

李连祥,符庆宏,张海平.微型土压力传感器标定方法研究[J].地震工程学报,2017,39(4):0731-0737.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0731

LI Lian-xiang, FU Qing-hong, ZHANG Hai-ping. Study on the Calibration Method of Micro Earth Pressure Sensors[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0731-0737. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0731

微型土压力传感器标定方法研究^①

李连祥¹, 符庆宏¹, 张海平²

(1. 山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2. 济南西城投资开发集团有限公司, 山东 济南 250300)

摘要:离心模型试验常用微型土压力传感器测量地基或土与结构接触边界上的土压力。传感器使用之前应进行标定。传统的液标或气标方法不能准确反映传感器埋置过程对土体的扰动或传感器周围人为土拱边界条件形成,导致测试结果不甚理想。故针对试验条件,设计制作一套标定微型土压力传感器的方法和装置,以水、粉质黏土和福建标准砂为标定介质,考虑有无刚性靠背两种工作状态对多个传感器进行室内标定,得到标定系数。结果表明:水标未出现卸载滞后,砂标和土标均出现卸载滞后,且表现为非线性;引入滞后比 R 评价微型土压力传感器的滞后性,认为标定介质和传感器类型是影响滞后比的两个主要因素;传感器自身材料特性和几何特性、地基土的制备和传感器放置、加载预压和加卸载循环等对土体密实度、土体强度等的改变、工作介质和状态等对标定结果有影响。建议尽量模拟试验工作介质和工作状态,逐个标定传感器,以得到更准确的土压力测量值。

关键词:微型土压力传感器; 标定方法; 滞后比; 标定系数; 影响因素

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0731-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0731

Study on the Calibration Method of Micro Earth Pressure Sensors

LI Lian-xiang¹, FU Qing-hong¹, ZHANG Hai-ping²

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Jinan West City Investment and Development Group Co., Ltd., Jinan 250300, Shandong, China)

Abstract: Micro earth pressure sensors are often used to measure the earth pressure within a soil mass or the earth pressure acting upon the boundaries of buried structures in centrifuge model tests. As pressure is a contact measurement, disturbances to the soil become inevitable when the sensors are embedded in it; these disturbances affect the soil stress distribution and promote artificial boundary conditions or soil arching. Considering this problem, calibrating each sensor is necessary before the test is conducted and measurements are made. Traditional calibration methods using solution or gas as the calibration medium cannot accurately reflect working conditions. Thus, in this work, a system designed to calibrate micro earth pressure sensors for centrifuge model tests is proposed. Multiple sensors are calibrated in the laboratory considering two working conditions: with a rigid backrest and without the backrest. Water, silty clay, or Fujian standard sand are used as the calibration media. Calibration coefficients are then obtained to establish the relationship between output voltage and earth pressure. The results show that the loading

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51508310); 济南市科技计划项目(201201145)

作者简介: 李连祥(1966—),男,河北唐山人,研究员,博士,硕士生导师,主要从事土力学及岩土工程方面的研究。E-mail: jk_doctor@163.com。

and unloading segments are relatively linear when the calibration medium is water; when the medium is sand or silty clay, however, highly non-linear behavior and large hysteresis are noted. The hysteresis ratio R is defined to evaluate the hysteresis quality, and computed results indicate that the calibration media and sensor types are the two major factors affecting values of R . A number of factors that may affect the calibration results of the sensors are then discussed. The material properties and geometric characteristics of the sensors, the preparation of the foundation soil, changes in soil compactness and soil strength due to preloading and cyclic calibration, the calibration medium, and the working state were found to exert the most significant influences on the calibration coefficients. Therefore, to enable correct measurement of earth pressure, the calibration conditions, especially the calibration media and the working state, must be as similar as possible to the test conditions, and all sensors should be calibrated individually.

Key words: micro earth pressure sensors; calibration methods; hysteresis ratio; calibration coefficient; influence factors

0 引言

离心模型试验是利用土工离心机提供离心力,在模型内部形成超重力场,还原原型应力场。在此基础上研究原型特性,被认为是目前进行岩土工程技术研究中最先进、最有效的试验方法^[1]。微型土压力传感器是离心模型试验中一种常见的测量仪器,被用于测量地基中土压力或土与结构接触边界上土压力。如魏少伟^[2-3]通过在开挖挡墙背后的主动侧布置微型土压力传感器得到土压力随开挖逐渐减小的结论。但传感器需要与土体接触才能测量,埋置仪器过程中不可避免地会对土体扰动,影响土体应力场分布,并在传感器周围形成人为边界条件或促成土拱形成,因此土压力测试一直不甚理想^[4],或仅作为定性分析参考。Weiler 等^[5],Dunnicliff^[6]总结了导致土压力测试不准确的众多因素(如传感器尺寸、宽厚比、材料刚度、环境因素等),特别指出接触面土体应力是否均匀分布也是不容忽视的重要因素,往往使测试结果产生偏差,而通过离心模型试验则偏差进一步放大。如何保证传感器均匀紧密接触土体准确测量土压力是岩土工程物理模拟中的关键问题之一。

微型土压力传感器在使用之前应进行标定,得到输出电信号(V)与表面垂直应力(kPa)的对应关系,即传感器标定系数;离心模型试验得到电信号输出后,再根据标定系数计算土压力值。传感器出厂时的标定系数一般采用液标或气标给出,将传感器放到液压或气压罐中,调节罐内压力,记录信号输出。该方法存在两个显著的缺陷^[7]:其一,液体或气体压力分布均匀,而土中传感器接触面处压力分布不均匀;其二,液体或气体中没有土拱效应,而在土中可能存在。因此,液标或气标方法并不能准确反映土压力传感器的实际工作状态。针对被测土体

进行标定并保证土体紧密接触传感器表面是保证测试准确的必要措施。

本文针对传统液标或气标方法不能符合测试土体标定方法的缺陷,研制标定离心模型试验微型土压力传感器的装置和方法,采用某试验用粉质黏土和福建标准砂为介质,考虑传感器有无刚性靠背两种工作状态对多个传感器进行室内标定,并将结果进行对比分析,为模型试验准确测量土压力提供参考。

1 微型土压力传感器标定

1.1 微型土压力传感器基本构造

实验室内有三种型号微型土压力传感器:TY-,CYB-,CYD12(10)-。第一种为饼状构造,如图 1(a),厚度 1 mm,直径 6.5 mm,量程 500 kPa。后两种为 T 型构造,如图 1(b),厚度 1 mm,直径 6.5 mm,量程分别为 500 kPa 和 200 kPa。三种型号土压力传感器均是以圆形箔式应变计测量迎土面感应膜的变形,电阻 350 Ω ,以全桥形式布置,输入电压 5 V。

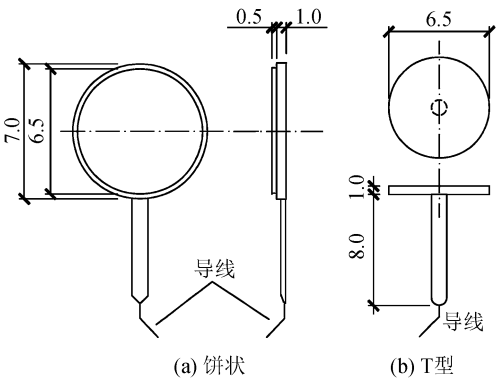


图 1 传感器构造尺寸(单位:mm)

Fig.1 Types and dimensions of the sensors (unit:mm)

1.2 标定装置及原理

实验室微型土压力传感器的工作状态分为两种:一种直接放置地基土中,测量土压力;另一种是通过嵌入结构物,测量土与结构接触边界上的土压力。两者区别在于有无刚性靠背。因此本次标定实验分别考虑这两种工作状态,并进行对比分析。图 2 是考虑有刚性靠背时,饼状和 T 型土压力传感器嵌入结构物所采用方法。

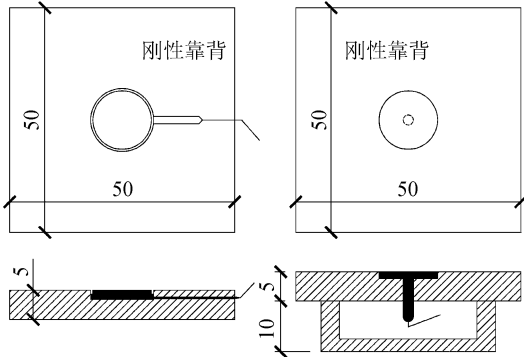


图 2 两种土压力传感器嵌入方法(单位:mm)
Fig.2 Embedding methods of the two kinds of sensors (unit:mm)

标定的装置如图 3,主要由反力架、模型箱、刚性平板、千斤顶和压力环等组成。标定原理是通过千斤顶和反力架向刚性平板施加垂直压力,并均匀传递给地基土体,形成微型土压力传感器界面超载,同时在千斤顶上部安装压力环,力的相互作用说明压力环所反映的力等于千斤顶对刚性平板所施加的压力,应用式(1)可得到传感器处土压力值:

$$P = \gamma h + q = \gamma h + \frac{F + G}{S} \tag{1}$$

其中: γ 为土体重度(kN/m^3); h 为上覆土体厚度(m); F 为压力环所反映的力(kN); G 为压力环、千斤顶、刚性平板、过渡层总重量(kN); S 为刚性平板底面积(m^2)。

实验用压力环规格为 6 kN,模型箱高度 0.2 m,刚性板底面积 $0.026\ 25\ \text{m}^2$,压力环、千斤顶、刚性平板、过渡层等总重量 0.06 kN,则最大标定压力约为 240 kPa。标定 500 kPa 量程土压力传感器时,最大加载至 6 kN(240 kPa),标定 200 kPa 土压力传感器时,最大加载至 4 kN(160 kPa)。实验中应严格控制额定压力值,以避免损坏仪器。

压力环压力与进程对应关系如表 1 所列。进程与压力为线性关系,标定中根据需要可作插值。

1.3 标定步骤

参照文献[8-9]中所介绍的步骤制定本次标定步骤:

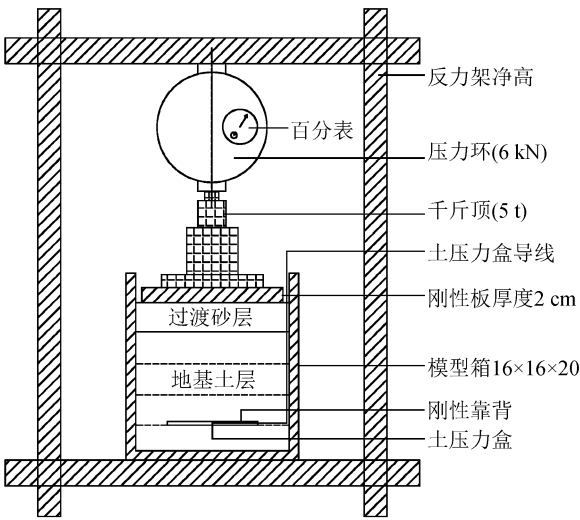


图 3 标定装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of the calibration device

表 1 压力环压力与进程对应关系
Table 1 Relationship between pressure and the process of pressure ring

进程/mm	压力/kN	进程/mm	压力/kN
1.000	0	4.469	3.0
1.687	0.6	5.628	4.0
2.147	1.0	6.798	5.0
3.308	2.0	7.972	6.0

- (1) 模型箱侧壁涂抹凡士林,以减小其摩擦作用。
- (2) 在模型箱中制备地基土体,并安放微型土压力传感器,导线沿箱壁引出。地基土体采用某试验用粉质黏土和福建标准砂制备,制备方法与试验中相同。粉质黏土地基采用分层夯实法,以分层所需土体重量和夯后土体高度为控制指标;砂土地基采用砂雨法,控制落距,达到所需目标相对密实度。
- (3) 制备好的地基模型安放到反力架上,并在模型上方平铺一层 3 cm 标准砂层,质量为 1.3 kg,再在砂层以上平放入刚性平板。
- (4) 在平板以上放置千斤顶和压力环,如图 3 中所示,并接好数据采集仪器。
- (5) 在未施加任何荷载情况下,调节压力环上的百分表读数为 1.000 mm,即对应压力为 0 kN。
- (6) 以额定压力值(量程 500 kPa 时为 6 kN,200 kPa 时为 4 kN)预压三次,每次间隔 5 min,再进行正式实验,目的是消除地基土主要的压缩沉降。
- (7) 按照表 1 分级施加荷载,并记录每一级荷载下的电压输出,直至达到额定压力值。
- (8) 稳定额定压力值 2 min 后,按照与加载相反步骤分级卸荷,并记录每一级荷载下的电压输出,直至完全卸荷。

(9) 保持完全卸荷 2 min 后,进行下一次循环,每次标定一个土压力传感器,循环 3 次。

(10) 重复(1)~(9)实验步骤,标定其他土压力传感器。

2 标定结果及分析

本次实验共标定 9 只微型土压力传感器(表 2)。实验中考虑两种工作条件:一种是无刚性靠

表 2 微型土压力传感器编号及标定条件汇总

Table 2 Summary of micro earth pressure sensors number and calibration conditions

传感器编号	外形	量程/kPa	工作条件		标定介质		
			无刚性靠背	有刚性靠背	水	标准砂	粉质黏土
TY1005846	饼状	500	✓	✓	✓	✓	✓
CYD100018	T 型	500	×	✓	×	✓	×
CYD120045	T 型	500	×	✓	×	✓	×
CYD120047	T 型	500	×	✓	×	✓	×
CYD120056	T 型	500	×	✓	×	✓	×
CYD120095	T 型	500	×	✓	×	×	✓
CYB120052	T 型	200	×	✓	×	×	✓
CYB120061	T 型	200	×	✓	×	×	✓
CYB120064	T 型	200	×	✓	×	×	✓

背,模拟测量地基土压力;另一种是有刚性靠背,模拟测量土与结构接触边界上土压力。标定介质分为水、福建标准砂和某试验用粉质黏土。考虑到 T 型土压力传感器防水性能和结构构造,未能进行水标实验和无刚性靠背实验。

2.1 循环加卸载标定曲线

图 4 给出了微型土压力传感器 TY1005846 的加卸载标定曲线,为了更清晰地表现结果,每一状态下只取一次加卸载标定值。砂标时控制相对密度为 70%。由图可知:(1)水标结果未出现卸载滞后,而砂标和土标均出现卸载滞后性,且表现为非线性,原因是土体摩擦导致土颗粒“锁定”,荷载虽减小,但土体仍会保留高一级的荷载作用,一旦完全卸荷,这种现象即消失^[7],这在所有加卸载循环周期中都有表现;(2)土标得到的标定系数小于砂标结果,但都大于水标结果;(3)有刚性靠背时的结果大于无刚性靠背时

的结果,说明传感器的标定介质和工作状态对结果影响显著。因此室内标定应尽量与试验环境条件(即试验土体)和工作状态(有无刚性靠背)相一致。

图 5、6、7 是 CYD 型 500 kPa 和 CYB 型 200 kPa 微型土压力传感器三次加卸载循环标定实验结果。为了使结果易于对比区分,将第二、三次标定初始电压分别人为设定为 0.2 mV、1.5 mV、2 mV 和 0.4 mV、3 mV、4 mV,不会影响标定系数。砂标实验中控制相对密度 85%。综合图 5 和 6,可知:(1)对于同一个传感器,在相同工作条件和标定介质中,多次循环标定结果相近,表明标定结果不会随标定循环次数的增加而显著变化;(2)对于同一种型号传感器 CYD 型 500 kPa,在同一工作状态(即刚性靠背),砂标滞后环较土标结果大,即砂标滞后性更明显。再次说明室内标定应尽量与试验环境条件相一致。

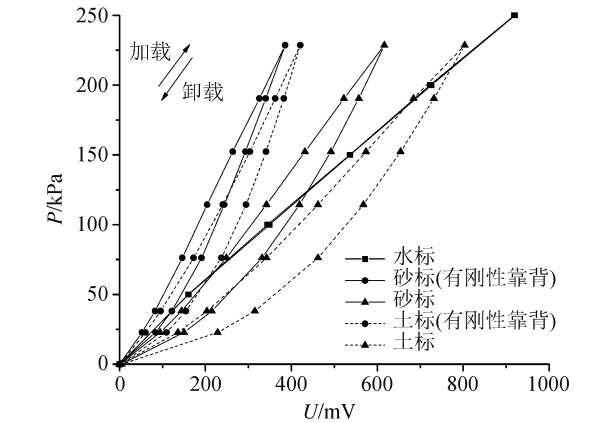


图 4 TY1005846 在不同介质下加卸载标定结果
Fig.4 Calibration results of TY1005846 in different media

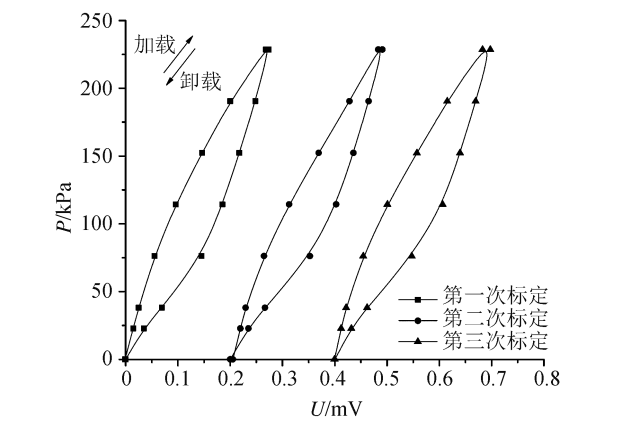


图 5 CYD120047 砂土中循环标定结果
Fig.5 Cyclic calibration results of CYD120047 in sand

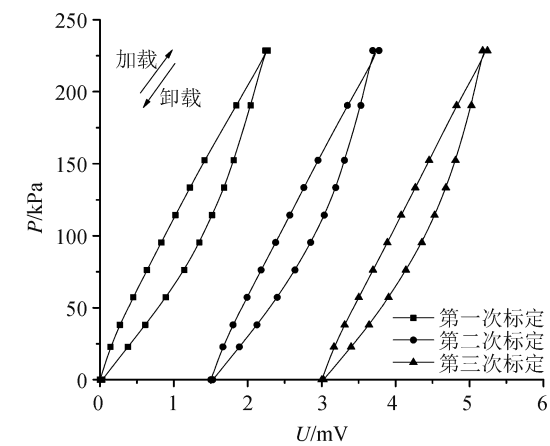


图 6 CYD120095 粉质黏土中循环标定结果
Fig.6 Cyclic calibration results of CYD120095 in silty clay

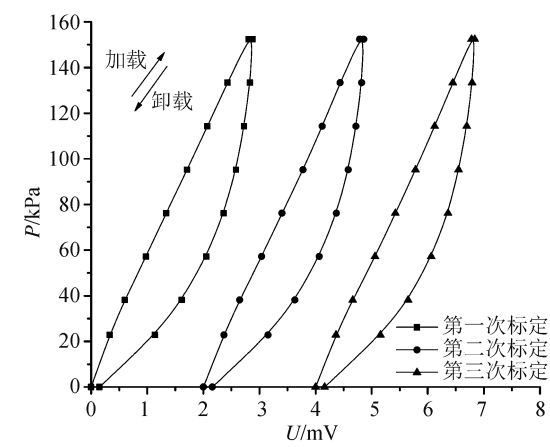


图 7 CYB120061 粉质黏土中循环标定结果
Fig.7 Cyclic calibration results of CYB120061 in silty clay

2.2 滞后比 R

对比图 6 和 7,卸载时土体都表现为滞后性,表

面上是 CYB 型 200 kPa 的滞后环较 CYD 型 500 kPa 滞后环大,但 200 kPa 的标定压力较 500 kPa 的标定压力小。如何评价滞后性应当引入一个统一的标准。

定义卸载压力滞后最大值与对应加载压力的比值为滞后比 R,即:

$$R = \frac{\Delta P_{\max}}{P_0} = \frac{(P_0 - P')_{\max}}{P_0} \tag{2}$$

其中: P_0 为加载压力; P' 为相同电信号输出时卸载压力值。

滞后比定义如图 8 所示。

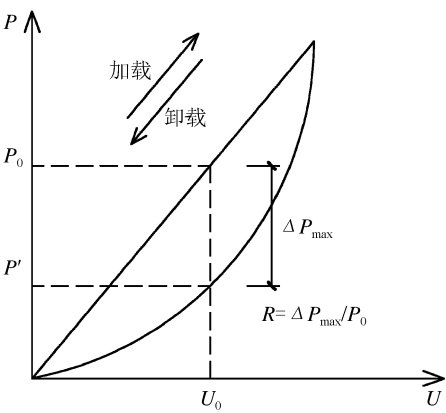


图 8 滞后比定义
Fig.8 Definition of hysteresis ratio

计算图 6 和 7 中滞后比分别为: 0.354 2 和 0.551。初步认为同一工作状态和同一标定介质,外观相同的不同类型传感器,其滞后性不同。

为进一步探究滞后比的影响因素,汇总了本次标定实验滞后比的计算结果(表 3)。

表 3 微型土压力传感器滞后比计算结果

Table 3 Computed results of hysteresis ration R

标定介质	TY 型		CYD-500 kPa 系列	CYB-200 kPa 系列
	有刚性靠背	无刚性靠背	有刚性靠背	有刚性靠背
福建标准砂	0.505 7	0.508 9	0.737 1/0.323 1/0.493 6/0.279 8	-
粉质黏土	0.511 1	0.513 3	0.354 2	0.55 1/0.505/0.506

通过比较计算结果得到以下结论:

(1) TY-型在两种不同标定介质中结果有差别,说明标定介质是滞后比的一个重要影响因素;但同种介质中两种工作状态影响不大,且 CYD-500 kPa 系列和 CYB-200 kPa 系列结果也呈现相同规律,说明工作状态不是影响滞后比的主要因素。

(2) TY-型和 CYD-500 kPa 系列的比较可知,尽管是同一种标定介质和同一种工作状态,外形不同,滞后比差别显著,而 CYD-500 kPa 系列和 CYB-

200 kPa 系列的比较说明外形相同、类型不同的传感器滞后比也差别显著。说明传感器类型是滞后比的另一个影响因素。

综上,影响滞后比的主要因素是标定介质和传感器类型,而工作状态影响小。

2.3 标定系数

标定实验的目的是得到微型土压力传感器电压输出与表面垂直应力的关系,以标定系数 K 描述。本次实验中标定系数是加载阶段标定数据的最小二

乘法线性拟合结果,是取三次循环的平均值得到的。
表 4 列出了所有传感器的标定系数。

表 4 微型土压力传感器标定系数汇总 (单位:kPa/mV)
Table 4 Summary of micro earth pressure sensors calibration coefficients (unit:kPa/ mV)

传感器编号	标定介质	工作状态	
		无刚性靠背	有刚性靠背
TY1005846	水	0.269 4	-
	标准砂	0.381 3	0.605 8
	粉质黏土	0.293 9	0.548 4
CYD100018	标准砂	-	176.509
CYD120045	标准砂	-	709.190
CYD120047	标准砂	-	730.655
CYD120056	标准砂	-	383.705
CYD120095	粉质黏土	-	99.342
CYB120052	粉质黏土	-	51.333
CYB120061	粉质黏土	-	53.730
CYB120064	粉质黏土	-	49.913

* CYD120056 标定系数与同类型其他传感器明显不同,可能是标定时放置不垂直导致。

从表 4 中可知:标定介质和工作条件不同,微型土压力传感器的标定系数会有明显不同,因此为了得到更准确的土压力值,标定时应尽量模拟试验时的环境条件,特别是上述两个条件;另外,同一种型号微型土压力传感器标定由于生产厂家生产条件等一致,因此其标定系数也较为接近。为节省时间,若试验中用量大,可依据型号有选择性的标定,但笔者建议尽量逐个标定。

3 影响标定结果的因素探讨

(1) 微型土压力传感器自身材料特性和几何特性影响。陈春红^[9]、徐光明^[4]、Egan and Merri-field^[10]等认为土压力传感器厚度和直径之比不大于 0.2 时,测量才较为准确。但笔者认为对于嵌入结构物内部测量界面处土压力的传感器而言,厚径比并没有那么重要。通过对上文中两种工作状态的比较,嵌入式的测量结果更理想,故建议尽量选择这种埋置方式。

(2) 地基土的制备和传感器放置对标定结果有影响。微型土压力传感器需要与土体接触测量,在埋置仪器过程中不可避免地会对土体扰动,影响土体应力场分布,并在传感器周围形成人为边界条件或促成土拱形成,同时传感器放置水平或垂直度,都会影响标定和实验结果,而且由于离心模型试验的“放大”效应,影响可能更突显。当标定时的周围介质状态和试验接近时,认为标定结果能够反映试验结果,因此建议标定工作介质和地基土制备都要与试验

相同。
(3) 加载预压和加卸载循环都会改变土体密实度,土体强度等,对后续标定结果稍有影响。除此之外,环境因素特别是温度对试验结果也会有影响,且其不可避免。

4 结论与讨论

(1) 设计了一套标定离心模型试验所用微型土压力传感器的方法和装置,采用某试验用粉质黏土和福建标准砂为介质,考虑传感器有无刚性靠背这两种工作状态对多个传感器进行室内标定,得到输出电信号(V)与表面垂直应力(kPa)的对应关系,即传感器标定系数,可用于将离心模型试验得到的电信号输出转化为真实土压力值。

(2) 通过对不同工作介质和工作状态的对比分析得到以下结论:水标结果未出现卸载滞后,砂标和土标均出现卸载滞后,且表现为非线性;土标得到的标定系数小于砂标结果,但两者都大于水标结果;有刚性靠背时的结果大于无刚性靠背时的结果。

(3) 引入滞后比 R 评价微型土压力传感器砂标或土标结果的滞后性,计算得到各传感器标定滞后比。通过比较可知:标定介质和传感器类型是影响滞后比的两个主要因素,而传感器工作状态对滞后比影响小。

(4) 标定介质和工作条件不同,微型土压力传感器的标定系数会有明显不同,因此为了试验得到更准确的土压力值,建议标定时应尽量模拟试验环境条件,特别是工作介质和工作状态,并对传感器进行逐个标定。

参考文献(References)

[1] 包承钢.我国岩土离心模拟技术的应用与发展[J].长江科学院院报,2013,30(11):55-71.
BAO Cheng-gang.Application and Development of Centrifugal Modeling Technology for Geotechnical Engineering in China [J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013,30(11):55-71.(in Chinese)
[2] 魏少伟.基坑开挖对坑底已建隧道影响的数值与离心试验研究[D].天津:天津大学,2010.
WEI Shao-wei.Centrifuge and Numerical Tudies of the Influence of Basement Excavation on the Underlying Tunnel[D].Tianjin:Tianjin University,2010.(in Chinese)
[3] 马险峰,刘光云,徐前卫,等.软土超深基坑端头开挖效应的模拟试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(增刊):505-508.
MA Xian-feng, LIU Guang-yun, XUu Qian-wei, et al. Model Tests on Excavation Effect of Deep Foundation Pit in Soft Soil

[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (Supp.): 505-508. (in Chinese)

[4] 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 Guang-ming, CHEN Ai-zhon, 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)

[5] 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.

[6] Dunncliff J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance[R]. John Wiley & Sons, New York, 1988, 577.

[7] Joseph F. Labuz, Brent Theroux. Laboratory Calibration of Earth Pressure Cells[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2005, 28(2): 188-196.

[8] GB/T 13606-2007, 岩土工程用钢弦式压力传感器[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
GB/T 13606-2007, Vibrating Steel Wire Pressure Transducer for Geotechnical Engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)

[9] 陈春红,刘素锦,王钊.土压力盒的标定[J].中国农村水利水电,2007(2):29-32.
CHEN Chun-hong, LIU Su-jin, WANG Zhao. Calibration of Earth Pressure Cell[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2): 29-32. (in Chinese)

[10] Egan D, Merrifield C K. The Use of Miniature Earth Pressure Cells in a Multi-gravity Environment [C]//Centrifuge 98, Kimura, [s.n], 1998: 55-59.

[11] Talesnick M. Measuring Soil Contact Pressure on a Solid Boundary and Quantifying Soil Arching[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2005, 28(2): 171-179.



(上接 730 页)

LI Zhao-yan, WANG Yun-long, CAO Zhen-zhong, et al. Feasibility of Liquefaction Prediction Method in China's Seismic Code to Xinjiang Region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Supp. 2): 396-400. (in Chinese)

[15] 李兆焱,袁晓铭,曹振中,等.标贯法对巴楚地震液化场地适用性及误判原因分析[J].世界地震工程,2010,26(增刊):282-286.
LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, et al. SPT Method's Feasibility for Liquefaction Decision of Sites and Analysis of Its Misjudge in Bachu Earthquake[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2010, 26 (Supp.): 282-286. (in Chinese)

[16] 袁晓铭,孙锐.我国规范液化分析方法的发展设想[J].岩土力学,2011,32(增刊2):351-358.
YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Proposals of Liquefaction Analytical Methods in Chinese Seismic Design Provisions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Supp. 2): 351-358. (in Chinese)

[17] 王兰民,袁中夏,汪国烈,等.饱和黄土地液化的工程初判和详判指标与方法研究[J].地震工程学报,2013,35(1):1-8.
WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Guo-lie, et al. Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 1-8. (in Chinese)

[18] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[19] 刘恢先.唐山大地震震害[M]. 北京:地震出版社, 1989.
LIU Hui-xian. Disaster of Great Tangshan Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese)