

不同地震波频率作用下砂土液化特性的振动台试验研究

王 彬, 褚天舒

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月8日

摘 要

为研究地震波频率对饱和砂土液化特性的影响, 进行了振动台模型试验, 对相对密实度为78%的饱和粉砂土模型加载不同频率的EI-Centro地震波, 分析不同频率条件下土体超静孔隙水压力、超静孔压比及沉降变化规律。试验结果表明: 在1 Hz和2 Hz频率条件下, 土体均发生完全液化, 其中1 Hz工况液化时间约为110 s, 2 Hz工况液化时间约为65 s, 孔隙水压力快速累积并导致有效应力消失; 当频率增大至4 Hz时, 土体仅在表层出现局部液化现象, 中下部未达到液化判据。随着振动频率增大, 砂土液化程度整体减弱, 沉降量明显减小, 液化临界加速度呈增大趋势。研究表明, 地震波频率对砂土液化发展具有显著影响, 低频振动更易引起饱和砂土发生液化, 基于试验数据拟合得到液化临界加速度与频率的二次多项式关系式, 可为场地液化评价及工程抗液化设计提供参考。

关键词

饱和砂土液化, 振动台试验, 地震波频率, 孔压比, 液化临界加速度

The Study on the Liquefaction Characteristics of Sandy Soil under Different Seismic Wave Frequencies Using Shaking Table Tests

Bin Wang, Tianshu Chu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: March 5, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 8, 2026

Abstract

To investigate the influence of seismic wave frequency on the liquefaction characteristics of saturated sandy soil, shaking table model tests were conducted using EI-Centro seismic waves with different frequencies. A saturated sandy soil model with a relative density of 78% was subjected to seismic loading, and the variations of excess pore water pressure, excess pore pressure ratio, and settlement under different frequency conditions were analyzed. The experimental results indicate that complete liquefaction occurred under frequencies of 1 Hz and 2 Hz. The liquefaction time was approximately 110 s for the 1 Hz condition and about 65 s for the 2 Hz condition, during which the excess pore water pressure rapidly accumulated and led to the loss of effective stress. When the frequency increased to 4 Hz, only partial liquefaction occurred near the surface layer, while the middle and lower layers did not reach the liquefaction criterion. With the increase of vibration frequency, the overall liquefaction intensity of sandy soil decreased, the settlement reduced significantly, and the critical liquefaction acceleration increased. The results demonstrate that seismic wave frequency has a significant influence on the development of sandy soil liquefaction, and low-frequency vibration is more likely to induce liquefaction in saturated sandy soil. A quadratic polynomial relationship between critical liquefaction acceleration and frequency was established based on experimental data, providing a reference for site liquefaction evaluation and engineering anti-liquefaction design.

Keywords

Saturated Sandy Soil Liquefaction, Shaking Table Test, Seismic Wave Frequency, Pore Pressure Ratio, Critical Liquefaction Acceleration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是一个多地震的国家, 在以往的多次强烈地震中, 由于砂土液化造成的各种损害相当严重。砂土液化是地震作用下常见的工程地质灾害, 主要表现为饱和砂土因孔隙水压力急剧上升、有效应力降低而丧失抗剪强度, 造成喷水、冒砂, 地表开裂与下沉, 使建筑物成片裂塌等灾害现象[1][2]。例如 1976 年唐山地震、2008 年汶川地震, 2023 年甘肃积石山地震在青海引发了罕见的“砂涌”泥流掩埋村庄, 以及 2023 年甘肃积石山地震在青海引发了罕见的“砂涌”泥流掩埋村庄均观测到严重的砂土液化灾害, 2024 年日本能登地震导致内滩町大量房屋倾斜等, 造成了重大的经济损失。深入研究砂土液化特性及其影响因素, 涉及多样问题的研究, 对工程抗震设计具有重要现实意义[3]。

砂土液化受多种因素影响, 主要包括土体密实度、颗粒级配、循环应力比、有效围压、固结比、初始剪应力、地震动强度、持续时间及地震波频谱特性等。目前, 国内外学者通过动三轴试验、振动台试验等手段, 对密实度, 波形, 振动频率, 颗粒级配等因素的影响规律已开展了大量研究, 赵伟等[4]提出砂土液化强度随细粒含量的增加而减少, 经过 3 次液化后仍显示出相同规律。许成顺等[5]发现循环加载频率显著影响饱和砂土的剪胀剪缩特性, 进而影响液化模式。王禹等[6]通过有限元数值模拟得出震波的维度、类型和不对称性等因素对砂土的液化有重要影响。王炳辉等[7]开展了不同相对密度和循环荷载幅值下饱和砂样的液化电测试验探讨了液化过程中饱和砂土存在孔隙结构变化的规律性, 为砂土液化过程数

值模拟获得的细观结构变化规律提供试验依据。鲁智豪等[8]提出一种基于灰狼优化算法(GWO)优化的极限学习神经网络算法(GWO-ELM), 用于砂土液化预测显著提升预测模型的综合性能。陈国兴等[9]基于数十年的研究, 提出了砂土液化不变性理论。该理论揭示了循环加载下可液化土的状态阈值不变性及控制循环行为与固-液相变的内在规律不变性, 构建了基于物理力学关联不变性的场地液化评价的普适新范式。

本文围绕不同频率对砂土液化的影响来展开, 通过地震模拟振动台试验, 对相对密实度 78% 的饱和砂土模型分别加载 1 Hz、2 Hz、4 Hz 三种不同频率的 EI-Centro 地震波, 分析不同频率下超静孔隙水压力、孔压比及土体沉降的变化规律, 探讨频率对砂土液化特性的影响机理, 以期为类似工程抗液化设计提供理论参考。

2. 砂土液化振动台模型试验

2.1. 试验土样

试验用土取自河南省孟州市西霞院灌区工程猪龙河流域。该区域地层以粉砂土为主, 是典型的易液化土层。经室内土工试验测定, 颗粒分析表明, 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重的 50%, 属粉砂土, 土样的基本物理性质指标如表 1 所示。

Table 1. Soil physic parameters

表 1. 土性物理参数

土样	天然含水率/%	天然密度/kg/m ³	饱和含水率/%	粘粒含量/%	比重
粉砂土	6.01	1.65	28.65	2.5	2.65

通过直剪试验, 本试验选取四个试样, 原状环刀试样如图 1 所示, 分别在 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 的竖向荷载作用下开展试验。剪切速率设定为 0.8 mm/min, 试验过程中记录每圈的转数及读数, 通常当变形达到 4 mm 时试验结束; 若读数呈持续增长态势, 则应剪至 6 mm。完成第一级垂直压力作用下的试验后, 改变垂直压力, 重复进行试验。最终获得土体的抗剪强度参数: 黏聚力为 0.26 kPa, 内摩擦角为 31.37°。



Figure 1. Undisturbed ring knife specimen

图 1. 原状环刀试样

2.2. 试验设备

试验在华北水利水电大学地震模拟试验室进行。采用苏轼 ES-5 振动台, 台面尺寸 1.5 m × 1.0 m, 最大载重 1500 kg, 工作频率范围 0.5~100 Hz, 最大加速度 40 m/s², 模型箱为自制刚性模型箱, 尺寸 100 cm × 50 cm × 90 cm, 如图 2 所示。模型箱内壁左右两侧粘贴 2 cm 厚泡沫板以减小高频反射波的影响, 箱体

