

DOI: 10.11779/CJGE2017S1008

双压力传感器埋入式沉降仪的研制及应用

吴跃东^{1,2}, 李通达^{1,2}, 刁红国^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 吴春波^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘 要: 针对传统沉降板在高速公路软基沉降观测中存在干扰施工、操作繁琐等弊端, 提出了一种双压力传感器埋入式沉降仪。该沉降仪基于将土体沉降测量转换为对密闭系统内液体压力变化测量的原理, 主要由竖向密闭管、基准传感器和路基传感器构成。通过室内试验和现场试验, 详细阐述了其在标定、埋设和数据采集等阶段的操作方法。研究表明, 该沉降仪的测量精度可达 2 mm, 重复性误差 2 mm。与传统沉降板方法相比, 其主要优势有: ①该沉降仪埋设在土体中, 与地面施工互不干扰; ②只需分别采集双压力传感器的读数, 测量效率高; ③可用于工后沉降的长期观测, 测量成本低。

关键词: 软土地基; 沉降; 双压力传感器; 沉降板; 测量精度

中图分类号: TU415; TU413.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0038-05

作者简介: 吴跃东(1969-), 男, 福建省云霄县人, 教授, 主要从事软基处理与基础工程和岩土工程测试技术的教学和科研。E-mail: hhuwyd@163.com。

Development and application of a new embedded settlement gauge based on dual-pressure sensors

WU Yue-dong^{1,2}, LI Tong-da^{1,2}, DIAO Hong-guo^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, WU Chun-bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Engineering Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China)

Abstract: Since the traditional settlement plates have adverse effects on the construction with tedious operations, a new embedded settlement gauge based on the dual-pressure sensors is proposed. Based on the principles of transforming the measurement of ground settlement to that of variations on hydraulic pressure in a full-sealed system, the new embedded settlement gauge comprises a vertical sealed pipe, a standard pressure sensor and a core pressure sensor. Both laboratory and field tests are conducted to describe the detailed operation instructions, including calibration, installation and data collection. It is found that the new gauge is applicable with a precision of 2 mm and repetition error of 2 mm. Compared with the traditional settlement plate, it has several significant advantages: (1) It is embedded underground, thus there are no effects on construction; (2) The settlement can be measured only by reading the sensors, resulting in a high efficiency; (3) It can be employed to measure the post-construction settlement, leading to a low cost.

Key words: soft foundation; settlement; dual-pressure sensor; settlement plate; measurement accuracy

0 引 言

高速公路已成为中国交通运输领域重要的组成部分, 在我国东部沿海发达地区, 高速公路大部分建设在软土地基上, 而这些地区的软土具有高含水率, 低渗透性, 高灵敏性, 高压缩性和厚度分布不均匀等特点, 极易发生沉降变形, 存在严重的安全隐患^[1]。因此, 为了保证高速公路在建设期间的施工安全和运营期间的行车安全, 同时进一步研究软土地基沉降变形的规律, 开展高速公路路基沉降监测是不可避免的^[2-3]。

目前用于高速公路路基沉降监测的常用设备包括

沉降板、沉降管、剖面沉降仪等^[4-7]。但是, 以上传统的监测方法均或多或少存在一定的局限性。目前工程中普遍采用的沉降测量方法是沉降板观测方法, 该方法存在以下问题: ①测量效率较低; ②干扰工程施工; ③测量工后沉降时存在安全隐患; ④量测时需较多人力物力等缺点。为解决传统监测手段存在的问题, 人们对沉降监测技术做了进一步研究, 一些专家学者也对现有的沉降监测装置进行了改进研发。李敏等^[8]提出用深埋的基准杆与套在其上的沉降管之间的高差来

得出沉降。李莉^[9]提出使用水管式沉降仪测量路堤沉降, 该种方法是利用连通管的原理, 埋设于待测点处的连通管一端因沉降而发生水位下降, 位于外侧的连通管另一端必然水位上升, 上升值即为沉降值。然而以上沉降监测装置均需在沉降观测点设置高出地表的沉降观测标志物, 在实际应用中无法保证完全不干扰施工, 且不适用于工后沉降的长期观测。

