

DOI: 10.11779/CJGE20221213

# 地震液化离心机振动台模型试验与 LEAP 研究进展

周燕国<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1,2</sup>, 曹渊<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 离心机振动台模型试验是研究地震液化问题的重要手段, 一方面可重现场地地震响应和揭示液化致灾规律, 为发展工程设计方法提供依据; 另一方面可以作为特定边值问题的标准模型试验数据, 验证数值方法与土体本构模型及其参数选取的合理性。介绍了离心机振动台模型试验的试验原理, 回顾了离心机振动台模型试验在地震液化领域的主要研究进展。围绕由中国、美国、日本和英国等国家高校与研究所联合开展的国际合作项目“液化试验与分析”(LEAP), 重点介绍了若干为提高离心机振动台模型试验可重复性而发展的物理模拟新技术, 包括离心机振动台的台面振动控制技术、模型土体弹性波速测试技术和基于图像分析的动态位移监测技术等。最后针对地震液化领域的若干工程和研究需求, 探讨了离心机振动台模型试验领域的发展趋势。

**关键词:** 地震液化; 离心机模型试验; 物理模拟; 振动台; VELACS; LEAP; 相似律

**中图分类号:** TU411.8; TU435

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2024)01-0054-09

**作者简介:** 周燕国(1978 - ), 男, 博士, 教授, 主要从事土动力学与地震工程、岩土工程防震减灾、地下基础设施性能设计与抗震韧性以及离心物理模拟方向的研究工作。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

## Centrifugal shaking table tests on soil liquefaction and progress of LEAP projects

ZHOU Yanguo<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1,2</sup>, CAO Yuan<sup>1</sup>, CHEN Yunmin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, MOE Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Center for Hypergravity

Experiment and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. China State Construction Silkroad

Construction Investment Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The centrifugal shaking table test is one of the most promising approaches to study soil liquefaction problems. On one hand, it can reproduce seismic response and reveal the ground failure mechanism induced by soil liquefaction, providing the scientific basis for developing the design methods for engineering practices; on the other hand, the test results can verify the relevant methods and constitutive models for soils used in numerical simulation. The principles of the centrifugal shaking table tests are briefly introduced and the research progress of centrifuge modeling for soil liquefaction problems are reviewed. Then the liquefaction experiments and analysis project (LEAP) and its verification and validation procedures are described. The new techniques developed to improve the repeatability of the centrifugal shaking table tests are introduced, including the shaking control of the shaking table, measurements of elastic wave velocities under high centrifuge acceleration, and particle image velocimetry (PIV)-based real-time monitoring of dynamic displacements. Finally, the research trends of the centrifugal shaking table tests in the field of soil liquefaction are discussed.

**Key words:** liquefaction; centrifugal model test; physical modeling; shaking table; VELACS; LEAP; scaling law

## 0 引言

中国处于环太平洋地震带和欧亚地震带的交汇处, VII 度以上的高烈度区覆盖了全国一半以上的土地, 包括了大部分的省会城市和百万以上人口大城市。近年来强震频发, 场地地震液化灾害严重。揭示土体液化机理是减轻地震液化灾害的关键, 目前主要研究方法包括: ①原位调查。通过对液化震害场地调查, 分析液化破坏机制, 但是原位调查和监测尺度大、历

时长、难度高, 且由于地震发生的时空不确定性, 有效数据较少且无法重复。②理论或数值分析。根据室内单元体试验揭示土体液化行为规律, 通过简化假设建立土体液化本构方程, 并用于数值分析。该方法的可靠性依赖于数值方法和边界条件设置, 以及土体本

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51988101, 52278374, 51978613);  
高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B18047)

**收稿日期:** 2021-05-31

构模型及参数的确定, 计算分析效果参差不齐。③常重力振动台模型试验。此方法能够简化场地条件及控制输入地震动参数, 再现场地地震液化响应。但高倍缩尺带来的土体应力-应变行为失真使模拟结果与原型相差较大。④离心机振动台模型试验。该技术在保留常重力振动台优势的同时通过离心机产生超重力场恢复原位自重应力, 可正确模拟土体应力-应变关系。因此, 离心机振动台模型试验被国内外岩土工程界认为是最有效的地震液化物理模拟手段之一<sup>[1]</sup>。迄今, 在地震液化离心物理模拟领域开展了两次重要的国际合作研究: 第一次是 20 世纪 90 年代开展的 VERification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies (VELACS) 项目<sup>[2]</sup>, 第二次是近期开展的 Liquefaction Experiments and Analysis Projects (LEAP) 项目<sup>[3]</sup>。两次国际合作研究不仅为液化模拟数值方法和土体本构模型的计算能力评估与检验提供了高质量的离心机模型试验基准数据, 而且有力促进了离心物理模拟技术本身的发展与进步。

本文简要介绍了离心机振动台模型试验原理, 回顾了离心物理模拟在地震液化领域的研究进展。然后围绕国际合作研究项目 LEAP, 介绍了若干提高离心机振动台模型试验质量与可重复性的新技术。最后, 探讨了离心物理模拟在地震液化领域的发展趋势。

# 1 离心机振动台模型试验原理与技术

## 1.1 离心机振动台模型试验原理

离心机振动台模型试验原理如图 1 所示: 通过离心机高速旋转产生的离心力来恢复模型地基自重应力, 使缩尺后的模型土体产生与原型相同的自重应力, 保证模型土体的应力-应变关系与原型土体相同<sup>[4-7]</sup>; 进一步, 安装在离心机吊篮的机载振动台在离心机高速旋转过程中产生振动, 模拟实际场地的基岩地震动输入。

