

饱和砂土液化特性的振动台试验研究

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: 2025年1月17日; 录用日期: 2025年2月11日; 发布日期: 2025年2月18日

摘要

饱和砂土液化是地震循环动荷载作用下常见的工程地质灾害, 往往会对工程结构造成重大破坏。为深入探究不同密实度下饱和砂土的液化特性, 利用振动台设备对相对密度为66%、78%、90%的饱和砂土依次输入6种工况的震动加载试验。通过计算分析超静孔隙水压力、超静孔压比、加速度响应和土体沉降等的发展演化规律, 从而研究地震作用下不同密实度饱和砂土的液化规律。结果表明: 随地震波加载峰值增大, 饱和砂土液化程度增大, 抗液化强度逐渐减小; 密实度与抗液化能力呈正比。

关键词

饱和粉质砂土, 强震区, 液化, 振动台试验, 孔压比

Shaking Table Test Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Sandy

Tianshu Chu

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

Received: Jan. 17th, 2025; accepted: Feb. 11th, 2025; published: Feb. 18th, 2025

Abstract

Liquefaction of saturated sand is a common engineering geological disaster under cyclic dynamic seismic loads, which often causes great damage to engineering structures. In order to further explore the liquefaction characteristics of saturated sand under different density, a vibration loading test of the saturated sand with relative density of 66%, 78% and 90% was carried out under six conditions. The liquefaction laws of saturated sand with different densities under earthquake conditions are studied by calculating and analysing the development and evolution laws of excess pore water pressure, excess pore pressure ratio, acceleration response and soil settlement. The findings

indicate that the degree of liquefaction in saturated sand increases with the peak value of seismic wave loading, while the liquefaction resistance decreases gradually. The compactness of the sand has been found to be directly proportional to its resistance to liquefaction.

Keywords

Saturated Silty Sand, Strong Earthquake Area, Liquefaction, Shaking Table Test, Hole Pressure Ratio

Copyright © 2025 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

砂土液化是地震中常见的地质灾害,也是岩土工程领域的重要研究课题。所引发的地质灾害多样,涵盖地基失效、建筑物不均匀沉降、地面喷砂冒水、公路桥梁破坏等[1]。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[2]。黄文熙[3]首次提出采用动三轴仪进行液化试验,更精确反映液化规律。汪文韶[4]基于大量砂土液化的试验结论,研究不同材料的液化特性及其机理。王锤琦[5]对比分析砂土液化的宏观现象与微观试验,提出宏观与微观两个角度液化判别分析方法。谢定义、吴世明等[6][7]对于液化研究方法、液化作用机理、液化试验方法等基本问题展开深入探讨,进一步完善了砂土液化的研究理论体系。王刚、张建明[8]指出应加强数值模拟研究,且液化引发的土体变形评价是液化研究的关键。对比动单剪、动三轴及共振柱等室内试验,地震模拟振动台试验具有显著优势[9]。

饱和砂土液化判别方法主要为规范法和剪切波速法。土壤液化势的剪切波速判别法[10]中石兆吉法具有稳定性好、在原位土层中测量等优点,但具有一定局限性;Seed 判别法[11]是通过研究砂土的循环阻力比与标准贯入试验两者关联得出的判别方法。

研究旨在深入探讨饱和砂土液化机理及其影响因素,以期为地震工程实践及现场勘察提供理论依据和技术支持。本文探讨不同密实度对砂土液化的影响,并评估现有液化评估方法的适用性和准确性。

2. 振动台模型试验

2.1. 振动台系统

试验于华北水利水电大学地震模拟试验室进行,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 m/s²,最大负载 1500 kg,频率范围为 0.5 Hz~100 Hz。

2.2. 模型箱选取

本次试验设计矩形刚性模型箱(如图 1),尺寸 100 cm (长)×50 cm (宽)×90 cm (高)。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。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,以保证水不在震动中漏出,模型箱内侧粘贴 2 cm 厚泡沫板,以吸收高频波,减少震动过程中的边界效应。

2.3. 基础物理试验

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 2 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，各项物理指标见表 1。



