

文章编号: 1000-7598(2013)12-3633-08

土压力传感器在硬土介质中的非线性响应分析

张立祥^{1,2}, 罗强¹, 张良¹, 刘钢¹, 魏永权¹, 翁骏祺¹

(1. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 成都 610072)

摘要: 为掌握土压力传感器置于硬土介质中呈现的非线性响应特性, 建立了传感器与土介质的相互作用模型, 运用有限元分析了满足匹配误差稳定所需的传感器与土介质的模量比条件。进行了传感器的单体标定和级配碎石土介质标定试验, 探讨了传感器非线性响应的主要影响因素。计算与试验表明, 目前国内主流的双膜土压力传感器在量测硬土介质中的土压力时, 由于模量偏小标定曲线非线性显著; 土压力传感器单体标定曲线线性度较高且其模量基本稳定, 表明土介质的模量变化是引起标定曲线非线性的主要因素; 通过将传感器置于与使用环境相近的土介质中进行标定, 并采用非线性修正可明显提高硬土介质中土压力量测的准确性。

关键词: 土压力传感器; 匹配误差; 硬土介质; 非线性响应; 修正方法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Analysis of nonlinear response of soil pressure transducer in high-modulus soil

ZHANG Li-xiang^{1,2}, LUO Qiang¹, ZHANG Liang¹, LIU Gang¹, WEI Yong-quan¹, WENG Jun-qi¹

(1. MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Consulting Group, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to grasp the nonlinear response characteristics of soil pressure transducer in high-modulus soil, based on the interaction of model of transducer with soil, the reasonable modulus ratio of transducer and soil medium was studied with FEM. And the main factors about nonlinear response of transducer was studied by monomer transducer calibration test and transducer calibration in graded broken stone medium. Based on the results of FEM and calibration test, some conclusions are drawn as follows. The modulus of domestic mainstream transducer is too low to satisfy the reasonable modulus ratio at present when used in high-modulus soil meadium, which leads to the significant nonlinear characteristics of calibration test curve. The monomer test curve is highly linear and the modulus of transducer is stable, which shows that the nonlinear characteristics of calibration test curve is mainly caused by the soil modulus's change. The test precision can be significantly increased by calibrating the transducer in the same state soil as field test and correcting the calibration results nonlinearly.

Key words: soil pressure transducer; matching error; high-modulus soil; nonlinear response; correction method.

1 引言

土压力的量测是土力学理论和试验研究经常遇到但至今尚未很好解决的一个问题^[1-2]。实际工程问题的解决和科学研究结论的得出, 多依赖于岩土工程试验中土压力传感器的直接量测结果。因此, 如何利用土压力传感器准确测出岩土工程中某一部位的土压力, 在土力学与岩土工程等相关领域具有重要现实意义^[3]。

土压力传感器与周围土介质在物理力学性质上

的较大差异势必改变土介质的原存应力场, 引起应力的重新分布。传感器量测的土压力 P_t 与未扰动时该点的原存土压力 P_0 并不相同, 两者之间的误差 $(P_t - P_0)/P_0$ 称之为匹配误差 β ^[4]。针对土压力传感器匹配误差产生的原因及其特性, 国内外在理论和试验方面已做了较多研究, 一致认为, 传感器的厚径比 H/D 及其与土介质的模量比 E_g/E_s 是影响传感器匹配误差的核心因素^[4-9]。文献^[10-11]指出: 合理的土压力传感器, 其匹配误差应是一个较小的稳定值。已有研究表明, 较小的 H/D 与较大的 $E_g/$

收稿日期: 2012-09-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专题项目 (No. SWJTU12ZT05); 973 计划项目 (No. 2013CB036200)。

第一作者简介: 张立祥, 男, 1988 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事道路工程及土工试验新技术等方面的研究工作。E-mail: zlxswjtu@foxmail.com

E_s 将会使传感器的匹配误差保持在一个较小的稳定值, 这对于通过量测手段获得土介质内某一部位的真正压力是有利的。对于传感器尺寸与模量比对匹配误差的影响, 文献[12]基于正交设计理论, 通过有限元计算分析了在模量比较小时, 传感器厚度与直径以及其交互作用对匹配误差的影响相对而言不明显, 影响匹配误差的核心因素是传感器与土介质模量比的变化。刘宝有^[5]、曾辉等^[11]的研究亦表明, 保持较大的模量比是使传感器的匹配误差保持在一个稳定值的有效方法, 因为, 在较大模量比时, 匹配误差对模量比的变化不敏感, 能确保量测值的相对稳定性。

然而从实际应用的角度来讲, 由于测试灵敏度与传感器综合变形模量的矛盾不可调和, 要想获得综合变形模量大、测试灵敏度高的土压力传感器是比较困难的。通过对国内目前大量使用的 4 个生产商生产的 2 种结构形式(单膜、双膜)、3 种感应方式(钢弦式、油腔式、电阻式)的近 40 个土压力传感器的试验数据进行统计分析发现, 双膜平动式传感器的综合变形模量多在 4.9~33.0 MPa 之间变化, 平均值约为 11.3 MPa; 单膜土压力传感器模量相对偏高, 在 90.8~227.0 MPa 范围变化, 平均综合变形模量约为 157.3 MPa。

另一方面, 随着工程设计标准的提高, 测试介质的变形模量也由软黏土的几个兆帕到级配碎石土的上百兆帕不等, 如高速铁路基床结构大量采用的级配碎石土等粗颗粒填料在压密状态下的变形模量已达到 180 MPa 左右^[13], 现有土压力传感器已明显不适应此类土介质的测量。尽管上述统计数据表明, 单膜土压力传感器模量明显高于双膜土压力传感器, 但单膜土压力传感器只有一层受力膜片, 它的变形直接被感应片感受并反映为传感器的输出信号, 故膜片的变形状态不仅与受力大小有关, 而且与力的作用方式有关^[14-15]。因此, 单膜土压力传感器即便在流体标定中线性较好, 在散体介质中应用时因其对介质状态特别敏感, 其测试准确度低、重复性差、回差大等问题不可避免。而双膜平动式土压力传感器由于其与介质接触面为刚性面, 故其自身结构特点就从原理上消除了单膜土压力传感器因对介质状态过于敏感而造成的测量准确性误差和重复性误差^[14]。据统计, 现有高模量介质多为级配碎石土介质或是复合地基碎石垫层等, 这类介质粒径变化较大, 单膜土压力传感器用于这类介质中将因其对介质状态过于敏感而很难保证测试的准确性和可重复性。故这类介质中土压力的测试仍选用双膜

土压力传感器, 其测试数据更为可信。

通过上述分析可以发现, 现有土压力传感器综合模量相较于测试介质明显偏小, 双膜土压力传感器尤为显著。要想通过使土压力传感器与测试介质的模量比维持在一个较高值来确保测量值的稳定性是比较困难的。在实际应用中为了获得较为真实的测试值, 需对土压力传感器置于被测介质中进行有效的标定, 文献[2, 16-17]均通过工程实例说明了土压力传感器的标定对获得真实结果的重要性。

本文通过有限元计算与理论分析探讨土压力传感器匹配误差的影响因素及匹配误差随各因素的变化规律, 并确定双膜平动式土压力传感器在测试过程中匹配误差保持稳定所需的条件。在此基础上, 通过对土压力传感器直接施加均布荷载, 并测得其在给定荷载下的变形, 得出传感器的综合变形模量, 并通过传感器的单体标定试验以及基于环圈仪的级配碎石土介质标定试验, 测得传感器输入压力与输出信号(电阻式传感器输出信号为应变, 钢弦式传感器输出信号为频率)的关系以及在级配碎石土中施加荷载与输出信号的关系。基于有限元计算结果以及标定试验数据, 对土压力传感器在高模量硬土介质中标定曲线所呈现出的非线性特性及其原因进行剖析, 并提出在现有技术条件下获得更为准确的土中应力测试的非线性修正方法。

2 土压力传感器匹配误差稳定条件

国内外现有研究表明, 厚径比 H/D 与模量比 E_g/E_s 是影响匹配误差的两个核心因素。应用大型通用有限元软件 Adina 对圆形双膜平动式土压力传感器与土介质的相互作用特性进行了数值模拟, 将传感器简化为两块横列刚性板中夹垂向弹簧的结构形式, 传感器和土介质的接触面设置摩擦单元。有限元模型的具体参数及模型的合理性验证与文献[12]一致。通过有限元计算和理论公式的对比分析, 探讨了匹配误差随 H/D 与 E_g/E_s 的变化规律, 并在此基础上确定了匹配误差保持稳定的条件。

2.1 模量比条件

在分析 E_g/E_s 对匹配误差 β 的影响时, 计算假定如下: 传感器为圆柱形, 在压力作用下其工作面作平行移动; 在模量比的变化过程中其尺寸不变, 厚度 $H=25$ mm, 直径 $D=180$ mm; 土介质为级配碎石, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则, 变形模量 $E_s=180$ MPa, 泊松比 $\mu_s=0.25$, 密度 $\rho=2.2$ g/cm³, 黏聚力 $c=100$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=42^\circ$; 土介质顶面施加均布荷载 $p=200$ kPa; 模量比的变化通过变化

弹簧刚度来实现。模量比取值如表 1 所列。

表 1 模量比取值
Table 1 Parameter values of E_g/E_s

E_g/E_s	E_g / MPa	E_g/E_s	E_g / MPa
0.05	9	0.80	540
0.10	18	1.00	900
0.30	54	3.00	540
0.50	90	5.00	900

前苏联科学家巴兰诺夫假定传感器的工作面在压力作用下平动，得出自由场中土压力传感器的理论公式^[5]为

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{1 - \frac{E_s}{E_g}}{\frac{\pi(1 - \mu_s^2) D}{4} \frac{D}{H} + \frac{E_s}{E_g}} \quad (1)$$

有限元计算所采用的传感器简化模型同样以传感器的垂向变位为平移作为前提条件。故可将有限元计算结果与巴兰诺夫提出理论解进行对比分析，以进一步验证该模型的合理性和计算结果的可靠性。取与有限元计算相同的计算参数，由式(1)可得出匹配误差的理论值，其与有限元计算值的比较如图 1 所示。

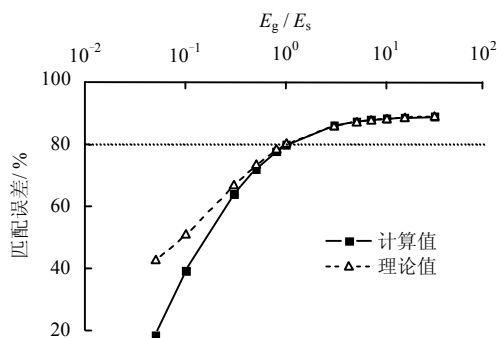


图 1 匹配误差与模量比关系曲线
Fig.1 Curves of matching error of E_g/E_s

由图可看出：(1) 有限元计算得到的匹配误差与理论值，在 $E_g/E_s > 1$ 时，具有较好的吻合性，而 $E_g/E_s < 1$ 时，计算值与理论值差别相对较大，这是因为理论分析假定传感器比土坚硬，其变形是在自由受压条件下产生的，但 $E_g/E_s < 1$ 时，传感器模量小于土介质模量，与理论公式假设不相符合，故 $E_g/E_s < 1$ 时，有限元计算结果更能反映实际情况；(2) $E_g/E_s < 1$ 时，由于土拱效应的存在，匹配误差为负值，即土压力传感器测得的土压力小于测试位置未放置土压力传感器前的真实应力，且

E_g/E_s 越小，匹配误差越大，测试值与真实值的差异越显著；(3) $E_g/E_s = 1$ 时，匹配误差为 0，土压力传感器与测试介质完全匹配，测试值等于真实应力，这是最理想的情况，但由于土的种类繁多且即便是一种土在加载过程中模量也在发生变化，故想保持土压力传感器与测试介质模量完全匹配基本是不可能的；(4) $E_g/E_s > 1$ 时，由于存在应力集中效应，匹配误差大于 0，即测量压力大于真实压力，且随着 E_g/E_s 的增大，匹配误差相应增大，但也逐渐趋于稳定， E_g/E_s 大于一定值后^[12] ($E_g/E_s \geq (8 \sim 12)$)，匹配误差对模量比的变化不再敏感，即可以保证匹配误差在测试过程中的稳定性。

2.2 厚径比影响

分析 H/D 对匹配误差的影响时，计算所采用的介质以及荷载与分析 E_g/E_s 对匹配误差影响时的相同（参见第 2.1 节）。由于 $E_g/E_s > 1$ 与 $E_g/E_s < 1$ 时匹配误差呈现出不同的特性，故传感器 E_g/E_s 取 0.1、5.0，传感器直径 $D = 180$ mm。厚径比的变化通过变化传感器厚度 H 来实现。根据刘宝有^[3]、曾辉等^[4]的研究表明，传感器的 H/D 宜小于等于 0.1~0.2，故在 $D = 180$ mm 的情况下， H 取到 60 mm 已足够。 H/D 在 0.08~0.33 变化，其对应的匹配误差 $\beta_{0.1}$ 、 $\beta_{5.0}$ 计算结果如图 2 所示。

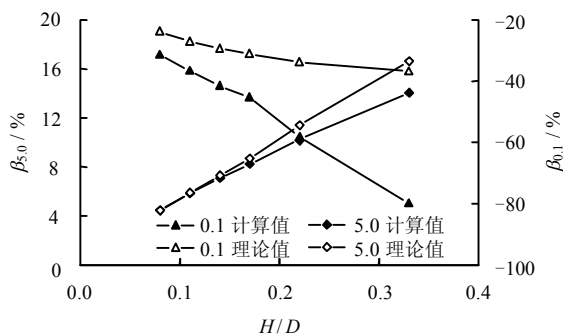


图 2 匹配误差与厚径比关系曲线
Fig.2 Curves of matching error of H/D

由图可知：(1) 匹配误差的正负由模量比惟一确定， H/D 仅影响匹配误差绝对值的大小；(2) 不论 $E_g/E_s > 1$ 还是 $E_g/E_s < 1$ ，匹配误差的绝对值均表现出随 H/D 的增加呈线性增加的规律，Pcattic 等^[8]在 1951 年得出的当传感器的 $H/D < 0.5$ 时，匹配误差随 H/D 呈线性增加的结论相印证。

通过上述分析表明：匹配误差的绝对值随 H/D 的增加基本呈线性增加，且土压力传感器在测试过程中其尺寸的变化基本可忽略，测试过程中影响匹配误差的核心是 E_g/E_s 的变化。要满足匹配

误差稳定性,需 $E_g/E_s \geq 8 \sim 12$, 但由试验分析可知, 现有双膜土压力传感器模量 E_g 多在 10 MPa 左右, 而高速铁路基床表层对填料压实度要求较高, 级配碎石土介质模量 E_s 可达 180 MPa, E_g/E_s 严重偏小, 难以满足匹配误差稳定所需的模量比要求。

3 单体标定与硬土介质标定试验研究

通过单体标定试验得到的标定系数仅能反映传感器表面所受压力与传感器输出信号间的关系, 并未考虑传感器置入土介质后因模量不匹配所产生的土拱效应或应力集中而导致传感器表面实际所受压力的失真。故若直接将单体标定试验得到的标定系数用于现场测得的输出应变 ε' (频率 f) 换算求压力, 将会产生极大的误差。文献[16]在湖北省枝江清水溪水库坝体内某部位的土压力测试值较理论计算得到的土压力差异悬殊, 就是因为直接采用土压力传感器单体标定数据用于现场测试换算所致。因此, 对土压力传感器在使用前将其放置于现场使用环境相同的土介质中进行介质标定, 已成为业内同行的共识^[2, 16-17]。

目前在对土压力传感器进行标定时, 多是通过土介质标定试验得到施加荷载 P_0 与输出信号 (输出应变 ε' 或频率 f) 的关系曲线, 然后采用线性回归得到该标定曲线的斜率来作为土压力传感器在土介质中的标定系数^[18], 在现场测试时通过测得的传感器的输出信号乘上该标定系数来换算得到测试位置的真实土压力。这种处理方法假定在加载过程中匹配误差保持不变, 这在 E_g/E_s 比较大、匹配误差较稳定时是合理的。但若 E_g/E_s 比较小 ($E_g/E_s < 8$) 时, 匹配误差对模量比的变化非常敏感, 土介质模量随荷载水平的变化所导致的极小的模量比变化也会引起较大的匹配误差变化, 从而使得土压力传感器的介质标定曲线呈现出显著的非线性, 在这种情况下, 采用单一的标定系数来表征土压力传感器在土介质中的真实土压力与测试值之间的关系就不再适应。因此, 对目前常用的土压力传感器进行单体标定并在硬土介质中进行介质标定, 探讨其标定曲线非线性特性与测试介质非线性特性的关系, 对提高土压力传感器的测试结果的可靠性具有显著意义。

3.1 传感器单体标定试验

为得到土压力传感器表面实际所受压力与输出信号的关系, 一般多采用流体标定试验。但由于双膜土压力传感器自身的结构特点, 其测试值只与承力面承受荷载合力的大小有关, 而与荷载在承力面上的分布情况无关^[14-15], 故采用刚性板直接加载与

流体介质中标定并无明显差别。因而在土介质标定试验前先将土压力传感器采用与土介质标定相同的桥压和采集系统进行了单体标定。

单体标定试验系统主要由加载架、量力环、刚性加载块、液压千斤顶与底座 5 部份组成。通过液压千斤顶与刚性加载块实现对传感器感应面法向均布荷载的施加, 施加荷载 P_l 由量力环测得, 并通过读数仪测得传感器对应的输出信号, 即可得到传感器表面所受压力 P_l 与输出信号的关系。

试验中针对每个传感器分别进行 3 次加-卸载循环, 各级荷载输出信号取平均值, 即可得出传感器表面的输入压力与输出信号 (输出应变 ε' 或频率 f) 的换算关系 (见图 3), 对其进行线性拟合, 可得传感器输入压力与输出信号间的关系式: $P_l = K_0 \varepsilon'$ 或 $P_l = K_0 f$, K_0 为标定系数。同时, 通过百分表测得传感器表面在感应面法向均布荷载下的位移, 根据测得的位移及传感器的尺寸可得出传感器自身的综合应变 ε , 对测得的荷载-应变曲线 (见图 4(a)) 进行线性拟合, 便可换算得到传感器的综合压缩模量 E_g , 试验结果如表 2 所列。

3.2 传感器土介质标定试验

单体标定试验仅获得了 P_l 与输出信号之间的对应关系, 而对土压力传感器进行土介质标定的关键是为了获得测试介质中真实应力 P_0 与传感器输出信号之间的对应关系, 由于土介质的土拱效应和应力集中现象的存在, 传感器的置入不可避免地改变了土介质的原存应力场, 使得测试值偏大或偏小, 导致匹配误差。故在对土压力传感器进行单体标定后, 尚需在与现场使用状态一致的测试土介质中对土压力传感器进行标定, 经过文献[19]的研究, 环圈仪在土压力传感器标定时具有显著的可靠性和经济性。环圈仪标定试验系统如图 5 所示。

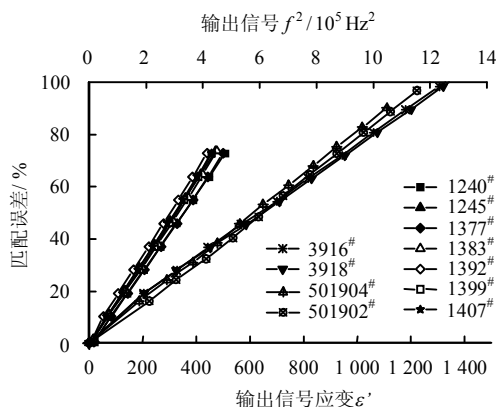


图 3 传感器单体标定曲线

Fig3 Monomer sensor calibration curves

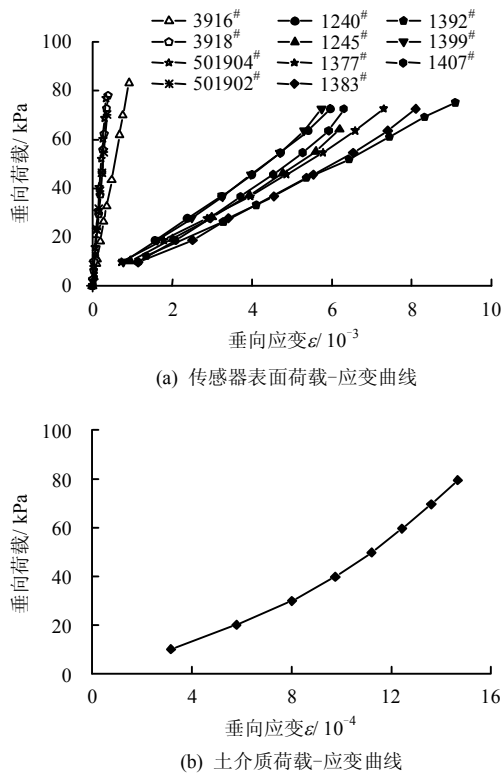


图 4 传感器与土介质 p - ε 曲线
Fig.4 p - ε curves of sensor and soil

表 2 传感器单体标定试验结果
Table 2 The results of monomer sensor calibration test

出厂编号	传感器类型	标定系数 K_0	等效综合模量 E_g / MPa
75 [#]	双膜油腔式	5.84×10^{-5}	6.16
1240 [#]	双膜电阻式	1.42×10^{-4}	11.82
1245 [#]	双膜电阻式	1.56×10^{-4}	10.18
1377 [#]	双膜电阻式	1.43×10^{-4}	9.47
1383 [#]	双膜电阻式	1.52×10^{-4}	9.03
1392 [#]	双膜电阻式	1.66×10^{-4}	8.32
1399 [#]	双膜电阻式	1.56×10^{-4}	12.43
1407 [#]	双膜电阻式	1.58×10^{-4}	11.93
3916 [#]	单膜钢弦式	8.10×10^{-8}	90.81
3918 [#]	单膜钢弦式	7.99×10^{-8}	201.72
501902 [#]	单膜钢弦式	1.01	189.39
501904 [#]	单膜钢弦式	0.98	227.15



图 5 环圈仪标定试验系统
Fig.5 The ring-loop calibration test system

土介质标定试验采用目前广泛用于高速铁路路基表层填料的级配碎石土进行应力测试。通过筛分试验得到其颗粒组成,最大粒径未超过 40 mm, 20~40 mm 的颗粒含量为 17.8%, 大于 2 mm 的颗粒含量为 73.5%, 小于 0.075 mm 的颗粒含量为 6.8%, 不均匀系数为 68, 曲率系数为 4.6; 通过标准重型击实试验测得其最大干密度为 2.4 g/cm^3 , 最佳含水率为 5%; 试验中实测含水率在 3.8%~4.8% 之间, 压实系数在 0.91~0.93 之间, 通过在加载板上安装位移百分表测得介质压缩模量在 47~68 MPa 之间, 平均压缩模量约为 58 MPa。

试验中通过液压千斤顶进行加载, 通过量力环测出给定的荷载 P_0 , 并通过读数仪采集传感器的输出信号 (输出应变 ε' 或频率 f) 可得出 P_0 - ε' 或 P_0 - f 曲线。根据传感器单体标定得到 K_0 , 可换算得到在 P_0 荷载下埋置于土介质中的土压力传感器表面所受的荷载 P_t 与其输出信号的转换关系, 可绘出每个传感器的 P_t - ε' 或 P_t - f 曲线。通过对试验中所采用的 12 个土压力盒标定曲线进行统计分析可知, 单膜土压力传感器 ($E_g/E_s > 1$) 与双膜土压力传感器 ($E_g/E_s < 1$) 由于其模量差别较大, 其标定曲线有显著差别。故根据模量比不同, 其曲线基本形态分两类, 如图 6 所示。

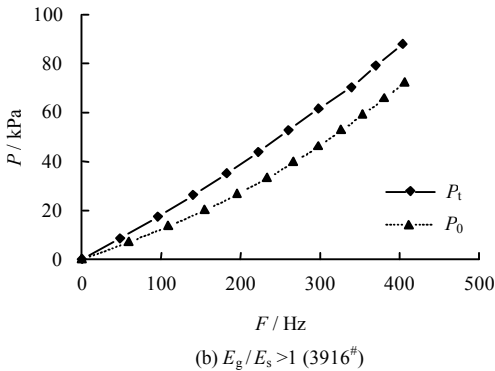
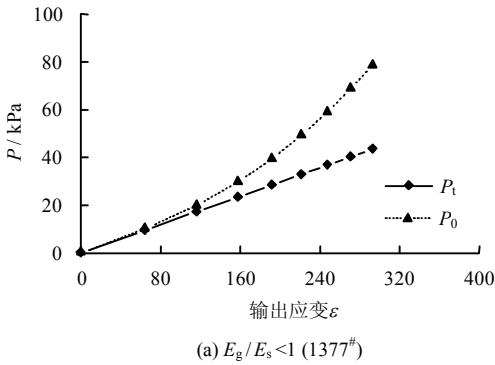


图 6 不同模量比下标定曲线
Fig.6 Curves of calibration tests with different E_g/E_s

据图可以看出:(1)当 $E_g/E_s < 1$ 时(见图 6(a)), 对应于同一输出应变, 通过单体标定曲线换算得到的 P_t 明显小于土介质标定曲线换算得到的 P_0 , 即测试土压力小于真实土压力。这是由于标定用级配碎石土模量平均值约为 58 MPa, 而试验所用双膜土压力传感器模量在 6~12.5 MPa 间, 其 E_g/E_s 在 0.10~0.22 之间, 根据第 1.1 节分析可知, 由于土拱效应, 其匹配误差应小于 0, 即测试值远小于真实土压力。

(2) 当 $E_g/E_s > 1$ 时(见图 6(b)), 对应于同一输出压力, 通过单体标定曲线换算得到 P_t 明显大于 P_0 , 即测试值大于真实土压力。这是由于单膜土压力传感器模量在 90~227 MPa 间变化, 其 E_g/E_s 在 1.6~3.9 之间, 由于应力集中现象, 匹配误差应大于 0, 即测试值大于真实压力。(3) 由图 6(a)与图 6(b)对比分析可以看出, 单膜土压力传感器在介质中标定曲线的线性相关性明显高于双膜土压力传感器, 因模量比越大, 匹配误差对模量比的变化越不敏感, 即匹配误差相对越稳定, 其介质标定曲线线性相关性亦越好。但单膜土压力传感器因其受介质粒径状态影响较大, 其可重复性较差, 并不适合此类介质的测试。

4 硬土介质标定曲线非线性特性分析

由于双膜土压力传感器综合变形模量相较于测试土介质严重偏小, 故其土介质标定曲线非线性特性非常显著。由于试验的 7 个双膜土力盒标定曲线特征一致, 故选用 1377# 的土压力传感器标定曲线进行分析。通过图 4(b)可以看出, 级配碎石土介质中标定得到的 $P_t - \varepsilon'$ 曲线具有明显的非线性特征; 而土压力传感器在单体标定中得到的 $P_t - \varepsilon'$ 曲线线性相关性极高(见图 3), 说明传感器表面输入压力和其输出信号(输出应变 ε' 或频率 f) 具有较好的线性关系; 同时, 传感器表面荷载-应变曲线的线性相关系数同样较高(见图 4(a)), 因而其模量相对稳定; 从而证明传感器土介质标定曲线的非线性基本与传感器自身的信号转换及传感器综合变形模量 E_g 无关, 主要是由土介质模量随荷载水平的变化引起的。文献[20]亦认为土介质应力-应变关系的非线性是影响土压力测量精度的主要因素。

根据级配碎石土介质中标定得到的每级荷载 P_t 下对应的输出应变 ε' 或频率 f , 利用单体标定试验得到的标定系数 K_0 , 由 $P_t = K_0 \varepsilon'$ 或 $P_t = K_0 f$ 可以换算得到施加荷载为 P_t 时对应于传感器表面所受到的实际压力 P_0 , 由匹配误差的定义式 $\beta = (P_t - P_0)/P_0$ 可以计算出土介质标定中由于土拱效应存

在, 土压力传感器匹配误差随荷载水平变化的关系曲线, 如图 7 所示。

由图可以看出, $E_g/E_s < 1$ 时, 匹配误差始终为负值, 即测试土压力小于真实土压力。随着荷载水平增加, 级配碎石土模量增加, 导致 E_g/E_s 减小, 引起匹配误差减小。随着荷载增加到一定程度, 级配碎石土压密到一定程度, 其模量变化量减小, 故匹配误差在加载后期其变化也逐渐趋缓。

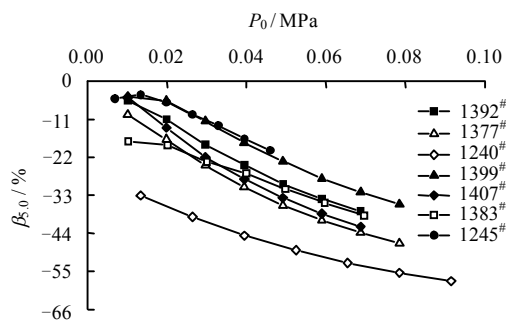


图 7 匹配误差随荷载水平变化关系曲线

Fig.7 Curves of matching error with load level

由匹配误差定义式可得

$$P_t = (1 + \beta)P_0 \quad (2)$$

由 $P_t = K_0 \varepsilon'$ 可得

$$\varepsilon' = \frac{1 + \beta}{K_0} P_0 \quad (3)$$

分析可知, 当土压力传感器与土介质模量比较小时, 由于介质模量随荷载水平的变化, 将会使匹配误差出现一定程度的变化, 由式(3)可知, 匹配误差随荷载水平的变化将导致标定曲线并非线性曲线。在模量比不能很好满足匹配误差稳定性要求的情况下, 为了更为准确地获得土压力的测试值, 通过介质标定试验获得不同荷载水平下土压力的测试值, 然后将标定数据进行非线性拟合, 并将拟合曲线用于现场测试时结果的换算, 这将比采用单一的标定系数所得到的结果更为准确。

针对 1392# 土压力传感器介质标定试验数据, 进行拟合得

$$y = y_0 + A_1 e^{\frac{\varepsilon'}{t}} = -0.03415 + 0.03436 e^{\frac{\varepsilon'}{234.7096}} \quad (4)$$

通过上式拟合该标定曲线, 其拟合度 $R^2 = 0.9999$, 表明该曲线能较好地反映此类标定试验数据的关系。采用该函数对其余 7 个双膜土压力传感器在级配碎石土介质中的标定试验数据进行拟合, 参数如表 3 所列。

由于现有的标定方法一般在对传感器进行土介质标定后, 将标定试验数据进行线性回归, 根据现场测试得到的输出信号乘上标定系数即得到真实土压力的测量值 $p_1 = kq$ 。对该次标定试验中的 8 个双膜土压力传感器分别进行线性回归, 并将线性回归的标定系数换算得到的真实土压力测试值 P_l 与非线性拟合曲线换算得到的真实土压力测试值 P_c 与 P_0 的相对误差 η 进行对比, 结果如图 8 所示。

表 3 级配碎石土介质标定曲线拟合参数

Table 3 Parameters of fitting curves about calibration test in graded broken stone

出厂 编号	E_g / MPa	y_0	A_1	t	拟合度
1240 [#]	11.8	-0.049 2	0.049 0	257.8	0.999 9
1245 [#]	10.2	-0.049 3	0.049 7	362.6	0.999 7
1377 [#]	9.5	-0.028 9	0.029 0	223.5	1.000 0
1383 [#]	9.0	-0.039 2	0.040 0	279.7	0.999 4
1392 [#]	8.3	-0.034 2	0.034 4	234.7	0.999 9
1399 [#]	12.4	-0.033 8	0.034 4	273.9	0.999 7
1407 [#]	11.9	-0.027 6	0.027 8	202.5	1.000 0

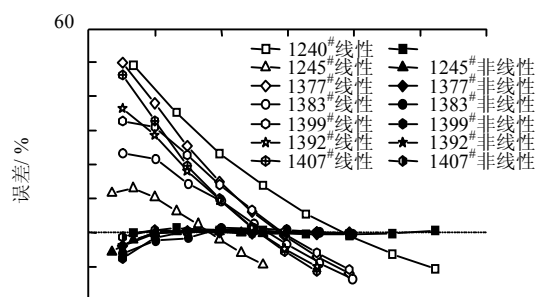


图 8 线性拟合与非线性拟合的测试值与真实应力误差

Fig.8 Relative error of test data about linear fitting and nonlinear fitting

由图可以看出, 对于 7 个双膜土压力传感器在级配碎石土介质中的标定试验数据, P_l 与 P_0 的误差范围在 $-13.6\% \sim 49.7\%$, 平均值为 9.6% ; 而 P_c 与 P_0 的误差范围仅在 $-7.6\% \sim 2.3\%$, 平均值仅为 -0.3% 。因此, 对级配碎石土介质中的土压力传感器标定曲线采用指数曲线拟合能够获得比线性回归更准确的测试数据。

5 结 论

(1) 匹配误差的稳定性是衡量土压力传感器工作性能的核心指标, 较小的厚径比和较大的模量比是一个理想土压力传感器不可缺少的特征, 传感器与土介质模量比宜大于等于 $8 \sim 12$ 。土压力传感器

不满足测试稳定性所需的模量比时, 标定曲线的非线性特征显著, 尤其当 $E_g/E_s < 1$ 时, 其非线性特性将非常显著, 且量测值较真实土中应力严重偏小。

(2) 土压力传感器的单体标定试验数据表明, 传感器实际承受的压力与输出信号具有高度的线性相关性且传感器综合变形模量稳定。在高模量的级配碎石土介质中土压力传感器标定曲线呈现的非线性特征由土介质在不同应力水平下土体模量的变化所引起。

(3) 目前常用的土压力传感器用于高速铁路路基等技术标准高的岩土结构物的土压力测试时, 因其模量偏小已较难获得准确的量测数据。通过在与使用环境相近的土介质中进行标定试验且采用非线性的修正方法, 是提高测量精度的可行途径。当然, 研发高模量的新型土压力传感器才是解决这类问题的根本途径。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 冷伍明, 魏丽敏, 华祖焜. 无粘结预应力筏板基础地基反力测试研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 456—460.
LENG Wu-ming, WEI Li-min, HUA Zu-kun. Experimental study on subgrade reaction under raft foundation prestressed with unbonded tendon[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 456—460.
- [3] 刘宝有. 国内土压力传感器的研制概况[J]. 传感器技术, 1988, (6): 11—13.
LIU Bao-you. The survey of domestic research about soil pressure transducer[J]. Sensor Technology, 1988, (6): 11—13.
- [4] 曾辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 99—105.
ZENG Hui, YU Shang-jiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 99—105.
- [5] 刘宝有. 电阻应变式土压力传感器的设计方法[J]. 传感器技术, 1989, (4): 1—6.
LIU Bao-you. The design method about resistance strain

- soil pressure transducer[J]. **Sensor Technology**, 1989, (4): 1—6.
- [6] 刘宝有. 电阻应变式土压力传感器[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1979: 72—80.
- [7] 刘宝有. 土压力国外理论和试验研究概况[J]. 传感器技术, 1988, (2): 48—53.
- LIU Bao-you. The survey of foreign theoretical and experimental study[J]. **Sensor Technology**, 1988, (2): 48—53.
- [8] PCATTIC K R, SPARROW R W. The fundamental action of earth pressure cell[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1954, 2(3): 141—155.
- [9] WACHMAN G, LABUZ J. Soil-structure interaction of an earth pressure cell[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 137(9): 843—845.
- [10] 曾辉, 余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 2003—2006.
- ZENG Hui, YU Shang-jiang. Characteristics of matching error of soil pressure transducer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 2003—2006.
- [11] 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.
- ZHEN Hui, YU Shang-jiang. Design and application principles of rock and soil pressure transducer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(1): 93—98.
- [12] 张立祥, 罗强, 刘钢, 等. 基于正交设计的土压力传感器匹配误差分析[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 50—53.
- ZHANG Li-xiang, LUO Qiang, LIU Gang, et al. Analysis of matching error of soil pressure transducer based on orthogonal design[J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2011, 30(3): 50—53.
- [13] 中华人民共和国铁道部. TB/T10621—2009 高速铁路设计规范(试行)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [14] 章模通, 徐瑞兰. 振弦式单、双膜片土压力传感器在不同介质作用下输出特性的探讨[J]. 工业仪表与自动化装置, 1986, (3): 14—19.
- ZHANG Mo-tong, XU Rui-lan. The characteristics of vibrating wire single and double membrane transducer in different media[J]. **Industrial Instrumentation & Automation**, 1986, (3): 14—19.
- [15] 曾辉. 岩土应力传感器匹配系数的等效性和真实性[C]//水电与矿业工程中的岩石力学问题——中国北方岩石力学与工程应用学术会议文集. 郑州: [s. n.], 1991: 787—794.
- [16] 张彬, 王钊, 杨俊峰, 等. 土压力盒在工程应用中的误差分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, (增刊): 157—161.
- ZHANG Bin, WANG Zhao, YANG Jun-feng, et al. Error analysis of application of earth pressure cell in geotechnical engineering[J]. **Exploration Engineering Rock&Soil Drilling and Tunneling**, 2005, (Supp.): 157—161.
- [17] 马时冬. 水泥搅拌桩复地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 48—51.
- MA Shi-dong. Test on pile-soil stress ratio of composite foundation with cement-soil pile[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(2): 48—51.
- [18] 韦四江, 王大顺, 郇进海, 等. 微型土压力盒的标定及修正[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1003—1006.
- WEI Si-jiang, WANG Da-shun, GAO Jin-hai, et al. Calibration and correction of miniature earth pressure cell[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(5): 1003—1006.
- [19] 刘宝有. 电阻应变式土压力传感器土中标定的试验研究[J]. 传感器技术, 1987, (4): 7—13.
- LIU Bao-you. The calibration test study of the resistance strain soil pressure transducer[J]. **Sensor Technology**, 1987, (4): 7—13.
- [20] 胡昌斌, 袁燕. 冲击碾压改建路面施工对路基动力作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 745—752.
- HU Chang-bin, YUAN Yan. Dynamic soil pressure characteristics of embankment under impact rolling load during rehabilitation of PCCP[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 745—752.