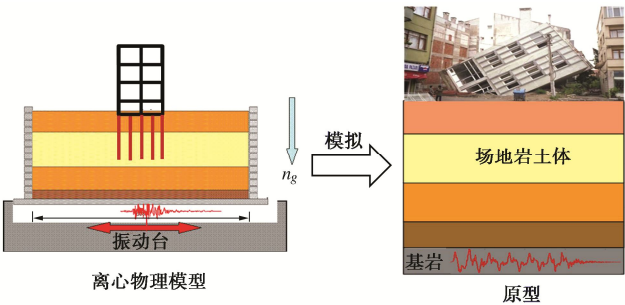


图 1 离心机振动台模型试验原理

Fig. 1 Principles of centrifugal shaking table tests

根据模型试验原理, 模型响应需要根据相似律换算才能得到原型响应。地震液化问题的离心机振动台

相似律可以根据 Zienkiewicz 提出的固-液两相介质理论给出土体运动的控制方程<sup>[8]</sup>, 然后根据相似定律给出相似系数的约束方程。假设用原型土体制作一个尺寸缩小为  $1/n$  的模型地基, 则需将此模型地基置于  $ng$  的离心加速度场中 ( $g$  为地球重力加速度), 使模型材料加重  $n$  倍以满足自重应力相似条件。选择重力加速度相似系数  $\lambda_g$ 、几何相似系数  $\lambda_l$  及密度相似系数  $\lambda_\rho$  为设计参数, 则离心模型试验相似律如表 1 所示。对于地震液化问题中出现的渗流时间和动力时间不一致的矛盾, 目前常用黏滞流体 (如甲基硅油或纤维素溶液) 代替水作为饱和孔隙流体, 以降低模型地基的渗透系数来达到固结时间与动力时间的一致<sup>[9]</sup>。

表 1 离心机模型试验相似律

Table 1 Scaling laws of centrifuge modeling		
物理量	相似关系	相似系数 (原型/模型)
长度	$\lambda_l$	$n$
速度	$(\lambda_g)^{0.5}(\lambda_l)^{0.5}$	1
加速度	$\lambda_g$	$1/n$
密度	$\lambda_\rho$	1
力	$\lambda_\rho(\lambda_l)^3\lambda_g$	$n^2$
能量	$\lambda_\rho(\lambda_l)^4\lambda_g$	$n^3$
应力	$\lambda_\rho\lambda_g\lambda_l$	1
应变	1	1
动力时间	$(\lambda_l)^{0.5}(\lambda_g)^{-0.5}$	$n$
渗流时间	$(\lambda_l)^2$	$n^2$
频率	$(\lambda_l)^{-0.5}(\lambda_g)^{0.5}$	$1/n$

## 1.2 离心机振动台模型试验设备发展

从 20 世纪 80 年代初期开始, 英国、日本、美国的离心机实验室研制了爆炸激振、压电激振和电磁激振等多种离心机振动台系统, 其中, 电液伺服激振系统拥有振动能力强、振幅和频率控制性能好的优点而成为主流类型<sup>[10]</sup>。离心机振动台的出现推动离心物理模拟从“静力”进入“动力”阶段。图 2 (a) 展示了国内外现有主要离心机的模拟能力, 以加州大学戴维斯分校 (UCD) 和美国陆军工程兵团 (USACE) 为代表的巨型离心机容量已经突破 1000 g·t, 能够满足大型岩土工程中的静力模拟需求。图 2 (b) 总结了全球主要离心机机载振动台的模拟能力, 相较于离心机的能力, 机载振动台的负载尚未突破 100 g·t, 比静力试验容量低一个数量级, 难以适应现有重大工程抗震物理模拟需求。

国内离心机物理模拟装备建设起步相对较晚, 但发展迅速, 目前中国已有二十多家高校和科研单位建成土工离心机。图 2 (a) 中以香港科技大学 (HKUST)、中国水利水电科学研究院 (IWHR)、浙江大学 (ZJU)、成都理工大学 (CDUT) 以及天津水运工程科学研究所 (TIWTE) 为代表的大型离心机容量均超过 400 g·t, 处于国内外大型机的序列。在机载振动台方面, 2002

年南京水利科学研究所 (NHRI) 研制出大陆首台电液式土工机载振动台, 容量为  $3\text{ g}\cdot\text{t}$ , 频率为  $100\text{ Hz}$ <sup>[11]</sup>。后续国内 IWHR、ZJU、CDUT、TIWTE 以及中国地震局工程力学研究所 (IEM) 等单位相继建设了先进的机载振动台。

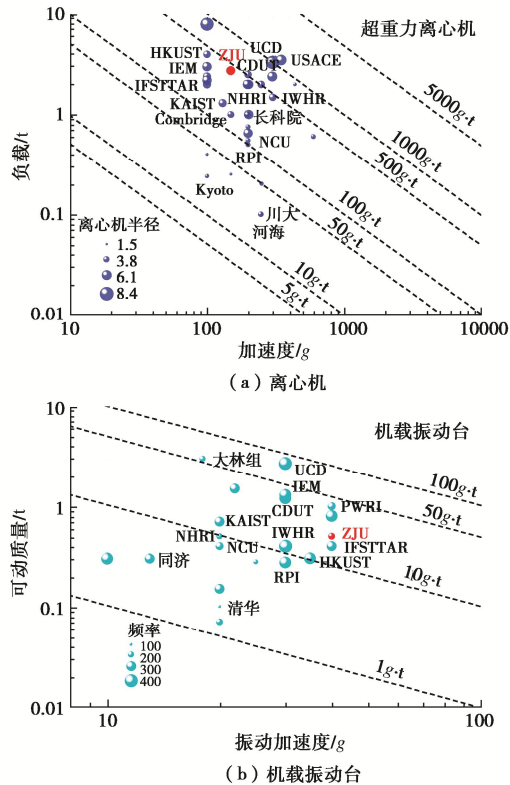


图2 离心物理模拟能力

Fig. 2 Capacity of centrifuge modeling

值得一提的是, 中国 HKUST、美国伦斯勒理工 (RPI) 和韩国科学技术院 (KAIST) 等单位建设了离心机水平双向振动台, 中国 IWHR 和 TIWTE、美国 UCD 和日本东京工业大学等单位则建设了水平-竖向双向振动台, 以研究地震动方向性的影响。

