

DOI: 10.11779/CJGE202204022

# 饱和砂土坝基液化超重力振动台试验研究

杨凯文<sup>1, 2</sup>, 李俊超<sup>1, 2</sup>, 王 锋<sup>3</sup>, 陈 涛<sup>4</sup>, 汪玉冰<sup>\*1, 2</sup>, 邹德高<sup>5</sup>, 刘京茂<sup>5</sup>

(1. 浙江大学超重力研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 4. 四川华能泸定水电有限公司, 四川 成都 610041;

5. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 坝基作为水利水电工程重要基础设施的核心部分, 其在地震作用下的动力响应和稳定性受到广泛关注。针对饱和砂土坝基的动力响应和液化规律, 开展了两组超重力振动台试验, 分析了饱和砂土地基在坝闸荷载作用下的地震响应规律。根据两组离心试验结果, 地震作用下自由场地地基下层土体发生软化, 上层土体发生液化喷砂, 加速度放大系数和超静孔压比沿深度方向呈现先减小后增大的趋势; 坝基在荷载边缘的土体中出现液化现象, 加速度放大系数随深度逐渐减小而土体超静孔压比随深度逐渐增大。坝闸荷载能够增大坝基土体中的有效应力, 减小超静孔压比。超静孔压消散后土体的密实度、刚度提高。最后, 基于非线性有限元分析软件 GEODYNA, 对两组离心机试验进行了数值模拟, 结果吻合较好。试验结果和数值模拟结果为饱和砂土坝基的设计与加固提供了依据。

**关键词:** 坝基; 液化; 上覆荷载; 地震响应; 离心模拟

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)04-0778-09

作者简介: 杨凯文(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地基动力响应和桩土动力相互作用等方面的研究。E-mail: 12012001@zju.edu.cn。

## Centrifugal shaking table tests on saturated sand foundation under dam

YANG Kai-wen<sup>1, 2</sup>, LI Jun-chao<sup>1, 2</sup>, WANG Feng<sup>3</sup>, CHEN Tao<sup>4</sup>, WANG Yu-bing<sup>1, 2</sup>, ZOU De-gao<sup>5</sup>, LIU Jing-mao<sup>5</sup>

(1. Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key

Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Chengdu Survey, Design and Research Institute Co., Ltd. of China Power Construction Group, Chengdu 610072, China; 4. Sichuan Huaneng Luding Hydropower

Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 5. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** As the core part of the important infrastructure of water conservancy and hydropower projects, the stability of dam foundation under earthquake is widely concerned. In order to solve the problem of the dynamic response and liquefaction law of saturated sand foundation under dam, two groups of centrifugal shaking table tests are carried out to analyze the influences of overlying loads on the seismic response of this foundation. The test results show that when there are no overlying loads on the foundation, the soil in the lower layer is softened during the vibration, while the soil in the upper layer is liquefied during the vibration, and the acceleration magnification factor of the foundation and the excess pore pressure ratio of the soil first decrease and then increase along the depth direction. When the foundation has overlying loads, liquefaction occurs in the soil at the edge of the overlying loads, and the acceleration magnification factor of the foundation increases gradually along the depth direction and the ratio of excess pore water pressure decreases gradually along the depth direction. The existence of overlying loads of dam can increase the effective stress of soil and reduce the excess pore pressure ratio. After the dissipation of excess pore pressure, the compactness and stiffness of soil is improved. Finally, based on the nonlinear finite element software GEODYNA, the numerical simulation of the two centrifuge tests is carried out, and the results are in good agreement. The results of the tests and the numerical simulation provide the basis for the design and reinforcement of the saturated sand dam foundation.

**Key words:** dam foundation; liquefaction; overlying load; seismic response; centrifuge modelling

## 0 引言

在岩土工程领域, 人们对于地基土的地震液化问题一直保持着相当程度的关注, 历史上的多起地震中

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51808490)

收稿日期: 2021-05-31

\*通信作者 (E-mail: wangyubing@zju.edu.cn)

也报道了地震液化现象及相关灾害, 如中国唐山地震(1976年)、汶川地震(2008年), 国外的日本神户地震(1995年)等。地震液化往往会造成地基与结构物的重大损坏<sup>[1-2]</sup>。在汶川地震中公路、建筑、农田均因土体液化遭受了巨大的损坏, 在这些出现液化的地方, 震害更加严重。

坝基作为水利水电工程重要基础设施的核心部分, 地基土体地震液化会导致水工建筑物出现开裂、破坏等严重影响安全的问题<sup>[3-7]</sup>。研究地基土体地震动力响应对饱和砂土地基抗液化处理和抗震设计具有重要的工程实践意义<sup>[8-11]</sup>。

目前国内外学者针对饱和砂土地基地震响应的研究往往是采用常重力振动台和超重力振动台试验。

常重力振动台试验凭借试验周期短、便于获取大量数据等优势, 常被用于土体地震响应研究中。Seed等<sup>[12]</sup>利用双向振动台对饱和砂土进行了的动力特性进行了研究, 并指出相比于单向振动饱和砂土在双向振动下其产生的超静孔压和沉降将提高一倍; 黄春霞等<sup>[13]</sup>通过自主研制的单向振动台对饱和砂土地基进行了研究, 并指出超静孔压的增长随深度增大, 而位于深层处的土体孔压最先开始消散; Varghese等<sup>[14]</sup>对砂土地基抗液化性能展开了研究, 并利用试验验证了密实化是一种有效的抗液化措施。

超重力振动台是利用离心机高速旋转产生超重力场从而能够还原土体原型的应力场, 成为了探究土体地震过程中动力响应和液化特征的有效手段<sup>[15-18]</sup>。Hushmand等<sup>[9]</sup>首次在超重力振动台试验中还原了砂土液化现象, 其采用了层状剪切模型箱; Adalier等<sup>[19]</sup>利用离心机振动台试验发现了土体在发生液化后土体加速度响应与土体形状的变化, 总结了其变化规律。苏栋等<sup>[20]</sup>通过对自由场地地基的离心模拟试验, 指出当砂土地基临近液化时其振动响应会减小, 而土体在经历较小的地震动后其地震稳定性将提高。蔡正银等<sup>[21]</sup>利用离心机振动台对振动频率进行了研究, 指出较低频率的振动更有利于超静孔压的积累, 引起土体最终的液化。上述研究基本都是针对自由场地砂土地基, 目前关于饱和砂土坝基地震动力响应的相关试验研究相对较少, 坎基在坝闸荷载作用下应力分布发生改变, 在地震荷载作用下其无论孔压响应还是最终的变形都将不同, 因此对于饱和砂土坝基地震动力响应的研究是有必要的。

本文基于“大渡河硬梁包水电站”工程项目, 结合实际工况进行了两组离心机振动台试验, 同时, 利用非线性有限元分析软件 GEODYNA 对两组饱和砂土地基液化离心机试验进行了数值模拟, 分析了饱和

砂土坝基在坝闸荷载作用下的地震响应规律, 揭示了坝基加速度、超静孔压、位移变化规律, 探究了地基液化可能性与坝闸荷载抗液化效果, 为坝基的抗震设计及加固提供了科学依据和理论指导。

## 1 离心模型试验

### 1.1 试验设备

本次试验在浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室 ZJU-400 土工离心机振动台进行。ZJU-400 土工离心机能够提供的最大有效载荷为  $400 \text{ g} \cdot \text{t}$ , 其拥有  $4.5 \text{ m}$  有效旋转半径。当进行动力试验时能够提供  $100\text{g}$  的最大离心加速度。离心机上搭载有振动台, 其采用机载液压施加地震荷载, 能够提供  $10 \sim 200 \text{ Hz}$  范围的振动频率,  $0.5 \text{ kN}$  的有效负重,  $40\text{g}$  的最大振动加速度和  $6 \text{ mm}$  的振动位移<sup>[22]</sup>。

在试验中采用柔性剪切模型箱, 内部尺寸长  $\times$  宽  $\times$  高为  $740 \text{ mm} \times 340 \text{ mm} \times 425 \text{ mm}$ , 模型箱通过 12 层矩形剪切环叠合的方式为岩土体提供柔性的约束边界条件。剪切环内表面铺设 2 层  $2.5 \text{ mm}$  橡胶模, 保证模型箱的密封性和防止土颗粒进入剪切环中。

### 1.2 试验安排

针对坝闸荷载对饱和砂土坝基地震响应规律影响, 两组离心机振动台试验均在  $50\text{g}$  下开展。坝基模型图如图 1 所示。Test1 为自由场地地基, Test 2 为有坝闸荷载地基(以下简称坝下地基)。饱和砂土地基下层为厚  $300 \text{ mm}$ , 相对密实度为  $63\%$ , 对应原型地基厚度  $15 \text{ m}$ ; 上层土体为厚  $100 \text{ mm}$ , 相对密实度为  $74\%$ , 对应原型地基厚度  $5 \text{ m}$ 。利用在地基表面放置钢板的方式模拟坝闸荷载和坝基。本次试验安排见表 1 所示。

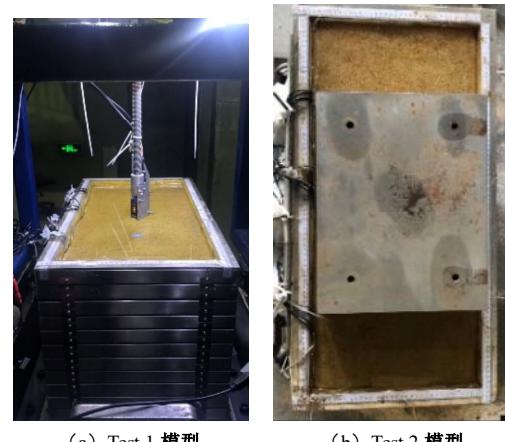


图 1 模型实物图

Fig. 1 Picture of centrifuge model

### 1.3 试验模型与材料

模型地基所用材料为根据现场砂颗粒级配配置而

成, 由于粒径大于2 mm的颗粒将在离心作用下产生不可忽略尺寸效应, 因此采用剔除法剔除粒径大于2 mm的颗粒, 图2为试验中砂土的颗粒级配, 表2为试验中砂土的物理力学性质。

表1 试验安排

Table 1 Test arrangement

试验组别	离心机加速度/g	上层砂土		下层砂土		钢板厚度/mm
		厚度/mm	相对密实度/%	厚度/mm	相对密实度/%	
Test 1	50	100	74	300	63	—
Test 2	50	100	74	300	63	106.5

表2 模型试验中砂土材料基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of sand in model tests

土层	$G_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$\rho_{d\max}$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\rho_{d\min}$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$k$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$D_r/\%$
上层土	2.64	0.711	0.342	1.968	1.544	$1.89 \times 10^{-2}$	74
下层土	2.66	1.147	0.527	1.742	1.239	$1.001 \times 10^{-3}$	63

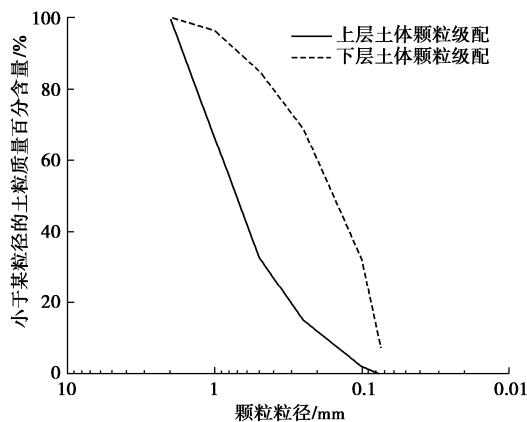


图2 模型试验中砂土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of sand in model tests

