

静压桩贯入试验硅压阻式传感器的研制及应用

王永洪^{1,3}, 张明义^{1,2}, 张春巍¹, 白晓宇^{1,2}, 苗德滋¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033; 3. 青岛理工大学 琴岛学院 土木工程系, 山东 青岛 266106)

摘 要:根据静压桩贯入过程中桩端阻力、桩土界面土压力和孔隙水压力测试对传感器的要求,介绍了硅压阻式压力传感器的压阻效应和工作原理。针对尝试采用的模型桩硅压阻式传感器安装工艺,研制了两种出现方式的传感器,并对贯入过程中桩端阻力、桩土界面土压力和孔隙水压力进行了测试。试验结果表明,硅压阻式压力传感器成活率高达100%,模型桩硅压阻式传感器安装工艺可行,测试结果准确、可靠。硅压阻式传感器可以应用到静压桩贯入模型试验中。

关键词:硅压阻式传感器;压阻效应;静压桩;贯入;模型试验

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Development and Application of Silicon Piezoresistive Sensors for Jacked Pile Driving Test

WANG Yonghong^{1,3}, ZHANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Chunwei¹, BAI Xiaoyu^{1,2}, MIAO Dezi¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 3. Department of Civil Engineering, Qindao College, Qingdao Technological University, Qingdao 266106, China)

Abstract: Based on the need of testing on resistance at pile end, lateral pressure and pore water pressure of interface between pile and soil in jacked pile driving, the piezoresistive effect and working principle of silicon piezoresistive sensors were introduced. Aiming at the installation process of model pile silicon piezoresistive sensor, two kinds of sensors were developed to test the resistance at pile end, lateral pressure and pore water pressure of interface between pile and soil in jacked pile driving. The experimental results showed that the survival rate of silicon piezoresistive sensors had a survival rate of 100%, and the installation process of the model pile silicon piezoresistive sensor was feasible, the test results were accurate and reliable. The silicon piezoresistive sensors can be applied to the jacked pile driving model test.

Key words: silicon piezoresistive sensors; piezoresistive effect; jacked pile; driving; model test

0 引言

静压桩贯入模型试验中由于土体受到扰动,桩端阻力、桩土界面孔隙水压力和侧压力随着贯入深度的增大而发生变化,测试元件既要灵敏度高,稳定性好,又要能够准确监测数据。另外,由于模型桩尺寸的限制,为了避免安装在模型桩上的测试元件影响其力学特性,保证测试数据的准确性,必须要求使用微型测试元件。以往的测试方法中,张建新等^[1]通过在模型桩底不同位置埋设土压力盒,测量了桩

端附近的应力分布,但未对贯入过程进行量测。周健等^[2]在桩端安装微型土压力盒进行端阻量测,采用以归一化变形量为加载级的加载方式,未进行贯入试验。李雨浓等^[3]把土压力盒埋设在成层黏土地基中不同深度,进行了桩贯入过程桩周土体应力分布,没有量测桩土界面应力。叶真华等^[4]为了量测桩侧土压力增量,因土压力盒直径较大而无法直接安装到铝桩上,故试验的同时在方形木桩侧面安装了土压力盒。

收稿日期:2017-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778312, 41502304);山东省重点研发计划资助项目(2017GSF16107);山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EPP06)

作者简介:王永洪(1984-),男,山东东营人,博士生,主要从事土力学与桩基础工程的研究。通信作者:张明义(1958-),男,山东青州人,教授,博士生导师,主要从事地基基础与桩基础工程的研究。

本文利用多晶硅材料为弹性体,采用先进微型化制作工艺集成硅膜片作为敏感元件制成微型硅压阻式土压力传感器,最小直径仅 $\varnothing 5\text{ mm}$ 。其动态频响高,测量范围宽,灵敏度系数大,且采用了齐平封装结构,使得传感器长期稳定性好。将微型硅压阻式传感器成功应用于静压桩贯入模型试验中,实现了贯入过程的桩端阻力、桩土界面孔隙水压力和侧压力的实时监测。

1 微型硅压阻式传感器的研制

1.1 多晶硅材料的压阻效应

多晶硅材料受到外力的作用后,其电阻值发生变化的现象称为压阻效应。根据电阻 $R=\rho L/A$,微分^[5]后可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\nu)\epsilon \quad (1)$$

式中: R 为多晶硅材料的电阻; ρ 为多晶硅材料的电阻率; L 为多晶硅材料的长度; A 为多晶硅材料的截面积; ν 为多晶硅材料的泊松系数; ϵ 为多晶硅材料的应变。

应力会引起多晶硅材料电阻率的变化。根据应力与电阻率相对变化、应力与应变的关系为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma \quad (2)$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\nu)\epsilon = (1+2\nu+\pi E)\epsilon = GF\epsilon \quad (4)$$

式中 $GF=1+2\nu+\pi E$ 为应变系数。

$$V_0 = \frac{[(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)]}{(R_1 + R_2 + \Delta R_1 - \Delta R_2)(R_3 + R_4 + \Delta R_3 - \Delta R_4)} \times V_B \quad (5)$$

式中: V_B 为电源电压; V_0 为输出电压。其中, $R_1=R_3=R_2=R_4=R$,则 $\Delta R_i=R \cdot GF \cdot \epsilon_i$ ($i=1,2,3,4$), ϵ_i 为第 i 个电阻的应变值,有:

$$V_0 = \frac{1}{4}GF \cdot \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - \epsilon_2 - \epsilon_4}{\left[1 + \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4)\right]} V_B \quad (6)$$

传感器设计时,使4个电阻应变值满足 $\epsilon_1 = \epsilon_3 = -\epsilon_2 = -\epsilon_4 = \epsilon$,式(6)变为

$$V_0 = GF \cdot \epsilon \cdot V_B \quad (7)$$

根据式(4)可知,多晶硅材料的应变系数与 $1+2\nu$ 、 πE 有关,因多晶硅材料受力后引起的几何形变远小于其引起的电阻率变化,其压阻系数较大, $1+2\nu$ 可忽略, $GF=72.4 \sim 149.6$;而金属材料的压阻效应主要由材料几何尺寸的变化引起,其压阻系数可认为是0, $GF=1.5 \sim 2.0$,即多晶硅材料比金属材料具有更高的灵敏度系数。

1.2 硅压阻式压力传感器的工作原理

硅压阻式压力传感器采用先进微型化制作工艺集成硅压力膜片作为敏感元件,利用多晶硅的压阻效应,在压力膜片上淀积的绝缘层二氧化硅上淀积制备4个多晶硅压敏电阻,组成惠斯通电桥^[6-7]。硅压阻式压力传感器示意图如图1所示。惠斯通电桥电路如图2所示。

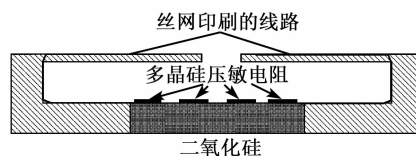


图1 硅压阻式压力传感器示意图

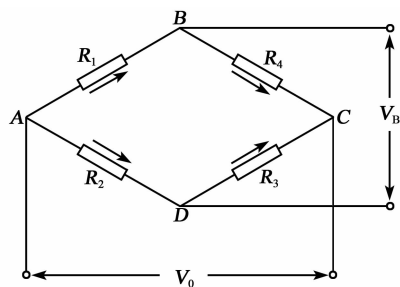


图2 惠斯通电桥电路

本文惠斯通电桥采用恒压源供电方式,硅膜片两侧产生压力差使得上面的4个电阻阻值也发生变化,惠斯通电桥失去平衡,输出的电压^[6]为

由式(7)可看出,惠斯通电桥产生与压敏电阻上的应变值呈线性关系的电压,可以实现在外界压力作用下输出电压的测量,电压值也与膜片的应变系数有关,膜片的应变系数和应变值越大,电桥输出的压力值越大,传感器的灵敏度越高。

1.3 硅压阻式压力传感器的设计

微型硅压阻式压力传感器采用先进微型化制作工艺集成硅膜片作为敏感元件,膜片上4个电阻之间通过丝网印刷线路连接,并用金属外壳进行精致的微型封装^[8-9],传感器封装结构示意图如图3所

示,传感器的照片如图 4 所示。根据静压桩贯入模型试验中测试要求,采用硅压阻式土压力传感器和硅压阻式孔隙水压力传感器,孔隙水压力传感器表面用透水石封装,由于采用受尺寸限制的模型桩,根据传感器在模型桩上的安装工艺不同,本文设计了两种出现方式。

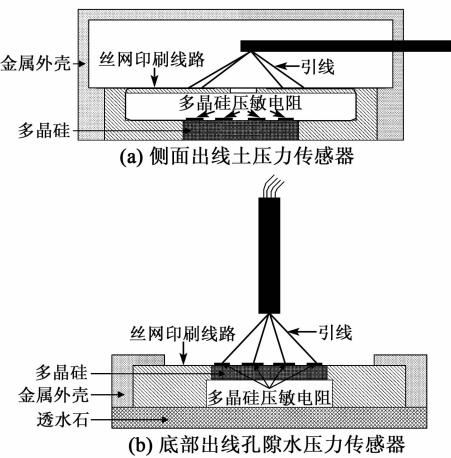


图 3 微型硅压阻式压力传感器封装示意图

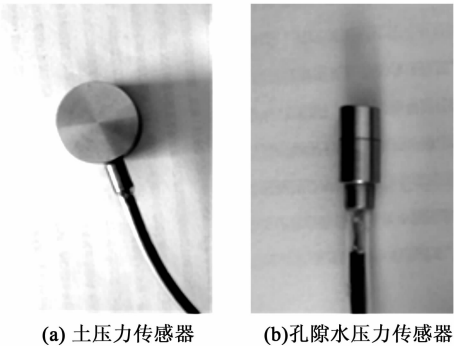


图 4 微型硅压阻式压力传感器照片

标定试验结果表明,各硅压阻式压力传感器具有很好的线性拟合度,线性相关系数都在 0.99 以上,微型硅压阻式压力传感器的具体性能指标如表 1 所示。

表 1 微型硅压阻式压力传感器性能指标

参数	土压力传感器	孔隙水压力传感器
量程/kPa	500	500
动态频响/kHz	2 000	2 000
精度/%	0.1	0.1
接口方式	自带锁紧结构	自带锁紧结构
外观尺寸/mm	20×10	8×15

2 在静压桩贯入模型试验中的应用

2.1 模型试验概况

本试验加载装置包括反力架和油压千斤顶,油

压千斤顶固定在反力架横梁上,在油压千斤顶端部粘贴荷重压力传感器,测量贯入过程压桩力。反力架下方放置模型桶,模型桶直径 $\varnothing 800\text{ mm}$,高度为 1 200 mm,模型桶中心与千斤顶中心上下对齐。为保证贯入过程中模型桩的垂直度,在模型桶外壁焊接夹持导向装置。本次试验选用青岛某工地黏性土,黏性土取回后进行烘干、粉碎及 0.075 mm 过筛,通过控制干密度和添加水量的方法重塑土样,干密度均控制在 1.58 g/cm^3 ,每次击实土层厚度为 5 cm,直至距离模型桶顶面 20 cm,预配好后静置固结,以保证土样内部水分的均匀。

2.2 硅压阻式传感器安装工艺

本文试验模型桩采用实心尼龙棒,在模型桩桩端开口安装微型硅压阻式土压力传感器测量桩端阻力,在模型桩桩身表面开槽封装传感器及导线,微型硅压阻式土压力和孔隙水压力传感器分别测量桩土界面侧压力和桩土界面孔隙水压力,传感器表面与模型桩端部和表面需保持齐平。具体的硅压阻式传感器安装流程如下:

1) 在机床上对尼龙棒表面两侧对称开槽,开槽尺寸分别为 $20\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ (宽度 $\times$ 深度), $8\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ (宽度 $\times$ 深度),然后在桩端用开口器开口,开口尺寸为 $\varnothing 20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (直径 $\times$ 深度),如图 5 所示。

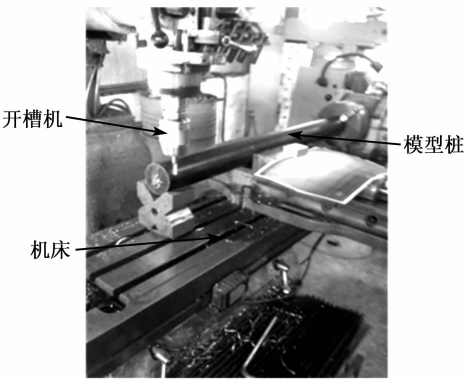


图 5 模型桩开槽

2) 在模型桩上根据传感器间距 150 mm 进行标记,土压力和孔隙水压力传感器各 6 个,传感器距离模型桩两端都为 50 mm,如图 6 所示。

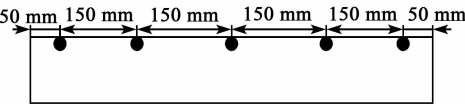


图 6 传感器安装位置

3) 封装前,为了防止环氧树脂堵塞传感器表面

而影响测试结果,用塑料薄膜保护传感器表面,同时用锡箔纸封住模型桩开槽两端以免溢出环氧树脂,先用细钢丝模架初步固定每个传感器的位置,再灌入环氧树脂进行封装,如图 7 所示。

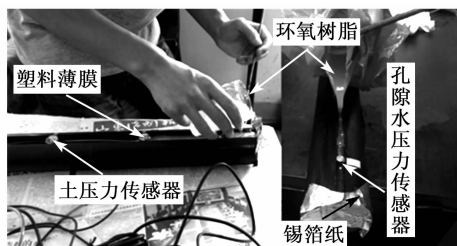
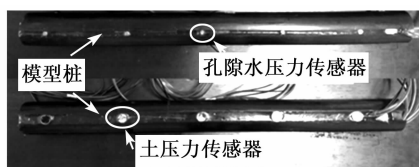
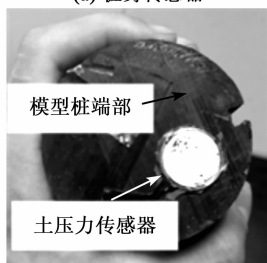


图 7 传感器封装

4) 在环氧树脂凝固前再次对传感器进行调整找平,待环氧树脂完全固化后去除传感器表面塑料薄膜和开槽两端锡箔纸,硅压阻式传感器安装结束,如图 8 所示。



(a) 桩身传感器



(b) 桩端传感器

图 8 传感器安装

2.3 试验结果及分析

试验开始前记录初始读数,在加载过程中,连续记录荷重压力传感器读数、硅压阻式土压力及孔隙水压力读数,试验结束,12 个硅压阻式传感器全部存活,存活率达 100%。试验共做 3 组,本文结果分析中的压桩力、桩端阻力、桩土界面侧压力及孔隙水压力均为平均值。

图 9 为压桩力、桩端阻力和桩侧摩阻力随深度变化曲线。由图可知,压桩力随模型桩入土深度的增加未呈现较明显的线性增大。在贯入深度较小时,压桩力与贯入深度呈线性增大;当贯入深度为 14~36 cm 时,压桩力变化较小;当贯入深度大于 40 cm 时,压桩力随着贯入深度持续增大。本文所用土体为黏性土,贯入阻力主要由贯入过程桩端剪切土

体产生的桩端阻力产生,桩侧摩阻力较小,与李雨浓等^[3]在黏性土层状地基中贯入过程规律相近。

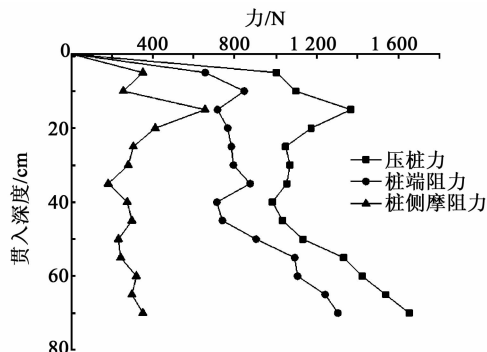


图 9 压桩力、桩端阻力和桩侧摩阻力变化曲线

图 10 是不同贯入深度时,侧压力的变化曲线。由图可知,贯入过程中侧压力随着贯入深度的增加而逐渐增大。在贯入开始阶段,侧压力的增长较快,随着贯入深度的增加,侧压力的增长减缓,同一深度处侧压力也逐渐减小^[10]。

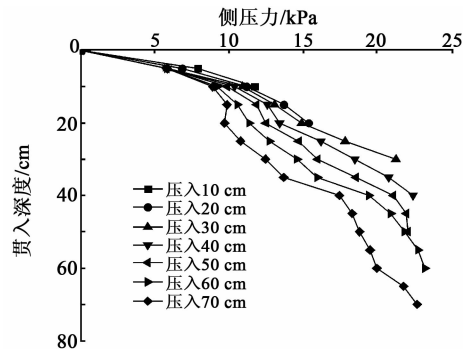


图 10 不同贯入深度下,侧压力变化曲线

图 11 是不同贯入深度时,超孔隙水压力的变化曲线。由图可知,桩土界面超孔隙水压力贯入开始阶段,由于对土体扰动不大,故变化幅度小;随着贯入深度的不断增大而显著增大,当贯入深度为 35 cm(有效桩长的一半)时,超孔隙水压力达到最大值,但积累到最大值后又开始降低^[11]。

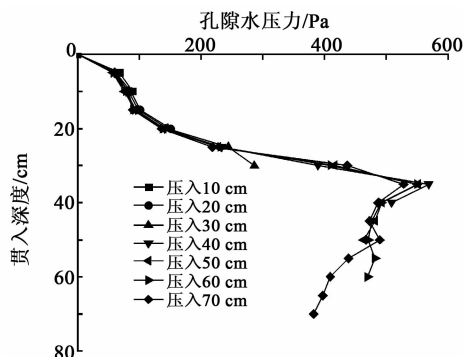


图 11 不同贯入深度下,孔隙水压力变化曲线

3 结论

1) 本文在介绍了硅压阻式压力传感器压阻效应和工作原理的基础上,设计了两种出现方式的微型硅压阻式压力传感器,不同的出现方式为传感器的安装提供了方便。

2) 本文提出了一种新的模型桩硅压阻式压力传感器的安装工艺,该安装工艺传感器存活率达100%,为硅压阻式压力传感器应用到静压桩贯入模型试验中提供了保障。

3) 本文成功地把硅压阻式压力传感器应用到了室内静压桩贯入模型试验中,在模型桩端安装土压力传感器,模型桩桩身表面安装了多个土压力传感器和孔隙水压力传感器。硅压阻式传感器测试数据准确、可靠,为今后进一步应用到现场试验中积累了宝贵经验。

4) 本次静压桩贯入试验在黏性土中进行,贯入阻力主要由贯入过程桩端剪切土体产生的桩端阻力产生,桩侧摩阻力较小。贯入过程中侧压力随着贯入深度的增加而逐渐增大,同一深度处侧压力逐渐减小。超孔隙水压力随着贯入深度的不断增大而显著增大,积累到最大值后开始降低。

参考文献:

- [1] 张建新, 吴东云. 桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 541-543.
ZHANG Jianxin, WU Dongyun. Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 541-543.
- [2] 周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 501-507.
ZHOU Jian, DENG Yibing, YE Jianzhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 501-507.
- [3] 李雨浓, 李镜培, 赵仲芳, 等. 层状地基静压桩贯入过程机理试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1409-1414.
LI Yunong, LI Jingpei, ZHAO Zhongfang, et al. Model test research on penetration process of jacked pile in layered soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1409-1414.
- [4] 叶真华, 周健, 唐世栋. 粘土中不同桩端条件下桩承载性状的模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 25(2): 78-80.
YE Zhenhua, ZHOU Jian, TANG Shidong. Model test on pile bearing behaviors in clay under different pile tip conditions[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 25(2): 78-80.
- [5] 蒋小燕. 基于 MAX1457 的硅压阻式传感器只能补偿与标定系统的应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
- [6] 陆学斌. 多晶硅纳米薄膜压阻特性及其压力传感器应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] 杜春晖, 何常德, 葛晓洋, 等. MEMS 压阻式加速度传感器的优化设计[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 848-852.
DU Chunhui, HE Changde, GE Xiaoyang, et al. Optimization design of MEMS piezoresistive acceleration sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(6): 848-852.
- [8] 胡明, 马家志, 邹俊, 等. 微机械加工技术在微传感器中的应用[J]. 压电与声光, 2002, 24(4): 268-302.
HU Ming, MA Jiazhi, ZOU Jun, et al. Application of micromachining technology in micro-sensors[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002, 24(4): 268-302.
- [9] 宛克敬, 何常德, 廉德钦, 等. MEMS 压阻超声传感器的设计与优化[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 728-731.
YUAN Kejing, HE Changde, LIAN Deqin, et al. Designing of MEMS piezoresistive ultra acoustic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(5): 728-731.
- [10] 唐世栋, 何连生, 叶真华. 软土地基中桩基施工引起的侧向土压力增量[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 752-755.
TANG Shidong, HE Liansheng, YE Zhenhua. Increment of lateral pressure caused by installation of pile in soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 752-755.
- [11] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725-732.
TANG Shidong, HE Liansheng, FU Zong. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 725-732.