HV}$ 。在加固后进行反压饱和时,T2加固的试样3个方向的波速均显著下降,说明影响了加固效果。在相同的有效应力下,卸载阶段的波速均小于加载阶段,推断可能是由于卸载阶段应力释放,导致胶结键断裂。图5比较了每种方法从初始阶段到加载前3个方向的剪切波速增量, T1三个方向的剪切波速增长量均比T2、T3大得多,意味着MICP胶结效果最好,且相比 $V_{VH}$ 和 $V_{HV}$ ,T1和T2的 $V_{HH}$ 增长量最显著,为163、86.5 m/s,T3的 $V_{VH}$ 增长量最大。表明在轻胶结时MICP生成的碳酸钙胶结不均匀,具有一定的方向性。



注:T1为低pH一相法+注入反应液后直接反压<sup>[25]</sup>;T2为低pH一相法+加固后施加反压;T3为两相法+直接反压

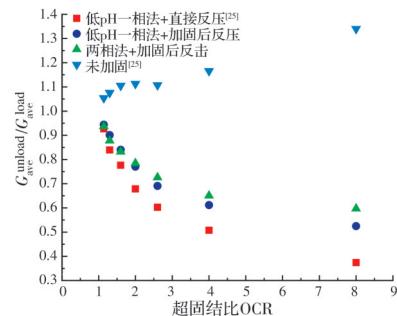
图5 不同加固方法下3个方向剪切波速增量

Fig. 5 Shear wave velocity increment in three directions with different reinforcement methods

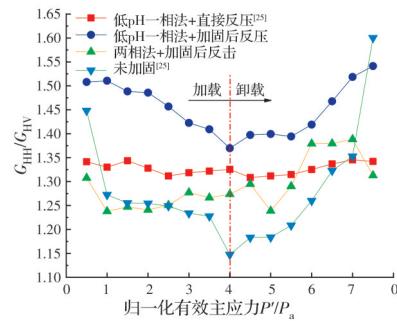
图6为小应变剪切模量各向异性的变化情况。为了进一步研究不同加固方法下小应变剪切模量的退化情况,图6(a)显示了加载和卸载阶段3个方向上的平均小应变刚度比(简称刚度比)与超固结比OCR之间的关系,超固结比表示试样加载过程中经历的最大有效应力与卸载阶段的有效应力比值,平均小应变刚度比 $G_{ave} = (G_{VH}/f(e)) + (G_{HV}/f(e)) + (G_{HH}/f(e))/3$ 。可以看出,T1加固试样的小应变刚度比下降幅度最大,其次是T2,进一步反映出T1的加固效果最好,胶结程度更高。且随着超固结比OCR的增大,加卸载之间的刚度比差异性逐渐增大。而未加固与加固后玻璃砂的应力规律恰好相反,刚度比大于1。未加固玻璃砂卸载阶段的 $G_{ave}$ 要高于加载阶段,这是由于应力历史对玻璃砂的结构影响,卸载时仍然具有最大荷载时的特性,玻璃砂的恢复性较差。

图6(b)显示了小应变刚度各向异性的情况

况,加固后的玻璃砂各向异性比值都有所增大,其中,T2加固试样的增长最多,T1和T3加固的试样刚度各向异性增长较小。此外,未加固的玻璃砂刚度各向异性随着加载阶段平均有效主应力的增大而减小,卸载阶段重新增大,T2加固的试样也有相似的规律。T3加固的试样刚度各向异性先减小,随后趋于平稳,最后再增大。而T1加固试样的刚度各向异性基本不变。