该试验原型为成都大渡河硬梁包水电站, 原型混凝土坝闸高30.5 m。为保证与原型基底应力相同以及考虑到模型重量对试验安全影响, 试验中采用矩形钢板代替混凝土坝闸。地震过程时间很短, 土层孔隙水难以迅速从混凝土坝闸底部排出, 故混凝土坝闸底部近似为不排水边界, 离心模拟试验中钢板底部排水条件与其相似。本文主要研究坝闸荷载对砂土地基液化特性的影响, 相比于砂土地基, 混凝土坝体可视为刚体, 其高度对于地基土动力响应及液化的影响相对较小; 同时受试验模型箱空间限制, 难以还原原型坝闸高度。故试验基于砂土地基中坝下中心、边缘位置应力与实际工况等效的原则, 计算得到的钢板高度为106.5 mm, 原型坝基中心与边缘应力分别为401.1, 1058.2 kPa, 离心模型中分别为375.3, 1189.7 kPa, 模型试验与原型地基中附加应力分布示意图见图3, 对钢板底面打毛以增加摩擦力。超重力下渗流速度是运动速度的N(施加的g值)倍, 为解决超重力动力模

型试验中震动比尺与渗流比尺之间的矛盾, 本次试验中采用50 cst的硅油对地基砂土进行饱和。

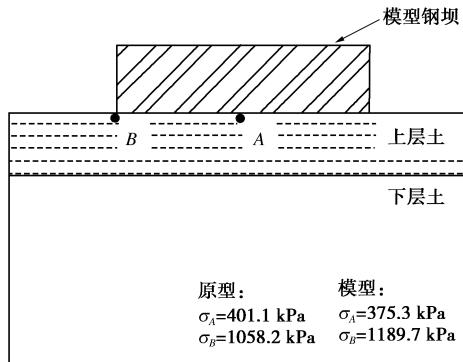
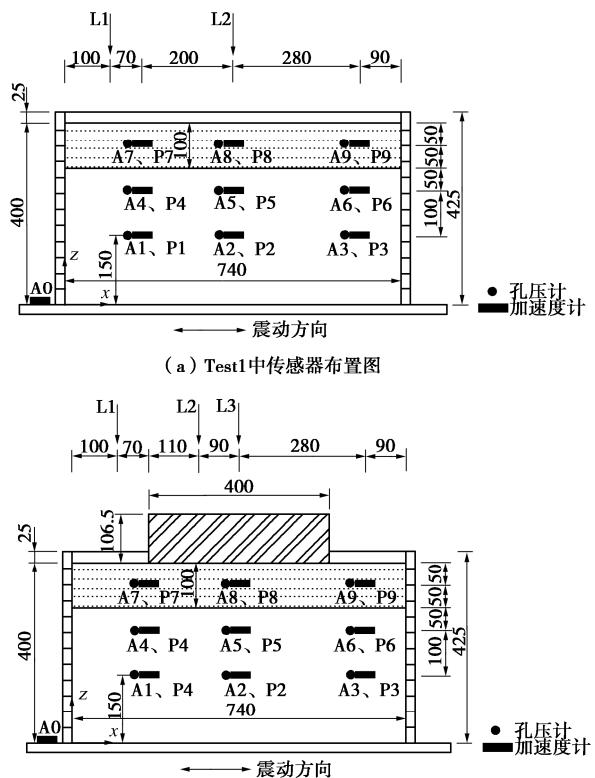


图3 原型与模型试验坝下地基附加应力分布示意图

Fig. 3 Distribution of additional stress of foundation under dam in prototype and model tests

#### 1.4 传感器布置

图4为两组试验中的传感器布置示意图。试验中在模型箱外出底面上安装一个三向加速度传感器A0, 用于监测实际输入至模型箱底部的加速度。在土体中布置3层共9个加速度传感器(A1~A9)、9个孔压计(P1~P9), 分别用于监测土体中不同位置的加速度响应和孔压响应。利用激光位移计监测地基土体在地震作用下的沉降, 在Test 1中布置两个激光位移计(L1、L2), 在Test 2中布置3个激光位移计(L1~L3)。



(b) Test2中传感器布置图

尺寸单位: mm

图4 传感器布置

Fig. 4 Layout of sensors

### 1.5 制模过程

地基土体烘干, 采用砂雨法对地基进行浇筑。地基土共分8层浇筑, 先按相对密实度63%浇筑底下6层土体, 后按相对密实度74%浇筑上两层, 当浇筑完第3, 5, 7层时在对应位置布置相应的加速度和孔压传感器。在地基土体浇筑完成后, 利用真空饱和箱对模型地基进行硅油饱和, 饱和过程需控制进油速率以防大量气体进入地基土体中。Test2中将钢板缓慢放置在饱和好的模型地基上, 并将模型静置1d, 使得由钢板放上产生的超静孔压完全消散。

在模型制作完成后需对模型及模型箱进行称重用于配平离心机的不平衡力, 在将模型箱安装于振动台后在对应位置安装激光位移计。待离心机稳定在设定加速度下一段时间后, 记录传感器读数作为初始值。

### 1.6 施震顺序

运行离心机并逐级增加离心加速度直至设定值50g, 随后在50g状态下维持一段时间以稳定土体中的孔压。当监测的孔压保持稳定后向振动台发出施振信号, 施加水平地震荷载。输入地震波来源于成都现场地震波的波形, 该地震波时程曲线如图5所示。在每次施加地震动前后, 输入0.02g阶跃波, 用于分析振动前后地基土体动力特性和剪切波速变化, 当在试验中施加成都现场波时采样频率设为5kHz, 当在试验中施加阶跃波时采样频率设为20kHz, 本次试验中施震顺序见表3所示。

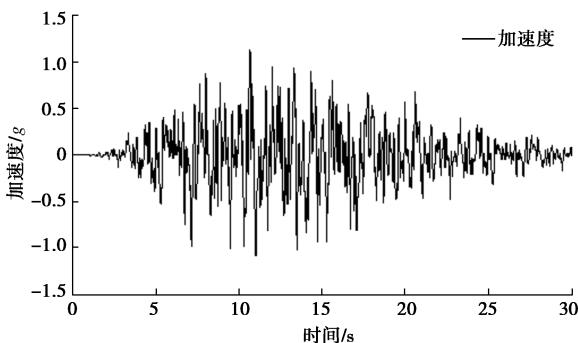


图5 成都现场地震波时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of acceleration of Chengdu waves

表3 施震顺序

Table 3 Earthquake sequence

地震序列	波形	加速度峰值/g		采样频率 /Hz
		Test 1	Test 2	
1	阶跃波	0.020		20k
2	成都现场波	0.360	0.400	5k
3	阶跃波	0.020		20k

## 2 试验结果及分析

### 2.1 地基加速度响应分析

本文中所有试验结果均换算成原型尺寸来表示。

图6为Test1和Test2中地基的加速度时程曲线。

图7为Test1和Test2中地基土体的水平向加速度放大系数, 从图中可以看出加速度放大系数变化与高程之间的关系。图中横坐标为加速度放大系数, 其定义为土体中某测点峰值加速度与台面峰值加速度的比值; 纵坐标为无量纲高程, 其采用加速度计到模型箱底的距离与地基模型的高度的比值。

从图7可以看出, 对于Test1自由场地地基, 随着高程的增加土体的加速度放大系数呈现先减小后增大的趋势, 并在上层砂土中达到最大。放大系数先减小是由于中部土体在振动过程中很快因为较高的超孔压发生软化, 阻尼增大, 起到了隔振作用。而上层土体在地震作用下加速度放大系数增大, 这可能跟土体震密、刚度增大有关。对于Test2坝下地基, 加速度放大系数沿高程呈现逐渐减小的趋势, 上下两层土体在振动过程中均产生较大的超静孔压, 土体软化, 减弱了地震波向上传播, 放大系数减小。

### 2.2 地基频谱分布规律

图8为Test1和Test2地基中A8处的加速度Fourier谱。从图8中可以看出Test1自由场地地基与Test2坝下地基加速度Fourier谱低频部分(小于2.5Hz)接近, 而高频部分(大于2.5Hz)Test1自由场地地基要大于Test2坝下地基, 因此可以认为坝闸荷载的存在能够减小上层土体高频部分的振动。这与前文中提到的地基上层土体加速度放大系数Test1自由场地地基明显大于Test2坝下地基结论一致。

### 2.3 砂土地基剪切波速

砂土地基的性质变化能够通过剪切波速的变化来反映, 为了在离心机振动台试验环境下测得土体的剪切波速, 可以利用振动波依次通过相邻两加速度传感器的时间差计算得到。在地震荷载前后施加幅值很小的阶跃波, 通过测量得到同一列加速度传感器接收到阶跃波的时间差, 从而计算得到土体剪切波速。由于施加的阶跃波幅值很小, 可忽略其振动对于土体的影响。

Test1和Test2中地震荷载作用前后的平均剪切波速变化如图9所示。地震后土体的平均剪切波速提高, 这是由于土体密实度提高, 刚度提升。通过土体的剪切波速可以根据公式 $G = \rho v_s^2$ 可以进一步计算得到土体的平均剪切模量, 经历振动后, 土体的平均剪切模量相应提高, 当再次施加地震, 土体会受到更大的动力响应。

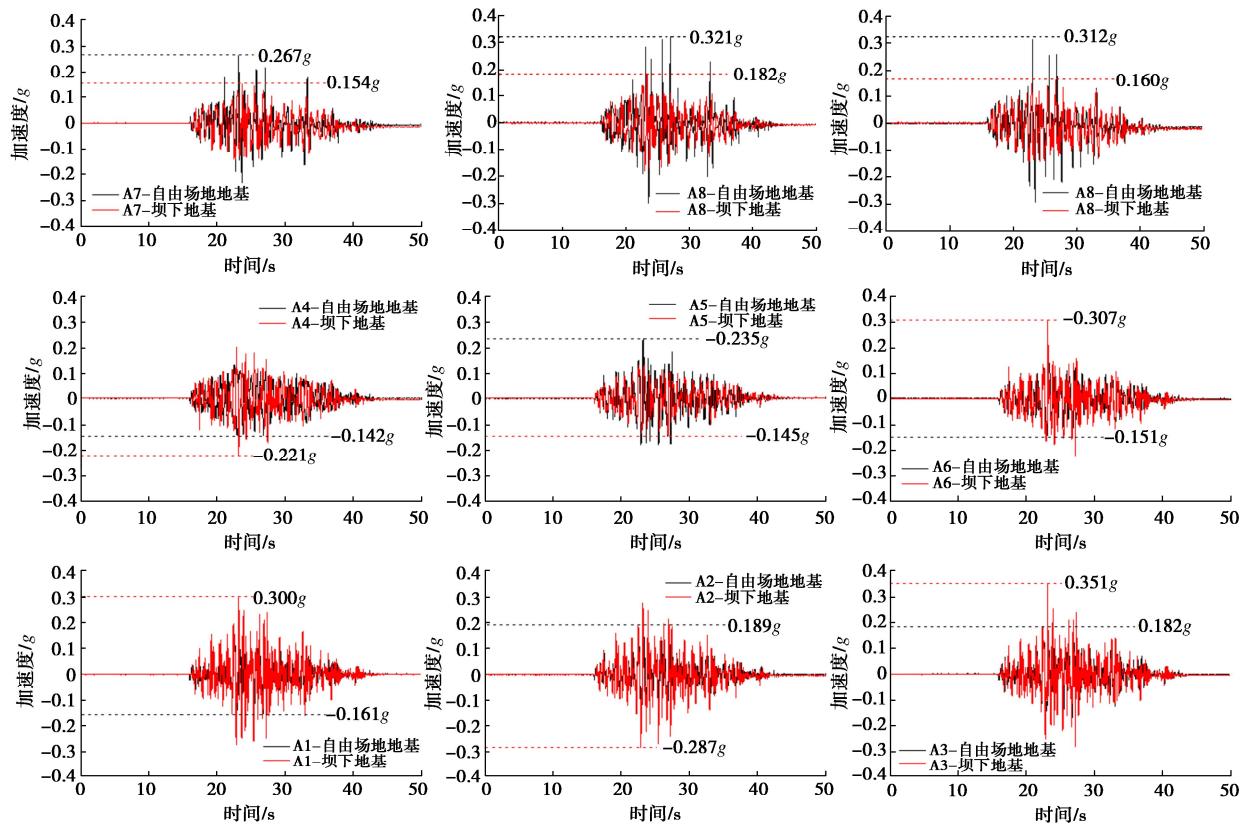


图 6 地基土体水平加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of horizontal acceleration of foundation

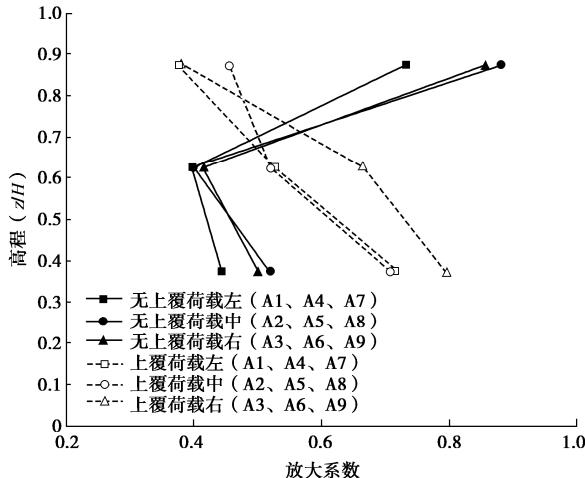


图 7 地基水平向加速度放大系数

Fig. 7 Amplification factor of horizontal acceleration of foundation

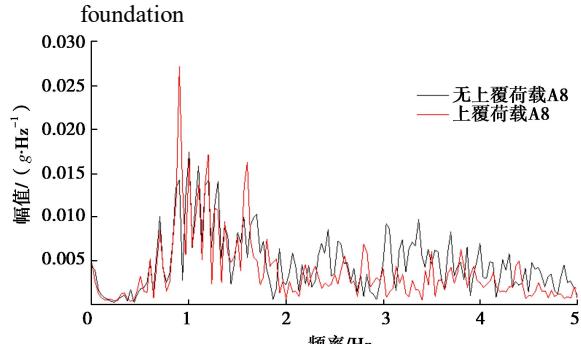


图 8 地基 A8 处加速度 Fourier 谱

Fig. 8 Fourier spectra of point at foundation A8

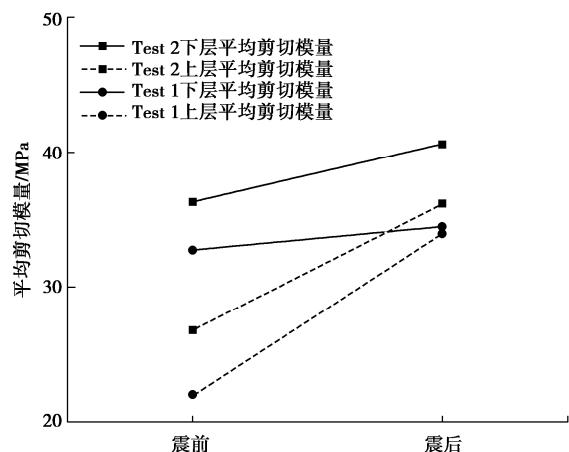
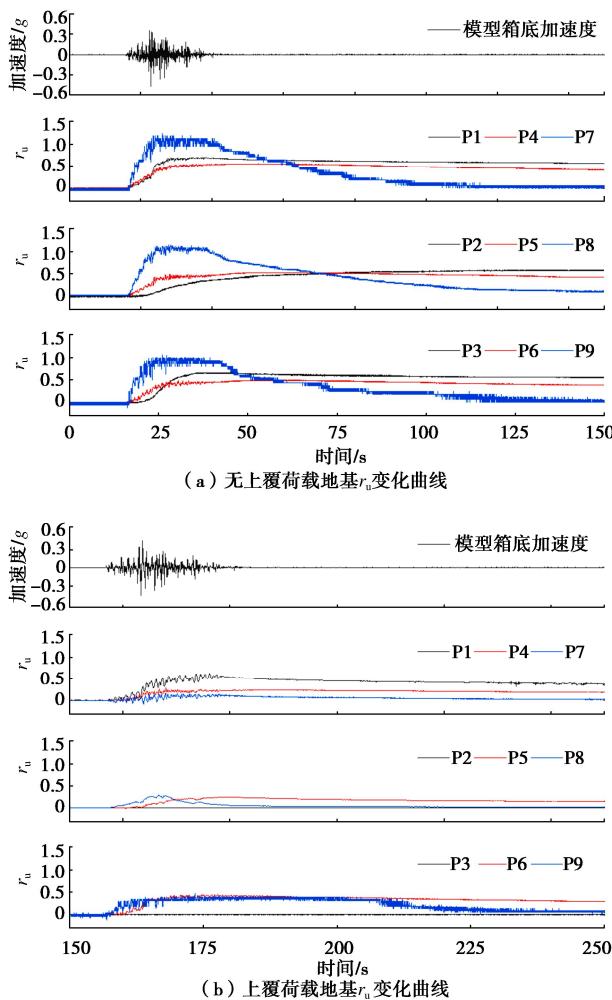


图 9 振动前后地基平均剪切波速变化图

Fig. 9 Variation of average shear-wave velocity of foundation before and after vibration

## 2.4 地基孔压响应分析

图 10 为振动过程中自由场地地基和坝下地基在地震作用下不同位置超静孔压比  $r_u$  ( $r_u$  为模型试验中测得的超静孔压  $\Delta u$  与其对应位置土体初始有效应力  $\sigma'$  的比值) 时程曲线。在进行 Test 2 坝下地基试验时, P2、P3 两个孔压传感器在试验过程中损坏, 但由于损坏的传感器位于模型最下层, 受坝闸荷载影响较小, 因此可认为 P2、P3 的损坏对于试验结果影响不大。

图 10 地基振动过程中  $r_u$  变化曲线Fig. 10 Variation of  $r_u$  in process of vibration

从图 10 的孔压时程曲线可以看出, 地基土体在受到地震荷载后, 其孔压逐渐升高, 形成超静孔压。经过一段时间的振动过后, 土体中的超静孔压达到峰值, 随后在土体排水作用下逐渐消散。在对于地震液化孔压问题的研究中, 通常采用超静孔压比  $r_u$  进行表征。当土体某处的  $r_u$  大于等于 1, 则认为该位置的土体发生液化。对于 Test 1 中自由场地地基, 其土体中的超静孔压比  $r_u$  沿着高程方向呈现先减小后增大的趋势, 并在上层砂土中达到最大值且均大于 1.0, 说明上层砂土发生了液化, 同时试验过程中位于地基上方拍摄的视频中也出现了相应的喷砂现象。而对于 Test 2 中坝下地基, 其土体中的超静孔压比  $r_u$  沿着高程方向呈现逐渐增大的趋势, 并在上层砂土中达到最大值, 虽然其上层砂土中的超静孔压比  $r_u$  均小于 1, 但从试验中拍摄的视频以及拆模后的模型可以发现位于钢板边缘土体出现了液化喷砂现象。图 11 为震后地基的试验现象。



(a) 震后上层土分层



(b) 地震喷砂产生的黑斑

图 11 震后地基试验现象

Fig. 11 Experimental phenomena of foundation after earthquake

对比两次试验中的超静孔压峰值可以看出, 在坝闸荷载的作用下, 土体中的初始有效应力增加, 从而在地震过程中坝下地基的超静孔压比峰值均要小于自由场地地基相应位置处超静孔压峰值。因此, 坝闸荷载下方的土体在地震荷载作用下液化的可能性降低, 但在坝闸荷载边缘的土体仍然存在液化的风险。

## 2.5 地震沉降分析

图 12 为 Test 1 和 Test 2 两组试验地基沉降变化曲线, 当地基土体在经受地震荷载后, 其表面会发生沉降或因液化喷砂出现隆起, 通过安装与模型箱顶部的激光位移计监测这种现象。对于 Test 1 中 L1 处的土体在地震作用下发生沉降, 沉降值为 20.7 mm, 而 L2 处的土体在地震作用下出现隆起, 隆起量为 32.8 mm。对于 Test 2 中 L1 处的土体在地震作用下发生沉降, 沉降值为 52.7 mm, 而 L2、L3 处由于位于钢板表面, 其沉降量很小。

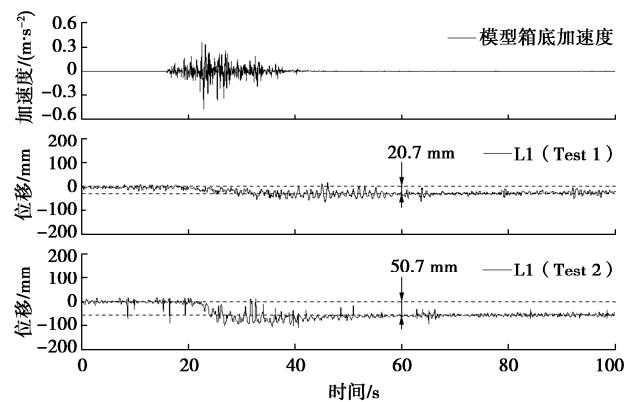


图 12 Test 1 和 Test 2 中地基 L1 处沉降

Fig. 12 Vertical settlements of point at foundation L1 in Test 1 and Test 2

### 3 数值分析对比

基于大连理工大学研发的非线性有限元分析软件 GEODYNA 对两组试验进行了数值分析对比。该软件采用了考虑饱和多孔介质 Biot 动力固结理论, 结合大连理工大学静动统一实用化弹塑性本构模型<sup>[23]</sup>, 在反映地基的地震动力响应上更具优势。

#### 3.1 计算模型介绍

计算模型根据模型实际尺寸进行建模, 采用四边形等参单元模拟地基土。模型底部边界输入地震动, 试验中处于同一深度的剪切箱两侧侧壁对应节点的运动是完全相同的<sup>[24]</sup>, 因此, 数值模拟时将计算网格中两侧边界上处于相同深度的节点自由度耦合在一起。模型图见图 13 所示。土体本构模型采用静动统一实用化弹塑性本构模型, 该本构能够更合理的描述复杂循环加载条件下的土体应力应变关系。本构参数取值见表 4 所示, 其是根据离心机模型试验中上下层砂土的三轴试验成果标定获得, 三轴试验过程中保持砂土的级配、密实度与离心试验中一致。

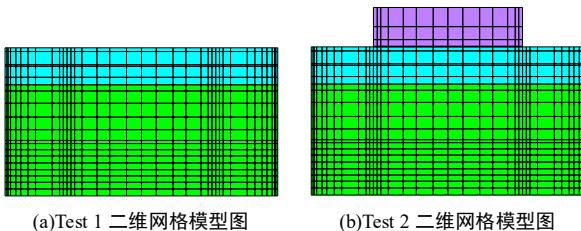


图 13 Test 1 和 Test 2 地基有限元模型图

Fig. 13 Finite element model foundation in Test1 and Test2

表 4 本构模型参数

Table 4 Parameters of constitutive model

参数	$G_0$	$\nu$	$n$	$e_\tau$	$\lambda_c$	$M_g$	$\beta$
上层土	224	0.1	0.430	0.740	0.078	1.45	0.3
下层土	224	0.1	0.304	0.651	0.090	1.47	0.1
参数	$h_1$	$h_2$	$m$	$m_p$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$n_g$
上层土	10	1.8	0.25	0.5	0.50	1.00	2.0
下层土	40	16.0	0.50	0.5	1.45	0.80	1.0
							$n_b$

#### 3.2 数值模拟与模型试验结果对比分析

图 14 给出了 A8 位置的加速时程响应对比。对比图中两者结果可以看出: 数值模拟的加速时程响应能够较好的吻合模型试验, 在 Test 1 和 Test 2 中位于上层土中的 A8 测点模型试验峰值加速度要高于数值模拟结果, 这可能与上层土在地震中出现液化现象有关。

图 15 给出了 A8 位置的傅里叶谱对比, 对比图中数两者结果可以看出: 两次试验中低频部分数值模拟结果能够较好的与模型试验结果吻合, 在 Test 1 中当频率大于 3 Hz 时数值模拟结果略小于模型试验结果, 在 Test 2 中当频率处在 1.5~3 Hz 范围时数值模拟结果大于模型试验结果。造成以上现象的原因有可能与

数值计算中未能完全考虑模型箱底部和侧边界地震波反射有关。

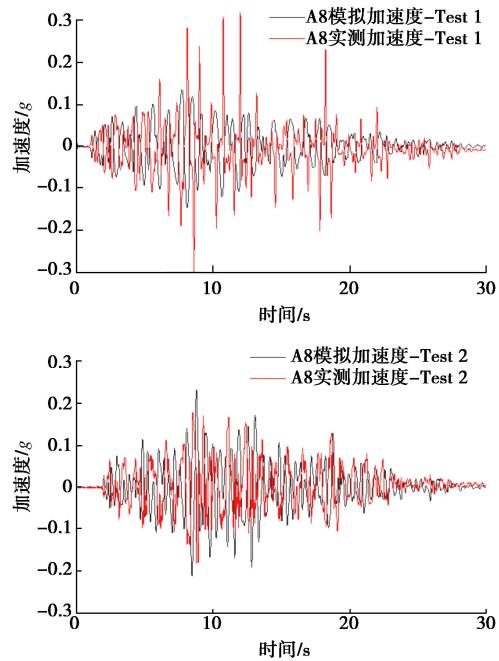


图 14 数值模拟与模型试验加速度时程对比

Fig. 14 Comparison between simulated and measured time-history curves of acceleration

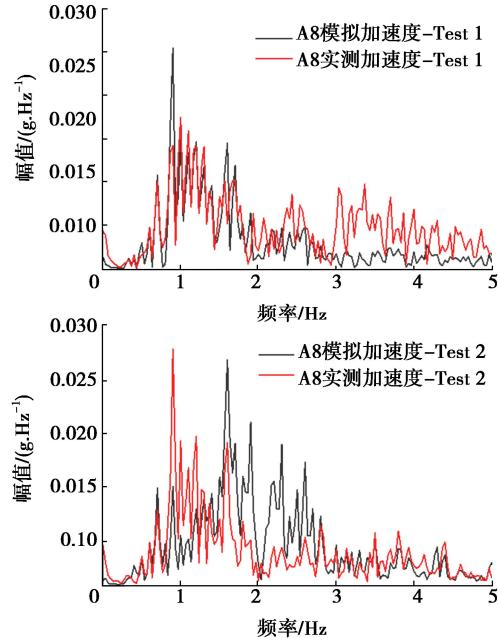


图 15 数值模拟与模型试验傅里叶谱对比

Fig. 15 Comparison between simulated and measured Fourier spectra

图 16 给出了 A8 位置的孔压时程对比, 对比图中两者结果可以看出: Test 1 和 Test 2 中 A8 测点孔压时程曲线吻合较好, 孔压发展规律一致, 孔压峰值接近。但 Test 1 中模型试验孔压比模拟孔压更早开始发展, 而 Test 2 中模型试验孔压比模拟孔压更晚开始消散,

这可能与上层土体出现液化使得模拟更加困难有关。

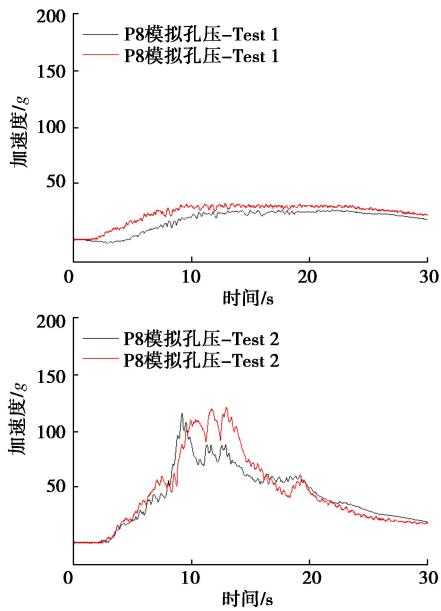


图 16 数值模拟与模型试验孔压时程对比

Fig. 16 Comparison between simulated and measured time-history curves of pore pressure

## 4 结 论

针对饱和砂土坝基地震响应规律开展了两组超重力振动台试验，并通过数值分析进行了验证，分析了坝闸荷载对饱和砂土坝基地震响应规律影响，得到以下 5 点结论。

(1) 对于自由场地地基，随着高程的增加土体的加速度放大系数呈现先减小后增大的趋势，并在上层砂土中达到最大；对于坝下地基，随着高程的增加土体的加速度放大系数呈现逐渐减小的趋势。

(2) 自由场地地基和坝下地基 Fourier 谱低频部分接近，而高频部分自由场地工况大于有坝闸荷载工况，坝闸荷载的存在能够一定程度上减小上层地基高频振动。

(3) 地震时，自由场地地基在上层砂土中出现液化现象，坝下地基在位于坝闸荷载周围的上层砂土中出现液化现象。

(4) 在坝闸荷载的作用下，荷载下方土体的初始有效应力增加而其在地震荷载作用下液化的可能性降低，但在荷载边缘的土体仍然存在液化的风险。

(5) 数值模拟与离心机试验结果总体吻合较好。但由于模型箱底部和侧边界存在地震波反射等原因，使得个别点两者结果存在差别。

本文的模型试验与数值模拟研究对成都大渡河硬梁包水电站工程中坝闸荷载作用下饱和砂土地基抗液化处理具有一定的指导意义，对于更多坝基形式下的

地基液化研究有待进一步的试验研究。

**致 谢：**感谢浙江大学超重力研究中心朱斌教授、刘庭伟硕士在试验中给予的帮助与指导。

## 参 考 文 献：

- [1] 刘恢先. 唐山大地震灾害[M]. 北京：地震出版社，1985. (LIU Hui-xian. Damage of Tangshan Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1985. (in Chinese))
- [2] 陈跃庆, 吕西林. 几次大地震中地基基础灾害的启示[J]. 工程抗震, 2001, 23(2): 8 - 15. (CHEN Yue-qing, LÜ Xi-lin. Lessons learned from damages of soils and foundations during several strong earthquakes[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2001, 23(2): 8 - 15. (in Chinese))
- [3] SEED H B. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(4): 1123.
- [4] SEED H B. Soil problems and soil behavior[J]. Earthquake Engineering, 1970(10): 227 - 251.
- [5] MATSUO O. Damage to river dikes[J]. Soils and Foundations, 1996, 36: 235 - 240.
- [6] TANI S. Behavior of large fill dams during earthquake and earthquake damage[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20(1/2/3/4): 223 - 229.
- [7] ZHANG J M, YANG Z Y, GAO X Z, et al. Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76: 145 - 156.
- [8] ARULANANDAN K, ANANDARAJAH A, ABGHARI A. Centrifugal modeling of soil liquefaction susceptibility[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 281 - 300.
- [9] HUSHMAND B, SCOTT R F, CROUSE C B. Centrifuge liquefaction tests in a laminar box[J]. Géotechnique, 1988, 38(2): 253 - 262.
- [10] LAMBE P C, WHITMAN R V. Dynamic centrifugal modeling of a horizontal dry sand layer[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 265 - 287.
- [11] 刘庭伟, 李俊超, 朱斌, 等. 小型土石坝加密抗液化离心机振动台试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3695 - 3704. (LIU Ting-wei, LI Jun-chao, ZHU Bin, et al. Centrifuge shaking table modelling test study on anti-liquefied densification of small earth-rock dam slope[J].)

- Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3695 – 3704. (in Chinese))
- [12] SEED H B, MARTIN G R, PYKE R M. Effect of multidirectional shaking on pore pressure development in sands[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, **104**(1): 27 – 44.
- [13] 黄春霞, 张鸿儒, 隋志龙, 等. 饱和砂土地基液化特性振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2098 – 2103. (HUANG Chun-xia, ZHANG Hong-ru, SUI Zhi-long, et al. Shaking table tests on liquefaction properties of saturated sand ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2098 – 2103. (in Chinese))
- [14] VARGHESE R M, MADHAVI LATHA G. Shaking table tests to investigate the influence of various factors on the liquefaction resistance of sands[J]. Natural Hazards, 2014, **73**(3): 1337 – 1351.
- [15] 苏 栋, 李相崧. 地震历史对砂土抗液化性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(10): 1815 – 1818. (SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge investigation on effect of seismic history on resistance of sand to liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(10): 1815 – 1818. (in Chinese))
- [16] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲, 等. 砂土地基自由场离心机振动台模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, **49**(9): 31 – 34. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, WANG Zong-gang, et al. Dynamic centrifuge model test of an unconfined sandy foundation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, **49**(9): 31 – 34. (in Chinese))
- [17] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 粉粒含量对砂土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1647 – 1652. (ZHU Jian-qun, KONG Ling-wei, ZHONG Fang-jie. Effect of fines content on strength of silty sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1647 – 1652. (in Chinese))
- [18] 周燕国, 梁 甜, 李永刚, 等. 含黏粒砂土地液化离心机振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1650 – 1658. (ZHOU Yan-guo, LIANG Tian, LI Yong-gang, et al. Dynamic centrifuge tests on liquefaction of clayey sand ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1650 – 1658. (in Chinese))
- [19] ADALIER K, ELGAMAL A. Liquefaction of over-consolidated sand: a centrifuge investigation[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, **9**(S1): 127 – 150.
- [20] 苏 栋, 李相崧. 砂土自由场地震响应的离心机试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(2): 166 – 170. (SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge modeling of seismic response of free sand ground[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(2): 166 – 170. (in Chinese))
- [21] 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 Zheng-yin, WU Shi-yang, WU Ying-li, 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))
- [22] 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 Yun-min, HAN Chao, LING Dao-sheng, 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))
- [23] LIU J M, ZOU D G, KONG X J. Three-dimensional scaled memory model for gravelly soils subject to cyclic loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, **144**(3): 04018001.
- [24] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, **30**(7): 781 – 785. (WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, **30**(7): 781 – 785. (in Chinese))