Figure 1. Schematic diagram of the model box
图 1. 模型箱示意图

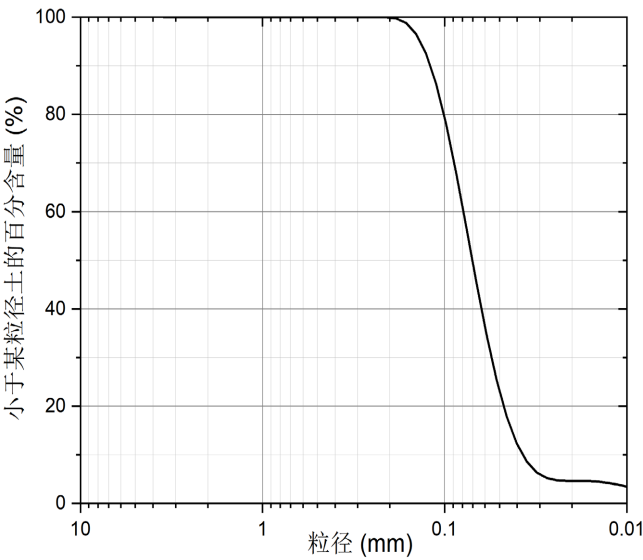


Figure 2. Particle size distribution curve of test soil sample
图 2. 试验土样的粒度分布曲线

Table 1. Soil 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

2.4. 直剪试验

试样选用猪龙河处的特征原状环刀样进行直剪试验，如图 3 所示。本次试验选取四个试样，分别在垂直压力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、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 毫米。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° ,黏聚力为 0.26 kPa。



Figure 3. Undisturbed ring knife specimen
图 3. 原状环刀试样

2.5. 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。振动台因输入频率限制,采用地震波处理软件限制各地震动峰值加速度分别为 0.1 g、0.2 g、0.3 g、0.4 g、0.5 g、0.6 g,将初始地震波进行滤波压缩,处理后时长约为 20 s,如图 4 所示。

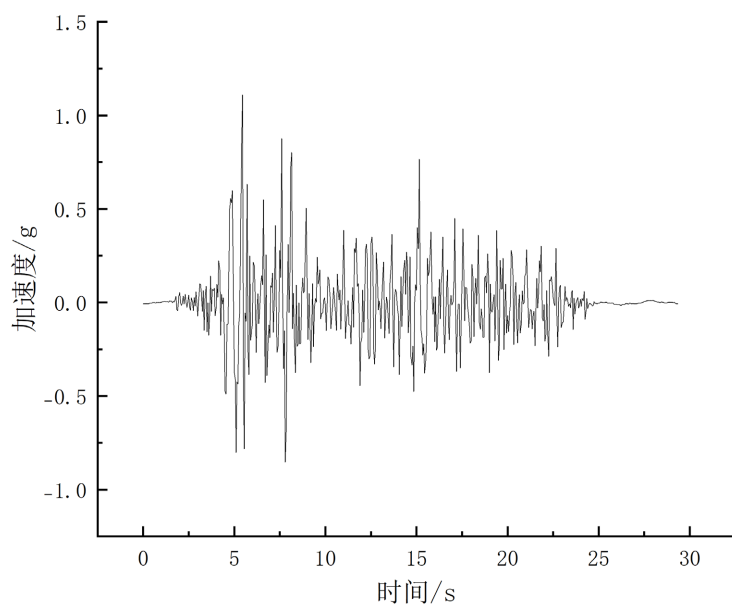


Figure 4. Time course curve of seismic wave acceleration
图 4. 地震波加速度时程曲线

本次试验有相对密度为 66%, 78%, 90%, 3 个饱和砂土模型。输入的 EI-Centor 地震波为水平单向,根据《建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)》[12]相关要求,设计地震波输入加速度峰值分为 6 个工况,如

表 2 进行试验。

Table 2. Shaking table test conditions
表 2. 振动台试验工况

工况序号	地震波类型	加速度峰值/(m/s ²)	加载时间
1	EI-Centor 地震波	0.1 g	20 s
2	EI-Centor 地震波	0.2 g	20 s
3	EI-Centor 地震波	0.3 g	20 s
4	EI-Centor 地震波	0.4 g	20 s
5	EI-Centor 地震波	0.5 g	20 s
6	EI-Centor 地震波	0.6 g	20 s

2.6. 传感器布置

试验设置 5 个孔隙水压力传感器、4 个加速度传感器、4 个土压力传感器。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 5。砂土试样高 90 cm，孔隙水压力传感器分别埋于土表以下 10 cm、25 cm、50 cm、65 cm、80 cm，加速度传感器分别埋于土表下 50 cm、65 cm 处，主要目的测试不同位置加速度随时间变化情况。

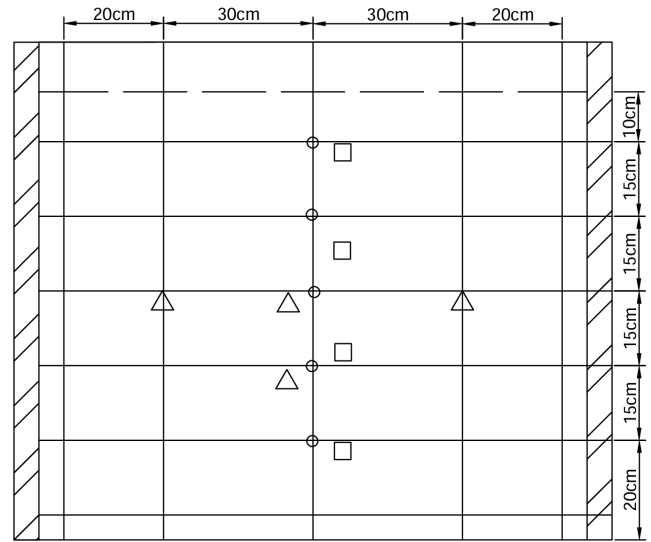


Figure 5. Sensor layout of the model
图 5. 传感器布置

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 6 所示。

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，这说明在本试验中所设计的刚性模型箱及其内壁泡沫垫层对土体在地震作用下的剪切运动产生的影响微乎其微，能够较好地模拟自然土层在地震波作用下的真实振动情况。因此，模型箱及其边界处理方式满足了试验的相关要求。

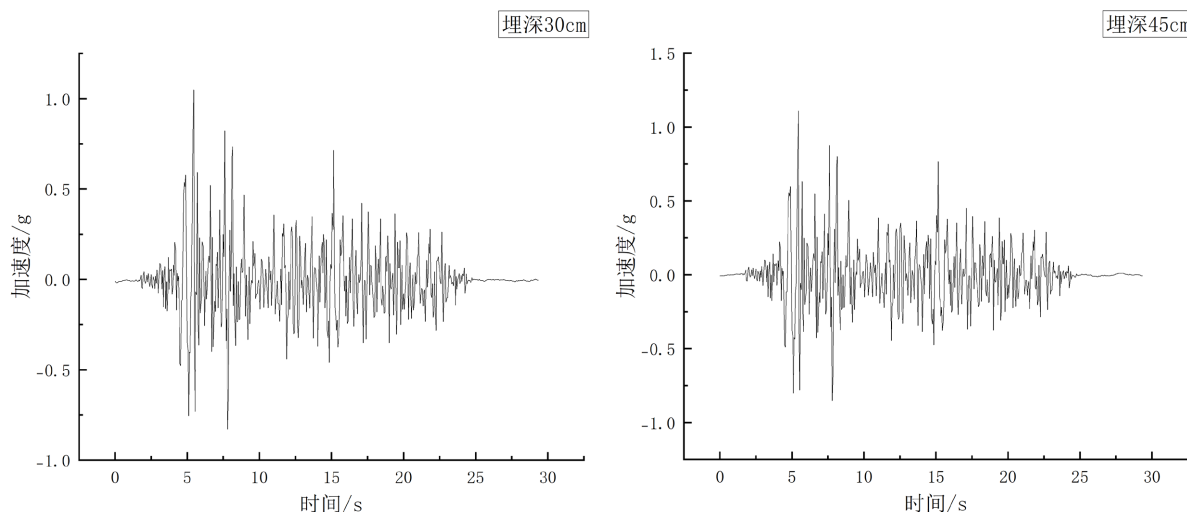


Figure 6. Time history curves of acceleration at different depths

图 6. 不同深处加速度时程曲线

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皆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涌出水, 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; 三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 66% 的土样在加速度峰值为 0.6 g 时沉降 1.8 cm, 相对密度 78% 的土样沉降 1.1 cm, 相对密度 90% 的土样沉降 0.75 cm。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。图 7 为饱和砂土试样液化前后对比。

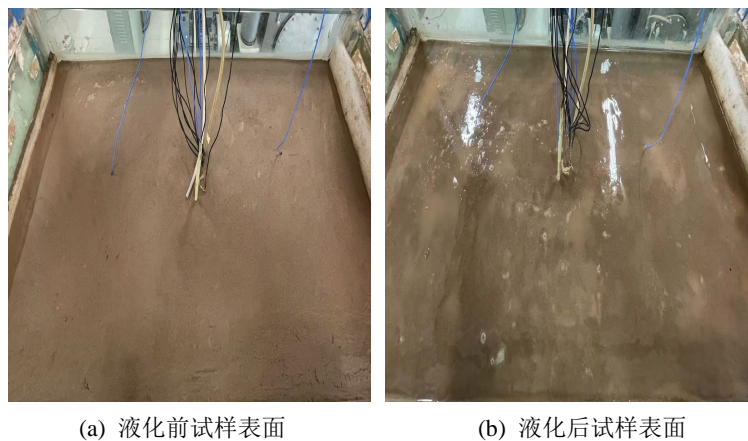
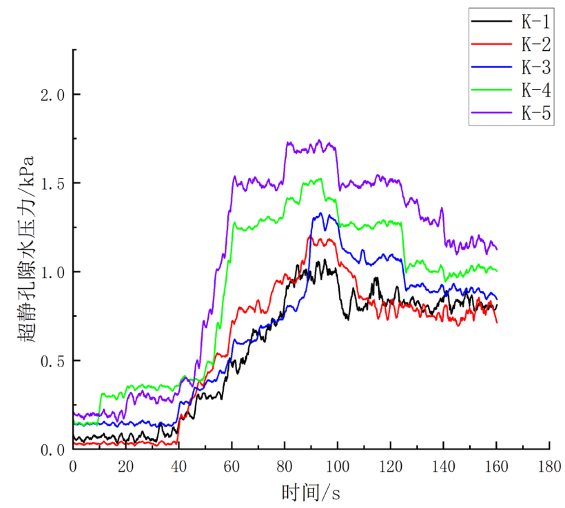


Figure 7. Comparison before and after liquefaction

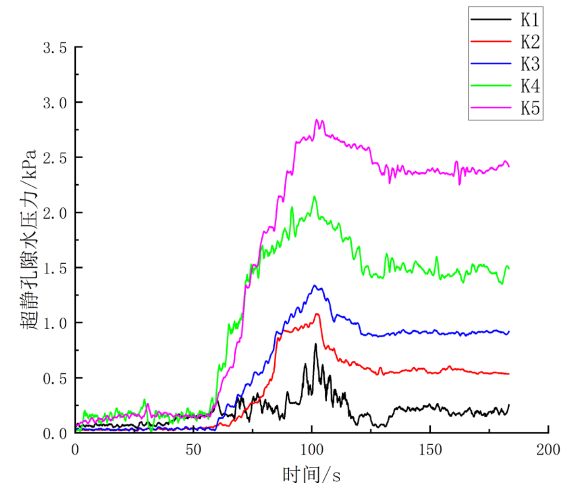
图 7. 液化前后对比图

3.3. 数据分析

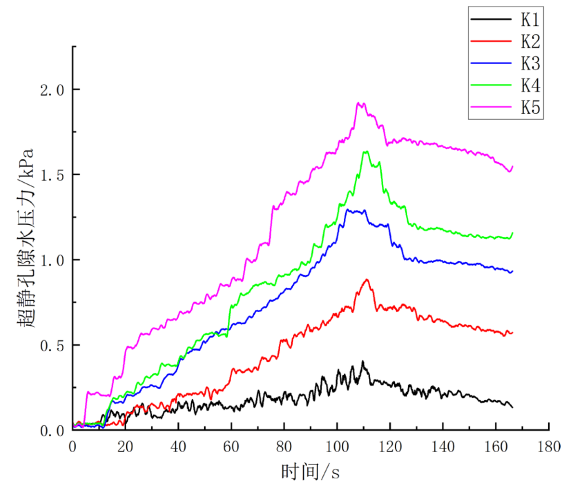
分析数据并绘制不同埋深处的超静孔隙水压力、超静孔压比随时间变化曲线, 如图 8、图 9 所示。



