DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.06.003

## 微生物产气降饱和砂土的剪切波速特性试验研究

吕美形,章定文\*,沈 晨,曾 彪 (东南大学 交通学院,江苏 南京 211189)

**摘 要:**基于振动台模型试验,采用预振动技术通过对不同深度处的加速度传感器阵列进行了剪切波速测量,研 究了振动台试验中微生物产气过程中的剪切波速变化情况,从而建立了微生物产气过程中饱和度和剪切波速之间 的定量关系。试验结果表明,饱和度降低后剪切波到达的时间增大,微生物产气降饱和过程得到的剪切波速在显 著减小。剪切波速随着饱和度降低而不断减小,当饱和度下降到 90%时剪切波速的速率在减小。由于砂土自重及 气泡溢出,模型箱下部的砂土剪切波速的值大于上部。微生物产气降饱和处理可液化地基过程中,振动台试验中 剪切波速和饱和度之间满足对应的曲线关系,采用剪切波速描述微生物产气过程中饱和度的变化是有效的。本文 的试验结果可对微生物降饱和法在现场试验中的工程应用提供依据。

# Experimental study on shear wave velocity characteristics of microbial gas production de-saturated sandy soil

LV Mei-tong, ZHANG Ding-wen\*, SHEN Chen, ZENG Biao

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract**: Based on shaker model tests, shear wave velocity measurements were carried out using a pre-vibration technique through an array of accelerometers at different depths. The variation of shear wave velocity during microbial gas production in the shaker test was investigated. A quantitative relationship between saturation and shear wave velocity during microbial gas production was established. The results show that the shear wave arrival time increases as saturation decreases and the shear wave velocity obtained during the desaturation of microbial gas production decreases significantly. The shear velocity decreases as the saturation decreases. The rate of shear velocity decreases as the saturation decreases to 90%. Due to the self-weight of the sand and bubble overflow, the value of the equivalent shear wave velocity of the sand in the lower part of the model box is greater than that in the upper part. In the process of microbial gas production and de-saturation treatment of liquefiable foundation, the corresponding curve relationship is satisfied between the equivalent shear wave velocity and saturation in the shaking table test. It is effective to describe the change of saturation during microbial gas production by shear wave velocity. The experimental results in this paper can provide a basis for the engineering application of the microbial desaturation method in field experiments.

Key words: shear wave velocity; microbial gas production; pre-vibration; saturation; shaker model tests; accelerometers array

0 引 言

随着地震过程的发生,地基土会出现液化现 象。地基土液化时会产生巨大的人员伤亡和财产损 失,如发生建筑物的下沉、倾斜甚至倒塌,地下管 线等生命线工程遭受破坏以及重要构筑物(堤防、 水坝、地基等)的破坏<sup>[1]</sup>。历次大地震中由于地震引 起的地基土液化均有发生,所带来的灾害极为严重, 如 1964 年日本新泻地震,由于地基发生液化导致 2 130 多座建筑物发生倒塌,6 200 多座建筑物严重

收稿日期: 2022-04-12

**基金项目**:国家自然科学基金项目(51878158)。

**作者简介:** 吕美彤(1993—),女,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事液化地基处理方面的研究。E-mail:lvmeitong0722@163.com。 \*通信作者:章定文(1978—),男,湖南常德人,教授,博士生导师,主要从事特殊地基处理和环境岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail:zhang@seu.edu.cn。

破坏,31 000 多座建筑物发生轻微破坏。2008 年中国汶川地震中,液化面积更是达到了100 000 km<sup>2</sup>, 绵阳、成都、德阳和雅安的不同地区均出现了大面积的喷水冒砂现象,喷水高度达到了10 m,并伴随着数公里长的地表裂缝出现<sup>[2]</sup>。因此如何有效处理液化地基成为我国基础设施建设的关键技术难题之一。

传统的可液化地基的工程处理措施主要有强 夯、挤密砂桩、碎石桩和水泥土搅拌桩等<sup>[3-4]</sup>。由于 受经济水平和建筑技术水平的限制,我国部分建 (构)筑物在修筑时未采取措施消除地基土的液 化,如底层或多层建筑、非高等级公路等。传统的 可液化地基的处理方法只能适用于新建工程中,难 以用于既有建筑物的防治,这也是近些年来大中型 地震中仍普遍存在液化现象的主要原因,故迫切需 要一种经济有效的液化缓解技术对既有建筑下的 液化地基进行处理。

微生物岩土技术作为岩土工程领域新的分 支,逐渐成为一个热门研究方向,近年来,众多学 者开展了相关的研究<sup>[5]</sup>。有学者通过研究表明, 饱 和度轻微减小,土体的抗液化性能会明显提高。 YOSHIMI 等<sup>[6]</sup> 通过循环扭剪试验指出砂土抗液化 强度随着饱和度的降低显著增大,当降低至 70% 时,其抗液化强度增加3倍。PENG等<sup>[7]</sup>通过试验 研究发现在不排水条件下,当样品的饱和度从 100%下降到 92.4%时,破坏模式会由应变软化转化 为应变硬化,且不排水抗剪强度可以提高2倍。只 要饱和度的微小变化,砂土试样的液化性能就会显 著提高。根据气体的产生方式,目前降饱和度的方 法有直接注气法、电解法、排注水法、化学气泡法 和微生物气泡法等[8-9]。而微生物产气降饱和法采用 垂直或倾斜钻孔注浆等方法,随着菌液的流动,气 泡均匀的填充在土体颗粒骨架中,HE<sup>[10]</sup>进行一系 列摄像监控和 CT 扫描测试显示, 微生物降饱和砂 柱中气泡的均匀性效果更好, 且可解决化学气泡法 引起的环境污染问题,过程可控,并且土壤生态系 统中本身存在广泛的微生物反硝化过程,利用微生 物的活动来改变土壤物理和机械行为,抵抗土壤液 化,具有很大的应用前景。

许多学者通过静三轴、动三轴及振动台试验都 证实了微生物降饱和度法在砂土饱和度降低的时 候就可以显著提高饱和砂土的抗液化能力<sup>[11-13]</sup>,但 对于反应过程中砂土饱和度降低的程度及反应后 各部分饱和度的均匀性未给出指标定量描述。明确 菌液注入后饱和度变化的实时监测和定量分析对 于微生物降饱和法在现场试验中的应用至关重要。

岩土地震工程中通常采用土壤的剪切波速来 评估离心机模型试验中的动态原位土壤特性。确定 剪切波速的值是进行地震场地响应和液化潜力分 析的基础。在离心机测试中通常采用弯曲元和微型 气锤来进行剪切波速测定。FU 等[14] 采用一对弯曲 元在离心机中发射和接受剪切波来测定剪切波 速。ARULNATHAN 等<sup>[15]</sup> 和 GHOSH 等<sup>[16]</sup> 采用微 型气锤产生横波,通过不同深度处的垂直加速度计 阵列记录传播的横波。但是这两种方法中弯曲元和 气锤都必须提前嵌入到模型土中,这种操作会对离 心机的试验结果进行扰动。因此一种无损且操作简 单,只用到传感器而不需要其他元件,并可以在土壤 层间和测试结构上进行剪切波速测试的技术是迫 切需要的。LEE 等<sup>[17]</sup> 开发了预振动技术用于测量离 心机模型试验中的剪切波速测试,当在测试砂床上 激发一个循环的低振幅正弦波(预振动),从而引起 砂床产生低振幅的自由振动过程,大大减小了砂床 对砂颗粒的干扰作用,得到了在预振动前后沿着模 型深度方向的剪切波速剖面,且预振动前后砂床的 相对密度和横波波速没有变化。ZHANG 等<sup>[18]</sup> 采用 预振动技术研究了微生物加固过程中钙质砂地基 的剪切波速, 通过加固前后土体的剪切波速变化, 评 估了胶结过程中钙质砂地基性质的变化。

预振动技术不会对砂土颗粒之间的滑移产生 影响,且廉价、无破坏性。本文基于振动台模型试 验,采用预振动技术通过不同深度处的加速度传感 器阵列进行了剪切波速测量,研究了振动台试验中 微生物产气过程中的剪切波速变化情况,从而建立 了微生物产气过程中的饱和度和剪切波速之间的 定量关系,研究成果可以为微生物降饱和法在现场 试验中的工程应用提供依据。

## 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验砂样

本次试验用砂为福建厦门标准砂,对其进行比 重、颗分等常规试验得到砂土的比重(*G*<sub>s</sub>)为 2.65, 砂土的最大和最小孔隙比分别为 0.703 和 0.385, 粒 径分布曲线见图 1,级配常数见表 1。由图 1 和表 1 可知,砂样粗粒组含量大于 50%,不含砾粒和细粒, 且 5<*C*<sub>u</sub>, 1<*C*<sub>c</sub><3,依据《土的工程分类标准》 (GB/T 50145—2007),定名为良好级配砂。

2022年11月

表 1 试验用砂的物理性质 Table 1 Physical properties of the tested sand

土类	颗粒形状	$G_{ m s}$	$e_{\min}$	emax	$D_{10}/\mathrm{mm}$	$D_{50}/\text{mm}$	$C_{\mathrm{u}}$	$C_{ m c}$
ISO 标准砂	圆形	2.650	0.385	0.703	0.162	0.658	5.167	1.054



#### 1.2 测试装置及传感器布置

试验采用东南大学交通学院城市地下工程与 环境安全重点试验室的小型电磁振动台系统。试验 模型土箱采用内部尺寸为50 cm×36 cm×40 cm 层状 剪切模型箱,框架层间设置钢珠用于减小层间摩阻 力,为土体提供较为理想的剪切变形条件,最大程 度地消除了边界效应。振动台与层状剪切盒的实物 图如图 2 所示。本试验采用的传感器主要是加速度 计阵列。针对已有学者进行的振动台试验结果,反 应过程中采用工业防水级压电式加速度传感器。传 感器布置如图 3 所示。



图 2 振动台与层状剪切盒 Fig. 2 Shakers and laminated shear boxes 单位: mm 层状剪切盒 50 •A3 加速度传感器 饱和标准砂 <u>400</u> 100 • A2 100 • A1 敲击 100 150 振动台台面 1<sub>500</sub> 振动方向 传感器布置图 图 3 Fig. 3 Distribution of sensors

#### 1.3 微生物培养

试验采用的菌种为购自德国微生物菌种保藏 中心(DSMZ,编号 5190)的施氏假单胞菌 (Pseudomonas stutzeri)。微生物采用的 Luria-Bertani(LB)。培养基的组成为胰蛋白胨 10 g, 酵母提取物5 g, NaCl 10 g,加入去离子水定容至 1 L。采用的反硝化培养基的基本组成为 MgSO4·7H2O 0.2 g,K2HPO4 1 g,Na3C6H5O7·2H2O 5 g和适量KNO3(根据降饱和度的要求添加)加入 蒸馏水,定容至1 L。微生物反硝化过程是由反硝 化细菌将硝酸氮通过4步反应转化为氮气的还原反 应(Rebata-Landa and Santamarina, 2012)。以硝酸 钾作为氮源时,柠檬酸钠为最佳碳源,采用的反硝 化细菌反硝化过程进行的还原反应方程式为:

 $5C_5H_7O_5COO^- + 18NO_3^- \rightarrow 30CO_2^+ + 9N_2^+ + 6H_2O + 23OH^-$ 

(1)

#### 1.4 微生物产气降饱和试验

在恒温 30 ℃条件下利用 LB 培养基培养施氏假 单胞菌 24 h,将菌悬液取出以 4 000 r/min 离心,去 除上清液,留存菌体待用。将反硝化培养基与留存菌 体混合,制备成 OD 值为 0.1 的高浓度菌悬液备用。

振动台试验过程采用水沉法进行制样,在层状 剪切盒内壁布置 PVC 薄膜,防止砂和水从层状剪 切盒间流出。将配置好的高浓度菌悬液倒入模型箱 内,将烘干的标准砂从剪切盒顶端 10 cm 处落入剪 切盒中,始终保持砂面在水面之下。加砂过程中进 行传感器的埋设,为了防止传感器位置偏差,在模 型箱顶端用细线进行定位。加砂到模型箱的 30 cm 处,平整砂子表面,并抽出多余菌液。由于微生物 在反应前期有 12 h 的初始停滞期,这个过程保证 砂样实现饱和固结。待反应过程开始,试样表面的 水位会不断上升,40~45 h 左右反应停止,水面不 再变化反应过程结束。

#### 1.5 试验工况

对比微生物产气降饱和后在不同饱和度下的 剪切波速的测试结果,估算经过微生物处理后的饱 和砂土的抗液化能力。制备一个未加入微生物,其 他试验条件一样的空白对照组进行剪切波速测 试。剪切波速测试试验工况见表 2。

Table 2         Shear wave speed test conditions									
测试工况	试验初始 高度/cm	产气后水层厚 度变化量/cm	初始 饱和度/%	相对 密实度/%					
1	30.2	0.00	100.0	40.9					
2	30.5	0.78	94.3	41.2					
3	30.0	1.87	90.2	40.5					
4	30.8	2.95	84.6	41.1					

剪切波速测试工况

表 2

## 2 微生物产气降饱和缓解液化地基 的剪切波速测试

#### 2.1 剪切波速测试原理

振动台模型试验中都会配置有垂直方向的加速度阵列来监测土壤的动态响应过程。本实验中采用不同深度的加速度计阵列进行剪切波速测试。剪切波速可以用来评估土壤的剪切强度和土壤的完整性。测试原理是在模型箱的底部产生一个横向的水平冲击力作为剪切振动源,使用不同深度处的加速度计进行加速度测量,通过第一个波传播的时间差和加速度计之间距离来得到剪切波速,如图4所示。为了准确的测量第一个波到达时的时间,数据采集仪设置了200000 Hz 的采样频率,和加速度计阵列之间波传播的距离相比,只要采样频率足够小,就可以消除由于分辨率导致的剪切波速数值的误差。剪切波速(v<sub>s</sub>)的测试采用第一到达法<sup>[19]</sup>确定,计算公式为:

$$v_{\rm s} = \Delta S / \Delta t \tag{2}$$

式中:  $\Delta S$  为加速度计阵列之间的距离;  $\Delta t$  为加速度计阵列之间的距离;  $\Delta t$  为加速度计阵列对应的第一波到达的时间差。



图 4 加速度计 A1 测得的信号 Fig. 4 Signal measured by accelerometer A1

#### 2.2 不同深度处的剪切波速测试

在模型试验箱不同深度处(5 cm、15 cm、25 cm) 设置 A1、A2 和 A3 共 3 个加速度计阵列,微生物 产气降饱和前后得到的加速度计阵列采集到的数 据汇总如图 5 所示,可以看出第一个波的峰值幅值 由第一个加速度计 A1 采集到的 0.05 m/s<sup>2</sup>(0.005 g) 变化到模型箱顶部的加速计 A3 的 0.02 m/s<sup>2</sup> (0.002 g)。将图 5 中加速度信号按照公式(1) 转换为剪切波速随着时间的变化规律,如图 6 所示。

从微生物发生反应开始,每间隔4h将微生物 在饱和砂土中的产气过程进行剪切波速测试,距模 型底部15 cm范围以下和以上的剪切波速随着时间 的变化规律如图6所示,由图可以看出微生物产气 降饱和过程中60h记录得到的剪切波速在显著减 小,饱和度降低之后明显观测到剪切波到达的时间 差增大。说明采用剪切波速作为微生物产气过程中 饱和度的指标是有效的。



图 5 在微生物产气前得到的加速度数据







Fig. 6 Variation law of shear wave velocity with reaction time

将反应过程中微生物产气引起的饱和度的变 化进行计算,得到测得的剪切波速和饱和度之间的 关系如图7所示,图7中第一组和第二组指的是当 饱和度降到84.6%的两组平行试验。由图可以看出, 随着饱和度降低,剪切波速在不断减小,由反应初 期的 59 m/s 减小为 12 m/s。反应进行中,随着产气 饱和度降低,砂土孔隙中水分不断被气体替代,由 于波在空气中的传播速度远远小于水中,所以剪切 波速呈下降的趋势。随着微生物反应过程的进行, 土体饱和度降低,将原本在孔隙中的菌液排出土 体,这部分菌液反应过程中产生的气体直接悬浮在 液体表面,这部分气体无法起到降低饱和度的作 用,同时菌液在排出的过程中带走了一部分不稳定 的气泡, 故图7在曲线上出现了拐点。随着饱和度 下降,剪切波速的下降速率在减小。由于反应过程 中部分气泡会向上部溢出,及砂土重力的影响导致 砂样中气泡的分布为下部小而封闭的气泡,上部气 泡大且呈现出气泡不均匀的状态,所以由图7也可 以看出计算得到的砂土剪切波速在上部和下部不 完全统一,且总是下部大于上部。取上下两部分的 平均值作为该模型箱某一饱和度下的剪切波速。



Fig. 7 Relationship between shear wave velocity and saturation

#### 2.3 剪切波速和饱和度的关系

为了得到剪切波速和饱和度的关系,将试验过程中的4组不用饱和度试样的剪切波速进行汇总如图8所示,可以看出随着饱和度降低,剪切波速是不断减小的,且满足关系式: v<sub>s</sub> = 2.779×1.13<sup>st</sup>。当微生物开始产气,随着饱和度降低,砂土孔隙中水分不断被气体替代,由于波在空气中的传播速度远远小于水中,所以剪切波速呈下降的趋势。随着微生物反应过程的进行,土体饱和度降低,将原本在孔隙中的菌液排出土体,这部分菌液反应过程中产生的气体直接悬浮在液体表面,无法对剪切波速产生影响,所以随着饱和度的降低,特别是降低到90%以下,剪切波速的减小速率在变小。



图 8 剪切波速和饱和度的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves for equivalent shear wave velocity and saturation

### 3 结 论

本文基于振动台模型试验,采用预振动技术通 过不同深度处的加速度传感器阵列进行了剪切波 速测量,研究了振动台试验中微生物产气过程中的 剪切波速变化情况,从而建立了微生物产气过程中 的饱和度和剪切波速之间的定量关系,主要得出以 下结论:

(1)微生物产气降饱和过程中得到的剪切波 速在显著减小,饱和度降低之后明显观测到剪切波 到达的时间差增大。说明采用剪切波速作为微生物 产气过程中饱和度的指标是有效的。

(2)随着饱和度降低剪切波速在不断减小, 由反应初期的 59 m/s 减小为 12 m/s。剪切波速下降 速率随着饱和度的减小而减小。砂土剪切波速的值 在上部和下部不一样,且总是下部大于上部的原因 主要是反应过程中部分气泡会向上部溢出,及砂土 重力的影响导致砂样中气泡的分布呈现不均匀的 状态。

(3) 振动台试验中, 微生物产气降饱和处理 可液化地基过程, 剪切波速和饱和度之间满足曲 线: v<sub>s</sub> = 2.779×1.13<sup>s</sup>。当微生物开始产气,随着饱 和度降低, 剪切波速呈快速下降的趋势, 当饱和度 降低到 90%以下, 剪切波速下降的速率在变小。

#### 参考文献

 MONTGOMERY J, WARTMAN J, REED A N, et al. Field reconnaissance data from geer investigation of the 2018 MW 7.5 palu-donggala earthquake[J]. Data in Brief, 2021, 34: 106742.

- [2] 王维铭. 汶川地震液化宏观现象及场地特征对比分析
  [D]. 北京:中国地震局工程力学研究所, 2010.
  WANG Wei-ming. Wenchuan earthquake liquefaction macro-phenomenon and comparative analysis of field characterization[D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics in China Earthquake Administration, 2010.
- [3] DU G, GUO Q, LIU S, et al. Treatment of liquefiable ground by resonant compaction using a crisscross-shaped probe. case study at the Huaiyan highway site[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2021, 58: 320–325.
- [4] LEE D H, JUANG C H, KU C S. Liquefaction performance of soils at the site of a partially completed ground improvement project during the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan[J]. Canadian Geotechnical Journal 2001, 38(6): 1241–1253.
- [5] 吴创周, 楚剑, 成亮, 等. 微生物注浆地基处理技术研 究进展[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 181-186.
  WU Chuang-zhou, CHU Jian, CHENG Liang, et al. Advances of ground improvement with MICP-based biogrouting[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 181-186.
- [6] YOSHIMI Y, TANAKA K, TOKIMATSU K. Liquefaction resistance of a partially saturated sand[J]. Soils & Foundations, 1989, 29(3): 157–162.
- [7] PENG E, SHENG Y, HU X Y, et al. Mitigation of sand liquefaction under static loading condition using biogas bubbles generated by denitrifying bacteria[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113106.
- [8] ESELLER-BAYAT E, YEGIAN M K, ALSHAWABKEH A, et al. Liquefaction response of partially saturated sands. I: Experimental results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(6): 863–871.
- [9] OKAMURA M, TAKEBAYASHI M, NISHIDA K, et al. In-situ desaturation test by air injection and its evaluation through field monitoring and multiphase flow simulation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 137(7): 643–652.

- [10] HE J. Mitigation of liquefaction of sand using microbial methods[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2013.
- [11] WANG K D, CHU J, WU S F, et al. Stress-strain behaviour of bio-desaturated sand under undrained monotonic and cyclic loading[J]. Géotechnique, 2021, 71(6): 521-533.
- [12] HE J, CHU J, WU S F, et al. Mitigation of soil liquefaction using microbially induced desaturation[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2016, 17(7): 577–588.
- [13] PENG E, HOU Z, SHENG Y, et al. Anti-liquefaction performance of partially saturated sand induced by biogas under high intensity vibration[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128794.
- [14] FU L, ZENG X, FIGUEROA J L. Shear wave velocity measurement in centrifuge using bender elements[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2004, 4(2): 1–11.
- [15] ARULNATHAN R, BOULANGER R W, KUTTER B L, et al. New tool for shear wave velocity measurements in model tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(4): 444–453.
- [16] GHOSH B, MADABHUSHI S P. An efficient tool for measuring shear wave velocity in the centrifuge[C]//Proceedings of the International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. AA Balkema, 2002: 119–124.
- [17] LEE C J, HUNG W Y, TSAI C H, et al. Shear wave velocity measurements and soil-pile system identifications in dynamic centrifuge tests[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(2): 717–734.
- [18] ZHANG X, CHEN Y, LIU H, et al. Performance evaluation of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105959.
- [19] ZHOU Y, CHEN Y, ASAKA Y, et al. Surface-mounted bender elements for measuring horizontal shear wave velocity of soils[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2008, 9(11): 1490–1496.