内铺设塑料薄膜确保试验过程中水不漏出。

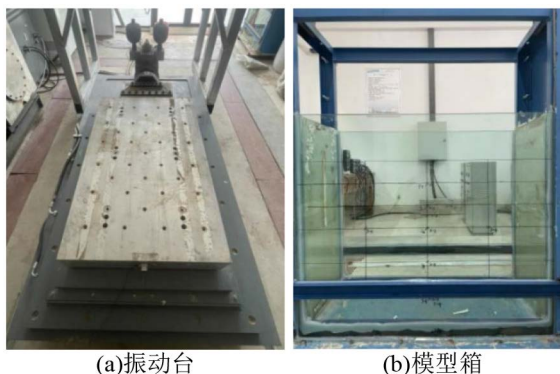


Figure 2. Shaking table and model box
图 2. 振动台与模型箱

2.3. 加载方案

为研究地震波频率的影响, 对土样加载不同频率的地震波, 分析不同埋深处的超静孔隙水压力及超静孔压比随时间变化曲线, 对 EI-Centor 地震波处理, 处理后地震波频率为 2 Hz、4 Hz, 每种频率下依次输入峰值加速度为 0.1 g、0.2 g、0.3 g、0.4 g、0.5 g、0.6 g 的 6 种工况如表 2 加载方向为水平单向。

Table 2. Test conditions
表 2. 试验工况

工况	地震波类型	加速度峰值	频率
1	EI-Centor 地震波	0.1 g~0.6 g	1
2	EI-Centor 地震波	0.1 g~0.6 g	2
3	EI-Centor 地震波	0.1 g~0.6 g	4

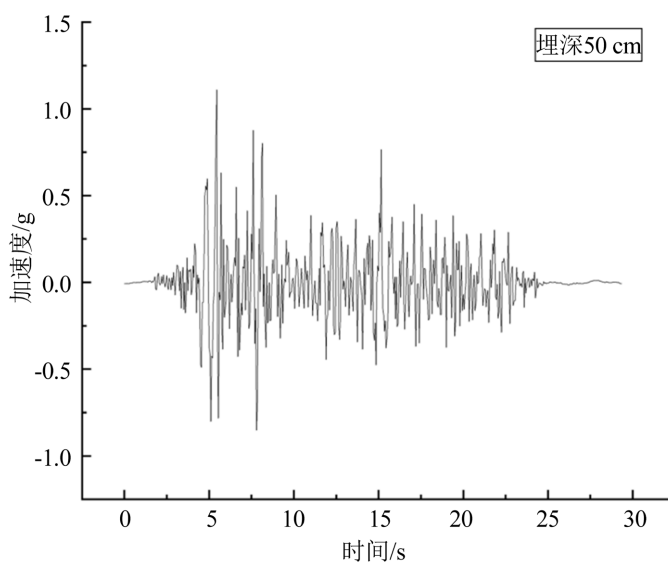


Figure 3. Time course curve of EI seismic wave acceleration
图 3. EI 地震波的加速度时程曲线

处理后的 EI 波时长约 22 s 如图 3 所示。并以相对密实度 78% 的饱和砂土试样为例, 加载三种不同频率的地震波, 对比分析超静孔隙水压力与超静孔压比变化规律。通过这一系列的实验加载, 能够模拟不同频率地震波对砂土液化的不同影响。

2.4. 数据采集与传感器布置

在模型箱的不同深度埋设 5 个孔隙水压力传感器, 分别安装在图表面下 10 cm、25 cm、50 cm、65 cm、80 cm 处, 以及 4 个加速度传感器, 分别埋设在 50 cm、60 cm 土层深度处(如图 4), 用于监测土体在地震波加载下的孔隙水压力和加速度响同时用于验证输入地震波的传播情况。通过相机和标尺记录砂土模型的宏观变化和整体沉降量, 评估不同频率地震波对砂土液化的影响。传感器通过 DHDAS 动态采集系统实时记录。

