

DOI: 10.11779/CJGE202107005

分体高频响应微型孔隙水压力传感器研制与性能评价

汤兆光, 王永志*, 段雪锋, 孙 锐, 王体强

(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)

摘 要: 孔隙水压力是岩土物理试验和原位工程监测的关键力学指标之一。针对动力离心试验高频、瞬时荷载特点与动态孔压测试需求, 研发了一种分体高频响应微型孔压传感器 DSP-II, 以国际公认标准孔压传感器 PDCR-81 为参考, 开展多组静/动力标定试验和土工离心模型试验, 验证其测试精度、频响速率和稳定性。主要结论: ① DSP-II 传感器在提高频响速率、测试精度、寿命周期等方面, 建立了关键技术与设计方法。② 动力标定试验表明 DSP-II 和 PDCR-81 传感器具有基本相同动力性能, 响应时间分别为 4.93 ms 和 4.97 ms, 幅值误差为 0.483% 和 0.575%, 可满足频率 ≤ 200 Hz 地震、爆炸等动力离心试验孔压测试需求。③ 逐级加载和 39 d 后重复静力离心试验, 不同埋深 DSP-II 和 PDCR-81 测试结果与理论值高度吻合, 平均幅值误差和重复性指标分别为 0.347% 和 0.392%, 0.157% 和 0.169%, 表明二者具备优良的长期稳定性和一致性。④ 各动荷载离心试验中两种传感器的测量结果极为一致, 最大峰值滞时和最小相关系数分别为 1.76 ms 和 0.9908, 证明 DSP-II 达到了国际标准孔压传感器的量测性能。

关键词: 孔隙水压力; 微型传感器; 分体结构; 高频响应; 性能评价

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)07-1210-10

作者简介: 汤兆光(1993—), 男, 博士研究生, 从事动力离心试验技术研究工作。E-mail: tzg158135@163.com。

Development and performance evaluation of separable high-frequency response miniature pore water pressure transducer

TANG Zhao-guang, WANG Yong-zhi, DUAN Xue-feng, SUN Rui, WANG Ti-qiang

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The pore water pressure is one of the key mechanical indexes in geotechnical model tests and in-situ engineering monitoring. Aiming at the characteristics of high frequency and instantaneous load of dynamic centrifugal model tests and the measuring requirements of dynamic pore water pressure, a novel separable high-frequency response miniature transducer DSP-II is developed. Moreover, the internationally recognized standard pore water pressure transducer PDCR-81 is selected to perform a series of static and dynamic calibration tests and centrifugal model tests to verify the accuracy, frequency response and stability performance of the DSP-II. The main conclusions are drawn: (1) The DSP-II has established key technology and design method in improving the frequency response, accuracy, life cycle, etc. (2) The dynamic calibration test results show that the response time of the DSP-II and the PDCR-81 is 4.93 and 4.97 ms, and the amplitude error is 0.483% and 0.575%, which indicates that the two transducers have basically the same dynamic performance and can meet the requirements of dynamic centrifugal tests with frequencies equal or less than 200 Hz. (3) From the static stepwise centrifugal loading and repeated tests after 39 days, the results of the two transducers with different buried depths are highly consistent with the theoretical values, the average amplitude error is 0.347% and 0.392%, and the repeatability index is 0.157% and 0.169%, which indicates that they have excellent long-term stability and consistency. (4) The results of the two transducers with different dynamic loads are nearly consistent in centrifugal model tests. The maximum time lag of peak value and the minimum correlation coefficient are 1.76 ms and 0.9908, which proves that the DSP-II reach the measurement performance of the PDCR-81. The research work and conclusions are essential for advancing pore water pressure measurement technology, and may provide important guidance and design method.

Key words: pore water pressure; miniature transducer; separable structure; high frequency response; performance evaluation

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 (2019EEVL0203); 国家自然科学基金项目 (51609218); 黑龙江省自然科学基金项目 (YQ2019E035)

收稿日期: 2020-09-17

***通信作者** (E-mail: yong5893741@163.com)

0 引言

孔隙水压力传感器(简称“孔压传感器”)是土工测试技术的重要组成部分,也是岩土工程学科的基础课题之一^[1-6],其量测孔隙水压力的准确性与可靠性,对认识土体、构筑物的应力状态和失效过程至关重要^[7-8]。但是,其与一般压力传感器^[9-11]相比,具有透水石、空腔、通气线缆等特殊结构,并以颗粒间孔隙流体状态为量测对象,其量测准确性与可靠性受诸多复杂因素影响。在土工离心机、振动台等动力试验中,动力荷载根据相似准则,需将原荷载频率提升几十至上百倍(可达上百或数百赫兹),具有高频、瞬时等特点,对孔压传感器的准确与可靠量测提出了严苛要求。若这些要求不能得到很好满足,其测量的孔隙水压力必然会对土体力学性质的认识产生影响。

在此,简要介绍微型孔压传感器发展历程的代表性研究成果,并归纳主要现状与问题。20世纪70—80年代,土工离心机在全球范围内得到迅速发展,与大量建设^[12],压阻式传感器也取得飞跃进步,根据离心试验中小体积模型、传感器尺寸效应、高频荷载等特点,若干离心机单位委托英国 Druck 公司研发了 PDCR-81 微型孔压传感器,被各离心机单位应用^[1-3, 12-13]。此后,Knodel 等^[1]利用二维有限元法分析了 PDCR-81 前端形状、尺寸等因素,对外部土体应力集中和传递路径的影响规律与产生的误差,提出了改进的前端设计方法,被 Druck 公司采用。König 等^[2]在国际联合离心平行试验中发现 PDCR-81 透水石易出现堵塞现象,影响传感器的饱和度与响应时间而造成量测误差,并指出传感器量测的准确性与使用方法关联紧密。为此,Druck 公司进一步改善 PDCR-81 设计方法,并提高高频响应速率与精度,形成最终方案,逐渐被认可为离心试验测量孔压的“标准”传感器。之后,Chaney 等^[3]通过离心试验探讨了 PDCR-81 测量非饱和土基质吸力的可行性,证明了充分饱和的 PDCR-81 可准确、有效地测量土体基质吸力。孙汝建^[4]介绍了一种借鉴 PDCR-81 研发的国产 YY-2 孔压传感器,基于室内标定试验和原位工程监测结果,表明 YY-2 可适应静力荷载下孔压的准确与稳定测试。2010 年第七届国际土工物理模拟学术会议上,Druck 公司因 PDCR-81 在公司产值占比很小而宣布停产,使全球离心机单位失去了高性能微型孔压传感器的来源。Stringer 等^[13]介绍了美、日若干离心机单位委托精密仪器公司研发的 3 种新型微型孔压传感器,以发展 PDCR-81 的替代品,包含 2Mie、XCL-11 和 KPE-PB,并通过气体标定装置简单分析了 3 种孔压传感器性能。王永志等^[5]借助 2Mie 传感器的分体式结构和标定试验,探讨了透水石渗透性、饱和状态等对孔压量测精度的影响特征,给出了透水石的

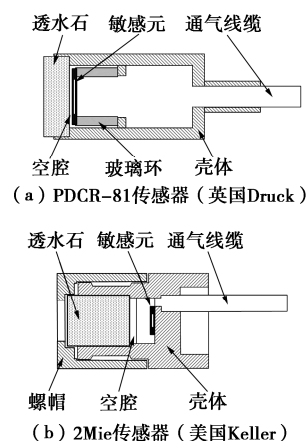
选取原则与清理饱和方法。汤兆光等^[6]采用一套自主研发的孔压动力响应标定装置,对比了 PDCR-81 和 2Mie 的响应性能,证明了饱和度可对传感器频响速率与精度产生严重影响,而充分饱和条件下 2 种传感器的频响速率均约为 200 Hz。

综上,土工离心试验孔压量测技术的发展历程与研究成果,主要围绕 PDCR-81 与其可替代传感器开展。总体而言,国内微型孔压传感器发展的技术水平,已可满足静力荷载下孔压准确、稳定测试需求。但是,在高频、瞬时动力荷载下,其频响速率和可靠性认识尚十分有限,且多以 PDCR-81 传感器为参考“标准”。据笔者曾工作过的加州大学半径 9.1 m 离心机实验室和现工作的离心机实验室统计,孔压传感器与加速度、位移等微型传感器相比,其故障率占列首位,甚至一些关键测点的失效,有时直接导致试验的失败。因此,微型孔压传感器的动力量测性能方面,仍有待加强研究与提升。此外,中国现有微型孔压传感器多由土压或水压传感器改造而成,与国际孔压传感器相比,其普遍在频响、精度、稳定性等方面表现不足,且故障率是国际高端传感器的 2~3 倍。

针对动力离心试验高频、瞬时荷载特点和中国孔压量测技术发展需求,本文介绍了一种自主研发的分体式高频响微型孔压传感器,以 PDCR-81 传感器为参考基准,开展多组静/动力标定试验与干/饱和砂离心模型试验,评价新型孔压传感器的频响速率、精度和稳定性等指标,验证其适用范围和长期服役性能。

1 国际典型孔压传感器结构组成

为充分说明典型微型孔压传感器的设计结构与国际的发展水平,以曾在全球土工离心试验广泛应用的 PDCR-81 和海外近期研制的 2Mie、KPE-PB 传感器作为代表介绍,其设计结构和组成如图 1 所示,主要参数和材质见表 1。观察图 1(a)~(c)并比较表 1 中设计参数,容易发现 3 种传感器的基本组成较为一致,包含敏感元、透水石、壳体、线缆等 4 个基本组成,但在设计的结构、参数和选材等方面差异显著。



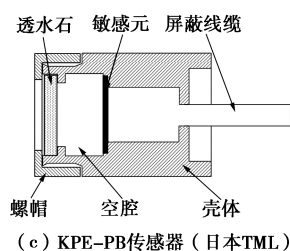


图1 国际多种典型微型孔压传感器结构设计

Fig. 1 Structural design of several typical miniature transducers

表1 国际多种典型微型孔压传感器主要设计参数及材质

Table 1 Main technical specifications and materials of several typical miniature transducers (mm)

型号	壳体	透水石	空腔	线缆	壳体材质	透水石材质
PDCR-81	$\phi 6.4 \times 11.4$	$\phi 6.0 \times 2.0$	0.13	$\phi 2.3$	不锈钢	多孔陶瓷
2Mie	$\phi 7.0 \times 11.2$	$\phi 3.8 \times 4.0$	0.40	$\phi 1.2$	不锈钢	多孔陶瓷
KPE-PB	$\phi 10 \times 13.5$	$\phi 6.5 \times 1.0$	2.80	$\phi 1.6$	黄铜	细烧不锈钢

在敏感元方面, PDCR-81 和 2Mie 为压阻膜片, KPE-PB 则为电阻应变片; PDCR-81 的敏感元由内嵌玻璃杯实现固定与支撑, 2Mie 和 KPE-PB 则通过壳体内腔室和悬臂的设计实现固定与支撑。在透水石方面, PDCR-81 和 2Mie 为多孔陶瓷, KPE-PB 则为细烧不锈钢; PDCR-81 的透水石采用凸台设计, 以消除土体与传感器两种介质强度差异产生的应力路径影响^[1], 2Mie 和 KPE-PB 则利用内凹设计, 消除两种介质强度差异对应力路径的影响。在壳体方面, PDCR-81 和 2Mie 为不锈钢, KPE-PB 则为黄铜; PDCR-81 的壳体采用一体式结构以保护敏感元, 2Mie 和 KPE-PB 则采用螺帽及螺纹的分体式结构, 以增加检修能力和提高敏感元利用率。在线缆方面, PDCR-81 和 2Mie 为铁氟龙材质, KPE-PB 则采用聚四氟乙烯材质; PDCR-81 的线缆采用四芯制, 供电线与屏蔽线共用接地, 2Mie 和 KPE-PB 则采用五芯制, 供电线与屏蔽线独立接地。

在频响速率与测试精度影响因素方面, 依据连通原理, 当透水石孔隙处于完全连通条件^[5]和经历足够响应时间^[1, 4], 传感器应能准确感应透水石外界的静力孔压变化。但是, 当外界孔压处于动力变化时, 应力波经由透水石、空腔等需传递时间, 若传递时间大于外界孔压变化速度, 其势必对响应幅值与精度产生影响。根据典型孔压传感器设计结构和应力波传播路径, 可知其响应精度和速率, 与透水石渗透率及厚度、孔隙液体黏度、传感器饱和度、空腔长度等因素均有关联^[1-3, 5-6, 13], 其中透水石厚度和空腔长度越小, 对缩短传递时间和提高响应速率越有利。由表 1 中 3 种传感器参数可知, 在透水石方面, KPE-PB 最小为 1.0 mm, 而 PDCR-81 和 2Mie 分别为 2.0, 4.0 mm; 在空腔方面, PDCR-81 最小为 0.13 mm, 2Mie 和 KPE-PB

分别为 0.4, 2.8 mm。笔者通过一系列标定试验对比了 3 种微型孔压传感器的性能差异^[6], 得出 PDCR-81 的响应速率与饱和速率均优于 2Mie 和 KPE-PB, 证明了其被国际公认为土工离心试验“标准”孔压传感器所特有的优势与特点。因此, 本文将选取 PDCR-81 为参考基准, 评价新型国产微型孔压传感器的测试性能。

2 DSP-II 孔压传感器设计方法及特点

2.1 设计结构与基本组成

缘于中国土工离心试验国产微型孔压传感器在频响、精度、寿命等方面存在严重不足, 而各单位库存的 PDCR-81 传感器已基本损耗殆尽; 国际 2Mie、KPE-PB 等新型传感器因价格昂贵, 损坏率高, 供货期长等原因, 未能在国内各单位广泛应用。为此, 经深入调研国际代表性微型孔压传感器设计方法并解析其频响、精度及寿命等影响因素, 笔者自主研发了一种分体高频响微型孔压传感器 (DSP-II)^[14], 其设计结构与组成如图 2 所示, 主要参数与材质见表 2。对比图 1, 2 和表 1, 2 中数据, 不难发现 DSP-II 与国际典型传感器相比, 在设计结构、组成和参数等方面, 均具有突出差异, 除传感器基本组成之外, 增加了密封圈、无应力胶、密封脂和宝塔头等组成设计, 并合理确定了透水石厚度、空腔长度等参数及增加壳体厚度, 以获得优良的频响、精度和寿命等测量性能。

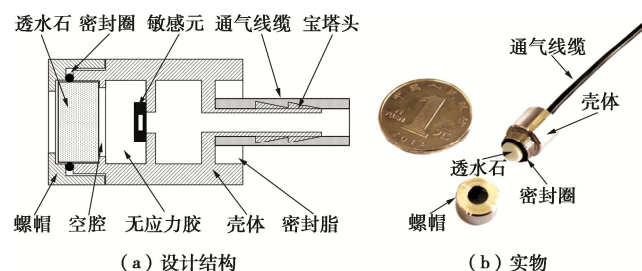


图2 DSP-II 分体微型孔压传感器设计结构与实物

Fig. 2 Separable structure and photo of DSP-II

表2 DSP-II 分体微型孔压传感器设计参数与材料

Table 2 Technical specifications and materials of DSP-II (mm)

型号	壳体	透水石	空腔	线缆	壳体材质	透水石材质
DSP-II	$\phi 10 \times 13.5$	$\phi 5.4 \times 3.0$	0.20	$\phi 2.0$	不锈钢	多孔陶瓷

2.2 主要特点与关键技术

与 PDCR-81 及 2Mie、KPE-PB 传感器相比, 本文分别围绕提高频响速率、量测精度、寿命周期等 3 个方面性能, 阐述 DSP-II 传感器的主要特点与关键技术。

(1) 提高频响速率方面

DSP-II 传感器采用了 3 项关键技术与优化设计:

①与 PDCR-81 相比, DSP-II 采用分体式结构和选取高渗透率透水石, 根据达西定律其能有效降低渗透力传递时间对频响速率的影响; ②DSP-II 传感器采用压阻膜片, 固有频率约 300 kHz, 有效避免了敏感元对传感器频响速率的限制; ③空腔长度和透水石厚度与 PDCR-81 接近, 其中空腔长度为 0.2 mm, 远小于 2Mie、KPE-PB 的 0.4, 2.8 mm, 有效降低了流体中应力波传递时间对传感器频响产生的延迟。此外, König 等基于 5 家单位联合离心试验结果的对比^[2], 提出了每次试验均应根据土体渗透率更换孔压传感器的透水石, 显然, DSP-II 的分体式结构很好地满足这一点。

(2) 提高量测精度方面

比较 PDCR-81 及国际两种新型传感器, DSP-II 传感器的主要特点与改进之处体现于两方面: ①敏感元表面及四周增加了无应力胶填充, 能有效减小壳体变形、流体杂质颗粒等对敏感元造成的应力集中, 使其受力均匀, 以提高测试精度; ②空腔内表面作了专门光滑处理, 能有效防止空腔内表面微小气泡吸附导致饱和度不足, 对传感器测试精度产生不利影响, 并有助于加快饱和速度。同时, DSP-II 采用分体式结构, 为通过拆卸透水石的方法, 评判透水石、流体黏度、饱和度等对测试精度的影响, 提供了有利条件。

(3) 提高寿命周期方面

与加速度、位移等传感器相比, 高故障率是国内外微型孔压传感器的一个突出共性问题, 因此, 提高寿命周期是 DSP-II 传感器研发的核心目标之一。经反复归纳和总结孔压传感器的常见故障形式与成因, DSP-II 传感器开发了 4 方面关键技术与创新方法: ①采用具备良好绝缘特性的无应力胶, 能有效避免导电介质对敏感元造成的损伤; ②线缆引出口采用内凹结构与密封脂填充, 能有效解决 PDCR-81 线缆引出位置积水导致的常见失效; ③传感器与线缆接口采用宝塔头设计, 能有效加强两者连接强度与降低线缆断裂; ④增加壳体厚度, 能有效提升传感器的耐磨、耐冲击和延长使用寿命。此外, 当因透水石堵塞、污染等因素导致传感器故障时, 可利用 DSP-II 分体式结构与更换透水石的方式, 提高敏感元利用率和延长使用寿命。

综上, 针对提高频响速率、测试精度和寿命周期的目标需求, DSP-II 微型孔压传感器开发了多项创新设计方法和关键技术, 为缩小国产与国际微型孔压传感器的发展差距, 建立了重要技术保障。

3 标定试验

3.1 标定装置与试验方案

为校验动力荷载下孔压传感器的频响速率和测试

精度, 笔者自主研发了一套动力孔压响应标定装置, 如图 3 (a) 所示, 具有以下特点: 可施加正弦波、阶跃波、液化孔压模拟荷载等任意荷载输入, 同时满足孔压传感器的静力和动力性能标定需求, 并基于此标定装置, 建立了适于校验土工离心试验微型孔压传感器的标定方法, 详见文献[6]。此外, 图 3 (b), (c) 还分别给出了标定试验中 DSP-II、PDCR-81 实物和标定过程。

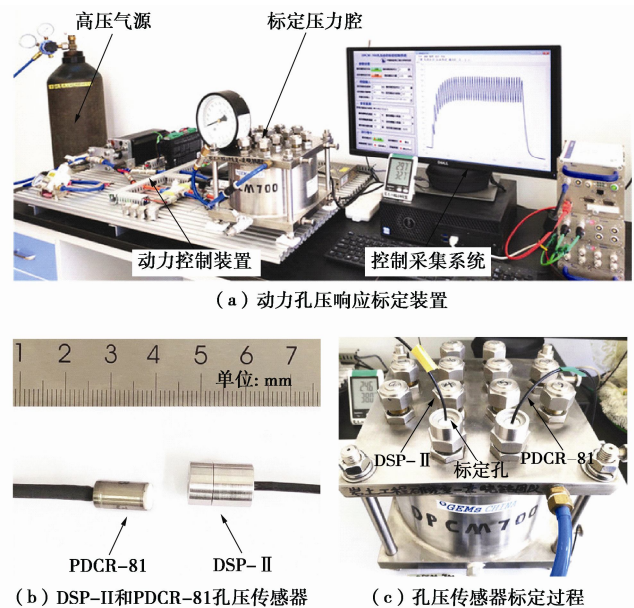
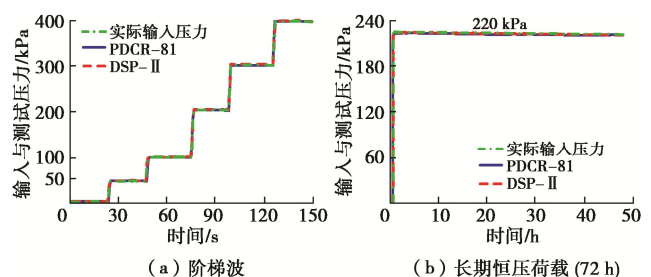


图 3 动力孔压响应标定装置与孔压传感器标定

Fig. 3 Photos of dynamic response calibration device for pore water transducer and calibration procedure

根据研究目标, 为充分认识 DSP-II 与 PDCR-81 传感器的性能差异, 本文分别设计了静力和动力标定试验, 输入荷载如图 4 所示, 包含阶梯波、长期高压荷载试验, 以校验传感器的静力测试精度和长期稳定性; 还包含阶跃波、液化孔压模拟荷载试验, 以校验其动力测试精度和频响速率。值得一提, 两种传感器在标定试验前, 均进行了充分饱和与灵敏度率定, 并以高精度、高频响标准水压计监测和反馈输入荷载。同时, 图 4 还给出了不同输入荷载下两种传感器的响应结果, 易发现两种传感器的响应记录与实际压力高度吻合。



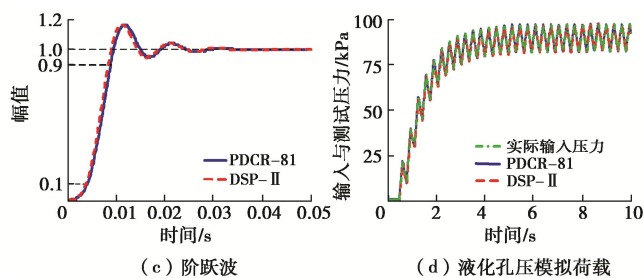


图4 标定试验输入压力荷载与孔压传感器响应结果

Fig. 4 Calibrated results of input pressure loads and response of miniature transducers

3.2 结果对比与性能评价

(1) 静力标定试验

借鉴孙汝建^[4]评判孔压传感器静力性能的技术指标,以非线性 ξ_1 、幅值误差 A_e 等指标衡量其测试精度,以重复性 ξ_r 、漂移量 ξ_d 等指标衡量其长期稳定性。图5给出了静力标定试验的分析结果,图5(a)为50, 100, 200, 300, 400 kPa每一级阶梯压力荷载下,两种传感器最大、最小量测值与实际压力对比,根据公式^[4],获得DSP-II和PDCR-81的非线性指标分别为0.312%, 0.451%,平均幅值误差分别为0.232%, 0.253%,表明两种传感器均具有十分良好的静力测试精度,且前者略微优于后者。图5(b)给出了长期高压荷载下,每2 h两种传感器的测量值与实际压力对比,其中实际压力略呈下降趋势,原因是传感器线缆与标定压力腔连接处发生缓慢漏气,且承压时间过长。根据公式^[4],由图5(b)中数据可求得DSP-II和PDCR-81的重复性分别为0.143%, 0.149%,漂移量分别为0.147%, 0.164%,表明两种传感器均具有十分良好的长期稳定性能。

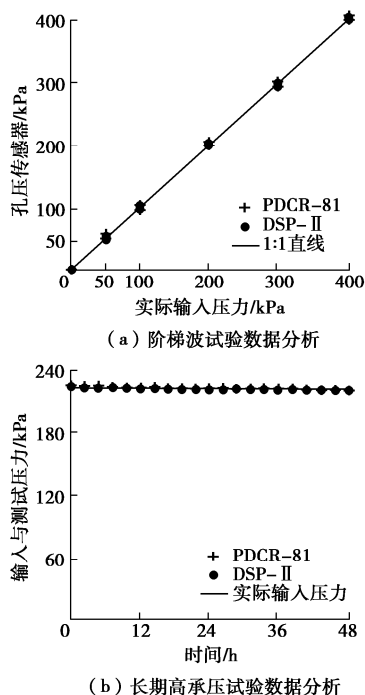


图5 孔压传感器静力性能分析

Fig. 5 Comparison of static performances of miniature transducers

(2) 动力标定试验

目前,《土工离心模型试验技术规程》等岩土行业标准^[15]均尚未明确评判孔压传感器动力性能的技术指标,为此,借鉴评判通用压力传感器动力性能的技术指标^[16],以响应时间 t_r 、峰值时间 t_p 等指标衡量孔压传感器的频响速率,以动态非线性 ξ_1 、幅值误差 A_e 等指标衡量其测试精度。其中,响应时间指输出从稳态值10%上升至90%所需时间,是表征传感器动力性能的一个关键指标;峰值时间指输出达到最大值所需时间,与 t_r 共同反映传感器动力响应的稳定性。图6给出了动力标定试验的分析结果,图6(a)为阶跃波荷载下两种传感器响应时间、峰值时间的分析结果,根据前述定义,可求得DSP-II和PDCR-81的响应时间 t_r 分别为4.93, 4.97 ms,峰值时间 t_p 分别为11.36, 11.43 ms,说明二者响应速度极为相近。将响应时间换算成频响速率,可得两种传感器的频响速率均约200 Hz,证明二者适于频率 ≤ 200 Hz动力荷载下孔压测试需求。图6(b)给出了液化孔压模拟荷载下,每一周循环荷载上、下峰值点两种传感器的测量值与实际压力对比,根据公式^[4],可求得DSP-II和PDCR-81动力荷载下非线性分别为0.368%, 0.497%,平均幅值误差 A_e 分别为0.483%, 0.575%,证明两种传感器的动力测试精度十分相近,且前者略微优于后者,但是与静力测试精度相比,略微下降。

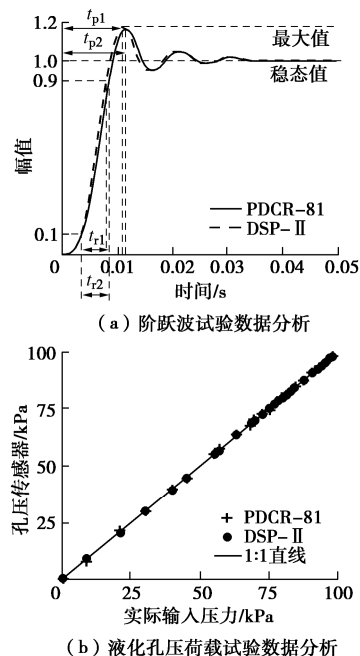


图6 孔压传感器动力性能对比分析

Fig. 6 Comparison of dynamic performances of miniature transducers

DSP-II和PDCR-81两种孔压传感器在标定试验中,静力与动力性能的评价指标对比汇入表3。由表3数据可以看出,两种传感器的各项测试性能均高度一致,其中动力性能方面,二者均可满足频率 ≤ 200 Hz

地震、爆炸等动力离心模型试验, 及常重力下机械、爆炸、交通等高频和冲击荷载下动力孔压测试需求。

表 3 两种传感器静力和动力标定试验量测性能指标对比
Table 3 Comparison of operational indexes of static and dynamic calibration tests on two transducers

静力指标	$\xi_r/\%$	$A_{\xi}/\%$	$\xi_d/\%$	$A_{\xi_d}/\%$
DSP-II	0.312	0.232	0.143	0.147
PDCR-81	0.451	0.253	0.149	0.164
动力指标	t_r/ms	t_p/ms	$\xi_r/\%$	$A_{\xi}/\%$
DSP-II	4.93	11.36	0.368	0.483
PDCR-81	4.97	11.43	0.497	0.575

4 土工离心模型对比试验

本次试验目的是以国际标准 PDCR-81 孔压传感器为参考基准, 检验 DSP-II 孔压传感器在抗离心力和冲击力荷载下的稳定性、测试精度、频响速率、分辨力等, 通过非线性、幅值误差、相关系数、迟滞时间等指标, 证明其量测准确性与可靠性。

4.1 试验设备与方案设计

本次试验设备采用中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 大型动力离心机试验系统^[12], 如图 7 所示, 主要性能指标: 最大半径为 5.5 m, 额定离心加速度为 100g, 有效容量为 300 g·t; 水平单向离心振动台额定负载为 1.5 t, 最大激振加速度为 30g, 振动频宽为 10~300 Hz, 有效台面为 1.5 m×0.8 m, 可施加地震波、正弦波等任意动力荷载。此外, 该试验系统还配备了砂雨法制模装置、黏土预压固结仪、多功能机械手、128 ch 动态采集仪、高清高速摄像仪等试验装置与测试仪器^[12]。



(a) 半径 5.5 m 离心机

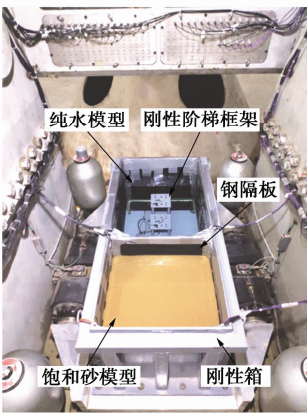
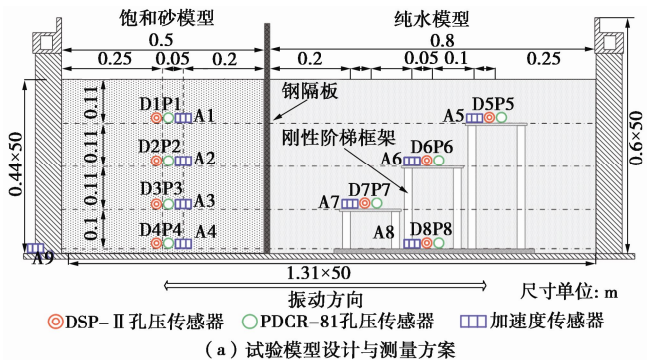


(b) 1500 kg 单向离心振动台

图 7 DCIEM-40-300 大型动力离心机试验系统

Fig. 7 DCIEM-40-300 centrifuge shaking table test system

试验模型设计如图 8 所示, 分为饱和砂模型、纯水模型, 其中纯水模型目标为校验孔压传感器的测试精度和分辨力。模型箱选用刚性箱, 内部尺寸 1.31 m×0.6 m×0.6 m (长×宽×高), 通过钢隔板和两张高强度橡胶膜实现饱和砂、纯水模型的制备与分割, 其中饱和砂模型长 0.5 m, 纯水模型长 0.8 m, 二者深 0.44 m, 宽 0.6 m。饱和砂采用中级福建标准砂, 其主要物理参数: $G_s=2.61\text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.69\text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.41\text{ g/cm}^3$, $d_{50}=0.39\text{ mm}$, $C_u=1.35$, $C_c=0.94$, 相对密实度 $D_r=60\%$, 通过水沉砂雨法分为 4 层制备。为协调动力离心试验中孔压累积与消散时间比尺矛盾, 饱和和孔隙液体为黏度 50 cst, 密度为 1.012 g/cm^3 的甲基纤维素溶液^[17-18]。



(b) 试验模型实物照片

图 8 土工离心试验模型设计与实物照片

Fig. 8 Model design and photo of centrifuge tests

4.2 传感器布置与输入荷载

图 8 (a) 给出了传感器的布设方案, 其中饱和砂模型通过分层制备, 在模型中心、不同埋深处布设 4 组传感器, 同一位置每组传感器包含 PDCR-81、DSP-II 孔压传感器各一只和 PCB 加速度传感器一只(美国); 50g 离心加速度下, 各组传感器自上而下对应的原型埋深, 分别为 5.5, 11.0, 16.5, 21.5 m; PDCR-81 和 DSP-II 的标识分别为 P1~P4、D1~D4; PCB 的标识为 A1~A4。同时, 纯水模型中心通过放置一套刚性阶梯框架, 利用不同高度阶梯实现与饱和砂模型相同

埋深的传感器布设,其中3个阶梯框架与底部厚钢板焊接为一体。纯水模型4组传感器与箱壁边界的距离均大于饱和砂模型,自上而下PDCR-81和DSP-II的标识分别为P5~P8、D5~D8;PCB的标识为A5~A8。此外,刚性箱底部还布设了一支PCB加速度传感器,其标识为A9,用于监测和对比试验箱内外台面记录。

图9给出了输入荷载设计方案。在静力测试精度和长期稳定性方面,选取图9(a)逐级离心加速度和39 d后重复施加离心加速度,基于非线性 ξ_l 、重复性 ξ_r 、幅值误差 A_e 等指标作评价,其中离心加速度分为5g, 10g, 20g, 30g, 40g, 50g。在动力测试精度和响应速率方面,选取依次施加正弦波、地震波和脉冲波,基于幅值误差 A_e 、相关系数 R_d^2 、迟滞时间 t_d 等指标作评价,其中台面输入和记录的动力荷载如图9(b)~9(d)所示,分别对应原型0.1g和1.0 Hz正弦波、PGA=0.4g El-Centro波和脉冲波,这些动力荷载是在离心加速度达到与保持50g下运行2 h,确认试验模型充分固结和稳定后施加。由图9(b), 9(c)正弦波和地震波,可知台面实测幅值和PGA分别为0.104g和0.406g,证明了该离心振动台系统具有良好的控制性能。此外,每级动力荷载施加后,均保持50g离心加速度运行不小于30 min,确认饱和砂模型恢复稳定后,施加下一级动力荷载。值得注意,除特别说明外,下文数据均已根据相似准则和比尺^[12]转换为原型。

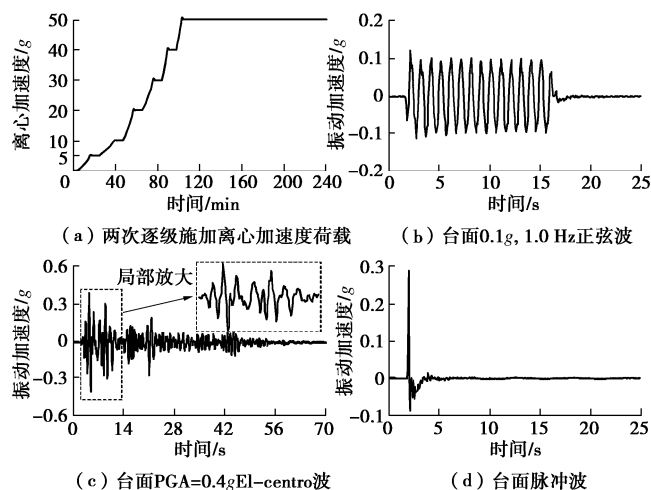


图9 施加离心加速度与动力荷载

Fig. 9 Centrifugal acceleration and dynamic loading

5 离心试验结果与性能验证

5.1 静力性能验证

同一饱和砂和纯水模型在相隔39 d前后,即全部传感器在饱和模型中浸泡约39 d前后,两次逐级施加

离心加速度荷载下,各组孔压传感器的响应结果如图10所示,其中不同埋深处静孔压理论值由 $P = \rho_w(ng)h$ 计算得到。对比图10不同埋深处各组孔压传感器量测结果和理论值,可得出DSP-II、PDCR-81量测值和理论值高度一致,8支DSP-II和8支PDCR-81传感器性能,均表现出良好的一致性,并且比较39 d前后的静力测试结果,两种传感器整体表现出优异的长期稳定性。

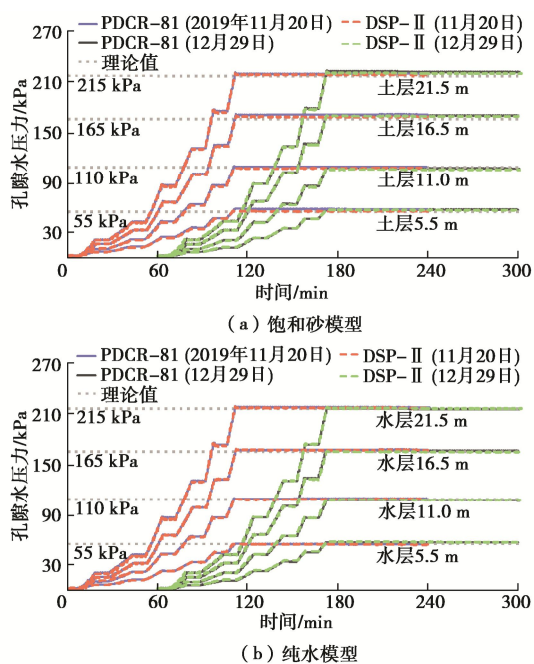


图10 各组孔压传感器静力离心试验结果

Fig. 10 Static centrifugal test results of transducers along depth

图11(a)给出了试验模型各DSP-II和PDCR-81在每一级离心加速度荷载下最大、最小测量值与理论值的对比结果。由图11(a)可以看出全部孔压传感器量测值均较好落于1:1直线上,根据公式^[4],获得DSP-II和PDCR-81传感器的平均非线性 ξ_l 分别为0.468%, 0.587%,平均幅值误差 A_e 为0.347%, 0.392%,略高于常重力下标定结果,原因为传感器布设和埋深测量误差所致,但证明了DSP-II不仅具有高精度、可靠的静力性能,还具有良好的总体稳定性和一致性。图11(b)给出了不同离心加速度下,每一个DSP-II和PDCR-81的平均测量值与理论值的误差分布,其中DSP-II和PDCR-81的总体平均误差 S_e 列入表4。由图11(b)容易发现,两种传感器的测量值与实测值十分逼近,39 d前后两组静力离心试验两种传感器均未呈现出漂移现象,而根据公式^[4],获得DSP-II和PDCR-81的重复性指标 ξ_r 分别为0.157%, 0.169%,平均漂移量 ξ_d 为0.281%, 0.336%,与常重力下标定试验结果十分相近,再次证明两种传感器均具有十分良好的长期稳定性能,且前者略优于后者。

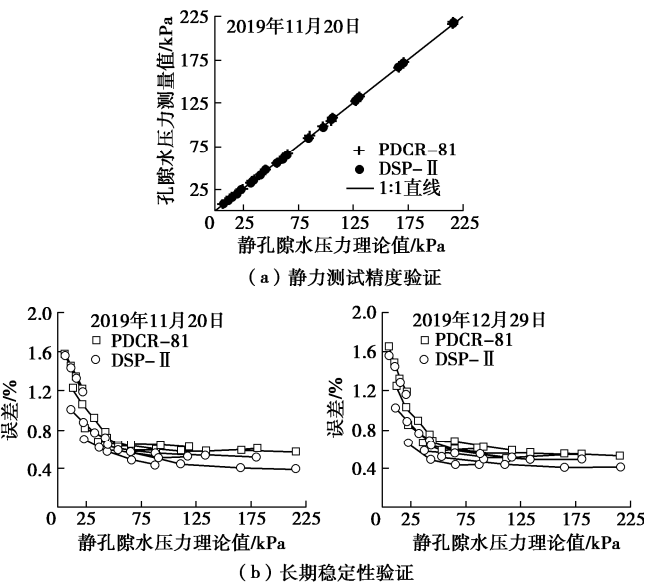


图 11 两种孔压传感器静力性能对比验证

Fig. 11 Comparison of static performance verification of transducers

表 4 长期稳定性测试总体误差
Table 4 Long-term stability overall operational data (%)

离心荷载	5g	10g	20g	30g	40g	50g
DSP-II	1.31	0.84	0.58	0.63	0.69	0.47
PDCR-81	1.39	1.05	0.69	0.77	0.75	0.65

综上, 通过逐级加载和39 d后重复试验, 验证了 DSP-II和PDCR-81传感器具有十分良好的静力性能, 可满足静力离心试验孔压测试的精度和稳定性需求。

5.2 动力性能验证

50g 离心加速度和 0.1g, 1.0 Hz 正弦波荷载下, 两模型中各加速度、孔压传感器的测试结果, 如图 12 所示, 其中正弦波历时 15 s, 循环次数 15 周。自下而上比较两模型加速度时程的变化趋势, 虽均呈现一定幅值放大现象, 但明显具有不同特征, 孔压时程也表现出显著差异。饱和砂模型浅层土体发生轻微液化, 导致地表加速度时程出现“缩脖”现象且孔压比接近 1; 而纯水模型受箱壁边界作用出现中间低、两端高的“凹型”往返振荡, 不同深度孔压表现为良好动态正弦响应且幅值均≤4.0 kPa, 而基本未见静态响应。

图 12 (a), (b) 两种截然不同的孔压时程特征下, 观察每组 DSP-II 和 PDCR-81 的测试记录, 可发现不同埋深和工况条件下, 两种传感器均获得了十分令人满意的吻合度, 以每周循环加速度对应的孔压峰值为分析对象, 不同埋深各 DSP-II 相对 PDCR-81 的平均峰值偏差 P_e (mean peak value deviation) 和平均峰值滞时 P_l (mean time lag of peak value) 列入表 5。根据表 5 中数据统计与分布, 可看出两种传感器的峰值偏差很小, 最大仅为 2.15 kPa, 位于饱和砂埋深 5.5 m 处, 最大峰值滞时为 1.76 ms, 证明 DSP-II 和 PDCR-81 传感器具备极为近似的动力响应性能。

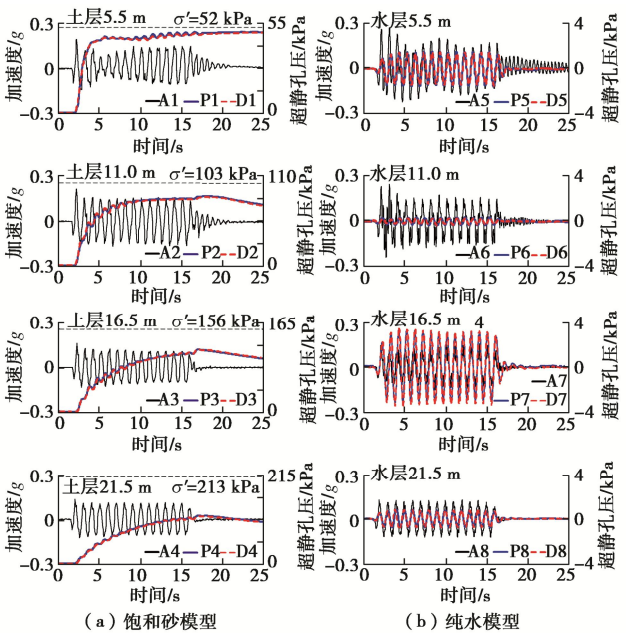


图 12 0.1g 正弦波荷载下动力离心试验结果

Fig. 12 Dynamic centrifugal test results under 0.1g sine wave

表 5 正弦波荷载下两种孔压传感器动力性能对比
Table 5 Comparison of dynamic performances of miniature transducers under 0.1g sine wave

原型深度	5.5 m		11.0 m		16.5 m		21.5 m	
动力指标	P_e /kPa	P_l /ms	P_e /kPa	P_l /ms	P_e /kPa	P_l /ms	P_e /kPa	P_l /ms
饱和砂	2.15	1.76	0.93	0.52	0.28	0.51	0.29	0.41
纯水	0.12	0.55	0.07	0.48	0.16	0.42	0.11	0.45

50g 离心加速度和 0.4g El-centro 地震波荷载下, 两模型不同埋深处的加速度和孔压传感器测试结果, 如图 13 所示。由于地震波的频率成分丰富, 饱和砂、纯水模型呈现不规则、非对称的加速度时程特征, 并自下而上表示出强烈的幅值放大现象, 孔压时程也出现丰富频率成分。饱和砂模型发生严重液化, 16.5 m 以上土体孔压比均达到 1.0, 但未出现明显“缩脖”现象, 原因为 0.1g 正弦波荷载下液化使土体密实度增加, 并形成一定排水通道; 纯水模型仍体现出“凹型”的往返振荡, 不同深度孔压时程均为丰富频率的动态响应, 且幅值均≤8 kPa, 而其静态响应基本可忽略。

比较图 13 (a) 和 13 (b) 不同孔压响应形式下 DSP-II 和 PDCR-81 的测试记录, 不难发现地震波荷载下, 两种传感器仍然获得了极其一致的响应结果。由于地震波频率成分相对丰富, 将以每组 DSP-II 与 PDCR-81 的测试记录的相关系数 R 和纯水模型中孔压峰值与加速度峰值的平均时间迟滞 T_d , 作为两种传感器的动力性能评价指标, 计算结果列入表 6。由表 6 数据统计, 易发现各工况下 DSP-II 与 PDCR-81 的相关系数 R 均不小于 0.9908, 再次证明了两传感器具有良好的动力性能一致性。基于纯水模型中孔压动力响应由箱壁对水阻挡作用产生, 即孔压峰值与加速度峰值理论上应同步或反相位, 由此, 可利用二者峰值的时间迟滞评价传感器的响应速率, 表 6 统计了不同

深度 DSP-II 与 PDCR-81 最大 8 个孔压峰值与加速度峰值的平均时间迟滞, 由数据可得出孔压传感器能快速跟随荷载的动态变化, 平均时间迟滞 $T_d \geq 4.96$ ms, 与常重力下标定试验结果相当接近, 再次证明了两种孔压传感器可满足频率 200 Hz 以下动力离心试验孔压测量需求。

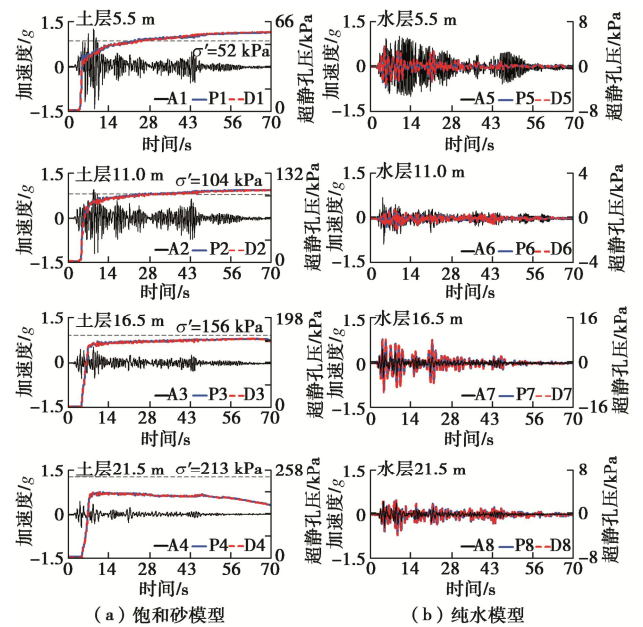


图 13 0.4g El-centro 波荷载下动力离心试验结果

Fig. 13 Dynamic centrifugal test results under 0.4g El-centro wave

表 6 地震波荷载下两种孔压传感器动力性能对比

Table 6 Comparison of dynamic performances of miniature transducers under 0.4g El-centro seismic wave				
原型深度 /m	饱和砂 R	纯水 R	$T_d(\text{DSP-II})/\text{ms}$	$T_d(\text{PDCR-81})/\text{ms}$
5.5	0.9991	0.9936	8.47	8.55
11.0	0.9993	0.9908	6.31	6.58
16.5	0.9997	0.9976	5.03	5.31
21.5	0.9995	0.9925	4.96	5.17

50g 离心加速度和 0.3g 脉冲波荷载下, 两模型中不同埋深处加速度和孔压传感器的测试结果, 如图 14 所示。观察图 14 中两模型的加速度时程, 易发现不同埋深的加速度时程, 均呈现不同程度的自由衰减振荡, 且振幅和周期随埋深增加而减小。同时, 在孔压方面, 饱和砂模型因经历两次液化排水通道和致密作用, 在脉冲波结束后各埋深处超静孔压一致呈现快速消散现象; 而纯水模型受箱壁的阻挡作用, 不同深度孔压时程伴随加速度时程, 表现一致、清晰的自由衰减振荡。

观察图 14 (a), (b) 两模型不同埋深处的孔压时程, 可发现 DSP-II 和 PDCR-81 保持了很高吻合度, 获得与正弦波、地震波一致的动力性能表现。根据分辨力定义^[17], 以纯水模型中孔压自由衰减振荡的最小往返振幅作为分辨力, 不考虑静孔压的幅值影响, 各埋深处获得分辨力列入表 7。由表 7 中数据, 可知 DSP-II 和 PDCR-81 的分辨力十分接近, 平均分辨力分别为 0.058, 0.063 kPa, 可满足地震、波浪、交通

等荷载下诸多孔压监测和本构模型研究的精度需求。

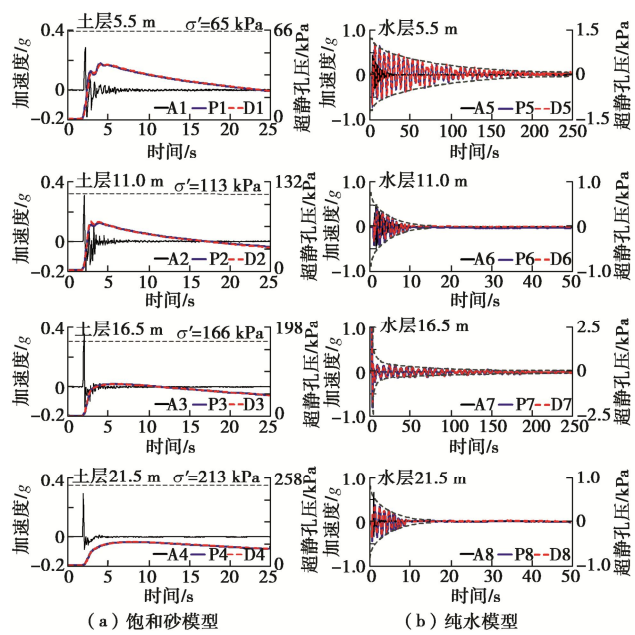


图 14 0.3g 脉冲波荷载下动力离心试验结果

Fig. 14 Dynamic centrifugal test results under 0.3g step wave

表 7 两种孔压传感器动力量测分辨力对比

Table 7 Comparison of dynamic resolutions of miniature transducers					(kPa)
原型深度	5.5 m	11.0 m	16.5 m	21.5 m	平均分辨力
DSP-II	0.049	0.065	0.057	0.062	0.058
PDCR-81	0.051	0.076	0.056	0.064	0.063

综上, 通过幅值误差、相关系数、迟滞时间、分辨力等技术指标, 利用正弦波、地震波和脉冲波等动力离心试验, 验证了 DSP-II 达到了国际 PDCR-81 的动力性能, 可视为替代“标准”良好的传感器, 满足频率 200 Hz 以下动力荷载离心试验孔压测量需求。

6 结 论

(1) 剖析了国际若干典型微型孔压传感器的设计与基本组成, 指明了不同传感器之间结构、参数、材质等方面重要差异; 探析了孔压传感器测试精度和频响速率的关键影响因素, 阐明了微型孔压传感器的基本现状与发展特点。

(2) 基于以往孔压传感器常见故障与成因, 介绍了 DSP-II 孔压传感器设计的主要特点与关键技术, 其中, 减小透水石厚度和空腔长度, 以提高频响速率; 增加无应力胶填充和空腔表面光滑度, 以提高测量精度; 采用绝缘无应力胶和增加壳体厚度, 以降低故障风险与延长寿命。探讨了评价孔压传感器静力和动力性能的技术指标, 给出相应的标定与试验方法。

(3) 通过阶梯荷载和 72 h 高承压标定试验, 获得 DSP-II 和 PDCR-81 传感器非线性指标分别为 0.312% 和 0.451%, 重复性指标分别为 0.143% 和 0.149%; 通过阶跃波和液化孔压模拟荷载标定试验, 得到 DSP-II

和 PDCR-81 传感器响应时间分别为 4.93, 4.97 ms, 平均幅值误差分别为 0.483%和 0.575%, 表明 DSP-II 达到了 PDCR-81 孔压传感器相一致的静力与动力性能, 可满足频率 ≤ 200 Hz 地震、爆炸等动力离心试验测试需求。

(4) 逐级加载和 39 d 后重复静力离心试验中, 不同埋深 DSP-II 和 PDCR-81 传感器测试结果与理论值高度吻合, 平均幅值误差分别为 0.347%和 0.392%, 重复性指标分别为 0.157%和 0.169%, 验证了两种传感器具备优良的静力测试性能。正弦波、地震波和脉冲波等动力离心试验中, DSP-II 和 PDCR-81 传感器的测试结果极为一致, 最大峰值滞时和最小相关系数分别为 1.76 ms 和 0.9908, 证明前者为后者的良好替代。另外, 在核心元件利用率、饱和速度、故障修复和经济成本方面, DSP-II 孔压传感器更具优势。

参考文献:

- [1] KNODEL P C, KUTTER B L, SATHIALINGAM N, et al. Effects of arching on response time of miniature pore pressure transducer in clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1990, **13**(3): 164 - 178.
- [2] KÖNIG D, JESSBERGER H L, BOLTON M D, et al. Pore Pressure Measurement During Centrifuge Model Tests: Experience of Five Laboratories[M]. Rotterdam: Balkema, 1994: 101 - 108.
- [3] CHANEY R C, DEMARS K R, MURALEETHARAN K K, et al. The use of miniature pore pressure transducers in measuring matric suction in unsaturated soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1999, **22**(3): 226 - 234.
- [4] 孙汝建. 压阻式孔隙水压力计性能试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(6): 796 - 798. (SUN Ru-jian. Experimental study of piezoresistive silicon pore pressure transducers[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(6): 796 - 798. (in Chinese))
- [5] 王永志, 袁晓铭, 王海. 动力离心试验常规点位式量测技术改进方法[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(增刊 2): 722 - 728. (WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming, WANG Hai. Improvement method of node-oriented measurement technique for dynamic centrifuge modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S2): 722 - 728. (in Chinese))
- [6] 汤兆光, 王永志, 孙锐, 等. 土工离心试验微型孔压传感器标定方法与影响因素[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(7): 1238 - 1246. (TANG Zhao-guang, WANG Yong-zhi, SUN Rui, et al. Calibration method and effect factors of miniature pore water pressure transducer for geotechnical centrifuge modelling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(7): 1238 - 1246. (in Chinese))
- [7] HOLZER T L, HANKS T C, YOUNG T L. Dynamics of liquefaction during the 1987 superstition hills, California, earthquake[J]. *Science*, 1989, **244**: 56 - 59.
- [8] 周镜. 岩土工程中的几个问题[J]. *岩土工程学报*, 1999, **21**(1): 2 - 8. (ZHOU Jing. Some cases in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(1): 2 - 8. (in Chinese))
- [9] 曾辉, 余尚江. 岩土应力传感器设计和使用原则[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(1): 93 - 98. (ZENG Hui, YU Shang-jiang. Design and use policy of stress sensors in geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(1): 93 - 98. (in Chinese))
- [10] TALESNICK M. Measuring soil pressure within a soil mass[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(7): 716 - 722.
- [11] 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 Duan-zheng, HU Gang, et al. Calibration tests on diaphragm-type pressure cells[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(5): 837 - 845. (in Chinese))
- [12] 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 Design Theory and Key Technology of Large Dynamic Centrifuge[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [13] STRINGER M, ALLMOND J, PROTO C, et al. Evaluating the response of new pore pressure transducers for use in dynamic centrifuge tests[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 2014, Perth, Australia.
- [14] 王永志, 汤兆光, 孙锐, 等. 一种微型孔隙水压计: CN209127331U[P]. 2019-07-26. (WANG Yong-zhi, TANG Zhao-guang, SUN Rui, et al. Miniature Pore Water Pressure Gauge: CN209127331U[P]. 2019-07-26. (in Chinese))
- [15] 土工离心模型试验技术规程: DL/T 5102—2013[S]. 2014. (Specification for Geotechnical Centrifuge Model Test Techniques: DL/T 5102—2013[S]. 2014. (in Chinese))
- [16] 压力传感器性能试验方法: GB/T 15478—2015[S]. 2015. (The Methods of the Performances for Pressure Transducer/Sensor: GB/T 15478—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [17] CHANEY R C, DEMAES K R, DEWOOLKAR M M, et al. A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling[J]. *Geotechnique Testing Journal*, 1999, **22**(3): 196 - 210.
- [18] CHANEY R C, DEMARS K R, STEWART D P, et al. Experience with the use of methylcellulose as a viscous pore fluid in centrifuge models[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1998, **21**(4): 365 - 369.