

# 西霞院灌区工程砂土液化特性振动台试验研究<sup>1</sup>

卢凤民<sup>1</sup>, 赵亮<sup>1</sup>, 董金玉<sup>2</sup>, 曹泰瑞<sup>3</sup>, 褚天舒<sup>2</sup>, 王闯<sup>2</sup>

(1. 河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 河南 郑州 450008; 2. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 3. 河南省水利勘测有限公司, 河南 郑州 450008)

**摘要:**【目的】深入探究地震动力作用下饱和砂土液化特性, 为工程抗震设防地震动参数的确定提供依据。

【方法】基于地震模拟振动台模型试验, 配制并建造 3 组不同相对密度的饱和砂土模型, 基于埋置于砂土内部的传感器监测模型内部不同位置的超静孔隙水压力、超静孔压比、加速度响应和土体沉降等参数, 分析砂土模型内部的超孔隙水压力时程曲线及孔压比时程曲线, 总结归纳出地震波加载峰值、埋置深度等因素对饱和砂土液化特性的影响规律。【结果】随着地震波加载峰值的增大, 砂土模型液化程度逐渐增大, 液化势逐渐增大, 抗液化强度逐渐减小; 随着砂土埋置深度的增加, 砂土模型液化程度逐渐减小, 液化势逐渐减小, 其抗液化强度逐渐增大。密实度与抗液化能力呈正相关, 随着砂土密实度的增加, 其抗液化能力逐渐增强, 液化程度逐渐减弱。地震波频率越大, 砂土液化越强烈, 抗液化能力越小。【结论】砂土液化各影响因素对砂土液化的影响程度从大到小依次为地震波强度>砂土埋置深度>密实度。试验结果可为后续数值模拟的参数选取提供支持, 为研究其他因素对砂土液化的影响提供参考。

**关键词:** 砂土液化; 振动台模型试验; 密实度; 超静孔隙水压力; 孔压比

**中图分类号:** TV223

**文献标识码:** A

地震作用下饱和砂土体存在发生液化的可能性, 液化造成的地基失效往往会造成严重的建筑结构震害<sup>[1-4]</sup>。历史上的多起地震中均报道了地震液化现象及相关灾害, 如我国河北唐山地震(1976 年)、四川汶川地震(2008 年)、甘肃积石山地震(2023 年), 国外的美国阿拉斯加地震(1964 年)、日本神户地震(1995 年)、缅甸实皆地震(2025)等。由于砂土液化问题十分复杂, 涉及多学科的交叉问题研究, 是岩土工程的前沿课题<sup>[5]</sup>。

国内外学者对砂土液化问题开展了较多相关研究。张希栋等<sup>[6]</sup>通过对纤维加固超疏松和疏松饱和砂土开展不排水动三轴试验, 分析了其超孔压发展规律和流动液化特性。胡庆等<sup>[7]</sup>通过动三轴试验, 得到了不同循环振动次数下试样的抗液化应力比, 研究了深层饱和砂土的液化可能性及液化深度。杨奇等<sup>[8]</sup>通过开展不同加载条件下饱和砂土的动三轴试验, 对比分析在连续加载和间歇加载条件下饱和砂土的动力特性。范猛等<sup>[9]</sup>

对比分析了国内外基于 SPT 的液化判别方法的差异, 总结出了影响砂土液化的 3 个主要因素为土体环境、土体性质、动荷载。韩庆华等<sup>[10]</sup>基于动力三轴分级循环加载试验, 研究了饱和机制砂模型土的动力特性。王小桃等<sup>[11]</sup>基于福州饱和砂土的室内动三轴试验, 研究了饱和砂土动剪模量比和阻尼比变化特性及其与围压之间的关系。周燕国等<sup>[12]</sup>根据有效应力原理和 Hardin 公式, 提出了饱和软弱土振动液化过程中小应变剪切模量预测方法。赵路朋等<sup>[13]</sup>结合豫北引黄灌区原位测试数据, 并从砂土液化的机理、砂土液化判别结果、可液化土的成分构成及液化地层时代成因等角度出发, 对豫北引黄灌区砂土液化规律和处理方法进行研究。

砂土液化机制具有高度复杂性, 涉及多因素耦合作用。当前研究主要依托原位试验与室内试验进行定量分析, 但常规测试方法难以真实还原地震荷载下土体的动态应力-应变关系, 且研究重点多集中在纯砂材料的抗液化强度及残余变形

**收稿日期/Received:** 2025-07-25

**修回日期/Revised:** 2025-09-25

**基金项目:** 河南省水利厅 2020 年度水利科技攻关项目 (GG202020)。

**第一作者:** 卢凤民 (1968—), 男, 高级经济师, 从事灌区水利工程建设与管理方面的研究。

E-mail: WBB199406@163.com。

**通信作者:** 董金玉 (1977—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事工程地质与地质灾害方面的研究。

E-mail: dongjinyu@ncwu.edu.cn。

特性上。针对饱和砂土在液化过程中的动态本构行为及其主控因素, 现有成果尚未形成完整理论体系, 因而深入研究饱和砂土体液化特性以及其影响因素显得很有必要<sup>[14-15]</sup>。

地震模拟振动台试验作为研究液化场地动力响应的关键技术, 其核心优势在于采用缩尺模型与真实地震波输入相结合的方法。该方法通过高保真波形加载(失真度可控制在5%以内), 能精确复现地震波传播过程中的三维应力场重构与土体动力耦合效应<sup>[16-17]</sup>。相较于动单剪、动三轴及共振柱试验等传统室内试验, 其有极大的优势。如: 张雪东等<sup>[18]</sup>通过开展饱和砂土地基的离心机振动台试验, 研究了饱和砂土地基在振动液化过程中不同土层深度处的加速度响应规律。梁孟根等<sup>[19]</sup>基于福建中细砂的振动台模型试验, 分析了中西砂在地震动作用下的动力响应和液化特性, 揭示了土体不同深度范围内超静孔隙水压力、加速度随时间的变化规律。许成顺等<sup>[20]</sup>开展了含上部黏土层、饱和砂土层、密实砂土层的可液化自由场地在水平地震动激励下的大型振动台模型试验研究, 分析了地震动激励时饱和砂土液化后场地加速度、位移、孔压比时空响应等动力响应。李金字等<sup>[21]</sup>基于小型振动台输入的模拟地震序列, 通过监测土体参数、轻型动力触探和土工试验等方法, 研究砂土液化前后场地条件的变化规律。尽管目前已有不少针对液化场地动力响应特性的相关研究, 由于砂土在地震作用下的响应机制非常复杂, 影响因素多样, 上述试验研究结果并不能反映砂土相对密度与地震波参数在饱和砂土地震动动力响应中所起的作用。