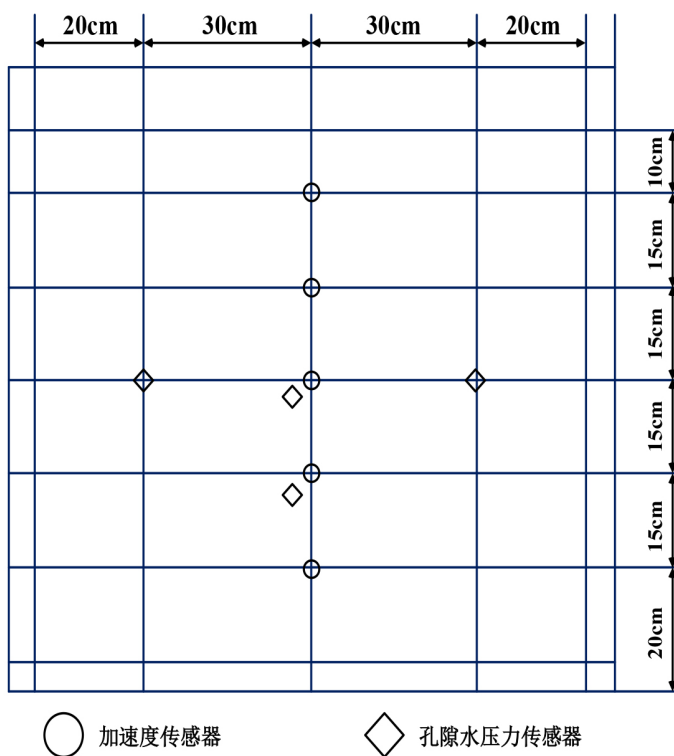


Figure 4. Sensor layout of the model

图 4. 模型箱传感器布置

3. 试验结果

3.1. 砂土液化宏观现象

加载三种不同频率的 EI-Centor 地震波时, 砂土试样液化宏观现象基本相同, 沉降量与地震频率呈反比, 抗液化能力与地震频率呈正比; 加载地震频率 1 Hz 时, 饱和砂土试样在加速度达到 0.51 g 时, 砂土发生液化, 最终沉降量 1.5 cm; 加载地震频率 2 Hz 时, 饱和砂土试样在加速度达到 0.55 g 时, 砂土发生液化, 最终沉降量 0.8 cm。频率为 4 Hz 时, 砂土试样未完全液化, 土样表面析水、产生气泡, 土样沉降等现象相对最弱, 孔隙水压力随地震波加载响应时间有所滞后, 最终沉降量 0.42 cm。在原波形下试体液化前后宏观形态演变特征如图 5 所示。

