研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

引用格式:莫朝栋, 杜娟, 雷枭鹏, 等. 海岛有机质浸染砂液化特性振动台试验研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 87−97.

Citation: MO Chaodong, DU Juan, LEI Xiaopeng, et al. Shaking-table tests on the liquefaction characteristics of organic matter-disseminated sand in island areas[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 87−97.

Open Access

海岛有机质浸染砂液化特性振动台试验研究

莫朝栋, 杜　娟✉, 雷枭鹏, 张一航
(海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘　要: 针对海岛区域性砂土, 开展不同砂样、不同峰值加速度条件下的自由场地振动台试验, 结合试验现象与响应数据阐述砂土液化特性, 并对其影响因素进行分析。结果表明: 2 种砂土地基均发生变形沉降, 伴有喷砂冒水等液化现象; 超静孔压比与加速度呈现正相关性, 随着埋深的增加, 液化风险降低; 有机质浸染砂超静孔隙水压力消散速率慢且有残存, 标准砂超静孔隙水压力消散速度快且彻底; 加速度放大系数呈现高程放大效应, 加速度放大系数随加速度增加而增大; 循环剪应力随加速度的增加而上升, 有机质浸染砂显示出在相同条件下更高的液化风险; 显著性分析表明峰值加速度对砂土液化的影响高于埋深。

关键词: 振动台试验; 有机质浸染砂; 砂土液化
中图分类号: TU472　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0087-11
DOI: 10.65658/j.hndk.2025011304　　CSTR: 32403.14.hndk.2025011304

Shaking-table tests on the liquefaction characteristics of organic matter-disseminated sand in island areas

MO Chaodong, DU Juan✉, LEI Xiaopeng, ZHANG Yihang
(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Hainan Haikou 570228, China)

Abstract: Sand soli liquefaction can significantly reduce the bearing capacity of foundations, posing risks to the structural integrity of buildings and infrastructure. In this study, free-field shaking table tests were conducted to evaluate the liquefaction behavior of regional sandy soils from island environments under various sand types and acceleration conditions. The liquefaction characteristics of the sandy soil were analyzed by integrating macroscopic phenomena, pore pressure measurements, and acceleration data obtained from the tests. The results indicate that under seismic excitation, both types of sandy soil foundations experience deformation and settlement while exhibiting liquefaction phenomena such as flow failure, sand spouting, and water gushing. The ratio of excess pore pressure is positively correlated with peak loading values, while liquefaction susceptibility decreases with greater burial depth. Notably, organic matter-disseminated sand demonstrates slower excess pore pressure dissipation and persistent residual pressures, whereas standard sand exhibits rapid and complete dissipation. Acceleration measurements reveal a bottom-to-top amplification effect within soil layers. The amplification coefficient for acceleration increases alongside higher peak loading values, demonstrating a more pronounced amplification effect in shallower soil layers. Additionally, the cyclic

Received: 2025−01−13; **Revised:** 2025−03−14; **Accepted:** 2025−03−15; **Available online:** 2025−05−16
✉ **Corresponding author(s):** DU Juan, E-mail: dujuan2012@hainanu.edu.cn

stress ratio (CSR) rises with increased loading intensity, and organic matter-disseminated sand presents a heightened risk of liquefaction under identical conditions. Significance analysis underscores that peak ground acceleration magnitude exerts a greater influence on liquefaction potential than burial depth.

Keywords: shaking-table test; organic matter-disseminated sand; liquefaction of sandy soil

0 引 言

砂土液化常使地基承载力降低,引发坡体侧滑、管涌变形和建筑物变形等灾害,是工程领域长期关注的研究热点。例如在1964年日本新潟地震中,川岸町公寓楼因砂土液化下沉倾斜;1993年日本关岛地震液化侧移在军事基地形成大裂缝,导致约半数房屋倒塌;1995年日本阪神大地震致人工岛码头水平与垂向变形;2011年东日本大地震茨城县利根川沿岸住宅区因液化沉降约1 m;2018年印尼帕卢地震触发大规模流滑;2020年伽师地震致房屋道路液化损毁[1];2021年青海玛多地震野马滩大桥因地基沉陷落梁[2];2023年土耳其地震液化致地面大幅侧移[3]。这些灾害影响范围广泛且持续时间长,严重危及人们的生命及财产安全[4−5]。

鉴于砂土液化在多次地震中造成的严重后果,研究不同区域砂土液化特性至关重要。振动台模型试验是研究场地液化的重要手段,能够精确模拟地震下土体的动应力−应变条件。目前对场地液化的研究主要是以钙质砂、海沙和具有一定黏粒的砂土及粉土为研究对象[6−8]。左康乐等[9]探究了不同细粒含量的砂土液化特性,为含细颗粒砂土液化判别提供新思路。李涛等[10]探讨了细颗粒形状对混合砂性能的影响。王晓磊等[11]研究了地震历史对不同深度土体液化特性的影响,发现强震历史使浅层土体易液化。不同地区砂土的颗粒尺寸和级配特征等存在显著差异,这直接影响其液化特性。海南岛北部及雷州半岛所在的雷琼断陷区,火山和地震活动剧烈而频繁,该地区广泛分布有机质浸染砂[12]。胡勇士等[13]研究了该砂土有机质存在形式及其特殊结构。Du等[14−15]揭示了其动应力、动弹性模量以及阻尼比的变化规律,发现了最优固化材料及水泥土的配合比。目前,针对饱和有机质浸染砂的振动台模型试验研究鲜有报道。随着海南自贸港的建设推进,有机质浸染砂作为海岛海湾地区广泛存在的地基材料,该砂土液化问题成因复杂,地震发生时可能严重威胁生命财产安全并阻碍区域经济发展。

本文以有机质浸染砂与标准砂为研究材料,利用振动台开展模型试验,研究加载正弦波时不同峰值加速度、不同埋深下地基动力响应,根据各组试验的宏观现象、动孔压发展趋势、加速度响应规律等分析不同工况下土体液化前后的动力响应状态。探究有机质浸染砂的液化特性,以期为海岛有机质浸染砂场地液化治理提供合理的理论和数据依据。

1 试验方案

1.1 振动台与波形选择 试验场地设在海南大学振动台实验室,试验系统由GF−500W功率放大器、WS−5921/U60212−DA1数采控制仪、ICP加速度计放大器、WS−2401电荷放大器、JZ−50激振器等动力加载设备,振动台面(38.0 cm×51.6 cm)和Vib' SQK振动台控制软件组成。

正弦波因其波形规律、峰值稳定且频率单一的特性,从而保证试验的可重复性与参数一致性。此外,正弦波的能量较大可激发土体达到临界应变状态,提升液化发展过程的宏观辨识度。因此,选择系统内的正弦波为解析砂土液化的动力加载条件。

1.2 模型相似关系设计 在砂土液化的振动台试验中,受限于振动台设备的尺寸与荷载承载能力,试验需采用缩尺模型进行。为确保模型试验能够有效反映原型场地的实际液化行为,需严格遵循物理相似性原则。根据文献[16−17]的研究方法,采用基于Buckingham π相似理论的缩尺设计方法,确定比例系数C_L=1∶30,能够有效模拟土体的动力响应特性。

1.3 模型设计与材料选择 试验采用自行研制的刚性模型箱。该模型箱由木板和有机玻璃制作而成,壁厚为9 mm,尺寸为250 mm×250 mm×360 mm。为减小边界效应,在模型箱振动方向两侧箱壁粘贴1 cm

厚的橡胶模，并在底部粘贴土工布。地基模型材料土分别采用有机质浸染砂和福建标准砂。有机质浸染砂取自海南省文昌市龙楼镇清澜湾某国家级重点工程建设项目建设工地，采用薄壁取土器取土样，取土深度在地下 2 ~ 5 m 范围内，该砂呈灰黑色，有特殊气味，有机质含量为 5.32 %。2 种砂土的颗粒级配曲线如图 1 所示。

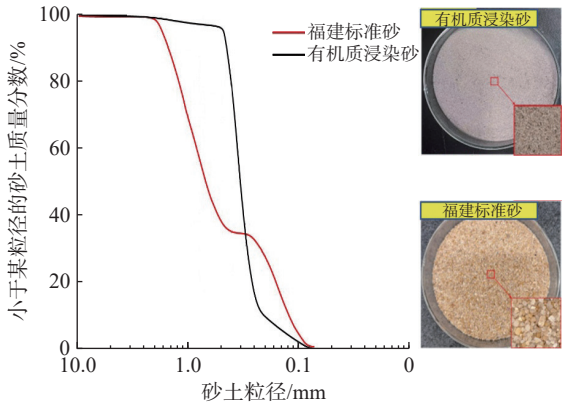


图 1　颗粒级配图

1.4　数字采集系统及传感器布置　振动前先用白噪声扫频，可得到体系的固有频率，依次施加 0.1g、0.2g、0.3g 和 0.4g 的正弦波峰值加速度（g=9.8 m·s^{-1}），相邻加载阶段设置 60 min 静置间隔以消除残余孔压影响，试验工况如表 1 所示。将传感器校准之后，对加速度计做防水涂层，孔压计捆绑成圈，以便插入饱和土层，传感器的布控如图 2 所示。数据信号采集使用 IMC 动态信号测试分析系统和东华动态信号测试分析系统，选用 DSP−I−3BS 微型分体式孔压计、YD81D−V 压电加速度传感器[18−19]。

表 1　试验分组

试样	加速度/(m·s^{-1})	波形	振动频率/Hz
有机质浸染砂	0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g	正弦波	5.47
福建标准砂	0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g		

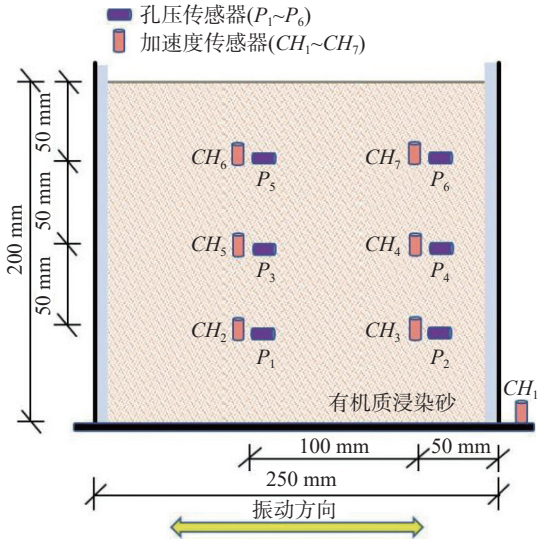


图 2　传感器布置图

2　试验结果与数据分析

2.1　宏观现象　试验过程清晰显示不同加速度下 2 种砂样地基宏观现象，如图 3 所示。振后地基均出现喷沙冒水的现象，有机质浸染砂沉降较大，水中有颗粒悬浮；标准砂沉降较小，水质较为澄清。随加速度增强，加剧砂土结构破坏，孔隙水被挤压，地基变形更加剧烈甚至出现沉陷等现象。