(a) 不同加固方法下加卸载阶段平均刚度比随超固结比OCR的变化趋势



(b) 不同加固方法对小应变刚度各向异性的影响

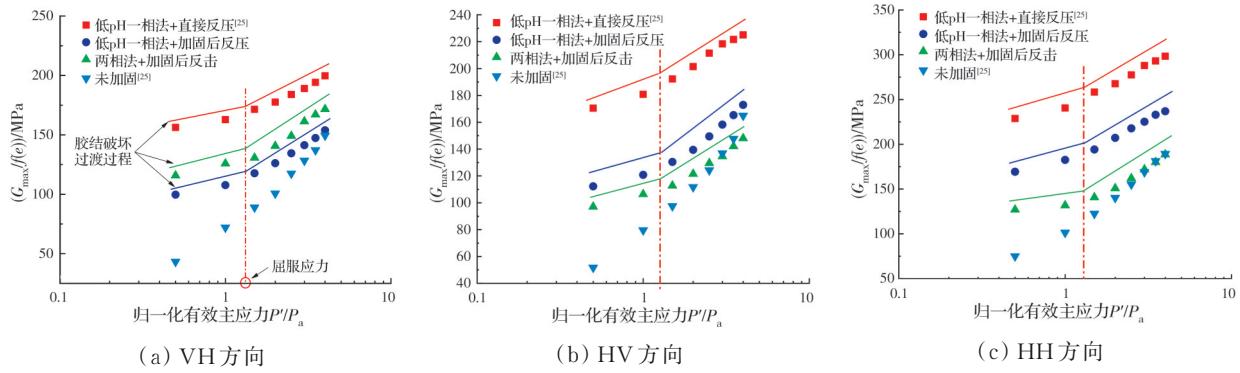
图6 不同加固方法下的加卸载情况

Fig. 6 Loading and unloading under different reinforcement methods

图7为玻璃砂在不同加固方法下3个方向的归一化剪切模量 $G_{max}/f(e)$ 随有效主应力在加载阶段的变化情况。由图7可知,3种方法加固后剪切模量均有所提高,可以观察到有较明显的胶结破坏过渡过程,图中已用折线标记出。T1加固的试样3个方向的归一化剪切模量始终最大,而T2和T3三个方向的归一化剪切模量大小顺序有所不同,且在有效应力较大时,与未加固砂相近。

## 2.2 弯曲元布置形式的影响

采用T1(一相法+注入反应液后直接反压)加固方法对A50R50玻璃砂进行加固,反应液浓度为0.5 mol/L,4种弯曲元布置形式如图1所示。图8为不同弯曲元布置形式下归一化剪切模量随有效主应力的变化情况。从图8(b)、(c)可以观察到,在

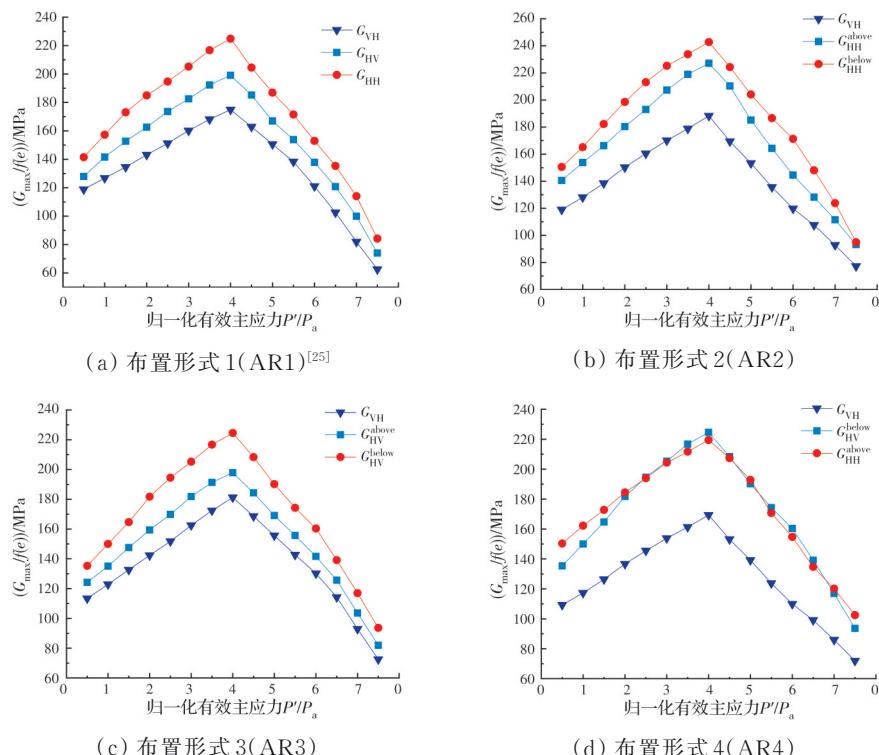
图 7 不同加固方法对归一化  $G_{\text{VH}}$ 、 $G_{\text{HV}}$  和  $G_{\text{HH}}$  的影响Fig. 7 Effect of different reinforcement methods on normalized  $G_{\text{VH}}$ ,  $G_{\text{HV}}$  and  $G_{\text{HH}}$ 

水平方向上,弯曲元在侧壁上的布置高度会对剪切模量有一定影响。布置在下端的  $G_{\text{HH}}$  和  $G_{\text{HV}}$  均大于上端。且  $G_{\text{HH}}$  和  $G_{\text{HV}}$  上下端的差异性在加载阶段逐渐变大,卸载阶段逐渐变小,  $G_{\text{HH}}$  在卸载阶段最后近似相同。这与加固方法有一定关系,用 T1 方法加固,越靠近试样下端碳酸钙的含量越高,胶结效果越好。从图 8(a)、(d)可以看出,相较于 HH 弯曲元在上端、HV 弯曲元在下端的布置弯曲元在同一高度时  $G_{\text{HH}}$  和  $G_{\text{HV}}$  差值更大。AR4 布置的  $G_{\text{HV}}^{\text{below}}$  在加载阶段逐渐超过  $G_{\text{HH}}^{\text{above}}$ ,结合图 8(b)、(c)可以说明布置在下端的弯曲元  $G_{\text{max}}$  对有效应力更加敏感。

图 9 比较了 AR1 和 AR4 布置形式的小应变刚度各向异性。由图 9 可以看出,AR1 布置的试样小

应变刚度各向异性在加卸载阶段变化不明显,相较于 AR1,AR4 的刚度各向异性比值更小,且加载阶段整体呈先减少后增大的趋势。

由于 MICP 加固的不均匀性,试样内部的小应变剪切模量存在空间差异性,导致在设置弯曲元传感器时需考虑剪切波速在高度上的变化情况。可以看出,下部的 MICP 加固效果要优于上部,如果将 HH 设置在下部,会导致刚度各向异性的额外增加。反之,会产生更小的各向异性。AR4 中小应变剪切模量的各向异性在加卸载过程中基本保持不变,本质上是由于下部的 MICP 加固更显著,抵消了结构各向异性导致的刚度各向异性。因此,考虑到不同方法在空间上加固的不均匀性,在同一水平面设置

图 8 不同弯曲元布置形式对加卸载阶段归一化  $G_{\text{VH}}$ 、 $G_{\text{HV}}$  和  $G_{\text{HH}}$  的影响Fig. 8 Effect of different bender element arrangement on normalized  $G_{\text{VH}}$ ,  $G_{\text{HV}}$  and  $G_{\text{HH}}$  in loading and unloading stages

横向的弯曲元传感器更为合理。但是,由于加固程度的差别,不同高度处HH和HV小应变剪切模量之间的比较可能会存在差异性,本文尚未做相关讨论,需进一步研究。

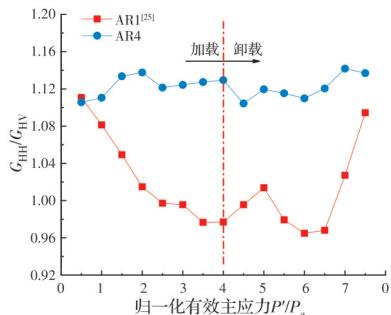


图9 不同布置形式对小应变刚度各向异性的影响

Fig. 9 Effect of different bender element arrangement on anisotropy of small-strain stiffness

### 3 结论

结合多方向弯曲元测量设备进行MICP加固玻璃砂各向同性固结排水试验研究,讨论加固方法、弯曲元布置形式对剪切波速 $V_s$ 、小应变剪切模量 $G_{\max}$ 及刚度各向异性 $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$ 的影响,得到如下主要结论:

1)经3种方法加固后,玻璃砂 $V_s$ 和 $G_{\max}$ 均有提高,加载阶段均有较明显的胶结破坏过渡过程。在相同的有效主应力下,3种加固方法卸载阶段的 $V_s$ 和 $G_{\max}$ 要小于加载阶段。其中,“低pH一相法+注入反应液后直接反压”加固的试样 $V_s$ 增长量最大,加固效果最好,小应变刚度比( $G_{\max}^{\text{unload}}/G_{\max}^{\text{load}}$ )下降幅度最大。

2)MICP在弱胶结时生成的碳酸钙胶结不均匀,具有一定的方向性,在砂颗粒间沿水平方向形成的碳酸钙沉淀更多。“低pH一相法”加固试样的 $V_{\text{HH}}$ 增长量最显著,而“两相法+直接反压” $V_{\text{HV}}$ 增长量最大。

3)3种加固方法的刚度各向异性在加卸载阶段的发展规律不同。“低pH一相法+加固后反压”和未加固玻璃砂的 $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$ 在加载阶段逐渐减小,卸载阶段重新增大。“两相法+直接反压”的 $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$ 先减小,随后趋于平稳,最后再增大。“低pH一相法+注入反应液后直接反压”的 $G_{\text{HH}}/G_{\text{HV}}$ 基本不变。

4)由于加固的不均匀性,在水平方向上,弯曲元在侧壁上的布置高度对剪切模量和刚度各向异性有一定的影响。“低pH一相法+直接反压”加固的试样,布置在下端时 $G_{\text{HH}}$ 和 $G_{\text{HV}}$ 均大于布置在上端时,布置在下端时 $G_{\max}$ 对有效应力的敏感性更高。

### 参考文献

- [1] 刘士雨,俞缙,曾伟龙,等.微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1): 191-204.  
LIU S Y, YU J, ZENG W L, et al. Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 191-204. (in Chinese)
- [2] 谢约翰,唐朝生,刘博,等.基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳定性改良[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(8): 1438-1447.  
XIE Y H, TANG C S, LIU B, et al. Water stability improvement of clayey soil based on microbial induced calcite precipitation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(8): 1438-1447. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 刘汉龙,韩绍康,陈卉丽,等.潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(6): 219-220.  
LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [5] ACHAL V, PAN X L, ZHANG D Y. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1601-1605.
- [6] 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 Y F, GUO Z J, CHEN H J, 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. (in Chinese)
- [7] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G. Investigation of pore-scale CaCO<sub>3</sub> distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4): 944-961.
- [8] FENG K, MONTOYA B M. Quantifying level of microbial-induced cementation for cyclically loaded sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engi-

- neering, 2017, 143(6): 06017005.
- [9] SHI J Q, LI H Y, XIAO Y, et al. Small strain stiffness of graded sands with light biocementation [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(10): 5273-5284.
- [10] XIAO Y, LI H Y, SHI J Q, et al. Effect of particle size on small strain stiffness of biotreated sands [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 41: 101027.
- [11] WHIFFIN V S. Microbial  $\text{CaCO}_3$  precipitation for the production of biocement [D]. Western Australia: Murdoch University, 2010.
- [12] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 112-117.
- [13] CHENG L, SHAHIN M A. Urease active bioslurry: A novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(9): 1376-1385.
- [14] BURBANK M, WEAVER T, LEWIS R, et al. Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(6): 928-936.
- [15] GOMEZ M G, GRADDY C M R, DEJONG J T, et al. Stimulation of native microorganisms for biocementation in samples recovered from field-scale treatment depths [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(1): 04017098.
- [16] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 615-626.
- [17] XIAO Y, WANG Y, DESAI C S, et al. Strength and deformation responses of biocemented sands using a temperature-controlled method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(11): 04019120.
- [18] YANG Y, CHU J, LIU H L, et al. Improvement of uniformity of biocemented sand column using  $\text{CH}_3\text{COOH}$ -buffered one-phase-low-pH injection method [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(1): 413-428.
- [19] 张锦程, 李俊, 肖鹏, 等. MICP加固砂土方法对比研究 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 151-157.
- ZHANG J C, LI J, XIAO P, et al. Comparative study on MICP-treatment schemes for sands [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(6): 151-157. (in Chinese)
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for soil test method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [21] CHANEY R C, DEMARS K R, FIORAVANTE V, et al. On the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2001, 24(3): 243.
- [22] 史金权, 肖杨, 刘汉龙, 等. 钙质砂小应变初始剪切模量试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 324-333.
- SHI J Q, XIAO Y, LIU H L, et al. Experimental study on small-strain shear modulus of calcareous sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 324-333. (in Chinese)
- [23] JAMIOLKOWSKI M, LANCELLOTTA R, PRESTI DLO. Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays [C]//International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials-Measurement and Application, IS-Hokkaido, Sapporo, 1994, 1: 95-114.
- [24] ALTUHAFI F N, COOP M R, GEORGIANNOU V N. Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(12): 04016071.
- [25] SHI J Q, XIAO Y, CARRARO J A H, et al. Anisotropic small-strain stiffness of lightly biocemented sand considering grain morphology [J]. *Géotechnique*, 2023: 1-14.
- [26] SADREKARIMI A, OLSON S M. Effect of sample-preparation method on critical-state behavior of sands [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(4): 548-562.
- [27] LADD R S. Specimen preparation and liquefaction of sands [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1974, 100(10): 1180-1184.

(编辑 胡玲)