

DOI: 10.11779/CJGE20250306

含黏土夹层砂性地基动力响应离心模型试验研究

陈锦祎^{1,2}, 傅中志^{*1,3}, 陈生水^{1,3}, 陈 聪¹, 陈澄昊^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210024; 3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 自然界中河床覆盖层常由不同类型土层沉积而成, 构成复杂, 且常伴有黏土夹层。通过开展一系列离心机振动台模型试验, 探究了黏土夹层对砂土覆盖层超静孔隙水压力、加速度响应及频谱特性影响。结果表明, 采用分层击实法制备的模型在重复振动下具有更强的抗液化能力, 浅层砂土液化行为受覆盖层厚度与黏土夹层影响; 黏土夹层减弱了地表加速度响应, 夹层处加速度放大系数明显降低, 反映出材料阻尼对地震传播的削弱作用; 虽然黏土夹层既能耗散振动高频能量又能削弱低频响应, 缩小反应谱“平台段”范围, 减小最大动力系数 β_{\max} , 降低诱发结构地震破坏的风险, 但现行抗震设计规范仍可能低估深厚覆盖层对实际地震动的放大效应。

关键词: 砂土; 加速度响应; 液化; 覆盖层; 黏土夹层

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)10-2117-10

作者简介: 陈锦祎(1996—), 女, 博士研究生, 主要从事土石坝地震响应分析方法等方面的研究工作。E-mail: chenjinyi0808@163.com。

Centrifuge model test on dynamic response of sandy foundation with clay interlayer

CHEN Jinyi^{1,2}, FU Zhongzhi^{1,3}, CHEN Shengshui^{1,3}, CHEN Cong¹, CHEN Chenghao^{1,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Natural riverbed overburden is often composed of stratified deposits of various soil types, resulting in a complex structure commonly accompanied by clay interlayers. This study conducts a series of centrifuge shaking table model tests to investigate the effects of a impermeable interlayer on excess pore water pressure, acceleration response, and spectral characteristics of sandy overburden. The results show that the sand models prepared by layered compaction exhibit enhanced liquefaction resistance under repeated shaking. The liquefaction susceptibility of shallow sandy layers is influenced by both the thickness of the overburden and the presence of a clay interlayer. The presence of the clay interlayer reduces surface acceleration response, and a significant decrease in amplification coefficients at the interlayer indicates the attenuation effect of material damping on seismic wave propagation. Although the clay interlayer can dissipate high-frequency seismic energy and attenuate low-frequency responses—thereby narrowing the plateau region of the response spectrum, reducing the maximum dynamic amplification factor, and lowering the risk of earthquake-induced structural damage—current seismic design codes may still underestimate the amplification effect of thick overburden in actual ground motion responses.

Key words: sand; acceleration response; liquefaction; overburden; clay interlayer

0 引言

中国约80%的水能资源集中在地震频发的西部地区, 该区域河谷深厚覆盖层广泛分布^[1], 且常伴有低渗透性软弱夹层。这种特殊结构影响了深厚覆盖层对

地震波的放大效应及地震诱发超静孔隙水压力(EPWP)的发展过程, 是影响工程结构安全性的主要因素。日本新潟地震^[2]与中国汶川地震^[3]中均有发现砂性地基液化、沉降及结构上浮等问题, 对工程长

基金项目: 国家自然科学基金项目(52222906, U21A20158, 52309158, 52209166) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52222906, U21A20158, 52309158, 52209166).

收稿日期(Received): 2025-04-08 修回日期(Revised): 2025-06-29 接受日期(Accepted): 2025-07-17 网络出版日期(Online): 2025-07-18

*通信作者 (E-mail: zzfu@nhri.cn)

期安全运行构成较大威胁。

已有研究表明, 软弱夹层具有非线性特性, 能显著放大或衰减地震动强度^[4-5], 引发更大地表沉降^[6]; 低渗透性夹层改变了砂土超孔压传递路径, 具备延缓液化发展的作用^[7], 但其上下易产生高水力梯度, 导致上覆松散土层破坏或引发结构上浮^[8], 威胁工程结构安全。此外, 夹层厚度^[9-10]、位置^[8, 10]及渗透性^[11]均会对孔压发展速率和地表响应产生影响。浅部夹层能够有效限制液化范围并减少地表沉降, 而深部夹层易导致上下砂层孔压叠加, 影响土体再固结并显著增加孔压完全消散所需时间; 增加夹层厚度^[9-10]则会增强对向上渗流的阻隔作用, 加剧夹层下方孔压滞留, 进而改变整个土层体系的动力响应特征。然而, 目前研究多聚焦于低渗透性夹层对土体液化发展能力的影响, 对含夹层土体地震动传播特性关注不足, 难以全面揭示夹层在地震动传播过程中的作用机制。因此, 有必要开展含低渗透性夹层砂性地基的动力响应特性研究, 揭示夹层在地震传播、能量分布与孔压发展过程中的关键影响。

由于土石材料的动力学特性受围压或上覆荷载的影响, 并表现出显著的非线性。因此, 利用模型试验研究深厚覆盖层动力响应规律的前提是真实模拟覆盖层所受的应力状态, 这一点常规的室内小尺度单元试验难以达到。为此, 开展了一系列离心模型试验, 输入人工合成地震波, 模拟含黏土夹层砂土覆盖层动力响应特性。重点分析了夹层对频谱能量分布、加速度响应及孔压传递路径的影响, 为深入理解复杂覆盖层场地地震特性提供了理论依据与试验支撑。

1 试验方案与条件

1.1 试验设备

采用南京水利科学研究院 NHRI 400 g·t 型土工离心机和 NS-2 型电液振动台进行动态离心模型试验, 试验装置如图 1 所示。离心机臂最大半径 5.5 m, 承载能力 400 g·t。可在满载 500 kg 以及 80g 离心状态下施加任意波形地震波, 提供高精度单向水平振动。振动台在 20~200 Hz 振动频率范围内最大输出振动加速度为 20g, 持续振动时间 3 s。配有固壁式模型箱, 尺寸为 72 cm(长)×40 cm(宽)×50 cm(高), 与电液振动台一并固定于离心机吊篮处。模型箱主振方向两壁采取吸波措施, 即在模型箱左右两侧粘贴了厚度 1.5 cm 的塑胶板, 以减少反射波的影响; 其余两壁保证光滑以消除边壁摩擦。



