

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1000

超重力振动台柔性叠层箱剪切效能评价方法

王体强¹, 王永志¹, 张雪东², 汤兆光¹, 段雪锋¹

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048)

摘 要: 针对超重力振动台试验场地边界效应和新研制的一套柔性叠层箱, 设计与开展干砂、纯水离心模型对比试验, 引入加速度峰值误差 E_{PGA} 、归一化均方误差 NMSE、峰值频率误差 E_F 等指标, 评价了该叠层箱的剪切效能和边界效应。结果表明: 与土体中心加速度相比, 干砂模型叠层梁的 E_{PGA} 、NMSE 和 E_F , 最大分别为 21.50%、21.36% 和 3.1%, 表明该叠层箱具有较好剪切效能。相同动荷载条件下, 干砂模型各叠层梁的加速度峰值和峰值频率, 最高是纯水模型的 2.37 倍和 2.23 倍, 说明干砂试验中叠层梁的响应被土体响应控制, 进一步验证了叠层箱具有良好剪切效能。干砂模型叠层梁与土体中心的剪切模量和阻尼比基本一致, 误差分别为 3% 和 18%; 纯水模型叠层梁的剪切模量为干砂模型的 1/3, 仅为 9.22 MPa; 但阻尼比较大, 为 34.8%。以加速度峰值误差 5% 为边界效应临界距离, 该叠层箱中心处约 90 cm×24 cm 范围内的测试结果是有效和可靠的。提出的方法与结论, 对评价超重力振动台叠层箱边界效应具有重要指导意义和应用价值。

关 键 词: 超重力振动台; 柔性叠层箱; 边界效应; 评价指标; 校验方法

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)03-0719-11

Shear performance evaluation of a flexible laminar container with hypergravity shaking table tests

WANG Ti-qiang¹, WANG Yong-zhi¹, ZHANG Xue-dong², TANG Zhao-guang¹, DUAN Xue-feng¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Aiming at the site boundary effects on the hypergravity shaking table, with the benefits of a newly developed flexible laminar container, we design and carry out comparison tests between the dry sand and the water centrifugal model. We introduce the metrics including the acceleration peak error E_{PGA} , the normalized mean square error NMSE, and the peak frequency error E_F , to evaluate the shear efficiency and boundary effects of the laminar container. The results show that compared with the center accelerations of the soil, the maximum values of E_{PGA} , NMSE and E_F for the laminar beams can be 21.50%, 21.36% and 3.1%, respectively, with the dry sand model, indicating the shear efficiency of the laminar container. Under the same dynamic load conditions, the peak acceleration and the peak frequency of each laminar beam in the dry sand model are 2.37 and 2.23 times of those of the water model, indicating that the response of the laminar beams in the dry sand model is controlled by the response of the soil, which further verifies the excellent shear efficiency of the laminar container. The shear modulus and the damping ratio are similar between the laminar beams and the center of the soil in the dry sand model, with the relative differences of 3% and 18%, respectively; the shear modulus of laminar beams in the water model is 1/3 of that in the dry sand model, which is only 9.22 MPa; but the damping ratio is relatively large, which is 34.8%. Taking 5% of the acceleration peak error as the threshold of the boundary effect, the test results are valid and reliable in the range of about 90 cm×26 cm at the center of the laminar container. The proposed methods and conclusions should have important guiding significance and application value for evaluating the boundary effect of the laminar container of the hypergravity shaking table.

Keywords: hypergravity shaking table; flexible laminar container; boundary effect; evaluation indexes; verification methods

收稿日期: 2021-07-05

修回日期: 2021-12-15

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目 (No.2019EEEEVL0203); 国家自然科学基金项目 (No.51609218); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (No.YQ2019E035)。

This work was supported by the Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(2019EEEEVL0203), the National Natural Science Foundation of China(51609218) and Heilongjiang Natural Science Foundation(YQ2019E035).

第一作者简介: 王体强, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事动力离心模型试验测量与数据处理方法方面的研究。E-mail: wangtiqiang0313@126.com

通讯作者: 王永志, 男, 1984 年生, 博士, 副研究员, 主要从事动力离心试验方法、地基基础抗震设计研究。E-mail: yong5893741@163.com

1 引言

叠层试验箱也称层状箱或剪切箱,是常重力振动台和超重力离心机物理试验研究各类自由场地地震反应和土-基-结相互作用的重要工具。理想化叠层箱能有效避免边界效应和模拟半无限空间环境,而实际证明,从材料角度和岩土强非线性角度,叠层箱仅能一定程度减轻边界效应,且受有限箱体尺寸和两种介质动力相互作用影响,其势必一定程度扭曲试验结果。因此,叠层箱剪切效能评价是岩土工程物理试验领域的一个基础课题。

在此,简要回顾和总结叠层箱剪切效能与边界效应评价方面具有代表性的研究成果,表1列出了一些叠层箱的设计者、年份、应用场合(常/超重力)、形状、尺寸和导向装置等。Whitman等^[1]率先提出采用叠层箱消除边界效应和模拟半无限空间环境的基本思想,并研发了一套基于聚四氟乙烯润滑的铝环叠层箱。Hushmand^[2]和Zeng^[3]等用叠层梁加速度、变形响应等验证了动力离心模型试验模型箱的可靠性。Matsuda等^[4]研制了层状单向剪切箱,并最早完成了饱和砂土振动台试验研究。Ueng^[5]和Turan^[6]等通过振动台试验和数值模拟,验证模型箱的剪切性能和边界影响。陈国兴等^[7]基于自主研发叠层箱的自由场模型试验,提出边界效应指数作为衡量土箱边界效应的指标。而孙海峰^[8]、杜修力^[9]、李小军^[10]等主要用加速度峰值误差、Fourier幅值谱误差或反应谱相对误差评价模型箱的边界效应。Lee等^[11]进行了大量的动力离心机测试和相应的地震响应分析,用峰值地面加速度(peak ground acceleration,简称PGA)和加速度谱评估了剪切箱的动态性能。

表1 剪切叠层箱的应用

Table 1 Applications of shear laminar container

设计者	年份	常/超重力	形状	尺寸	导向装置
Whitman等 ^[1]	1981	超重力	圆形	0.30 m×0.30 m	铝环润滑
Hushmand等 ^[2]	1988	超重力	矩形	0.38 m×0.20 m×0.35 m	刚性滚子
Zeng等 ^[3]	1996	超重力	矩形	0.56 m×0.25 m×0.23 m	柔性橡胶
Matsuda等 ^[4]	1998	常重力	矩形	2.50 m×1.50 m×2.00 m	刚性滚子
Ueng等 ^[5]	2006	常重力	矩形	1.88 m×1.88 m×1.52 m	线性导轨
Turan等 ^[6]	2009	常重力	矩形	0.90 m×0.45 m×0.90 m	刚性滚子
陈国兴等 ^[7]	2010	常重力	矩形	3.50 m×2.00 m×1.70 m	刚性滚子
孙海峰等 ^[8]	2011	常重力	矩形	3.70 m×2.40 m×1.70 m	刚性滚子
杜修力等 ^[9]	2012	常重力	圆形	4.12 m×1.98 m	刚性滚子
Lee等 ^[11]	2013	超重力	矩形	0.65 m×0.65 m×0.65 m	柔性橡胶
李小军等 ^[10]	2017	常重力	圆形	5.064 m×1.800 m	线性导轨

综上所述不难发现,目前国内外叠层试验箱绝大多

数为针对常重力振动台模型试验而发展,且多为针对基于刚性滚子和线性导轨的叠层箱开展,且缺少统一的评价指标和验证方法。与常重力振动台叠层箱相比,超重力作用下叠层箱的层间导向结构要承受很大离心力荷载;箱体尺寸相对很小,按照相似比,层间位移十分微小;且要承受几十g的高频冲击。同时,近些年超重力离心机的数量与规模取得飞跃发展,科研试验与工程试验激增^[12-14]。因此,超重力试验环境下叠层箱的研制与剪切效能评价更值得关注和亟待开展深入基础研究。

为此,本文针对近期开发的一套基于柔性氯丁橡胶获得层间变形的叠层箱,设计与开展了一组干砂、纯水动力离心模型平行试验。通过施加正弦、El-centro、TCU等波,以加速度峰值误差 E_{PGA} 、加速度归一化均方误差NMSE、峰值频率误差 E_F 评价了叠层箱的剪切效能和边界效应的空间分布,并进一步给出了边界效应临界距离和滞回圈、模量阻尼比的分布特征,为合理选取传感器布设位置、正确认识试验数据可靠性和优化叠层箱设计,建立一定的指导依据。

2 试验设备与方案设计

2.1 动力离心机

本文动力离心模型平行试验在中国地震局工程力学研究所DCIEM-40-300动力离心机上开展,见图1。该离心机有效半径为5m,最大离心加速度为100g,最大荷载为3t,容量为300g·t。1500kg离心振动台采用电液伺服驱动,实现水平单向振动,其主要性能指标列入表2。该离心振动台采用橡胶轴承导向装置和一致性调频技术,增加台面承载能力和获得更大的同步激振力,大幅提高了振动容量。另外,该离心机配有128静/动复用通道IMC数据采集系统,可满足加速度、位移、应变、孔压、土压力以及热电偶等信号独立静态、动态量测需求。

2.2 柔性叠层箱

采用多层平面框架堆叠而成叠层剪切试验箱,根据超重力试验的研究目的和环境特点,其设计应遵循以下基本原则和技术要求^[15-17]:

(1) 相邻剪切梁之间能自由地相对错动,有效消除端壁产生的反射波,以模拟自由场地条件。

(2) 剪切梁具有足够的强度和刚度,在离心条件和振动过程中保持平衡尺寸不变。

(3) 叠层箱端壁能维持由于振动作用产生的补偿剪应力,使模型土体与原型地基土体具有相同的剪切变形特征。



(a) 300 g · t 离心机



(b) 1 500 kg 离心振动台

图 1 工程力学研究所离心机振动台

Fig.1 Geotechnical centrifuge shaking table at IEM

表 2 离心振动台主要性能指标

Table 2 Main parameters of the shaking table system

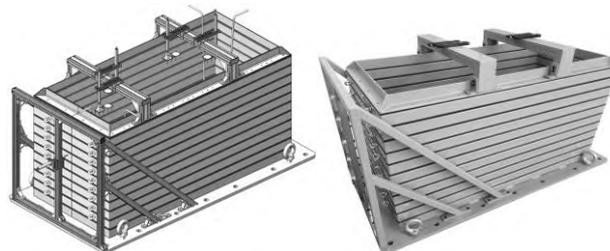
离心加 速度/g	激振加 速度/g	激振速度 (m · s ⁻¹)	激振 位移 /mm	振动频宽 /Hz	振动 负载 /kg	振动容量 /(g · t)	台面尺寸 长/m 宽/m
50	>30	1	10	10~300	1 500	>40	1.6 0.8

(4) 叠层梁质量尽可能轻，以减少振动过程中自身质量惯性作用对周边土体侧向动土压力的干扰。

(5) 叠层箱具有合适的长、宽、高比例，以避免出现难以分析的三维问题。

本文研究了叠层箱不同导向装置的特点与原理，综合考虑叠层箱的剪切变形特征与边界效应，设计出的叠层箱如图 2 所示，其主要设计具有层间刚度可调、内部空间大、剪切效果明显等特点。叠层箱的长×宽×高为 130 cm×60 cm×67 cm，采用 11 层 5 cm×5 cm 的轻质方形空心的铝合金方管与特质橡胶层堆叠而成。整体重 352 kg，远小于振动台的最大振动负载为 1 500 kg。由于该叠层箱以氯丁橡胶变形实现刚性铝合金环梁之间的错动与位移，与以往基于滚子和线性导轨滑动的叠层箱具有显著不同。该叠层箱能够模拟长为 60 m、宽为 25 m、厚为 28 m 的原位土体或模型，为国内现役最大的动

力离心土工叠层箱。箱体内侧贴有 2 mm 的橡胶膜做防水保护，箱底安装有透水石和给排水通道，用于模型饱和和排水。箱体顶部和侧面安装位移计固定支架，用于测量土体沉降和竖向位移。



(a) 设计图

(b) 实物图

图 2 柔性叠层剪切箱

Fig.2 Flexible laminar shear container

2.3 试验方案设计

试验选用福建标准中砂，其物理力学性质参数如表 3 所示，设计与开展干砂和纯水平行试验，以干砂模拟场地具有较大剪切模量状态，纯水模拟场地处于完全液化与失效状态，分别对应场地两种极限“强、弱”状态。模型试验设计方案如图 3 所示，模型土体中心布设 CA 列、沿长度方向布设 B1-A、B2-A、B3-A 和 B4-A 4 列、沿宽度方向布设 B5-A 和 B6-A 两列加速度传感器，其中 B4-A 列布设在土体边界，靠近叠层箱端壁中心，距端壁 5 mm 处；B6-A 列布设在靠近叠层箱侧壁中心，距侧壁 5 mm 处。叠层箱端壁外侧布设 SA 列加速度传感器和 SD 列位移传感器。除此之外，在模型土体内部埋深 5.6 m 和 16.8 m 处，每层增布 4 只加速度传感器。每列传感器各对应测点的布设高度相同。砂雨法制备模型，实测相对密度为 48%。纯水模型试验，叠层箱外部的 SA 列加速度传感器与 SD 列位移传感器布设与干砂试验模型一致。

表 3 基本物理力学性质

Table 3 Fundamental physical and mechanical properties

物理量	G_s	C_c	C_u	D_{50}/mm	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
参数	2.65	0.844	2.034	0.48	1.47

注： G_s 为土粒相对密度； C_c 为曲率系数； C_u 为土的不均匀系数； D_{50} 为小于该粒径的土颗粒的质量占土颗粒总质量的 50%； ρ 为土体密度。

试验在 50 g 离心加速度条件下开展，选用扫频波、正弦波、El-centro 波、TCU 波等作为振动台输入荷载，其原型加速度时程和归一化频谱如图 4 所示，其中扫频波的频率为 0.2~4.0 Hz，转换成模型数据后为 10~200 Hz。试验的加载工况如表 4 所示。下文数据除特别说明外均为经相似比换算后的原型

数据。

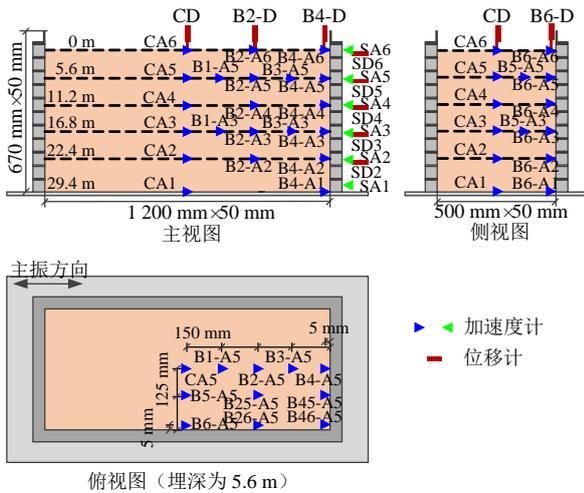


图3 试验模型设计与测量传感器布设

Fig.3 Model configuration and the instrument layout

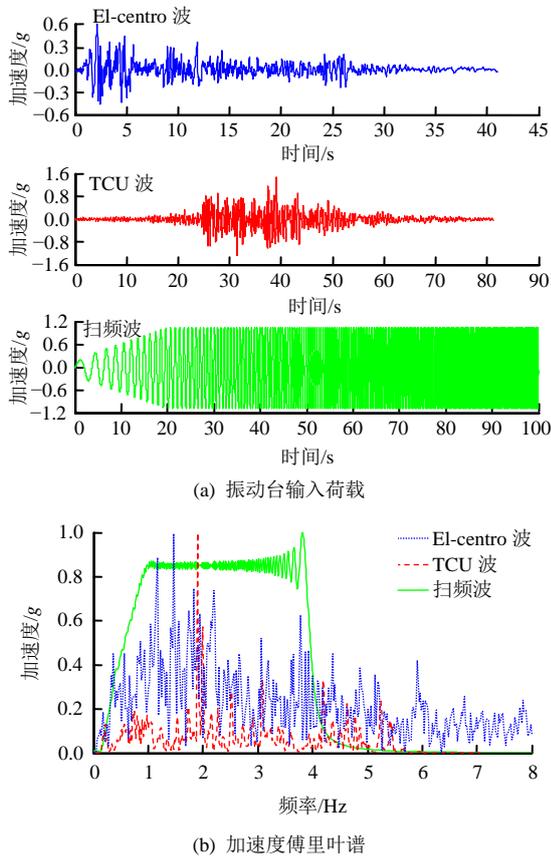


图4 振动台输入荷载及傅里叶谱

Fig.4 Dynamic loadings and the Fourier spectrums

表4 加载工况表

Table 4 List of load cases

序号	输入荷载	目标 PGA/g	干砂实测 PGA/g	纯水实测 PGA/g
1	扫频波	0.03	0.029	0.030
2	扫频波	0.10	0.102	0.102
3	正弦波	0.10	0.104	0.103
4	El-centro 波	0.30	0.307	0.309
5	TCU 波	0.30	0.310	0.306
6	正弦波	0.20	0.205	0.204

3 剪切效能评价

3.1 叠层箱自振频率和阻尼比

叠层箱的自振频率和阻尼比等动力特性可以通过计算台面和箱体之间的加速度响应传递函数计算得出，即输入扫频荷载，利用傅里叶变换，计算箱体与台面输入荷载的幅值比，当输入频率与叠层箱的频率相等时，叠层箱共振，传递函数达到峰值，由此方法测得叠层箱的自振频率为 0.641 Hz。之后，按照半功率点（带宽）法^[18]计算叠层箱的阻尼比为 29.8%。而地震动作用下土体的阻尼比一般在 5%~25%之间，因此叠层箱的阻尼基本不会影响模型地基的地震响应。

3.2 干砂模型加速度分布特征

由于位移与加速度时程的分析结果基本一致，限于篇幅，本文仅列出了基于加速度时程的叠层箱剪切效能评价结果。干砂模型，0.2 g 正弦波、El-centro 波和 TCU 波荷载下，CA、B2-A、B4-A、B6-A 和 SA 5 列加速度传感器实测的加速度时程如图 5 所示。观察图 5 可直观发现，3 种荷载下，相同埋深，不同位置的加速度时程幅值及相位基本一致；模型端壁 B4-A 列、侧壁 B6-A 列和叠层梁 SA 列实测加速度时程较土体模型中心 CA 列没有明显差异。

借鉴前人的研究成果，基于边界效应的基本概念和叠层箱的目标效果，提出评价指标为：加速度峰值误差 E_{PGA} 、加速度归一化均方误差 NMSE、峰值频率误差 E_F ，分别评价实测加速度时程的局部和整体离散程度以及叠层箱的频率特征。 E_{PGA} 、NMSE 和 E_F 的计算公式如下：

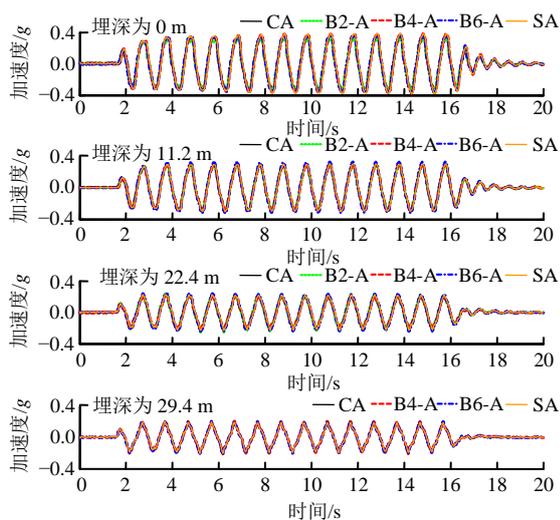
$$E_{PGA} = \left| \frac{PGA_M - PGA_C}{PGA_C} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{M,i} - A_{C,i})^2}{\sum_{i=1}^n (A_{C,i})^2} \times 100\% \quad (2)$$

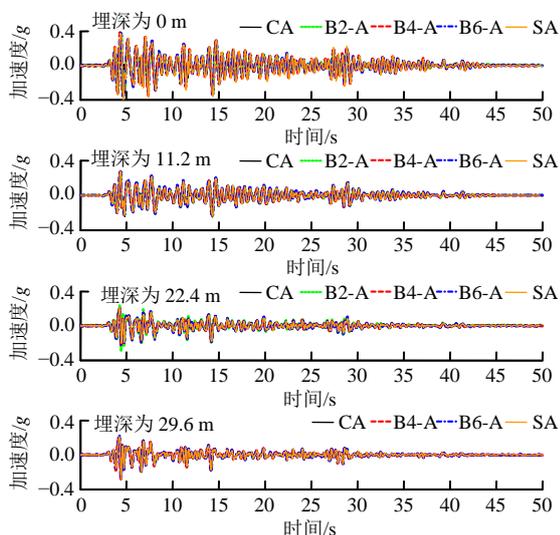
$$E_F = \left| \frac{F_M - F_C}{F_C} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中： $A_{C,i}$ 为模型中心处 (CA1~CA6) 实测加速度时程，峰值为 PGA_C ，频率峰值为 F_C ； $A_{M,i}$ 为模型其他位置处实测加速度时程，峰值为 PGA_M ，频率峰值为 F_M 。

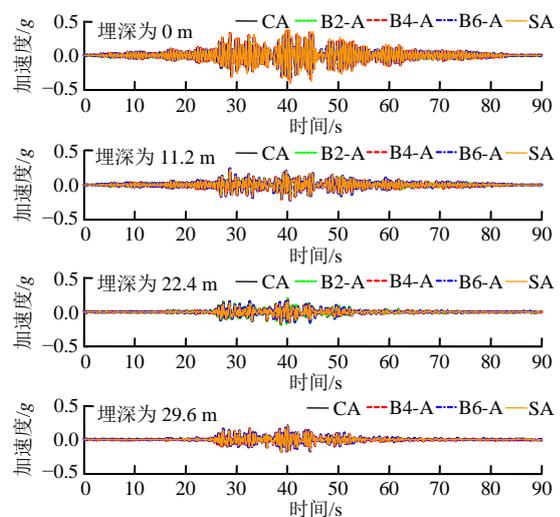
以模型中心 CA 列加速度时程为参考，3 种输入荷载下，B2-A、B4-A、B6-A 和 SA 等列的加速度峰值误差 E_{PGA} 和归一化均方误差 NMSE 随深度的空间分布，如图 6 所示。总体而言，3 种荷载下，各列加速度时程的 E_{PGA} 和 NMSE 均沿埋深的增加



(a) 正弦波



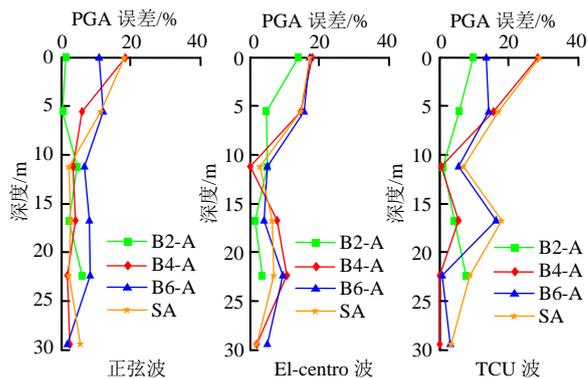
(b) El-centro 波



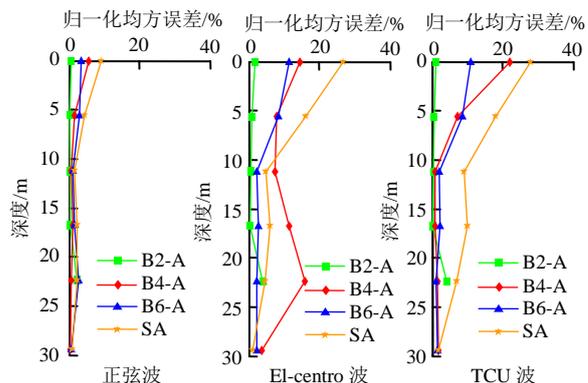
(c) TCU 波

图 5 干砂模型实测加速度对比

Fig.5 Comparison of the measured accelerations of the dry sand model



(a) 加速度峰值误差



(b) 加速度归一化均方差

图 6 干砂模型加速度误差随深度空间分布

Fig.6 Variation of the acceleration errors with the depth of the dry sand model

而降低，在模型表面达到最大值。相较于模型边界 B4-A 列、B6-A 列和叠层梁 SA 列，土体内部 B2-A 列加速度时程的 E_{PGA} 和 NMSE 明显偏低，说明叠层梁对土体边界的加速度时程产生一定影响。3 种荷载下，地表 B2-A6 的平均 E_{PGA} 和 NMSE 分别为 8.32% 和 1.11%，而 B4-A6 为 21.69% 和 14.01%；B6-A6 为 14.01% 和 8.59%，SA6 为 21.50% 和 21.36%，从 E_{PGA} 和 NMSE 的结果可知，模型边界的最大离散程度不超过 25%，综合考虑该叠层箱体积较大，可以忽略边界对模型内部土体加速度响应的影响。此外，土体与叠层箱在顶部加速度偏差较大原因，主要为：①土体剪切模量在地表处接近为 0，而剪切梁自身具有一定厚度和刚度，难以模拟刚度为 0 状态；②地表处加速度反应最大。

试验选用扫频波探究各埋深加速度时程的频率成分，0.1 g 扫频波荷载下，各列各埋深加速度传感器实测的加速度时程频谱如图 7 所示。观察可知，相同高度，不同位置处的加速度频率成分及幅值基本一致。埋深越小，幅值离散越大，与 E_{PGA} 和 NMSE 的结果基本一致。

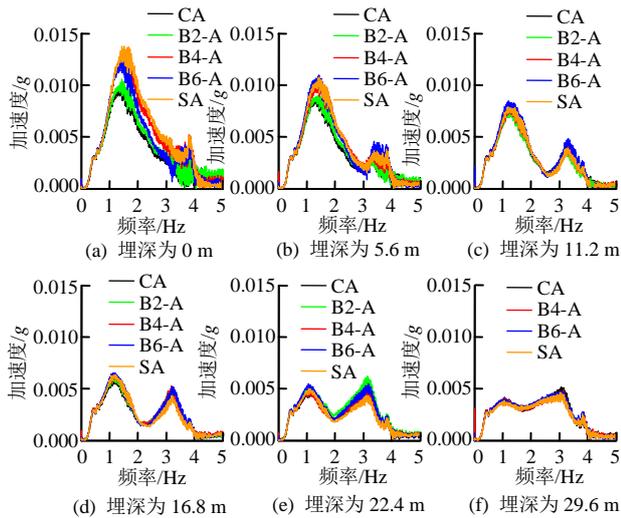


图7 干砂模型加速度时程频谱对比

Fig.7 Comparison of the acceleration spectrums of the dry sand model

图8为0.1 g扫频波荷载下,不同位置的峰值频率和峰值频率误差 E_F 随埋深的空间分布曲线。观察图8可知,相同埋深,各位置处的加速度峰值频率高度一致,未见明显异常。随埋深增加,峰值频率降低,从1.43 Hz降低到1.04 Hz左右。峰值频率误差最大仅为3.1%,在最上层叠层梁端壁SA6和B4-A6处,埋深增加,峰值频率误差明显降低。

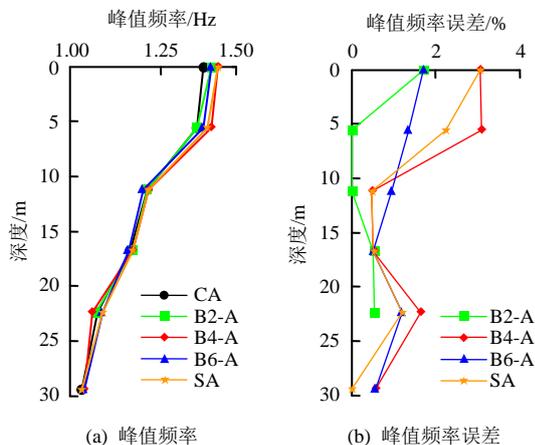


图8 干砂模型加速度峰值频率和峰值频率误差随深度空间分布

Fig.8 Variation of the acceleration peak frequency and the peak frequency errors versus the depth of the dry sand model

从以上分析的干砂模型加速度分布特征可知,叠层梁对土体模型边界一定范围产生一定影响,加速度峰值误差 E_{PGA} 、加速度归一化均方误差NMSE、峰值频率误差 E_F ,最大分别为21.50%、21.36%和3.1%,表明该叠层箱具有较好剪切效能。结合该叠层箱的尺寸较大,基本可以忽略边界效应的影响。

3.3 干砂与纯水模型试验对比

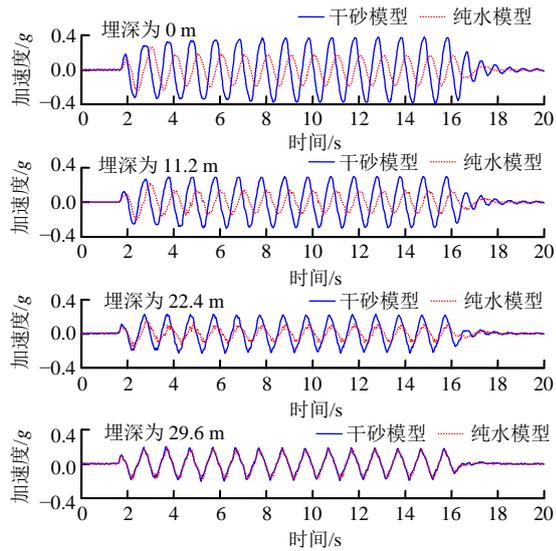
在正弦波、El-centro波、TCU波荷载下,干砂模型和纯水模型各叠层梁实测加速度对比结果,如图9所示。从图中埋深29.6 m基底SA1的测试结果可知,两输入荷载下,干砂模型和纯水模型基底输入波形极为一致,但其他层梁的测试结果相差较大,纯水模型较干砂模型出现了明显的幅值衰减和相位滞后,埋深越小,差异越明显。图10给出了各输入荷载下,PGA随埋深的空间分布结果。可知,纯水模型各层PGA明显低于干砂模型,正弦波输入荷载下,最大相差2.37倍,干砂模型SA2~SA6的PGA分别是纯水模型的2.01、2.37、2.15、2.08和2.12倍,均超过2倍。另两种输入荷载下,平均峰值误差也超过1.5倍。

同样,用扫频波探究干砂模型和纯水模型的频率特征,0.1 g扫频波荷载下,各叠层梁的实测加速度时程频谱如图11所示。观察可知,相同高度,两模型的加速度频率成分及幅值差异明显,干砂模型峰值频率和幅值明显大于纯水模型。图12为两模型下各叠层梁的峰值频率随深度的空间分布曲线,可知,干砂模型峰值频率在1.43 Hz到1.04 Hz左右,随埋深增加,峰值频率降低;而纯水模型,各叠层梁的峰值频率基本一致,为0.62 Hz左右,无明显变化。

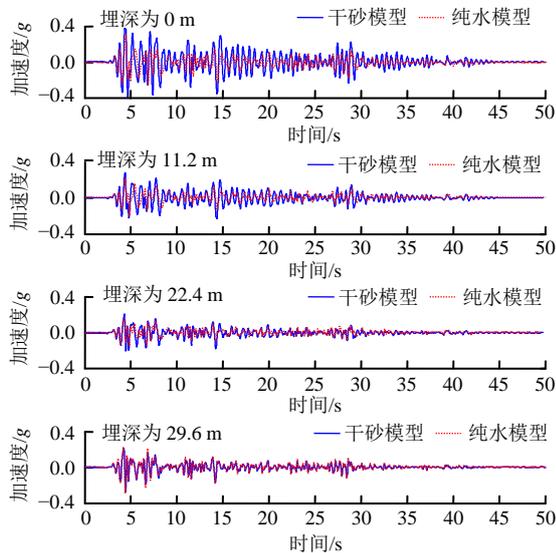
综上所述,干砂模型和纯水模型对比试验中,叠层梁的响应有明显差异,干砂模型中土体主导控制剪切梁响应,进一步验证了叠层箱具有良好的剪切效能。

3.4 剪应力-剪应变滞回圈

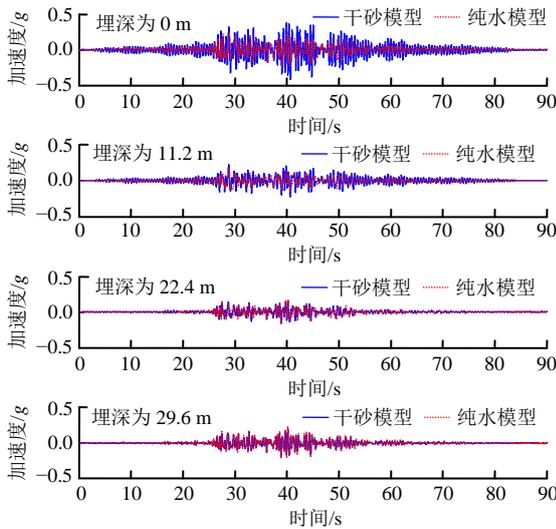
为进一步探究叠层箱的剪切效能,采用ARI法^[19]实测加速度积分位移,并采用线性方法^[20-21]反演剪应力与剪应变。0.2 g正弦波荷载下,干砂模型土体中心、干砂模型叠层梁以及纯水模型叠层梁,埋深为11.2 m和16.8 m的剪应力-剪应变滞回圈如图13所示。观察图13(a)和13(b)可知,干砂模型土体中心与叠层梁,相同埋深,滞回圈的闭合性、光滑性以及剪应力、剪应变的大小基本一致,说明叠层箱的响应与土体响应基本一致,叠层梁响应由模型土体主导控制。观察图13(b)和13(c)可知,两种埋深下,干砂模型和纯水模型叠层梁的剪应变差异较小,但干砂模型的剪应力约是纯水模型的2倍,而且,纯水模型叠层梁滞回圈明显较干砂模型向右倾斜,因为水不受剪切作用且叠层梁的剪切模量较低,纯水模型中叠层箱响应是单端固定柔性体一种常见受力变形模型。



(a) 正弦波



(b) El-centro 波



(c) TCU 波

图 9 干砂和纯水模型各层剪切梁加速度对比
Fig.9 Comparison of the measured acceleration of each layer of beams between the dry sand model and the pure water model

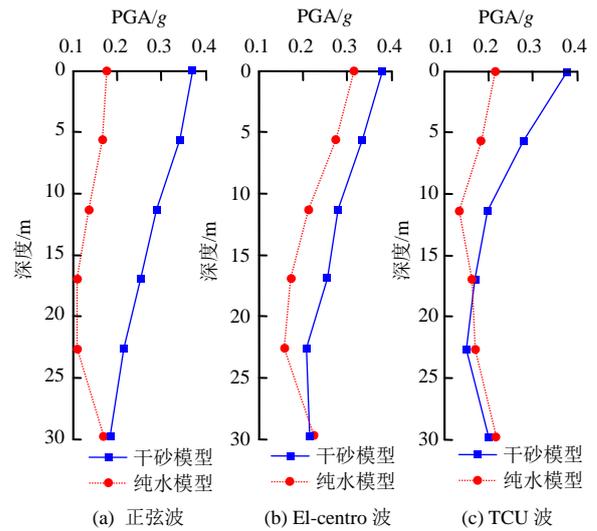


图 10 干砂和纯水模型剪切梁 PGA 随深度空间分布

Fig.10 Variation of the PGA of laminar beams with depth between the dry sand model and the pure water model

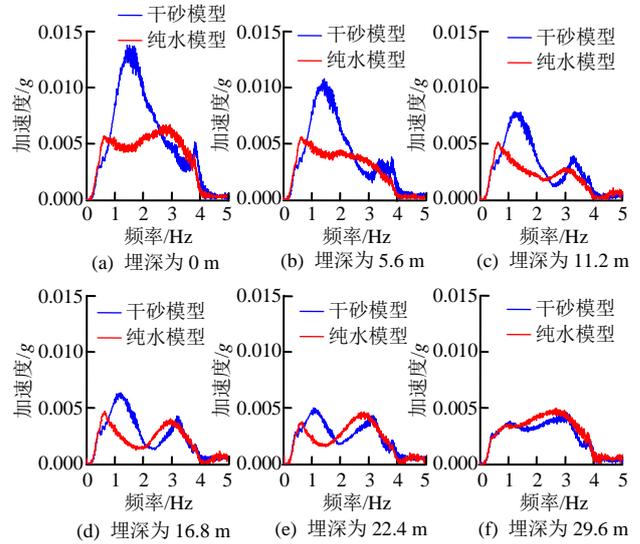


图 11 干砂和纯水试验各层剪切梁加速度频谱对比

Fig.11 Comparison of the measured acceleration spectrum of each beam between the dry sand model and the pure water model

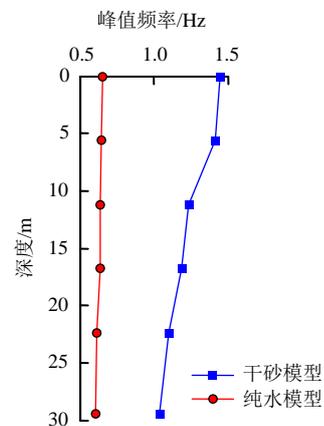


图 12 干砂和纯水试验各层剪切梁峰值频率对比

Fig.12 Comparison of the peak frequency of each layer of beams between the dry sand model and the pure water model

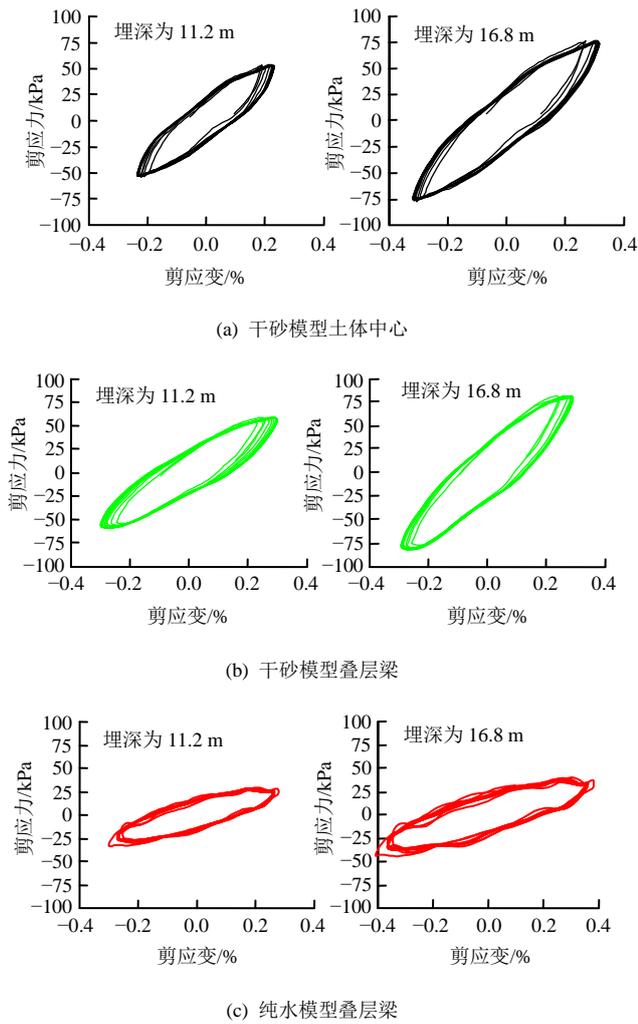


图 13 干砂和纯水试验滞回圈对比

Fig.13 Comparison of the hysteresis loops between the dry sand model and the pure water model

基于前面获取的滞回圈数据,借鉴文献[22-23]的相关定义与计算方法,求取的不同埋深,干砂模型中心、干砂叠层梁和纯水叠层梁的剪切模量和阻尼比数据,如表 5 所示。观察表 5 不难发现,干砂模型土体中心与干砂模型叠层梁的剪切模量和阻尼比基本一致,平均值分别为 25.5 MPa 和 24.7 MPa、22.2% 和 18.2%,误差分别为 3% 和 18%。纯水模型

表 5 干砂和纯水试验模量和阻尼比对比

Table 5 Comparison of modulus and damping ratio between the dry sand and the pure water test

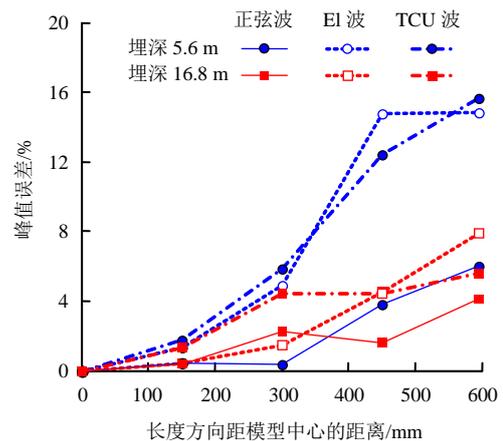
埋深/m	剪切模量/MPa			阻尼比/%		
	干砂土体中心	干砂叠层梁	纯水叠层梁	干砂土体中心	干砂叠层梁	纯水叠层梁
5.6	24.1	20.4	8.40	24.9	18.3	30.8
11.2	22.6	19.5	10.30	20.8	14.8	36.7
16.8	23.7	27.8	9.70	19.3	19.6	36.6
22.4	31.6	31.1	8.50	23.7	19.9	35.0
平均值	25.5	24.7	9.22	22.2	18.2	34.8

叠层梁的剪切模量很低,仅为 9.22 MPa,为干砂模型的 1/3;但阻尼比较大,为 34.8%,该反演结果与叠层梁的阻尼比接近,可证明叠层梁的阻尼基本不会影响模型地基的地震响应。从剪切模量和阻尼比的计算结果可知,该叠层梁基本满足设计原则和要求。

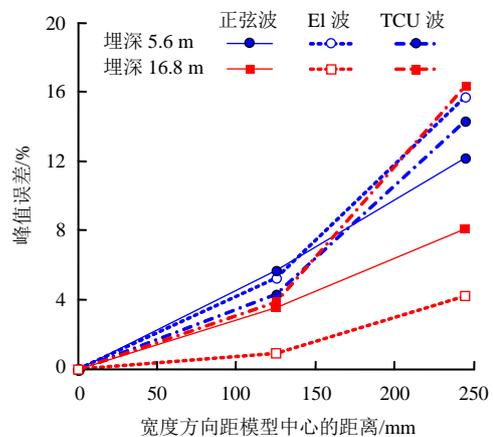
4 边界效应空间分布

4.1 边界距离影响

综合 CA5 和 B1-A5~B6-A5、CA3 和 B1-A3~B6-A3,图 14 给出了 3 种输入荷载下,埋深为 5.6 m 和 16.8 m,加速度峰值误差 E_{PGA} 沿长度方向和宽度方向的空间分布情况。观察图 14 不难发现,模型边界处 E_{PGA} 较土体内部显著增加,离散程度增加,并在模型边界处达到最大值。模型边界处的加速度传感器 B4-A5、B4-A3、B6-A5 和 B6-A3,受边界效应影响明显,峰值误差较模型中部位置明显偏大,3



(a) 长度方向



(b) 宽度方向

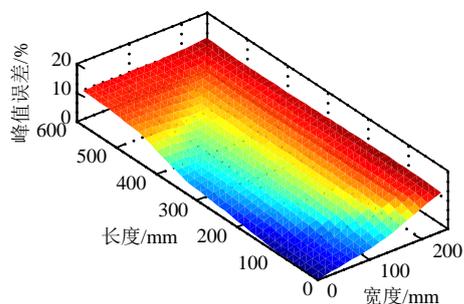
图 14 边界距离对 PGA 误差影响

Fig.14 Effects of boundary distance on the PGA errors

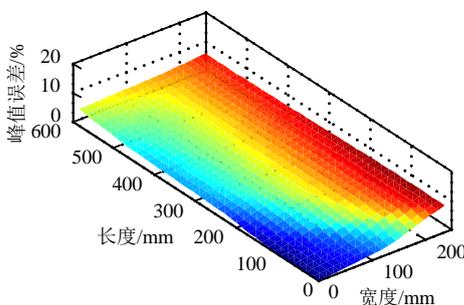
种输入荷载下, 平均峰值误差为 12.18%、5.84%、14.06%、9.54%, 且 E_{PGA} 随埋深增加, 有明显的降低趋势。

4.2 空间分布特征

综合所有输入荷载及埋深为 5.6 m 和 16.8 m 布设的所有传感器, 分别绘制出埋深为 5.6 m 和 16.8 m, 加速度峰值误差 E_{PGA} 的空间分布特征, 如图 15 所示。不难发现, 距离叠层箱边界越近, 峰值误差 E_{PGA} 越大, 边界效应越明显。但是, 端壁梁的边界效应是由于振动波的反射与折射引起, 而侧壁梁的边界效应是由箱体侧摩阻力引起, 两者边界效应的发生原理截然不同。从图 15 可知, 埋深为 5.6 m 时, 端壁和侧壁的峰值误差基本一致, B4-A5 和 B6-A5 的平均峰值误差为 12.18% 和 14.06%; 但埋深为 16.8 m 时, 端壁和侧壁的峰值误差相差较大, B4-A3 和 B6-A3 的平均峰值误差为 5.84% 和 9.54%, 相差约 1.63 倍, 说明埋深越大, 箱体侧壁侧摩阻力影响会明显高于端壁梁振动波的反射与折射。因此, 叠层箱设计时, 除保证叠层梁具有足够刚度外, 还应根据长边和宽边的边界影响范围, 合理设计叠层箱长宽高比例。



(a) 埋深 5.6 m



(b) 埋深 16.8 m

图 15 PGA 误差的空间分布

Fig.15 Spatial distribution of the PGA errors

为评价边界效应的影响范围, 将加速度峰值误差达到 5% 定义为边界效应临界距离, 从图 15 结果看, 可认为长边方向距叠层箱端壁 15 cm 和宽度方

向距离叠层箱侧壁 13 cm 为边界效应影响范围, 而模型中心处 90 cm×24 cm 范围内的测试结果是有效和可靠的, 不同埋深有效测试范围略有不同。该结果, 与 Malushitsky^[24]和 Drnevich 等^[25]的研究结果一致。

5 结 论

(1) 干砂模型中, 叠层梁和模型中心土体的加速度记录相比, 加速度峰值、归一化均方误差和峰值频率误差, 最大分别为 21.50%、21.36% 和 3.1%, 一定程度反映了叠层箱对土层加速度响应和场地周期的影响较小, 证明了叠层箱具有较好的剪切效能。

(2) 纯水与干砂模型相比, 相同动荷载输入条件下, 各层剪切梁加速度峰值和谱峰值周期, 干砂试验与纯水试验最高相差 2.37 和 2.23 倍, 侧面说明了干砂试验中剪切梁响应是由土体模型主导控制, 进一步验证了叠层箱具有良好的剪切效能。

(3) 干砂模型叠层梁与土体中心的剪切模量和阻尼比基本一致, 误差分别为 3% 和 18%。纯水模型叠层梁的剪切模量仅为 9.22 MPa, 为干砂模型的 1/3, 但阻尼比较大, 为 34.8%。剪切模量和阻尼比测试结果证明该叠层箱基本满足设计原则和要求。

(4) 以干砂模型土体中心加速度为参考, 将峰值误差 5% 作为衡量边界效应临界距离的判别指标, 该叠层箱在长度和宽度方向的边界效应临界距离分别为 15 cm 和 13 cm, 为测试传感器和桩基结构物等方案设计提供了重要参考。

本文试验内容和研究结论仅是在 50 g 离心加速度下完成, 50 g 以上柔性叠层箱的剪切效能和适用性需要进一步探讨。另外, 柔性叠层箱的橡胶层可能具有良好的防水密封效果, 有效避免橡皮膜的使用及带来的不便。因此, 超重力与高频冲击振动作用下柔性叠层箱的防水密封效果值得开展专门研究。

参 考 文 献

- [1] WHITMAN R V, LAMBE P C, KUTTER B L. Initial results from a stacked ring apparatus for simulation of a soil profile[C]//Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis: University of Missouri, 1981.
- [2] HUSHMAND B, SCOTT R F, CROUSE C B. Centrifuge liquefaction tests in a laminar box[J]. *Géotechnique*, 1988, 38(2): 253-262.
- [3] ZENG X, SCHOFIELD A N. Design and performance of

- an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modelling[J]. *Géotechnique*, 1996, 46(1): 83-102.
- [4] MATSUDA T, GOTO Y. Studies on experimental technique of shaking table test for geotechnical problem[C]// Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: [s. n.], 1988: 837-842.
- [5] UENG T, WANG M, CHEN M, et al. A large biaxial shear box for shaking table test on saturated sand[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29(1): 1-8.
- [6] TURAN A, HINCHBERGER S D, ELNAGGAR H. Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(2): 404-414.
- [7] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89-97.
CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 89-97.
- [8] 孙海峰, 景立平, 王宁伟, 等. 振动台多功能叠层剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2498-2506.
SUN Hai-feng, JING Li-ping, WANG Ning-wei, et al. Development of multifunctional laminar shear container for shaking table test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2498-2506.
- [9] 杜修力, 李霞, 陈国兴, 等. 悬挂式层状多向剪切模型箱的设计分析及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 424-432.
DU Xiu-li, LI Xia, CHEN Guo-xing, et al. Design and test verification of suspension multidirectional laminar shear model box[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3): 424-432.
- [10] 李小军, 王晓辉, 李亮, 等. 振动台试验三维层状剪切模型箱的设计及性能测试[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1524-1532.
LI Xiao-jun, WANG Xiao-hui, LI Liang, et al. Design and performance test of 3D laminar shear container for shaking table[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1524-1532.
- [11] LEE S H, CHOO Y W, KIM D S. Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 44: 102-144.
- [12] 张建民, 于玉贞, 濮家骝, 等. 电液伺服控制离心机振动台系统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 843-845.
ZHANG Jian-min, YU Yu-zhen, PU Jia-liu, et al. Development of a shaking table in electro-hydraulic servo-control centrifuge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 843-845.
- [13] 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.
- [14] 郭明伟, 马欢, 杨忠明, 等. 常泰长江大桥施工阶段大型沉井基础沉降变形分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1705-1712, 1723.
GUO Ming-wei, MA Huan, YANG Zhong-ming, et al. Settlement analysis of large open caisson foundation at construction stage of Changtai Yangtze River Bridge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1705-1712, 1723.
- [15] 陈正发, 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4026-4033.
CHEN Zhen-fa, YU Yu-zhen. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Suppl.2): 4026-4033.
- [16] 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 Yu-jing. Centrifuge shakers and testing technique[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(1): 15-22.
- [17] 王永志. 大型动力离心机设计理论与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
WANG Yong-zhi. Study on the design theory and key technology for large dynamic centrifuge[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013.
- [18] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 61-65.
LIU Jing-bo, DU Xiu-li. Dynamics of structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 61-65.

- Journal of Hydraulic Engineering**, 2017, 48(6): 702-709.
- [15] 张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 等. 压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 97-104.
ZHANG Zhen-fei, NI Wan-kui, WANG Xi-jun, et al. An experimental study of water infiltration and hydraulic-conductivity of the compacted loess[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2019, 46(6): 97-104.
- [16] TIAN K, YANG A, NIE K, et al. Experimental study of steady seepage in unsaturated loess soil[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(9): 2681-2689.
- [17] PFEIFER P, AVNIR D. Chemistry in noninteger dimensions between two and three. I. Fractal theory of heterogeneous surfaces[J]. **Journal of Chemical Physics**, 1983, 79(7): 3558-3565.
- [18] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(化学生物学农学医学地学), 1987(12): 1309-1318.
LEI Xiang-yi. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. **Scientia Sinica (Chemical)**, 1987(12): 1309-1318.
- [19] 陶高梁, 陈银, 袁波, 等. 基于 NMR 技术及分形理论预测 SWRC[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1466-1472.
TAO Gao-liang, CHEN Yin, YUAN Bo, et al. Predicting soil-water retention curve based on NMR technology and fractal theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(8): 1466-1472.
- [20] 张世民, 孙银锁, 章丽莎, 等. 核磁共振技术在非冻结土体孔隙分析中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 183-188.
ZHANG Shi-min, SUN Yin-suo, ZHANG Li-sha, et al. Application of nuclear magnetic resonance technology in pore analysis of unfrozen soil[J]. **Yangtze River**, 2019, 50(11): 183-188.
- [21] PHADNIS H S, SANTAMARINA J C. Bacteria in sediments: pore size effects[J]. **Geotechnique Letters**, 2015, 1(4): 91-93.
- [22] 李华, 李同录, 张亚国, 等. 不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 979-986.
LI Hua, LI Tong-lu, ZHANG Ya-guo, et al. Relationship between unsaturated permeability curve and pore-size distribution of compacted loess with different dry density[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2020, 51(8): 979-986.
- [23] 刘德仁, 徐硕昌, 肖洋, 等. 浸水入渗条件下压实黄土水-气运移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3260-3270.
LIU De-ren, XU Shuo-chang, XIAO Yang, et al. Experimental study on the law of water-air migration in compacted loess under the condition of immersion infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3260-3270.

上接第 728 页

- [19] 王体强, 王永志, 袁晓铭, 等. 自适应鲁棒加速度积分新方法 with 可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2724-2737.
WANG Ti-qiang, WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming, et al. A new type of adaptive robust acceleration integration approach and reliability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(Suppl.1): 2724-2737.
- [20] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotung downhole array. II: evaluation of soil nonlinear properties[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 121(4): 363-378.
- [21] 王永志, WILSON D W, KHOSRAVI M, 等. 动力离心模型试验循环剪应力-剪应变反演方法对比[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 271-277.
WANG Yong-zhi, WILSON D W, KHOSRAVI M, et al. Evaluation of cyclic shear stress-strain using inverse analysis techniques in dynamic centrifuge tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(2): 271-277.
- [22] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 98(7): 667-692.
- [23] AFACAN K B, BRANDENBERG S J, STEWART J P. Centrifuge modeling studies of site response in soft clay over wide strain range[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(2): 04013003.
- [24] MALUSHITSKY Y N. The centrifugal model testing of waste-heap embankments[M]. London: Cambridge University Press, 1975: 5-11.
- [25] DRNEVICH V P, SANTAMARINA J C, GOODINGS D J. Centrifuge modeling: a study of similarity[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1989, 12(2): 163-166.