

文章编号: 1007-2993(2025)01-0132-07

路基压实状态与碾压动土压力的关联性分析

张荣华¹ 王育杰² 董超¹ 王新宇² 蒋红光² 姚占勇²

(1. 山东高速济青中线有限公司, 山东潍坊 261500; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250061)

【摘要】 路基压实状态与碾压动土压力密切相关, 为此开展了土压力传感器室内标定试验。标定试验显示砂标系数与厂家标定系数相差 65% 以上, 论证了根据传感器的实际工程状态选择相应介质进行标定试验的必要性。在此基础上明晰了标定系数与压实状态的关系, 建立了标定系数-砂土介质压实度关系曲线, 提出了标定系数与介质压实度关系的归一化方程。路基碾压土压力的实测数据显示, 按实际介质标定系数修正后的实测值与 Boussinesq 解理论值的偏差更小, 较厂家标定系数下的实测值平均降低 29.4%。

【关键词】 高速公路; 路基压实; 土压力传感器; 标定系数; 压实状态

【中图分类号】 U416.1

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0534

Correlation analysis between subgrade compaction state and rolling dynamic soil pressure

Zhang Ronghua¹ Wang Yujie² Dong Chao¹ Wang Xinyu²

Jiang Hongguang² Yao Zhanyong²

(1. Shandong Expressway Jiqing Middle Line Highway Co., Ltd., Weifang 261500, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

【Abstract】 To ensure subgrade compaction quality, the correlation between compaction state and rolling dynamic soil pressure was investigated. An indoor calibration test of soil pressure sensors was conducted, revealing a difference of over 65% between the sand calibration coefficient and the manufacturer's coefficient. This emphasized the necessity of selecting the medium based on actual engineering conditions for calibration. The relationship between the calibration coefficient and compaction state was clarified, leading to the establishment of a calibration coefficient - sand compaction degree curve and a normalization equation. Field measurements show that correcting measured values using actual medium calibration coefficients reduces the deviation from the Boussinesq theoretical solution by an average of 29.4%, compared to using the manufacturer's coefficients.

【Key words】 highway; subgrade compaction; soil pressure sensor; calibration coefficient; compaction state

0 引言

公路路基的压实质量关乎路面性能的长期稳定^[1-2]。路基压实质量与碾压土压力密切相关。一方面, 过大的碾压土压力易造成路基的过碾破坏, 同时也导致碳排放高、经济性差; 另一方面, 过小的碾压土压力会造成路基压实度偏低, 易导致服役期病害显现。由此可见, 准确获得路基碾压土压力对合理选择碾压机械及其吨位、优化压实厚度, 进而保证压实效果至关重要^[3-5]。

目前, 土压力传感器是进行土压力值测量的主要工具, 根据测量原理不同划分为振弦应变式、电阻

应变式和液压(气压)式 3 类传感器^[6-7]。在传感器出厂前, 厂家一般会给出该传感器的标定系数, 但受到温度、湿度、介质类型和状态等因素影响, 该系数与实际工程中测量结果有较大差异^[8-11]。因此, 针对传感器的实际工作环境对标定系数进行校准和修正, 是准确测量土压力值的必然要求。任连伟等^[12]通过室内砂标试验发现 3 种常见类型的土压力传感器砂标结果与厂家标定结果相差 50% 以上。简 箐等^[13]针对刚性加载砂标试验中常出现的土拱效应、应力分散和应力侧卸等问题, 设计了新型的应力集中砂标法。蔡正银等^[14]通过离心模型试验, 论证了超重力

作者简介: 张荣华, 男, 1995 年生, 硕士, 主要从事高速公路建设管理研究。E-mail: 1051666359@qq.com

通信作者: 蒋红光, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事交通岩土工程研究。E-mail: hongguang_jiang@sdu.edu.cn

场中土压力传感器的标定系数会数随着土样颗粒粒径的增大而逐渐增大。郭永兴等^[15]提出了考虑土料粒径影响的新型土压力传感器结构,以减小传感器受压力分布方式的影响。赵世永^[16]发现土压力传感器砂标系数和上部填砂厚度相关,提出标定试验中上部填砂厚度建议值。曾力等^[17]发现较小量程的土压力传感器的温度敏感性较大。贺红林等^[18]提出了一种结合三次样条插值与埃尔米特插值的压式传感器温度补偿方法。

然而,目前关于路基压实状态对土压力传感器标定影响的相关研究仍然欠缺。本文通过室内砂标试验,探究路基压实状态与碾压动土压力的关联性,提出了标定系数随压实度变化的归一化方程,并以此指导现场试验结果的修正,对提高电阻应变式土压力传感器测试准确性、推进压实应力相关研究、保障路基压实质量具有重要意义。

1 室内试验

1.1 试验材料与装置

本次标定的传感器为 DMTY 微型土压力盒,属于电阻应变式土压力传感器,实物照片见图 1(a),具体参数见表 1。表 1 中编号 21683 和编号 21684 的土压力传感器为同一批次,编号 18356 的土压力传感器为另一批次。标定介质为标准砂,其实物照片和级配曲线见图 1(b)。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020),测得其最大干密度为 1.796 g/cm^3 。

试验装置由加载系统和数据采集系统组成。试验加载装置如图 2 所示,采用微控电子万能试验机(WDW-100M)进行加载,最大试验力为 100 kN,精度可达 0.1 N,满足加载试验需求。使用数据采集仪连接电脑实时采集、记录土压力传感器数据。

1.2 试验方案

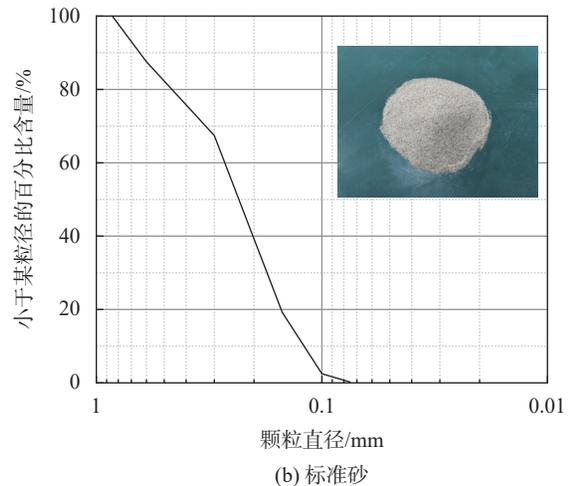
1.2.1 试件制作

试验用的标定容器为改造的标准击实筒,该筒高 17 cm、直径 15 cm,相较于传感器尺寸完全满足尺寸效应的要求。在标定容器高度 8 cm 处钻直径 5 mm 的孔,以便于传感器电源线和信号线的通过。

为尽量减少筒壁摩擦力影响,制作试件时首先在标定筒内壁涂抹足量凡士林,将光滑的塑料薄膜均匀地平铺在凡士林表面,防止薄膜褶皱,将底部垫块放入筒中,注入标准砂至筒高一半的位置,该高度与筒侧壁导线开孔基本齐平;然后整平压实底层砂,将待标定的微型土压力传感器放置在圆筒中央,将其导线引出并使其受力面向上;调整土压力传感器水平后,



(a) 传感器



(b) 标准砂

图 1 试验材料

表 1 土压力传感器参数

序号	传感器编号	直径/mm	厚度/mm	量程/MPa
1	18356	16	4.8	0.3
2	21683	16	4.8	0.3
3	21684	16	4.8	0.3

继续向标定筒中注入标准砂直至与顶部齐平;最后整平顶部标准砂,盖上顶部垫块,在标定容器与顶部垫块处做标记以记录累积沉降量,同时记录制件所用标准砂的质量,以计算标定试件的初始压实度。

单个试件标定结束后,记录累积沉降量并计算压实度。使用万能试验机静压试件,通过控制累积沉降量实现对试件压实度的控制。制件完成后完全卸载,静置 30 min 以上,待试件压实状态无变化方可进行标定试验。3 个土压力传感器分别进行 5 级压实度下的标定试验,如表 2 所示。

1.2.2 加载-卸载循环

将上述标定筒固定在万能试验机上,接通传感器电源和数据采集仪信号后将信号调零,按照表 3 所示工况进行“加载-卸载”循环作业,软件界面及试

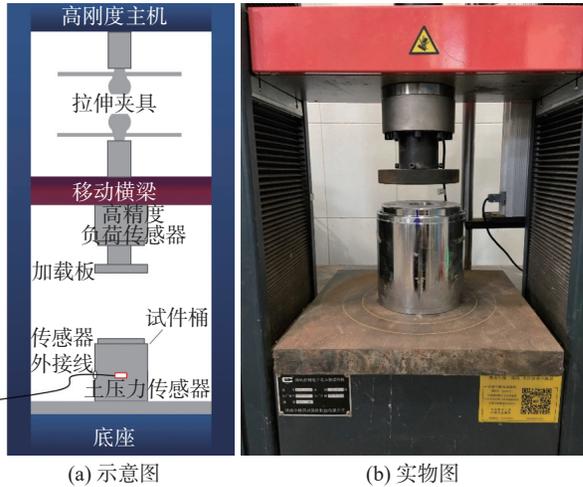


图2 试验加载装置

表2 压实度工况

传感器编号	压实度1/%	压实度2/%	压实度3/%	压实度4/%	压实度5/%
18356	89.01	92.88	94.52	96.23	97.99
21683	89.27	92.35	93.15	94.80	96.51
21684	89.25	91.53	93.13	94.78	96.48

验曲线如图3所示。对于特定压实度,每个传感器进行3次“加载-卸载”循环,每次循环结束后完全卸载,且循环间隔不小于30 min。

表3 加载-卸载循环工况

加载阶段			卸载阶段		
序号	应力/MPa	试验力/kN	序号	应力/MPa	试验力/kN
1	0.03	0.53	11	0.27	4.77
2	0.06	1.06	12	0.24	4.24
3	0.09	1.59	13	0.21	3.71
4	0.12	2.12	14	0.18	3.18
5	0.15	2.65	15	0.15	2.65
6	0.18	3.18	16	0.12	2.12
7	0.21	3.71	17	0.09	1.59
8	0.24	4.24	18	0.06	1.06
9	0.27	4.77	19	0.03	0.53
10	0.3	5.3	20	0	0

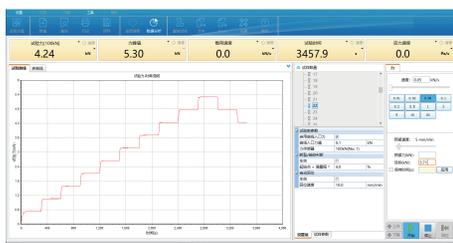


图3 加载-卸载循环标定软件界面

1.2.3 数据采集与处理

每级加载或卸载完成,待万能试验机读数稳定至少5 min后使用数据采集仪读取数据并记录。由于每个压实度下第一次循环时土压力传感器与介质接触不够紧密,顶部垫块与筒内壁可能存在一定的机械摩擦,导致第一次循环和后两次差异性可能较大。因此,处理标定数据时,选择后两个循环的加载曲线进行线性拟合,从而确定应力 σ 与应变 ϵ 的关系,进一步计算标定系数 F 。

2 试验结果分析

2.1 标定系数线性分析

以编号18356土压力传感器第一级压实度试验为例,标定结果如图4所示。在加载-卸载过程中土压力传感器存在显著的滞回现象,这是由于土体本身为非弹性体,卸载以后土压力盒受力面仍有部分残余应变,导致加载与卸载曲线并不完全重合。取后两次循环的加载曲线分别进行线性拟合,得到两次循环下土压力传感器的标定系数,二者取均值即为本级压实度下该传感器的标定系数 F 。经过计算,本次标定试验进行标定系数拟合时的线性拟合优度 R^2 均大于0.90,标定系数准确可靠。标定系数计算公式如下:

$$F = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

式中: F 为标定系数; σ 为应力; ϵ 为应变。

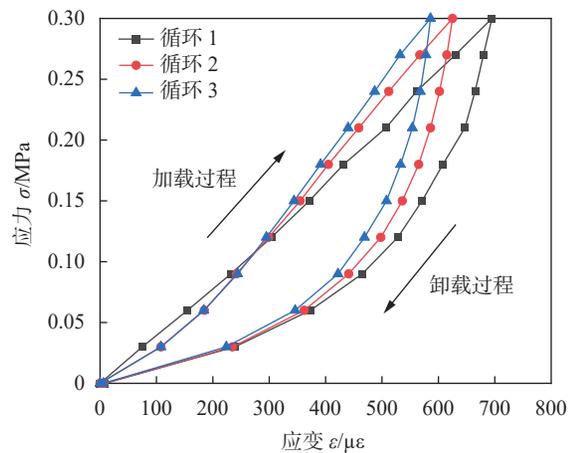


图4 典型标定试验结果

2.2 砂标与厂家标定系数

传感器出厂前厂家一般会给出相应的标定系数,本次标定试验所用传感器厂家标定方法为油标,将其与初始压实度下砂标系数 F 进行对比,结果见表4。砂标系数与厂家标定系数的偏差值在65%以上,最高可达227%;同一批次(编号21683和编号21684)的土压力传感器偏差值接近,不同批次间偏差值差异

较大。由此可见, 标定介质显著影响土压力传感器的标定系数, 进一步影响土压力值的测试。因此, 土压力传感器在使用前有必要根据实际埋设条件进行相应介质下的标定试验, 以保证土压力测试值的准确有效。

表 4 砂标与厂家标定系数对比

传感器编号	厂家标定系数/(MPa·με ⁻¹)	砂标系数/(MPa·με ⁻¹)	偏差/%
18356	1.80×10 ⁻⁴	5.88×10 ⁻⁴	227
21683	2.29×10 ⁻⁴	4.20×10 ⁻⁴	83
21684	2.82×10 ⁻⁴	4.67×10 ⁻⁴	67

2.3 标定系数与压实度

不同压实度下土压力传感器的标定试验结果如图 5 所示。对于三个传感器, 其标定系数均随压实度增大而增大, 且增幅逐渐减小。可解释为随着砂土介质压实度的增加, 应力传递阻力增大, 产生相同应变所需要的应力增加, 因此传感器的标定系数(应力/应变)随之增大。以编号 18356 土压力传感器为例, 当标准砂的压实度由 89.01% 增加至 92.88%, 标定系数增幅为 16.65%, 每 1% 压实度增幅对应的标定系数增幅平均为 4.30%, 而这一数值在随后三级压实度增加时分别为 3.16%, 1.22% 和 0.38%。由于三个土压力传感器的标定系数随压实度的变化规律相似, 因此分别将各传感器的标定结果进行拟合, 拟合方程如式(2)所示。

$$F = A_2 + (A_1 - A_2) / \left(1 + \left(\frac{K}{K_0} \right)^p \right) \quad (2)$$

式中: K 为压实度; F 为该压实度下的标定系数; A_1 , A_2 , K_0 , p 为拟合参数。

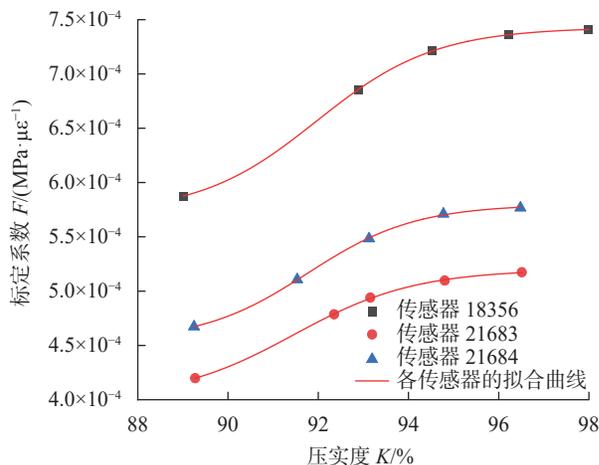


图 5 标定系数与压实度关系曲线

拟合结果如图 5 和表 5 所示。三条拟合曲线的线性拟合优度 R^2 均在 0.99 以上, 表明标定系数和压

实度具有强相关性。根据拟合结果, 可实现对该传感器目标压实度(大于初始压实度)下标定系数的预测。以编号 18356 土压力传感器为例, 当进行高速公路路基施工相关研究时, 下路堤、上路堤和路床的设计压实度分别为 93%, 95%, 96%, 则其对应的标定系数分别为 6.89×10^{-4} , 7.27×10^{-4} 和 7.35×10^{-4} , 较初始压实度下标定系数的分别增加为 17.26%, 23.72%, 25.09%, 表明土压力传感器标定系数在不同压实度下进行修正十分必要。

表 5 标定系数与压实度拟合曲线参数

传感器编号	A_1	A_2	K_0	p	R^2
18356	5.72×10^{-4}	7.43×10^{-4}	91.99	70.56	0.99
21683	4.01×10^{-4}	5.20×10^{-4}	91.49	68.70	0.99
21684	4.55×10^{-4}	5.80×10^{-4}	91.79	77.49	0.99

2.4 标定系数的归一化方程

由图 5 可知, 试验所用三个土压力传感器的标定系数随砂土介质压实度的变化呈现显著的一致性。为了进一步研究同一类型(电阻应变式)土压力传感器的标定系数和压实度的相关关系, 取 3 个传感器的标定试验结果, 以测试压实度和初始压实度的比值为自变量, 以测试标定系数和初始压实度下标定系数的比值为因变量, 进行归一化处理, 结果如图 6 所示。拟合方程如式(3)所示, 取 95% 的置信区间, 其上、下边界的拟合结果分别如式(4)和式(5)所示。

$$\frac{F_i}{F_0} = \frac{1.53 - 1.62 \frac{K_i}{K_0}}{1 - 1.09 \frac{K_i}{K_0}}, R^2 = 0.98 \quad (3)$$

$$\frac{F_i}{F_0} = \frac{1.68 - 1.43 \frac{K_i}{K_0}}{1 - 1.05 \frac{K_i}{K_0}} \quad (4)$$

$$\frac{F_i}{F_0} = \frac{1.38 - 1.81 \frac{K_i}{K_0}}{1 - 1.13 \frac{K_i}{K_0}} \quad (5)$$

式中: K_0 为初始压实度; K_i 为第 i 级压实度; F_0 为初始压实度下的标定系数; F_i 为第 i 级压实度下的标定系数。

根据式(3), 当确定某一土压力传感器(电阻应变式)在初始压实度下的标定系数后, 即可预测后续压实度下其标定系数。这一规律对于该厂家不同批次的电阻应变式土压力传感器有效, 但对于其他厂家研

发的该类传感器是否有效还有待进一步研究。

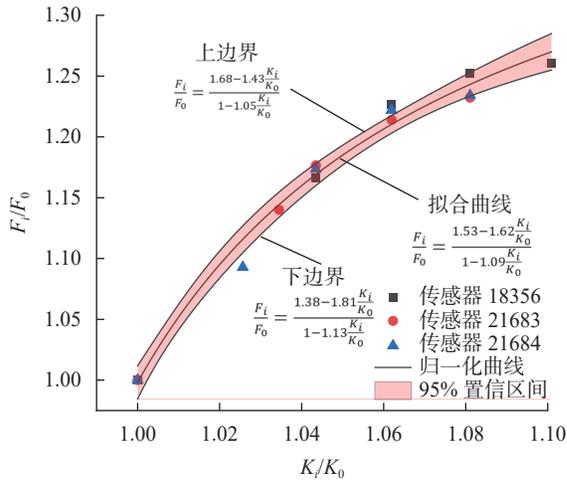


图6 标定系数的归一化曲线

2.5 工程现场应用

以济青中线高速公路某试验路段下路堤施工实测土压力数据为例,验证土压力传感器标定系数修正的工程应用,测试过程如图7所示。

本试验路段路基填料为粗砂砾石,松铺厚度80 cm,土压力传感器的埋设深度分别为18, 40, 60, 76 cm,压实机械为YZ362型振动压路机,其工作质量为36 t。在进行土压力传感器埋设时,采用与室内标定试验相同的标准砂以保持介质的一致性,并保护传感器,同时调节水平,随后进行压路机压实作业,并实时采集土压力数据。完成土压力数据采集后,采用改良灌砂法分层检测各层压实度,分别基于厂家油标系数和式(3)修正砂标系数计算土压力值,结果如图8所示,其中黑色虚线为根据 Boussinesq 解计算得到的附加应力分布情况。按照厂家标定系数,自上而下四层土压力传感器的测试值分别为0.49, 0.19, 0.08, 0.04 MPa,经式(3)修正后对应值分别为1.32, 0.54, 0.22, 0.11 MPa,与理论值的偏差率由修正前的47.63%, 57.24%, 73.82%, 81.97%,分别降低至42.34%, 21.26%, 25.77%, 53.72%,平均降低幅度达29.4%。由此可见,进行砂土介质压实度修正后的附加应力值更为接近 Boussinesq 解理论值。

3 结论

(1)砂标试验显示,电阻应变式土压力传感器的砂标标定系数高于厂家的油标标定系数,相差在65%以上,表明根据实际工程状态选择相应介质对传感器进行标定试验是必要的。

(2)土压力传感器的标定系数均随砂土介质压实度增加而增大,其增幅随压实度增加而逐渐减小。建立了土压力传感器标定系数-砂土介质压实度关系曲



(a) 土压力传感器



(b) 传感器排布



(c) 数据采集系统



(d) 路基压实作

图7 土压力现场测试

线,砂土介质压实度为93%, 95%和96%时,较初始压实度下,标定系数的增幅分别为17.26%, 23.72%, 25.09%,表明土压力传感器标定系数对于介质压实度的修正具有重要意义。

(3)提出了电阻应变式土压力传感器标定系数与介质压实度关系的归一化方程,当初始压实度时的标

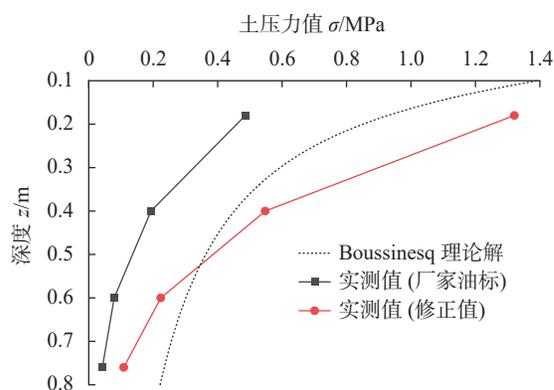


图8 附加应力的修正曲线

定系数确定后,可实现对后续压实度下标定系数的预测。

(4)开展了现场碾压土压力的实测应用,在80 cm的压实厚度下,36 t振动压路机产生的碾压土压力达0.11~1.32 MPa,相较厂家油标的0.04~0.49 MPa,修正后实测值与Boussinesq解理论值的偏差平均降低29.4%。

参 考 文 献

- [1] 夏志远,王 率,任延斌.某山区高填方路基边坡失稳机制分析研究[J].*岩土工程技术*, 2022, 36(5): 371-376. (XIA Z Y, WANG S, REN Y B. Analysis and research on instability and sliding mechanism of high fill subgrade slope in a mountainous area[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2022, 36(5): 371-376. (in Chinese))
- [2] 魏佩顺.斜坡路基边坡中路堤位移及应力影响参数研究[J].*岩土工程技术*, 2019, 33(3): 162-165,177. (WEI P S. Study on influence parameters of embankment displacement and stress in slope subgrade slope[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2019, 33(3): 162-165,177. (in Chinese))
- [3] 李 晋,姜 鹏,李天宇,等.液压夯补强路基动力响应现场试验研究[J].*公路交通科技*, 2022, 39(9): 67-74. (LI J, JIANG P, LI T Y, et al. In-situ experimental study on dynamic response of subgrade reinforced by hydraulic impactor[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(9): 67-74. (in Chinese))
- [4] 李国维,米帅奇,仇红超,等.深埋盖板涵路基填土应力场分布特征试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2022, 41(11): 2311-2319. (LI G W, MI S Q, QIU H C, et al. Experimental study on stress field distribution characteristics of slab-culvert under high embankments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(11): 2311-2319. (in Chinese))
- [5] ZHANG D, WEI J, WEI P, et al. An experimental investigation of mechanical properties within geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Railway Engineering: Construction and Maintenance of Railway Infrastructure in Complex Environment. Beijing, 2014: 371-376.
- [6] 于友朋.农田无线土壤压力传感器及监测系统研究与开发[D].哈尔滨:东北农业大学,2017. (YU Y P. Research and development of farmland wireless soil pressure sensor and monitoring system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese))
- [7] 徐镜先.农田多向无线土压力传感器及监测系统的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020. (XU J X. Research of farmland multidirectional wireless earth pressure sensor and monitoring system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese))
- [8] 梁 雨,梅国雄,蒋明杰,等.土压力盒标定试验研究及工程应用[J].*广西大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(2): 245-252. (LIANG Y, MEI G X, JIANG M J, et al. Investigation on calibration of earth pressure cell and its on-site application[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(2): 245-252. (in Chinese))
- [9] 李 升,周 琳,施尚伟,等.一种提高电阻应变式土压力盒灵敏度的方法[J].*建筑结构*, 2022, 52(S1): 2946-2950. (LI S, ZHOU L, SHI S W, et al. A method for improving sensitivity of the earth pressure cell of resistance strain type[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S1): 2946-2950. (in Chinese))
- [10] 李春林,陈青春,丁启朔.用于土壤压实监测的土压力传感器标定[J].*实验技术与管理*, 2010, 27(4): 63-66. (LI C L, CHEN Q C, DING Q S. Calibration of soil pressure sensors for soil compaction monitoring[J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(4): 63-66. (in Chinese))
- [11] 孔祥松,许壮壮,胡经尧,等.基于相似试验的土压力盒便捷标定方法[J].*矿业研究与开发*, 2021, 41(9): 56-60. (KONG X S, XU Z Z, HU J Y, et al. Convenient calibration method of earth pressure cell based on similarity test[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(9): 56-60. (in Chinese))
- [12] 任连伟,肖 扬,顾红伟.砂土介质中多类型土压力盒标定试验[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 155-159. (REN L W, XIAO Y, GU H W, et al. Experimental study on calibration tests of earth pressure cells in sand soil[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(2): 155-159. (in Chinese))

- [13] 简 箐,赵国彦,王 玺,等. 砂土介质振弦式土压力盒标定试验 [J]. 黄金科学技术, 2020, 28(4): 541-549. (JIAN Z, ZHAO G Y, WANG X, et al. Calibration tests of vibrating wire earth pressure cells in sand soil[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(4): 541-549. (in Chinese))
- [14] 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 Z Y, DAI Z Y, XU G M, 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))
- [15] 郭永兴,张东生,孟 汇,等. 土壤介质对土压传感器测量准确度的影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 369-373,384. (GUO Y X, ZHANG D S, MENG H, et al. Influence of earth medium on earth pressure sensor measurement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 369-373,384. (in Chinese))
- [16] 赵世永. 结构界面单膜电阻式微型土压力盒室内砂土标定方法研究 [J]. 河南科学, 2022, 40(1): 39-45. (ZHAO S Y. Laboratory sand calibration method of single membrane resistance miniature earth pressure cell set on the structural surface[J]. Henan Science, 2022, 40(1): 39-45. (in Chinese))
- [17] 曾 力,鲁臻臻,李明宇,等. 温度影响下不同含水率细砂中土压力盒测试结果试验研究 [J]. 力学与实践, 2022, 44(1): 100-108. (ZENG L, LU Z Z, LI M Y, et al. Experimental study on test results of earth pressure cells buried in fine sand with different moisture content under the influence of temperature[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 100-108. (in Chinese))
- [18] 贺红林,许佳豪,周战洪,等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 1-7. (HE H L, XU J H, ZHOU Z H, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezo-resistive pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 1-7. (in Chinese))

收稿日期: 2023-05-09