(a) 相对密度 66%

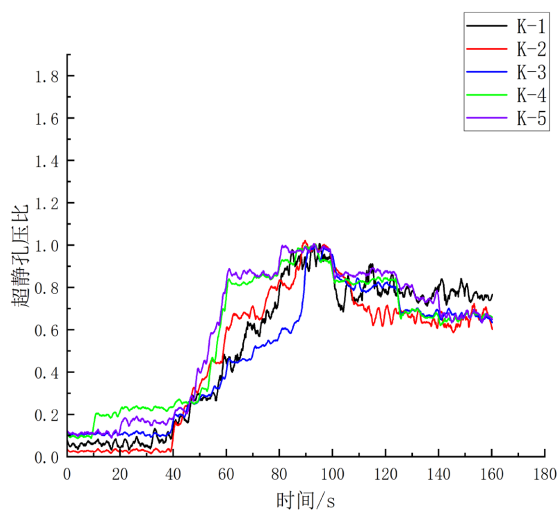


(b) 相对密度 78%

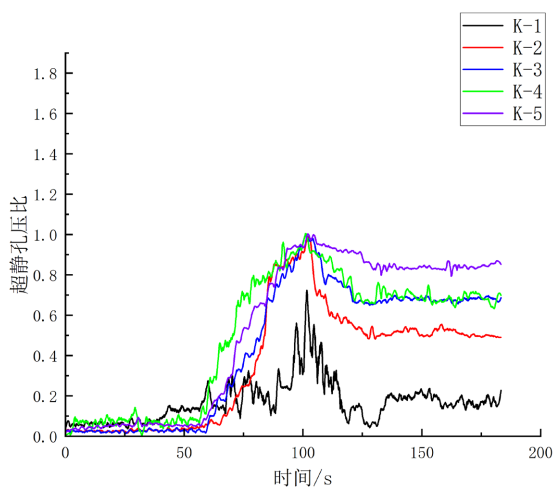


(c) 相对密度 90%

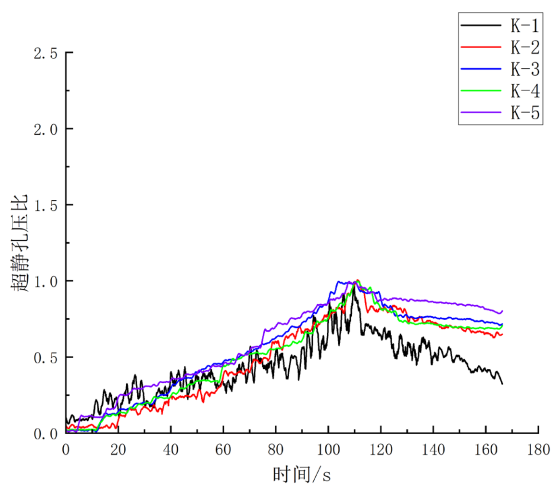
Figure 8. Curve of ultra-static pore water pressure over time
图 8. 超静孔隙水压力随时间变化曲线



(a) 相对密度 66%



(b) 相对密度 78%



(c) 相对密度 90%

Figure 9. Hyperstatic pore pressure ratio curve over time
图 9. 超静孔压比随时间变化曲线

分析图 8、图 9 可知, 振动停止后, 埋深 10 厘米、25 厘米以及 40 厘米处的超静孔隙水压力基本稳定。但中、底部超静孔隙水压力出现了一定程度的消散现象, 说明振动结束后, 土体的中上部率先趋近于稳定。当砂土的相对密度为 66% 时, 在达到 0.1 g 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 0.4 g 时便会发生液化现象, 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; 当相对密度为 78% 时, 同样地, 底部超静孔隙水压力的变动异常剧烈, 在加速度为 0.51 g 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; 当相对密度达到 90% 时, 加速度达到 0.57 g 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。三种不同密实度的饱和砂土试样的孔隙水压力皆自下而上变化, 且底部孔隙水压力变化最为明显, 说明液化是从底部开始, 当土体内孔隙水压力大于土体内有效应力时发生液化。密实度越高, 孔隙水压力在峰值后消散速度越小, 其主要原因是颗粒含量越高, 土样渗透性越小。上述三种情况均是在孔压比达到 1 时发生液化。试验结果确凿地表明, 砂土的密实度越高, 其抗液化的能力就越强; 密实度越低, 液化的程度则越剧烈。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。

4. 结论

- (1) 砂土的密实度与抗液化能力及液化程度密切相关, 密实度越高, 抗液化能力越强, 液化程度越弱; 密实度越低, 抗液化能力越弱, 液化程度越剧烈;
- (2) 在高频地震波加载下, 砂土液化后深部土体状态改变, 会因振动变得更加密实, 且密实度越小, 土体下沉现象越显著, 而埋深较浅处(如 10 厘米、25 厘米、40 厘米)超静孔隙水压力在振动停止后趋于稳定, 更深处有消散情况, 中上部先趋于稳定;
- (3) 饱和砂土液化失稳的因素有: 地震加速度、砂土层埋藏深度、密实度等。

参考文献

- [1] 储方舟, 吴静云, 丁静鹤, 等. 生物水泥技术应用于液化地基处理的研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 91-96.
- [2] 方志, 陆浩亮, 王龙. 土-结构动力相互作用研究综述[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 57-63.
- [3] 黄文熙. 水工建设中的结构力学与岩土力学问题[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [4] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [5] 王锤琦. 地震液化的宏观研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 3-12.
- [6] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992(3): 90-98.
- [7] 吴世明, 徐俊在. 土动力学现状与发展[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 125-131.
- [8] 王刚, 张建民. 地震液化问题研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 575-589.
- [9] 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.
- [10] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 74.
- [11] Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971) Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **97**, 1249-1273. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001662>
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.