2.2　模型箱性能　边界效应验证方案与超静孔隙水压力 u 响应结果如图 4 所示。图 4a 为验证边界效应影响范围的孔压计水平布置方案，测点 A_1 ~ A_3 在 10 cm 埋深沿水平方向分别布置。图 4b 表示埋深 10 cm 位置沿振动方向布置的 3 个孔压计的振动响应情况，中心测点 A_2 的 u 发展趋势与两侧 A_1、A_3 测点的 u 变化情况接近一致，表明设计的模型箱有效减少了边界效应对试验结果的影响。发展趋势与两侧 A_1、A_3 测点变化情况接近一致，表明设计的模型箱有效减少了边界效应对试验结果的影响。

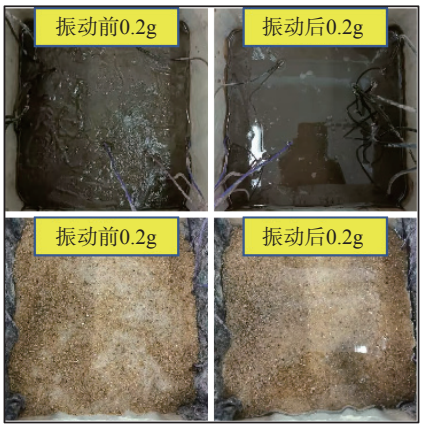
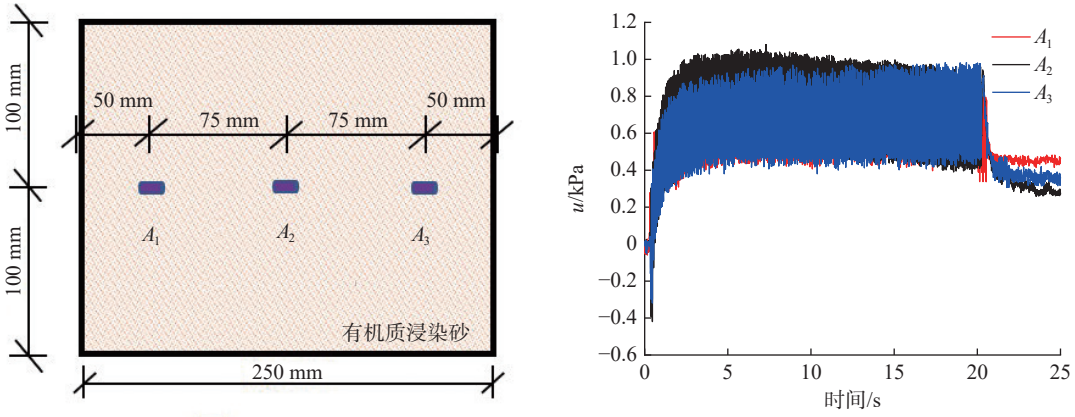


图3 振动前后的土体表面宏观现象



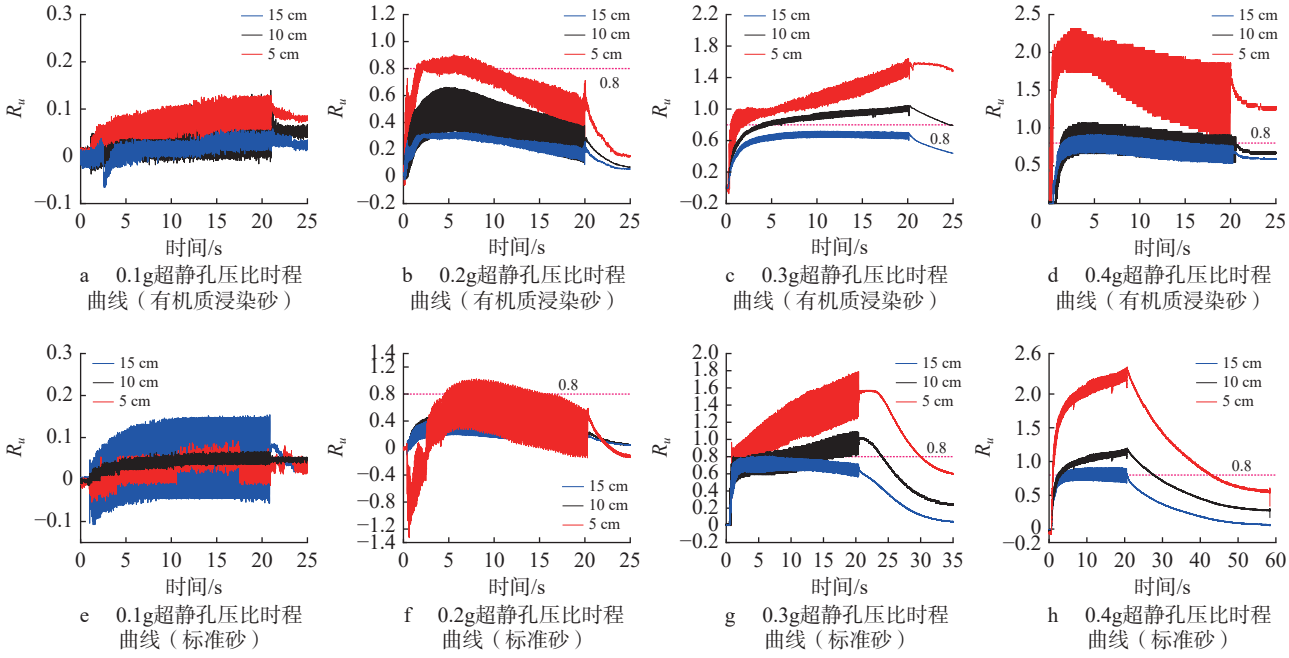
a 边界效应测试点水平布置图　　b 超静孔隙水压力时程曲线

图4 边界效应验证方案与超静孔隙水压力响应

2.3 超静孔压比发展规律 研究表明,当u和土体初始竖向有效应力σ'相等时,即超静孔隙水压力等于总应力时发生液化,但研究发现,当超静孔压比R_u>0.8时就出现了明显的循环流动性和大应变,于是选取R_u=0.8作为液化指标[20−21]。具体表达式如下:

$$R_u = \frac{u}{\sigma'} \tag{1}$$

有机质浸染砂和标准砂在不同工况下的R_u时程曲线,如图5所示。从图5可以看出,不同加速度下,有机质浸染砂在不同埋深处的R_u变化情况存在明显的差异。在加速度0.1g的正弦波激振作用下,各埋深的R_u发展趋势平稳,但有上升的趋势。有机质浸染砂在加速度0.2g的正弦波振动下,土体5 cm埋深处的R_u在振动1.5 s内迅速超过0.8,10 cm埋深处的R_u在5 s左右达到了0.66,未达到液化临界值。表示浅层地基已经发生液化,深层尚未液化。如图5c所示,当加速度增加到0.3g时,有机质浸染砂5 cm埋深处的R_u在振动0.5 s后大于0.8,15 cm埋深处的R_u在3.7 s后大于0.72,各埋深处的R_u均达到或接近R_u=0.8,浅层R_u的增长速率远大于深层R_u的增长速率,说明此时地基液化程度加剧,各埋深土层均发生了液化。在加速度0.4g的正弦波振动下,有机质浸染砂5 cm埋深处的R_u在振动0.5 s后超过2.0且土层15 cm深处的R_u也在2 s内达到0.8,此时土体液化现象显著恶化,观察到此时喷砂冒水现象明显,存在大量浑浊液体。对比2种砂样,在正弦波影响下,有机质浸染砂和标准砂地基模型的液化发展趋势与加速度呈现正相关,由浅层向深层蔓延,浅层的R_u发展迅速,尤其是在土体5 cm埋深处,表明浅层土体更容易发生液化。其原因是正弦波的放大效应使传递至浅层的能量较大,浅层与土表面紧密接触,孔隙水排出的路径更短,排水速度快。标准砂的液化呈现持续发展的趋势,有机质浸染砂的R_u达到峰值后开始下降,这表明标准砂的孔隙水易排出,从而延长液化持续时间。

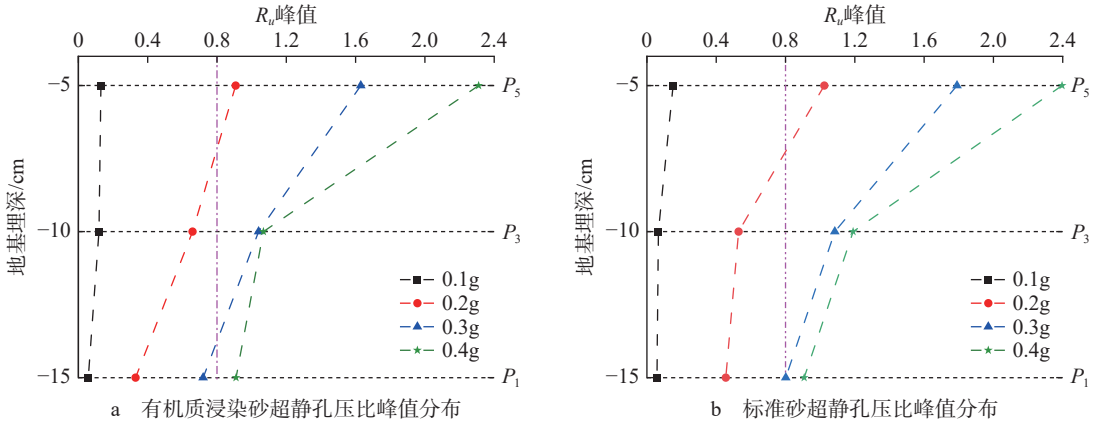


a 0.1g超静孔压比时程曲线（有机质浸染砂） b 0.2g超静孔压比时程曲线（有机质浸染砂） c 0.3g超静孔压比时程曲线（有机质浸染砂） d 0.4g超静孔压比时程曲线（有机质浸染砂）

e 0.1g超静孔压比时程曲线（标准砂） f 0.2g超静孔压比时程曲线（标准砂） g 0.3g超静孔压比时程曲线（标准砂） h 0.4g超静孔压比时程曲线（标准砂）

图 5 不同加速度条件下有机质浸染砂和标准砂场地超静孔压比时程曲线

不同工况下有机质浸染砂和标准砂的 R_u 峰值分布，如图 6 所示。R_u 峰值分布展示整个振动过程中，土体中 R_u 的最大值随空间位置的变化，有助于识别土体中最可能液化的区域。有机质浸染砂在加速度 0.2g 的正弦波下，在土体 15、10 和 5 cm 埋深处的 R_u 峰值分别为 0.33、0.66 和 0.91；在加速度 0.4g 的正弦波激振时，土体 15、10 和 5 cm 埋深处的 R_u 峰值为 0.91、1.07、2.31，R_u 峰值随埋深的减少而增加，且在较高加速度（0.4g）下，R_u 峰值的增长速率更为显著，说明地基模型浅层易液化，随着埋深增加，液化趋势减小。标准砂的 R_u 峰值发展规律相似，但其增长趋势更加显著，尤其在输入加速度 0.2g 的正弦波时较为明显。有机质浸染砂的 R_u 的增长速率大于标准砂的 R_u 的增长速率，在加载后期增长速率明显减缓，最终有机质浸染砂的 R_u 稳定值低于标准砂的 R_u 稳定值，这也反映了标准砂具有较好的排水能力，有利于土体内部超静孔隙水压力消散。



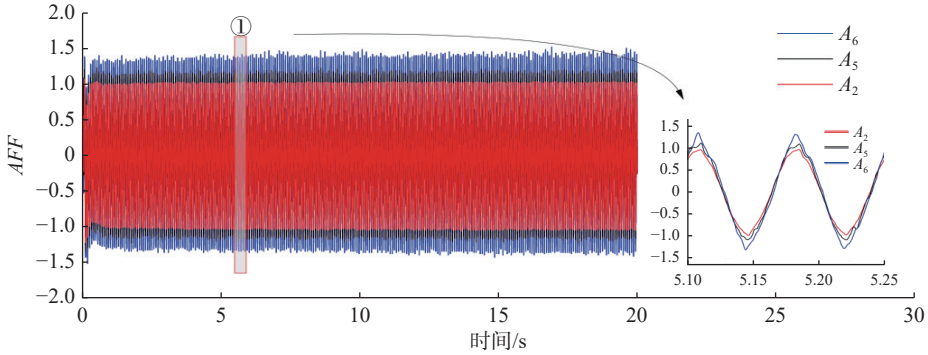
a 有机质浸染砂超静孔压比峰值分布 b 标准砂超静孔压比峰值分布

图 6 不同加速度条件下有机质浸染砂和标准砂场地超静孔压比峰值分布

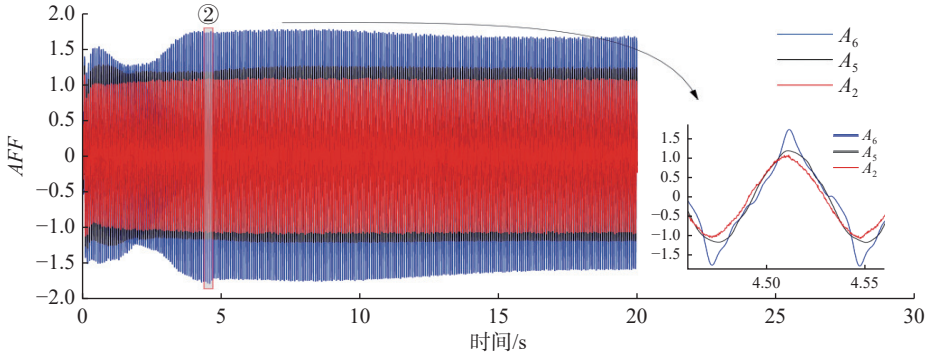
2.4 加速度响应分析 加速度放大系数（acceleration amplification factor, AAF）定义为测点实测的加速度响应峰值与台面加速度峰值之比[22]，用来描述地基内部不同位置的加速度响应相对于地面加速度的放大倍数。

有机质浸染砂在不同工况下的加速度放大系数时程曲线，如图 7 所示。图 7 中的 A_2、A_5 和 A_6 表示在土体 15、10 和 5 cm 埋深处模型箱中心测点的加速度传感器。可知，各测点 *AAF* 自下而上存在放大趋