本文以河南省西霞水利枢纽引黄灌区总干渠穿猪龙河倒虹吸处砂土地基为例, 设计并完成饱和砂土液化的地震模拟振动台模型试验, 综合考虑相对密度与地震波参数, 利用埋置于砂土试样中不同部位处的孔隙水压力传感器及加速度传感器, 监测并分析砂土模型在地震动作用下的孔隙水压力变化规律和砂土模型动力响应规律, 分析不同指标对砂土体孔隙水压力的影响规律。并针对现场工程实际情况提出液化临界孔压比, 为工程提供参考价值。

## 1 西霞院灌区工程概况

西霞院水利枢纽工程是黄河小浪底水利枢纽的配套工程, 位于小浪底坝址下游16 km处的黄河干流上, 开发任务以反调节为主, 结合发电, 兼顾灌溉、供水等综合利用。工程区地层属华北地层区之华北平原地层分区, 输水及灌区工程属豫东地层小区, 连通工程属豫北地层小区。区域

涉及的地层主要为基岩丘陵区及黄土丘陵区三叠系、侏罗系、古近系的砂岩、页岩、泥岩; 黄土丘陵区的中更新统老黄土, 冲、坡洪积的砂、砂壤土、粉质壤土、粘土及卵砾石等。工程区地层以第四纪新近沉积物( $Q^{al}_4$ )为主, 除局部以次一级河流为主沉积形成外, 黄河冲积地层主要分为两层, 下部多为漂卵石、砾卵石, 上部为中砂和粉细砂( $Q^{2al}_4$ )夹重粉质壤土和粉质粘土透镜体, 局部为中粉质壤土。

### 1.1 现场取样

试验所用土样取自河南省孟州市南庄镇黄庄村南侧约1.5 km处的猪龙河流域。结合现场勘察可知, 取样点土质具有典型砂土的特征, 土层自上而下其含水率变化明显。在自然干燥状态下, 土体胶结试样在轻微压力作用即可解构分散; 当处于湿润状态时, 土体经机械拍击会产生明显的液化现象, 施加振动后的土体可见水分析出, 表明土体的抗液化性较弱。同时, 所取试样的砂土颗粒多呈卵圆形或椭球状, 磨圆度较好, 表现出弱黏聚性和较好的渗透性能。

### 1.2 土的基本物理力学性质

对现场所取的土样展开室内基础土工试验, 并通过激光粒度分析仪进行颗粒分析, 根据试验结果绘制该地区土样的粒度分布曲线, 如图1所示。由数据可得该土样中粒径大于0.075 mm的颗粒含量超过了全重的50%, 因此可将土样定性为粉砂土, 在室内展开一系列基本常规试验, 测得的土体各项物理指标见表1。

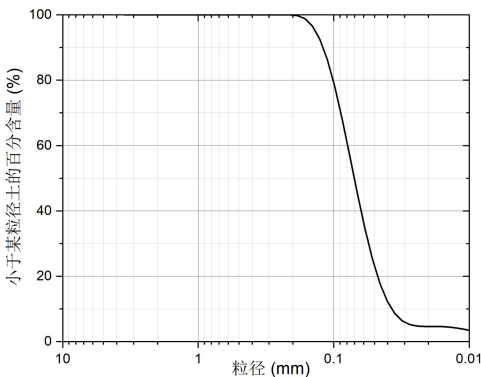


图1 试验土样的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of test soil sample

表1 土体的物理性质参数

Tab. 1 Physical Property Parameters of Soil

| 土样  | 天然含水率/% | 天然密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 饱和含水率/% | 黏粒含量/% | 比重   |
|-----|---------|--------------------------------|---------|--------|------|
| 粉砂土 | 6.01    | 1.65                           | 28.65   | 2.5    | 2.65 |

为测试所取试验的力学性质, 选用猪龙河处的特征原状环刀样进行直剪试验。本次试验选取 4 个试样, 分别在垂直压力为 100、200、300、400 kPa 的竖向荷载下进行试验。剪切速率为 0.8 mm/min, 试验过程中记录每圈的转数以及读数, 通常剪到变形为 4 mm 时结束, 若读数处于一直增加的状态, 则应剪至 6 mm。即完成第一级的垂直压力, 改变垂直压力后重复进行试验。

由试验数据可得该地区饱和粉砂直剪试验抗剪强度与施加压力之间呈线性增长关系, 拟合度较高,  $R^2=0.99$ , 根据库仑定律可得该地区饱和粉砂抗剪强度参数为: 内摩擦角为  $31.37^\circ$ , 黏聚力为 0.26 kPa。

## 2 振动台模型试验

### 2.1 振动台系统

本次试验于华北水利水电大学地震模拟试验室进行, 试验所用的电液伺服控制地震模拟振动台, 平面尺寸为 1.5 m (长)  $\times$  1.0 m (宽), 台面最大载重量 1 500 kg, 试验所用振动台具体参数额定激振力为 50 kN, 最大速度 0.4 m/s, 最大位移 100 mm, 最大加速度  $40 \text{ m/s}^2$ , 频率范围为 0.5~100 Hz。

### 2.2 模型箱选取

本次试验设计的矩形刚性模型箱的尺寸为 100 cm (长)  $\times$  50 cm (宽)  $\times$  90 cm (高), 如图 2 所示。在玻璃两侧安装厚度为 2 cm 的钢化玻璃, 以便观察土体沉降情况。同时在玻璃板上画刻度线, 作为观测时的参考坐标系。在钢化玻璃上标注传感器位置, 四周焊接处均匀涂抹防水胶, 以保证水体在震动中不会漏出。模型箱内壁敷设 10 cm 聚乙烯闭孔泡沫板, 不仅可减弱对波的反射, 衰减高频振动能量, 而且还能减小箱壁与模型材料之间的摩擦阻力, 将外部振动对模型的影响控制在试验允许误差内。箱体内部采用四层高分子塑料薄膜分层错缝铺贴工艺, 形成全封闭防渗体系。



图 2 模型箱

Fig. 2 Vibration table model test model box

### 2.3 地震波选取及加载方案

本次试验采用水平向 EI-Centor 地震波输入, 以模拟地震波。结合振动台模拟地震波系统的参数条件, 采用的地震波峰值加速度分别为 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g、0.6g, 将初始地震波进行滤波压缩操作后, 输入波时长约为 20 s。地震波加速度时程曲线如图 3 所示。

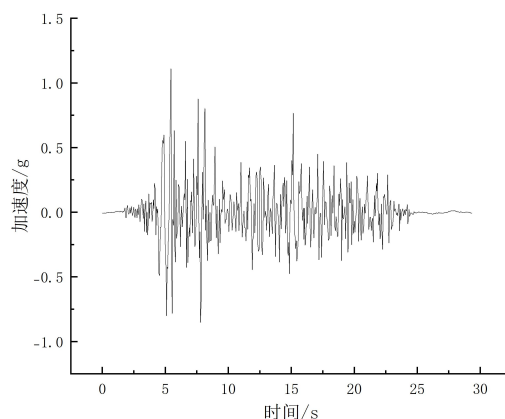


图 3 地震波加速度时程曲线

Fig. 3 Time history curve of seismic wave acceleration

结合现场土体密实度情况, 本次试验选取的相对密度 ( $D_r$ ) 为 66%、78%、90%。分别制作 3 个不同密实度的饱和砂土模型, 研究不同密实度饱和砂土液化特性规律。输入 3 种不同频率的地震波, 对相对密度为 78% 的饱和砂土试验进行加载, 以研究不同频率的饱和砂土液化特性规律。输入的 EI-Centor 地震波为水平单向, 加载时间为 20 s, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 相关要求, 将设计地震波输入加速度峰值 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g、0.6g 共 6 个工况依次进行加载试验。

