

DOI: 10.11779/CJGE2024S10042

基于隧道离心试验的柔性软接触土压计测试可靠性评价

刘远鹏^{1,2}, 汤兆光^{1,2}, 李雨润³, 王永志^{*1,2}, 朱耀庭⁴, 刘红帅⁵

(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. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 4. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;
5. 河北大学岩土工程研究所, 河北 保定 071002)

摘要: 开展一系列离心模型试验, 选取线性误差、平均幅值误差、响应速率作为指标, 基于隧道模型对柔性软接触新型土压计 ESP-II 和两种国际代表性传统土压传感器 (PDA、EPL-D1) 进行对比评价, 验证新研发土压力计测量的可靠性。主要结论如下: ①静力状态下, ESP-II、PDA、EPL-D1 线性误差分别为 19.36%, 12.7%, 21.0%, 平均幅值误差为 5.79%, 48.2%, 22.6%, 证明 ESP-II 土压力计相比国际两种土压计具有较好静力测试性能。②动力荷载下, ESP-II、PDA、EPL-D1 土压力计的平均响应速率分别为 67.1, 51.5, 65.8 Hz, ESP-II 的响应速率略高于其他两种土压力计, 具有良好的响应频率; 序列地震动荷载下 ESP-II、PDA 测得土压力与 EPL-D1 不同, 呈现一致增量规律, 而数值存在一定差异, 反映土体具有较强结构性。③卸载过程中, 3 种土压力计测得数据均呈现不同程度的非线性变化特征, PDA 和 EPL-D1 土压力时程曲线产生了偏折、跳变现象, 而 ESP-II 土压力时程曲线保持了较好数据连续性, 一定程度说明软接触式设计能实现土压力计与土体的良好接触。

关键词: 隧道; 离心模型试验; 软接触式; 土压力计; 测试可靠性

中图分类号: TU453 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0075-06

作者简介: 刘远鹏(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事土压力理论与测试方法方面的研究。E-mail: lyp243571@163.com。

Reliability evaluation of flexibly soft contact earth pressure cell testing based on centrifugal tests on tunnels

LIU Yuanpeng^{1,2}, TANG Zhaoguang^{1,2}, LI Yurun³, WANG Yongzhi^{1,2}, ZHU Yaoting⁴, LIU Hongshuai⁵

(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. College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 4. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 5. Institute of Geotechnical Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: A series of centrifugal model tests are conducted by selecting the linear error, average amplitude error and response rate as the indice. Based on the tunnel model, a new flexibly soft contact earth pressure cell ESP-II and two internationally representative traditional earth pressure sensors (PDA and EPL-D1) are compared and evaluated to verify the reliability of the newly developed earth pressure cell measurement. The main conclusions are as follows: (1) Under the static state, the linear errors of ESP-II, PDA and EPL-D1 are 19.36%, 12.7% and 21.0%, respectively, and the average amplitude errors are 5.79%, 48.2% and 22.6%, indicating that the ESP-II earth pressure cell has better static testing performance compared to the two international earth pressure cells. (2) Under the dynamic loads, the average response rates of ESP-II, PDA and EPL-D1 earth pressure cells are 67.1, 51.5, and 65.8 Hz, respectively. The response rate of ESP-II is slightly higher than that of the other two types of earth pressure cells, indicating a good response frequency. The earth pressures measured by ESP-II and PDA under sequential seismic loads are different from those of EPL-D1, showing a consistent incremental pattern. However, there are certain differences in the numerical values, indicating that the soils have strong structural characteristics. (3) During the unloading process, the data measured by the three types of earth pressure cell show varying degrees of nonlinear changes. The time-history curves of earth pressures of PDA and EPL-D1 exhibit bending and jumping phenomena, while those of ESP-II maintain good data continuity, indicating to some extent that the soft contact design can achieve good contact between the earth pressure cells and the soils.

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); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2023E019)

收稿日期: 2024-04-29

Key words: tunnel; centrifugal model test; soft contact type; earth pressure cell; test reliability

0 引言

隧道是现代化城市和城市间地下交通、运输的重大基础设施，尤其海底隧道、跨江河隧道等建设，提出了一些列挑战和机遇。土压力是评判隧道施工质量、健康服役、抗震性能等关键力学指标，但是受限于土体内部受力变形机制未明确，准确获得土压力问题具有复杂性。

近些年来，众多学者在隧道围压计算方法、物理试验及土压力测试方法方面，取得重要进展和代表性成果，在此做简要阐述和归纳。Terzaghi^[1]基于活动门试验，探讨了土拱效应的产生机理，提出了极限平衡方法下隧道拱顶松动区土压力计算公式；陈若曦等^[2]采用主应力线偏转方法，修正了不同土体条件下侧向土压力系数计算方法；刘晶波等^[3]开展动力离心试验，研究了不同埋深条件下矩形隧道地震动土压力响应；Wang 等^[4]基于一系列离心模型试验，研究了干砂中不同方向地震荷载下不同隧道模型的地震响应，提出了垂直方向地震荷载会显著提升隧道衬砌动态弯矩；Cilingir 等^[5]采用动力离心试验和数值模拟方法，研究不同类型地震动输入对圆形和方形隧道抗震性能影响，发现隧道衬砌的围压峰值及增量主要受输入加速度峰值影响，与地震持续时间及频率含量无关；芮瑞等^[6]基于自主研发标定装置，对膜式土压力盒进行加载卸载标定试验，结果表明加载过程标定曲线为线性分布，卸载过程标定曲线可通过指数拟合；魏永权等^[7]开展了大模量土体中微型土压力传感器 BY-4 离心标定试验，揭示了引起标定曲线发生非线性的原因为土体模量变化，基于匹配误差对标定曲线进行修正；梁波等^[8]详细介绍了标定试验常用的加压方式，并结合试验所用两种土压力盒性质，选用固结仪作为标定过程的加压设备；蔡正银等^[9]开展离心模型土压力盒标定试验，分析温度、砂层厚度、土颗粒粒径变化对标定系数的影响。

综上所述，可以发现现有研究多集中于隧道土压力理论计算及动力或静力荷载下围压响应分析，以及地下挡土墙结构土压力测试方法，而关于隧道环境中土压力计测试可靠性问题，尚缺乏对比研究与认知。因此，本文选取线性误差、平均幅值误差、响应速率为指标，对柔性软接触土压计 ESP-II 和两种国际代表性土压传感器进行评估，验证所用土压力计测量可靠性。

1 试验设备与模型设计

1.1 试验设备

本次模型试验在中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 型离心机上进行（图 1），有效旋转半径 5.0 m，台面尺寸 1.6 m×0.8 m，最大离心加速度 100g，动台台面尺寸 1.6 m×0.8 m，振动加速度 30g，振动荷载 1500 kg，振动频宽 10~300 Hz，激振位移 10 mm。



图 1 DCIEM-40-300 型离心机振动台系统

Fig. 1 Shaking table test system of DCIEM-40-300 centrifuge

1.2 土体材料选取

试验所用土体为天津细砂，其主要物理参数：土颗粒相对质量密度 G_s 为 2.641，不均匀系数 C_u 为 1.7，曲率系数 C_c 为 0.96，限制粒径 D_{60} 为 0.185 mm，最大干密度 ρ_{dmax} 和最小干密度 ρ_{dmin} 分别为 1.696, 1.482 g/cm³。图 2 为该砂的级配曲线，采用砂雨法进行制模，控制相对密实度 80%。

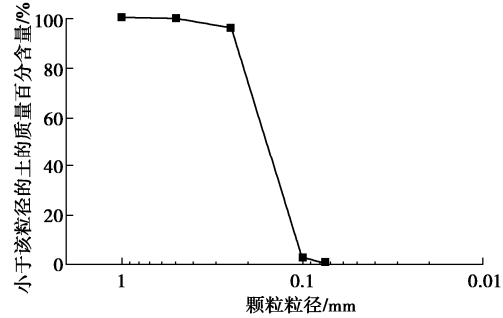


图 2 砂的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of sand

1.3 隧道设计与制作

查阅文献可知，工程常见圆形隧道直径在 6~15 m 之间。而在离心模型试验中应考虑模型箱边界效应，故本次试验原型隧道直径设置为 10 m，衬砌厚度设置为 0.5 m，长度设置为 10 m。模型隧道外径及长度根据几何相似比确定即可，对隧道来说，抗震设计主要考虑其抗弯能力，因此模型衬砌设计应以抗弯刚度为主，模型隧道设计依托于抗弯刚度等效原则：

$$N^4 E_m J_m = E_p J_p \quad .$$

故本次试验设计选择铝合金作为模型材料，表 1 为模型与原型对应的参数指标。

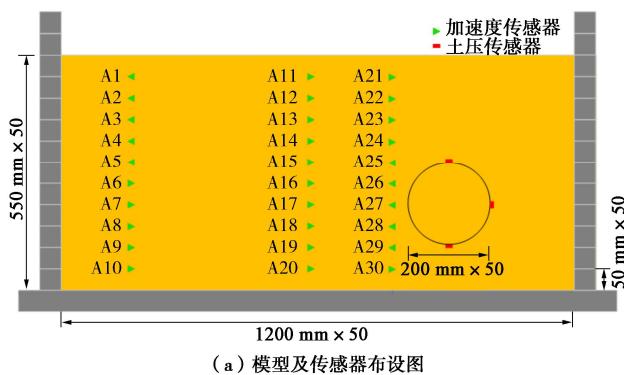
表 1 原型/模型隧道参数

Table 1 Parameters of prototype/model tunnel

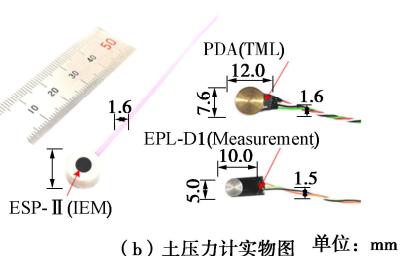
材料参数	原型材料	模型材料
弹性模量/GPa	35.5	71
隧道外径/mm	10000	200
隧道内径/mm	9000	190
衬砌厚度/mm	500	5
隧道长度/mm	20000	400

1.4 模型布设及测试方案

图 3 为模型与传感器的总体布设图, 根据国家现行规范:《公路隧道设计细则: JTG/T D70—2010》与《铁路隧道设计规范: TB10003—2016》中对隧道界限埋深的定义, 计算得到本次试验隧道界限埋深约为 10.8~13.5 m, 结合试验所用模型箱尺寸, 将隧道埋深设置为 12.5 m(对应模型 0.25 m), 为评估柔性软接触式土压力计测试可靠性, 在隧道中心断面拱顶、拱腰、拱底分别布设工力所自制的柔性软接触式土压力计 ESP-II 以及两种国际代表性土压力计(美国 Measurement 公司 EPL-D1 型土压力计、日本 TML 公司 PDA 型土压力计), 监测隧道动态及静态衬砌土压力; 为测试土体动力响应, 按层布设加速度传感器, 监测动态加速度变化。



(a) 模型及传感器布设图



(b) 土压力计实物图 单位: mm

图 3 离心模型试验设计方案及实物图

Fig. 3 Design scheme and physical image of centrifugal model tests

图 4 所示为本次试验的输入荷载, 基于图 4 (a) 逐级递增的离心加速度, 以分析 3 种土压力计的静力测试精度及指标下隧道衬砌土压力变化特征, 基于图 4 (b)~(d) 依次输入的峰值 0.1g 正弦波、0.1g EL-Centro 波、0.3g EL-Centro 波、0.3g 正弦波, 以分析 3

种土压力计动力响应敏感性及震后土压力增量变化规律。

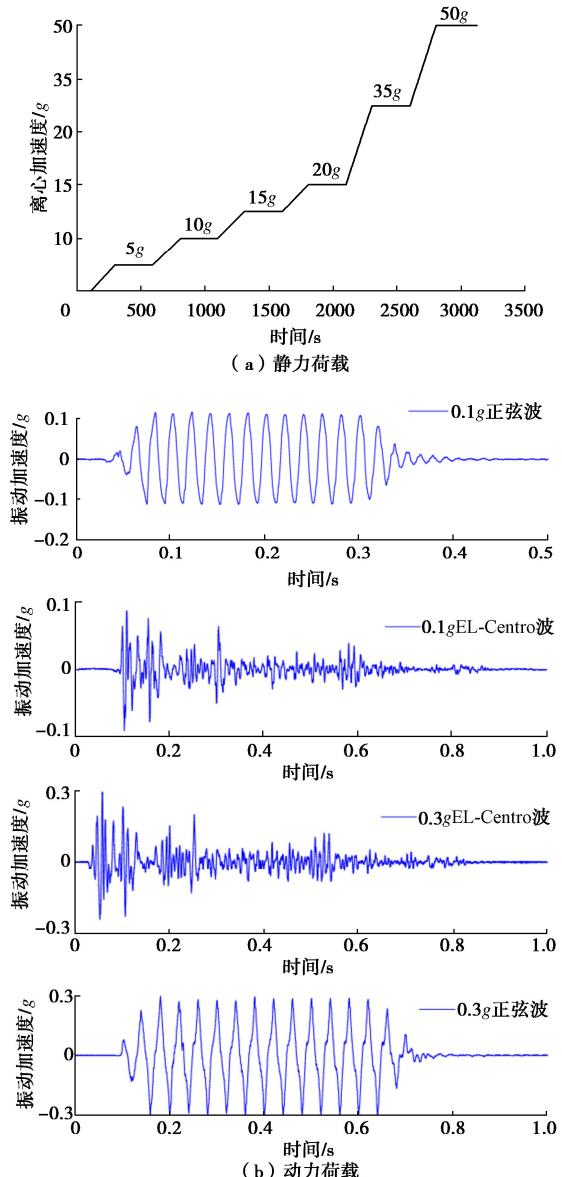


图 4 输入荷载

Fig. 4 Input loadings

2 静力响应可靠性分析

本节采用线性误差、平均幅值误差作为评价指标, 分析静力荷载下位于隧道衬砌上的 3 种土压力计测试准确性。

根据相关规范《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件: GB/T 15406—2007》, 线性误差 E_L 、平均幅值误差 E_A 定义如下:

$$E_L = \frac{|\Delta Y_{LS}|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% , \quad (1)$$

$$E_A = \left| \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta Y_{ES}|_{\max}}{Y_E}_{ave} \right| \times 100\% . \quad (2)$$

式中: ΔY_{LS} 为荷载历程上实测值与理论值的最大偏差绝对值, 为土压力计的满量程输出 (500 kPa); Y_E 为每级荷载真实值, ΔY_{FS} 为真实值与测量值的最大偏差。

理论计算方面, 选取太沙基松动土压力理论计算隧道拱顶土压力, 其余测点土压力基于日本土工学会提出的修正惯用法求解:

$$\sigma_0 = P_0 \exp(-K_0 \tan \varphi / B_1), \quad (3)$$

$$\sigma_{v1} = \frac{B_1 \gamma - c}{K_0 \tan \varphi} [1 - \exp(-K_0 \tan \varphi H / B_1)] + \sigma_0, \quad (4)$$

$$B_1 = R_0 \cot(\varphi/8 + \pi/16), \quad (5)$$

$$\sigma_{v2} = \sigma_{v1} + W, \quad (6)$$

$$\sigma_h = K_0 (\sigma_{v1} + \gamma R). \quad (7)$$

式中: σ_{v1} 和 σ_{v2} 分别为隧道拱顶和拱底竖向土压力理论值; σ_h 为隧道拱腰侧向土压力理论值; W 为隧道自重; K_0 为侧向土压力系数; c , φ , γ 分别为土体黏聚力、内摩擦角、重度; P_0 为地面附加荷载; R 为隧道半径。

根据上式及表 2 中数据 (一为传感器故障导致数据缺失) 计算得到 ESP-II 型、PDA 型、EPL-D1 型线性误差为 19.36%, 12.7%, 21.0%, 平均幅值误差为 5.79%, 48.2%, 22.6%。可以发现柔性软接触式土压力计 ESP-II 的线性误差与两种土压力计接近, 而平均幅值误差远小于两者, 说明 ESP-II 型土压力计已达到较好的测试可靠性与准确性, 与国际静力测试水平相当。

表 2 土压力计静力测量值及计算值

Table 2 Static measurements and calculated values of three types of soil pressure cells

离心加速度/g	土层深度/m	测量值/kPa			计算值/kPa
		ESP-II	PDA	EPL-D1	
5	1.25	9.26	—	37.83	18.13
	1.75	4.33	5.82	9.34	11.15
	2.25	—	53.01	61.40	34.43
10	2.5	15.66	—	59.52	36.27
	3.5	14.10	18.21	25.33	22.30
	4.5	—	76.09	83.67	52.57
15	3.75	21.24	—	76.17	54.40
	5.25	22.98	33.64	45.13	33.44
	6.75	—	94.24	106.14	70.70
20	5	26.14	—	90.65	72.53
	7	30.98	51.34	67.03	44.59
	9	—	111.45	126.32	88.83
35	8.75	38.52	—	130.59	126.94
	12.25	55.01	114.05	142.16	78.04
	15.75	—	152.51	178.98	143.24
50	12.5	51.36	—	174.97	181.34
	17.5	78.37	174.82	216.41	111.48
	22.5	—	191.26	227.81	197.64

3 动力响应可靠性分析

本节采用响应速率作为评价指标, 分析了动力荷载下隧道衬砌上的 3 种土压力计测试敏感性, 及 3 种土压力计土压力增量变化。

3.1 动力响应敏感性分析

土压力计最重要的动力精度指标为其对动力荷载的敏感程度, 采用响应滞时 T_d (首次土压力峰值与加速度峰值的平均迟滞时间) 反应 3 种土压力计对动力荷载的敏感程度。限于篇幅, 本小节仅给出首次振动的动力响应结果, 同时对土压力值进行归一化处理, 如图 5 所示, 通过图 5 计算得 ESP-II、PDA、EPL-D1 土压力计的平均响应滞时分别为 14.9, 19.4, 15.2 ms, 换算成响应速率为 67.1, 51.5, 65.8 Hz, 可以发现 ESP-II 的响应速率高于其他两种国际代表性土压力计。综上, ESP-II 型已达到国际通用的动力测试水平。

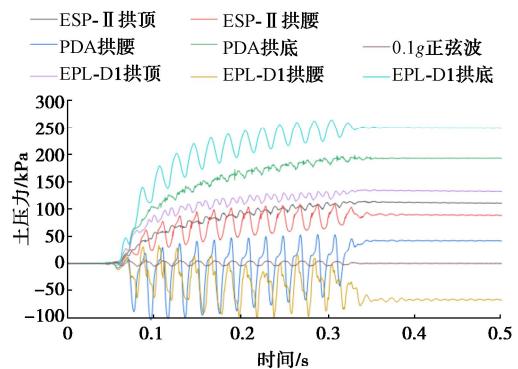


图 5 0.1g 正弦波下土压力变化规律图

Fig. 5 Variation of earth pressure under 0.1g sine waves

3.2 动态土压力增量分析

图 6 给出了拱腰位置测点 3 种土压力计地震前后的动土压力时程, 整体上可以看出 ESP-II 动力响应处土压力连续性较好, 变化规律一致, 而其余两种土压力计动力响应处土压力数据出现了不同程度的跳变。进一步分析数据容易发现, ESP-II 和 PDA 的土压力增量显示出相似的变化规律: 首次振动土压力增量都产生较大变化, 中间两次振动后土压增量逐渐变小, 此时拱腰测点附近土体密实度不发生变化, 最后一次振动后, 土压增量再次变大, 而数值存在一定差异, 该现象产生的主要原因是土体具有较强结构性, 但 EPL-D1 的土压力增量呈现“负-正”往复变化趋势, 与现有认知不符。

3.3 卸荷影响分析

图 7 (a) 给出了离心力卸载过程中拱腰位置 3 种土压力计时程曲线, 观察可发现, 在图中标记的 E1、E2 处, PDA 和 EPL-D1 土压力曲线都出现了较大的偏

折、跳变, EPL-D1 偏折尤其明显, 而 ESP-II 土压力测量曲线维持了较好的测试连贯性, 说明软接触式设计能实现土压力计与土体接触更加稳定。卸载过程 3 种土压力计测量值随离心加速度变化响应曲线如图 7 (b) 所示, 不难看出 3 种土压力计测量曲线都呈现出不同程度的“滞后”, 即非线性变化特征, 主要原因为卸载时土体还保留着上级荷载残余的土压力。

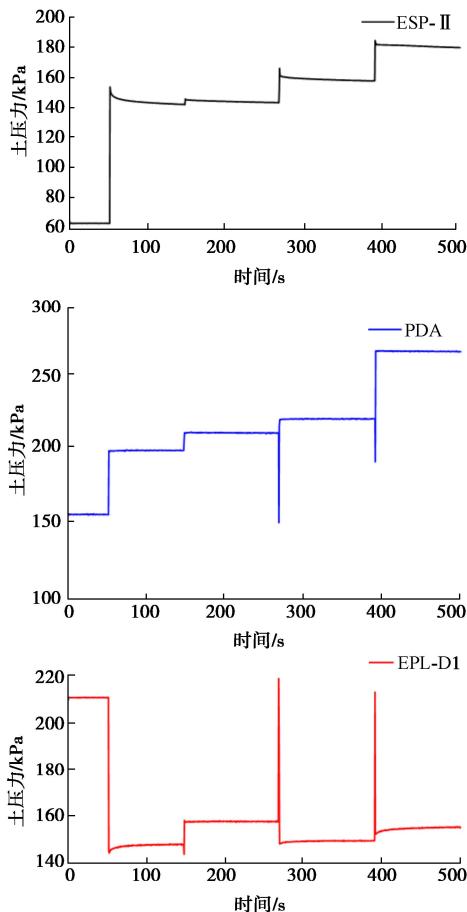


图 6 连续振动荷载下土压力测量结果

Fig. 6 Time histories of earth pressure under continuous vibration loads

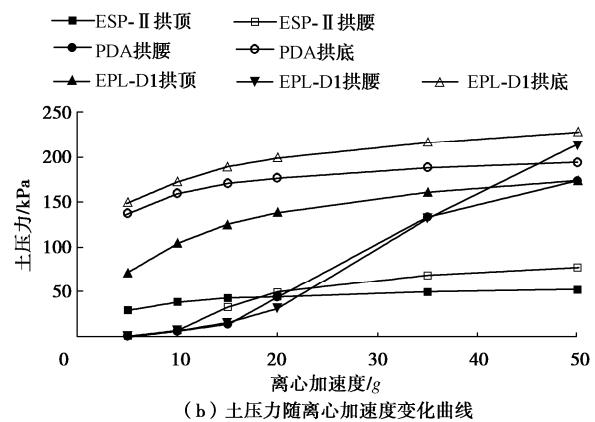
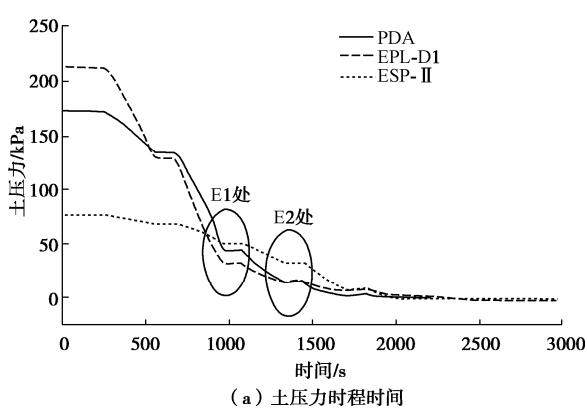


图 7 卸载过程 3 种土压力计测量结果

Fig. 7 Measured results of three types of earth pressure cells during unloading process

4 结 论

(1) 静力荷载下, ESP-II、PDA、EPL-D1 线性误差分别为 19.36%, 12.7%, 21.0%, 平均幅值误差为 5.79%, 48.2%, 22.6%, 证明 ESP-II 土压力计相比国际两种土压计具有较好静力测试性能。

(2) 动力荷载下, ESP-II、PDA、EPL-D1 土压力计的平均响应速率为 67.1, 51.5, 65.8 Hz, ESP-II 的响应速率略高于其他两种土压力计, 具有良好的响应频率; 序列地震动荷载下 ESP-II、PDA 测得土压力与 EPL-D1 不同, 呈现一致增量规律, 而数值存在一定差异, 表明土体具有较强结构性。

(3) 卸载过程中, 3 种土压力计测得数据均呈现不同程度的非线性变化特征, PDA 和 EPL-D1 土压力时程曲线产生了偏折、跳变现象, 而 ESP-II 土压力测量曲线保持了较好数据连贯性, 一定程度说明软接触式设计能实现土压力计与土体的良好接触。

参考文献:

- [1] KARL T. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: J Wiley and Sons Inc, 1943.
- [2] 陈若曦, 朱斌, 陈云敏, 等. 基于主应力轴旋转理论的修正 Terzaghi 松动土压力[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1402-1406. (CHEN Ruoxi, ZHU Bin, CHEN Yunmin, et al. Modified Terzaghi loozening earth pressure based on theory of main stress axes rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1402-1406. (in Chinese))
- [3] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲, 等. 土-结构动力相互作用系统离心机振动台模型试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 114-121. (LIU Jingbo, LIU Xiangqing, WANG Zonggang, et al. Dynamic centrifuge model test of a soil-structure

- interaction system[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(11): 114-121. (in Chinese))
- [4] WANG J, LIU H Q, LIU H B, et al. Centrifuge model study on the seismic responses of shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **92**: 103036.
- [5] CILINGIR U, GOPAL MADABHUSHI S P. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**(3): 452-462.
- [6] 茄 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))
- [7] 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))
- [8] 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. Determination of earth pressure by miniature earth pressure cell in centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 818-826. (in Chinese))
- [9] 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))

(编校: 黄贤沙)