针对上述现有沉降监测装置存在的弊端, 基于将土体沉降测量转换为对密闭系统内液体压力变化的测量原理, 本文提出了一种双压力传感器埋入式沉降仪。通过室内试验详细阐述了该沉降仪的使用方法, 并对其测量精度和重复性误差等性能指标进行了分析。结合现场试验, 通过与传统沉降板监测结果的对比分析, 进一步验证了该沉降仪的可行性和实用性。

1 沉降仪结构及工作原理

图 1 为该双压力传感器埋入式沉降仪的结构示意图。从图 1 可见, 该沉降仪主要由竖向密闭管、基准传感器和路基传感器组成。其中, 竖向密闭管由构成其主体的 PVC 管和位于顶端的进水阀门和抽气阀门组成。基准传感器和路基传感器分别通过塑料液管与竖向密闭管的底部相连。通过控制进水阀门和抽气阀门可以将竖向密闭管和塑料液管内充满填充液, 从而形成一个完整的密闭系统。将竖向密闭管和基准传感器埋设于非沉降影响区, 使二者基本不受到施工的干扰, 同时将路基传感器埋设于沉降影响区, 使其与土体同步沉降。通过分别测量密闭系统在基准传感器和路基传感器位置处产生的液体压力, 从而实现把对土体沉降的测量转换为对密闭系统内液压变化的测量。采用四位半数显直流电压表可以实现将密闭系统内的液体压力转化为电信号, 便于采集。该沉降仪的工作原理详述如下:

以竖向密闭管内的液面位置作为基准点, 将基准传感器与该基准点之间的初始液面高差记为 h_0 , 路基传感器与该基准点之间的初始液面高差记为 h'_0 , 则路基传感器与基准传感器的相对高差为 $\Delta_0 = h'_0 - h_0$, 如图 2 (a) 所示。随着路基传感器与施工区土体同步发生沉降 (记为 s), 其与基准点之间的液面高差逐渐增大, 第 i 次观测时记为 h'_i 。同时, 第 i 次观测时基准传感器与基准点之间的液面高差记为 h_i , 此时路基传感器与基准传感器的相对高差增大为 $\Delta_i = h'_i - h_i$, 如图 2 (b) 所示。由于竖向密闭管和基准传感器均埋设于非沉降影响区, 距离施工区较远, 因而可认为二者不发生沉降, 相对位置不变, 即 h_i 始终等于初始值 h_0 。因此, 第 i 次观测时的土体总沉降 s 可以通过下式计

算得到:

$$s = \Delta_i - \Delta_0 \quad (1)$$

此外, 传感器与基准点之间的液面高差可以采用静水压力公式计算得到。以第 i 次的观测值 h_i 和 h'_i 为例, 二者可分别表示为:

$$h_i = P_i / \rho g \quad , \quad (2)$$

$$h'_i = P'_i / \rho g \quad , \quad (3)$$

式中 P_i 和 P'_i 分别为第 i 次观测时密闭系统在基准传感器和路基传感器位置处的液体压力; ρ 为密闭系统内的液体密度; g 为重力加速度。而液体压力 P_i 和 P'_i 则可以通过基准传感器和路基传感器分别测量得到, 二者可分别表示为:

$$P_i = kU_i + c \quad , \quad (4)$$

$$P'_i = k'U'_i + c' \quad , \quad (5)$$

式中, k 和 k' 分别为基准传感器和路基传感器的标定传感系数; c 和 c' 分别为基准传感器和路基传感器的标定常数; U_i 和 U'_i 则分别为第 i 次观测时, 使用四位半数显直流电压表测得的基准传感器和路基传感器的压力值。

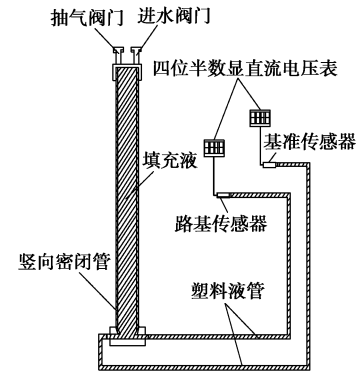


图 1 双压力传感器埋入式沉降仪的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of embedded settlement gauge based on dual-pressure sensor

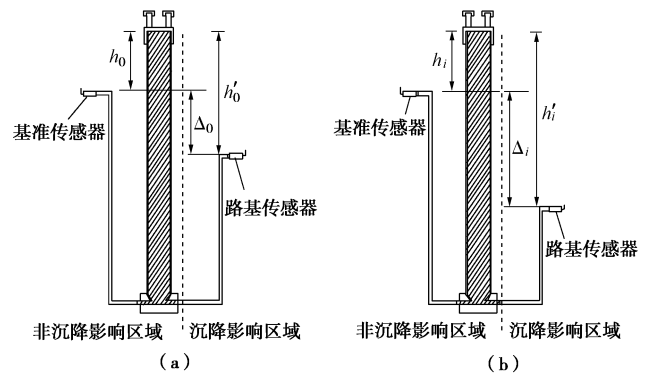


图 2 工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principles

将式 (4) 和 (5) 分别代入式 (2) 和 (3), 可得

第 i 次观测时路基传感器与基准传感器的相对高差

$$\Delta_i = h'_i - h_i = [(k'U'_i + c') - (kU_i + c)] / \rho g \quad (6)$$

同理，可计算得到

$$\Delta_0 = h'_0 - h_0 = [(k'U'_0 + c') - (kU_0 + c)] / \rho g \quad (7)$$

式中， U_0 和 U'_0 分别为初始观测时使用直流电压表测得的基准传感器和路基传感器的压力值。

最后得到第 i 次观测时的土体总沉降 s 表达式：

$$s = \Delta_i - \Delta_0 = [k'(U'_i - U'_0) - k(U_i - U_0)] / \rho g \quad (8)$$

2 室内试验及结果分析

2.1 室内试验

为了研究双压力传感器埋入式沉降仪的测量精度和重复性误差，本文开展了一系列的室内试验。如图 3 所示，固定竖向密闭管和基准传感器，采用升降平台来模拟路基传感器同土体的沉降，具体步骤如下：

(1) 检查试验所需的升降平台，预热并校正四位半数显直流电压表和两个传感器，检查系统密闭性。

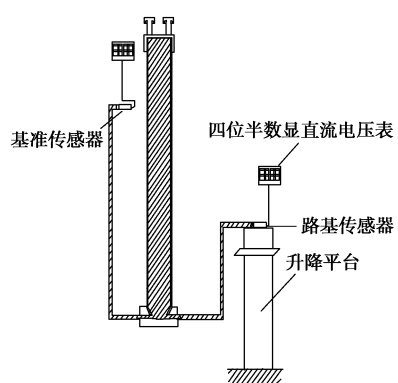


图 3 室内试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laboratory tests

(2) 调整阀门，将系统内部抽成真空状态，使填充液充满系统内部，整个过程中保证系统的密闭性。

(3) 将试验仪器架设好之后，将基准传感器固定在指定位置，将路基传感器固定在升降平台上；将竖向密闭管固定，并且保证竖向密闭管底部高于路基传感器所在位置。

(4) 将路基传感器此时的高度视为初始高度。接通电源，测量并记录双传感器的初始读数 U_0 、 U'_0 ，分别记录基准、路基传感器与基准点间的高差 h_0 、 h'_0 。

(5) 调节升降平台使路基传感器随着平台一同下降，直至达到预设的单次沉降 S ，稳定后记录新的基准、路基传感器与基准点间的液面高差 h_1 、 h'_1 和电流表的读数 U_1 、 U'_1 。

(6) 重复步骤 5，并记录每次稳定后的数据，直至完成预定的沉降。

2.2 试验结果分析

为了验证该仪器测量沉降的精确性，本试验分别设计了单次小沉降和单次大沉降两种情形，具体试验结果见表 1 和表 2。通过式 (8) 依次得到对应的沉降计算值，并针对单次沉降采取重复试验的方法得到平均计算值，然后与实际值进行比较得到方差、绝对误差和相对误差等评价指标。本次试验中 $k' = 6.4708$ Pa/U， $c' = -0.7478$ ， $k = 6.7584$ Pa/U， $c = -1.1195$ ， $\rho = 1000$ kg/m³， $g = 9.8$ m/s²。

表 1 单次小沉降时平均计算值与实际值的对比

Table 1 Comparison between average calculated and actual values of single small settlement

单次沉降 实际值 /mm	单次沉降 平均计算 值/mm	方差	平均绝对 误差/mm	平均单次 相对误差 /%
1	0.83	0.18	0.39	-17.23
2	1.91	0.36	0.59	-4.52
4	3.91	1.22	0.52	-2.15
6	5.92	0.17	0.41	-1.28
8	7.86	0.21	0.44	-1.79
10	9.90	-0.97	0.74	-0.97
12	11.93	0.13	0.36	-0.60
14	13.79	0.38	0.59	-1.47
16	15.92	0.47	0.69	-0.48
18	17.78	0.44	0.64	-1.22
20	19.97	0.43	0.67	-0.16

表 2 单次大沉降时平均计算值与实际值的对比

Table 2 Comparison between average calculated and actual values of single large settlement

单次沉降 实际值/mm	单次沉降平均 计算值/mm	方差	绝对误 差/mm	相对误 差/%
100	97.51	6.20	2.49	-2.49
200	199.63	0.14	0.37	-0.18
300	297.76	5.03	2.24	-0.75
400	397.42	6.66	2.58	-0.65
500	499.85	0.02	0.15	-0.03
600	602.28	5.20	2.28	0.38
700	706.56	42.98	6.56	0.94
800	809.60	92.20	9.60	1.20
900	913.75	184.17	13.57	1.51

根据表 1 和表 2 计算得出的单次沉降平均值与单次沉降实际值之间的误差较小，以下因素可能是误差产生的原因：在试验过程中，竖向密闭管不可避免的会受到外界因素干扰，表现为传感器受到震动，在四位半数显直流电压表上不能精确的读出相应位置的电压，造成误差，最终影响试验结果的准确性。从对比结果可以看到，计算得到的沉降结果与实际沉降的结果误差相对较小，在允许的范围内，能够满足沉降监测的精度要求。

3 现场试验

为了进一步验证双压力传感器埋入式沉降仪的可行性，本文开展了相应的现场试验。鉴于沉降板监测

方法已较成熟, 在实际工程中积累较多的经验, 且该方法本身也满足工程的精度要求, 将双压力传感器埋入式沉降仪结果与之进行对比分析, 更具有说服力。

77 省道龙湾至洞头延伸线疏港公路灵霓海堤西段地貌属冲海积平原区, 地形较为平坦, 高程一般在 1.20~1.50 m。拟建新路基现状为鱼塘, 北侧为灵霓海堤公路; 勘察深度范围内浅部土层为海堤抛石体、淤泥或淤泥质粉质黏土, 厚度约 35.00 m, 下部土层为黏性土, 软塑状。

现场试验依托 77 省道延伸线龙湾至洞头疏港公路工程, 依据施工进度和现场条件, 选取了 2 个典型断面进行现场试验。每个试验断面相应地布置一个双传感器埋入式沉降仪, 其中断面 K24+350 的沉降板与路基传感器埋设在路中, 断面 K24+540 的沉降板与路基传感器埋设在路肩, 典型沉降观测的剖面布置见图 4。为了保证两者对比条件的一致性, 通过将路基传感器和沉降板固定来测量同一点的沉降变化 (图 5)。基准传感器则埋置于离施工场区较远的非沉降影响区, 并加以保护 (图 6)。

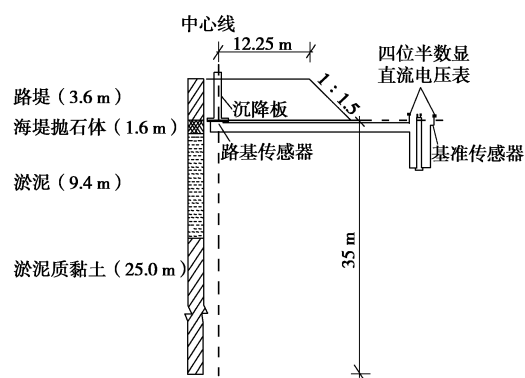


图 4 沉降观测剖面布置图

Fig. 4 Elevation view of settlement instrumentation

3.1 现场埋设

准备阶段: 保持进水阀门关闭, 打开抽气阀门, 采用真空设备抽气直至竖向密闭管和塑料液管内达到真空状态; 打开进水阀门, 直至竖向密闭管内充满液体, 同时关闭进水阀门和抽气阀门保证竖向密闭管和塑料液管的密闭性。

埋设阶段: 将路基传感器放入沉降板下面的圆柱形套筒内 (图 5), 一端连接电线, 另一端连接塑料液管。

3.2 现场试验数据及分析

图 7 为 K24+350 断面测量得到的时间 - 荷载 - 沉降曲线, 对比传统沉降监测方法和双压力传感器埋入式沉降仪的数据来验证本文仪器测量沉降的准确性。



图 5 路基传感器与沉降板的固定

Fig. 5 Fixation of sensor and settlement plate



图 6 基准传感器的埋置与保护

Fig. 6 Installation and protection of standard sensor

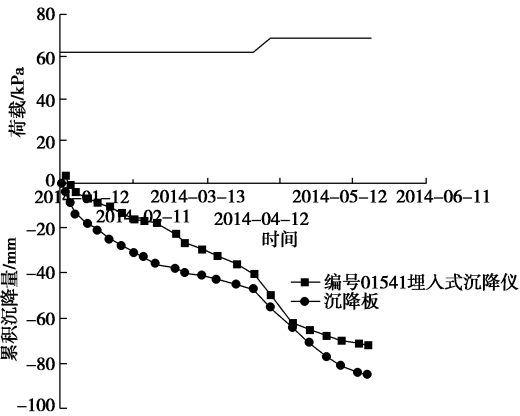


图 7 时间 - 荷载 - 沉降曲线

Fig. 7 Time-load-settlement curves

从图 7 可见, 在恒定荷载作用下, 采用两种装置测得的沉降值存在一定的差异, 且呈现先增大后减小的变化趋势。在 3 月 12 到 4 月 12 日期间加载过程中, 双压力传感器埋入式沉降仪曲线比沉降板沉降曲线更陡, 此时采用双传感器埋入式沉降仪测量的沉降值明显大于采用埋设沉降板方式测量的沉降值, 由于加载期路基传感器受震动影响敏感度高, 频率变化较大, 因此所计算的沉降量也有所增大。后期随着荷载保持恒定, 两条沉降曲线的差异又逐步增大, 后期沉降板的沉降速率大于双传感器埋入式沉降仪的沉降速率。在沉降观测期间, 两条沉降曲线没有表现出明显的同步变化趋势, 因此两条沉降曲线沉降差值较大。另外由于双压力传感器埋入式沉降仪的主要构件均埋设在土体中, 不会干扰正常的施工; 操作方便, 只需要记

录基准传感器和路基传感器的压力值并通过式(8)换算为沉降即可,且避免了监测人员进入施工区采集数据,从而保证了监测人员的人身安全。此外,其可以在施工结束后继续用于路基工后沉降的长期监测。可见,与沉降板相比,该双压力传感器埋入式沉降仪在现场应用中的优势显著。

4 结 论

本文通过开展双压力传感器埋入式沉降仪的室内试验和现场试验,讨论了仪器的可行性和适用性。初步结论如下:

(1) 基于将土体沉降测量转换为对密闭系统内液体压力变化测量的原理,本文提出的双压力传感器埋入式沉降仪为工程测量提供了一种新的沉降监测技术。该沉降仪主要由埋设于非沉降影响区的竖向密闭管、基准传感器和埋设于沉降影响区、与土体沉降一致的路基传感器组成,构造简单,成本较低。

(2) 室内试验结果表明,该沉降仪测量精度可达2 mm,重复性误差为2 mm。现场试验表明其与采用沉降板得到的测量结果基本一致,验证了该沉降仪的可行性,能够满足工程监测要求。

(3) 与传统沉降板相比,双压力传感器埋入式沉降仪采用了体积小且埋设于土体中的传感器,具有不干扰施工、操作简便、测量效率高和可用于工后沉降等显著特点,具有广阔的市场应用前景。

参考文献:

- [1] WU Yue-dong, DIAO Hong-guo, LIU Jian, et al. Field studies of a technique to mitigate ground settlement of operating highways[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2016, **17**(7): 565 - 576.
- [2] 潘林友, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1053 - 1058. (PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1053 - 1058. (in Chinese))
- [3] 唐杰军. 拓宽软土路基沉降监测与室内试验分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, **31**(6): 163 - 167. (TANG Jie-jun. Settlement monitoring on soft soil foundation in widen subgrade and interior simulating test[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2011, **31**(6): 163 - 167. (in Chinese))
- [4] 袁怀宇. 公路工程中沉降板的应用[J]. 东北公路, 2003, **26**(3): 79 - 80. (YUAN Huai-yu. The application of settlement plate in highway engineering[J]. Northeastern Highway, 2003, **26**(3): 79 - 80. (in Chinese))
- [5] 张阿峰. 电磁式自动化沉降仪测尺的改进技术[J]. 水力发电, 2012, **38**(2): 86 - 88. (ZHANG A-feng. Improvements on the staff of electromagnetic automatic settlement gauge[J]. Water Power, 2012, **38**(2): 86 - 88. (in Chinese))
- [6] 李克绵, 张文东, 刘天鹏, 等. 振弦式沉降仪在双沟水电站混凝土面板堆石坝中的应用[J]. 水电自动化与大坝检测, 2012, **36**(3): 58 - 60. (LI Ke-mian, ZHANG Wen-dong, LIU Tian-peng, et al. Application of vibrating wire settlement gauge in concrete face rockfill dam of Shuanggou Hydropower Station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, **36**(3): 58 - 60. (in Chinese))
- [7] 杨晓明, 马亚兰. 沉降仪在国内外现状的描述[J]. 甘肃科技, 2009, **25**(11): 66 - 69. (YANG Xiao-ming, MA Ya-lan. Settlement instrument in the description of the status quo at home and abroad[J]. Gansu Science and Technology, 2009, **25**(11): 66 - 69. (in Chinese))
- [8] 李 敏, 李粤南, 林福林, 等. 新型软基沉降观测装置的安设与维护[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2002(增刊1): 102 - 103. (LI Min, LI Yue-nan, LIN Fu-lin, et al. Settlement observation device of the new soft foundation installation and maintenance[J]. Exploration Engineering: (Rock and Soil Drilling and Tunneling Engineering), 2002(S1): 102 - 103. (in Chinese))
- [9] 李 莉. 水管式沉降仪应用技术研究[J]. 公路与汽运, 2007(1): 97 - 98. (LI Li. The technology research of tube settlement gauge[J]. Highway and Motor, 2007(1): 97 - 98. (in Chinese))

(本文责编 明经平)