

DOI: 10.11779/CJGE20230642

# 岩土离心模型试验软接触式微型土压计研制及性能评价

王永志<sup>1,2</sup>, 杨阳<sup>1,2</sup>, 徐光明<sup>3</sup>, 汤兆光<sup>\*1,2</sup>, 张雪东<sup>4</sup>, 孙锐<sup>1,2</sup>, 周燕国<sup>5</sup>

(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. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 5. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 微型土压计是岩土离心模型试验的重要测量技术之一。为解决刚性土压计测量中拱效应、尺寸效应、厚径比等经典误差问题及提升频响速率和精度, 尝试开发了一种全新软接触式微型土压计 ESP-II, 介绍了其技术创新和设计方法。以两种国际代表性土压计为参考, 设计开展一系列离心模型试验, 对其感应精度、速率和适用性进行评价。主要结论: ①逐级加载离心加速度 5g~50g 试验下, 各深度 ESP-II 和两种参考传感器测试结果与理论值的平均误差分别为 5.16%, 6.70%, 4.85%, 三者沿深度拟合  $K_0$  优度系数  $R^2$  均  $\geq 0.9893$ 。②脉冲荷载试验中 ESP-II 最大响应时间约 7.8 ms, 略优于两种参考传感器, 具有良好的频响速率。③不同幅值正弦、地震等动荷载试验下, 3 种传感器测得土压力均呈一致增量趋势,  $K_0$  约由 0.43~0.45 增至 0.51~0.56, 与既有规律认识吻合。④离心机下降卸荷过程中, ESP-II 测得时程表现良好连续性和光滑性, 反映软接触式设计有利于保障土体与传感器良好接触和稳定响应。研究成果, 初步证明了软接触式土压计适应于静、动力离心试验需求, 具有重要价值与应用前景。

**关键词:** 岩土离心模型试验; 微型土压计; 设计方法; 软接触式; 性能评价

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1655-10

**作者简介:** 王永志(1984—), 男, 研究员, 主要从事土工离心机设计理论与试验方法、岩土工程防灾方面的研究工作。

E-mail: yong5893741@163.com。

## Development and performance evaluation of a soft-contact earth pressure transducer for geotechnical centrifuge modeling

WANG Yongzhi<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>1,2</sup>, XU Guangming<sup>3</sup>, TANG Zhaoguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuedong<sup>4</sup>, SUN Rui<sup>1,2</sup>, ZHOU Yanguo<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 5. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The miniature earth pressure transducer is one of the key testing tools in geotechnical centrifuge modeling. Aiming at solving the classical problems such as arching effects, size effects and thickness-diameter ratio in the measurement of rigid transducers, and improving the frequency response rate and induction accuracy, a soft-contact pressure transducer ESP-II is developed, and its innovations and design methods are introduced. Taking two internationally representative earth pressure transducers as reference, a series of centrifugal model tests are designed and carried out to evaluate its accuracy, frequency response and applicability. The main conclusions are as follows: (1) In the static centrifugal acceleration tests spinning up from 5g to 50g, the difference between the theoretical values and the test results of ESP-II and the two reference transducers at each depth is small, and the average deviations are 5.16%, 6.70% and 4.85%, respectively. The coefficient  $R^2$  of the three curves  $K_0$  fitted along the depth is  $\geq 0.9893$ . (2) In the pulse load tests, the maximum response time of ESP-II is about 7.8 ms, which is slightly better than that of the two reference transducers and has a satisfactory frequency response. (3) In the dynamic load tests of sine and seismic with different amplitudes, the incremental trend of earth pressure measured by the three transducers is basically consistent. The variation range of  $K_0$

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 (2023B08); 国家自然科学基金项目 (52278374, 519786131); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2023E019)

收稿日期: 2023-07-10

\*通信作者 (E-mail: tgz158135@163.com)

increases from 0.43~0.45 before the seismic to 0.51~0.56 after the seismic, which is consistent with the existing theory. (4) At the decelerating stage of the centrifuge, the good continuity and smoothness of the time history measured by the ESP-II, which reflects the soft-contact design, is conducive to ensuring good contact and stable response between the soil and the transducer. The research results have preliminarily proved that the developed soft-contact transducer ESP-II satisfies the requirements of static and dynamic centrifugal tests, with significant application value and immense potential.

**Key words:** geotechnical centrifuge modeling; miniature earth pressure transducer; design method; soft-contact type; performance evaluation

## 0 引言

岩土离心试验通过缩尺物理模型与离心场,能有效再现工程对象在自然界真实应力条件下的力学行为与破坏机制,相比理论分析、数值模拟、灾害调查等研究手段,其具有材料真实、参数与过程可控、现象可再现、效率高等优点,是当前研究岩土工程复杂问题和学科前沿问题的重要手段之一<sup>[1-4]</sup>。目前中国正在掀起一场大型离心机建设热潮,预计 5 年内新增 10 套以上容量超过 700g·t 的世界级土工离心机,呈现大臂长、高容量、多功能、精密化等发展趋势。然而,相比离心机数量和规模的疾速增长,离心试验测量技术方面的开发和基础研究十分缺乏,譬如土压力测量方面仍以刚性土压计为主,其拱效应、尺寸效应、厚径比、刚度匹配等经典误差问题,尚未得到有效解决。

土压力是岩土构筑物、地下结构等受力性态和破坏过程及预警监测的一个关键力学指标,也是岩土离心试验测量的重要物理量之一。在此,对土压力测量技术发展及岩土离心试验应用方面较具影响和代表性成果,作扼要论述。曾辉等<sup>[5]</sup>建立了结构表面、刚性基础、自由场等 3 种使用场合下土压计测量静匹配误差计算公式,并指出土压计只有满足刚度和形状匹配才能获得较小匹配误差。Miura 等<sup>[6]</sup>选用 4 种不同尺寸的土压计,给出砂土与不同粒径介质对土压计标定结果的影响,并提出选取合理传感器尺寸的建议。余尚江等<sup>[7]</sup>给出了自由场和结构表面土压计在测量误差计算、应力场分布状态和扰动范围等方面的差异,并推导出两类情况的匹配误差的定量计算公式。Joseph 等<sup>[8]</sup>利用自研的土压计试验校准装置,开展砂标与液标试验,得出传感器砂标与水标系数相差约 20%。Talesnick<sup>[9]</sup>指出土压计的测量结果与应力历史相关,在多次逐级卸荷过程中,土压计响应曲线呈现高度滞后特性。徐光明等<sup>[10]</sup>分类总结了 Weiler 等<sup>[11]</sup>、Egan 等<sup>[12]</sup>提出的土压力测量的影响因素,如嵌入效应、盒与土相互作用、测试环境和填筑影响,开发一种引入柔度因数设计的 BW-3 型应变式土压计,通过离心模型试验证明其获取  $K_0$  值的可行性。Dave 等<sup>[13]</sup>通过土压计校准装置,研究土层厚度对土压计测量结果的影响,发现不同砂层厚度下土压计标定结果呈明显离散。魏永权等

<sup>[14]</sup>选用 BY-4 型应变式土压计,结合匹配误差理论,开展土介质标定离心模型试验,建立了土压计的匹配误差随较大土介质模量变化的关系曲线,证明了该方法可明显提升土压计测试精度。芮瑞等<sup>[15]</sup>通过自制砂土模型开展多组砂土加压/卸荷试验,发现膜式土压计测量的加压曲线具有良好的线性度,而卸荷曲线拟合则需采用指数曲线。梁波等<sup>[16]</sup>选用 2 种电阻应变式土压计,开展标定试验和离心模型试验,发现电压输出式传感器测量数据的稳定性与灵敏度高于应变输出式传感器。蔡正银等<sup>[17]</sup>开展了不同水温、砂层厚度和颗粒粒径 3 种条件的离心模型试验,发现随着砂层厚度增加应变式土压计输出电压呈非线性趋势,且标定系数随粒径增大而逐渐增大。另外,目前还发展了薄膜式土压计测试方法 (tactile pressure sensor)<sup>[18-22]</sup>,具有厚度薄、灵敏度高、局域化等特点,但其响应滞后且对被测物体表面平整度要求极高,可靠性受被测物体表明光滑度和细微气泡影响严重,难以重复利用、寿命有限,价格昂贵,难以获得广泛应用。

综上所述,土压力测量技术的研究主要围绕标定方法、刚度匹配、拱效应、尺寸效应、厚径比等方面,实际上,其中绝大多数误差因素均与刚性土压计的高刚度接触形式紧密相关。中国目前岩土离心模型试验采用的土压计多以应变式为主,因其自身尺寸、刚度较大,易产生土体应力集中或重分布现象,造成测试结果存在较大离散和不确定性<sup>[15-16, 18, 22]</sup>。

针对离心模型试验中土压力精准测试需求,借鉴薄膜式土压传感器的“柔性”原理,本文介绍了一款自主研发引入“软接触”设计概念的全新微型土压计 ESP-II,以国际 PDA 和 EPL-D1 土压计为参考,选用福建标准砂,开展一系列离心试验,探讨静/动荷载条件下三种传感器测得土压力和侧向土压力系数  $K_0$  变化规律,验证 ESP-II 的静/动态响应准确性和可靠性,旨在尝试消除传统刚性土压计测试的拱效应、尺寸效应、厚径比、刚度匹配等误差问题,开辟一条崭新思路与途径,以期推动土压力测量技术发展。

## 1 ESP-II 土压计设计方法及特点

### 1.1 设计结构与基本组成

准确和可靠的测量技术, 是保证岩土离心模型试验结果有效性和具有价值的前提条件之一。剖析国际代表性土压计设计结构, 汲取最新薄膜式土压计技术优势, 自主设计研发了一种全新软接触式微型土压计 ESP-II, 如图 1 (a) 所示。以美国 Measurement 公司 EPL-D1 型和日本 TML 公司 PDA 型土压计为参考, 对 ESP-II 的设计方法和技术创新进行阐述, 其中 EPL-D1、PDA 型为目前国际岩土离心模型试验最为常用土压计<sup>[23]</sup>, 见图 1 (b), 3 种土压计主要参数汇总见表 1。观察并对比图 1, 表 1, 容易发现 ESP-II 传感器与国际两种土压计相比, 在内部敏感元、结构设计、接触面型式和尺寸参数等方面均具有明显差异, 其中最大差异为 ESP-II 采用软接触面设计, 而国际两种土压计均采用刚性接触面设计。除此之外, ESP-II 还增加了无应力胶、倒钩结构、定位槽、硬质密封胶等创新设计。

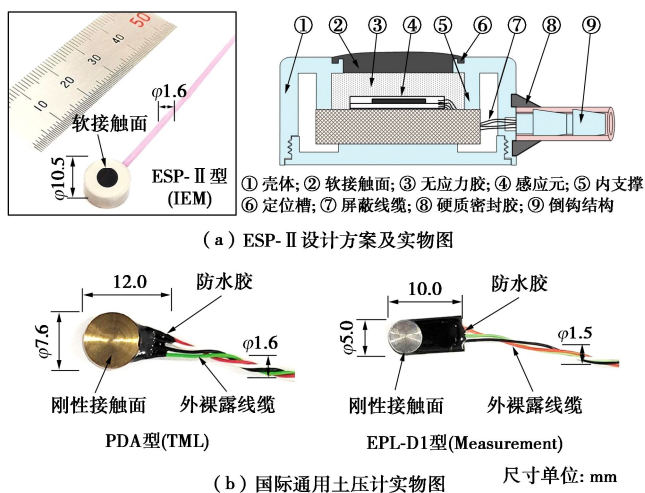


图 1 ESP-II 微型土压计设计方案及 3 种传感器实物

Fig. 1 Structural design of ESP-II miniature transducer and photos of three types of transducers

表 1 ESP-II 与国际通用土压计的主要设计参数及材料

Table 1 Main design parameters and materials of three types of earth pressure transducers							
型号	量程/ kPa	感应元 类型	壳体/ mm	线缆/ mm	厚径比 $\frac{d}{h}$	接触面 形式	信号 类型
ESP-II	500	压敏硅膜片	$\phi 10.5$	$\phi 1.6$	0.47	柔性	电压
PDA	500	电阻应变片	$\phi 7.6$	$\phi 1.6$	0.21	刚性	应变
EPL-D1	500	电阻应变片	$\phi 5.0$	$\phi 1.5$	0.32	刚性	电压

1.2 主要特点与关键技术

进一步阐明 ESP-II 土压计的技术创新与设计特点, 为解决拱效应、尺寸效应、厚径比、刚度匹配等刚性土压计固有误差问题, 汲取岩土离心模型试验常见故障形式与经验教训, ESP-II 土压计采用的主要技术创新和设计方法如下。

(1) 软接触式感应面

现有微型土压计均利用壳体金属接触面的挠曲变形及内侧感应元实现对土压力的测量, 这种刚性接触一方面产生的挠曲变形导致周围土体应力场重分布, 另一方面刚度差作用下壳体发生的压缩变形远小于土体, 两种因素耦合影响带给测试结果很大不确定性。ESP-II 土压计针对这一经典误差, 采用 2 项新技术: ①引入柔性软接触式感应面设计, 对比和配制了与土体刚度最优匹配的高弹性橡胶材料 (图 2), 其刚度与密度远低于黄铜、不锈钢等金属, 能有效减小土体与传感器刚度差引起的“拱效应”及颗粒与接触面之间的尺寸效应, 且感应元与软接触式感应面之间填满无应力胶, 能有效减小壳体变形、颗粒不均对感应元产生的应力集中; ②感应元基底材料采用半导体材质, 具有高硬度和弹性模量 (硬度 $\geq 850$  kg/mm<sup>2</sup>, 杨氏模量 $\geq 200$  GPa), 可避免感应元发生较大挠曲变形, 同时不影响其感受被测微弱压力变化量, 且能减小传感器周围应力场产生重分布影响。

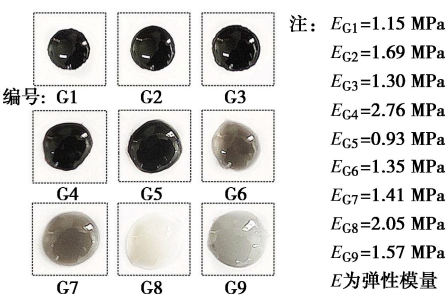


图 2 调配与选取最优刚度匹配软接触材料

Fig. 2 Reconciliation and test soft-contact materials with different elastic moduli

(2) 敏感速率精度提升

在响应敏感性方面, 为提升传感器响应速率和精度, ESP-II 土压计采用 2 项关键技术: ①感应元采用高速率压敏硅膜片, 其固有频率 $\geq 300$  kHz, 能有效避免感应元对传感器响应速率的限制, 并具有温度补偿功能。②经过凹面、凸面、平面等 3 种软接触面形态的测试比较 (如图 3 所示), ESP-II 土压计最终采用微凸弧面设计, 利用土体与软接触面之间预应力, 保证接触面与被测土体的良好接触, 有效提升传感器响应的准确性和速率。同时, 软接触面与感应元之间的填充无应力胶, 可消除附加应力对敏感元的影响, 并避免了传递路径对敏感元响应的影响。

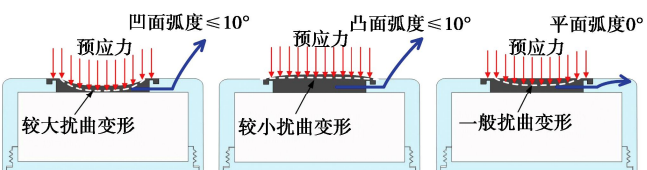


图 3 凹、凸、平不同接触面形态设计对比

Fig. 3 Design contact surface shapes of concave, convex and plane



### (3) 耐久性与使用寿命增强

岩土离心试验中微型土压计发生的常见故障型式, 主要包含感应元变形毁坏、壳体渗水、线缆磨损/断裂等, 如图 1 中 EPL-D1、PDA 土压计线缆与壳体连接处均采用胶套进行了防水和防断处理, 但仍常有漏水和断裂发生。针对这些故障, ESP-II 采用了两项重要技术: ①线缆与壳体连接处采用倒钩结构设计, 并配合硬质密封胶进行防渗处理, 即能有效提升线缆抗剪/抗拉强度, 又能有效提升防水能力; 线缆还采用铁氟龙材质作为保护层, 以增强耐磨耐蚀能力。②增加壳体厚度和内部填充具有绝缘特性的无应力胶, 能有效提升敏感元抵抗壳体变形、静电干扰能力和增强使用寿命; 需要特别指出, ESP-II 土压计设计厚径比 ( $d/h=0.47$ ) 略大于国际两种代表土压计, 但满足相关经验和规范设计要求<sup>[10, 16]</sup>。

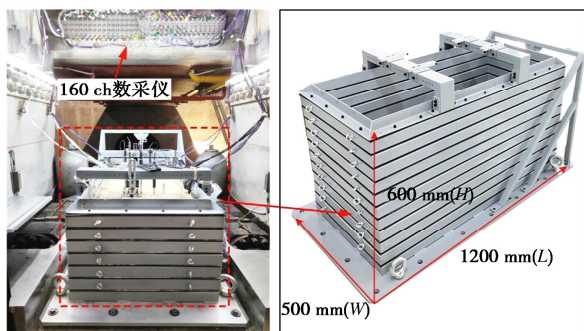
## 2 试验设备与方案

### 2.1 试验设备

本次岩土离心模型试验采用中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 型离心机振动台系统, 如图 4 所示, 其主要指标<sup>[24]</sup>: 离心机转臂半径 5.0 m, 离心加速度 100g; 离心振动台振动加速度 30g, 频宽 10~300 Hz, 振动负载 15 kN; 该系统配备了砂雨制模、160 ch 动态采集、高速摄像等辅助试验装置。试验选用 Laminar Box-I 型层状剪切模型箱<sup>[24]</sup>, 内尺寸为 1.2 m(长)×0.5 m(宽)×0.6 m(高)。此外, 试验还选用 ICP 加速度计, 最大量程为 100g, 频宽为 0.2~20 kHz; LVDT 位移计量程为 0~100 mm。



(a) 离心机系统



(b) 离心振动台系统

(c) 层状剪切模型箱

图 4 DCIEM-40-300 型离心机振动台系统

Fig. 4 DCIEM-40-300 centrifuge shaking table test system

### 2.2 试验材料与模型制备

本次试验目的为验证全新软接触式 ESP-II 土压计的适用性和可靠性, 选取国际 PDA 和 EPL-D1 土压计为参考, 但由于两者尺寸较小, 为尽可能消除介质不均匀性及考虑传感器接触面应力分布的影响, 试验砂土颗粒粒径不宜过大 (一般要求土压计  $d/D_{50}$  控制在某一界限值)<sup>[10]</sup>, 因此, 试验砂土选用福建标准石英细砂, 其基本物理参数: 粒径范围为 0.08~0.3 mm,  $G_s$  为 2.65, 最大、最小干密度分别为 1.59, 1.37 g/cm<sup>3</sup>,  $D_{60}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{10}$  分别为 0.192, 0.169, 0.158, 0.126 mm, 不均匀系数  $C_u$  为 1.524, 曲率系数  $C_c$  为 1.032, 级配曲线如图 5 所示。此外, 还采用砂雨法制备地基模型, 相对密实度  $D_r$  控制在 50%, 内摩擦角约为 35°, 具体制备方法参考文献[24]。需说明的是, 本次试验为减小被测对象表面形状对测试结果的影响, 将 3 种传感器粘贴于平面钢板 (高度 40 cm、宽度 1 cm), 对土压力进行测试。

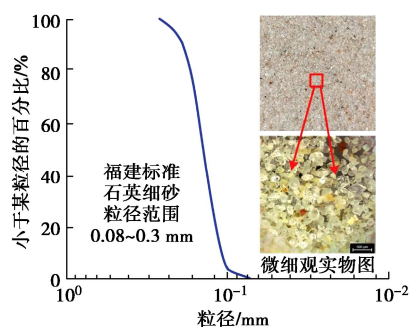


图 5 砂土粒径级配曲线与实物

Fig. 5 Grain-size distribution curve and photo of soil particles

### 2.3 传感器布设与测试方案

本次试验基于地基模型, 将探讨逐级加载离心力 5g~50g 和连续输入动荷载条件下 3 种传感器测量的土压力及侧向土压力系数  $K_0$  的变化规律, 分析 3 种传感器离散程度及验证 ESP-II 传感器的静态性能、动态响应敏感性与适用性, 传感器布设方案与模型试验设计如图 6 所示。模型制备前, 将钢板安装于模型中心处 ( $L/2$ ), 以确保离心机加载过程中钢板两侧对称承受侧向土压力, 通过分层制备地基模型, 在钢板左侧沿模型中心处 ( $W/2$ ) 不同深度 (模型深度 5, 15, 25, 35 cm) 埋设 4 组微型土压计和加速度计, 每组各类传感器包含 ESP-II (标识 T1、T4、T7、T10)、PDA (标识 T2、T5、T8、T11)、EPL-D1 土压计 (标识 T3、T6、T9、T12)、ICP 加速度计 (标识 AH1~AH4), LVDT 位移计 (标识 L1、L2)。此外, 模型箱底板还布设 1 支加速度计 (标识 AH5), 用于记录台面输入动荷载; 在模型表层布设 2 支 LVDT 位移计, 用于监测土体沉降位移量。



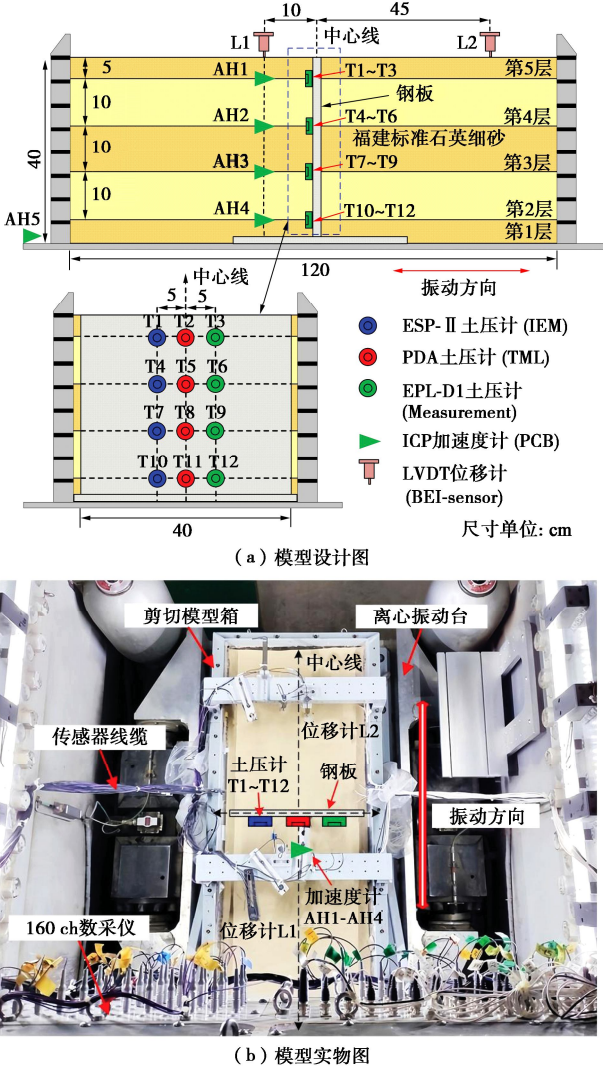


图 6 离心模型试验设计方案与实物照片

Fig. 6 Design configuration and photo of test models

2.4 荷载施加方案与标定试验

本次离心模型试验加载的离心力与动荷载如图 7 所示。在静力离心试验中，选取图 7 (a) 分级加载离心力数据，引入线性误差  $\zeta_{ls}$ 、平均幅值误差  $A_{es}$ 、拟合优度系数  $R^2$  作为评价指标，以分析 3 种传感器的静态响应准确性。待离心力加载至 50g，选取图 7 (b) 所示脉冲波，基于响应滞后  $T_d$  作为评价指标，以分析传感器动态响应敏感性；选取图 7 (c) ~ (f) 依次施加 0.1g 正弦波（原型频率 1Hz）、0.3gEI-centro 波、0.3gTCU 波、扫频波，以反映连续动荷载条件下 3 种传感器测量的震前-震后土压力增量的变化规律，其中，每次动荷载施加完成后，待土压力数据达到稳定状态，再施加下一个动荷载。需特别说明，3 种土压计出厂均采用液压或油压进行率定，但根据《土工离心模型试验技术规程：DL/T 5102—2013》<sup>[3]</sup>规定“土压计宜埋置于与模型相同的材料进行加压率定”，因此，在开展离心模型试验前，需对所有微型土压计进行砂标试验，具体率定方法参考文献[17]，采用最小

二乘法拟合，以确定 3 种土压计的砂标系数。

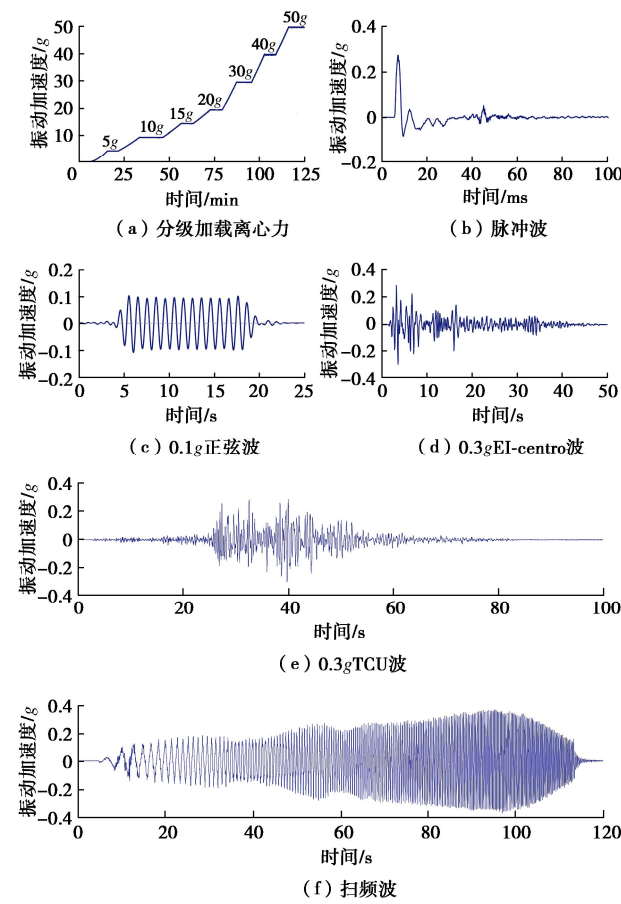


图 7 施加离心力与动荷载

Fig. 7 Centrifugal acceleration and dynamic loading as input

3 试验结果与性能验证

在离心模型试验环境中，即具有高离心力，又有瞬时和高频荷载，对土压计的测试准确性提出了严苛要求，因此，开展土压力测量规律和准确性研究，对土压力测量可靠性和数据正确认识具有重要意义。需说明的是，本次试验逐级加载离心力过程中 T2(TML) 土压计由于线缆磨损导致测量数据明显离散，在后续分析中不予采用，本文仅选取具有代表性 T4~T12 土压计进行具体研究。

3.1 静力响应准确性分析

离心机分级加载离心力 5g~50g 过程中，不同深度下各组微型土压计的静力测量结果汇总于图 8，表 2，其中侧向土压力理论值为

$$E=K_0 \gamma (Ng) h \quad (1)$$

式中： $E$  为侧向土压力理论值； $\gamma$  为土体重度； $N$  为离心加速度量级； $g$  为重力加速度； $h$  为模型深度； $K_0$  为侧向土压力系数，该地基模型为正常固结土（内摩擦角较小），其可参考 Jaky 经验公式  $K_0=1-\sin \varphi$  计算<sup>[25]</sup>，求得  $K_0$  理论值约为 0.426。对比图 8 和表 2 逐级加载离心加速度条件下，不同深度各组 ESP-II、PDA

和 EPL-D1 土压计的测量结果与理论值, 除 T11 实测数据与理论值曲线离散程度略高, 其余均与理论曲线具有较高吻合度, 说明全新 ESP-II 传感器与国际通用土压计整体表现出良好的静态响应性能。

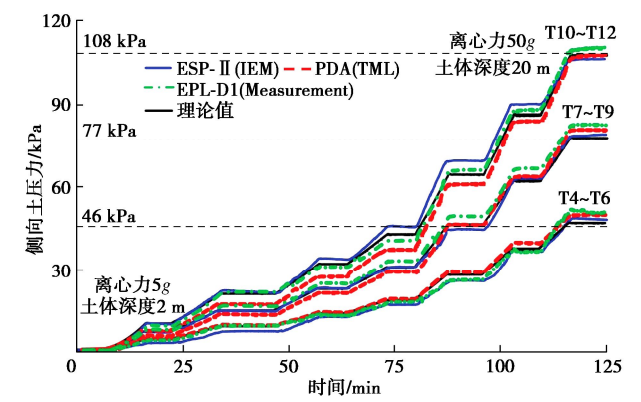


图 8 离心机加速度阶段 3 种土压计响应测试结果

Fig. 8 Static centrifugal test results of three types of earth pressure transducers at celebration stage of centrifuge

表 2 静力离心试验 3 种土压计实测土压力

Table 2 Earth pressures measured of three types of earth pressure transducers by static centrifuge spinning up 5g to 50g

离心加 速度/g	土层 深度/m	传感器 位置/m	土压计实测值/kPa		
			ESP-II (IEM)	PDA (TML)	EPL-D1 (Measurement)
5	2.0	0.75	3.41	4.89	4.33
		1.25	7.01	5.81	7.66
		1.75	9.97	7.48	9.23
		1.50	7.39	9.69	9.41
10	4.0	2.50	14.59	13.38	16.25
		3.50	22.15	17.08	21.41
		2.25	12.46	14.40	13.11
		3.75	22.89	21.23	24.74
15	6.0	5.25	33.69	27.32	30.28
		3.00	16.80	19.20	18.00
		7.00	45.51	36.92	40.06
		4.50	25.48	29.08	25.85
20	8.0	10.50	69.51	60.65	65.54
		6.00	36.18	39.60	36.08
		10.00	62.49	63.41	66.46
		14.00	89.81	83.54	87.41
30	12.0	7.50	47.82	49.66	51.51
		12.50	78.28	80.31	82.43
		17.50	106.89	107.35	109.85
40	16.0	12.50	78.28	80.31	82.43
		17.50	106.89	107.35	109.85
		17.50	106.89	107.35	109.85
		17.50	106.89	107.35	109.85

参照行业规范《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件: GB/T 15406—2007》<sup>[26]</sup>, 以线性误差  $\xi_{ls}$ 、平均幅值误差  $A_{es}$  指标评价微型土压计的测试精度:

$$\xi_{ls} = \frac{|\Delta Y_{LS}|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

$$A_{es} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta Y_{ES}|_{\max}}{Y_E} \right) \text{ave} \times 100\% \quad , \quad (3)$$

式中:  $\Delta Y_{LS}$  为同一标定点上正行程上土压计最大实测值与理论值之差;  $\Delta Y_{FS}$  为满量程 (500 kPa) 输出;  $\Delta Y_{ES}$

为每级荷载下土压计示值与真实值之差;  $Y_E$  为每级荷载真实值 (选取代表性离心力数据 10g, 20g, 30g, 40g, 50g)。

根据式 (2) 和表 2 实测数据, 可获得全新软接触式 ESP-II 传感器、国际 PDA 和 EPL-D1 传感器的线性误差  $\xi_{ls}$  分别为 0.99%, 1.22%, 1.08%, 平均幅值误差  $A_{es}$  分别为 5.16%, 6.70%, 4.85%, 说明 ESP-II 土压计与国际 EPL-D1 土压计的测试精度较为一致, 且略优于 PDA 土压计, 初步证明了 ESP-II 土压计达到国际通用土压计的静力测试水平。

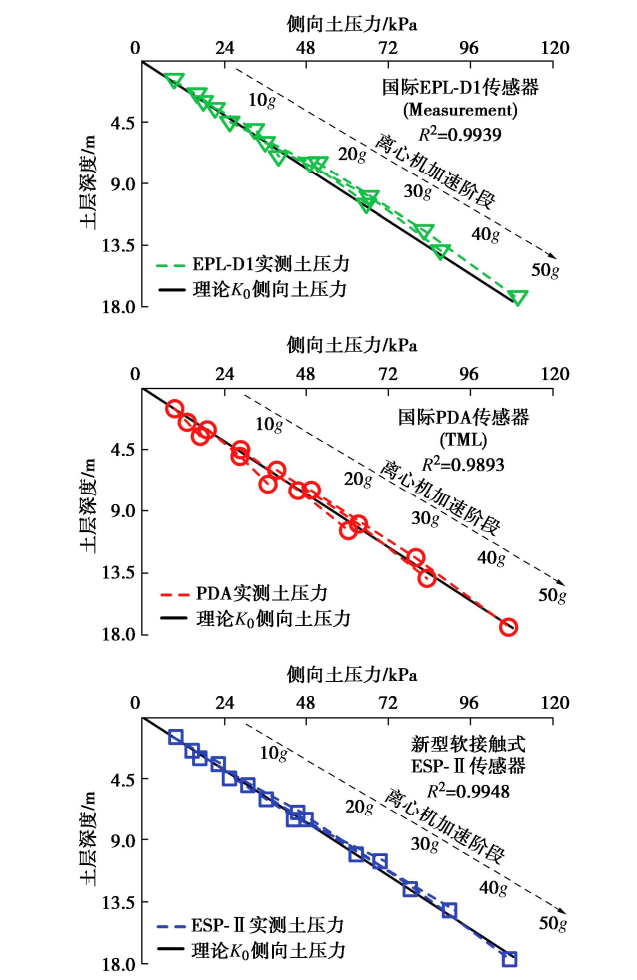


图 9 离心机加载阶段侧向土压力与理论  $K_0$  分布

Fig. 9 Profile of lateral earth pressure and theoretical  $K_0$  at celebration stage of centrifuge

在离心机分级加速阶段 10g, 20g, 30g, 40g, 50g 中, 地基模型中沿深度侧向土压力分布结果如图 9 所示, 其中虚线为离心力 10g~50g 时 3 种微型土压计的实测值, 黑色实线为理论  $K_0$  曲线。观察图 9, 容易看出 ESP-II、PDA 和 EPL-D1 土压计实测的侧向土压力随深度变化曲线呈线良好的线性分布规律, 其与理论  $K_0$  曲线的拟合优度系数  $R^2$  分别高达 0.9948, 0.9893, 0.9939, 说明 3 种传感器实测与理论  $K_0$  曲线较为吻合; 进一步, 通过最小二乘法对  $K_0$  曲线进行拟合, 可获得

3 种传感器实测侧向土压力  $K_0$  值分别约为 0.432, 0.421, 0.440, 均较为接近理论值  $K_0$ 。

图 10 给出了各离心力条件下,同一模型埋深各组微型土压计的实测压力曲线。由图 10 可以看出,离心机加载过程中,3 种土压计测量的  $K_0$  值随着深度的变化规律较为一致;同时,发现了不同离心加速度下 ESP-II 和 EPL-D1 土压计获得的  $K_0$  值范围分别在 0.418~0.438 和 0.417~0.446,而 PDA 土压计的  $K_0$  值范围则在 0.360~0.435,前两者  $K_0$  变化值较为稳定,后者则呈逐步增大趋势,也说明微型土压计的选型对静力离心模型试验中土压力的影响因素研究和测量数据分析结论产生较为重要的影响。

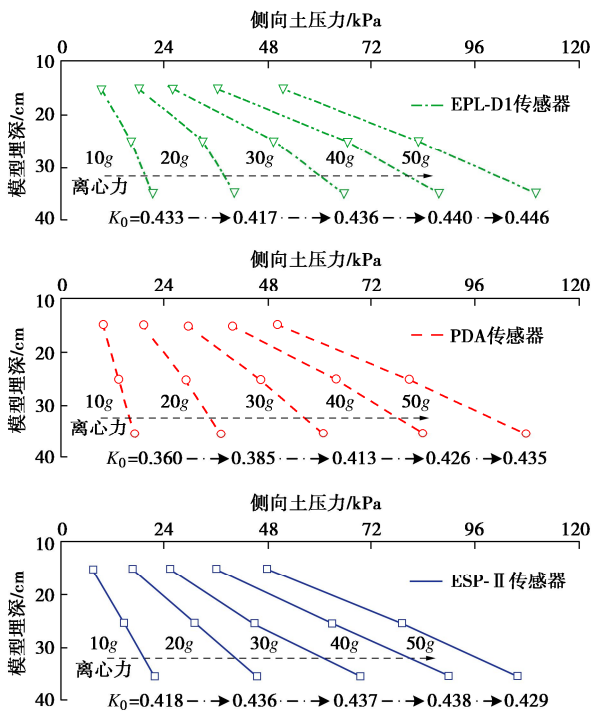


图 10 不同离心力下各组土压计实测侧向土压力变化

Fig. 10 Measured values of three types of earth pressure transducers at different centrifugal accelerations

### 3.2 动态响应敏感性分析

脉冲荷载对于微型土压计而言是最为严峻的工作状态,以响应滞时  $T_d$  (定义为土压力峰值与加速度峰值的平均时间迟滞)作为描述其响应速率的重要参数,可反映微型土压计的动态响应敏感性。在离心力 50g 和输入脉冲波条件下,不同埋深处加速度和土压计的动态测试结果,对 3 种传感器测量的动态土压力幅值变化进行归一化处理,如图 11 所示。

观察图 11 中加速度和土压力峰值响应时程,可发现土层深度 7.5, 12.5, 17.5 m 处 ESP-II 峰值响应时程均略超前 PDA 和 EPL-D1 土压计;由图 11 计算可获得 ESP-II 土压计的响应滞时  $T_d$  分别为 7.8, 7.9, 8.5 ms, PDA 土压计  $T_d$  为 8.6, 8.9, 9.6 ms, EPL-D1 土压计为 8.1, 8.3, 8.9 ms,三者响应滞时自上而下呈现

增大趋势,主要原因是以土压计响应滞时计算是以加速度为参考,但受脉冲荷载由深至浅传递时间的影响,造成加速度与土压力峰值响应存在滞时现象。将  $T_d$  换算成响应速率,可得到 ESP-II、PDA 和 EPL-D1 土压计分别约为 128, 116, 123 Hz,前者响应速率略高于后两者传感器。进一步,观察图 11,可发现与 PDA 土压计相比,容易发现 ESP-II 和 EPL-D1 土压计均可快速跟随振动荷载变化,且两者表现出较为一致、清晰的衰减震荡的变化规律,主要原因 ESP-II 不仅采用了高性能压敏感应元,还引入软接触式和无应力胶的设计方法,能将界面土压力变化直接传递至感应元,以缩短响应时间。综上,证明了 ESP-II 土压计达到国际通用土压计的动态响应敏感性,具有良好的响应速率。

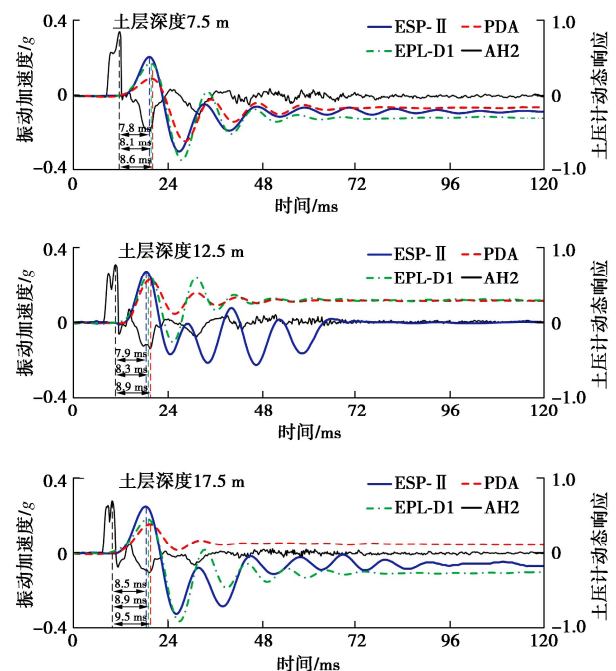


图 11 脉冲波荷载下土压计动力离心试验结果

Fig. 11 Dynamic centrifugal test results of three types of earth pressure transducers under pulse wave

### 3.3 动态土压力增量分析

在离心加速度 50g 条件下,依次输入不同动荷载,包含 0.1g 正弦波、0.3gEI-centro 波、0.3gTCU 波、扫频波,震前-震后 3 种土压计的动力响应时程如图 12 所示。由图 12 可以看出,逐级施加多次动荷载,对比深度 7.5~12.5 m 处震前-震后土压力稳定过程,3 种土压计测量结果随振动荷载变化规律均较为一致,土压力增量在达到峰值后缓慢下降至稳定值,但整体侧向土压力值仍呈线增大趋势;其中,加载第 1 个动荷载时传感器记录的压力增量较小,主要原因是振动荷载幅值较小且持时短,使得土体密实度受振动影响相对较小;加载第 2~4 个振动荷载时,受动荷载幅值快速增大且持时长的影响,震后土体密实度逐渐升高,导致作用于地基模型的土压力也随之增大,上述土压



力增长趋势与既有规律一致<sup>[27]</sup>。

图 13 给出了连续加载 4 次动荷载时,地基模型中各组微型土压计的实测侧向土压力沿深度变化曲线。观察图 13, 容易看出 ESP-II、PDA 和 EPL-D1 土压计实测  $K_0$  值分别由震前-震后 0.429 增至 0.561, 0.435 增至 0.513, 0.446 增至 0.526, 三者获得的  $K_0$  值均呈现增大趋势, 且测量结果离散性较小, 说明 3 种土压计均能较好地反映动荷载下震前-震后侧向土压力系数  $K_0$  随深度和密实度的变化规律。

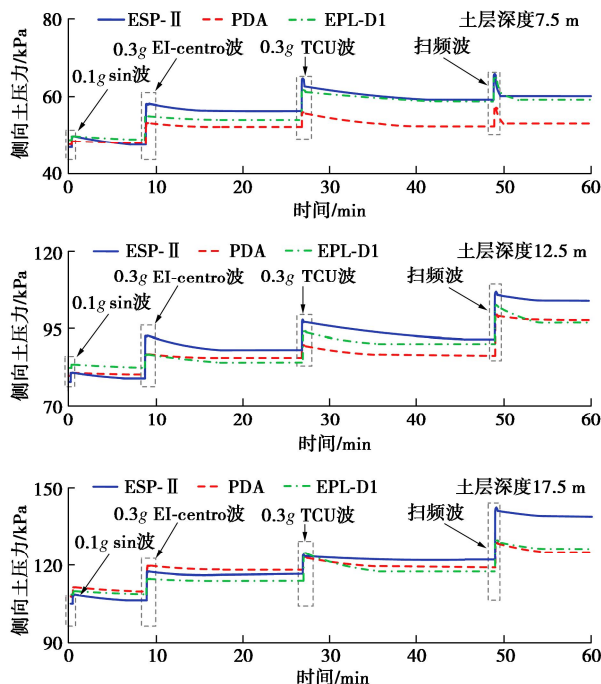


图 12 连续动力荷载下土压计测量结果

Fig. 12 Dynamic centrifugal test results of earth pressure transducers under different seismic amplitudes

### 3.4 荷载历史及卸荷影响分析

本文试验经历了逐级离心力上升和多次地震波等加载静/动力荷载, 已有研究表明荷载历史也是影响土压计测量标定系数和准确性的重要因素之一。因此, 笔者对于离心机降速阶段中 50g~30g~10g 三种土压力随离心力变化过程进行了初步探讨, 数据分析结果如图 14 所示, 其中, 图 14 (a) 为土压力与离心力响应时程曲线, 图 14 (b) 为侧向土压力沿深度分布曲线。观察图 14 (a) 响应时程曲线, 容易发现离心力由 50g 变化至 0g 时, 图中 P1~P5 处 EPL-D1 土压计和图中 P1、P3 处 PDA 土压计测量曲线的光滑度和连续性略差, 均出现不同程度的跳跃、折线现象, 尤其是体积较小的 EPL-D1 土压计最为明显, 而 ESP-II 土压计则保持相对较为良好的响应连续性, 也说明经历过一系列静/动力荷载试验后, 其软接触式设计可较好地保障土压计具有较好的稳定性和土介质-传感器接触面。观察图 14 (b), 容易发现 3 种传感器均出现一定程度的“滞后”特性, 且侧向土压力系数  $K_0$  沿深度

变化呈现非线性变化, 主要原因是离心力逐级下降, 土体仍保留上一级的压力荷载和摩擦力, 这也说明卸荷过程导致土体骨架和力链结构变化。

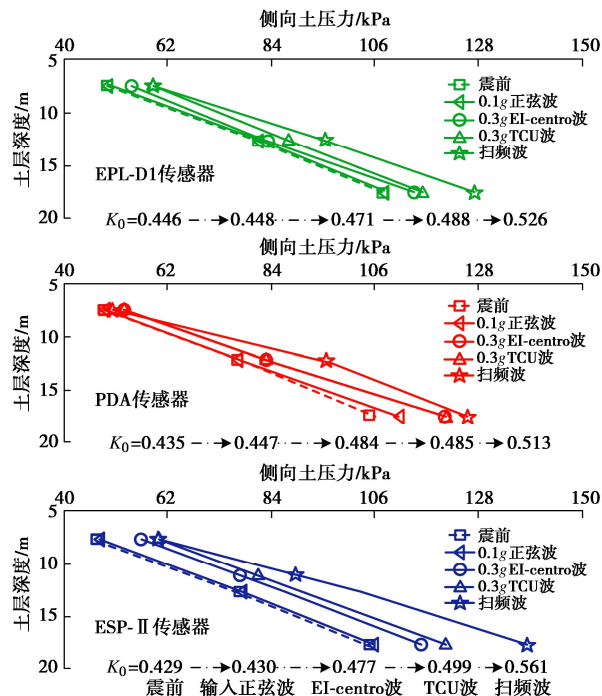
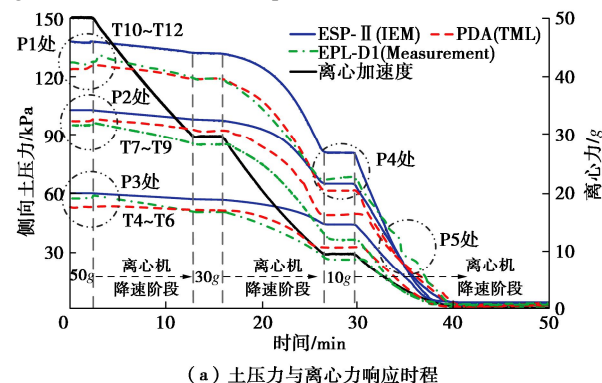
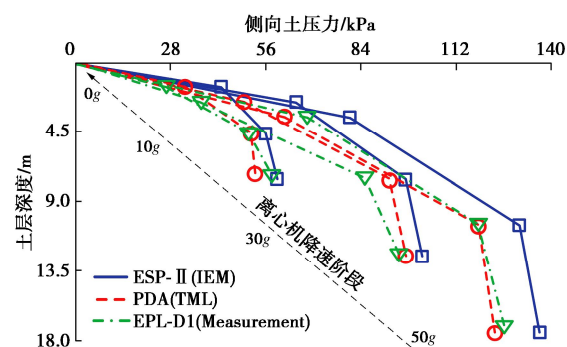


图 13 不同动荷载下侧向土压力分布

Fig. 13 Profile of lateral earth pressure under different seismic loads



(a) 土压力与离心力响应时程



(b) 侧向土压力沿深度分布

图 14 离心力逐级下降阶段 3 种土压计响应结果

Fig. 14 Test results of three types of earth pressure transducers at decelerating stage of centrifuge

## 4 应用与讨论

本文开发的软接触式微型土压计 ESP-II, 已先后

应用于国内外多个离心机单位的岩土离心模型试验, 包含: 中国地震局工程力学研究所有效半径 5.0 m 离心机振动台的直斜桩动力离心模型试验 (2021)、珊瑚礁砂港口碎石桩地基液化离心模型试验 (2022)、高桩码头群桩基础减隔震离心模型试验等 (2022); 上海交通大学直径 2.2 m 鼓式离心机的大直径吸力锚基础拉压离心模型试验 (2022), 荷兰 TU Delft 半径 1.3 m 离心机的某结构物侧扩流抗液化响应离心模型试验 (2022)。此外, 本文 ESP-II 土压计也已应用于一些大型振动台和降雨模拟试验, 包含浙江省丽水学院山区地质灾害监测系统的降雨滑坡地质灾害智能监测试验 (2021); 宁波诺丁汉大学多功能风浪-地震耦合加载设备的海上风电桩基模型抗倾覆试验 (2022); 中国地震局工程力学研究所 5 m×5 m 振动台的 30 万方级 LNG 储罐模型抗震模型试验 (2022); 西南交通大学土木工程学院的铁路土工结构地基处理全过程变形智能监测 (2023) 等。上述案例表明, ESP-II 土压计在各类土木工程的多灾害模拟试验中, 具有良好适用性和推广前景。

土压计的使用方法与标定系数和土体类型、相对密实度、土体与感应面刚度比及加载历史等密切相关, 选择合适土压计和正确使用方法是保证测量结果可靠性和具有价值的关键因素, 尤其是卸载土压力测试。不同土体介质、应用环境和使用方法, 对新研制软接触式土压计测试结果的影响作用, 将在后续研究开展和另文发表。

## 5 结 论

(1) 介绍了完全自主研发的软接触式土压计 ESP-II 的技术创新和设计方法, 包含引入柔性软接触面, 以消除传统土压力计拱效应、尺寸效应及刚度差和应力集中等误差因素; 采用高性能压敏元件、微凸表面和无应力胶设计, 以提升响应速率、精度和保障土体-传感器良好接触; 利用倒钩结构、密封胶和铁氟龙材质增强其使用寿命和耐久性, 为土压力测量技术的发展开辟新思路和新途径。

(2) 逐级加载离心加速度 5g~50g 试验下, 不同深度 ESP-II、国际 PDA 和 EPL-D1 土压计测量结果与理论值差异较小, 平均误差分别为 5.16%, 6.70%, 4.85%, 沿深度拟合  $K_0$  优度系数  $R^2$  均超过 0.9893, 反映 3 种土压计具有相近的测量精度和一致性, 也初步证明了软接触式 ESP-II 在测量静力离心试验土压力方面, 能达到国际同类代表传感器的一致水平。

(3) 50g 离心加速度下脉冲和地震动力荷载试验结果表明, ESP-II 最大响应时间  $T_d$  约 7.8 ms, 略优于两种国际代表土压计, 具有良好的频响速率; 不同幅

值正弦、地震等连续动荷载下, 3 种传感器测得土压力均呈一致增量趋势, 与既有规律认识吻合,  $K_0$  约由 0.43~0.45 增至 0.50~0.56, 一定程度反映了软接触式 ESP-II 测量动态土压力的适用性和可靠性。

(4) 离心加速度逐级下降的卸荷过程中, 不同深度 PDA 和 EPL-D1 的测量时程出现明显的跳跃、折线现象, 尤其体积较小的 EPL-D1 型; 而 ESP-II 测量时程具有良好连续性和光滑性, 表明软接触式设计有利于保障土体与传感器良好接触和稳定响应。卸荷过程中 3 种传感器均反映  $K_0$  沿深度变化的非线性增强, 表明卸荷过程将导致土体骨架和力链结构变化。

## 参考文献:

- [1] 张建民, 于玉贞, 濮家骊, 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 Jianmin, YU Yuzhen, PU Jialiu, et al. Development of a shaking table in electro-hydraulic servo-control centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 843-845. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 土工离心模型试验技术规程: DL/T 2013—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. (Specification for Geotechnical Centrifuge Model Test Techniques: DL/T 2013—2020[S]. Beijing: China Architecture and Building, 2020. (in Chinese))
- [4] 港口工程离心模型试验技术规程: JTS/T 231—7—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013. (Code for Centrifugal Model Test for Port Engineering: JTS/T 231-7-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese))
- [5] 曾 辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 99-105. (ZENG Hui, YU Shangjiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 99-105. (in Chinese))
- [6] MIURA K, OTSUKA N, KOHAMA E, et al. The size of earth pressure cells on measurement in granular materials[J]. The Japanese Geotechnical Society, 2003, 43(5): 133-147.
- [7] 余尚江, 曾 辉. 土中自由场应力与结构表面压力测量的差异[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 654-657. (YU Shangjiang, ZENG Hui. The difference between measurements of stress in soil and pressure on wall-surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6):

- 654-657. (in Chinese))
- [8] JOSEPH F L, BRENT T. Laboratory calibration of earth pressure cells[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2005, **28**(2): 188-196.
- [9] TALESNICK M. Measuring soil contact pressure on a solid boundary and quantifying soil arching[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2005, **28**(2): 171-179.
- [10] 徐光明, 陈爱忠, 曾友金, 等. 超重力场中界面土压力的测量[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(12): 2671-2674. (XU Guangming, CHEN Aizhong, ZENG Youjin, et al. Measurement of boundary total stress in a multi-gravity environment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(12): 2671-2674. (in Chinese))
- [11] WEILER W A, KULHAWAY F H. Factors affecting stress cell measurement in soil[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1982, **108**(12): 1529-1548.
- [12] EGAN D, MERRIFIELD C K. The use of miniature earth pressure cells in a multi-gravity environment[C]// *Centrifuge 98*. Tokyo, 1998.
- [13] DAVE T N, DASAKA S M. In-house calibration of pressure transducers and effect of material thickness[J]. *Geo-mechanics and Engineering*, 2013, **5**(1): 1-15.
- [14] 魏永权, 罗强, 张良, 等. 离心力场中微型土压力传感器非线性响应分析[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(1): 286-292. (WEI Yongquan, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Study of nonlinear response of miniature earth pressure transducer in centrifugal force field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(1): 286-292. (in Chinese))
- [15] 芮瑞, 吴端正, 胡港, 等. 模型试验中膜式土压力盒标定及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(5): 837-845. (RUI Rui, WU Duanzheng, HU Gang, et al. Calibration tests on diaphragm-type pressure cells[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(5): 837-845. (in Chinese))
- [16] 梁波, 厉彦君, 凌学鹏, 等. 离心模型试验中微型土压力盒土压力测定[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(2): 818-826. (LIANG Bo, LI Yanjun, LING Xuepeng, et al. Centrifugal model test of micro box of earth pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(2): 818-826. (in Chinese))
- [17] 蔡正银, 代志宇, 徐光明, 等. 离心模型试验中界面土压力盒标定方法研究[J]. *水利学报*, 2020, **51**(6): 695-704. (CAI Zhengyin, DAI Zhiyu, XU Guangming, et al. Study on calibration method of interface soil pressure sensor in centrifugal model test[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(6): 695-704. (in Chinese))
- [18] 刘开源, 许成顺, 贾科敏, 等. 薄膜压力传感器(FSR)曲面土压力测量研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(3): 584-591. (LIU Kaiyuan, XU Chengshun, JIA Kemin, et al. Research on measurement of curved soil pressure using thin film pressure sensor (FSR) [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(3): 584-591. (in Chinese))
- [19] GAO Y, WANG Y H. Calibration of tactile pressure sensors for measuring stress in soils[J]. *Geotechnical testing journal*, 2013, **36**(4): 1-7.
- [20] PALMER M C, O'ROURKE, THOMAS D, OLSON N A, et al. Tactile pressure sensors for soil-structure interaction assessment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(11): 1638-1645.
- [21] MADABHUSHI S S C, HAIGH S K. Using tactile pressure sensors to measure dynamic earth pressures around du-al-row walls[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2018, **19**(2): 58-71.
- [22] 张紫涛, 徐添华, 徐韵, 等. 薄膜压力传感器在土工试验中的适用性初探[J]. *岩土工程学报*, 2016, **39**(增刊 1): 209-213. (ZHANG Zitao, XU Tianhua, XU Yun, et al. Feasibility of applying tactile pressure sensors in geotechnical tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **39**(S1): 209-213. (in Chinese))
- [23] MADABHUSHI G. *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [24] 汤兆光. 超重力试验动态孔压传感器设计方法、性能评价与应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022. (TANG Zhaoguang. Design Method and Performance Evaluation of Dynamic Miniature Pore Water Pressure Transducer in Centrifuge Modelling and Its Application[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese))
- [25] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 1944, **78**(22): 355-358.
- [26] 岩土工程仪器基本参数及通用技术条件: GB/T 15406—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. (Primary Parameter and General Specification for Geotechnical Engineering Instrument: GB/T 15406—2007[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [27] 蔡正银, 代志宇, 徐光明, 等. 颗粒粒径和密实度对砂土 $K_0$ 值影响的离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(12): 3882-3888. (CAI Zhengyin, DAI Zhiyu, XU Guangming, et al. Effect of particle size and compaction on  $K_0$  value of sand by centrifugal model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(12): 3882-3888. (in Chinese))