(a) NHRI 400 g·t 土工离心机 (b) 振动台装置

图 1 离心机振动台装置

Fig. 1 Geotechnical centrifuge shaking table apparatus

1.2 试验材料

试验所用砂土取自中国西南某河床覆盖层。该覆盖层自下而上可划分为 3-1、3-2 和 3-3 层, 其中 3-1 层与 3-3 层主要由深灰色或灰黑色的中粗砂、细砂及含泥细砂组成, 筛分后砂料如图 2 所示。3-1 与 3-3 层间夹杂的粉质黏土层(3-2 层), 本试验中以高岭土代替, 高岭土中粒径小于 2 μm 的黏粒含量达到 80%。3-1 层与 3-3 层砂土的物理性质指标, 包括相对密实度(D_r)、最小干密度(ρ_{min})、最大干密度(ρ_{max})、不均匀系数(C_u)和平均粒径(d_{50})列于表 1。试验砂土与高岭土级配曲线如图 3 所示。根据 ASTM D2487-17^[12]土壤分类标准, 3-1 与 3-3 层砂土被归类为颗粒级配不良砂。

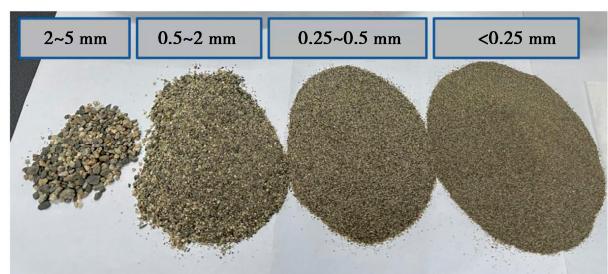


图 2 试验砂土

Fig. 2 Test sand

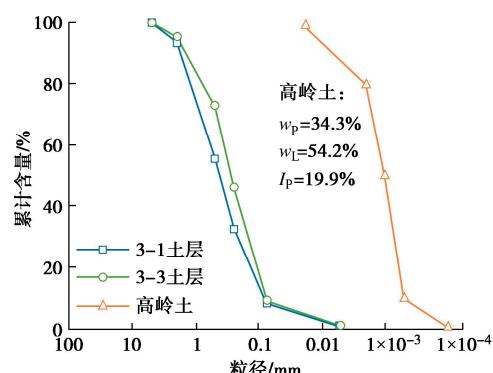


图 3 试验材料级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of test materials

表1 砂土物理性质指标

土层	D_r	$\rho_d/$	$\rho_{\max}/$	$\rho_{\min}/$	C_u	C_c	$d_{50}/$
		(g·cm ⁻³)	(g·cm ⁻³)	(g·cm ⁻³)			
3-1	0.80	1.784	1.90	1.43	7.25	0.92	0.41
3-3	0.65	1.721	1.90	1.46	4.98	0.81	0.26

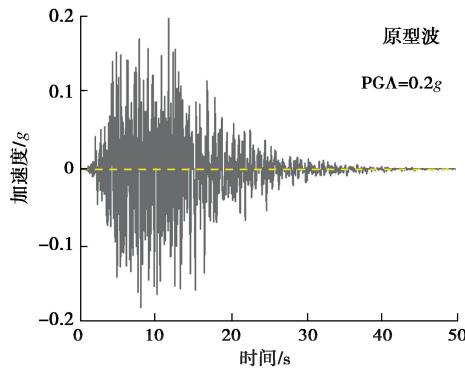
注: $C_u=d_{60}/d_{10}$, $C_c=d_{30}^2/(d_{10} \times d_{60})$; d_{10} , d_{30} , d_{50} 和 d_{60} 分别为级配曲线上累计含量对应 10%, 30%, 50%, 60% 的颗粒粒径。

1.3 模型制备

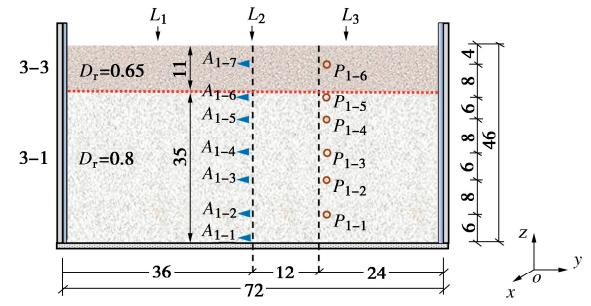
砂土模型的制备常采用砂雨法或分层击实法。不同制样方法产生的初始结构(包括颗粒间的接触与排列)会导致砂土模型液化行为和强度特性呈现差异^[13-15]。砂雨法常用来研究砂土液化行为, 由于制样过程中不施加其他外力, 仅依靠重力让颗粒自由下落形成松散砂土结构, 因此模型相对密实度较低。为达到 80% 的相对密实度, 本次模型制备采用分层击实法, 每层砂土厚度约 5 cm, 分 9 层击实, 初始相对密实度根据砂土质量与体积计算得出。

试验设置了纯砂模型(Model 1)与含黏土夹层砂模型(Model 2)两组对照模型。本研究旨在通过离心模型试验, 揭示深厚砂土覆盖层中黏土夹层对地震作用下饱和砂层超静孔隙水压力增长规律、加速度响应特性及频谱特征的影响, 明确黏土夹层在降低液化危害、改善覆盖层抗震性能方面的潜在作用。离心模型中配置了 6 个 DSPP-I-DM 型孔压传感器^[16](量程: -100~700 kPa)、7 个 YX-1181-5 型压电式加速度传感器(量程: $\pm 50 g$)和 3 个 YP11MGVL80 型激光位移计(量程: 50~100 mm), 分布如图 4 所示。试验前对传感器进行标定, 孔压传感器和加速度传感器分别用于测量模型内超静孔隙水压力和加速度大小, 激光位移计置于模型顶部以测量砂土在离心振动过程中的沉降。

离心模型制备完成后, 利用水头差向模型中注水, 并进行抽真空饱和 24 h。为避免黏土夹层在抽真空过程中受损, 先对黏土层以下砂土进行 24 h 饱和处理, 再放置黏土层及黏土层以上砂土, 随后采用水头法进行二次饱和 24 h。