### 1.3 地震液化离心物理模拟研究进展

图3展示了物理模拟在一个具体工程问题研究逻辑链里的作用: 以地震液化问题为例, 根据研究目标对地震液化问题的初始条件、边界条件和地震荷载等简化得到具有明确物理学意义的概念模型, 然后针对概念模型工况制备缩尺模型和开展试验, 重现地基液化响应和观测致灾过程, 为建立地震液化评价或防治的简化方法提供依据。物理模型试验的另一重要作用是对数学模型的计算结果进行验证。

20 世纪 80 年代, 欧美国家开始利用离心机振动台模型试验研究地震液化问题。1981 年, Lamb 利用离心机振动台模型试验研究水平砂层液化问题<sup>[12]</sup>; 1988 年 Hushmand 等<sup>[13]</sup>利用剪切箱开展水平砂土地液化问题。1990—1993 年, 由美国、英国、日本等国

的 20 多家单位联合开展 VELACS 项目, 由加州理工学院 (Caltech)、加州大学戴维斯分校 (UCD)、剑桥大学 (CU) 等 5 家单位对 9 种典型的堤坝或地基工况进行了离心机振动台模型试验, 得到了如下 2 点重要认识<sup>[14]</sup>: ①只要保持相同的制样方法且振动台性能参数允许, 则离心物理模型试验具有较好的可重复性, 能可靠模拟地震液化边界值问题; ②振动台频响特性、模型箱边界效应和振动台不可控竖向振动分量等会影响离心模型试验质量, 需进一步研究。

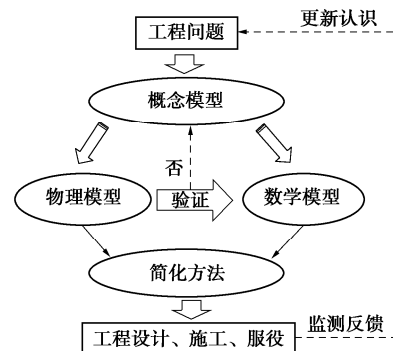


图3 物理模型试验的作用

Fig. 3 Role of physical modeling

## 2 LEAP 项目进展

### 2.1 项目背景及简介

VELACS 项目之后的近 30 a 来, 离心物理模拟技术得到了长足进步。国内外研究机构新建或更新了容量更大、功能更强的离心机和机载振动台; 加速度、孔压、位移等传感器更加微型化和高精度, 提高了模型试验响应监测的种类及数据质量。另一方面, 随着计算机技术的不断发展, 基于 Biot 固结理论耦合的有效应力分析程序已成为液化问题主流手段, 国内外发展出一批优秀的数值计算平台, 如 FLAC、OpenSees、FLIP、PLACXIS、GEODYNA<sup>[14]</sup>及 DBLEAVES 等<sup>[15]</sup>。此外, 国内外学者提出了一些能够合理描述土体剪胀性的砂土液化本构模型如 CycLiqCPSP<sup>[16]</sup>, PDMY<sup>[17]</sup>、PM4Sand<sup>[18]</sup>、Cocktail Glass<sup>[19]</sup>及 SANISAND<sup>[20]</sup>等。上述本构模型及软件计算平台亟需高质量的模型试验数据加以检验与验证。在此背景下, 从 2013 年起至今, 由中国、美国、日本、英国等多家高校和科研单位合作开展了系列 LEAP 项目。参加 LEAP 的离心机物理模拟团队包括 ZJU、CU、UCD、RPI、KAIST、京都大学 (KU)、东京工业大学 (TIT)、法国交通发展规划和交通网络科技研究院 (IFSTTAR) 以及中国台湾中央大学 (NCU) 等, 而数值分析团队包括中国清华大学 (Tsinghua)、乔治华盛顿大学 (GWU)、加州大



学圣地亚哥 (UCSD) 和 KU 等。

LEAP 研究目的是通过高质量的单元体试验和离心物理模型试验科学评估、检验和验证地震液化问题数值计算中常用土体本构模型和数值方法的性能, 并建立土体液化本构模型的科学评价方法。LEAP 项目建立了如图 4 所示的评价土体本构模型和数值方法计算能力的 V & V (Verification & Validation) 框架<sup>[3]</sup>。首先, LEAP 团队对 Ottawa-F65 砂土开展了详尽的物理性质和单元体材料力学试验以确定土体物理力学参数, 为本构标定提供数据; 然后, 物理模拟团队各自独立完成离心机基准试验; 最后, 数值分析团队对离心机试验分别开展 Class A、Class B 及 Class C 模拟。Class A 模拟是在物理模拟团队开展离心机试验之前, 依据单元体试验标定的本构参数和设计的台面目标输入波形进行模拟, 为“全盲”预测; Class B 模拟是在物理模拟团队完成离心机试验之后, 依据单元体试验标定的本构参数和台面输入实测波形进行模拟, 为“半盲”预测; Class C 模拟则是在离心机试验公布所有试验结果之后, 根据所有模型试验测试数据试算优化本构参数来提高数值分析与物理模拟数据的吻合度, 是一种“明测”<sup>[21]</sup>。

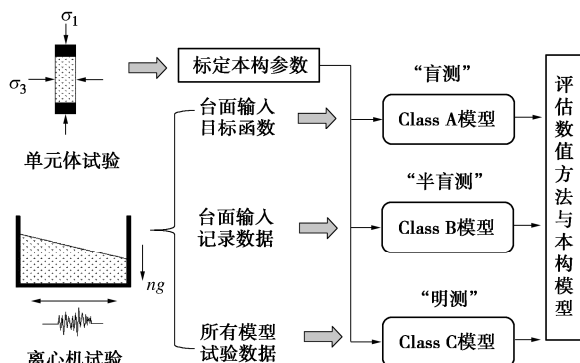


图4 LEAP 的标定与验证研究框架

Fig. 4 V & V framework of LEAP projects

上述工作完成后, 研究成果上传至 DesignSafe 网站开放共享 (<https://www.designsafe-ci.org/>)。需要强调的是, LEAP 项目的目标并不是根据数值计算吻合度来评价数值计算方法与某一本构模型的优劣, 而是评估该本构模型在模拟土体某一行为的能力, 同时分析计算结果与试验数据差异的原因。

LEAP 项目在前期系统研究了饱和缓坡场地振动液化问题, 其离心试验的模型布置如图 5 所示, 对应原型场地为水平宽度 20 m, 中部高 4 m 的倾角 5° 饱和斜坡。模型中部的传感器用于监测斜坡地震响应, 两侧埋置加速度计和孔压计用于观测刚性箱的边界效应。如图 6 (a) 所示, 相对于水平场地, 倾斜场地模型的加速度时程曲线会出现明显的“尖峰”。

是由土体大剪应变剪胀引起, 一般发生在加速度上坡向时 (位移为下坡向), 土体更易剪胀。此外, 浅层土体由于围压小更易剪胀, 因此“尖峰”在上层加速度计中更明显。倾斜场地模型的孔隙水压力时程也与水平场地显著不同。图 6 (b) 对比了 P1~P4 的超静孔隙水压力比 ( $r_u$ ) 的时程曲线: 与水平场地不同的是,  $r_u$  达到 1 之后会突然下降, 产生向下的“尖峰”, 且产生“尖峰”的时间与加速度的“尖峰”一致。孔压向下的“尖峰”的原因是土体剪胀吸水, 导致孔压突然下降。土体的应力-应变滞回圈如图 6 (c) 所示: 在第一象限由于剪胀导致孔隙水压力下降, 土体会迅速恢复剪切刚度并承受较大的剪应力, 应力-应变滞回圈产生“剪胀峰”; 当土体表现剪缩时, 孔隙水压力上升, 土体又会迅速丧失剪切刚度, 基本不能承受剪应力, 应力-应变滞回圈表现为“平躺”。

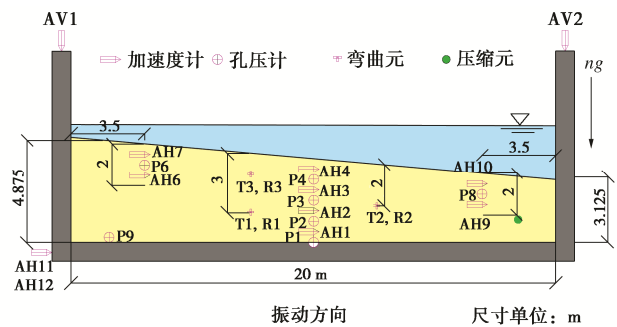


图5 LEAP 物理模拟模型布置

Fig. 5 Model instrumentations of physical model in LEAP

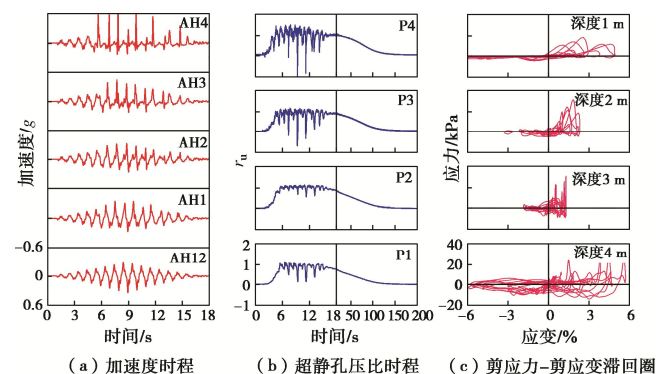


图6 浙江大学 LEAP 模型试验结果

Fig. 6 Centrifugal test results of ZJU in LEAP

## 2.2 LEAP 离心物理模拟技术进展

LEAP-GWU-2015 的模型试验表明, 总体上模型试验可重复性较好, 但不同单位之间仍然存在一定的离散性。Kutter 等<sup>[22]</sup>分析认为, 土体密度、模型饱和度和台面输入荷载控制的差异是主要原因。此外, 基于停机后人工测量斜坡地表标记点得到的液化侧移数据精度较低, 需发展更可靠的测量手段。为进一步提高离心机振动台模型试验的监测精度和可重复性, 浙

江大学离心物理模拟平台在 LEAP 项目中发展了离心机振动台振动控制、弹性波速测试及基于图像分析的动态位移监测 (PIV) 等关键技术。

### (1) 离心机振动台控制技术

Zeghal 等<sup>[23]</sup>研究表明, 输入波形的频率和幅值是影响土体动力响应的关键因素, 精确控制输入波形是离心机振动台模型试验可重复的前提。由表 1 可知, 离心机振动台输出波形振幅扩大  $n$  倍, 频率提高  $n$  倍, 加之振动台面信号受到离心机吊篮-振动台-模型箱系统相互作用影响, 其台面输入的振动控制难度很大。Zhou 等<sup>[24]</sup>根据离心机振动台的机械液压结构和振动控制原理, 建立了 ZJU-400 离心机吊篮-振动台-模型箱系统相互作用力学模型, 通过仿真分析和模型试验发现: 离心机振动台系统的频响函数受台面振动幅值、模型箱 (及模型地基) 参数以及离心加速度等因素的影响, 其中振动幅值对频响系数的影响占主导地位。在此基础上提出了基于频响函数簇的前馈振动控制方法, 通过预先调制输入波形实现一次精准施振。图 7 对比了 LEAP-Asia-2019 试验中不同单位的振动控制效果 (滤波前), 可以看出浙江大学振动控制方法可精准再现目标波形, 保证了台面振动控制的可重复性。

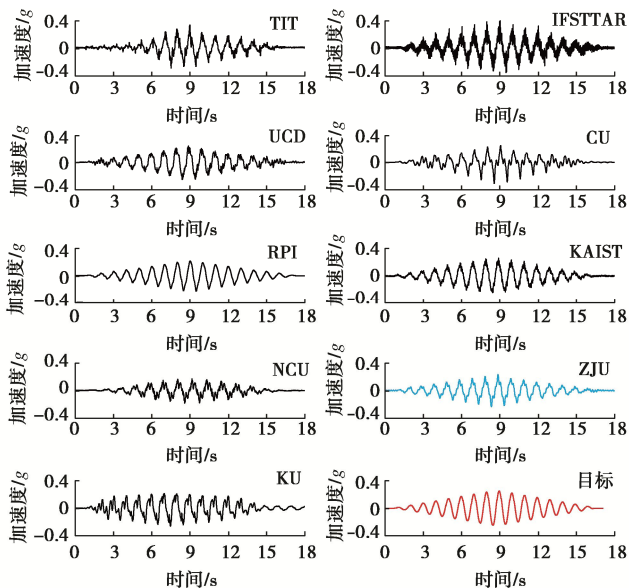


图 7 LEAP 离心机振动台振动控制效果对比

Fig. 7 Achieved and target base motions in LEAP

### (2) 微型孔压静力触探测试技术

静力触探 (CPT) 测试技术是岩土工程领域常用的原位测试技术, 1980 年代以后逐步应用到离心机模型试验。Zhou 等<sup>[25]</sup>研发了浙江大学微型孔压静力触探 (CPTu) 测试系统并开展了一系列试验, 结果表明该 CPTu 测试系统可以用于土类识别、土体密度、渗透性、内摩擦角等物理力学参数的评价。LEAP 项目研发了统一规格的 CPT 探杆, 以避免不同实验室不同规

格触探设备带来的试验结果差异。试验中根据 CPT 的端阻评价模型地基的密度。图 8 为 LEAP-UCD-2017 试验中模型地基 2 m 深度处砂土干密度与端阻的关系, 可以看出浙江大学的试验结果基本落在 95% 置信区间内, 再次证明了该触探装置的可靠性。

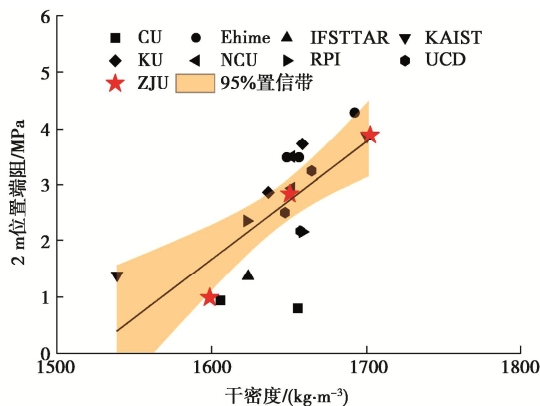


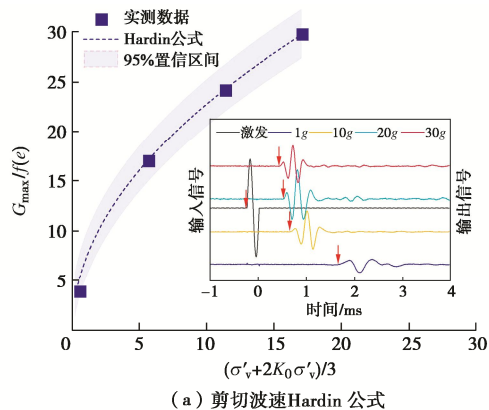
图 8 LEAP-UCD-2017 模型试验砂土干密度与 CPT 端阻

Fig. 8 Tip resistances and dry densities of sand in LEAP-UCD-2017 experiments

### (3) 弹性波速测试技术

岩土体材料的弹性力学参数如小应变剪切模量  $G_{\max}$ 、杨氏模量  $E$ 、剪切波速  $v_s$  和压缩波速  $v_p$  等是岩土工程分析与设计的重要参数, 广泛用于建筑场地类别划分、场地动力响应分析和砂土液化判别等。由于离心物理模拟显著的“缩尺-缩时效应”, 超重力环境下弹性波测试对设备的微型化、高频响、测试精度及抗电磁干扰能力提出了很高要求。

周燕国等<sup>[26]</sup>详细阐述了浙江大学弹性波测试系统和性能。在 LEAP 项目试验中, 浙江大学利用该系统得到的弹性波速检验模型地基的密实度和饱和度。图 9 (a) 给出了在离心模型试验中采用压电弯曲元测量剪切波速, 然后用 Hardin 公式进行拟合, 表明不同  $g$  值下测得的试验结果高度一致, 模型地基均匀。图 9 (b) 利用压电压缩元对饱和后的模型地基进行压缩波速测试, 经检测饱和度达 99.5% 以上, 保证了模型地基孔压响应的准确性。



(a) 剪切波速 Hardin 公式

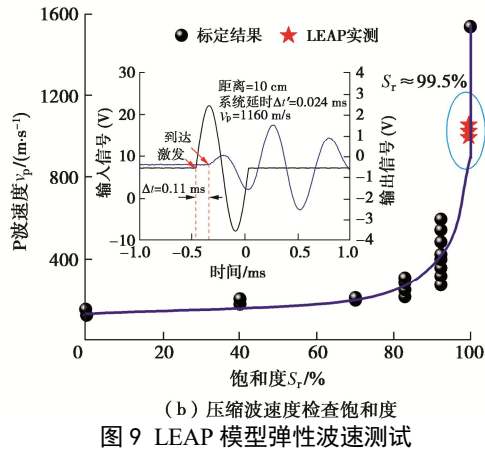


图 9 LEAP 模型弹性波速测试  
Fig. 9 Measurements of elastic wave velocities in centrifuge model

#### (4) 基于图像分析的动态位移监测技术

倾斜场地地震液化时会产生较大的侧移, 甚至失稳流滑, 如 2018 年印尼 Palu 地震 ( $M_w=7.5$ ) 引发 Petobo 地区缓坡场地大范围长距离流滑, 造成严重灾害<sup>[27]</sup>, 因此在物理模型试验中实时监测边坡变形尤为重要。目前物理模型试验常用的位移计只能监测边坡沉降, 难以监测边坡侧移。通常的做法是利用深度尺加上模型箱两侧的刻度标尺人工测量得到振动前后标记点的位置的三维坐标, 通过两次坐标之间的变化计算得到侧移。但是人工测量只能得到残余位移值, 无法得到振动过程中的动态位移时程。针对该问题, 浙江大学研发了基于图像分析的动态位移监测系统。如图 10 所示, 该系统主要由有机玻璃板、相机支架及小型高速相机组成。在制模完成后, 将十字型的标记点放到模型表面, 然后将有机玻璃板安装在模型上方, 并浸入液面 5~10 mm, 以抑制振动过程中液面晃动产生的波纹, 保证高速相机的成像质量。随后将相机支架安装在玻璃板上, 并将 5 台相机安装在相机支架上。试验过程中, 高速相机录制高帧率视频并储存。试验结束后, 将所需时间段的视频解析为图像序列, 利用 PIV 技术<sup>[28]</sup>分析标记点的动态位移时程。该系统组成简单, 无需额外的数据采集系统, 能实现对整个模型动态响应过程中地表位移场的实时监测, 显著降低了试验监测难度和成本。

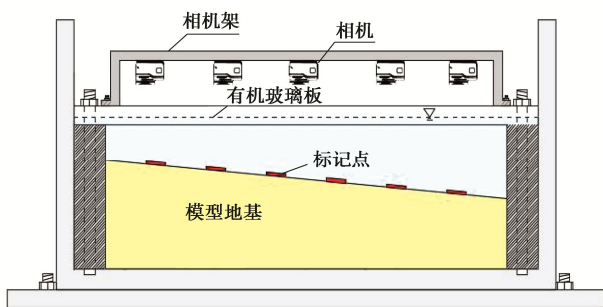


图 10 动态位移监测系统剖面图<sup>[32]</sup>

Fig. 10 Dynamic displacement monitoring system

图 11 给出了 LEAP 项目试验中, 浙江大学利用上述系统测量的坡体地表某一标记点的下坡向动态位移时程。为检查结果的可靠性, 在十字标记点上选取了 5 个微小区域进行 PIV 分析, 结果基本重合。同时, 停机后人工测量得到的残余位移与该系统实测的残余位移也一致, 表明该测量系统的可靠性。

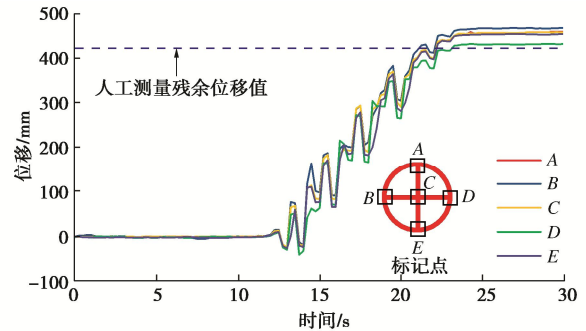


图 11 地表标记点动态位移时程

Fig. 11 Time histories of lateral displacement obtained by dynamic displacement monitoring system

### 3 研究需求与发展趋势

当前离心物理模拟技术得到了长足的发展, 对地震液化问题的研究和工程应用起到了很大的推动作用。鉴于国内外地震高烈度区重大工程建设与防震减灾的重大需求, 该领域尚存在若干需要解决的重要问题。

(1) 深厚覆盖层砂性土地震液化问题。中国西南高烈度区进行大规模水电开发和川藏线建设, 大江大河的河床多发育易液化深厚覆盖层。百米级高坝的坝基土体承受数兆帕级别的上覆应力。这些重大工程几何尺度巨大 (高/深达到或大于百米级), 场地条件复杂, 地震烈度高, 坝体坝基抗强震设计、建设与安全服役超出现有规范的考虑范围。国内外主要采用高围压单元体试验和离心机振动台物理模拟研究此类问题<sup>[29-30]</sup>。鉴于已有离心机振动台模拟能力低于  $100\text{ g}\cdot\text{t}$ , 模拟的原型高度 (深度) 一般不超过 50 m, 尚无法直接模拟百米级尺度的大型岩土工程。为解决此难题, 第一种方法是研发负载能力更大的离心机及机载振动台, 但成本巨大且面临很多技术挑战; 第二种方法是在离心物理模拟平台的基础上发展不等应力相似律, 突破现有离心物理模拟等应力假设下相似律的缩尺限制。LEAP-Asia-2019 研究 Iai 等<sup>[31]</sup>提出的两阶段不等应力相似律的适用性, 表明该方法在孔压消散, 土体变形等方面任存在问题, 需进一步改进<sup>[32]</sup>。

(2) 砂砾土地液化灾害机理与评价。2008 年中国汶川地震中发现了大量砂砾土地液化现象<sup>[33-36]</sup>, 其液化致灾机理值得深入研究。离心模型试验是揭示



砂砾土液化机理和致灾效应的理想手段,但在原型材料到室内的模型材料缩制上存在难题。对于细粒土,可直接采用原型材料开展离心模型试验(即同质模型);但是含有砾石组分的砂砾土若采用原型材料,会带来模型地基制备不均匀、砾石颗粒尺寸效应明显等问题,导致试验难以开展或不同试验结果不可重复。因此,需要基于大尺寸单元体材料力学试验发展基于异质材料模型的离心模型试验相似律,为离心模型试验中砂砾土缩尺制备提供科学依据。

(3) 砂土液化全过程物理模拟难题。饱和砂土液化全过程涉及复杂的相变(态转化)。如图 12 所示,地震前,水平场地土体颗粒相互接触,为稳定的固液两相介质;地震时,在循环剪应力作用下土体有剪缩趋势并产生超静孔隙水压力,土体有效应力及颗粒间接触逐渐减小,出现软化;随着振动持续,超静孔隙水压力持续累积直至土体有效应力降为零,土颗粒完全无接触、土体发生完全液化,此时的土体表现为非牛顿流体介质;地震结束后,随着超静孔隙水压力消散,土颗粒再固结形成土骨架力链,土体有效应力增加,刚度和强度逐步恢复,土体重新变为稳定的固液两相介质。现有离心机振动台模型试验的动力相似律是建立在饱和土体固液两相介质控制方程基础上的,对于砂土液化前和液化后孔压消散过程的模拟基本合理,而土体完全液化后表现为非牛顿流体,此时原有“固-液”两相介质控制方程已经不适用,由此推出的物理模拟相似律可能不再适用。为了模拟砂土液化全过程,必须考虑复杂的相变过程,建立能够描述液化全过程的控制方程,发展相应的本构关系。例如, Ye 等<sup>[37]</sup>建立了能够描述砂土液化前后行为的统一本构关系,这为研究砂土液化前后相似律适用性和发展砂土液化全过程物理模拟方法提供了参考。

(4) 易液化场地土-结构动力相互作用问题。目前主要利用常重力振动台和离心机振动台模型试验研究土-结构动力相互作用。常重力振动台能合理再现结构模型的塑性破坏,但由于岩土水自重应力失真导致其无法准确模拟土-结构动力相互作用。与常重力振动台相比,离心机振动台模型试验还原了岩土水介质的自重应力,可准确模拟土与结构的动力相互作用。然而,由于离心机模型缩尺过大,试验中结构物相似设计和模型制作存在一定的技术困难,现有研究主要关注结构的弹性响应,难以再现结构的塑性破坏。近期有学者开始尝试将常重力振动台与离心机振动台联合<sup>[38]</sup>,或将物理模拟与数值分析混合<sup>[39-40]</sup>,研究地震荷载下易液化场地土-结构动力相互作用机理,为评估地基、基础与上部结构抗震性能和发展先进的抗震设计方法提供了契机。

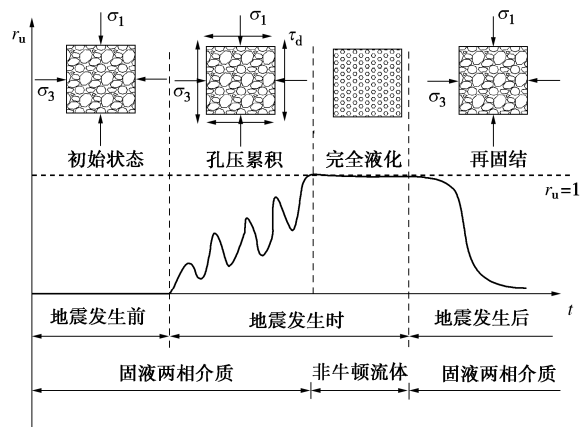


图 12 地震液化全过程的相变(态转化)示意图

Fig. 12 Schematic diagram of phase/state transformation during soil liquefaction

## 4 结 论

本文简要阐述了地震液化离心机振动台模型试验技术内涵和概况,并介绍了国际合作项目 LEAP 的研究框架和物理模拟方面的具体进展,得到以下 4 点结论。

(1) 离心物理模拟是研究场地与地基地震液化最有效的试验手段,一方面可以重现地震液化响应过程,揭示致灾规律;另一方面可对数值分析结果进行验证,评价数值算法可靠性和本构模型及其参数选取的合理性。

(2) 浙江大学在 LEAP 项目中发展了离心机振动台振动控制、弹性波速测试及基于图像分析的动态位移监测等离心物理模拟试验新技术,显著提高了模型试验结果的可重复性。

(3) LEAP 项目的离心机振动台模型试验发现,与水平场地相比,倾斜场地砂土液化时剪胀效应明显,当振动加速度为上坡向时,此时位移下坡向,加速度、孔压及应力-应变滞回圈会出现“剪胀峰”;当振动加速度为下坡向时,此时位移上坡向,应力-应变滞回圈表现为“平躺”。

(4) 以超深厚覆盖层为代表的复杂初始应力条件、以砂砾土为代表的复杂土性、以振动液化相变为代表的复杂过程和诸如港口码头等易液化场地土-结构动力相互作用为代表的复杂服役工程对象,对地震液化研究提出了新挑战。需要进一步提高离心振动台物理模拟设备性能和探索新的相似律,为突破上述挑战提供科学手段。

## 参考文献:

[1] 王年香,章为民. 混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研

- 究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(4): 504-507. (WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Dynamic centrifuge model test for concrete face rock fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(4): 504-507. (in Chinese))
- [2] ARULANANDAN K, SCOTT R F. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems[M]. Rotterdam: Balkema, 1993.
- [3] MANZARI M T, KUTTER B L, ZEGHAL M et al. LEAP projects: concept and challenges[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (4th GEDMAR). Oxford, 2015.
- [4] 陈云敏, 马鹏程, 唐 耀. 土体的本构模型和超重力物理模拟[J]. 力学学报, 2020, **52**(4): 901-915. (CHEN Yunmin, MA Pengcheng, TANG Yao. Constitutive models and hypergravity physical simulation of soils[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, **52**(4): 901-915. (in Chinese))
- [5] 包承纲. 土力学的发展和土工离心模拟试验的现状[J]. 岩土力学, 1988, **9**(4): 23-30. (BAO Chenggang. Development of soil mechanics and present situation of centrifugal modelling test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1988, **9**(4): 23-30. (in Chinese))
- [6] 侯瑜京. 土工离心机振动台及其试验技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, **4**(1): 15-22. (HOU Yujing. Centrifuge shakers and testing technique[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, **4**(1): 15-22. (in Chinese))
- [7] NG C W W. The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2014, **15**(1): 1-21.
- [8] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. Géotechnique, 1980, **30**(4): 385-395.
- [9] TAYLOR R. Geotechnical centrifuge technology[C]// Glasgow. UK: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [10] 陈云敏, 韩 超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1887-1894. (CHEN Yunmin, HAN Chao, LING Daosheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1887-1894. (in Chinese))
- [11] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研究[J]. 水利水运工程学报, 2002(1): 63-66. (ZHANG Weimin, LAI Zhongzhong, XU Guangming. Development of an electrohydraulic shake table for the centrifuge[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(1): 63-66. (in Chinese))
- [12] LAMBE P C. Dynamic Centrifuge Modelling of a Horizontal Sand Stratum[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [13] HUSHMAND B, SCOTT R F, CROUSE C B. Centrifuge liquefaction tests in a laminar box[J]. Géotechnique, 1988, **38**(2): 253-262.
- [14] 黄茂松, 边学成, 陈育民, 等. 土动力学与岩土地震工程[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(8): 64-86. (HUANG Maosong, BIAN Xuecheng, CHEN Yumin, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(8): 64-86. (in Chinese))
- [15] YE B, YE G L, ZHANG F, et al. Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand[J]. Soils and Foundations, 2007, **47**(3): 547-558.
- [16] WANG R, ZHANG J M, WANG G. A unified plasticity model for large post-liquefaction shear deformation of sand[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **59**: 54-66.
- [17] QIU Z J, ELGAMAL A. Numerical simulations of LEAP centrifuge tests for seismic response of liquefiable sloping ground[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **139**: 106378.
- [18] BOULAANGER R W, ZIOTOPOULOU K. PM4Sand (Version 3): A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications[R]. Davis :Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2015.
- [19] IAI S, TOBITA T, OZUTSUMI O, et al. Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, **35**(3): 360-392.
- [20] MANZARI M T, DAFALIAS Y F. A critical state two-surface plasticity model for sands[J]. Géotechnique, 1997, **47**(2): 255-272.
- [21] UEDA K, IAI S. Numerical predictions for centrifuge model tests of a liquefiable sloping ground using a strain space multiple mechanism model based on the finite strain theory[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **113**: 771-792.
- [22] KUTTER B L, CAREY T J, HASHIMOTO T, et al. LEAP-GWU-2015 experiment specifications, results, and comparisons[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,



- 2018, **113**: 616-628.
- [23] ZEGHAL M, GOSWAMI N, MANZARI M, et al. Discrepancy metrics and sensitivity analysis of dynamic soil response[C]// Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V. Austin, 2018.
- [24] ZHOU Y G, MENG D, MA Q A, et al. Frequency response function and shaking control of the ZJU-400 geotechnical centrifuge shaker[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2020, **20**(2): 97-117.
- [25] ZHOU Y G, LIANG T, CHEN Y M, et al. A two-dimensional miniature cone penetration test system for centrifuge modelling[C]// Proceeding of 8th Physical Modelling in Geotechnics. London, 2014.
- [26] 周燕国, 摄宇, 陈捷, 等. 超重力离心模型试验土体弹性波速监测与表征[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(6): 90-96, 121. (ZHOU Yanguo, SHE Yu, CHEN Jie, et al. Measurement and characterization of elastic wave velocity of soil in hypergravity centrifuge model test[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(6): 90-96, 121. (in Chinese))
- [27] MASON H B, GALLANT A, HUTABARAT D, et al. The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake[R]. Geotechnical Extreme Events Reconnaissance, 2019: 1-77.
- [28] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 619-631.
- [29] 杨玉生, 刘小生, 李小泉, 等. 固结应力状态对超深厚覆盖层深埋砂土动强度参数的影响[J]. 水利学报, 2016, **47**(4): 518-526. (YANG Yusheng, LIU Xiaosheng, LI Xiaoquan, et al. Effects of effective confining stresses on cyclic resistance ratio of deep buried sands in deep alluvial soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(4): 518-526. (in Chinese))
- [30] 蔡正银, 吴诗阳, 武颖利, 等. 高地震烈度区深厚覆盖砂层液化研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(3): 405-412. (CAI Zhengyin, WU Shiyang, WU Yingli, et al. Liquefaction of deep overburden layers in zones with high earthquake intensity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(3): 405-412. (in Chinese))
- [31] IAI S, TOBITA T, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests[J]. Géotechnique, 2005, **55**(5): 355-362.
- [32] ZHOU Y G, MA Q, LIU K, et al. Centrifuge model tests at Zhejiang University for LEAP-Asia-2019 and validation of the generalized scaling law[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, **144**: 106660.
- [33] 蔡袁强, 于玉贞, 袁晓铭, 等. 土动力学与岩土地震工程[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(5): 9-30. (CAI Yuanqiang, YU Yuzhen, YUAN Xiaoming, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(5): 9-30. (in Chinese))
- [34] 袁晓铭, 秦志光, 刘荟达, 等. 砾性土层液化的触发条件[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(5): 777-785. (YUAN Xiaoming, QIN Zhiguang, LIU Huida, et al. Necessary trigger conditions of liquefaction for gravelly soil layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(5): 777-785. (in Chinese))
- [35] 陈国兴, 孙田, 王炳辉, 等. 循环荷载作用下饱和砂砾土的破坏机理与动强度[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2140-2148. (CHEN Guoxing, SUN Tian, WANG Binghui, et al. Undrained cyclic failure mechanisms and resistance of saturated sand-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2140-2148. (in Chinese))
- [36] ZHOU Y G, XIA P, LING D S, et al. Liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 2020, **274**: 105691.
- [37] YE B, NI X Q, HUANG Y, et al. Unified modeling of soil behaviors before/after flow liquefaction[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **102**: 125-135.
- [38] KUTTER B L, WILSON D W. Physical modelling of dynamic behavior of soil-foundation-superstructure systems[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2006, **6**(1): 1-12.
- [39] 唐贞云, 洪越, 李振宝. 振动台子结构试验方法实现的韧性防灾需求与其关键问题[J]. 地震研究, 2020, **43**(3): 478-484, 602. (TANG Zhenyun, HONG Yue, LI Zhenbao. Shaking table RTHS needs for disaster resilience and its key scientific issues in RTHS implementation[J]. Journal of Seismological Research, 2020, **43**(3): 478-484, 602. (in Chinese))
- [40] 王涛, 潘鹏. 子结构混合试验方法研究与应用[J]. 工程力学, 2018, **35**(2): 1-12. (WANG Tao, PAN Peng. Study and application of substructure online hybrid test method[J]. Engineering Mechanics, 2018, **35**(2): 1-12. (in Chinese))