### 2.4 传感器布置

制作好的砂土模型中共布置了 5 个孔隙水压力传感器、4 个土压力传感器和 4 个加速度传感器。为真实反映砂土模型的动力响应与变形特征, 结合相关研究成果<sup>[19]</sup>, 孔隙水压力传感器均埋置于砂土模型的中性面, 其主要记录不同深度孔隙水压力的变化情况, 分布详情如图 4 所示。砂土试样高 90 cm, 孔隙水压力传感器分别埋于土表以下 10、35、50、65、80 cm, 加速度传感器分别埋于土表下 50、65 cm 处, 主要目的测试不同位置加速度变化情况, 确保所输入加速度的准确性。

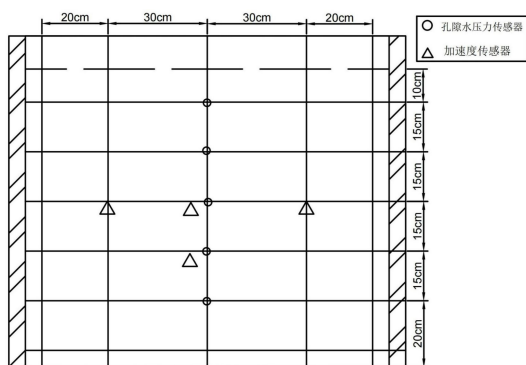


图4 传感器布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sensor layout

### 3 试验结果分析

#### 3.1 震动误差分析

分析烘干砂土试样在加载 EI-Centor 地震波作用时, 模型中埋深 30 cm 与 45 cm 处加速度传感器记录的加速度时程曲线, 如图 5 所示。

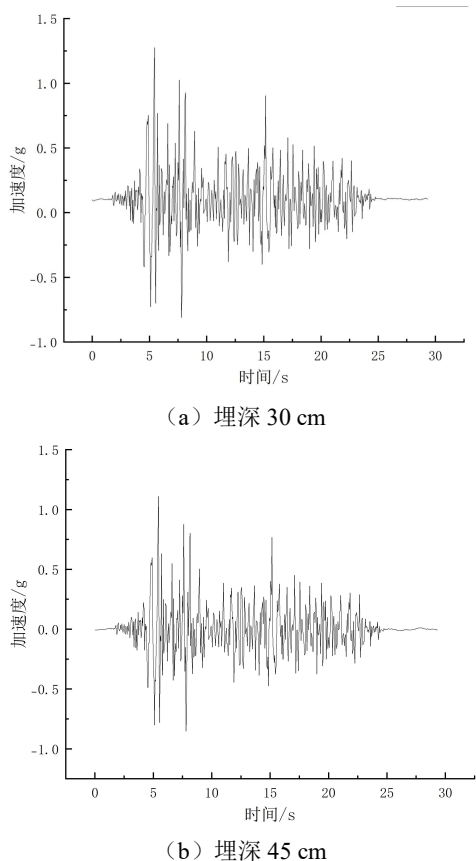


图5 不同埋深处测点加速度时程曲线

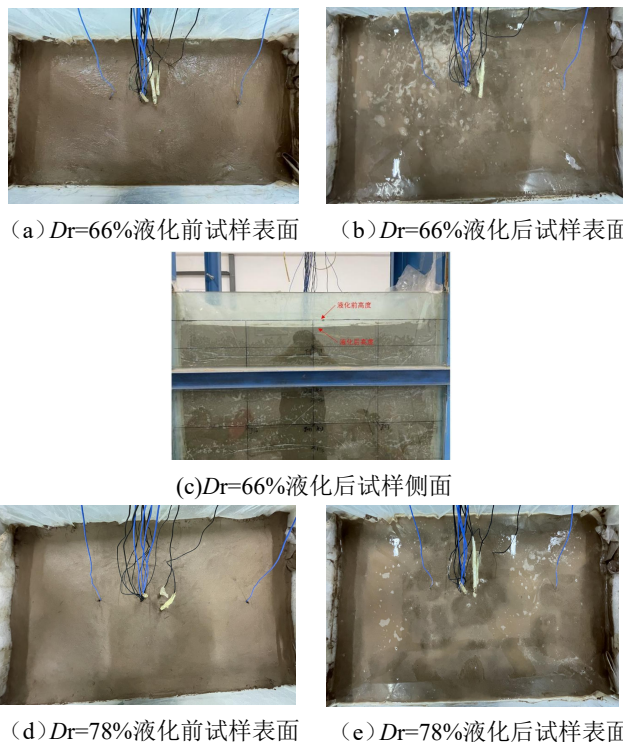
Fig. 5 Acceleration time history curves of measuring points at different burial depths

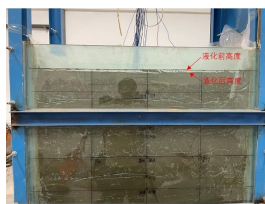
从试验结果可以看出, 在不同埋深处的加速度波形曲线呈现出相似的走势, 波形几乎重叠。试验结果表明, 选用的刚性模型箱和在模型箱内壁安装泡沫垫层的边界处理措施对地震作用下砂土的剪切运动影响最小。该装置成功模拟了自

然条件下地震波作用下土层的实际运动。模型箱和边界处理方法满足试验要求。此外, 30 cm 和 45 cm 深度处的加速度时程曲线的加速度峰值相对相似, 表明刚性模型箱在振动过程中不会与振动台共振。这也符合试验要求。

#### 3.2 砂土模型液化宏观现象

地震波进行加载时, 3 个不同密实度的砂土模型均产生了极为强烈的反应。随着加载强度持续增大, 试样的表面泛出光亮色泽, 并有少量的水体析出。随后砂土模型的四周开始涌水, 周边的土体随之变软, 土体沉降现象愈发明显, 此时试样表面少量气泡不断冒出。当加载致使砂土完全达到液化状态之际, 土样表面涌出浑浊水体析出, 箱体四周骤然出现喷砂情景。砂土表面呈现出波浪状, 不过其起伏幅度相对较小, 并且这种波状起伏的程度与加速度峰值呈现明显的正相关关系, 即加速度峰值越高, 波状起伏越显著。3 种不同密实度的土样在振动过程中都出现沉降现象, 其中: 相对密度为 66% 的土样在加速度峰值为 0.6g 时沉降 1.8 cm; 相对密度为 78% 的土样沉降 1.1 cm; 相对密度为 90% 的土样沉降 0.75 cm。对比在加载不同频率的地震波时同一密实度下的饱和砂土模型, 得出了激振频率越大, 砂土模型的液化越剧烈。同时, 开始液化时间与频率呈正比。在高频地震波加载的情形下, 砂土液化后深部土体由于振动更加密实, 土体出现沉降现象, 且初始密实度越小, 沉降现象越明显。直至振动停止后, 砂土模型的表面依旧有少量水体慢慢析出。试验土样液化破坏前后如图 6 所示。

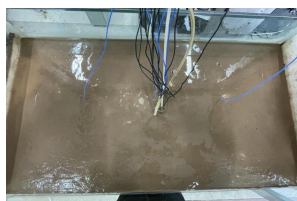




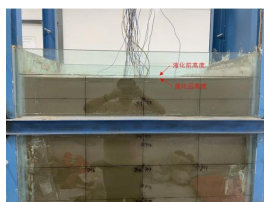
(f)  $Dr=78\%$  液化后试样侧面



(g)  $Dr=90\%$  液化前试样表面



(h)  $Dr=90\%$  液化后试样表面



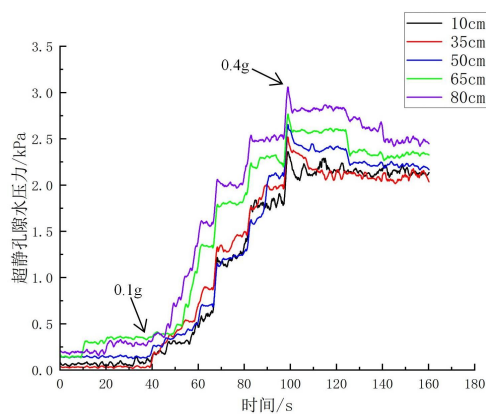
(i)  $Dr=90\%$  液化后试样侧面

图 6 试样表面液化前后对比图

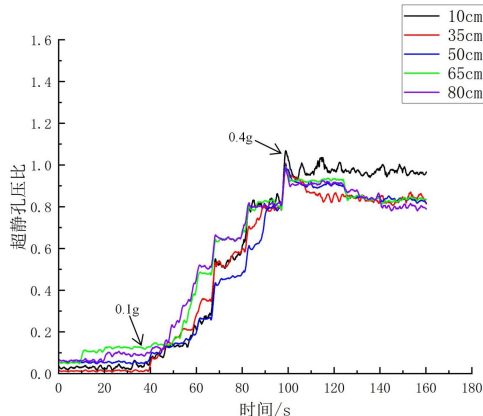
Fig. 6 Comparison of sample surface before and after liquefaction

### 3.3 密实度对超静孔隙水压力影响

分析数据并绘制不同埋深处的超静孔隙水



(a) 超静孔隙水压力



(b) 超静孔压比

图 7 相对密度为 66% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线

Fig. 7 Time varying curve of excess pore water pressure and excess pore pressure ratio for a sand soil model with a relative density of 66%

### 3.3.2 相对密度 $Dr=78\%$ 结果分析

相对密度为 78% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出，相对密度为 78% 时，5 个不同埋深处的超静孔隙水压力随加载增大而增大，并在 103 s 时完全液化。与相对密度为 66% 时的砂土模型试样相同，砂土试样埋深越深，其超静孔隙水压力也就越大。并且，超静孔隙水压力在峰值后

压力、超静孔压比随时间变化曲线，加载加速度峰值为 0.6g。试验数据记录孔隙水压力发生，持续发展直至消散，对超静孔隙水压力及超静孔压比的规律进行分析，可得到不同相对密度的饱和砂土液化的特性。

### 3.3.1 相对密度 $Dr=66\%$ 结果分析

相对密度为 66% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线如图 7 所示。从试验结果可以看出，不同埋深处的超静孔隙水压力随荷载增大也迅速增大，同时埋深深度与增长速率成正比。相对密度为 66% 时，砂土模型试样在 96 s 时完全液化。液化时埋深 10、35、50、65、80 cm 处的超静孔隙水压力分别为 1.07、1.19、1.33、1.53、1.74 kPa。从试验结果可以看出，砂土的深度越大，其超静孔隙水压力越大。在达到 0.1g 的加速度之后，超静孔隙水压力陡然急剧上升，并且下部的变化态势更为猛烈。当加速度达到 0.4g 时，便会发生液化现象。同时，在此压实度条件下，超静孔隙水压力随时间变化的曲线斜率达到最大值。不同深处振动开始后的超静孔压比也迅速增大，其 5 个不同埋深处孔压比皆大于 1，说明土样在地震波加载情况下发生液化。

有较大变化，随后孔压消散。但与相对密度为 66% 的砂土模型相比，由于密实度更大，在振动之后更加密实，故孔隙水压力消散缓慢。同时，由图 8 还可知，5 个深度不同的孔压比增长速率相似。埋深浅处孔压比为 1.02，随着埋深增加，孔压比逐渐减小，表明上部砂土模型的液化程度较下部强烈。土样在加速度为 0.51g 时发生液化，与之对应的超静孔隙水压力随时间变化曲线的斜率有所减小。

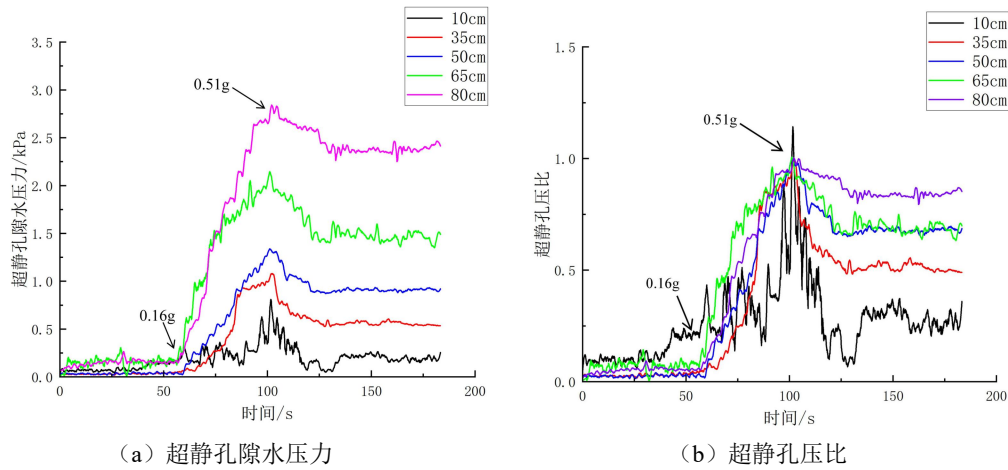


图 8 相对密度为 78% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线

Fig. 8 Time dependent curve of excess pore water pressure and excess pore pressure ratio for a sand soil model with a relative density of 78%

### 3.3.3 相对密度 $D_r=90\%$ 结果分析

相对密度为 90% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知，与相对密度为 66% 和 78% 时的砂土模型试样相同，相对密度为 90% 砂土模型的超静孔隙水压力也是随深度增大而增大。在超静孔隙水压力达到峰值后，也出现大幅度式消散，但消散速率较小。对比不同埋置深度的监测点而言，埋置

深度较深处砂土试样的消散速度大于埋置深度较浅处的砂土试样。出现这种试验结果的原因是，由于砂土模型的密实度较大，在地震波加载后由于振动而使得土体更加密实，导致其消散速率较慢。埋置深度不同的 5 处监测点的孔压比自上而下依次增大，说明了砂土模型的中上部液化较为剧烈。同时，相对密度为 90% 砂土模型在加速度达到 0.57g 时发生液化，此时超静孔隙水压力随时间变化曲线的斜率在三者之中为最小。

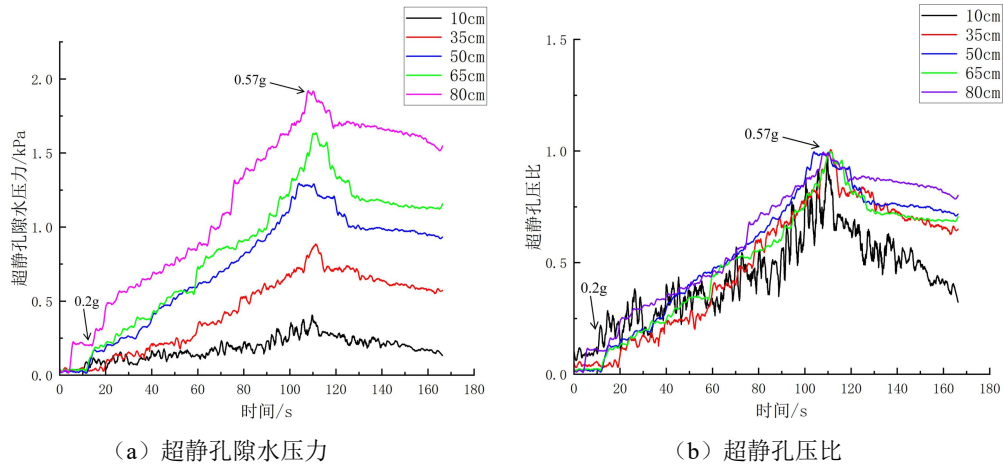


图 9 相对密度为 90% 砂土模型的超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线

Fig. 9 Time varying curve of excess pore water pressure and excess pore pressure ratio for a sand soil model with a relative density of 90%

### 3.3.4 不同相对密度土样超静孔隙水压力及超静孔压比结果分析

图 10 为不同埋深处超静孔隙水压力随时间变化曲线。从图中可以看出，随地震波加载增大，3 种不同密实度的饱和砂土试样中孔隙水压力急速增长，增长速率随相对密度增大而减小。超静孔隙水压力达到峰值后开始逐渐减小，且相对密度越大，消散速率越慢。试验结果表明了砂土试

样液化后其孔压消散与密实度有关，埋置深度较深处的超静孔隙水压力最先变化，随着埋置深度的减小而依次变化。同时，由于埋置深度较深处土体中的孔隙水无法向四周排出，只能向上渗流，故密实度越大，土样渗透性越小，消散速率也就减小。对比不同密实度下相同深度处的超孔隙水压力还可以看出，同一深度下，相对密度越小，超静孔隙水压力越大。

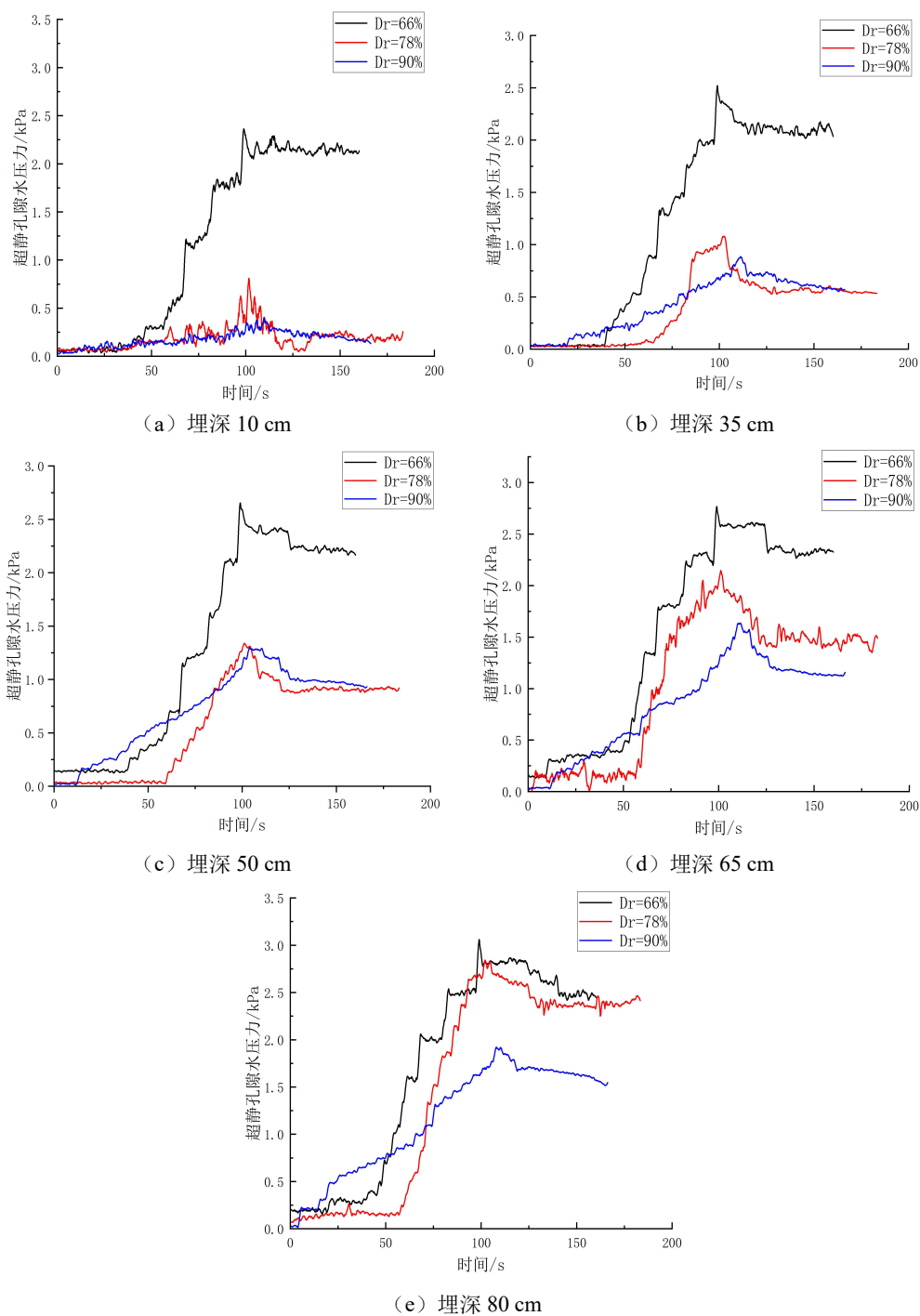


图 10 不同埋深处超静孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 10 Time varying curves of ultra static pore water pressure at different burial depths

图 11 为不同深处超静孔压比变化曲线。从试验结果可以看出，密实度对砂土模型的空压比峰值也存在显著影响。相对密度越大，孔压比峰值

越小。这一试验结果表明了密实度越大，饱和砂土试样液化现象越弱，抗液化能力越强，液化趋势也会随之减小。

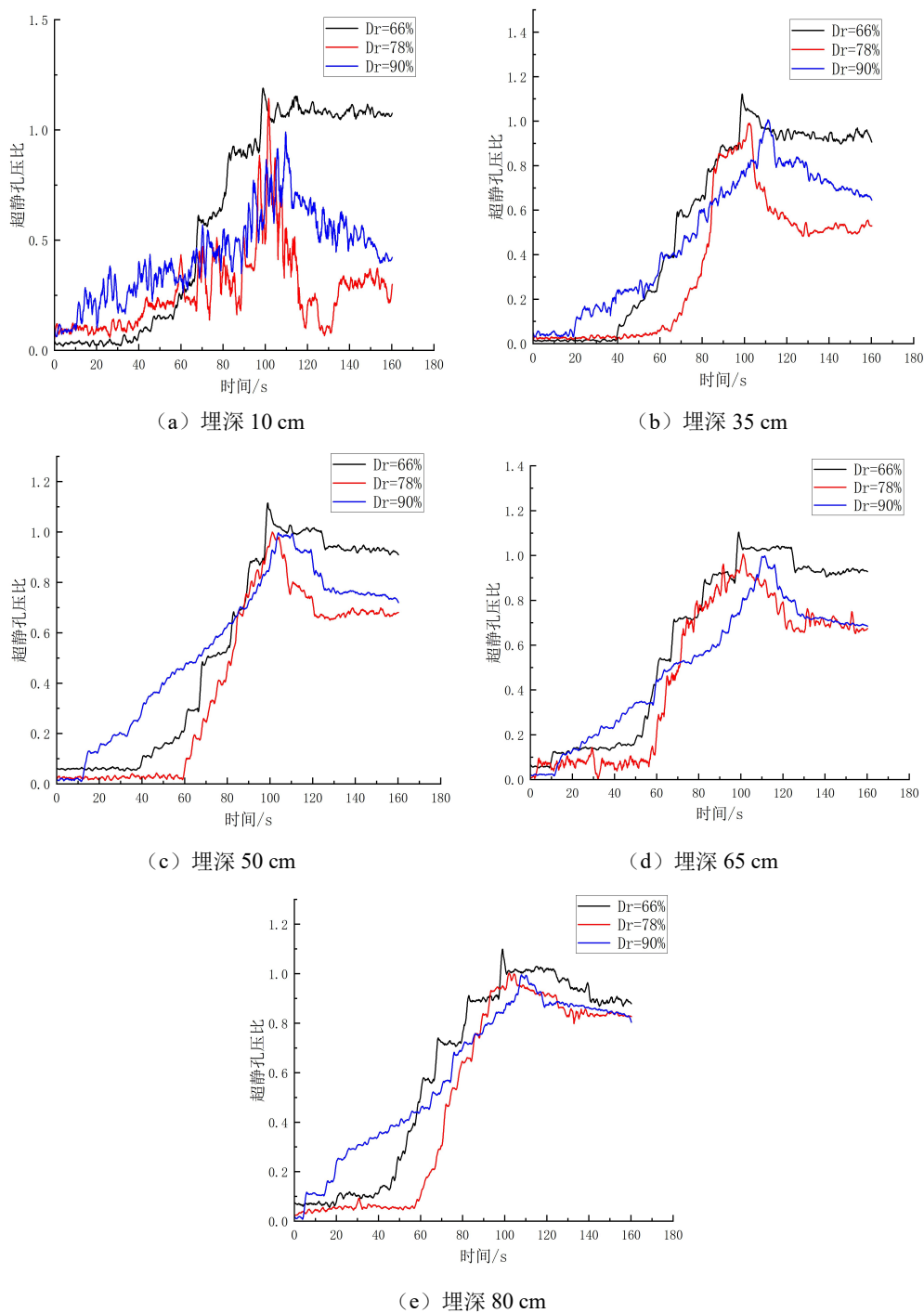


图 11 不同埋深处超静孔压比随时间变化曲线

Fig. 11 Time varying curve of ultra static pore pressure ratio at different burial depths

### 3.4 地震波频率对超静孔隙水压力影响

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，将其频率扩大 2 倍、4 倍，并以相对密度 78% 的饱和和砂土试样为例，加载 3 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规律，如图 12、图 13 所示。在不同频率地震波加载下，中下部的超静孔隙水压力和超静孔压比变化规律大致一致。在加载地震波后超静水压与超静孔压快速增大到峰值后减小，最终趋于稳定。

在加载初始频率地震波时，孔隙水压力在  $t=56$  s 时发生变化，底部超静孔隙水压力率先变大，且自下而上依次增加，不同深度变化规律相似，在  $t=103$  s 时超静孔隙水压力与超静孔压比达到峰值；频率增大 2 倍后，孔隙水压力在  $t=38$  s 时发生变化，在  $t=78$  s 时超静孔隙水压力与超静孔压比达到峰值；频率增大 4 倍后，孔隙水压力在  $t=20$  s 时发生变化，在  $t=65$  s 时超静孔隙水压力与超静孔压比达到峰值。地震波频越大，超静孔隙水压力越大，孔隙水压力变化滞后于地震动力响应的的时间越短。且频率越

大，超静孔隙水压力与超静孔压比随时间变化曲线的斜率越大，表明频率对液化程度呈正相

关性，地震波频率越大，液化现象越明显，抗液化能力越弱。

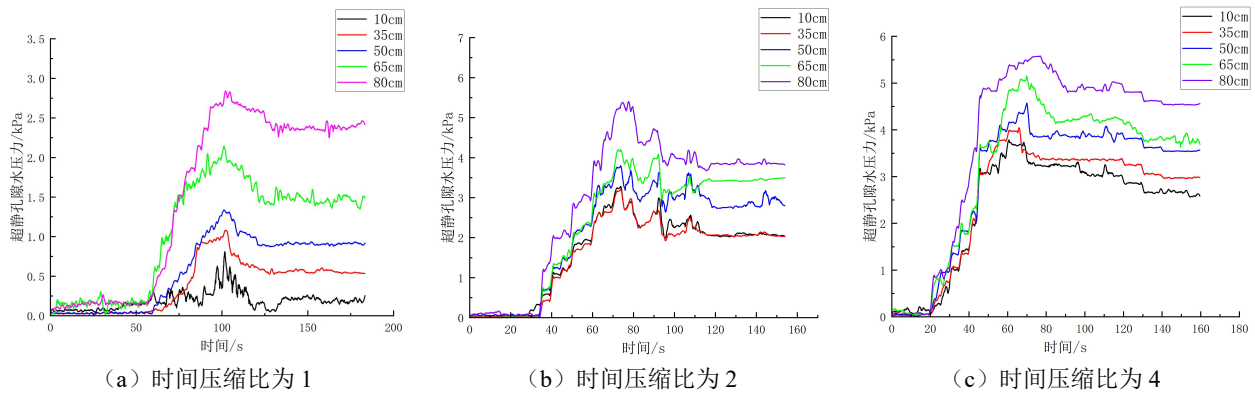


图 12 不同时间压缩比下超静孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 12 Time varying curves of ultra static pore water pressure under different compression ratios

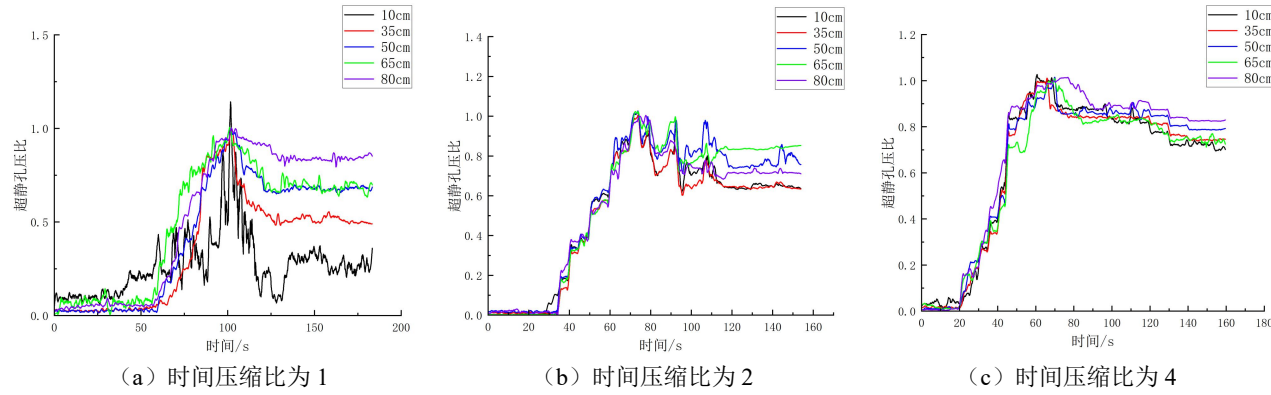


图 13 不同时间压缩比下超静孔压比随时间变化曲线

Fig. 13 Time varying curve of ultra static pore pressure ratio under different compression ratios

#### 4 饱和粉质砂土液化判别讨论

通过试验现象与试验数据分析，以初始地震波，相对密度 78%为例。加载地震比 0.2g 时土样表面现象不明显，土样表面析出少量的水,没有出现冒水、喷砂现象，此时在土样下 10 cm 处超静孔压比为 1.02，35、50、65、80 cm 处孔压比皆小于 1.02；当峰值加速度为 0.4g 时，土样表面析出大量水，土体出现不均匀沉降现象，此时饱和砂土试样埋深 10、35、50 cm 处超静孔压比达到 1.02，65、80 cm 处超静孔压小于 1.02；当加载地震波的峰值加速度 $\geq 0.5g$  时，土样表面在振动过程中呈波浪状，表面析出大量浑浊水，同时伴有气泡冒出，砂土呈流体运动特性，土样整体出现明显沉降，说明此时已经完全液化。此时不同深处的超静孔压比均 $\geq 1.02$ 。上述数据表明可将超静孔压比为 1.02 作为猪龙河倒虹吸处砂土液化临界孔压比。具体饱和粉质砂土液化判别法见表 3。以上判别方法以饱和砂土的深度，不同峰值加速度的地震波，超静孔压比，以及振动台物理模型试验为标准，基于现实工程情况，提出符合实际的液化判别方法。

表 3 饱和粉质砂土液化判别表

Tab. 3 Liquefaction discrimination table for saturated

| silty sand       |            |             |      |
|------------------|------------|-------------|------|
| 粉质砂土埋深 D/cm      | 地震波峰值加速度/g | 孔压比         | 判别结果 |
| $D \leq 10$      | $\geq 0.2$ | $\geq 1.02$ | 液化   |
| $10 < D \leq 50$ | $\geq 0.4$ | $\geq 1.02$ | 液化   |
| $50 < D \leq 80$ | $\geq 0.5$ | $\geq 1.02$ | 液化   |

#### 5 结论

- 1) 饱和砂土的地震模拟振动台模型试验表明，土体密实度对砂土的抗液化能力和液化程度影响显著。砂土的密实度越高，其抗液化能力越强，液化程度越弱；反之，密实度越低，抗液化能力越弱，液化程度越剧烈。
- 2) 地震波频率与砂土的液化程度也存在着直接影响。随着加载地震波频率的增加，砂土的液化程度逐渐变得剧烈，其抗液化能力也逐渐减弱。
- 3) 从试验结果可以看出，随着地震波的加载，上部砂土最先出现液化现象，砂土液化是由

上部土层开始逐渐扩展至下部土层,且上部土层液化程度较下部土层大。

4) 振动台模型试验结果表明,地震加速度、砂土埋置深度和密实度对砂土液化均存在显著影响,各影响因素对砂土液化的影响程度从大到小依次为地震波强度>砂土埋置深度>密实度。

5) 结合不同深度处砂土发生液化时的超静孔隙压比可知,在超静孔隙压比大于 1.02 时,不同深度处的砂土均发生了液化现象。因此,猪龙河倒虹吸处饱和粉质砂土液化临界孔隙压比为 1.02,该结果为工程预测和防治液化提供理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] KUSAKABE R, ICHIMURA T, FUJITA K, et al. A finite element analysis method for simulating seismic soil liquefaction based on a large-scale 3D soil structure model[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 123: 64-74.
- [2] 李雨润,邵鼎松,李赫,等.液化场地高层建筑桩筏基础动力响应试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2025,44(4): 1013-1025.[LI Y R, SHAO D S, LI H, et al. Experimental study on the dynamic responses of pile-raft foundation of high-rise building in liquefiable site[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025,44(4): 1013-1025.]
- [3] 王浩宇,王伟,李金宇,等.场地土层结构对砂土液化的影响研究:以新西兰液化场地为例[J].*自然灾害学报*, 2024, 33(6): 98-108.[WANG H Y, WANG W, LI J Y, et al. Influence of sediment architecture on sand liquefaction: a case study on a liquefaction site in New Zealand [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(6): 98-108.]
- [4] 胡庆,李漪,汤勇,等.基于剪切波速的砂土液化临界公式[J].*工程抗震与加固改造*, 2024,46(5): 179-189.[HU Q, LI Y, TANG Y, et al. Critical formula for sand liquefaction based on shear wave velocity[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2024, 46(5): 179-189.]
- [5] 赵泽宁,段伟,蔡国军,等.中国规范 CPT 砂土液化判别模型的改进与概率形式[J].*岩土工程学报*, 2025, 47(4): 869-876.[ZHAO Z N, DUAN W, CAI G J, et al. Improvement and probabilistic form of CPT-based liquefaction evaluation model in Chinese code[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(4): 869-876.]
- [6] 张希栋,董晓强,段伟,等.不排水循环荷载下纤维加固砂土的超孔压及流动液化特性研究[J].*岩土力学*, 2024,45(2):465-476.[ZHANG X D, DONG X Q, DUAN W, et al. Evolution of excess pore pressure and flow liquefaction responses of fibre reinforced sand under undrained cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024,45(2):465-476.]
- [7] 汪闻韶.土的动力强度和液化特性[M].北京:中国电力出版,1997.[WANG W S. The dynamic strength and liquefaction characteristics of soil[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.]
- [8] 杨奇,王晓雅,聂如松,等.间歇循环荷载作用下饱和砂土累积塑性变形及孔压特性研究[J].*岩土力学*, 2023,44(6):1671-1682+1694.[YANG Q, WANG X Y, NIE R S, et al. Characteristics of the cumulative plastic deformation and pore water pressure of saturated sand under cyclic intermittent loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1671-1682, 1694.]
- [9] 范猛,李敬军,杨正权,等.基于 SPT 的液化判别方法对深埋砂土适用性研究[J/OL].*岩土力学*, 2025(7): 1-10 [2025-05-13]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2024.1279>. [FAN M, LI J J, YANG Z Q, et al. Applicability of standard penetration test based liquefaction assessment methods for sandy soil in deep layer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025(7): 1-10 [2025-05-13]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2024.1279>.]
- [10] 韩庆华,王永超,刘铭劼,等.振动台试验饱和机制砂模型土动力特性研究[J].*土木工程学报*, 2024,57(3):110-122.[HAN Q H, WANG Y C, LIU M J, et al. Study on dynamic characteristics of saturated manufactured sand model soil for shaking table test[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(3): 110-122.]
- [11] 王小桃,程旭日,冯雨顺,等.福州长乐国际机场场地动力特性及稳定性研究[J].*岩土工程学报*, 2023,45(增刊 2): 98-103.[WANG X T, CHENG X R, FENG Y S, et al. Experimental study on

- dynamic characteristics of sand in Fuzhou Airport[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(S2): 98-103.]
- [12] 周燕国,周致亮,摄宇.饱和砂土液化刚度变化规律预测与离心模型试验观测[J].地基处理,2024,6(6):540-546.[ZHOU Y G, ZHOU Z L, S Y, et al. Stiffness evolution of saturated sand during liquefaction process in centrifugal model test[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, 6(6): 540-546.]
- [13] 赵路朋,王波波,吴若洵.豫北引黄灌区可液化土分布规律研究[J].河南水利与南水北调,2024,53(10):47-49.[ZHAO L P,WANG B B, WU R X, et al. Research on the distribution law of liquefiable soil in the Yellow River water irrigation areas of North Henan[J].Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2024, 53(10): 47-49.]
- [14] 陈国兴.岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.[CHEN G X. Geotechnical seismic engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007.]
- [15] 刘章军,叶燎原,彭刚.砂土地震液化的模糊概率评判方法[J].岩土力学,2008(4):876-880.[LIU Z J, YE L Y, PENG G. Fuzzy probability comprehensive evaluation method for sand liquefaction during earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4): 876-880.]
- [16] 徐增杰. 水泥土桩体加固不同密实度液化砂土的振动台试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2024. [XU Z J. Vibration table test study on the reinforcement of liquefied sand with different densities using cement soil piles[D].Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2024.]
- [17] 赵轩,马淑芝,马硕,等.饱和砂土液化特性的振动台试验研究[J].地震工程学报, 2024, 46(2): 376-387.[ZHAO X,MA S Z,MA S, et al. Shaking table tests on the liquefaction characteristics of saturated sand[J].China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 376-387.]
- [18] 张雪东,侯瑜京,梁建辉,等.饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J].水利学报,2014,45(增刊 2):105-111.[ZHANG X D,HOU Y J, LIANG J H, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of saturated sand foundation[J].Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(S2):105-111.]
- [19] 梁孟根,梁甜,陈云敏.自由场地液化响应特性的离心机振动台试验[J].浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1805-1814.[LIANG M G,LIANG T,CHEN Y M. Centrifuge shaking table modeling of liquefaction characteristics of free field[J].Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2013, 47(10): 1805-1814.]
- [20] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等.液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J].岩土力学,2019,40(10):3767-3777.[XU C S, DOU P F, DU X L, et al. Large-scale shaking table model test of liquefiable free field[J].Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10):3767-3777.]
- [21] 李金宇,王伟,王浩宇,等.地震序列对砂土液化场地条件影响的试验研究[J].自然灾害学报,2024,33(3):217-225.[LI J Y,WANG W,WANG H Y, et al. Experimental study on the influence of earthquake sequences on the conditions of sand liquefaction sites[J]. Journal of Natural Disasters, 2024,33(3):217-225.]

## Shaking Table Test Study on Sand Liquefaction Characteristics in Xixiayuan Irrigation Project

LU Fengmin<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, DONG Jinyu<sup>2</sup>, CAO Tairui<sup>3</sup>, CHU Tianshu<sup>2</sup>, WANG Chuang<sup>2</sup>

(1. Henan Province Xixiayuan Water Conservancy Project Water Conveyance and Irrigation District Engineering Construction Administration, Zhengzhou 450008, China; 2. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Water Conservancy Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** 【Objective】 The liquefaction characteristics of saturated sandy soil under seismic action were deeply explored for determining seismic motion parameters in the seismic fortification of major engineering projects.

【Methods】 Based on seismic simulation shaking table tests, three groups of saturated sandy soil models with different relative densities were prepared. Sensors buried inside the sandy soil were used to monitor various indicators such as excess pore water pressure, excess pore pressure ratio, acceleration response, and soil settlement at different locations within the models. The time-history curves of excess pore water pressure and pore pressure ratio inside the sandy soil models were analyzed to summarize the influence laws of factors such as the peak seismic wave loading and burial depth on the liquefaction characteristics of saturated sandy soil. 【Results】 The test results indicate that as the peak seismic wave loading increases, the liquefaction degree and liquefaction potential of the sandy soil model gradually increase, while its liquefaction resistance gradually decreases. With an increase in the burial depth of the sandy soil, the liquefaction degree and liquefaction potential of the sandy soil model gradually decrease, while its liquefaction resistance gradually increases. The compactness is directly proportional to the liquefaction resistance; the higher the frequency of the seismic wave, the more intense the liquefaction of sandy soil and the lower its liquefaction resistance.

【Conclusion】 The hierarchy of influencing factors is: Seismic intensity (SRI) > Embedment depth > Relative density. These experimental results provide crucial references for subsequent numerical simulation parameter selection and further research on sand liquefaction mechanisms.

**Keywords:** sand liquefaction; shaking table model test; compactness; excess pore water pressure; pore pressure ratio