

DOI: 10.11779/CJGE20221301

# 气动振杆密实法加固湿陷性黄土的模型试验研究

高常辉<sup>1,2</sup>, 刘松玉<sup>1</sup>, 杜广印<sup>\*1</sup>, 庄仲甸<sup>1</sup>, 杨泳<sup>3</sup>, 何欢<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 江苏盛泰建设工程有限公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 气动振杆密实法是湿陷性黄土地基处理的一项全新技术。采用自行研制的气动振杆密实模型试验装置, 进行了单一激振力、气体射流协同激振力两种条件下的模型试验, 评价了土体加固效果, 研究了振杆贯入过程中土体水平向土压力、土颗粒垂直振动速度和土体中气体压力值的变化规律。试验发现, 处理后各深度土层的密度均有明显提高, 湿陷系数降低; 增设气体射流后, 100 mm 深度以下土层密度进一步提高, 水平向土压力最大提高 20.4%, 同时放大了振杆密实法引起的土体振动响应。研究揭示了气体射流在土体加固过程中的作用机理, 探讨了气动振杆密实法加固湿陷性黄土机理, 为推广气动振杆密实法处理湿陷性黄土地基技术的应用提供了理论依据。

**关键词:** 振杆密实法; 气体射流; 湿陷性黄土; 地基处理; 循环剪切

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)02-0325-10

**作者简介:** 高常辉(1992—), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊地基处理、原位测试技术等方面的研究。E-mail: skd994742@sdust.edu.cn。

## Model tests on reinforcement of collapsible loess by pneumatic-vibratory probe compaction method

GAO Changhui<sup>1,2</sup>, LIU Songyu<sup>1</sup>, DU Guangyin<sup>1</sup>, ZHUANG Zhongxun<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>3</sup>, HE Huan<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong

University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Jiangsu Shengtai Construction Engineering Co., Ltd., Lianyungang

222000, China)

**Abstract:** The pneumatic-vibratory probe compaction method is a new technology for the treatment of collapsible loess. By using the self-developed pneumatic-vibration model test devices, the model tests on the reinforcement of collapsible loess are carried out by the above method under two test conditions, single excitation force and air jet combined with excitation force. The reinforcement effects are evaluated. The change rules of the horizontal soil pressure, vertical vibration velocity of soil particles and gas pressure values in the soils during the penetration of the vibratory probe are studied. The results show that the density of soil layers at each depth is significantly increased, and the collapsibility coefficient is reduced after the treatment. With the addition of air jet, the density of the soil layers below 100 mm in depth is further increased, and the maximum horizontal soil pressure is increased by 20.4%. At the same time, the vibration response of soils caused by the method is amplified. The mechanism of air jet in the process of soil reinforcement is revealed, and the mechanism of the pneumatic-vibratory probe compaction method to reinforce collapsible loess is discussed, which provides the theoretical basis for promoting the application of the method to treat collapsible loess foundation.

**Key words:** vibratory probe compaction method; air jet; collapsible loess; foundation treatment; cyclic shear

## 0 引言

振杆密实法是 20 世纪 60 年代末发展起来的一种处理可液化砂土地基的方法, 该方法利用振杆-土系统的振动效应来放大土体的振动响应, 实现振动能量从振杆到周围土体的最佳传递, 提高振动密实效率, 从而达到加固地基的目的<sup>[1]</sup>。国外于 1974 年进行了振杆密实法的首次工程实践<sup>[2]</sup>, 并在接下来的 40 多年里得

到了快速的发展<sup>[3-5]</sup>, 先后出现了 Terra 振杆<sup>[2]</sup>、振动棒<sup>[6]</sup>、瑞典翼<sup>[7]</sup>、Y 形振杆<sup>[8]</sup>以及双 Y 形振杆<sup>[9]</sup>等表现优良的振杆。刘松玉等<sup>[10-11]</sup>率先开展了振杆密实法的相关研究, 并研制了具有自主知识产权的十字形振动

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (41977241); 国家自然科学基金青年项目 (52008098); 江苏省自然科学基金青年项目 (BK20200405)  
**收稿日期:** 2022-10-21

\*通信作者 (E-mail: guangyin@seu.edu.cn)

翼及施工设备。大量工程实践表明,该方法在处理可液化地基时无需额外填料,经济效益突出,加固效果显著,振动环境影响小,为资源节约型和环境友好型的地基处理新技术。十多年来,十字形振杆密实法在我国东部沿海地区基础设施工程加固填海土地、减轻地震区液化危险等方面得到了大量推广和应用<sup>[11-14]</sup>。

近年来,随着十字形振杆密实法施工设备的不断升级以及振动密实理论体系的逐渐完善,其处理的土类范围也取得了突破性进展,不再局限于传统的松散砂性土地基,典型施工案例如江苏宿迁的可液化粉土地基处理<sup>[11]</sup>、淮盐高速(大丰港—盐城段)的滨海相可液化地基处理<sup>[14]</sup>等。2019 年,刘松玉等<sup>[15]</sup>首次提出了气动振杆密实法加固湿陷性黄土地基的原理和方法,并依托中兰客运专线工程(靖远段)进行了现场试验<sup>[16-18]</sup>,结果表明气动振杆密实法是湿陷性黄土地基处理的一项全新技术,具有工效高、能耗低、处理效果显著等优点,在黄土地区有很好的推广应用前景。

然而,目前气动振杆密实法加固湿陷性黄土的机理仍未明晰,尤其对地基处理过程中的气动作用效果和机理缺乏认识。鉴于此,本文采用自行研制的气动振杆密实模型装置,开展了有、无气体射流条件下的振杆密实法加固湿陷性黄土对比试验,通过监测试验过程中水平向土压力、土颗粒垂直振动速度和土体中气体压力变化,以及加固前后土层密度和湿陷系数变化,评价了湿陷性黄土的加固效果,分析了气体射流在地基加固过程中的作用效果,并探讨了气动振杆密实法加固湿陷性黄土的机理。

## 1 气动振杆密实法简介

### 1.1 气动振杆密实法智能化施工设备

研发的施工设备(图 1)包括振动锤、喷气式振杆、步履式行走机构、其它附属设备及智能化施工控制与远程监控系统等。

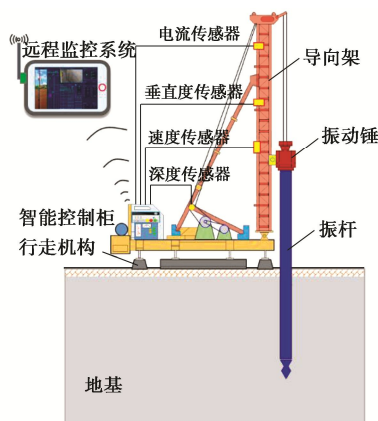


图 1 气动振杆密实施工设备

Fig. 1 Pneumatic-vibratory probe compaction equipment

振动锤由激振器、减振弹簧、减振梁等组成。喷气式振杆(图 2)由两根垂直相交的锰钢板交叉连接而成,其横截面呈十字形,底部钻头处沿环向布置 4 个喷气孔。行走机构为步履式,能够在凹凸不平的地上行走、跨越沟壑,具有广泛的适应性。其它附属设备主要有导向架、空压机、发电机、托盘机构、填土机构等。智能化施工控制与远程监控系统由施工数据采集系统、智能化控制系统、数据传输与存储系统和远程监控系统等组成。各项监测与智能化控制贯穿气动振杆密实法施工全过程,有效保证施工质量。

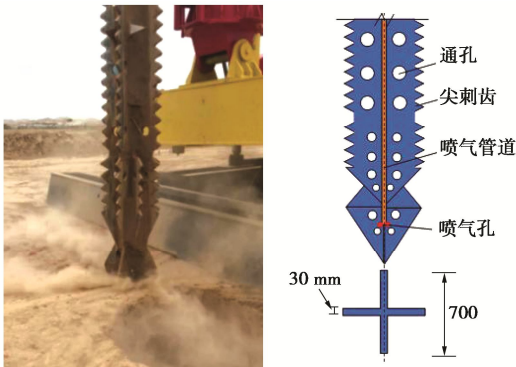


图 2 喷气式振杆

Fig. 2 Vibratory probe with air jet

### 1.2 施工工艺

气动振杆密实法施工时,振杆在垂直激振力和其自重作用以及气体射流的协同作用下贯入土层,具体施工步骤如下:①施工场地平整。②振点定位。行走机构移动到指定位置,将振杆与点位对中并调整垂直度。③气振下沉。调整喷气压力,使喷气孔保持高压喷气的稳定状态;启动振动锤,控制卷扬机放线速度,使振杆贯入土层直至设计深度;下降速度宜控制为 1.2 m/min 左右。④留振。待振杆到达设计深度后停止贯入,保持振杆在底部留振 15 s。⑤振动提升。关闭喷气,卷扬机缓慢收线并将振杆提升至地面。⑥回填振压。采用托盘机构、填土机构等对振孔进行回填和振压。⑦关闭振动锤,完成单点施工。在需要加强处理的深度可增加振动反插工艺,反插次数应根据场地实际情况进行调整。

## 2 室内模型试验概况

### 2.1 气动振杆密实模型试验装置

气动振杆密实模型试验装置(图 3)由振动锤、喷气式振杆、模型箱、支架、起吊设备和数据采集系统等组成。振动锤型号为 YZU-5-6,可实现无极调频;喷气式振杆按照原型尺寸的 1/10 制成,长、宽分别为 1500, 70 mm,其横截面呈十字形,以合金钢导气管为中心,间隔 90° 依次焊接 4 条侧翼,底部钻头处沿

环向均布 4 个喷气孔; 模型箱尺寸为 1.5 m×1.0 m×1.3 m (长×宽×高), 其 4 个侧面均布设树脂玻璃和加劲肋; 支架和起吊设备分别用于控制振杆的垂直度和贯入速率。

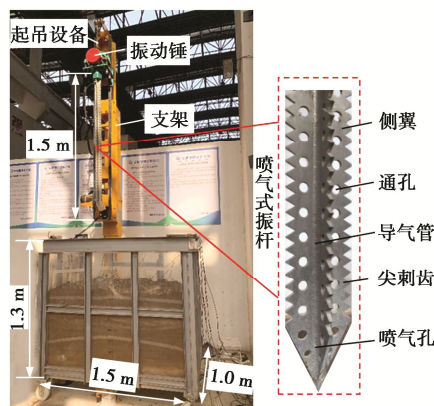


图 3 气动振杆密实模型试验装置

Fig. 3 Model test devices for pneumatic-vibratory probe compaction tests

数据采集系统主要有土压力监测、振动监测和气压监测三部分。土压力监测系统包括一台 TST3827E 系列动静态信号采集仪 (配套测试分析软件) 和 8 个微型土压力传感器; 振动监测系统包括一台 YSV8008 动态信号采集仪和 6 个 YSV200 型垂直振动传感器; 气压监测系统包括一台气压实时采集记录仪和 4 个扩散硅压力变送器。

2.2 模型相似比设计

试验采用缩尺模型, 以几何尺寸、密度和黏聚力为基本物理量, 控制模型与原型的几何相似比为 1:10, 密度相似常数为 1:1, 黏聚力相似常数为 1:10, 进而根据  $\pi$  定律, 采用量纲分析法求出其它各物理量的相似常数。

2.3 湿陷性黄土相似材料制备

结合张延杰等<sup>[19]</sup>、柴少峰等<sup>[20]</sup>的研究, 本文选取重塑黄土 (过 2 mm 筛)、工业细盐 (细度规格 80 目)、石膏粉 (细度规格 280 目)、氧化钙粉末 (细度规格 100 目) 和锯末 (过 2 mm 筛), 通过人工制备湿陷性黄土相似材料开展试验。重塑黄土可在一定程度上保持原状黄土的结构性和工程性质; 工业细盐作为湿陷性敏感材料, 亦可和石膏粉一起作为胶结材料; 氧化钙的加入可以模拟原状黄土的碳酸钙胶结特性; 锯末起到降低材料重度、减小黏聚力的作用。重塑黄土的颗粒级配曲线见图 4。根据相似关系, 相似材料的内摩擦角应与原型土保持一致, 而其黏聚力仅为原型土的十分之一。然而, 过低的黏聚力在实际操作中很难或者说几乎不可能实现。因此, 本文通过多次配比调整, 使实际值尽量接近于目标值。湿陷性黄土相似材

料的主要物理力学参数见表 1。

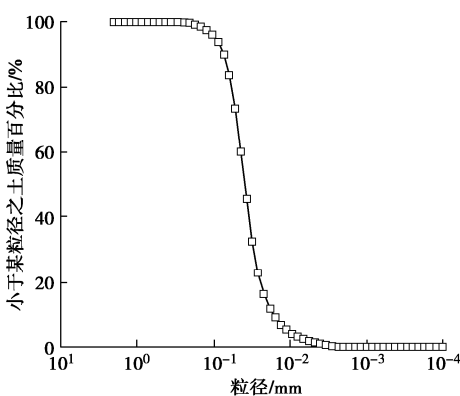


图 4 重塑黄土的颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves of remolded loess

表 1 湿陷性黄土相似材料及原状土的主要指标

Table 1 Indexes of similar materials and undisturbed soil

材料	含水率/ %	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	湿陷 系数
原状土	10.0	1.32	11.7	20.2	0.030
目标值	10.0	1.32	1.17	20.2	0.030
相似 材料	10.0	1.32	2.8~4.2	22.4~26.7	0.035~0.045

2.4 试验过程

黄土相似材料填筑前, 在模型箱四面树脂玻璃上分别布设刻度线, 以便控制填料密度。将重塑黄土、工业细盐、石膏粉、氧化钙和锯末按照预设比例混合并搅拌均匀, 然后按照相似材料干重的 10% 均匀地喷洒自来水。根据预设的填料密度 1.30 g/cm<sup>3</sup>, 分 10 层填筑压实相似材料, 每层填料控制厚度 100 mm。

在土层填筑过程中, 根据图 5 所示传感器布置示意图埋设土压力传感器、振动传感器和压力变送器。需要注意的是, 试验过程中量测的是水平向土压力, 微型土压力盒的受力面应当保持竖直; 压力变送器的进气口应与振点处于同一直线上。相似材料填筑完成后, 静置 3 d。

模型试验分气振区和振动区两个试验区进行。“气振”是指振杆在气体射流协同激振力 (下称气振协同) 作用下贯入土层; “振动”指振杆在单一激振力作用贯入土层。模型试验的具体参数如表 2 所示。两个试验区以模型箱中心线为界, 各进行 3 个振点的加固处理。试验时, 首先对气振区内振点 1#~3#依次进行加固, 每个振点均包括 3 个过程: 气动下沉 (喷气)、底部留振 5 s (无喷气) 和振动提升 (无喷气)。振动区内开展试验时, 关闭空压机, 使振杆在单一激振力作用下依次对振点 4#~6#进行加固处理。



表 2 模型试验参数

Table 2 Parameters of model tests

喷气压力/kPa	激振频率/Hz	贯入深度/mm	振点间距/mm	贯入速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	提升速率/(mm·s <sup>-1</sup> )
18	16	800	300	20	20

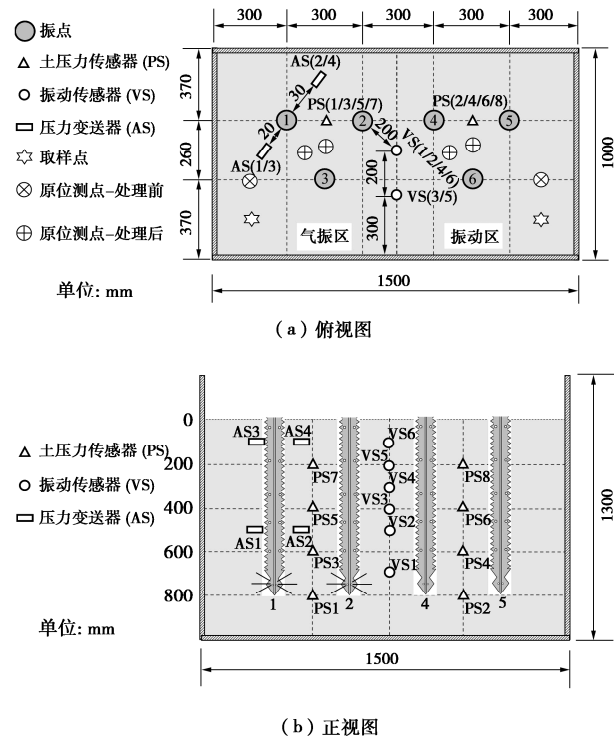


图 5 模型箱内各传感器布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of layout of sensors in model box

3 模型试验结果与分析

3.1 土层表面情况

振动区和气振区处理后土层表面形貌如图 6 所示。振动区内振点处土层破坏截面呈“十字形”，与振杆截面形状一致；气振区内破坏截面大致呈现圆形。根据空压机的原理以及气流在导气管路内的运动特性，气体射流通常被认为是一种带有脉冲波动幅度的连续性不均匀喷射流。当气体射流不断以脉冲式冲击土体时，对土体产生一种类似循环剪切荷载作用，使土体的残余变形迅速积累，土体结构在短时间内发生动力剪切破坏。因此，气体射流能够破坏振杆侧翼间的土体结构，加之振杆对土体产生的“十字形”破坏区，形成了大致以振杆宽度为直径的圆形破坏范围。

结合振杆贯入的土力学特性进一步分析，气体射流破坏了侧翼间土体的结构，减小了侧翼所受的来自周围土体的正压力，进而减小了侧翼与土体间的动摩阻力。根据振动沉桩方面的相关研究<sup>[21]</sup>，当激振力大于振杆侧翼所受的动摩阻力时，振杆方能持续下沉。因此，动摩阻力减小，使振杆的贯入效率得到提高，这也是现场试验时增设气体射流后振杆能够顺利贯入

的原因之一。

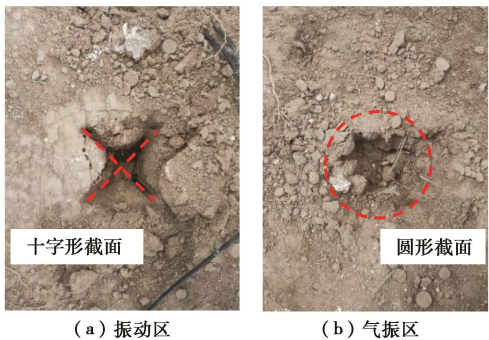


图 6 振后土层表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of soil layer after vibration

3.2 密度和湿陷性变化分析

采用 LA-15 型智能承载力检测仪，对处理前后土层的比贯入阻力进行测试，以此评价土体的加固效果。模型试验前，通过对不同密度的相似材料试样进行比贯入阻力测试，建立比贯入阻力与密度的关系，如图 7 (a) 所示。黄土相似材料的比贯入阻力随密度增加而增大，两者具有较好的幂函数关系。同时，对不同密度的试样进行室内浸水压缩试验，获得密度与湿陷系数的关系，如图 7 (b) 所示。试验结果表明，黄土相似材料的密度与其湿陷系数呈明显负相关关系。当黄土相似材料的湿陷性消除时，即湿陷系数小于 0.015，此时对应密度约为 1.40 g/cm<sup>3</sup>，比贯入阻力值约为 252 N。

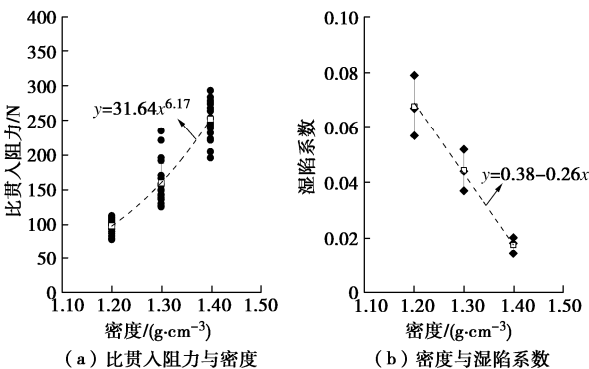


图 7 相似材料的比贯入阻力与其密度、湿陷系数的关系

Fig. 7 Relationship among the specific penetration resistance, density and collapsibility coefficient of similar materials

对处理前后不同深度处土层的比贯入阻力进行检测，并按照上述拟合关系换算得到土层的密度和湿陷系数，结果如图 8 所示。无论在气振区还是振动区，处理后各深度土层的密度均有明显提高，验证了振杆

密实法加固湿陷性黄土的良好效果。在振动区内,上部土层密度的提高幅度明显大于下部土层,说明振杆密实法的加固效果受土体初始密度影响较大;2点之间土层的加固效果明显优于3点形心处,平均提高2%。在气振区内,土层密度的提高幅度相对比较均匀,且总体上较振动区有所提高,尤其在100 mm深度以下土层,说明气体射流对一定范围内的土体具有密实作用。

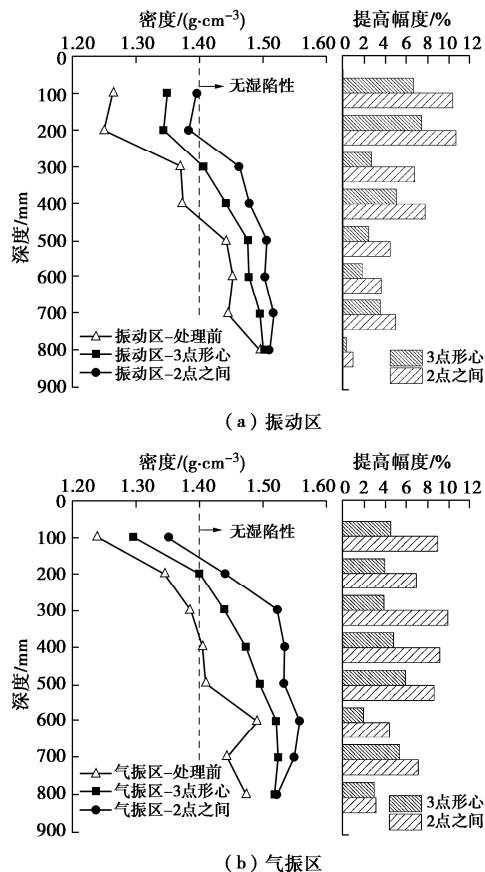


图8 处理前后不同深度处土层的密度和湿陷系数

Fig. 8 Densities and collapsibility coefficients of soils at different depths before and after treatment

值得注意的是,气振区内浅层土(100 mm)的密度略低于振动区,原因可能是气体射流在土体内渗流过程中对表层土产生了不利影响。具体而言,气体渗流时会对土体内原生裂隙等优势通道进行扩展,当土层上覆压力较小时,裂隙扩展主要以抬升土体为主,因而气体射流会引起浅层土的松动进而弱化其强度;而当上覆压力较大时,裂隙扩展主要以压缩土体为主<sup>[22-23]</sup>,这也是气振区内土层的密度普遍高于振动区的原因之一。

此外,由土层密度与湿陷系数的换算关系可得,处理前0~400 mm范围内土层均具有湿陷性,而处理后各深度土层的湿陷系数均明显降低;湿陷性土层厚

度减小,振动区内湿陷性土层剩300 mm左右,气振区内仅剩200 mm左右。

### 3.3 水平向土压力变化分析

振杆贯入—留振—提升全过程中水平向土压力变化如图9所示。从图9中可以看出,气振区和振动区内水平向土压力均明显增加,这与Massarsch等<sup>[5]</sup>在研究振杆密实法处理砂性土地基中得到的结论一致。原因在于,垂直激振的振杆与土体间的摩擦作用会产生水平方向的应力脉冲并向四周传播,进而使土体水平应力增加;而水平应力的改变将进一步在土体内产生一个压缩波,增加水平向土压力,提高土体密实度。

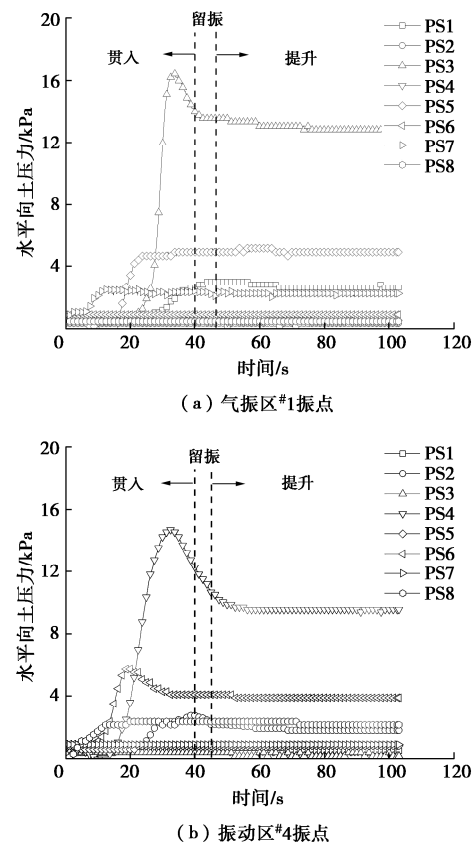


图9 振杆贯入—留振—提升过程中水平向土压力变化

Fig. 9 Variation of horizontal soil pressure during vibration penetration, continuous vibration and vibration extraction

气振区和振动区内各土压力盒监测的水平向土压力变化结果具有相似规律,即在振杆贯入阶段大幅增加,随后趋于稳定,在留振和提升阶段无明显变化。分析原因如下:湿陷性黄土相似材料具有一定的结构性,它不同于无黏性土会始终依附在振杆表面;在结构性土中贯入时,振杆会与周围土体之间形成一个疏松带甚至空隙区,导致振杆向周围土层传递的振动能量大幅减弱,因此进一步留振和提升不再对土体产生明显加固效果,水平向土压力也基本稳定。

根据振杆贯入时间与贯入速率的关系,绘制如图

10 所示水平向土压力与振杆贯入深度的关系。两个试验区内水平向土压力变化规律一致：除 800 mm 深度测点（PS1 和 PS2）外，土层深度越大，水平向土压力增加越明显。对比气振区和振动区的水平向土压力监测结果发现，气体射流对有效喷射范围内的土体产生了一定的挤压力。气振区内测点 PS3（600 mm）处水平向土压力增长最为明显，该测点处水平向土压力增加至 14.0 kPa，较振动区内相同深度处土层（PS4）提高 14.4%；气振区内 PS5（400 mm）测点处土压力较振动区 PS6 测点最大提高 20.4%，进一步说明气体射流对振杆密实法加固湿陷性黄土地基效果的促进作用。

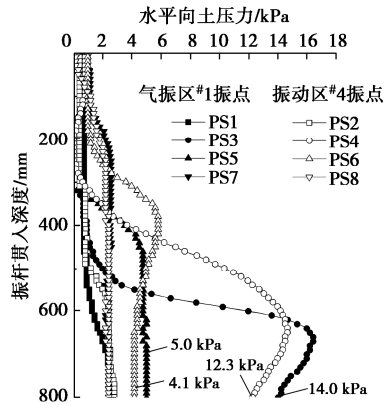


图 10 振杆贯入过程中水平向土压力值监测及稳定值

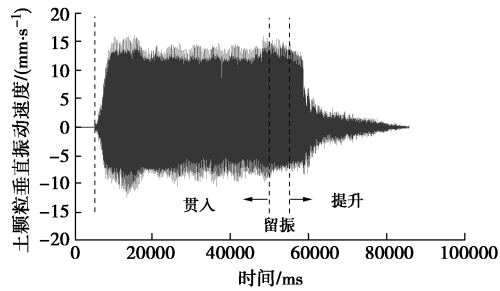
Fig. 10 Soil pressure monitoring during probe penetration and stable values

3.4 土颗粒垂直振动速度变化分析

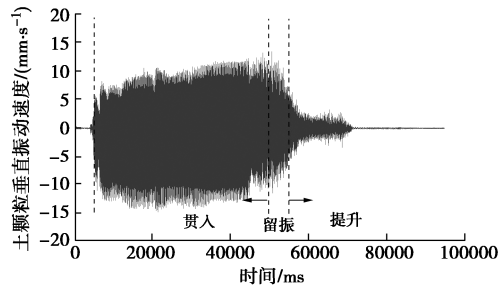
图 11 为气振区和振动区内两测点获得的振杆贯入—留振—提升全过程中土颗粒垂直振动速度时程曲线。由图 11 可以看出，两个试验区内土体均表现出显著的振动响应，且该响应具有明显的阶段性：振杆在接触土层后，土颗粒垂直振动速度在 5 s 内急剧增加，在振杆贯入阶段（5~40 s）内保持相对稳定或缓慢增加；留振阶段（40~45 s）振动速度开始缓慢下降，在提升阶段（45~85 s）急剧减小并趋向于零。该现象与水平向土压力监测结果类似，即振杆周围土层的动力响应主要发生在振杆贯入阶段，而在留振和提升阶段逐渐减小。

对垂直振动速度数据每 1000 ms 取一个平均值，绘制土颗粒垂直振动速度与振杆贯入深度的关系曲线，如图 12 所示。对比发现，气振区内各测点监测的土颗粒垂直振动速度随振杆贯入深度的变化趋势相对稳定，基本在 7.0~7.5 mm/s；振动区内振动速度随振杆贯入深度增加而增大，数值介于 4.5~7.0 mm/s。气振协同条件较单一激振力条件获得了更大的土颗粒垂

直振动速度，说明气体射流对振杆密实法引起的土体振动响应具有放大效应。



(a) 气振区#1振点VS1测点



(b) 振动区#6振点VS5测点

图 11 气振区#1 振点和振动区#6 振点试验时监测的土颗粒垂直振动速度时程曲线

Fig. 11 Time histories of vibration velocity during testing of points No.1 and 6

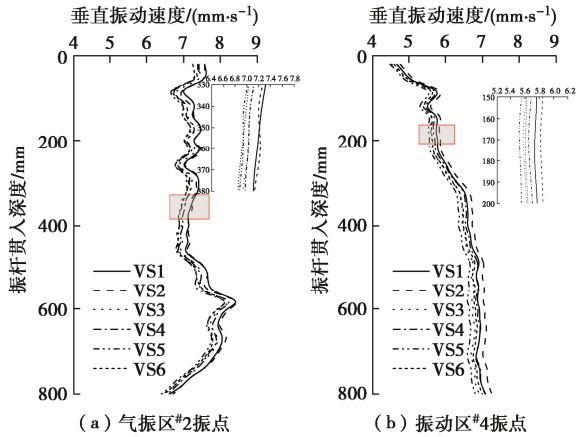


图 12 土颗粒垂直振动速度随振杆贯入深度的变化规律  
Fig. 12 Variation of vibration velocity of soil particles with penetration depth of vibratory probe

图 13 分别提取了 VS1（700 mm）、VS2（500 mm）、VS4（300 mm）和 VS6（100 mm）测点在振杆贯入至与之相同深度时记录的土颗粒垂直振动速度，其中图 13（a）对模型试验数据按照相似常数 1：10 进行了换算。由图 13（a）可以看出，同一土层深度处土颗粒垂直振动速度均随距振杆水平距离增加而减小，符合振动能量衰减的一般规律，说明土颗粒振动速度衰减受几何传播和土体阻尼的影响。

采用相同的动态信号采集仪对振杆密实法实际施

工过程中引起的地面垂直振动进行监测。以振杆为中心,在水平方向上不同距离处依次埋设振动速度传感器,现场实测数据同见图13(a)。通过对比可知,气振区内土颗粒垂直振动速度变化趋势与现场实测数据相似,不同的是,室内模型试验所测数据略大于现场实测数据。这是因为现场数据来自于地面振动监测,而模型试验监测的是不同贯入深度处土体的振动情况。由此可以看出,土颗粒垂直振动速度受振杆贯入深度的影响。如图13(b),在距振杆同一水平距离处,土颗粒垂直振动速度随振杆贯入深度增加大致呈线性增长趋势,Athina Grizi等<sup>[24]</sup>在锤击沉桩过程中发现了类似规律。此外,从图13(b)还可以得出,振动区内土颗粒垂直振动速度约为气振区的83%。

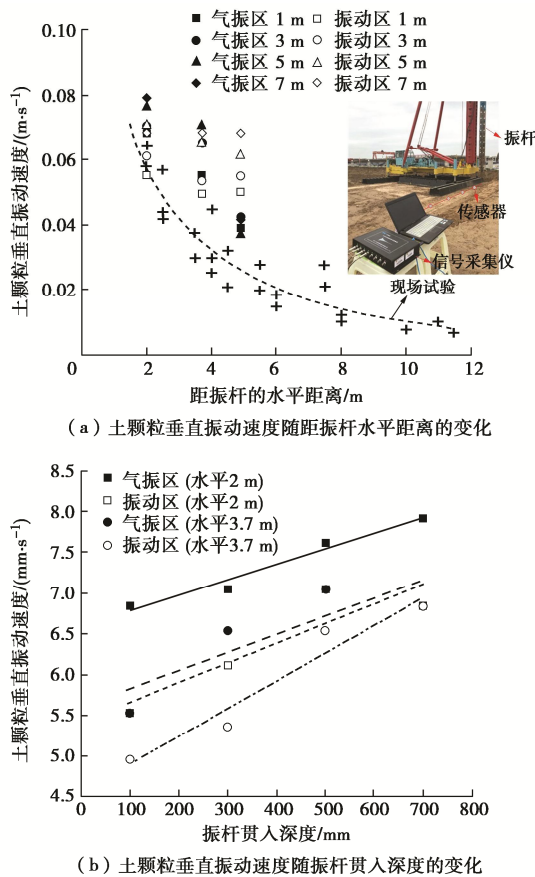


图13 振杆贯入过程中土颗粒垂直振动速度变化规律

Fig. 13 Variation of vibration velocity of soil particles during probe penetration

### 3.5 土体中气压值变化分析

根据3.2节的研究结果,气体射流可能在土体内发生渗流,图14所示各压力变送器测得的实时气体压力变化验证了该结论。其中埋深100 mm处的两个传感器AS3和AS4可能受振动影响偏离位置而未采集到有效数据。观察图14,测点AS1和AS2的气压值随时间变化趋势相同,在喷嘴到达与测点同一深度前

5 s左右监测到有效气压值,并在此后逐渐增大,在达到最大值后又缓慢降低直至为零。根据图14绘制气体压力在土体内分布云图,如图15所示。气体射流在土体内大致以半梭形渗流,气压值沿喷嘴轴向距离不断衰减,且衰减速率较快。在距1#振点水平距离20 mm的测点AS1实测最大气压值为183 Pa,距离30 mm的测点AS2的最大气压值仅为75 Pa,降幅约60%。

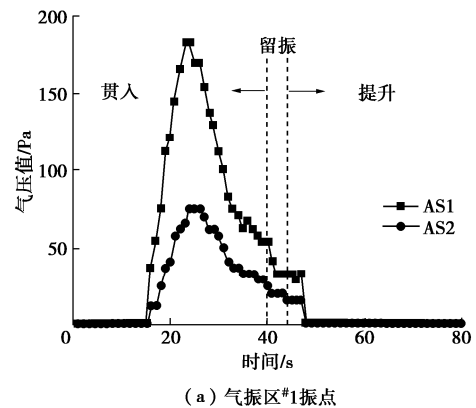


图14 #1振点试验时振杆周围土层气压值监测情况

Fig. 14 Air pressure distribution of surrounding soil layer during vibration of point No. 1

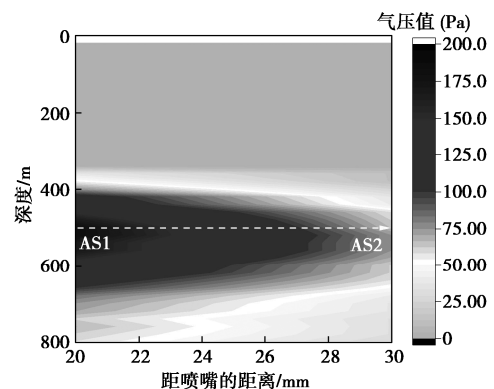


图15 #1振点试验过程中周围土层气压分布云图

Fig. 15 Cloud diagram of air pressure distribution of surrounding soil layer during vibration of point No. 1

基于上述试验结果,总结气体射流对土体的作用过程和机理如下:宏观上,气体射流对土体具有循环剪切作用,能够使喷嘴处土体发生剪切破坏;当其射流能量衰减至不足以对土体结构产生破坏时,土体处于峰前应力爬升累积损伤变形阶段<sup>[25]</sup>,该阶段土颗粒在循环剪切作用和上覆压力(挤压剪切作用)下发生剪切错动、相互填充和楔紧,土体结构逐渐趋于密实;细观上,气体射流在与土体内压力差的作用下向土体内发生渗流并对优势通道进行扩展,扩展过程中对土体产生了挤压效果。总体上,气体射流在水平方向上经历了从剪切破坏土体结构到压剪密实土体,再到沿优势通道扩展方向压力逐渐衰减为零的过程。



#### 4 气动振杆密实法加固湿陷性黄土的机理探讨

单一激振力条件下的振杆密实法加固机理可根据振动能量传递及其引起的土颗粒振动进行解释：振动锤驱动振杆产生振动能量，除热能、声能等外，其它部分能量转化为质点的振动能，并以剪切波、压缩波和瑞利波的形式传递至地基土，引起土颗粒的受迫振动；当土颗粒振动具有的惯性力能够克服与周围其它土颗粒间的黏聚力作用时，它可以偏离原来的位置并进行重新排列，并在向低势能位置转移过程中使土体结构逐渐趋于密实。增设气体射流后放大了振杆密实法引起的土体振动响应，意味着土颗粒振动强度增大，惯性力得到提高，使其更容易克服周围其它土颗粒的黏聚力作用而发生剪切错动。因此，增设气体射流有利于促进土颗粒重新排列，加快土体结构重组和致密化。

Massarsch<sup>[3]</sup>在研究振杆密实法处理砂性土地基时曾根据土颗粒振动速度的大小将振杆附近的影响区域由近及远划分为塑性区、弹塑性区和弹性区 3 个区域：塑性区内土颗粒振动速度处于一个较高水平，土颗粒发生明显错动，土体发生永久变形；弹塑性区内土颗粒振动速度具有明显衰减趋势，部分土体发生永久变形；弹性区内土颗粒虽仍受到振动影响，但其振动强度已衰减至不足以产生塑性变形，在振动消失后土体的变形会恢复到初始状态。

根据 Wood 等<sup>[26]</sup>的研究，地面峰值振动速度幅值衰减需要考虑几何传播和土体阻尼影响，其振幅衰减关系为

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^n \cdot \exp[-\alpha \cdot (r_2 - r_1)] \quad (1)$$

式中： $\omega_2$ ， $\omega_1$  分别为距振源距离为  $r_2$ ， $r_1$  的未知振幅和已知振幅； $n$  为几何阻尼系数，可根据 Gutowski 等<sup>[27]</sup>的相关研究确定，本文取值 0.5； $\alpha$  为与场地条件有关的经验衰减系数，需根据现场实测数据来确定。

根据式 (1) 对气动振杆密实法现场施工过程中产生的地面峰值垂直振动速度数据进行拟合。已知距振源  $r_1=2$  m 处的振幅为 0.057721 m/s，建立地面峰值垂直振动速度与距振杆水平距离的预测公式 (2)，其拟合度为 0.90。

$$v_1 = 0.057721 \left( \frac{2}{r} \right)^{0.5} \cdot \exp[-0.11373 \cdot (r - 2)] \quad (2)$$

式中： $v_1$  为气振协同条件下产生的地面峰值垂直振动速度 (m/s)； $r$  为距振源的距离 (m)。

对于单一激振力条件下的振杆密实法施工引起的

地面峰值振动速度衰减规律，可结合模型试验数据 (图 13) 获得：

$$v_2 = 0.047908 \left( \frac{2}{r} \right)^{0.5} \cdot \exp[-0.11373 \cdot (r - 2)] \quad (3)$$

式中： $v_2$  为单一激振力条件下产生的地面峰值垂直振动速度 (m/s)； $r$  为距振源的距离 (m)。

根据上述计算结果，绘制气振协同、单一激振力条件下的土颗粒垂直振动速度与距振杆水平距离的关系，如图 16 所示。从图中可以看出，土颗粒垂直振动速度随距振杆水平距离增加先急剧减小后缓慢减小并趋于零；振动速度明显衰减阶段，也即土体弹塑性区范围，大致位于距振杆水平距离 0~2 m 范围内；另外，较单一激振力条件，气振协同条件下产生的弹塑性区范围更广，因此能够产生更大的加固范围。

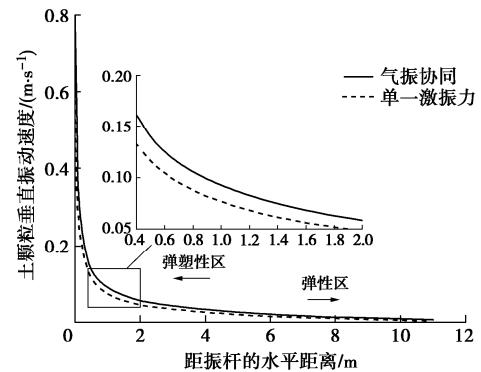


图 16 振杆到周围土层的振动衰减及影响范围划分

Fig. 16 Vibration attenuation and division of influence range from vibratory probe to surrounding soil

#### 5 结 论

采用自行研制的气动振杆密实模型装置，进行了单一激振力和气振协同两种条件下的振杆密实法加固湿陷性黄土对比试验，得到以下 5 点结论。

(1) 振杆密实法处理后各深度土层的密度均显著提高，湿陷系数降低；增设气体射流后进一步提高了 100 mm 深度以下土层的密度，但气体射流在土体内优势通道渗流过程中会引起浅层土松动而弱化其强度。

(2) 振杆贯入是加固湿陷性黄土的主要阶段，具体表现为水平向土压力大幅增加，土体产生明显的垂直振动响应；增设气体射流后进一步增加了水平向土压力，最大提高 20.4%；单一激振力条件下的土颗粒垂直振动速度约为气振协同条件下的 83%。

(3) 气体射流对土体具有宏观循环剪切作用和微观渗流作用，其在水平方向上经历了从剪切破坏土体结构到压剪密实土体，再到沿优势通道扩展方向压力逐渐衰减为零的过程。



(4) 初步探讨了气动振杆密实法加固湿陷性黄土的机理: 激振力驱动振杆产生振动能并引起土颗粒受迫振动, 当振动土颗粒的惯性力大于与其周围土颗粒间的黏聚力时, 土颗粒发生重新排列并向低势能位置转移, 土体结构逐渐趋于密实; 增设气体射流后放大了振杆密实法引起的土体振动响应, 加快了土颗粒排列并促进土体结构重组和致密化。

(5) 基于地面峰值垂直振动速度衰减规律, 得到振杆密实法产生的土体弹塑性区大致位于振杆附近0~2 m范围内, 气振协同条件较单一激振力条件能产生更大的加固范围。

#### 参考文献:

- [1] MASSARSCH K R, WERSÄLL C, FELLENIUS B H. Liquefaction induced by deep vertical vibratory compaction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2021, **174**(3): 194-205.
- [2] ANDERSON R D. New method for deep sand vibratory compaction[J]. Journal of the Construction Division, 1974, **100**(1): 79-95.
- [3] MASSARSCH K R. Effects of vibratory compaction[C]// TransVib 2002-International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction. Louvain-la-Neuve. Keynote Lecture, 2002: 33-42.
- [4] MASSARSCH K R, FELLENIUS B H. Vibratory compaction of coarse-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 695-709.
- [5] MASSARSCH K R, WERSÄLL C, FELLENIUS B H. Horizontal stress increase induced by deep vibratory compaction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2020, **173**(3): 228-253.
- [6] SAITO A. Characteristics of penetration resistance of A reclaimed sandy deposit and their change through vibratory compaction[J]. Soils and Foundations, 1977, **17**(4): 31-43.
- [7] MASSARSCH K R, BROMS B B. Soil compaction by vibro wing method[C]//Proceedings of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 1983: 275-278.
- [8] VAN IMPE W F, HAEGEMAN W, MEMGE P, et al. Dynamic soil improvement methods[C]// Proceedings of Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering, Rotterdam, 1993: 81.
- [9] VAN IMPE W F, De C F, MENGE P. Recent experiences and developments of the resonant vibrocompaction technique[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam, 1994.
- [10] 刘松玉, 杜广印, 苗永红. 十字形振动翼: CN101024952A[P]. 2007-08-29. (LIU Songyu, DU Guangyin, MIAO Yonghong. Cross-shaped Vibration Wing: CN101024952A[P]. 2007-08-29. (in Chinese))
- [11] 刘松玉, 程 远. 共振法加固公路可液化地基试验[J]. 中国公路学报, 2012, **25**(6): 24-29. (LIU Songyu, CHENG Yuan. Resonance compaction method for highway ground improvement at liquefaction site[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, **25**(6): 24-29. (in Chinese))
- [12] DU G Y, GAO C H, LIU S Y, et al. Evaluation method for the liquefaction potential using the standard penetration test value based on the CPTU soil behavior type index[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, **2019**: 1-8.
- [13] 杜广印, 刘松玉, 任蓓蓓, 等. 十字形振动翼共振法在处理可液化地基中的应用[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(增刊): 466-469. (DU Guangyin, LIU Songyu, REN Bei-bei, et al. Application of treatment on liquefied foundation using resonance compaction method[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(S0): 466-469. (in Chinese))
- [14] 谢 玲, 杜广印, 缪冬冬, 等. 十字振动翼共振法处理滨海相可液化地基的效果评价[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(增刊): 695-698. (XIE Ling, DU Guangyin, MIU Dongdong, et al. Effect evaluation of treatment on coastal liquefiable ground using resonant compaction method[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(S0): 695-698. (in Chinese))
- [15] 刘松玉, 杜广印, 章定文, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土地基的方法, 201910482316.1[P], 2020-12-27. (LIU Songyu, DU Guangyin, ZHANG Dingwen, et al. Method for Treating Collapsible Loess Foundation by Vibratory Probe Compaction Method, 201910482316.1[P], 2020-12-27. (in Chinese))
- [16] 刘松玉, 杜广印, 毛忠良, 等. 振杆密实法处理湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1377-1383. (LIU Songyu, DU Guangyin, MAO Zhongliang, et al. Field tests on improvement of collapsible loess by vibratory probe compaction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1377-1383. (in Chinese))
- [17] GAO C H, DU G Y, LIU S Y, et al. Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method[J]. Engineering Geology, 2020, **274**:

- 105715.
- [18] GAO C H, DU G Y, LIU S Y, et al. The microscopic mechanisms of treating collapsible loess with vibratory probe compaction method[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, **27**: 100492.
- [19] 张延杰, 王 旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(增刊 2): 4019-4024. (ZHANG Yanjie, WANG Xu, LIANG Qingguo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S2): 4019-4024. (in Chinese))
- [20] 柴少峰, 王 平, 郭海涛, 等. 大型振动台试验土质边坡模型材料相似性及评价[J]. *地震工程学报*, 2019, **41**(5): 1308-1315. (CHAI Shaofeng, WANG Ping, GUO Haitao, et al. Model material similarity and associated evaluation for soil slopes in a large-scale shaking table test[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, **41**(5): 1308-1315. (in Chinese))
- [21] 水谷裕. 钢管桩振动下沉计算[M]. 东京: 日本建设机械调查株式会社, 1966. (MIZUTANI Y. Calculation of Vibration Subsidence of Steel Pipe Pile[M]. Tokyo: Hitachi Construction Machinery Co., Ltd., 1966. (in Chinese))
- [22] 章定文, 刘松玉, 顾沉颖, 等. 土体气压劈裂的室内模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(12): 1925-1929. (ZHANG Dingwen, LIU Songyu, GU Chenying, et al. Model tests on pneumatic fracturing in soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(12): 1925-1929. (in Chinese))
- [23] MURDOCH L C, SLACK W W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(6): 479-487.
- [24] ATHINA G, ADDA A, RICHARD D W. Ground vibration measurements near impact pile driving[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 04016035.
- [25] 邵 帅, 邵生俊, 陈 攀, 等. 循环扭剪作用下黄土的动剪切特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(1): 168-174. (SHAO Shuai, SHAO Shengjun, CHEN Pan, et al. Experimental study on dynamic shear characteristics of loess under cyclic torsional shearing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(1): 168-174. (in Chinese))
- [26] WOODS R D, JEDELE L P. Energy-attenuation relationships from construction vibrations[C]// *Proc Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Engineering*. Detroit, 1985.
- [27] GUTOWSKI T G, DYM C L. Propagation of ground vibration: a review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, **49**(2): 179-193.

## 2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术研讨会征文通知（一号通知）

第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会以“长大隧道工程挑战与技术创新”为主题, 将于 2024 年 8 月在新疆乌鲁木齐举行, 会议将围绕水利、交通、矿山、市政等行业的热点问题进行交流, 旨在继续为海峡两岸隧道与地下工程领域的学者和工程师搭建一个高品质的学术交流平台, 推动隧道与地下工程领域重要问题进行深入研究, 分享最新的观点和最前沿的研究成果, 欢迎各界同仁积极投稿。

### 一、会议时间、地点

时间: 2024 年 8 月, 地点: 新疆乌鲁木齐。

### 二、会议主题

长大隧道工程挑战与技术创新

### 三、会议内容

①长大隧道掘进机施工信息化与智能化技术; ②隧道岩爆、大变形与突水突泥等重大地质灾害防控技术; ③强震区隧道工程抗减震技术; ④超长跨海隧道建设与数字化管养关键技术; ⑤城市更新与地下空间开发利用; ⑥国内外典型地下工程案例。

### 四、组织机构

主办单位: 中国岩石力学与工程学会地下工程分会, 中国土木工程学会隧道及地下工程分会; 台湾隧道协会。

### 五、会议征文

①应征论文须是原创的、尚未公开发表的论文, 中英文均可, 请作者分别参照《岩土力学》和《隧道与地下工程灾害防治》论文的格式撰写投稿。②拟投稿论文请以“题目-单位-姓名”为主题投稿至《岩土力学》或《隧道与地下工程灾害防治》编辑部, 并标注“2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会投稿”。③投稿截止日期: 2024 年 2 月 29 日。

### 六、联系方式

袁敬强 13871173207, 杨云 13545026200。邮箱: dxgcfh2023@163.com。《岩土力学》投稿网址: <http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/1000-7598/home.shtml>。《隧道与地下工程灾害防治》投稿网址: <http://tunnel.sdujournals.com/CN/column/column2.shtml>。

(中国岩石力学与工程学会地下工程分会 供稿)