势,*AAF* 随着埋深的减小而逐渐增大,这是由于液化导致土体的剪切模量和阻尼比变化,能量耗散机制发生改变,进而影响加速度的放大效果。



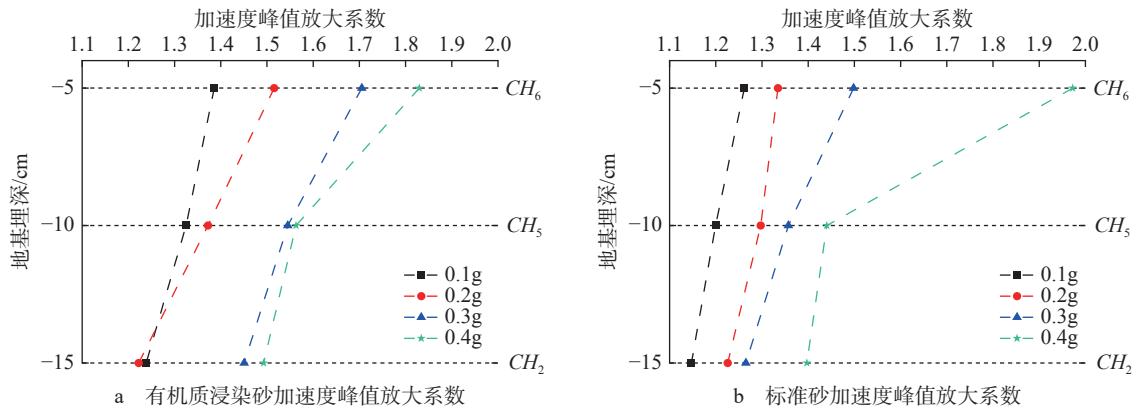
a 0.2g时有机质浸染砂场地加速度放大系数时程曲线



b 0.4g时有机质浸染砂场地加速度放大系数时程曲线

图 7 不同加速度下有机质浸染砂场地竖直方向上加速度放大系数时程曲线

加速度峰值放大系数是土体响应最大加速度与输入加速度之比,可直观表示地震作用下的动力响应特性[21]。不同工况下有机质浸染砂与标准砂场地加速度峰值放大系数分布,如图 8 示。有机质浸染砂的加速度峰值放大系数自下而上增大,表明在土体内正弦波向上传播的过程存在明显放大趋势。当输入振动加速度为 0.1g 和 0.2g 时,加速度峰值放大系数的数据点呈线性分布特征;在输入加速度为 0.3g 和 0.4g 时,加速度峰值放大系数相邻数据点之间线段斜率减小,表明加速度峰值放大系数呈非线性响应,其放大程度随加速度增大而加剧,如图 8a 中 0.4g 所示,在 5 cm 埋深处的加速度峰值放大系数比 15 cm 埋深处的加速度峰值放大系数约大 1.3 倍,表示土体刚度衰减沿竖直方向存在差异。有机质浸染砂的加速度动力响应与标准砂的加速度动力响应相似,但其曲线响应幅度相对显著,液化现象相对严重。



a 有机质浸染砂加速度峰值放大系数 b 标准砂加速度峰值放大系数

图 8 不同加速度条件下有机质浸染砂和标准砂场地加速度峰值放大系数分布

2.5 循环周数 N_r 与循环剪应力比 循环剪应力比(cyclic stress ratio,CSR)在砂土液化分析中起关键作用,是判别液化标准和动态响应的重要指标,对土壤改良、地震风险评估等具有重大意义。结合试验数

据，采用文献 [23] 中针对振动台试验提出了循环应力比，

$$CSR = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \tau_m(i)}{N_0 \sigma'} \tag{2}$$

其中，$\tau_m(i)$为第i循环周数时剪应力的峰值；σ'为上覆有效应力，忽略上覆有效应力的变化，取初始上覆有效应力计算；N_0值根据超静孔压比发展情况分类确定：$R_u \geqslant 0.63$ 时，N_0取R_u峰值或R_u=1.0 时刻对应的循环周数 N_f；R_u<0.63 时，N_0取 500。

饱和砂土振动台试验中破坏循环周数和循环剪应力比之间的关系，如图 9 所示。根据图 9 中试验点的拟合线变化趋势，可以得出相应的结论，随着破坏 N_f 的增加，CSR 有变小的趋势。另外，通过对比相邻 2 种砂的拟合线，可知，有机质浸染砂的拟合线显著低于标准砂，显示出在相同条件下更高的液化风险。

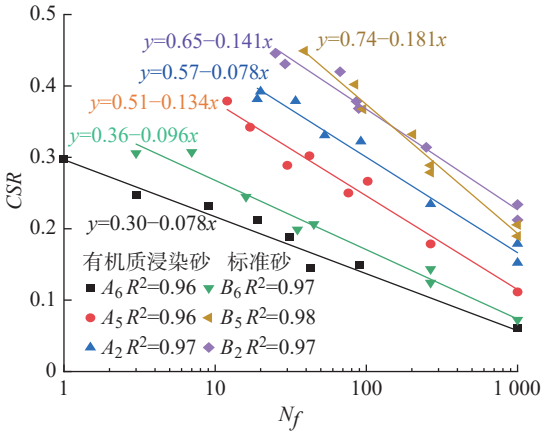


图 9　破坏循环周数和循环剪应力比关系曲线

3　参数显著性分析

R_u峰值和加速度峰值放大系数是表征砂土液化程度的关键力学指标，试验过程受振动加速度与土体埋深的相互影响。基于有机质浸染砂自由液化场地的振动台试验数据，采用双因素方差分析法，通过分离试验误差方差和试验条件（加速度和埋深）方差，并基于显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 F 检验，确定 2 类方差对总方差的贡献，据此判断加速度与埋深对液化指标的独立效应及其显著性[24]。

该砂土液化性质与加速度和埋深的关系如表 2 所示。表 3 为各显著性水平对应的检验值。表 4 为 R_u 峰值影响因素的显著性检验结果。表 5 为加速度峰值放大系数影响因素的显著性计算结果。显然，根据表 3 中给定的所有显著性水平判断，加速度和埋深对加速度峰值放大系数的影响均为显著，对 R_u 峰值影响因素的方差分析也能得到类似的结果。

表 2　加速度和埋深与 R_u 峰值和加速度峰值放大系数的试验关系

加速度/(m · s^{-2})	埋深/cm	有机质浸染砂	
		R_u峰值	加速度峰值放大系数
0.1g	5	0.130	1.385
	10	0.119	1.324
	15	0.057	1.238
0.2g	5	0.910	1.515
	10	0.660	1.372
	15	0.330	1.222
0.3g	5	1.630	1.705
	10	1.040	1.545
	15	0.720	1.450
0.4g	5	2.310	1.829
	10	1.070	1.562
	15	0.910	1.492

表3 F检验的临界值 $F_\alpha(f_1,f_2)$

显著性水平α	0.050	0.025	0.010	0.001
f_1=2,f_2=6	5.143	7.259	10.924	27.000
f_1=3,f_2=6	4.757	6.598	9.779	23.703
f_1=2,f_2=11	3.982	5.255	7.205	13.811
f_1=3,f_2=11	3.587	4.630	6.216	11.561
f_1=6,f_2=11	3.094	3.880	5.069	9.046

表4 R_u峰值影响因素的显著性检验

方差来源	自由度	平方和	均方	F值	P	η^2	显著性
加速度	3	3.056	1.019	9.959	0.009 6	0.63	Ⅰ
埋深	2	1.159	0.580	5.668	0.041 5	0.24	Ⅱ
误差	6	0.614	0.102				
总和	11	4.828					

表5 加速度峰值放大系数影响因素的显著性检验

方差来源	自由度	平方和	均方	F值	P	η^2	显著性
加速度	3	0.204	0.068	27.275	0.000 7	0.45	Ⅰ
埋深	2	0.135	0.068	27.105	0.001 0	0.27	Ⅱ
误差	6	0.015	0.003				
总和	11	0.355					

可知,当显著性水平 $\alpha>0.01$ 时,加速度对 R_u 峰值的影响较为显著;当显著性水平 $\alpha>0.025$ 时,埋深对 R_u 峰值的影响较为显著。根据统计分析结果,加速度的主效应 F 值始终大于埋深的 F 值,表明加速度对有机质浸染砂和标准砂液化指标的影响力大于埋深对有机质浸染砂和标准砂液化指标的影响力。加速度和埋深分别对 R_u 峰值和加速度峰值放大系数都存在显著影响,但加速度对砂土液化的影响比埋深对砂土液化的影响相对显著。

4 结 论

本文以海南岛区域性砂土为研究背景,通过振动台试验系统探讨了饱和砂土在不同振动强度、埋深条件及砂样类型下的液化特性,研究结论如下:

(1)在激振作用下2种砂土地基均发生变形沉降并出现流土喷沙冒水等液化现象。在较高加速度和较浅埋深条件下,液化范围和深度显著扩大。

(2)有机质浸染砂的液化风险高于标准砂的液化风险。这不仅从观察得到验证,还在 R_u 数据下进一步证实。2种砂土的 R_u 与加速度皆呈正相关,且随着埋深的增加,液化风险显著降低。有机质浸染砂的 u 消散速率较慢,且存在残余孔压,相比之下,标准砂的 u 消散则较为迅速且彻底。

(3)液化后的砂土对正弦波传播有促进作用,AAF 表现出自下而上的放大效应,AAF 随加速度的增加而增大,浅层土体的放大效果更为明显,受到的扰动更复杂。2种砂土的 CSR 都随破坏循环周数的增加有变小的趋势,有机质浸染砂的 CSR 拟合线显著低于标准砂的 CSR 拟合线,显示出在相同条件下更高的液化风险。

(4)加速度和埋深条件对砂土液化的敏感性显著,且对有机质浸染砂和标准砂的显著性顺序为:加速度>埋深。

参考文献:

[1] 张振斌,王宏伟,也尔扎提·巴合提汉. 2020年1月19日伽师 M_S6.4 地震强地面运动特征分析 [J]. 内陆地震,2023,

37(3): 281−288.

ZHANG Z B, WANG H W, BAHETIHAN Y. Analysis of strong ground motion characteristics of Jiashi M_S6.4 earthquake on January 19, 2020[J]. Inland Earthquake, 2023, 37(3): 281−288.

[2] 殷翔, 李鑫, 马震, 等. 青海玛多 M_S7.4 地震震害特点分析 [J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 868−875.

YIN X, LI X, MA Z, et al. Characteristics of seismic disasters caused by the Maduo M_S7.4 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 868−875.

[3] 陈龙伟, 刘昊儒, 任叶飞, 等. 2023 年 2 月 6 日土耳其双强震场地液化及其震害特征现场调查分析 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1541−1548.

CHEN L W, LIU H R, REN Y F, et al. In-situ investigation of site liquefaction and liquefaction-induced damages triggered by two strong Türkiye earthquakes on Feb. 6th, 2023[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1541−1548.

[4] 蔡飞. 日本地震砂土液化破坏案例及抗液化处置措施 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 12−23.

CAI F. Damage cases induced by liquefaction of sandy soils and anti-liquefaction measures in Japan[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2023, 42(1): 12−23.

[5] 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3799−3811.

YUAN X M, ZHANG W B, DUAN Z G, et al. Analysis for characteristics of seismic liquefaction in engineering sites of coralline soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3799−3811.

[6] 周正龙, 华凌霄, 徐令宇, 等. 初始剪应力作用下饱和粉土液化流动特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3295−3303.

ZHOU Z L, HUA L X, XU L Y, et al. Liquefaction flow characteristics of saturated silt under initial shear stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3295−3303.

[7] 潘坤, 李佩佩, 曹奕, 等. 初始静剪作用下含细粒砂土动力液化特性离散元分析 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47(2): 417−427.

PAN K, LI P P, CAO Y, et al. Cyclic liquefaction behavior of silty sand considering initial static shear effect: a DEM investigation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(2): 417−427.

[8] 刘茜, 郑西来, 刘红军, 等. 黄河三角洲粉土液化的试验研究 [J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 161−166.

LIU Q, ZHENG X L, LIU H J, et al. Experimental studies on liquefaction behavior of silt in the Huanghe River delta[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(2): 161−166.

[9] 左康乐, 顾晓强. 不同粒径比下含细颗粒砂土液化特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1461−1470.

ZUO K L, GU X Q. Experimental study on liquefaction characteristics of sand with fines under different particle size ratios[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1461−1470.

[10] 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.

[11] 王晓磊, 刘理腾, 刘润, 等. 地震历史对各深度土体抗液化性影响的振动台试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2657−2666.

WANG X L, LIU L T, LIU R, et al. Shaking table test study on the influence of seismic history on liquefaction resistance of soils at different depths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2657−2666.

[12] 杜娟, 刘冰洋, 郑刚, 等. 海湾相有机质浸染砂的动力特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 65–68.

DU J, LIU B Y, ZHENG G, et al. Experimental study on dynamic characteristics of bay facies organic sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 65–668.

[13] 胡勇士, 卫宏, 胡俊, 等. 海南有机质浸染砂变形特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 58−63.

HU Y S, WEI H, HU J, et al. Study on the deformation property of organic infect sand in Hainan[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 58−63.

[14] DU J, LIU B Y, WANG Z C, et al. Dynamic behavior of cement-stabilized organic-matter-disseminated sand under cyclic triaxial condition[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 147: 106777.

[15] DU J, ZHENG G, LIU B Y, et al. Triaxial behavior of cement-stabilized organic matter-disseminated sand[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(1): 211−220.

[16] 陈合毛. 液化场地刚性排水桩-土地震相互作用的振动台试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
CHEN H M. Study on seismic interaction of rigid drainage pile-soil in liquefiable site by shaking table test[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[17] 王安辉, 袁春坤, 章定文, 等. 桩筏连接形式对劲芯复合桩地震响应影响试验研究 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 24−36.
WANG A H, YUAN C K, ZHANG D W, et al. Experimental study on effect of pile-raft connection type on seismic response of piles improved with cement-treated soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 24−36.

[18] 汤兆光, 王永志, 段雪锋, 等. 分体高频响应微型孔隙水压力传感器研制与性能评价 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1210−1219.
TANG Z G, WANG Y Z, DUAN X F, et al. Development and performance evaluation of separable high-frequency response miniature pore water pressure transducer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1210−1219.

[19] 汤兆光, 王永志, 孙锐, 等. 土工离心试验微型孔压传感器标定方法与影响因素 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1238−1246.
TANG Z G, WANG Y Z, SUN R, et al. Calibration method and effect factors of miniature pore water pressure transducer for geotechnical centrifuge modelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1238−1246.

[20] KOUTSOURELAKIS S, PRÉVOST J H, DEODATIS G. Risk assessment of an interacting structure-soil system due to liquefaction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(4): 851−879.

[21] MONTOYA-NOGUERA S, LOPEZ-CABALLERO F. Effect of coupling excess pore pressure and deformation on nonlinear seismic soil response[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(1): 191−207.

[22] 解惠婷, 曹均锋, 冯伟栋, 等. 合肥城区基于抗倒塌的地表地震动峰值加速度研究 [J]. 华南地震, 2023, 43(4): 26−33.
XIE H T, CAO J F, FENG W D, et al. Study on peak acceleration of ground motion based on collapse resistance in Hefei urban area[J]. South China Journal of Seismology, 2023, 43(4): 26−33.

[23] 王炳辉, 陈国兴, 孙田, 等. 砂砾土抗液化强度的小型土箱振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2094−2100.
WANG B H, CHEN G X, SUN T, et al. Liquefaction resistance of sand-gravel soils using small soil-box shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2094−2100.

[24] 李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1173−1177.
LI S Q, GAO L X, CHAI S X. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1173−1177.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献,确保学术成果署名的规范性与公平性。各作者贡献如下:

莫朝栋负责数据分析,论文初稿撰写;杜娟提供经费支持,研究指导,监督研究过程,最终审阅;雷枭鹏负责实验操作,数据整理;张一航负责数据整理。

利益冲突

作者声明,不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025011304。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到以下基金项目支持:国家自然科学基金项目(52268056);海南省重点研发项目(ZDYF2022SHFZ277)。

This article was supported by the following funding projects: National Natural Science Foundation of China (52268056); Hainan Province Science and Technology Special Fund (ZDYF2022SHFZ277).

作者简介

莫朝栋(1998—),男,海南定安人,海南大学材料与化工专业 2022 级研究生,E-mail: 22220856000044@hainanu.edu.cn

杜　娟 (1978—),女,安徽金寨人,副教授,博士,研究方向:土动力学及地基处理,E-mail: dujuan2012@hainanu.edu.cn

(责任编辑:高　喆,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.