(a) 无黏土层模型



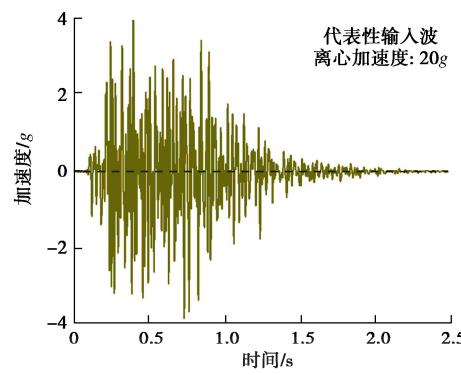
(b) 有黏土层模型

图 4 示意图与传感器布置

Fig. 4 Schematic model and instrumentation layout

1.4 试验条件

离心模型试验的基本原理是, 将 $1/N$ 缩尺的模型置于 Ng (其中 g 为重力加速度)的人造重力场中, 模型所受应力与原型相同。离心模型试验主要物理力学参数相似比尺见表 2。试验中选择图 5(a)所示的人工合成地震波作为基准输入波, 并通过调整输入地震动的峰值加速度(PGA)模拟不同强度的地震作用, PGA 分别为 $0.2g$, $0.1g$, $0.05g$ 。对地震波进行快速傅里叶变换(FFT)处理, 得到图 5(b)所示的傅里叶谱, 图中地震波能量主要集中在 $1\sim 5$ Hz。此外, 由图 5(c)所示的加速度反应谱可知, 原型地震波的卓越周期(T_p)约为 0.2 s, 这里卓越周期^[17]定义为反应谱上最大反应所对应的周期。



(a) 加速度时程曲线

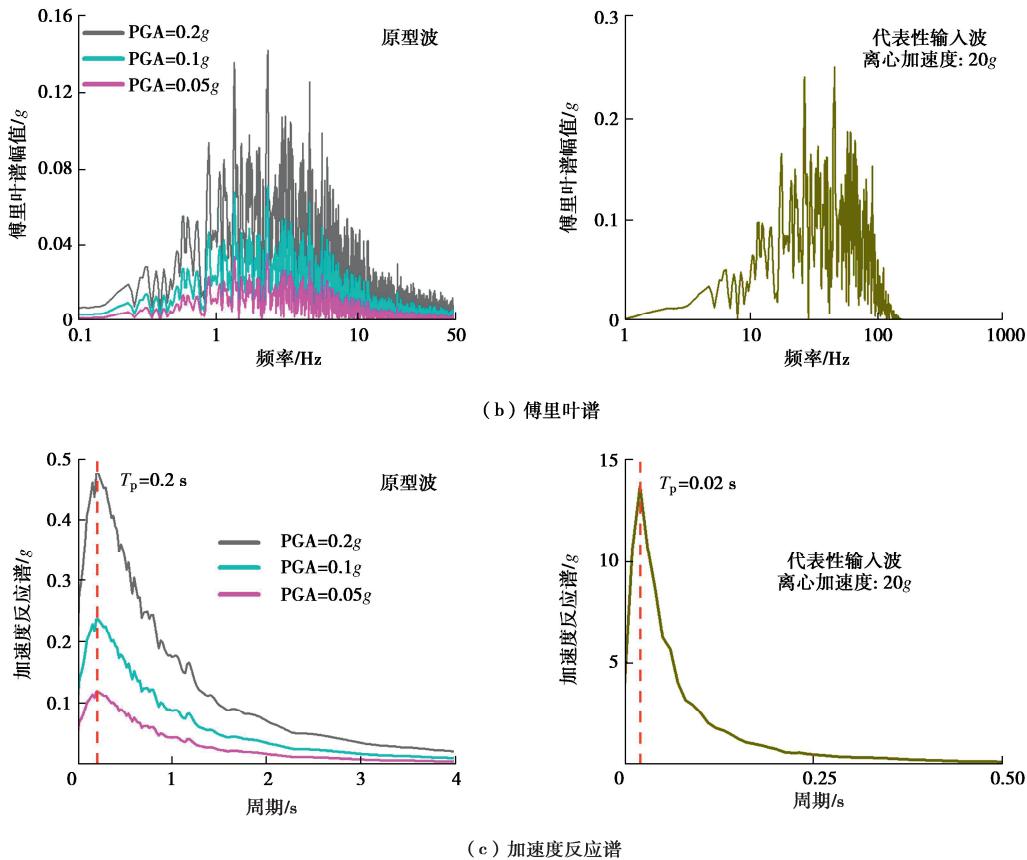


图 5 原型与代表性输入地震波

Fig. 5 Prototype and representative input seismic waves

分别在 20g, 40g, 60g 离心加速度条件下开展纯砂模型和含黏土夹层砂模型试验, 其中 20g 与 40g 工况进行多次等强度振动, 以研究重复振动对模型动力响应的影响。60g 工况下, 还输入了峰值加速度为 0.1g 和 0.05g 的地震波, 亦可知余震对砂土动力特性影响。具体试验工况设置如表 3 所示。

表 2 离心模型试验相似比尺

Table 2 Scaling relationships for dynamic centrifuge modeling

参数	原型(1g)	模型(Ng)
应力和应变	1	1
位移	1	1/N
速度	1	1
加速度	1	N
频率	1	N
时间(动力输入)	1	1/N
时间(固结)	1	1/N ²

2 纯砂模型动力响应结果分析

2.1 超静孔隙水压力响应分析

振动荷载导致土体超静孔隙水压力 (EPWP) 逐渐增大, 有效应力逐渐减小直至为零。当超静孔隙水压力等于有效应力时, 认为土体发生完全液化^[18]。发生大变形和有效应力显著降低可作为土层液化的判别方法, 也可将土层超孔压比 (R_u) 大于 0.8 的区域视

为液化区^[19-20]。 R_u 定义为超静孔隙水压力与土体振前有效应力的比值, 其表达式如下:

$$R_u = \Delta u / \sigma'_v \quad (1)$$

式中: Δu 为超静孔隙水压力; σ'_v 为土体竖向有效应力。

表 3 离心模型试验设置

Table 3 Cases in centrifuge model tests

模型编号	材料	离心加速度/g	PGA/g
S20-1		20	0.2
S20-2		20	0.2
S20-3		20	0.2
S40-1	Model 1, 纯砂模型	40	0.2
S40-2		40	0.2
S60-1		60	0.2
S60-2		60	0.1
S60-3		60	0.05
SC20-1		20	0.2
SC20-2		20	0.2
SC20-3		20	0.2
SC40-1	Model 2, 含黏土夹 层砂模型	40	0.2
SC40-2		40	0.2
SC60-1		60	0.2
SC60-2		60	0.1
SC60-3		60	0.05

每组试验中, 根据相似准则对输入地震波幅值和持时进行缩放。在 20g, 40g 和 60g 离心加速度作用下, Model 1 中 EPWP 增长如图 6 所示, 图中黄色阴影区

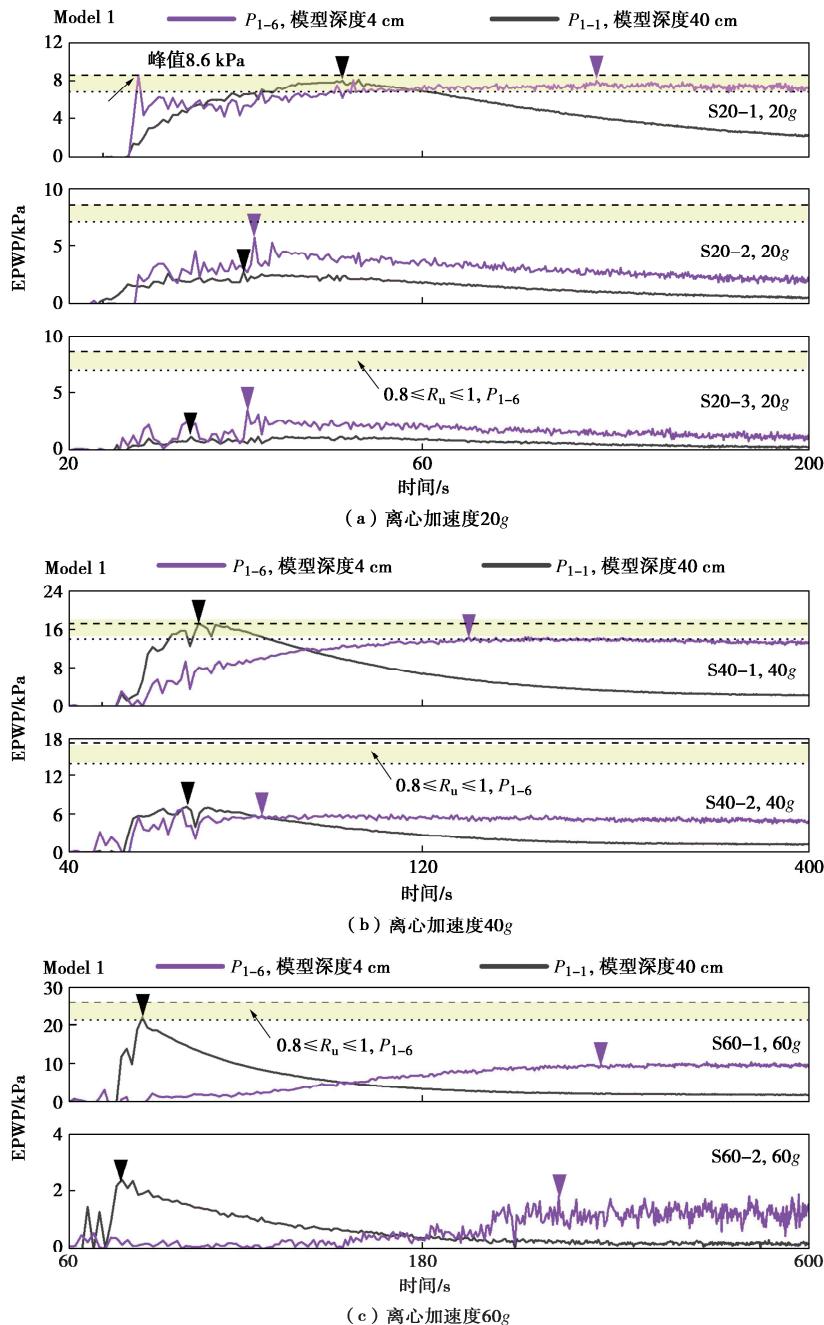


图 6 Model 1 的 EPWP 发展曲线

Fig. 6 Time histories of EPWP in Model 1

域测点 P_{1-6} 的孔压比介于 0.8~1。振动过程中, Model 1 内 EPWP 逐渐累积。以 $R_u > 0.8$ 作为局部液化判别标准, 仅 S20-1 和 S40-1 工况中浅层砂土发生液化。振后超静孔隙水压力消散, 砂土有效应力逐渐恢复, 抗液化能力增强, 表现为重复振动时 EPWP 增长时间缩短、幅值减小。此外, 随着覆盖层厚度增加 (离心加速度增加), 土体发生剪缩, 变得更加致密, EPWP 生成能力减弱。同时, 更长的消散路径进一步促进孔压降低, EPWP 衰减比逐级增大, 余震中 EPWP 衰减比高达 83%。EPWP 衰减比定义为同一离心加速度下, 两次振动 EPWP 幅值之差与前一次振动 EPWP 幅值的

比值, 结果如图 7 所示。

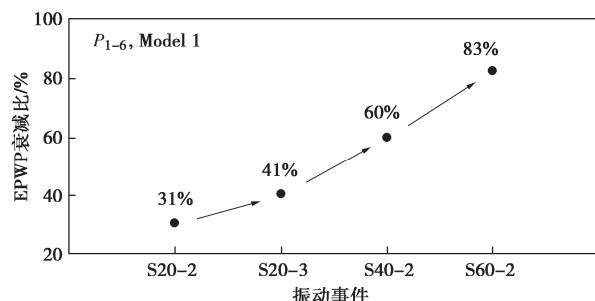


图 7 Model 1 的 EPWP 衰减比

Fig. 7 EPWP attenuation ratios of Model 1

2.2 加速度响应分析

图 8 展示了 Model 1 在 A_{1-7} 处的加速度时程曲线与反应谱。与输入波相比, Model 1 砂土浅表面加速度被不同程度放大, 振密砂土在后续振动中更易在浅层形成加速度放大。浅层砂土靠近自由面, 上覆应力小, 加速度放大明显, 因此其加速度响应幅值普遍高于稍深部位。然而, 液化发生后, 由于砂土有效应力下降、剪切模量降低, 地震波高频成分快速衰减, 液化区加速度反应谱明显缩小, 此时砂土对地震波放大效应减弱。