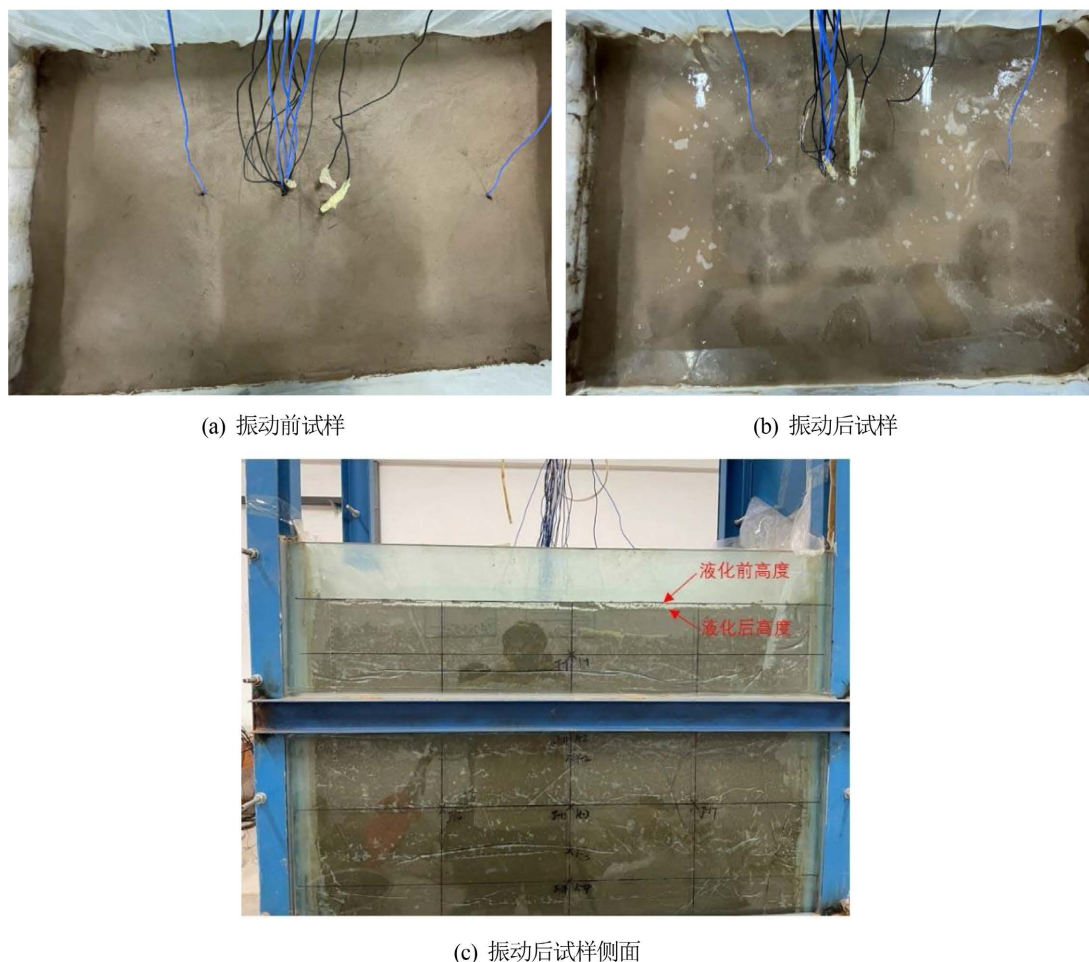


Figure 5. Sandy soil specimen before and after 1 Hz vibration
图 5. 1 Hz 振动前后砂土试样

3.2. 数据分析

从应力方面分析, 当砂土内部的超孔隙水压力大于等于土体内部有效应力时, 土体将发生液化[10], 此时土体内超静孔隙水压力与有效应力的比值为 1, 即为超静孔压比。通过 DHDAS 动采仪采集振动过程中不同深度饱和砂土试样内部孔隙水压力变化情况, 计算振动前不同位置砂土内部有效应力, 结合超静孔压比的变化规律与一次二阶矩定量分析法研究不同影响因素下液化规律。以液化或最大响应时刻为例, 各埋深超静孔隙水压力呈随深度增大而增大的总体趋势。分析数据并绘制不同频率下不同埋深处的超静孔隙水压力、超静孔压比随时间变化曲线, 如图 6、图 7 所示。

分析图 6、图 7 可知, 在 1 Hz 频率条件下, 砂土试样在约 110 秒时发生完全液化。此时各深度处的超静孔压比分别为 1.1、1.01、1、1、1, 均达到或超过 1, 表明土体有效应力基本消失, 试样整体进入液化状态。同时可观察到, 上部土层孔压比略高于下部, 说明液化发展由上向下逐渐减弱。液化发生后, 孔隙水压力出现峰值并逐渐消散, 这是由于振动作用使土体结构重新调整并趋于密实。在 2 Hz 加载频率下, 土样在约 65 秒即达到完全液化, 相比 1 Hz 工况, 液化时间明显提前。液化时各深度孔压比分别为 1.02、1.01、1、1、1, 同样全部满足液化判据。这表明在较高振动频率作用下, 循环荷载作用次数增加, 孔隙水压力累积速度加快, 从而使土体更快达到液化状态。当振动频率提高至 4 Hz 时, 试样在约 78 秒

时孔压达到峰值, 但各深度孔压比分别为 1、0.92、0.9、0.85、0.76。除表层外, 其余位置均未达到液化判据, 因此整体未发生完全液化, 仅表现为上部土层的局部液化现象。宏观上仅观察到表层少量析水, 未出现明显流动变形。

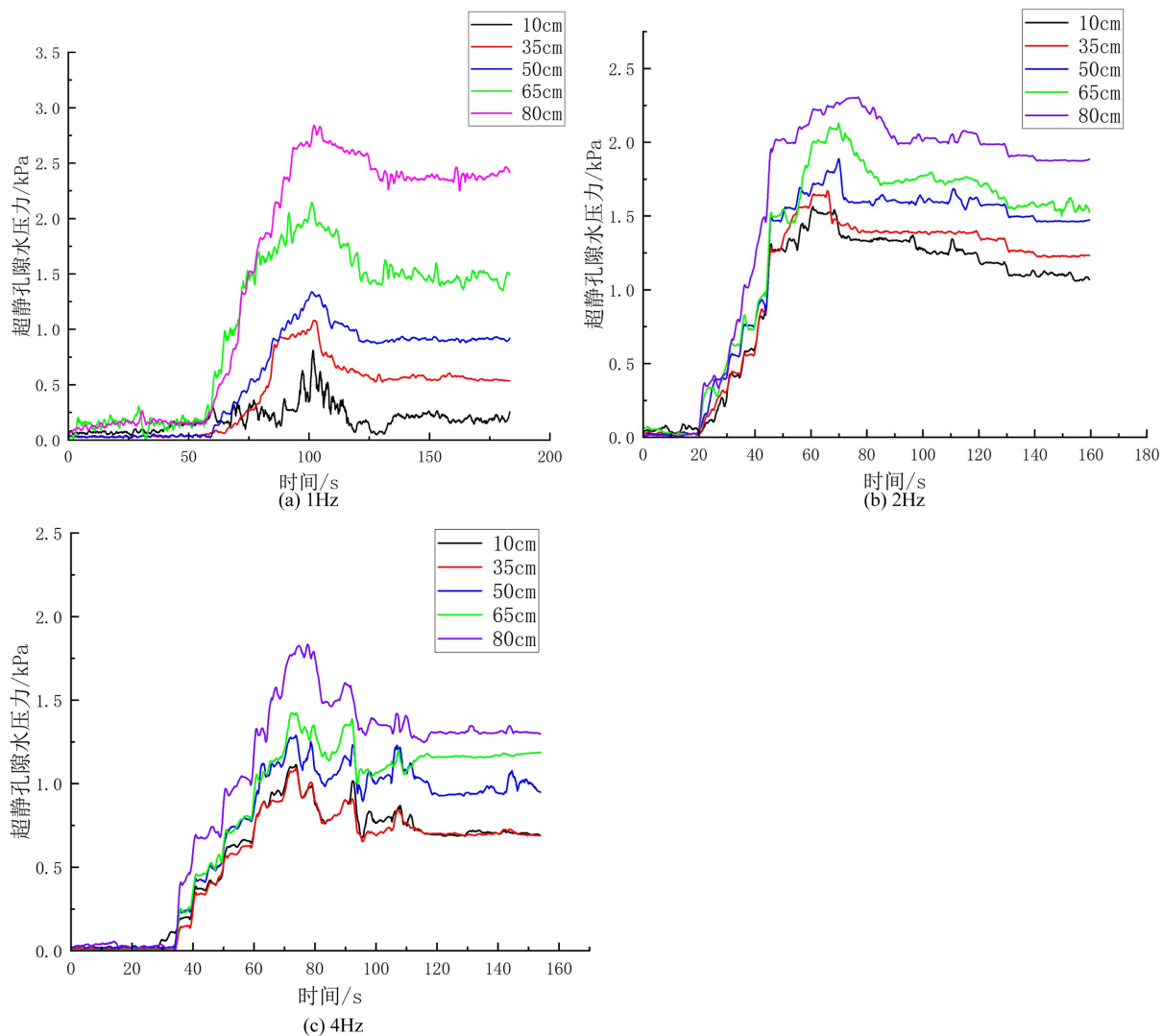


Figure 6. Time-history curves of excess pore water pressure under different frequencies
图 6. 不同频率下超静孔隙水压力时间变化曲线

综合对比可知, 振动频率对砂土液化发展具有显著影响。随着频率由 1 Hz 增加至 2 Hz, 孔隙水压力增长速率明显提高, 液化发生时间显著提前; 而当频率继续增大至 4 Hz 时, 由于输入振动幅值相对减小, 土体内部孔压未能在整体范围内充分累积, 从而仅产生局部液化。总体来看, 砂土液化发展表现出明显的频率敏感性。

通过数据分析得到图 8 为不同地震波频率下饱和砂土液化时加速度峰值曲线, 1 Hz 的砂土试样液化临界加速度为 0.51 g, 2 Hz 的砂土试样液化临界加速度为 0.55 g, 4 Hz 的砂土试样液化临界加速度为 0.6 g。基于试验数据可得出液化临界加速度与地震波频率存在二次多项式函数关系, 具体如下式:

$$y = -0.005x^2 + 0.055x + 0.46$$

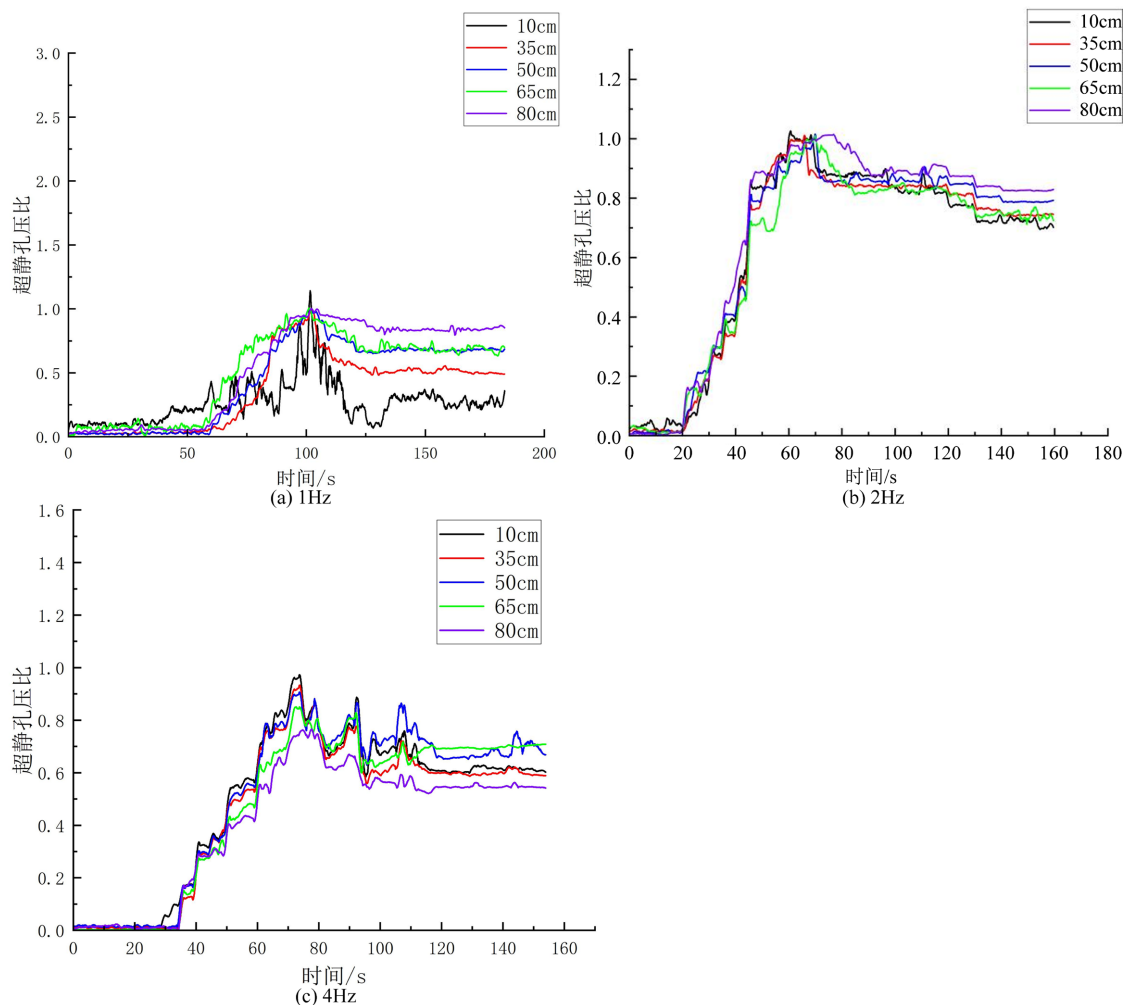


Figure 7. Time-history curves of excess pore pressure ratio under different frequencies
图 7. 不同频率下超静孔压比随时间变化曲线

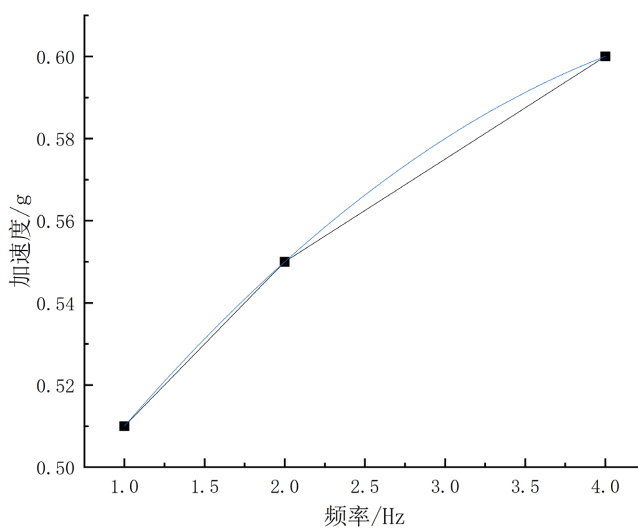


Figure 8. Critical liquefaction acceleration at different frequencies
图 8. 不同频率临界液化加速度

结果表明地震波频率对液化剧烈程度影响较大, 两者呈反比。

4. 结论

(1) 地震频率对砂土液化影响较大。试验对密实度 78% 的饱和砂土试样加载频率为 1 Hz、2 Hz、4 Hz 的 EI-Centor 地震波。三种不同频率地震波加载下砂土试样表面液化现象基本相同, 频率越大, 砂土试样液化程度越弱, 由稳定状态转变至流动状态程度越弱, 沉降量与频率呈反比。

(2) 地震波的频率 4 Hz 时, 饱和砂土试样中下部未液化, 低频振动对饱和砂土试样影响程度强于高频振动, 地震波频率对液化剧烈程度影响较大, 两者呈反比。

(3) 本研究仅针对固定相对密实度的粉砂土开展了地震波频率单因素影响分析。后续工作可系统探究相对密实度、颗粒级配等土体关键参数与地震波频率对液化特性的影响, 补充多类型地震波的频谱特性试验, 进而建立普适性更强的液化判别模型, 为工程场地液化评价与抗液化设计提供更全面的理论支撑。

参考文献

- [1] 徐柯勇. 地震作用下饱和砂土液化特性及防治措施探讨[C]//中国智慧工程研究会. 2024 工程技术应用与施工管理交流会论文集(上). 浙江省地矿勘察院有限公司, 2024: 92-93.
- [2] 李智超, 吴中海, 韩帅, 等. 2025 年 1 月 7 日定日 MS6.8 级地震砂土液化特征及成因机制[J]. 地球科学, 2025, 50(5): 1830-1841.
- [3] 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.
- [4] 赵伟, 史浩栋, 范冠宇, 等. 不同细粒含量砂土多次液化对其力学特性的影响[J]. 河南科学, 2025, 43(4): 576-585.
- [5] 许成顺, 王冰, 杜修力, 等. 循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 109-118.
- [6] 王禹, 高广运, 顾晓强, 等. 渗透系数对砂土液化震陷影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1813-1818+1826.
- [7] 王炳辉, 李松星, 李炎, 等. 液化过程中饱和砂土试样的电阻率变化特性[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S2): 25-30.
- [8] 鲁智豪, 徐世光, 郑超, 等. 基于灰狼优化算法优化极限学习机的砂土液化预测研究[J]. 江西科学, 2026, 44(1): 103-111.
- [9] 陈国兴, 吴琪, Juang, C.H. 砂土液化不变性理论[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(6): 1311-1370.
- [10] Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley.