

沉降自动化采集系统在软基处理中的应用

张伟云^{1,2}, 杨建贵³, 马昌龙⁴

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 南京市水务工程建设管理中心, 江苏 南京 210017;

4. 南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210002)

摘要: 地表沉降监测是软基处理中的重要监测项目,用于指导现场施工和预测工后沉降。目前软基处理过程中沉降监测大多采用几何水准测量的人工监测方法,自动化程度较低。为实现软基处理沉降监测的自动化,设计开发了基于压差式静力水准仪和 GPRS 通信技术的沉降自动化采集系统,并分析了该系统的误差来源,针对传感器、供电方式及外界条件等影响因素对系统进行了优化设计。此外,通过沉降自动化采集系统在台州市东部新区软基处理工程监测中的工程应用实例,说明了该系统在软基处理沉降监测中的可行性与实用性。

关键词: 软基处理;压差式静力水准仪;GPRS;误差分析

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0048—07

Application of Settlement Automatic Collection in Soft Foundation Treatment

ZHANG Weiyun^{1,2}, YANG Jianguai³, MA Changlong⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

3. Nanjing Water Affairs Engineering Construction Management Center, Nanjing, Jiangsu 210017, China;

4. Nanjing Public Engineering Construction Center, Nanjing, Jiangsu 210002, China)

Abstract: Surface settlement monitoring is an important monitoring project in soft foundation treatment, which can be used to guide site construction and predict post-construction settlement. At present, the settlement monitoring in the process of soft foundation treatment mostly adopts the manual monitoring method of geometric leveling, which has a low degree of automation. In this paper a settlement automatic collection system based on differential pressure static level and GPRS communication technology was designed and developed in order to realize the automation of soft foundation settlement monitoring. The error sources of the system have been analyzed. The system is optimized according to the influence factors of sensors, power supply mode and external conditions. In addition, the engineering application example of subsidence automatic collection system in soft ground treatment engineering monitoring in eastern New District of Taizhou City illustrates the feasibility and practicability of this system in soft ground treatment settlement monitoring.

Keywords: soft foundation treatment; differential pressure static level; GPRS; error analysis

软基处理过程中通常都需要进行地表沉降的监测,以监测结果来指导现场施工,把控工程进度,确保工程的安全性,同时也是预测工后沉降的重要依据^[1-2]。常见的沉降监测方法有几何水准测量、GPS 测量和静力水准测量^[3]。传统的几何水准测量

自动化程度低,人工成本高。GPS 造价昂贵,且高程测量精度低。静力水准系统是基于高精度传感器的测量系统。近年来,静力水准测量凭借其结构简单、测量精度高、自动化程度高等特点广泛应用于大坝^[4-5]、桥梁^[6-7]、地铁隧道^[8-9]、高速铁路^[10-11]、

建筑物沉降^[12]等各种工程测量中。目前常见的静力水准仪主要有差动电压式、超声波式、振弦式、电容式、磁致式、光电式、压差式等类型。由于软基处理中的总沉降量较大,可达 800 mm ~ 1 000 mm,只有磁致式和压差式静力水准仪的量程满足要求,而磁致式静力水准仪相比于压差式静力水准仪的单价要高得多,且通常静力水准仪都有较大体积的储液装置,相比之下,压差式静力水准仪的体积小,所占空间小。因此,在保证测量精度的前提下,压差式静力水准仪更加适用于软基处理的沉降监测。另一方面,随着无线通讯技术的发展,无线传输因其安装维护简便,无需布线的优点已经逐渐取代了有线传输。其中,GPRS 无线传输运营建设费用低,采用协议带宽,传输速度快,是目前最为常用的无线通讯方式。根据上述分析,本文设计了基于压差式静力水准仪和 GPRS 通信技术的沉降自动化采集系统,并将其应用于台州市软基处理工程的沉降监测中。

1 静力水准系统测量原理

静力水准系统基于连通器的原理,即互相连通的容器中的液面总是保持在同一水平面^[13]。多点系统中至少需要设置一个基准点,且该点的竖向位移是相对恒定或已知的^[14]。

假设共有 n 个观测点,初始状态时各测点的安装高程分别为 $Y_{01} \cdots Y_{0i} \cdots Y_{0j} \cdots Y_{0n}$,各测点的液面高度分别为 $h_{01} \cdots h_{0i} \cdots h_{0j} \cdots h_{0n}$ (见图 1)。

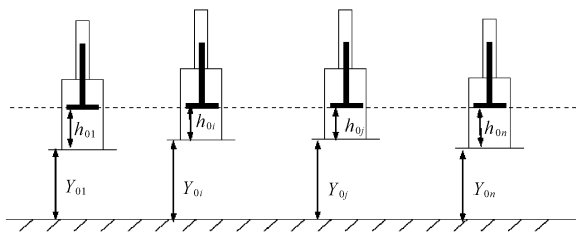


图1 初始状态示意图

对于初始状态,显然有:

$$Y_{01} + h_{01} = \cdots = Y_{0i} + h_{0i} = \cdots = Y_{0j} + h_{0j} = \cdots = Y_{0n} + h_{0n} \quad (1)$$

当第 k 次产生不均匀沉降后,各测点相对于基准面的总沉降量分别为: $\Delta h_{k1} \cdots \Delta h_{ki} \cdots \Delta h_{kj} \cdots \Delta h_{kn}$,各测点的液面高度变化为 $h_{k1} \cdots h_{ki} \cdots h_{kj} \cdots h_{kn}$ (见图 2)。

由于液面的高度还是相同的,因此有:

$$(Y_{01} + \Delta h_{k1}) + h_{k1} = \cdots = (Y_{0i} + \Delta h_{ki}) + h_{ki} = \cdots = (Y_{0j} + \Delta h_{kj}) + h_{kj} = \cdots = (Y_{0n} + \Delta h_{kn}) + h_{kn} \quad (2)$$

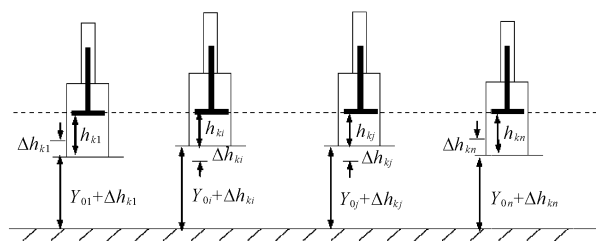


图2 任意次沉降状态示意图

第 j 个观测点相对于基准点 i 的相对沉降量为:

$$H_{ji} = \Delta h_{kj} - \Delta h_{ki} \quad (3)$$

由式(2)可以得出:

$$\Delta h_{kj} - \Delta h_{ki} = (Y_{0i} + h_{ki}) - (Y_{0j} + h_{kj}) = (Y_{0i} - Y_{0j}) - (h_{kj} - h_{ki}) \quad (4)$$

由式(1)可以得出:

$$Y_{0i} - Y_{0j} = h_{0j} - h_{0i} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可以算出第 j 个观测点相对于基准点 i 的相对沉降量:

$$H_{ji} = (h_{0j} - h_{0i}) - (h_{kj} - h_{ki}) \quad (6)$$

由式(6)可知,利用静力水准仪传感器测出不同时刻各点的液面高度值,通过计算基准点与待测点液位高度变化的差值即可得待测点相对基准点的相对沉降量^[15-16]。

2 沉降自动化采集系统的构建

2.1 系统总体设计

沉降自动化采集系统的构建基于静力水准系统,包括传感器子系统、数据采集与传输子系统和数据分析子系统三部分。系统的工作流程如图 3 所示,由数据采集模块采集压差式静力水准仪输出的电流信号,通过 GPRS - DTU 模块进行无线传输,由电脑端服务器 TLINK 云平台接收数据,并进行数据处理。

2.2 传感器子系统

传感器子系统为自行研制的压差式静力水准仪,包括安装底座、固定在安装底座上且设有进水口和出水口的不锈钢外壳,设置在外壳内部的有机玻璃腔体以及具有通孔的压力传感器。其结构示意图如图 4 所示。

有机玻璃腔体设有四个开口,一个开口内刻螺纹,与压力传感器螺纹规格相同,一个开口作为排气口,另外两个开口分别作为进水口和出水口。静力水准仪通过通液管与水箱连接,水箱材料也为有机玻璃,设有两个开口,一个用于连接通液管,一个用

于连接通气管。水箱示意图如图 5 所示。

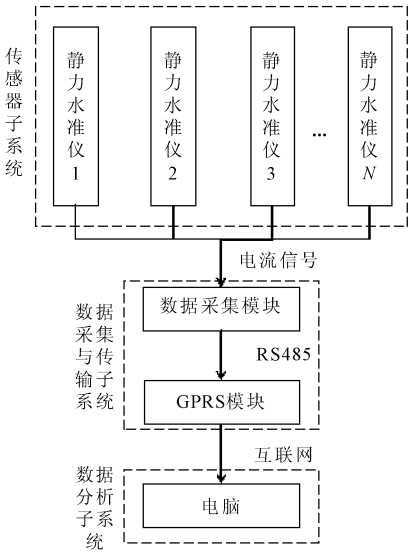


图 3 沉降自动化采集系统工作流程示意图

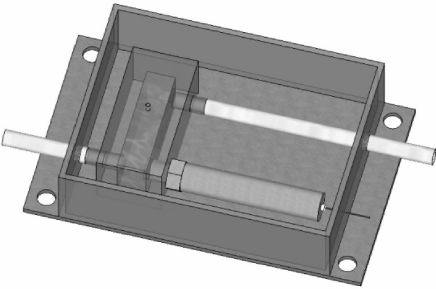


图 4 压差式静力水准仪结构示意图

通液管材料为白色半透明 PU 软管,内径为 16 mm。通气管为内径 10 mm 的 PVC 塑料软管。所选用的压力传感器为直引线型扩散硅压力传感器,压力量程为 20 kPa,精度等级 0.1% FS,输出信号为 4 mA~20 mA 电流二线制输出。静力水准仪通过二芯屏蔽电缆线连接电源和数据采集模块。

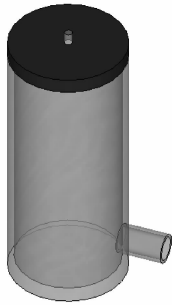


图 5 水箱示意图

2.3 数据采集与传输子系统

数据采集传输设备由数据采集模块,定时模块和无线传输模块组成。

数据采集模块采用 DAQM-4202 标准模拟量采集模块,8 通道标准模拟量差分输入量程,采用标准 MODBUS-RTU 通讯协议。数据采集模块工作时,将静力水准仪传感器输出的电流信号经过高精密金属箔电阻器转换为电压信号,该电压信号经过 AD 转换器从模拟量变为数字量,通过光电耦合器由 CPU 读出,完成数据的采集。读出的数据闪存在单片机中的寄存器中并实时发送。

无线传输模块^[17]采用 TP301 物联网无线数据传输终端设备,包括中国移动 SIM 卡和 GSM 托盘天线。无线模块通过 MODBUS-RTU 协议连接 TLINK 物联网云平台传输数据,需要在平台上创建设备和设置各传感器的读写指令,包括从站地址、MODBUS 功能码、寄存器地址和数据类型等。然后将模块通过 USB 端口连接电脑进行参数配置,将 DTU 的登录包和服务器信息按照 TLINK 云平台上的设备信息栏进行配置,串口通信参数与数据采集模块一致。参数配置完成后,远程数据监控界面则会出现相应的监测信息,如图 6 所示。



图 6 远程数据监控界面

由于采集模块采集的数据实时发送,数据数量过多导致后期数据处理比较困难,需要设置间隔一段时间读取一次。因此,在对采集模块供电的电路中增加了一个多功能通电延时器。

2.4 数据分析子系统

计算机在接收到数据后,可利用 TLINK 平台将数据导出为 Excel 文件,进行数据的分析处理,并绘制相应的沉降曲线。TLINK 云平台上建立有相应的

数据库存储数据,用户可以选择性地查看历史数据并导出。

图 7 以两个压差式静力水准仪和两个水箱组成的沉降自动化采集系统为例说明了系统的安装与各模块的连接。

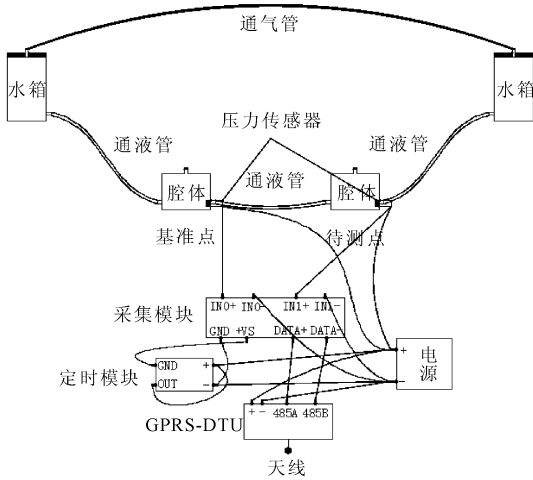


图 7 沉降自动化采集系统连接示意图

2.5 沉降量计算

压差式静力水准仪是一种将沉降变化转换为液压变化的传感器。传感器输出的电流为 I ($4\text{ mA} \sim 20\text{ mA}$),传感器受到的压力为 P ($0\text{ kPa} \sim 20\text{ kPa}$),两者呈线性关系,则可得出压力与电流的关系式:

$$P = 1.25(I - 4) \tag{7}$$

又有公式:

$$P = \rho hg \tag{8}$$

其中 ρ 为液体密度(取水的密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$); g 为重力加速度(取 9.8 m/s^2),为固定不变值,只有 h 为变化值。所以,沉降变化量 Δh 与传感器的压力变化 ΔP 成正比。

根据式(6)可得待测点 1 相对基准点 0 的沉降量为:

$$\Delta H = \frac{(P_{01} - P_{00}) - (P_{k1} - P_{k0})}{\rho g} \times 1000 \tag{9}$$

式中: ΔH 为待测点的相对沉降量,mm; P_{01} 为测点测得的初始值,kPa; P_{k1} 为测点实际测得的值,kPa; P_{00} 为基准点测得的初始值,kPa; P_{k0} 为基准点实际测得的值。

3 沉降自动化采集系统的误差分析

影响沉降自动化采集系统测量精度的因素主要有:传感器子系统的误差,数据采集与传输子系统的误差以及外界条件引起的误差。

(1) 传感器子系统的误差。传感器子系统的误差主要取决于所用的扩散硅压力传感器的测量精度,但是传感器在使用过程中也会产生一定的误差。压力传感器的测量精度主要取决于所用硅晶体的材质,在出厂时已经给定。为减少传感器安装使用的误差,在静力水准系统的安装过程中要注意确保传感器的水平放置和传感器进水口的畅通。

此外,静力水准系统的填充液体也会对测量的精度产生重要的影响。例如填充液可能会受到灰尘以及细菌的污染,严重时甚至会出现真菌繁殖,影响填充液的密度,甚至会阻塞通液管。

(2) 数据采集与传输子系统的误差。由于沉降自动化采集系统的数据采集模块和无线传输模块出厂时已经给定测量精度,所以数据采集与传输子系统的误差主要考虑供电方式引起的误差。分别采用电源适配器和蓄电池对两台传感器进行供电,监测 24 h,0.5 h 采集一次数据,共采集了 48 组数据。测试结果如图 8 所示。

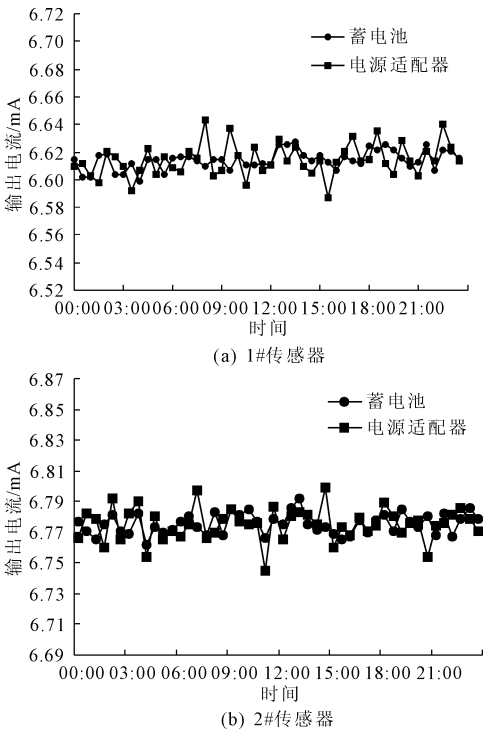


图 8 各传感器采用电源适配器和蓄电池供电监测数据对比图

结果表明当使用蓄电池代替电源适配器供电时,沉降自动化采集系统的精度明显提高,且奇异点的数量大大减少。分析电源适配器供电误差的原因是电源适配器交流转直流的过程中会残留一定的交流电成分,由于残留交流电的频率较低,滤波难度较大,而且残留的交流电会输入到采集模块的 CPU 以

及 AD 转换器中,影响子系统中的数据采集精度。因此,系统应选择蓄电池的供电方式。

(3) 外界条件引起的误差。静力水准系统的物理基础是伯努利方程:

$$P_1 + \rho_1 g_1 h_1 = P_2 + \rho_2 g_2 h_2 = C \quad (10)$$

式中: P_1, P_2 为大气压; ρ_1, ρ_2 为液体密度; h_1, h_2 为液面高度; C 为常数。

由式(10)可知,影响沉降自动化采集系统精度的因素有压力、密度和重力加速度三个方面。而温度的不均匀变化会导致液体的密度变化,所以系统主要受压力差、温度、重力加速度及其他因素的影响。

4 工程应用

4.1 工程概况

本工程位于台州市东部新区聚洋大道以东、围

四河以西、青龙浦路以南、三山北涂南隔堤以北的区域,面积约 263.5 万 m^2 。该工程是在台州东部新区涂面整理工程吹填完成后的基础上进行的,通过真空预压的地基处理方式将工程区内的吹填泥塘转变成建设用地,以满足后续开发建设条件。本次工程二标段共分为四个大区,分别是 2-1、2-2、2-3 南湿地区域以及通用机场区,各大分区中包含部分道路区。南湿地区块采用无砂垫层浅层真空预压处理方式,道路区采用两次无砂垫层真空预压处理方式。目前通用机场区和 2-2 区块处理已基本完成,正进行 2-1 区块的预压处理和部分区块的二次处理。地表沉降监测单块加固区布设 3 个测点,人工监测频次为加载期,压载期前 30 天 1 天 1 次,压载期前 30 天后至卸载 3 天 1 次。

4.2 测点布置及安装

2-1 区的监测点布置平面图如图 9 所示。

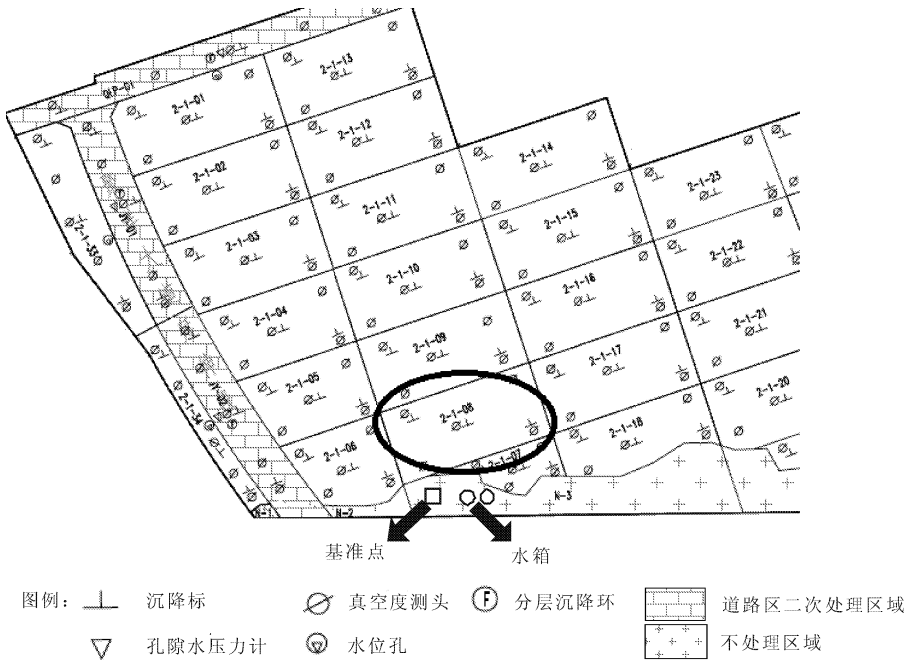


图 9 2-1 区监测点布置平面图

2-1-08 区块的排水板深度为 4.5 m,正处于抽真空起始阶段。因此,本文选取 2-1-08 区块的三个测点作为沉降监测点,如图 9 中圈画区域。

沉降自动化采集系统安装步骤如下:

(1) 在待测点处放置三台带有安装底座的压差式静力水准仪,通过混凝土墩中的预埋组件安装固定,预埋组件包括钢底板和不锈钢螺杆,预埋底板面与混凝土墩面找平,定位螺杆与墩面垂直。将两个水箱和基准点静力水准仪安装在加固区外的稳定位

置,如图 10 所示。应注意传感器最低点与水箱液面的高差不能超过传感器的量程。各静力水准仪和水箱均放置在不锈钢仪器保护罩中,并填充隔热材料。

(2) 通液管,通气管的连接。按测点之间的管线路径长度顺序铺设通液管,用热水泡涨后依次接入各静力水准仪和水箱的管嘴接口,然后用卡箍卡紧,防止漏液。管路铺设时注意管子理顺拉直,中间尽量不让管路走弯道,保证压力能快速传递。静力水准仪之间的通液管需根据测点间距离计算好最佳

长度,防止沉降发生时,通液管长度不够,导致通液管与水箱连接处出现松动,发生漏液现象。通液管采用 $\phi 20\text{ mm}$ 的聚氯乙烯保温材料进行保护。同时,两个水箱通过 PVC 塑料软管连接,使系统内气压平衡。

(3) 系统充液。为了减少水中的气泡,选用烧开后的纯净水作为填充液。从一端加液,加液时应注意不间断缓慢加入。由于水箱与静力水准仪腔体之间存在高低差,腔体内先注满液体,为了完全排尽通液管内的气泡,腔体的排气口溢出部分液体后再封闭。不断观察系统内的液位高度,当液位达到水箱标线时停止充液。

(4) 线路连接。采集箱中放有已连好线路的蓄电池、数据采集模块、无线模块和定时模块。根据静力水准仪间距确定线缆长度,将传感器的二芯电缆汇集成两根总线引入采集箱中,一根连接电源,一根连接数据采集模块的各输入通道。将通信线缆穿入 $\phi 20\text{ mm}$ 的 PVC 管,防止线路被破坏。

4.3 人工与自动监测结果对比分析

现场实测日期:2018 年 5 月 3 日至 2018 年 5 月 9 日。本文对地表沉降进行了长达 7 天的测量,设定每 6 h 采集一次数据,最终每个传感器各采集了 28 组数据。将自动监测数据与同期每天的人工测量数据进行对比,如图 10—图 12 所示。通常以三个测点的平均沉降量作为一个区块固结沉降的代表值,2-1-08 区块三个沉降监测点的平均沉降量的数据对比如图 13 所示。

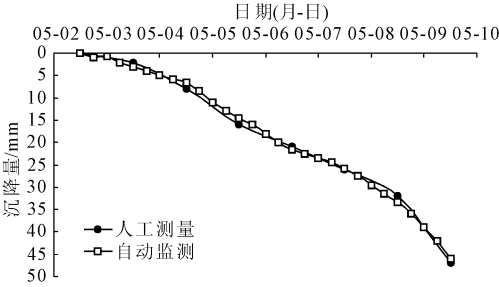


图 10 1 # 沉降监测点人工测量与自动监测数据对比

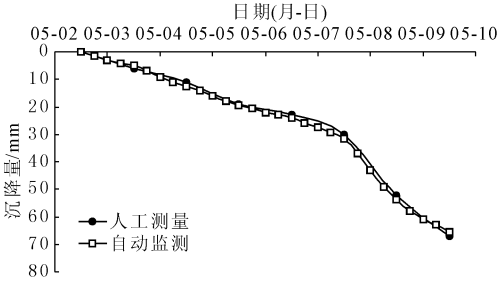


图 11 2 # 沉降监测点人工测量与自动监测数据对比图

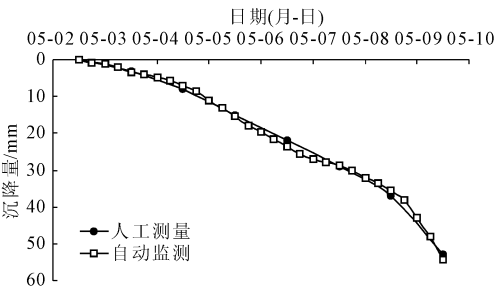


图 12 3 # 沉降监测点人工测量与自动监测数据对比图

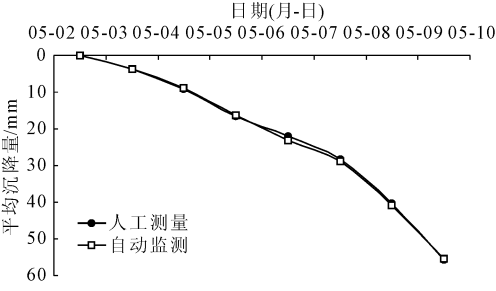


图 13 平均沉降量人工测量与自动监测数据对比图

此处沉降量指累计沉降量,即本期沉降加前期累计沉降。取每日 12:00 的数据作为 1 d 的代表值,将地表沉降人工与自动监测数据误差统计如表 1 所示。

表 1 地表沉降人工测量与自动监测数据误差表

日期 (月-日)	不同沉降监测点误差(人工测量-自动监测)/mm			
	1 #	2 #	3 #	平均值
05-03	-1.1	0.9	-0.3	-0.1
05-04	1.4	-1.7	0.9	0.2
05-05	1.5	-0.7	-0.4	0.3
05-06	-0.7	-1.1	1.5	-1.1
05-07	0.2	-1.8	0.2	-0.5
05-08	-1.4	-1.9	1.5	-0.6
05-09	0.9	1.5	-1.4	0.4

由上述图表可知,单个沉降监测点沉降自动化采集系统与人工测量的结果基本吻合,规律性一致,数据偏差在 2 mm 以内。2-1-08 区块平均沉降量的人工测量曲线与自动监测曲线的大部分数据点偏差极小。说明沉降自动化采集系统采集的数据能满足软基处理沉降监测的要求。

5 结 语

(1) 根据静力水准系统的组成,自主设计研制了压差式静力水准仪,完成了传感器子系统的安装。此系统具有制作成本低、性价比高、功耗小、自动化程度高等优点。

(2) 分析了沉降自动化采集系统的误差来源及解决措施。确保传感器的正确安装,减小安装误差。

(3) 结合沉降自动化采集系统在台州市东部新区软基处理工程沉降监测中的应用,自动监测与人工测量数据的对比验证了沉降自动化采集系统用于软基处理沉降监测的可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 张文昌.软土地基沉降监测仪的研究[D].北京:中国计量科学研究院,2006.
- [2] 柯 嘉.揭阳潮汕机场工程地基处理工程监测分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):227-230.
- [3] 李德桥.基于磁致式静力水准仪的沉降远程监控系统研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [4] 梁国清,周娇娇,董海波.静力水准系统在黄龙滩大坝变形监测中的应用[J].大坝与安全,2012(3):25-29,34.
- [5] 李农发,赵义飞.静力水准测量系统在向家坝水电站的应用[J].大地测量与地球动力学,2013,33(S1):181-182,185.
- [6] 杨 奇.高速铁路桥梁桩基础变形性状试验与工后沉降研究[D].广州:中南大学,2011.
- [7] 张建民.静力水准自动化系统在高铁桥墩差异沉降监测中的应用[J].铁道勘察,2016,42(2):1-2,5.
- [8] 冯 谦,张 伟,朱 念,等.基于 GPRS 的远程铁路路基沉降实时监测系统的设计[J].大地测量与地球动力

学,2013,33(3):155-157.

- [9] 匡团结,张志刚.自动化监测系统在某高速铁路运营监测中的应用[J].铁道勘察,2013,39(4):1-2,5.
- [10] 谢雄耀,李 军,王 强.盾构施工地表沉降自动化监测及数据移动发布系统[J].岩土力学,2016,37(S2):788-794.
- [11] 黄新召.港珠澳大桥拱北隧道静力水准自动化监测系统应用研究[J].测绘与空间地理信息,2017,40(6):173-174,177.
- [12] 胡云龙,汪大超.静力水准系统在沉降监测中的应用[J].城市勘测,2017(3):154-157.
- [13] 何晓业.静力水准系统在大科学工程中的应用及发展趋势[J].核科学与工程,2006,26(4):332-336.
- [14] JONES M. Latest results from the CLIC geodetic studies, international workshop on acceleator alignent[C]//The 11st International Workshop on Acceleator Alignment, Hamburg, Germany, 2010.
- [15] 韩三琪.物联网技术在城轨交通工程变形监测中的应用[J].现代城市轨道交通,2015(2):73-76.
- [16] Song Kaichen, Nie Xili. Adaptive fusion algorithms based on weighted least square method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(3):451-454.
- [17] 程传杰,王 斌,吴凤娇.基于 51 单片机的油矿测控系统硬件设计[J].水利与建筑工程学报,2013,11(2):168-171.

(上接第 32 页)

- [4] 于学馥.轴变论与围岩变形破坏的基本规律[J].铀矿冶,1982,1(1):8-17.
- [5] 张继勋,刘秋生.地下工程稳定性分析方法现状与不足[J].现代隧道技术,2005,42(1):1-5.
- [6] 闫红江,邓志刚.丽香铁路中义隧道高地应力软岩大变形控制技术[J].水利与建筑工程学报,2019,17(1):67-72.
- [7] Charpentier D, Tessier D, Cathelineau M. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing. case of tournemire, france[J]. Engineering Geology, 2003, 70(1/2):55-69.
- [8] 郑颖人,徐 浩,王 成.隧洞破坏机理及深浅埋分界标准[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(10):1851-1875.
- [9] 刘学增,张 鹏,周 敏.纵向裂缝对隧道衬砌承载力的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2010,31(10):2096-2101.
- [10] 李占海,朱万成,冯夏庭,等.侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J].岩土力学,2010,31(S2):

441-448.

- [11] 彭建兵,胡志平,门玉明,等.马蹄形隧道 40°斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2258-2265.
- [12] 李永乾,朱哲明,胡 荣.主应力方向对隧道稳定性影响规律的研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(S1):93-98.
- [13] 梁正召.三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[D].沈阳:东北大学,2005.
- [14] 唐春安,王述红,傅宇方.岩石破裂过程数值试验[M].北京:科学出版社,2003.
- [15] 唐春安.脆性材料破坏过程分析的数值试验方法[J].力学与实践,1999,21(2):21-24.
- [16] 廖志毅,唐春安,高军程,等.撞击荷载作用下板状岩体破坏特性数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):120-124.
- [17] 唐春安,唐先烈,李连崇,等.岩土破裂过程分析 RFPA 离心加载法[J].岩土工程学报,2007,29(1):71-76.