

DOI: 10.11779/CJGE2020S2023

动力离心试验微型孔压传感器研制与性能验证

汤兆光, 王永志*, 孙 锐, 段雪锋, 王体强, 王浩然

(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: 微型孔压传感器是土工离心模型试验的重要量测工具之一, 而以往国产与进口传感器相比, 在响应精度、频响范围、使用寿命等方面仍存在较大差距。介绍了一种自主研发的国产 DSP-I 微型孔压传感器, 通过多组静力、动力离心试验及与国际代表性 PDCR-81 传感器测试结果对比, 验证了新型传感器的响应精度与稳定性能。结果表明: 5g~50g 静力试验中每对 DSP-I 和 PDCR-81 传感器测试结果高度一致, 两者误差均 $\leq 1\%$; 不同幅值正弦、地震等荷载连续输入下, 每对传感器动力测试结果高度吻合, 相关系数 R^2 均 ≥ 0.9922 。试验证明了国产 DSP-I 微型孔压传感器具有良好响应精度和稳定性能, 可替代国际公认标准孔压传感器且成本优势显著, 为我国动力离心试验技术发展提供强有力支撑。

关键词: 离心模型试验; 孔隙水压力; 传感器; 动荷载; 性能验证

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0129-06

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。E-mail: tgz158135@163.com。

Development and performance verification of miniature pore water pressure transducer for dynamic centrifuge modeling

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

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The miniature pore water pressure transducer is one of the key measurement tools in the geotechnical centrifuge model tests. Compared with the imported transducers, the domestic transducers still have a great distance in response accuracy, frequency response range, service life, etc. The DSP-I miniature transducer for pore water pressure is proposed. Moreover, the PDCR-81 of internationally widespread transducers and the DSP-I transducers are selected to perform a series of comparative tests in static and dynamic centrifuge models, and the response accuracy and stability performance of the novel DSP-I transducer are verified. The results show: (1) The measurement results of DSP-I and PDCR-81 transducers are highly consistent in the static centrifuge model tests with spin up 5g to 50g, and their error is less than or equal to 1%. (2) The test results of each pair of transducers are highly consistent under the continuous input of sine waves, seismic waves with different amplitudes and other dynamic loads, and their correlation coefficient is more than or equal to 0.9922. From these tests it is proved that the DSP-I of domestic miniature pore water pressure transducers have good response accuracy and stability performance and can replace internationally recognized standard miniature pore water pressure transducers and have significant cost advantage, which provides power support for the development level of dynamic centrifuge test technology in China.

Key words: centrifugal model test; pore water pressure; transducer; dynamic load; performance verification

0 引 言

在岩土地震工程领域中, 无论是原位监测还是室内物理试验, 孔压传感器作为孔隙水压力的关键测试工具, 其性能对饱和/非饱和土体孔压量测的准确性, 均具有重要影响^[1-6]。与常规压力传感器相比, 微型孔压传感器具有透水石、空腔等特殊结构, 致使其测试结果受诸多因素影响^[1-2, 6]。不同于振动台试验与原位现场试验, 动力离心试验是在 N 倍常重力加速度的超

重力环境下, 通过输入“高频、瞬时”压缩地震荷载(振动持时一般 ≤ 1 s, 频率 N 倍于原型), 复现几十米原型土层的应力状态与地震反应行为, 其中超静孔

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资助项目(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: 2020-08-07

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

隙水压的增长将“瞬态”完成,为快速动力过程^[7]。国内外微型孔压传感器发展现状与静、动态性能研究代表成果,在此作简要阐述。Kutter 等^[1]利用 2D 有限元探讨了传感器端部形状对孔隙水压力传递路径的影响,提出了微型传感器端部设计方法。Lee^[3]基于流体动力学方程,给出了孔隙液体黏滞系数对传感器响应频率的影响规律。孙汝建^[4]介绍了一种国产压阻式微型孔压传感器,通过长期原位监测证明了该传感器与传统类型传感器相比,具有良好静力测试精度与稳定性。Druck 公司 PDCR-81 微型孔压传感器使用长达 20 余年,被国际公认为土工离心试验孔压量测的“标准”传感器^[2],但因其产值在公司总额占比较小,于 2010 年国际第七届岩土物理模拟学术会议上宣布停产。Allmond 等^[5]在 PDCR-81 传感器停产后,通过多种物理试验探讨了国际新研制几种微型孔压传感器的可替代性,发现动力离心试验中几种新型传感器与 PDCR-81 相比,可产出显著差异。王永志等^[6]通过动态孔压传感器标定装置与试验,揭示了未完全饱和、透水石孔隙堵塞等因素对孔压传感器动态响应滞后、幅值衰减的影响特征。汤兆光等^[7]开发了孔压传感器动力响应标定装置,给出了流体介质、饱和方法及时对孔压传感器动力测试性能的影响规律,建立了孔压传感器动力响应标定方法。总体而言,目前在长期原位监测和静力离心试验方面,国内外微型孔压传感器均可满足孔压测试需求。但是,在动力离心试验方面,微型孔压传感器的设计方法及动力性能影响因素认识尚待发展与深入,而现有国产微型孔压传感器与国际相比,也存在明显差距。因此,研发高精度、高性能微型孔压传感器,对发展土工离心试验量测技术具有重要意义。

本文将介绍一种自主研发的国产 DSP-I 微型孔压传感器,包含基本组成、设计参数和结构特点。通过一系列静力、动力饱和砂土模型离心试验和多组微型孔压传感器测试,以国际公认标准 PDCR-81 传感器为参考基准,探讨 DSP-I 传感器的响应精度和稳定性能。

1 DSP-I 传感器设计与参数

近年来,国际知名土工试验单位联合全球多家精密仪器厂商^[6],根据原有 PDCR-81 结构^[1-2]研制并改进微型孔压传感器,如 2Mie 传感器(Keller),EPB-PW 传感器(Measurement),XCL-11-250 传感器(Kulite),但缘于进口传感器价格昂贵、损坏率较高、供货周期长等问题,未被国内土工单位大量使用。同时,我国微型孔压传感器研制水平与国际仍存在较大差距,据笔者所在实验室统计,在大型振动台试验、土工离心试验中国产微型孔压传感器的故障率为进口传感器的

2~3 倍。因此,研制可替代“高频响、高精度”PDCR-81 微型孔压传感器需求也愈加强烈。

1.1 设计结构

经充分调研国际现有微型孔压传感器^[1-2, 5-6, 8],笔者自主设计了 DSP-I 微型孔压传感器,如图 1 所示,DSP-I 传感器设计参数与 PDCR-81 相比见表 1。根据功能与用途,DSP-I 微型传感器分为螺帽、透水石、O 型密封圈、敏感元件、主壳体、通气线缆等方面。

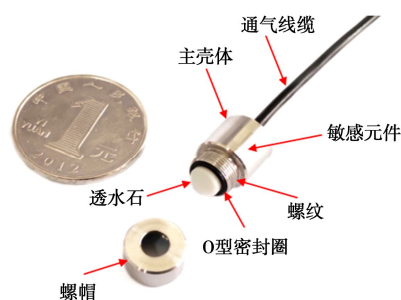


图 1 DSP-I 微型孔压传感器照片

Fig.1 Photo of DSP-I pore water pressure transducer

表 1 DSP-I 微型孔压传感器设计参数与 PDCR-81 对比

Table 1 Comparison of technical specifications of DSP-I miniature transducer with PDCR-81 transducer

型号	量程/kPa	壳体/mm	透水石/mm	空腔/mm	线缆/mm	供电/V
DSP-I	700(可变)	Φ10×13.5	Φ5.4×3.0	0.20	Φ2.0	5
PDCR-81	700	Φ6.4×11.4	Φ6.0×2.0	0.13	Φ2.2	5

壳体结构方面,DSP-I 传感器采用螺帽,将透水石和敏感元件通过螺纹进行连接,可单独对透水石进行清理与饱和,并可根据土体类型选择不同透水石,有效地降低实验室的传感器数量配置;在透水石结构方面,DSP-I 传感器将透水石形状设计成圆柱体,并通过 O 型密封圈与螺帽相配合固定透水石,以防止孔隙流体沿螺纹径向流入;在空腔结构方面,空腔位于透水石与敏感元件之间,其大小与传感器响应速率成反比,即缩小空腔尺寸可加快传感器响应时间,但考虑到空腔尺寸过小可能造成微小土颗粒由透水石进入空腔内而引发桥接效应,故将空腔尺寸设计为 0.2 mm。

1.2 设计原理

DSP-I 微型孔压传感器利用压阻效应,在敏感元件上沉淀制备 4 个等值扩散硅电阻,形成惠斯通电桥结构^[4],传感器工作原理如图 2 所示。敏感元件两端分布两个压力腔,一端是与传感器空腔内孔隙流体相接触的高压腔 P_1 ,另一端则是与大气(或真空)连通的低压腔 P_0 ,当惠斯通电桥输入激励电源,桥路上的 4 个扩散硅电阻达平衡状态,输出零点电压信号 V_0 ,受孔隙流体 P_1 作用时桥路失衡,输出电压信号 V_{out} ,在量程范围内 V_{out} 与 P_1 为线性关系,如下公式所示:

$$P_1 = K(V_{out} - V_0), \quad (1)$$

式中, P_1 为孔隙水压力(kPa), K 为标定系数(kPa/V),

V_{out} , V_0 分别为传感器输出电压和零点值 (mV)。为消除温度对桥路电阻影响, 传感器采用恒压源供电。

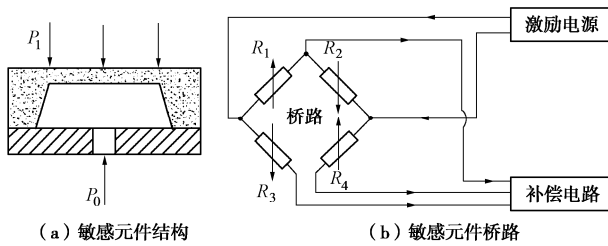


图 2 DSP-I 微型孔压传感器工作原理

Fig. 2 Schema of DSP-I pore water pressure transducer

2 试验设备与方案

2.1 试验设备与材料

本次离心试验采用中国地震局工程力学研究所、中国工程物理研究院、哈尔滨工业大学等单位联合研制的 DCIEM-40-300 大型离心机振动台系统^[9], 如图 3 所示。该离心机半径 5.5 m、最大离心加速度 100g、有效静力负载 3000 kg、净空 1.5 m×1.2 m×1.6m; 其配置的水平单向振动台: 最大振动加速度 30g、有效动力负载 1500 kg、振动频宽 10~300 Hz、最大位移±15 mm、最大持时 3 s、平台尺寸 1.5 m×1.0 m。该离心机还配置了 128 通道动态数据采集系统、多功能机械手及各类量测传感器, 可满足不同土工离心试验测试需求。



图 3 DCIEM-40-300 大型离心机振动台系统

Fig. 3 DCIEM-40-300 centrifuge shaking table test equipment

本次试验选用刚性模型箱, 箱内尺寸约为 1.3(L)×0.6(W)×0.6 m(H), 箱底设有透水板, 通过水管与模型箱外侧排水阀门相连; 侧壁还附有厚度为 3 mm 高强度光滑橡胶膜, 可减小箱壁侧摩阻力作用。试验离心加速度取 50g, 施加荷载频率压缩 50 倍, 时长为原型 1/50, 模型与原型之间基本相似率见文献[9], 下面各物理量除特别说明外, 均已转换为原型数值。

试验用砂采用福建标准石英砂, 平均粒径 $d_{50}=0.39$ mm, 不均匀系数 $C_u=1.45$, 曲率系数 $C_c=0.94$, 土体级配曲线如图 4 所示。采用砂雨制样装置^[10]分 6 层制备干砂模型, 控制落距为 20 cm, 制作的试样干

密度为 1.57 g/cm³, 平均相对密实度 D_r 约为 60%, 模型制备高度为 440 mm, 对应原型土层厚度为 22 m。动力离心试验中为确保动力时间与渗流时间相似关系一致, 将根据试验室温度制备无色透明黏度为 50cSt、密度为 1.012 g/cm³ 的甲基纤维素溶液作为饱和流体^[11-12]。本次离心模型试验采用常重力与超重力相结合方式实现模型的快速与充分饱和: ①采用低水头饱和法, 以防止流体压力和流速过大对模型造成渗流破坏, 设定预饱和时间为 48 h; ②在离心机加速度达到预设 50g 时, 再保持 50g 下运行 2 小时 (对应原型饱和时间约为 2×50 h=100 h), 模型饱和与固结总时间达到 148 h, 其饱和度大于 0.99^[13]。

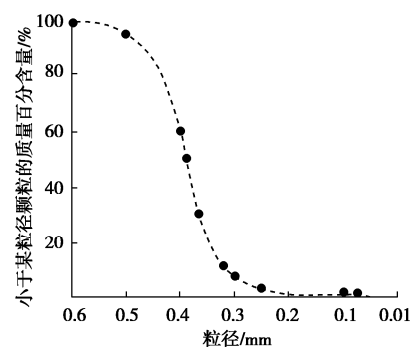


图 4 砂土粒径级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curve of soil particles

2.2 传感器布置

本文试验目的是以国际公认标准的 PDCR-81 传感器为参考基准, 探讨离心力场和地震动下 DSP-I 传感器的静力、动力测试结果的准确性。土工离心试验前, 为确保孔压传感器量测准确性, 根据我国行业标准《土工离心模型试验技术规程》规定^[14]: 本文采用真空-搅拌饱和法^[7]在黏度为 50cSt 甲基纤维素溶液中对两种微型孔压传感器进行饱和和处理, 通常设定饱和时间为 9 h。传感器饱和后, 笔者通过自行开发的动态孔压标定装置^[7]对两种传感器进行静/动态性能标定。

模型设计与传感器布置如图 5 所示。为准确获得模型孔隙水压力沿深度的变化规律, 并考虑减少边界效应影响, 在模型箱中心 (1/2 长度, 1/2 宽度) 处沿土层深度自下而上, 分为 5 层布设两列微型孔压传感器 D0~D4 (DSP-I) 和 P0~P4 (PDCR-81); 并在相同位置, 布设加速度传感器 A0~A4 (型号: 352M54, 美国 PCB 公司)。各土层中布设传感器距离顶部的高度, 分别为 50, 110, 220, 330, 430 mm, 对应原型埋深为 2.5, 5.5, 11, 16.5, 21.5 m。此外, 模型箱底板上还布置了加速度传感器 (A5), 以其记录作为模型动荷载输入。制备完成后的饱和和砂土模型实物, 如图 6 所示。

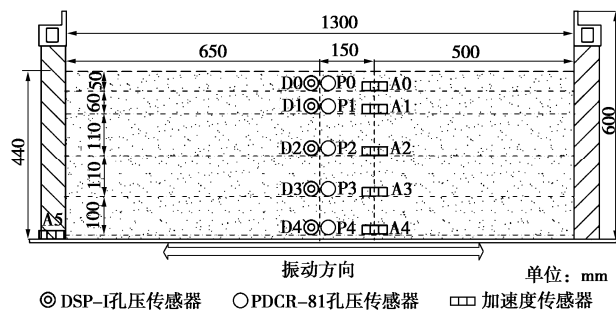


图5 试验模型设计与传感器布置图

Fig. 5 Model design and layout of transducers

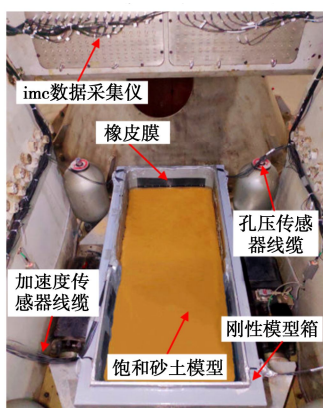


图6 饱和砂土模型实物照片

Fig. 6 Photo of saturation sand ground model

2.3 荷载施加方案

在振动台施加动荷载前，将通过离心机缓慢加速方式对饱和砂土模型，逐级施加 5g, 10g, 20g, 30g, 40g, 50g 离心加速度荷载，以观测 DSP-I 和 PDCR-81 传感器静力测试性能差异。当离心加速度达到 50g 和试验模型充分固结（2 h）后，振动台将依次施加振动荷载，包含峰值 0.1g, 0.2g, 0.3g 的正弦波和峰值 0.4g 的 El-centro 波，以观测 DSP-I 和 PDCR-81 传感器动力测试性能差异。此外，每次动荷载施加后，离心机将保持 50g 离心加速度下运行 20 min，并确保超静孔隙水压充分消散和土体再固结完成之后，施加下一动荷载。

3 离心试验数据分析

3.1 静力试验结果

图 7 为离心机加速过程中不同土层深度 DSP-I 和 PDCR-81 传感器的静力测试结果。图中各虚线上标注数字为静孔隙水压估算值和两者传感器的测试误差，其中静孔隙水压估算值根据制模时各孔压传感器实际埋深计算所得($P=\rho(ng)h$)，由图可见两种孔压传感器测量值与静孔隙理论计算值高度一致，两者误差均在 $\pm 1\%$ 以内，说明 DSP-I 具有良好的静力测试性能。

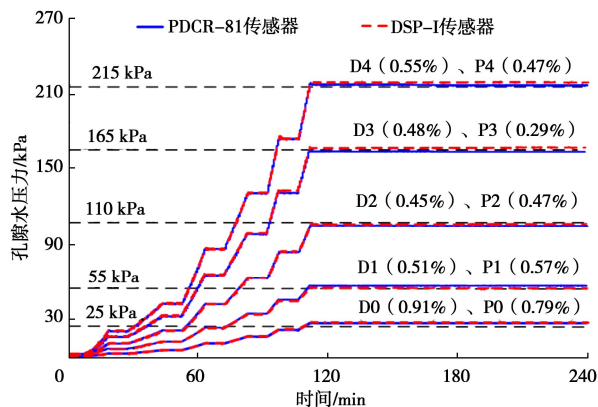


图7 离心机加速过程中孔隙水压力变化

Fig. 7 Vibration of pore water pressure during centrifuge spin-up

3.2 动力试验结果

本次振动试验选用正弦波和 El-centro 波作为动荷载输入。对于土工离心试验，按照模型比尺 1:50，原型正弦波峰值加速度 $PGA=0.1g, 0.2g, 0.3g$ ，振动频率为 $f=1.0Hz$ ，振动持时为 $T=15s$ ，振动次数 $N=15$ ；原型 El-centro 波峰值加速度 0.4g，振动持时为 $T=50s$ ，输入地震动时程曲线如图 8 所示。由图 8 数据可知，实测输入正弦波峰值加速度分别为 0.104g, 0.205g 和 0.31g，与目标峰值十分接近，且振动波形均匀，说明振动台系统输入激励具有良好的重复性与可靠性。

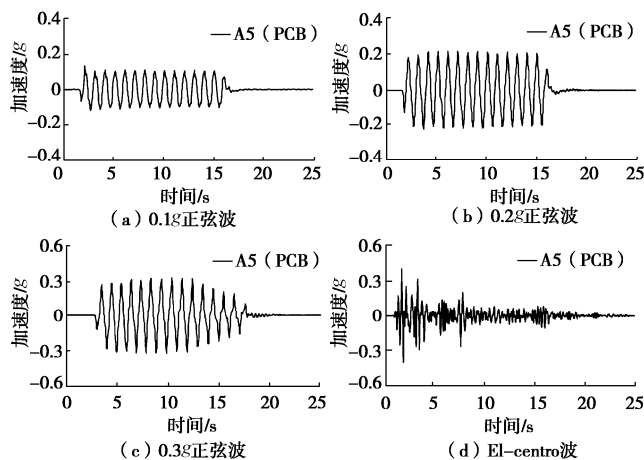
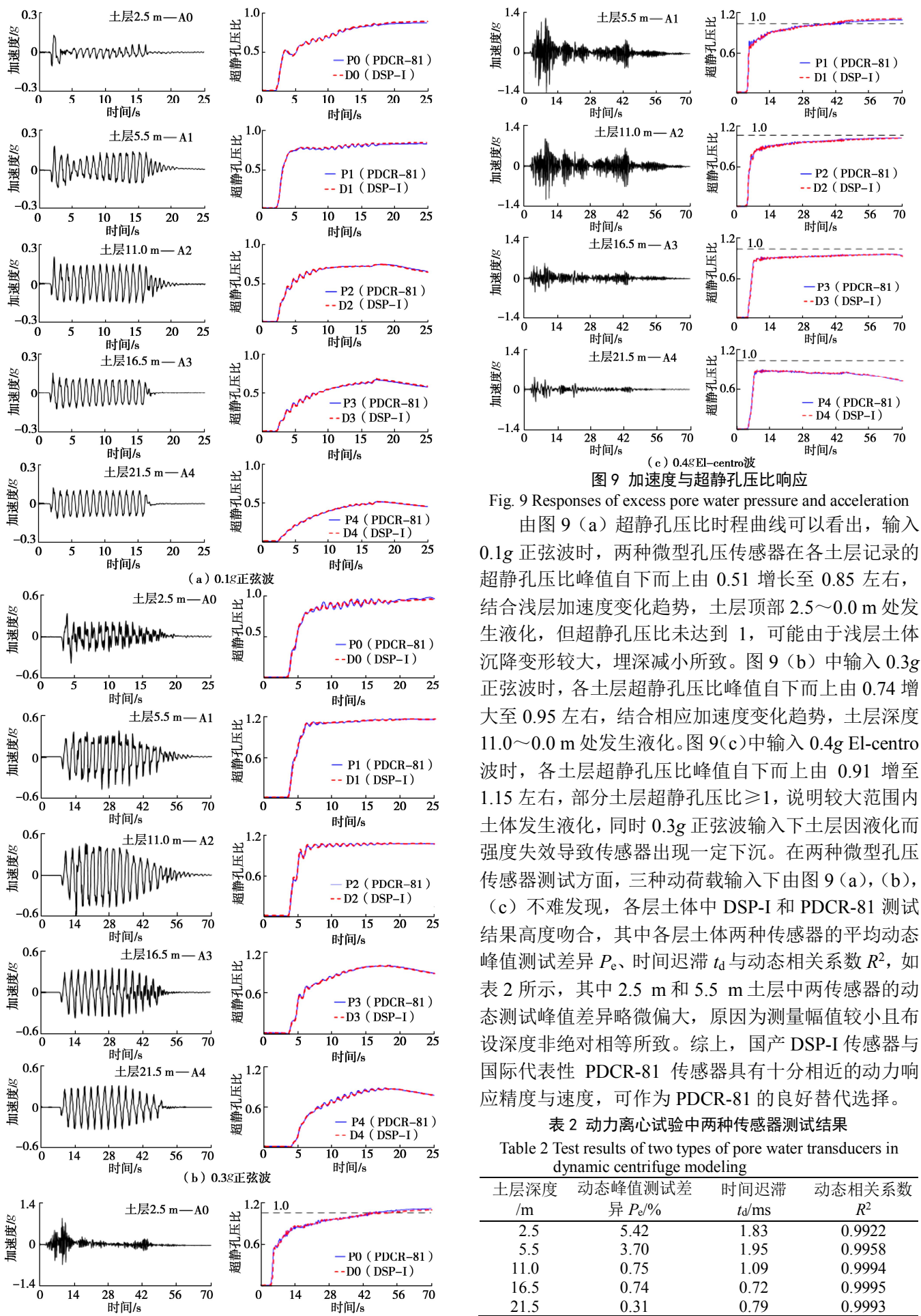


图8 输入地震波振动过程中台面加速度

Fig. 8 Acceleration of shaking table during input of seismic waves

由图 9 (a), (b) 可以发现：0.1g 和 0.3g 正弦波下，在底部加速度计 A4 波形与台面加速度 A5 相近，未发生较大波动；在 A3、A2 所在土层处振动加速度存在放大现象；在 A1 和 A0 处土层整体振动加速度呈现明显衰减，尤其是 A0 处加速度快速达到峰值后迅速“颈缩式”减小，形成小幅振动状态。图 9 (c) 中 El-centro 波下也表现出相同规律，在加速度计 A4、A3、A2、A1 所处土层自下而上整体振动加速度出现快速增大趋势，直至 A0 处土层加速度开始呈现明显幅值衰减。



DSP-I 微型孔压传感器的耐用性与故障率, 将通过反复破坏性试验进行验证, 但限于篇幅, 将另文发表。

4 结 论

(1) 介绍了一款自主研发的高精度、高性能的国产 DSP-I 微型孔压传感器, 包含基本组成、设计参数和结构特点。通过多组静力、动力离心试验及以国际代表性 PDCR-81 传感器为参考基准, 初步探讨了 DSP-I 微型孔压传感器响应精度和稳定性能。

(2) 静力离心试验中, DSP-I 和 PDCR-81 两种孔压传感器的测量结果高度一致, 5~50g 离心加速度荷载下, 二者在 21.5~2.5 m 各层土体中最大误差和平均误差均分别在 ±1.0% 和 0.5% 以内, 表明 DSP-I 与 PDCR-81 具有基本相同静力测试性能。

(3) 动力离心试验中, 在 0.1g、0.3g 正弦波和 El-centro 地震波荷载下, 各层土体 DSP-I 与 PDCR-81 两种传感器的动力孔压测试结果高度吻合, 相关系数 $R^2 \geq 0.9922$, 平均动态峰值测试差异和时间迟滞小于 5.5% 和 2 ms, 表明 DSP-I 和 PDCR-81 具有十分相近的动力测试性能, DSP-I 可完全替代 PDCR-81 传感器。

参考文献:

- [1] KUTTER B L, SATHIALINGAM N, HERRMANN L. Effects of arching on response time of miniature pore pressure transducer in clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1990, **13**(3): 164 - 178.
- [2] STRINGER M E, ALLMOND J D, PROTO C J, 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*. Perth, Australia, 2014.
- [3] LEE F H. Frequency response of diaphragm pore pressure transducers in dynamic centrifuge model tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1990, **13**(3): 201 - 207.
- [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] ALLMOND J D, WILSON D W. Analysis and comparison of various pore pressure transducers implemented in the JDA02 centrifuge test[R]. California: University of California, 2012.
- [6] 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))
- [7] 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 sensor for geotechnical centrifuge modelling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(7): 1238 - 1246. (in Chinese))
- [8] 汤兆光, 王永志, 孙锐, 等. 三种孔隙水压计量测性能对比初探[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, **15**(4): 291 - 296. (TANG Zhao-guang, WANG Yong-zhi, SUN Rui, et al. Preliminary discussion on measurement performance comparison of three pore pressure transducers[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, **15**(4): 291 - 296. (in Chinese))
- [9] 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]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [10] 王海, 王永志, 袁晓铭, 等. 砂雨法饱和模型制样相对密度控制要素与评价方法[J]. *西南交通大学学报*, 2019, **54**(2): 343 - 350, 372. (WANG Hai, WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming, et al. Control factors and assessment technique of relative density using pluviation method for saturated model[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, **54**(2): 343 - 350, 372. (in Chinese))
- [11] DEWOOLKAR M M, KO H Y, STADLER A T, et al. A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling[J]. *Geotechnique Testing Journal*, 1999, **22**(3): 196 - 210.
- [12] STEWART D P, CHEN Y R, KUTTER B L. Experience with the use of methylcellulose as a viscous pore fluid in centrifuge models[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1998, **21**(4): 365 - 369.
- [13] 赵志旭. 无黏性土模型试验饱和度测试方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019. (ZHAO Zhi-xu. Study on Saturation Testing Method of Cohesionless Soil Model Test[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese))
- [14] 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))

(编校: 明经平)