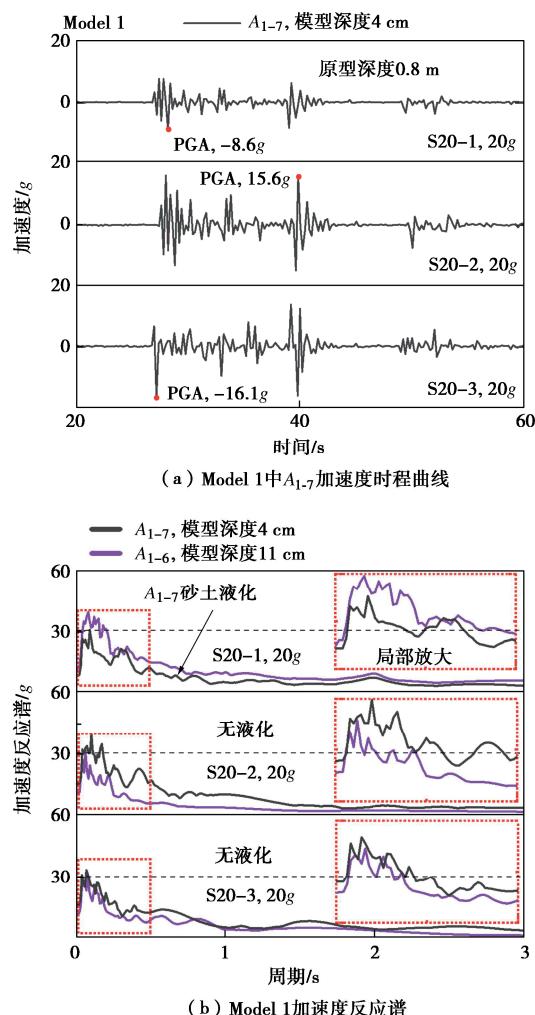


图 8 Model 1 加速度时程曲线及反应谱

Fig. 8 Acceleration time histories and response spectra of Model 1

图 9 中展示了砂土覆盖层归一化加速度反应谱, 其中纵坐标为无量纲动力系数 $\beta = S_a / \text{PGA}$, 反映的是质点最大加速度反应 (S_a) 相对于地面峰值加速度 (PGA) 的放大倍数。图中砂土浅部比深部有更宽的卓越周期范围 (T_p), 这是由于浅层砂土上覆应力低更容易产生较大变形, 这种条件下低频响应更明显; 深层砂土与之相反, 卓越周期范围更短。在卓越周期范

围内, 砂土覆盖层对地震波特定频率分量响应更强。根据中国水工建筑物抗震设计标准^[21]规定, 土石坝、重力坝及拱坝标准设计反应谱中最大动力系数 (β_{\max}) 分别为 1.6, 2.0, 2.5。然而, 本次纯砂覆盖层离心模型试验的 β_{\max} 范围为 2.4~3.7, 高于规范值, 覆盖层的动力响应水平被明显低估。

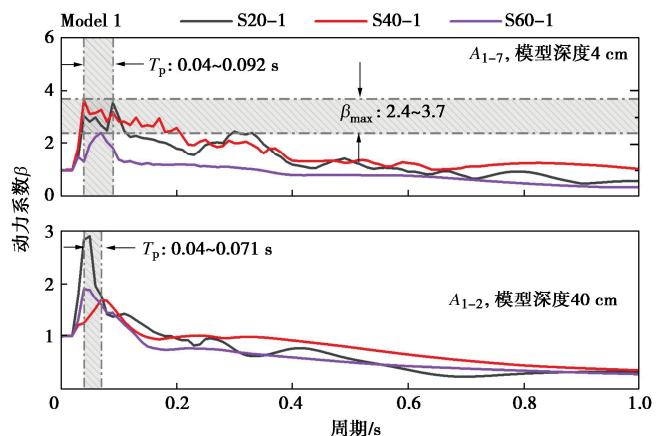


图 9 Model 1 归一化加速度反应谱卓越周期范围

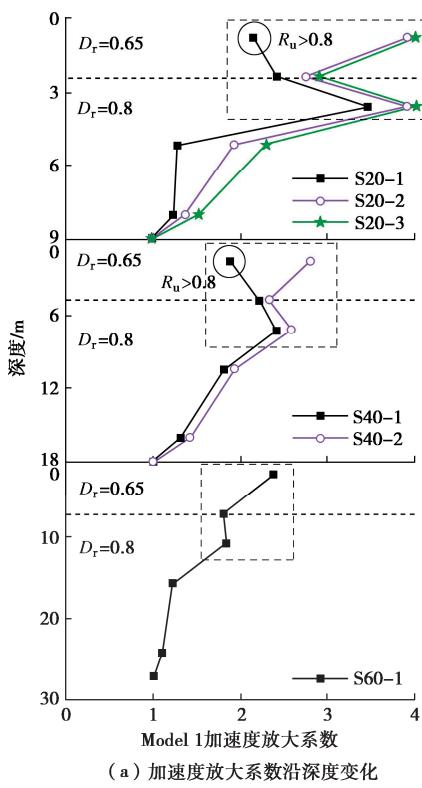
Fig. 9 Predominant period range of normalized acceleration response spectra of Model 1

图 10 记录了砂土不同深度处的加速度放大系数。其中, 图 10 (a) 中虚线标出了相对密实度 $D_r = 0.65$ 和 $D_r = 0.8$ 的交界区域, 可以明显观察到放大系数在此交界处下降。这一现象主要源于两侧土层剪切模量存在差异, 波阻抗不连续引起地震波在界面处发生部分反射与能量损耗, 从而削弱了向上传播的地震能量, 导致加速度响应减弱。此外, 在 S20-1 与 S40-1 模型中, 浅层砂土的孔压比超过 0.8, 已达到液化判据。液化使土体剪切模量大幅降低, 剪切波无法有效传播, 加速度响应进一步减弱。由图 10 (b) 中观察到覆盖层厚度增加导致浅层加速度放大系数减小。覆盖层越厚, 土体则吸收和耗散更多地震波能量, 削弱砂土的浅层放大效应。

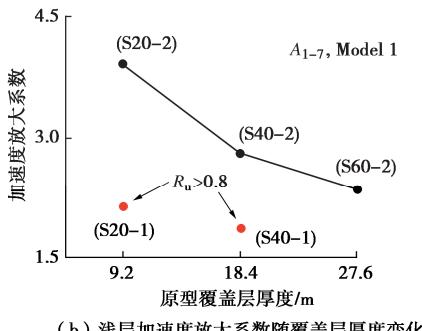
3 黏土夹层对砂性地基影响分析

3.1 超静孔隙水压力与沉降结果对比分析

含黏土夹层模型 (Model 2) 与纯砂模型 (Model 1) 在超静孔隙水压力 (EPWP) 增长模式上存在明显差异。图 11 对比了二者在不同深度的 EPWP 发展规律。输入地震波后, Model 1 底部 (P_{1-1}) 和中部 (P_{1-3}) 砂土的 EPWP 逐渐累积至峰值后消散, 土体进入再固结阶段; 而浅层砂土 (P_{1-6}) 受下部孔压持续传导影响, EPWP 消散过程变得缓慢。



(a) 加速度放大系数沿深度变化



(b) 浅层加速度放大系数随覆盖层厚度变化

图 10 Model 1 加速度放大系数

Fig. 10 Acceleration amplification coefficients of Model 1

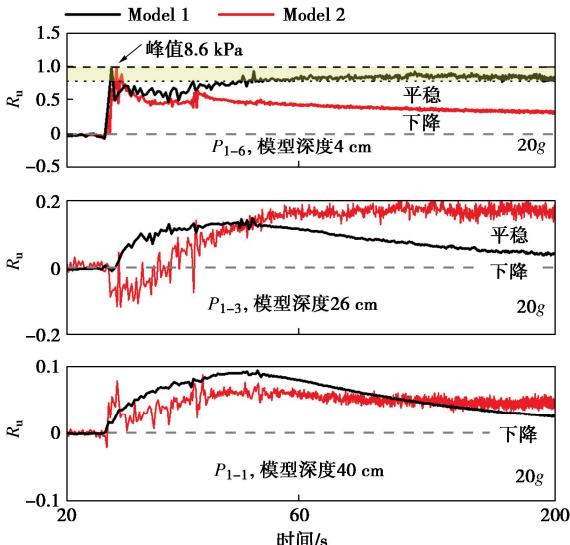
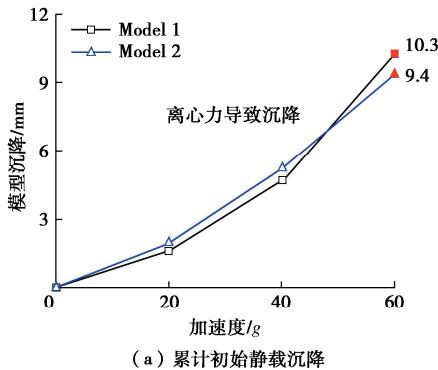


图 11 Model 1 与 Model 2 的 EPWP 对比

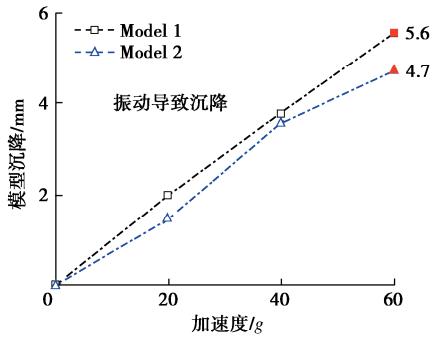
Fig. 11 Comparison of EPWP between Model 1 and Model 2

于 Model 2 而言, 底部 (P_{1-1}) 砂土超孔压增长模式与 Model 1 类似, 均累积至峰值后下降。然而, 中部砂层 (P_{1-3}) 紧邻黏土夹层, EPWP 达到峰值后并未在短时间内表现出明显消散趋势。由于低渗透性黏土夹层截断了孔压向上的渗流通道, EPWP 短时间内无法消散。同时, 黏土夹层也切断了砂层间的水力联系, 使夹层以上砂土无法获得来自下部的孔压传导, 导致浅层砂土 EPWP 达到峰值后迅速消散, 未发现明显液化现象。上述结果表明, 黏土夹层能够有效阻断砂层间的孔压传递, 加快夹层以上砂土超静孔隙水压力消散速度, 有效降低浅层砂土液化风险。

离心加载过程中, 受自重效应增强影响, 土颗粒发生挤压变形, 产生初始静载沉降。激光位移计所记录的总沉降量包含离心力作用导致的初始静载沉降与振动引起的沉降。图 12 分别展示了 Model 1 与 Model 2 分级加载与振动作用下的累计初始静载沉降与累计振动沉降。结果显示, 两种模型的总初始静载沉降与总振动沉降量均接近, 最大差值不超过 1 mm, 表明本试验条件下, 夹层的引入对砂土覆盖层整体沉降影响较小, 未改变沉降发展趋势。



(a) 累计初始静载沉降



(b) 累计振动沉降

图 12 模型沉降

Fig. 12 Settlements of Model 1 and 2

3.2 加速度响应结果对比分析

图 13 给出了 Model 2 不同工况下沿深度的加速度放大系数分布。由于黏土材料的阻尼比通常较高, 在地震传播过程中能够有效吸收并耗散部分能量, 因此

黏土夹层处加速度放大系数明显降低，加速度响应被削弱。

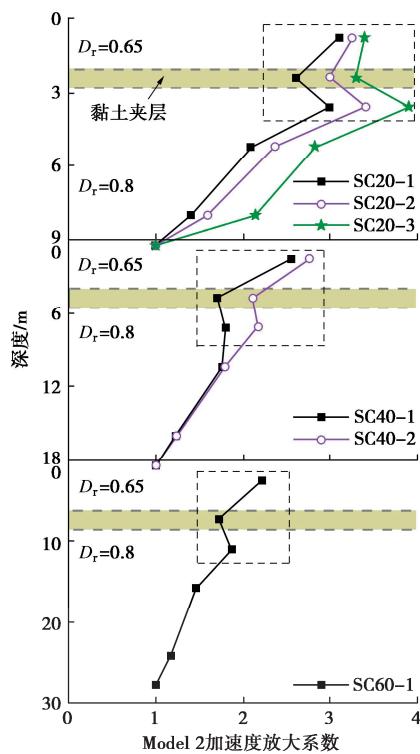


图 13 Model 2 加速度放大系数

Fig. 13 Acceleration amplification coefficients of Model 2

图 14 进一步对比了测点 A_{1-7} 处 Model 1 与 Model 2 的浅层加速度放大系数变化。两种模型加速度放大系数随振动次序表现为先升后降。在初始较松散状态 (S/SC20-1)，Model 1 出现局部液化 ($R_u > 0.8$)，其加速度放大系数比 Model 2 低约 44.7%。随振动次数增加，砂土被逐渐振密，二者放大系数均增大；当离心加速度增加至 40g 时，Model 1 再次发生液化，其加速度放大系数比 Model 2 低约 36.7%。在未发生液化的其他工况中，Model 2 的放大系数则始终低于 Model 1，最大降幅达 16.7%。直至振动后期，二者加速度放大系数逐渐接近。

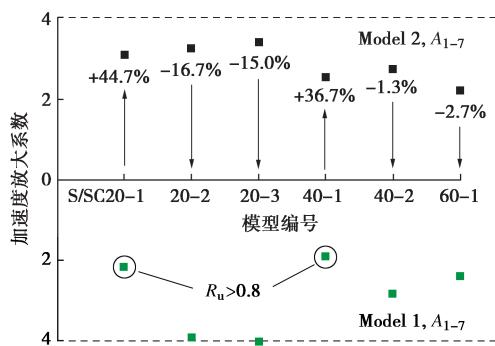
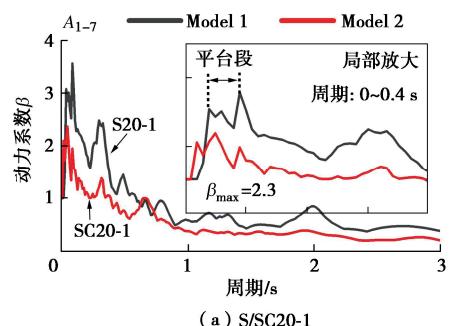


图 14 Model 1 和 2 浅层加速度放大系数

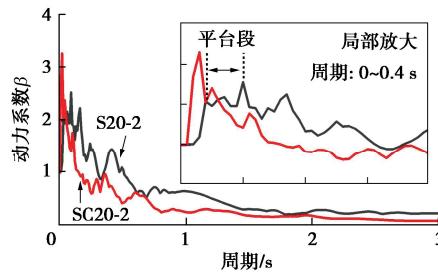
Fig. 14 Surface acceleration amplification coefficients for Model 1 and 2

综上，黏土夹层的存在可有效削弱上、下土层间的地震波传递，降低覆盖层土体的加速度放大效应，尤其在未发生液化的工况下差异更为突出。

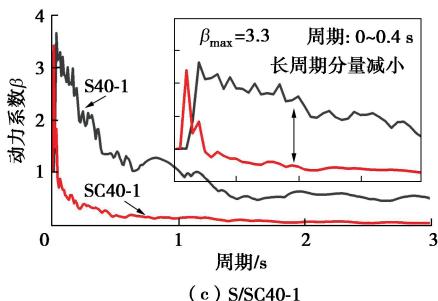
Model 1 与 Model 2 在测点 A_{1-7} 处归一化加速度反应谱变化情况展示于图 15 中。相比之下，Model 1 在短周期范围（约 0~0.4 s）存在相对平坦的“平台段”，浅层砂土在该周期范围内对地震动表现出强烈响应。而 Model 2 在相同周期内反应谱陡升陡降，缺乏明显“平台段”，高频响应集中表现在特定周期。这种差异主要源于黏土夹层有效耗散了地震波高频能量，抑制了“平台段”的形成。此外，Model 2 在长周期段的谱值普遍低于 Model 1，进一步表明夹层对低频能量亦具有一定衰减作用。



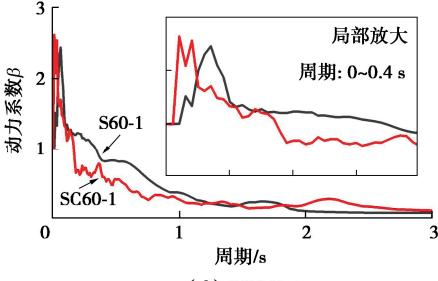
(a) S/SC20-1



(b) S/SC20-2



(c) S/SC40-1



(d) S/SC60-1

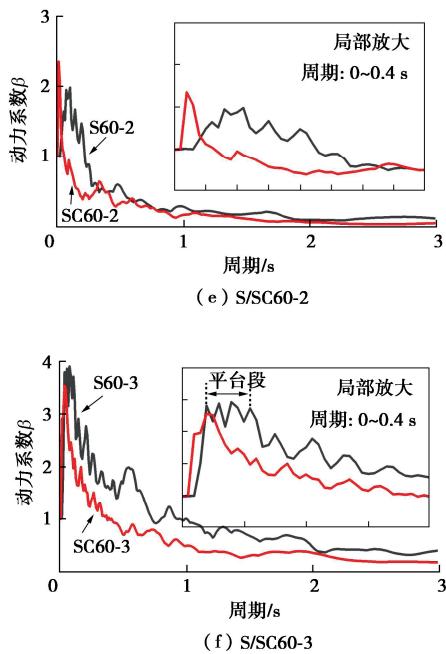


图 15 归一化加速度反应谱

Fig. 15 Normalized acceleration response spectra

在输入地震动 PGA 为 0.2g 的条件下, 增加黏土夹层后, Model 2 中反应谱 β_{\max} 最小值为 2.3 (SC20-1), 最大值为 3.3 (SC40-1), 虽较 Model 1 略有降低, 但仍高于抗震设计规范^[21]中的规定值 (1.6~2.5)。总体上, 黏土夹层能有效衰减地震波高频分量, 使上覆砂土层频谱响应更集中且快速衰减, 从而减小浅层砂土在持续振动过程中的动力反应强度。但与现行设计规范相比, 试验中所得反应谱动力系数仍明显偏高, 说明在深厚覆盖层场地条件下, 现行规范可能低估了实际地震动的放大效应, 仍需结合场地动力特性对标准设计谱进行适当调整和优化。

4 结 论

针对纯砂覆盖层 (Model 1) 与含黏土夹层砂覆盖层 (Model 2) 开展了一系列离心模型试验, 重点分析了不同离心加速度和地震动条件下砂土超静孔隙水压发展、加速度响应及频谱特性差异。主要得到以下 4 点结论。

(1) 采用分层击实法制备的砂土模型更加密实, 模型沉降受夹层影响较小。重复振动下砂土超静孔隙水压力增长时间缩短、幅值减小, 表现出更强抗液化能力。

(2) 覆盖层厚度增加, 即孔压消散路径延长, 促使超静孔隙水压力衰减比增大。同时, 黏土夹层切断了上、下砂层间的水力联系, 进一步加快浅层砂土超静孔隙水压力消散速度, 有效降低了浅层砂土的液化风险。

(3) 黏土夹层有助于减弱地表加速度响应。不同相对密实度砂土层交界面与黏土夹层处的加速度放大系数均明显降低, 分别归因于剪切模量差异引起的波阻抗不连续, 以及高阻尼材料对地震能量的吸收与耗散作用。增加覆盖层厚度同样利于地震传播过程中耗散能量, 减弱地表加速度响应。

(4) 从频谱响应特征来看, 黏土夹层既能有效耗散地震波高频能量, 亦对低频能量起到一定衰减作用。黏土夹层使砂土覆盖层频谱响应更集中、衰减更迅速, 缩短反应谱“平台段”, 降低了诱发结构破坏的风险。但对于本次研究的深厚砂土覆盖层, 试验所得反应谱动力系数明显高于现行设计规范要求, 规范中低估了深厚覆盖层对实际地震动的放大效应。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 陈锦祎、傅中志和陈澄昊设计研究内容, 傅中志和陈生水提供研究指导, 陈锦祎和陈聪完成物理模型试验, 陈锦祎和傅中志参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by CHEN Jinyi, FU Zhongzhi, and CHEN Chenghao. Guidance for this study was provided by FU Zhongzhi and CHEN Shengshui. The physical model tests were carried out by CHEN Jinyi and CHEN Cong. The manuscript was drafted and revised by CHEN Jinyi and FU Zhongzhi. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 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))
- [2] SEED H B, IDRISI I M. Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(3): 83-108.
- [3] CAO Z Z, LESLIE YOUD T, YUAN X M. Gravelly soils that liquefied during 2008 Wenchuan, China earthquake, $M_s=8.0$ [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(8): 1132-1143.
- [4] 唐俭政, 张齐, 黄颖婷, 等. 含软弱夹层场地的一维等效线性化地震响应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 36-42. (TANG Jianzheng, ZHANG Qi, HUANG Yingting, et al. One-dimensional equivalent linearized

- seismic response analysis for sites with soft interlayer[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, **46**(1): 36-42. (in Chinese))
- [5] TAKAHASHI N, HYODO M, HYDE A F, et al. Online earthquake response test for stratified layers of clay and sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(5): 611-621.
- [6] MAHARJAN M, TAKAHASHI A. Centrifuge model tests on liquefaction-induced settlement and pore water migration in non-homogeneous soil deposits[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **55**: 161-169.
- [7] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, ZENG X W, et al. Mechanism of liquefaction response in sand-silt dynamic centrifuge tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, **18**(1): 71-85.
- [8] LEE C J, CHEN H T, LIEN H C, et al. Centrifuge modeling of the seismic responses of sand deposits with an intra-silt layer[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **65**: 72-88.
- [9] 杨永香, 胡金虎, 贾敏才, 等. 粉粒夹层对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(6): 1215-1220. (YANG Yongxiang, HU Jinhu, JIA Mincai, et al. Effects of silty interlayer on liquefaction characteristics saturated stratified sands[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(6): 1215-122s0. (in Chinese))
- [10] 金丹丹, 鲁先东, 王炳辉, 等. 冲击荷载下含夹层饱和砂土孔压变化规律分析 [J]. 岩土力学, 2024, **45**(4): 1081-1091, 1120. (JIN Dandan, LU Xiandong, WANG Binghui, et al. Analysis of pore pressure variation pattern of saturated sandy soil containing interlayer under impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(4): 1081-1091, 1120. (in Chinese))
- [11] YANG Z H, ELGAMAL A. Influence of permeability on liquefaction-induced shear deformation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, **128**(7): 720-729.
- [12] INTERNATIONAL A. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System): ASTM D2487—17[S]. PA: West Conshohocken, 2011.
- [13] MULILIS J P, SEED H B, CHAN C K, et al. Effects of sample preparation on sand liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(2): 91-108.
- [14] 叶斌, 宋思聪, 倪雪倩. 制样方法对砂土液化力学性质影响的离散元模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, **50**(7): 998-1008. (YE Bin, SONG Sicong, NI Xueqian. Effects of sample preparation method on sand liquefaction mechanical properties with discrete element simulation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, **50**(7): 998-1008. (in Chinese))
- [15] ISHIBASHI I, CAPAR O F. Anisotropy and its relation to liquefaction resistance of granular material[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(5): 149-159
- [16] 汤兆光, 王永志, 孙锐, 等. 动力离心试验微型孔压传感器研制与性能验证[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 129-134. (TANG Zhao Guang, WANG Yongzhi, SUN Rui, et al. Development and performance verification of micro pore pressure sensor for dynamic centrifugal test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 129-134. (in Chinese))
- [17] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (GU Ganchen, SHEN Changsong, CEN Weijun. Earthquake Engineering for Earthrock Dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [18] MONTOYA-NOGUERA S, LOPEZ-CABALLERO F. Effect of coupling excess pore pressure and deformation on nonlinear seismic soil response[J]. Acta Geotechnica, 2016, **11**(1): 191-207.
- [19] KOUTSOURELAKIS S, PRÉVOST J H, DEODATIS G. Risk assessment of an interacting structure-soil system due to liquefaction[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, **31**(4): 851-879.
- [20] POPESCU R, PREVOST J H, DEODATIS G, et al. Dynamics of nonlinear porous media with applications to soil liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**(6/7): 648-665.
- [21] 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018. (Standard for Seismic Design of Hydraulic Structures: GB 51247—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese))