

DOI: 10.11779/CJGE2017S1041

薄膜压力传感器在土工试验中的适用性初探

张紫涛¹, 徐添华^{2,3}, 徐 韵³, 王幼行³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100084; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029;
3. 香港科技大学土木及环境工程学系, 香港)

摘要: 薄膜压力传感器因其厚度小、柔软、测压单元面积小等特点, 可准确测量土体应力及土颗粒间作用力, 因而在土工试验中有着广阔的应用前景。初步探究了薄膜压力传感器在静力和动力土工试验中的适用性。首先, 提供了结合 3D 打印技术, 将薄膜压力传感器安装于土体内部设定位置上测量相应土体应力及颗粒间作用力的方法。其次, 提出了测量静力时直接建立初始 DO 值与施加压强值间函数关系的标定方法, 并建议选用拟合优度判定系数 (R^2) 判定测压单元表现的优劣。最后, 结合模型桩试验, 验证了在动力试验中通过薄膜压力传感器、利用初始 DO 值可大体了解土体应力在动力荷载下的变化趋势。

关键词: 薄膜压力传感器; 土体应力; 土颗粒间作用力; 标定方法

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2017)S1 - 0209 - 05

作者简介: 张紫涛(1989 -), 男, 博士, 主要从事水利水电工程中岩土工程方面的科研工作。E-mail: zhangzt@iwhr.com。

Feasibility of applying tactile pressure sensors in geotechnical tests

ZHANG Zi-tao¹, XU Tian-hua^{2,3}, XU Yun³, WANG Yu-Hsing³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100084, China; 2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Due to their small thickness, high flexibility and tiny sensing element, the tactile pressure sensors can be used to measure the soil stresses and contact forces between soil particles. Hence, the tactile pressure sensors have a vast application prospect in laboratory geotechnical tests. This study aims to examine the feasibility of applying the tactile pressure sensors in static and dynamic tests. First, an installation approach for the tactile pressure sensors, which relies on 3D printed sensor holders, is proposed to place the sensors in the designed locations. Second, a modified calibration method is proposed for the static tests. In this calibration method, the “equilibration” step is abandoned. A relationship between the original digital output and the applied pressure is used in the calibration. In addition, it is suggested that only the measurements from the sensors with higher values of R^2 are used in the analysis. Finally, for the dynamic tests, the results of the model pile tests validate the feasibility of tactile pressure sensors and suggest that the change in the digital output might imply the trend of the soils stresses.

Key words: tactile pressure sensor; soil stress; contact force; calibration method

0 引言

测量土体中的应力(下文中简称土体应力, 区别于土体与结构物接触面的应力)有助于我们更好地理解土体特性。然而, 这一看似简单的需求在土工试验中却极难实现。其原因在于, 目前在各类土工试验中广泛采用的传统压力传感器(例如, 图 1 所示的内置应变片的压力传感器)因其自身厚度、刚度较大, 极易引起土拱效应, 进而引入较大的测量误差。由此可见, 土工试验中亟待引入薄型柔软的压力传感器以实现对土体应力的准确测量。

另外, 近年来对土体微观结构的数值模拟研究表

明土体的某些特性, 例如极小应变下的剪切刚度 G_{\max} , 不仅取决于土体应力, 还受土颗粒间接触点作用力的分布情况的影响^[1-2]。因此, 在砂土蠕变等工况下, 在土工试验中引入能够测量土颗粒间力的新型传感器是十分必要的。

薄膜压力传感器(tactile pressure sensors)即是一种可同时满足上述两方面要求的新型传感器。因此,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046802); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金项目(GE0145B102017)

收稿日期: 2016 - 11 - 28

结合实例探讨薄膜压力传感器在土工试验中的适用性，将为改进现有土工试验提供重要的参考。本文将首先介绍该类传感器的内部机构及相关特性，然后对其安装方法以及应用于静力土工试验的标定方法进行了探讨。最后，以周期荷载下模型桩试验为例，本文初步探究了该类传感器在动力土工试验中的应用效果。

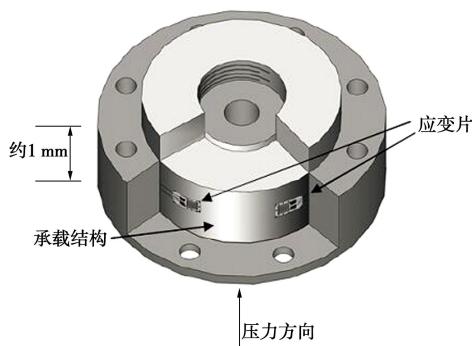


图 1 内置应变片的压力传感器的内部结构示意图^[3]

Fig. 1 Internal structure of strain gauge-loaded cells

1 薄膜压力传感器测量原理

如图 2 所示，薄膜压力传感器由半导体压电材料层及聚酯绝缘外表面层构成。在压电材料层，垂直相交的两组条状压电材料构成网格状，每个节点即为一个测压单元。该层压电材料由两层聚酯材料包裹。在聚酯材料内壁上，喷绘有银线以连接压电材料层与数据采集器。因此，任一测压单元处压力或压强值的改变将引起该点阻抗值的变化，进而引起相应模拟信号的改变，再经数字/模拟信号的转换后，即可引起数字信号的变化。如图 2 所示，在 I-Scan 数据分析软件中，在一定的压强作用下，每一测压单元会显示相应的数字信号输出值 (digital output, 下文中简称 DO 值)。经过精细的标定工作，即可建立 DO 值与压强值之间的关系，进而实现对测压单元处压强值的量测。由于传感器各层均为柔软材料，且总厚度可低至 0.1 mm，将此传感器置于土中时对土体的干扰将极大地降低。因而，该传感器可满足对土体应力的测量要求。另外，该薄膜传感器的测压单元的长度和宽度可小至 0.2 mm。鉴于实际工程中砂的平均粒径约为 0.2~2 mm，宽度为 0.2 mm 的测压单元的测量值即可反映砂土颗粒间作用力的相对大小。再者，该薄膜压力传感器每平方厘米的区域内测压单元的数量可达 248 个，便于对土颗粒间作用力的分布进行统计学分析。因此，该新型薄膜压力传感器可满足对砂土颗粒间力的测量要求。

2 安装方法

如前所述，厚度低、柔性的特性令薄膜传感器在

测量土体应力中具备诸多优势。但是，在实际操作中，这些特性并不利于薄膜传感器的安装。本研究中提出了结合三维打印技术的安装方法。下面将以模型桩试验为例对其安装方法进行探讨。

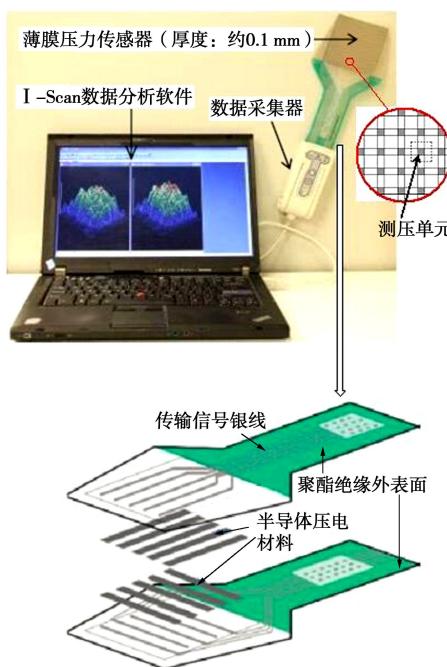


图 2 薄膜压力传感器相关数据采集系统及该传感器的内部结构示意图^[3-4]

Fig. 2 Setup of I-scan system and internal structure of tactile pressure sensors^[3-4]

如图 3 所示，该模型桩试验需测量土体内不同位置的竖向、径向和环向正应力。当测量竖向土体正应力时，只需将薄膜压力传感器平铺于土层上，再继续撒砂制样即可（参见图 3 中的 T-v-1）。为测量水平方向土体正应力，首先通过三维打印技术制作了辅助安装模架。该模架包含多个 1 mm 厚的外壁围成的厚度为 1 mm 的空隙。首先，将各传感器的测压单元放入相应空隙内（参见图 3 中的 T-r-1, T-T-r-2, T-r-3, T-h-1 和 T-h-2），再撒砂至土样高度升高 10 mm 左右，然后将辅助模架沿竖向滑升 10 mm 左右。然后，重复操作上述从撒砂到滑升模架的步骤直到将测压单元全部埋于土内。最后，取走辅助安装模架即可。

3 测量静力的标定方法

进行标定试验以确定测压单元的数字信号输出值 (DO 值) 与所受压强值 (p 值) 之间的函数关系，是利用薄膜传感器开展静力土工测试的关键步骤之一。通常，选用图 4 所示的加压装置 (Model PB100H, Tekscan Inc.) 为薄膜压力传感器提供稳定的压强。置于该加压装置中的测压单元所受压强值相等（参见图

4 中的内部结构示意图)。

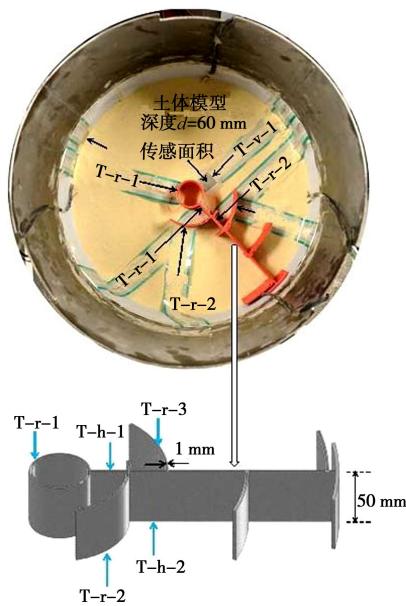


图 3 三维打印制成的传感器安装支架

Fig. 3 3D printed holders of sensors

表 1 给出了各类标定方法。Tekscan^[3-4]推荐了单一压强值法和双压强值法。这两种方法均要求对 DO 值进行均一化处理, 即对某一压强下的测压单元的 DO 值进行调整, 以使一个传感器中的所有测压单元的 DO 值相等。为便于讨论, 本文中将调整前后的 DO 值分别称为“初始 DO 值”与“均一化后的 DO 值”。该处理的优势是所有测压单元可使用同一标定函数(即压强值与均一化后的 DO 值的关系)。就标定的具体步骤而言, 在单一压强值法中, 假定零压强时, 均一化后的 DO 值也为零。因此, 得到某一压强值对应的均一化后的 DO 值即可确定线性标定函数($p = k \cdot DO$)。在双压强值法中, 依旧使用零压强时零均一化后的 DO 值的假定, 但对测压单元施加两个压强值并得到相应的均一化后的 DO 值, 即可确定幂函数形式的标定函数($p = a \cdot DO^b$)。这两种方法虽然操作简便, 但可测量压强值范围较小。例如, 单一压力值法仅能适用于待测量压强值与标定时施加压强值较为接近的情况。当待测量值与标定时选用值相差较大时, 将引入较大的误差。因此, 对于需要测量较大压强范围的土工试验, 上述两种标定方法不再适用。

Gao 等^[5]提出了多压强值法, 即用多个压强值及相应均一化后的 DO 值进行拟合以确定标定函数。Gao 等的试验表明对型号为 5076 的传感器, 采用线性函数即可取得较好的拟合效果, 因此, 可选用线性函数作为该型号薄膜传感器的标定函数。值得注意的是, 在该种方法中, 依然对初始 DO 值进行了均一化处理。如前所述, 均一化处理使得某一传感器的所有测压单

元可适用同一标定函数。但是, 在给定的压强下, 均需将如何进行调整的文件保存以备在实际测量中调用相应的文件对初始 DO 值进行处理。因此, 该方法需要预估待测量值进而调用相应的调整文件, 这对实际测试引入了较多的不确定性。为解决这一难题, 本研究对上述方法进行了改进, 即利用多压强值法对每一个测压单元确定初始 DO 值与压强值的函数关系。由于此方法无需进行均一化处理, 由调用均一化处理文件而带来的不确定性即被消除。

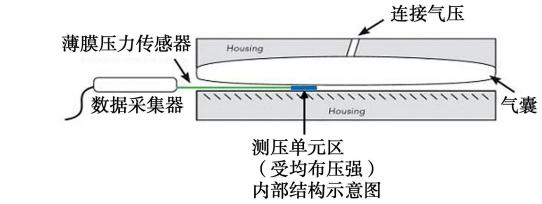


图 4 加压装置 Equilibrator 实物图及内部结构示意图^[5]

Fig. 4 Picture and internal structure of equilibrator^[5]

下面以型号为 5027 的薄膜压力传感器为例对其标定过程及标定函数进行详细介绍。图 5 给出了该种传感器的实物图。其总长度达到 508 mm, 便于安装到大尺寸土样的内部。因此, 相较于长度较短的传感器, 该 5027 型传感器可以满足较多土工试验的要求。另外, 其测压单元宽度仅为 0.2 mm, 可用来测量砂土微观结构。如图 6 所示, 选取 10 kPa 至 150 kPa 间的 9 个压强值进行标定试验。按照压强值从小至大的顺序, 利用加压装置(equilibrator)对薄膜压力传感器施加压强并得到相应初始 DO 值。需注意的是, 宜待 DO 值趋于稳定后再取值。一般而言, 施加某一压强后再过几分钟 DO 值可趋于稳定^[4, 6]。获得各压强值对应的初始 DO 值后, 即可对任一测压单元的标定结果用抛物线函数进行拟合, 相关的拟合优度判定系数 R^2 可用来评价测压单元表现的优劣(参见图 6)。该次标定试验的结果表明, 98% 的测压单元表现良好($R^2 > 0.95$)。为提高测量准确度, 建议在数据分析中仅选取具有较高 R^2 值的测压单元的量测结果。例如, 仅选取 R^2 值大于 0.98 的测压单元的数据进行分析。依据对 5027 型薄膜压力传感器的标定结果, $R^2 > 0.98$ 的测压

单元数量约为总数量(1936)的85%，即1645。因此，舍弃低判定系数的测压单元仍然可以保证足够的样本数量，不会为其后的统计学分析带来负面影响。

表1 标定方法总结

Table 1 Summary of calibration methods

标定方法	标定函数
需均一化的单一压力值法 ^[5]	线性函数
需均一化的双压力值 ^[5]	幂函数法
需均一化的多压力值法 ^[4]	依标定试验结果确定(对于 Model 5076, 选用线性函数)
不需均一化的多压力值法	依标定试验结果确定(对于 Model 5027, 选用幂函数)

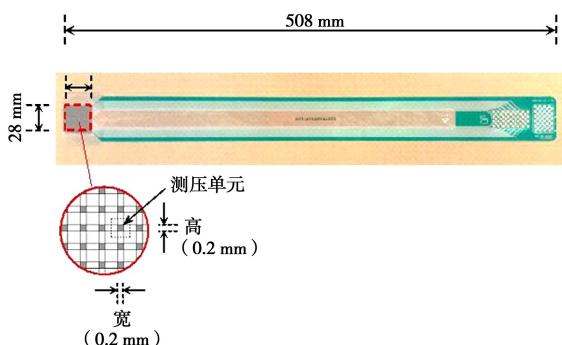


图5 型号为5027的薄膜压力传感器实物图

Fig. 5 Picture of model No. 5027 tactile pressure sensor

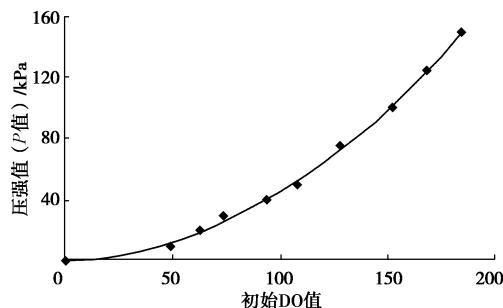


图6 5027型薄膜压力传感器某一测压单元标定结果

Fig. 6 Relationship between digital output of sensing element and applied pressure

4 动力试验中的适用性初探

动力试验对测量土体应力和颗粒间力的需求同样很大。以地震引发的土体液化为例，若能实测土体颗粒间力，即可清楚了解土体微观结构在地震作用下的演变过程，进而更深刻地理解土体液化的微观机理。然而，在动力荷载作用下，薄膜传感器的初始DO值并不仅由压强值决定，它同时受到施加荷载的频率的影响。这意味着，在标定试验中，需要将具有不同频率值的荷载分别施加于薄膜压力传感器上，再建立初始DO值、压强值及荷载频率值之间的函数关系。这无疑增加了相关标定试验的复杂度。目前，还未有报

告提出较为系统的相关标定方法。本文暂不探讨相关标定方法，而介绍一个“利用初始DO值对土体应力进行定性分析”的动力试验应用实例，以此初探薄膜压力传感器在动力试验中的应用效果。

该动力试验试图探究施加于桩体的竖向周期荷载对桩周土体径向正应力的影响。图7给出了试验设备与薄膜传感器的布置图。试验所用干砂土样在自制的可对土样竖向加压的模型箱内制成，关于该模型箱的细节可参考Zhang等^[7]。该土样为圆柱状，直径为460 mm，高度为380 mm，由Toyoura砂制成。在制样过程中，将5027型薄膜压力传感器(参见图5)预埋在土体中，其测压单元区下边缘位于土样表面以下100 mm处，距离土样中心线24 mm。制样完成后，土样的密度为1600 kg/m³。然后，利用气压对土样施加竖向荷载，直到土样内的竖向正应力达到70 kPa。其后，利用高精度直线驱动器(型号：ECT09-B53S02PB2510—400XP，Thomson Industries, Inc., USA)将模型桩沿土样中心线压入土中，直到桩的埋深达到250 mm(参见图7)。该模型桩为直径 D_p 为16 mm的圆柱状铝桩，其下端封闭。模型桩安装完成后，薄膜压力传感器距桩侧面约为16 mm，即与桩的直径 D_p 相近。之后，利用高精度直线驱动器对模型桩施加50个竖向周期荷载。在每一个周期中，桩首先被下压2 mm，然后上提4 mm，再下压2 mm回到原位。其移动的速度的绝对值均为0.1 mm/s。在此过程中，薄膜压力传感器以1 s的时间间隔记录数据。因此，每个荷载周期内记录80个数据，这足以捕捉到土体应力改变的趋势。

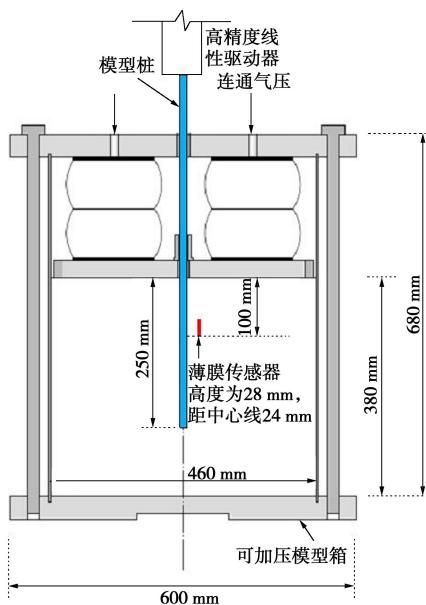


图7 试验设备与薄膜传感器布置图

Fig. 7 Experimental setup of model pile tests and arrangement of tactile pressure sensors

如图 8 所示, 用全体测压单元的 DO 值的总和(即总 DO 值)与施加周期荷载前的总 DO 值(即(总 DO 值)₀)的比值代表土体径向正应力的变化。由图 8 可知, 前 10 个周期荷载令总 DO 值降低到(总 DO 值)₀的一半左右, 随后的周期荷载仍令总 DO 值逐渐降低, 但下降速率趋于缓慢。如前所述, 虽未进行动力试验相关标定, 但由图 8 给出的试验结果可得到一些定性的结论, 即周期荷载作用下, 桩周土体径向正应力随周期数的增加而逐渐降低, 且降低的速率逐渐减小。该实验结果与其他研究^[8-12]中估计的土体径向正应力的变化趋势相一致。这表明在动力试验中, 在相关标定方法未明的情况下, 应用薄膜压力传感器可利用初始 DO 值进行定性分析。当然, 研究相关标定方法以达到定量分析是极为必要的。

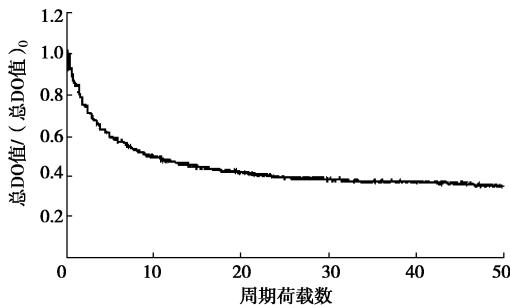


图 8 周期荷载作用下总 DO 值变化情况

Fig. 8 Change of total digital output under cyclic loadings

5 结论与建议

本文对薄膜传感器的安装方法及应用于静力土工测试中的标定方法进行了探讨, 并结合模型桩试验初步探究了该类传感器在动力试验中的应用效果。初步结论与建议如下:

(1) 提出了结合 3D 打印技术的安装方法, 该方法可将薄膜压力传感器安装于土体内部设定位置上以测量相应土体应力及颗粒间作用力。

(2) 提出了薄膜传感器的新的标定方法。该方法直接建立初始 DO 值与施加压强值间的函数关系, 并选用拟合优度判定系数(R^2)筛选测压单元。

(3) 在动力试验中, 利用初始 DO 值可大体了解土体应力在动力荷载下的变化趋势。但进一步研究相关标定方法无疑是十分必要的。

参考文献:

- [1] WANG Y H, GAO Y. Mechanisms of aging-induced modulus changes in sand with inherent fabric anisotropy[J]. J Geotech Geoenvir Eng, 2013, **139**(9): 1590 – 1603.
- [2] GAO Y, WANG Y H, SU J C P. Mechanisms of aging induced modulus changes in sand under isotropic and anisotropic loading[J]. J Geotech Geoenvir Eng, 2013, **139**(3): 470 – 482.
- [3] TEKSCAN. I-Scan & high speed I-Scan user manual[M]. Tekscan, Inc., 307 West First Street, South Boston, MA 02127, USA, 2009.
- [4] TEKSCAN. Comparison of interface pressure measurement options [M]. Tekscan, Inc., 307 West First Street, South Boston, MA 02127, USA, 2008.
- [5] GAO Y, WANG Y H. Calibration of tactile pressure sensors for measuring stress in soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, **36**(4): 20120143, 1 – 7.
- [6] PALMER M C, O'ROURKE T D, OLSON N A. Tactile pressure sensors for soil-structure interaction assessment[J]. J Geotech Geoenvir Eng, 2009, **135**(11): 1638 – 1645.
- [7] ZHANG Z, WANG Y H. Examining setup mechanisms of driven piles in sand using laboratory model pile tests[J]. J Geotech Geoenvir Eng, 2015, **141**(3): 04014114, 1 – 12.
- [8] LEHANE B M, JARDINE R J, BOND A J, et al. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests[J]. J Geotech Eng, 1993, **119**(1): 19 – 35.
- [9] GAVIN K G, O'KELLY B C. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand[J]. J Geotech Geoenvir Eng, 2007, **133**(1): 63 – 71.
- [10] AIREY D W, AL-DOURI R, POULOS H G. Estimation of pile friction degradation from shear box tests[J]. Geotech Test J, 1992, **15**(4): 388 – 392.
- [11] DEJONG J T, WHITE D J, RANDOLPH M F. Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(1): 15 – 28.
- [12] LEHANE B M, WHITE D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand[J]. Can Geotech J, 2005, **42**(4): 1039 – 1052.

(本文责编 黄贤沙)