

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209658

考虑温度效应的静力水准仪测试精度修正模型^{*}

肖 兴¹, 吴 琪¹, 陈 果², 张先伟³, 陈国兴¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所 南京 210009; 2. 华设设计集团股份有限公司江苏省先进道桥养护工程技术研究中心 南京 210000; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘 要:为系统研究温度效应对静力水准测试系统(HLS)测试精度的影响,降低 HLS 测试误差。结合笔者前期已完成的环境温度研究,搭建了温度梯度试验平台,开展了系列不同温度梯度条件下 HLS 测试精度试验研究,对升/降温模式、温度梯度 T_G 变化量、冷媒膨胀系数 γ_{di} 和联接管系数 γ_{pi} 、测点间距 D_{test} 的影响程度进行了量化研究。结果表明:升温或降温模式的温度梯度影响系数 ΔP_{t-G} 仅差 0.003 mm/℃,升/降温模式对 HLS 测试精度没有显著影响;测点高程与 T_G 具有明显相关性; ΔP_{t-G} 与 $(\gamma_{di}-\gamma_{pi})$ 呈线相关性,且 ΔP_{t-G} 与 D_{test} 存在幂函数关系。以此建立了 HLS 温度效应修正模型,并在南京长江隧道和太湖隧道的沉降监测中验证了模型的可靠性和适用性。

关键词: 静力水准仪;温度效应;温度梯度;测试距离;现场验证

中图分类号: TH761 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520. 20

Modified model for the temperature effect-induced error in the hydrostatic leveling system

Xiao Xing¹, Wu Qi¹, Chen Guo², Zhang Xianwei³, Chen Guoxing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Advanced Road and Bridge Maintenance Engineering Technology Research Center of Jiangsu Province, Ltd of China Design Group Co., Nanjing 210000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: To investigate the influence of temperature effect on the measurement accuracy of hydrostatic leveling system (HLS) and reduce the measurement error, a temperature gradient test platform is established, which combines with the ambient temperature research completed in the previous stage. Researches are conducted on the HLS measurement accuracy under temperature gradient conditions, and the heating/cooling mode, temperature gradient T_G variation, liquid expansion coefficient γ_{di} and communicating pipe expansion coefficient γ_{pi} , and measuring-point distance D_{test} are analyzed quantitatively. Results show that the temperature gradient influence coefficient ΔP_{t-G} between the heating and cooling mode is only 0.003 mm/℃, which indicates the limited effect of the heating/cooling mode on the HLS measurement accuracy. The elevation of the measuring point has an obvious correlation with T_G . The ΔP_{t-G} has a linear correlation with the $(\gamma_{di}-\gamma_{pi})$ and also shows the power function relationship with D_{test} . Finally, a modified model for the temperature effect-induced error in HLS is formulated. The reliability and applicability of the model are evaluated by the settlement tests of the Nanjing Yangtze River tunnel and Taihu tunnel.

Keywords: hydrostatic leveling system; temperature effect; temperature gradient; measurement distance; on-site verification

0 引 言

沉降监测是建(构)筑结构健康状态评价的不可或

缺的技术手段,对桥梁、隧道、高铁、大坝和边坡等重大基础工程全寿命周期安全运行的有效评价具有重要作用^[1-2],同时也在预测轨道交通沉降^[3]、大坝及其周围土体沉降^[4]方面具有重要价值。工程常采用水准测

量^[5]、三角高程测量^[6]、全球定位系统(global positioning system, GPS)测量^[7]、电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)光学成像测量^[8]、激光收敛测量^[9]以及光纤光栅测量^[10]等方法进行建(构)筑结构沉降监测。水准测量和三角高程测量方法虽然具有较高的测量精度,但存在受地形限制大、施测工作量大和速度慢等缺点。GPS测量虽具有很高的平面定位精度,但其高程测量精度稍显不足,且GPS造价昂贵,在信号微弱地区无法实时测试。CCD光学成像测量、激光收敛测量和光纤光栅测量虽能克服上述3种测量方法的缺点,但其运营成本及维护费用都比较高,且易受外界因素干扰。

基于联通器原理的静力水准仪具有结构简单、精度高、稳定性强、受外界环境影响小和使用范围广等优点^[11]。但受其测试原理约束,静力水准测试系统(HLS)对所处工作条件的温度效应具有较强的敏感性。温度效应的影响主要包括环境温度和温度梯度两个部分。环境温度的影响主要指HLS测量系统工作环境的温度变化(或差异)导致的误差^[12],主要由季节温度变化,尤其是冬夏两季温度差异引起。温度梯度影响主要指铺设时因HLS各测点位于不同高度而具有温差,从而导致测量误差^[13],其本质是两个或多个测点在同一时刻的温度差异。

陈继华^[14]指出温度变化引起测试误差的主要原因是温度差异导致联通液密度不均,并提出了减弱温度影响的措施。许少峰^[15]考虑环境温度和联通管材膨胀系数的影响,建立了HLS修正模型,该模型的有效性得到了李德娇^[16]的验证。陈龙浩等^[17]基于现场测试数据给出了HLS温度梯度修正模型。Lekomtseva等^[18]利用理论分析和数值模拟建立了温度梯度影响下降低管材间流体温度不均匀程度的方法。Jia等^[19]提出了考虑环境温度变化的温度修正模型,并在实际场地沉降监测中验证了该模型的有效性。陈果等^[20]定量分析了环境温度对HLS测试精度影响,并建立考虑测距及膨胀系数影响的环境温度HLS修正模型(详见下文)。

综上,学者们通过理论分析、数值建模、室内试验及现场测试等多种手段尝试建立温度效应与HLS测试误差的联系,同时,基于试验数据,提出温度效应引起的HLS测试误差评价方法。然而,已有的评价方法大多只针对环境温度或温度梯度其中一种温度效应,且没有考虑各测点距离和联通材质差异的影响,其适用性和合理性没有得到系统验证,这不利于实际工程推广。

本文基于已开展的HLS环境温度试验,进一步研究了温度梯度对HLS测试精度的影响,搭建压差式静力水准仪温度梯度试验平台,对升/降温模式、温度梯度 T_c 变

化量、冷媒膨胀系数 γ_{di} 和联通管系数 γ_{pi} 、测点间距 D_{test} 的影响程度进行量化,通过试验分析与理论推导建立了考虑温度梯度的修正模型,结合已建立的考虑环境温度的HLS修正模型,提出考虑测距和联通管材质的HLS温度效应修正模型,并通过现场试验验证该修正模型的可靠性。

1 HLS环境温度试验及修正模型

如图1所示,陈果等^[20]搭建环境温度测试平台,研究环境温度(T_E)对HLS测试精度的影响,对 T_E 变化量、 T_E 升/降模式和速度、联通管膨胀系数及测点距离的影响程度进行量化。

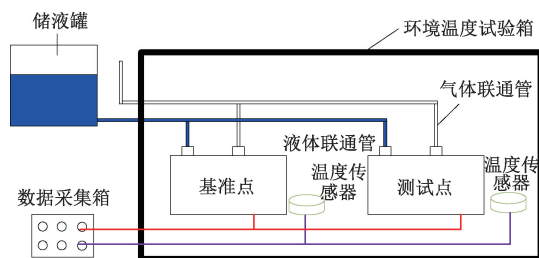


图1 HLS环境温度试验平台示意图^[20]

Fig. 1 Schematic diagram of ambient temperature testing layout for HLS^[20]

试验发现单HLS测点的高程变化量 H_E 与环境温度 T_E 变化量具有单一相关性,引入温度影响系数 P_t 定量表征环境温度变化的影响,如式(1)所示。

$$P_t = H_E / T_E \quad (1)$$

研究结果表明升温或降温模式对 P_t 无明显影响。当升温速度大于等于 $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,联通管与冷媒膨胀不充分,数据失真。此外, P_t 随 $(\gamma_{di} - \gamma_{pi})$ 的增大而线性增大,如式(2)所示。

$$P_t = 0.045\ 53(\gamma_{di} - \gamma_{pi}) - 0.010\ 3 \quad (2)$$

将双侧点(基站和测点)相对环境温度影响系数(ΔP_{t-E})定义为环境温度引起的两测点间相对高差(ΔH_E)与环境温差(T_E)之比,如:

$$\Delta P_{t-E} = \Delta H_E / T_E \quad (3)$$

ΔP_{t-E} 的变化是由基站和测点之间联通管的长度变化引起的。如图2所示, ΔP_{t-E} 随 D_{test} 的增大而增大,两者呈幂函数关系,如式(4)所示:

$$\Delta P_{t-E} = 0.054 - 0.023\ 6 D_{test}^{-0.617} \quad (4)$$

据此,可结合根据式(3)和(4)建立HLS环境温度修正模型,如:

$$\Delta H_E = (0.054 - 0.023\ 6 D_{test}^{-0.617}) \times T_E \quad (5)$$

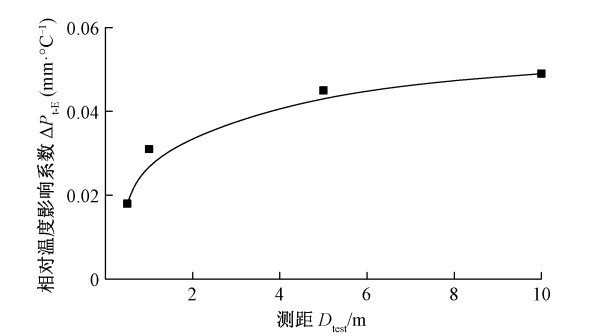


图 2 测距与相对温度影响系数的关系^[20]

Fig.2 The relationship between measure distance and relative temperature influence coefficient^[20]

2 试验流程

2.1 试验设备与材料

本文试验设备包括:罗斯蒙特 3051S 静力水准仪、PT100 铂电阻温度传感器、VW-102E 型全功能读数和温

度环境试验箱。罗斯蒙特 3051S 静力水准仪是一种 4~20 mA 电流信号输出的压差式静力水准仪,相关性能参数如文献[20]所示。PT100 铂电阻温度传感器用于实时监测各静力水准仪工作环境温度。VW-102E 型全功能读数仪可同步采集 HLS 液/气压和温度传感器温度数据。温度环境试验箱采用闭环控制系统,可在-40℃~150℃范围内精准控制试验环境温度,误差小于 0.1℃。

冷媒为二甲硅油,密度为 1.03 g/cm³(20℃),膨胀系数($\gamma_{\text{油}}$)在-60℃~160℃范围内基本保持 6.3×10^{-4} 不变。联通管为 PU 塑料软管、三丙聚丙烯管、聚四氟乙烯管和 204 不锈钢管 4 种,膨胀系数($\gamma_{\text{管}}$)依次为 3.35×10^{-4} 、 1.32×10^{-4} 、 1.45×10^{-4} 以及 6.43×10^{-5} 。

2.2 试验方案

为模拟实际监测工程中各测点之间的温度梯度,并考虑各季节平均温度差异的影响,改变 HLS 基站温度以及基站与测点温差,定量研究基站温度、基站与测点温差的影响。同时,考虑到工程应用,定量研究各温度梯度下两测点间的联通管膨胀系数及其长度的影响。详细的影响因素及控制参数如表 1 所示。

表 1 温度梯度对 HLS 测试精度的影响试验工况

Table 1 The influence of temperature gradient on the measurement accuracy of HLS

编号	试验平台	联通管材质	测距/m	基站温度/℃	基站与测点温差/℃	实验目的
G1	双测点+联通管	聚四氟乙烯管	2	-10	0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10, 20	探讨基站温度差异对 HLS 测试误差影响
G2				0		
G3				10		
G4				20		
G5	双测点+联通管	PU 塑料软管	2	20	0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10,20	探讨测试管材膨胀系数对 HLS 测试误差影响
G6		三丙聚丙烯管				
G7		204 不锈钢管				
G8	双测点+联通管	聚四氟乙烯管	0.5	20	0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10,20	探讨测点距离对 HLS 测试误差影响
G9			1			
G10			5			
G11			10			
G12			15			

2.3 测试平台搭建

如图 3 所示,为研究温度梯度(T_c)的影响,搭建了温度梯度试验测试平台,所有 HLS 均位于不同环境温度箱内,其中一台 HLS 作为基站,其温度与位置不发生变化,其余 HLS 作为测点,改变测点温度,以研究 T_c 对 HLS 测试精度的影响。每台 HLS 旁布设 PT100 铂电阻温度传感器。HLS 一端通过液体联通管串联到外部储液罐,另一端通过干燥管串联到大气,改变温度环境箱的温

度,以考察温度梯度引起的 HLS 测试误差。需要指出,相对沉降是通过两测点间的液/气体压差之差计算的。

3 试验结果与分析

3.1 升/降温模式对 HLS 测试精度影响

考虑自然条件下温度梯度变化速率,并兼顾数据采集的有效性及试验测试进度^[20],试验中的升/降温速度均设置为 0.05℃/min。本试验将基站与测点间初始液/

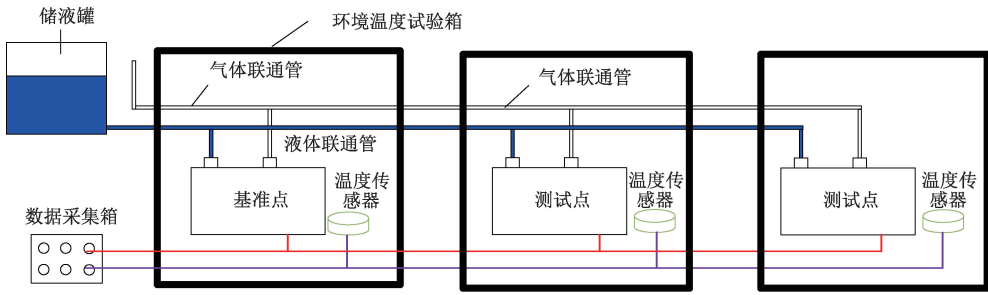


图3 温度梯度分析试验 HLS 工作布设示意图

Fig. 3 Schematic diagram of HLS work layout for temperature gradient analysis test

气压差之差换算的相对高程记为 0。工况 G1 的升温
和降温条件下的 HLS 高程变化量 ΔH_G , ΔH_G 定义为温度
梯度引起的测点与基准的相对高差。如图 4 所示,可以
发现,随着测点的 T_G 从 -10°C 线性的升到 10°C ,HLS 对
应的 ΔH_G 线性降低到 3.04 mm,而当 T_G 从 10°C 线性的
降低到 -10°C ,HLS 的 ΔH_G 从 3.04 mm 线性升到
0.01 mm,引入相对温度梯度影响系数 ΔP_{t-G} 定量表征温
度梯度对 HLS 测试高程的影响,如:

$$\Delta P_{t-G} = \Delta H_G / T_G, \quad (6)$$

工况 G1 升温 and 降温模式的 ΔP_{t-G} 分别为 $-0.152 \text{ mm}/^\circ\text{C}$
和 $-0.155 \text{ mm}/^\circ\text{C}$,这表明,升/降温对 ΔP_{t-G} 没有明显影
响。因此,其余工况不再进行降温测试。

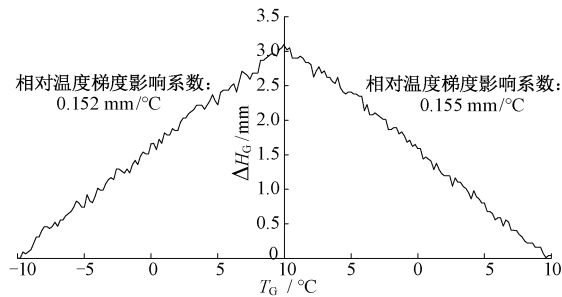


图4 G1 升温和降温对 HLS 测试精度的影响

Fig. 4 Influence of G1 heating/cooling on of HLS measurement accuracy

3.2 基站温度对双 HLS 测点测试精度的影响

如图 5 所示,当基站温度分别为 -10°C 、 0°C 、 10°C
和 20°C 时,HLS 测点的 ΔH_G 与 T_G 呈强线性相关,随测试
 T_G 以 $0.05^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度线性升到 20°C ,各测点的 ΔH_G
也分别线性增加到 0.304、0.298、0.306 和 0.308 mm,
 ΔP_{t-G} 分别为 0.152、0.149、0.153 和 0.154 $\text{mm}/^\circ\text{C}$ 。如
图 6 所示,基站温度对 ΔP_{t-G} 几乎没有影响。这表明,当
测距 D_{test} 和联通管材料确定时, T_G 对于双 HLS 测点测试
精度的影响主要由测点与基站的相对温度差异决定,与
基站自身的环境温度没有明显相关性。

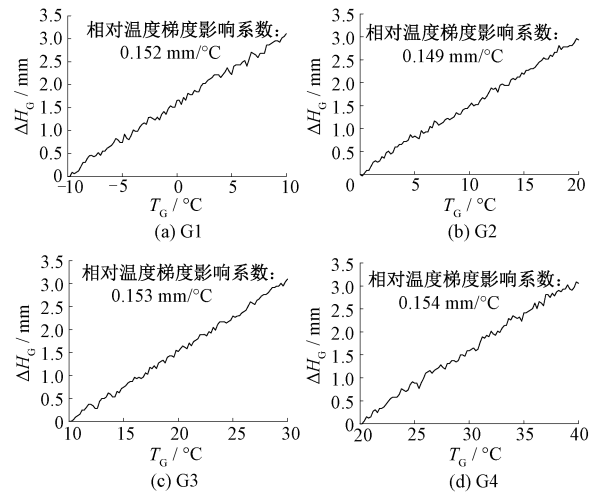


图5 基站温度对双 HLS 测点测试精度的影响

Fig. 5 Influence of datum point temperature on the measurement accuracy of two HLS measurement points

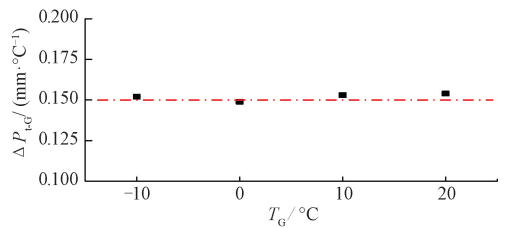


图6 基站测试温度与 ΔP_{t-G} 的关系

Fig. 6 ΔP_{t-G} variation with datum point temperature

3.3 管材膨胀系数对 HLS 测试精度影响

为探讨温度梯度下测试基站与测试点之间的联通管
膨胀系数 γ_{pi} 的影响,采用不同连通管分别搭建双测点测
试平台,设置基站温度为 20°C ,测距为 2 m,试验结果如
图 7 所示。由图可知,联通管为 PU 软管时,高程随 T_G
升高而降低,联通管为聚四氟乙烯管、三丙聚丙烯管或
204 不锈钢管时,高程随 T_G 升高而升高。

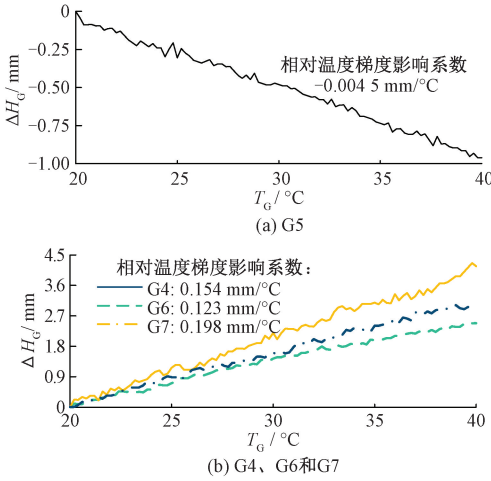
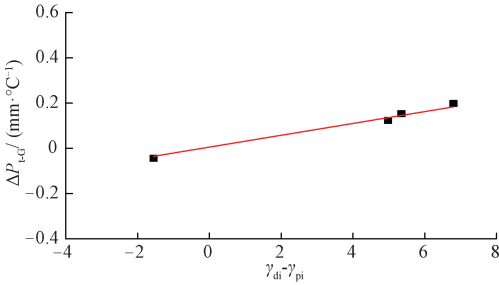


图 7 联通管膨胀系数对 HLS 测试精度的影响

Fig. 7 Influence of pipe expansion coefficient deviation on HLS measurement accuracy

如图 8 所示, ΔP_{t-G} 与联通液体与管材的膨胀系数之差 ($\gamma_{di} - \gamma_{pi}$) 呈线相关性, 如:

$$\Delta P_{t-G} = 0.0262(\gamma_{di} - \gamma_{pi}) - 0.00529 \quad (7)$$

图 8 ΔP_{t-G} 与 $(\gamma_{di} - \gamma_{pi})$ 的关系Fig. 8 The relationship between the ΔP_{t-G} and $(\gamma_{di} - \gamma_{pi})$

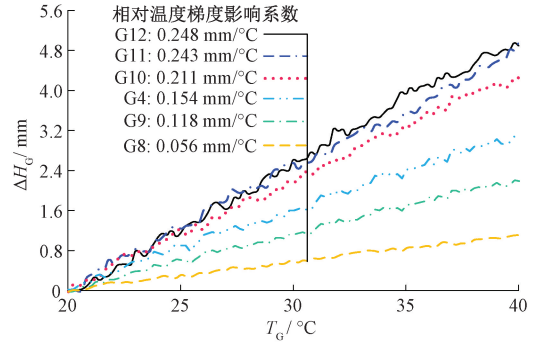
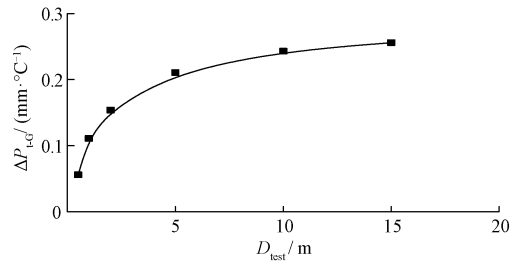
3.4 测距对 HLS 测试精度影响

为研究基站与测点的测距 D_{test} 对温度梯度作用下双 HLS 测点测试精度影响, 开展了 G8~G12 工况的试验测试, 分析 D_{test} 从 0.5 m 增至 15 m 时 T_G 对测试精度影响。如图 9 所示, 各 D_{test} 下, ΔH_G 均随 T_G 的增大而线性增大, 且 T_G 相同, D_{test} 越大, ΔH_G 越大。为定量表征 D_{test} 的影响, 如图 10 所示, ΔP_{t-G} 随 D_{test} 的增大而增大, 两者呈现幂函数关系, 如:

$$\Delta P_{t-G} = 0.435 - 0.426D_{test}^{-0.224} \quad (8)$$

结合 ΔP_{t-G} 定义, 可以建立考虑 D_{test} 影响的温度梯度环境下双 HLS 测点的温度梯度修正模型, 如:

$$\Delta H_G = (0.435 - 0.426D_{test}^{-0.224}) \times T_G \quad (9)$$

图 9 T_G 对 HLS 测试精度的影响Fig. 9 Influence of T_G on HLS measurement accuracy图 10 D_{test} 与 ΔP_{t-G} 的关系Fig. 10 The relationship between D_{test} and ΔP_{t-G}

3.5 HLS 温度效应修正模型及验证

结合已建立的 HLS 环境温度修正模型及温度 HLS 梯度修正模型, 可建立考虑测距影响的 HLS 温度效应修正模型:

$$Set_{true} = Set_{test} - \Delta H_E - \Delta H_G \quad (10)$$

式中: Set_{true} 为各测点的消除温度效应影响的真实沉降量, Set_{test} 为各测点的测试沉降量。进一步, 将 ΔH_E 和 ΔH_G 的计算公式代入上式可得:

$$Set_{true} = Set_{test} - (0.054 - 0.0236D_{test}^{-0.617}) \times T_E - (0.435 - 0.426D_{test}^{-0.224}) \times T_G \quad (11)$$

为验证上述温度效应修正模型的有效性。在南京长江隧道开展基站+双测点的现场试验, 联通管选择聚四氟乙烯管, 各 HLS 之间的距离均设定为 25 m, 现场验证试验的布设示意图如图 11 所示。

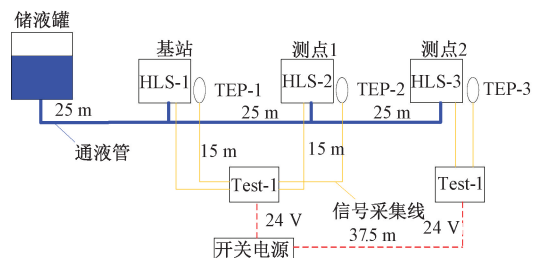


图 11 现场验证试验的布设示意图

Fig. 11 Diagram of in-site verification test

如图 12 所示,图中给出了现场验证试验基站和测点的温度变化时程曲线,隧道内的温度变化范围在 $5.5^{\circ}\text{C} \sim 10.5^{\circ}\text{C}$ 之间,且基站及测点的温度变化趋势保持一致,但需要关注的是,即使各测点距离仅有 25 m,各测点处的温度仍有明显的差异,这表明,在隧道内部确实存在温度梯度,此外,从基站和测点的温度对比可知,离隧道口越远,其温度越低。综上可知,隧道内部确实存在环境温度及温度梯度的显著变化,因此,前文对 HLS 测试系统开展温度效应修正是十分必要的。

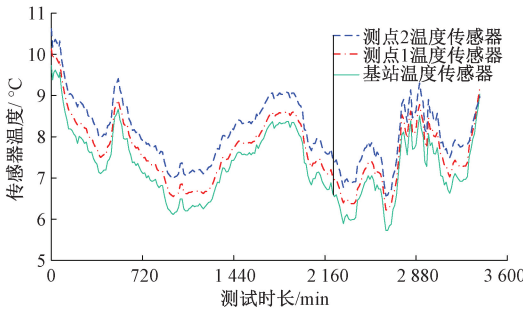


图 12 基站和测点的温度变化时程曲线

Fig. 12 Temperature time-history curves of datum point and measure point

如图 13 所示,给出了基站和测点的 HLS 测得沉降量时程曲线。由图 13 可知,各 HLS 测得沉降量的变化量约

为 0.2 mm,其变化规律与各点的温度变化保持一致,南京长江隧道已经运行多年,在仅有的两天测试阶段,其真实沉降基本没有。因此,图 13 给出的数据即为由环境温度及温度梯度共同作用引起的 HLS 测试误差。

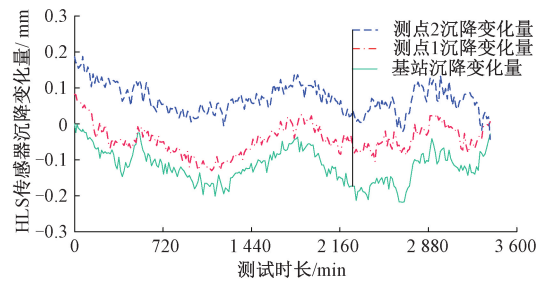


图 13 基站和测点的 HLS 测得沉降量时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of settlement measured by HLS of the datum point and measure point

为验证本研究提出的温度效应修正模型的可靠性,分别对比了温度效应引起的 HLS 的真实沉降及基于温度效应修正模型的 HLS 预测误差,如图 14 所示,真实沉降误差与预测误差基本保持一致,图 14 同时给出了由式(11)计算获得的各测点的消除温度效应影响的真实沉降量,3 个测点均基本在 0 值附近波动。这充分说明本研究建立的温度效应修正模型可以合理的表征环境温度及温度梯度对 HLS 测试精度的影响,该修正模型具有较好的工程应用性。

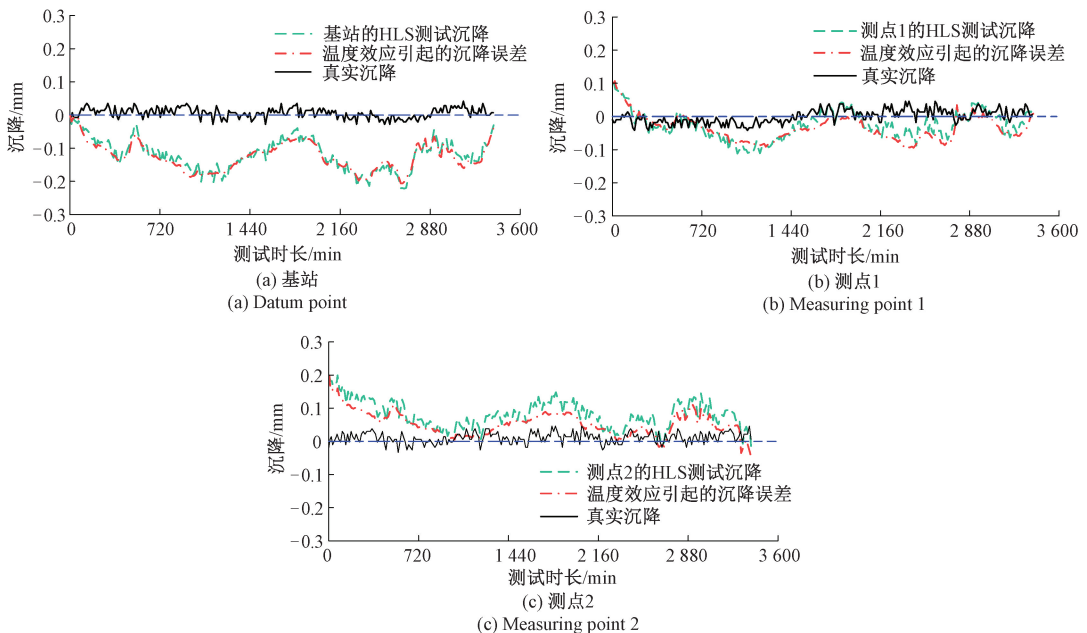


图 14 HLS 测试沉降量与温度效应引起沉降误差对比

Fig. 14 Comparison between HLS test settlement and temperature effect-induced settlement error

基于本研究建立的考虑温度效应的静力水准仪测试精度修正模型已应用于苏锡常南部通道太湖隧道智能结构健康监测项目——隧道沉降监测。太湖隧道于2021年12月30日正式通车,为我国建成的最长最宽的水下隧道。鉴于该隧道对沉降检测的高精度要求,同时,由于该隧道超长超宽的结构特性,隧道内各区间存在显著的温度差异,因此,必须对该隧道内温度效应引起的沉降误差进行修正,以实现对该隧道沉降的精准监测。如图15所示,图15给出了2022年6月1日0~12时太湖隧道测点K25+010的温度时程及HLS测得的沉降时程。考虑到太湖隧道通车仅有6个月,且采集时长为12h,此外,测点K25+010处隧道所处为低压缩性土层,故可认为该时间段内测点K25+010处的真实沉降基本为0。图16给出了基于本研究方法修正后测点K25+010的沉降时程,由图可知,基于本模型修正后的该时间段内测点K25+010的沉降也维持在0值波动,于真实沉降值保持一致,这表明,本文研究成果可直接应用于实际重大工程,并具有较高的适用性。

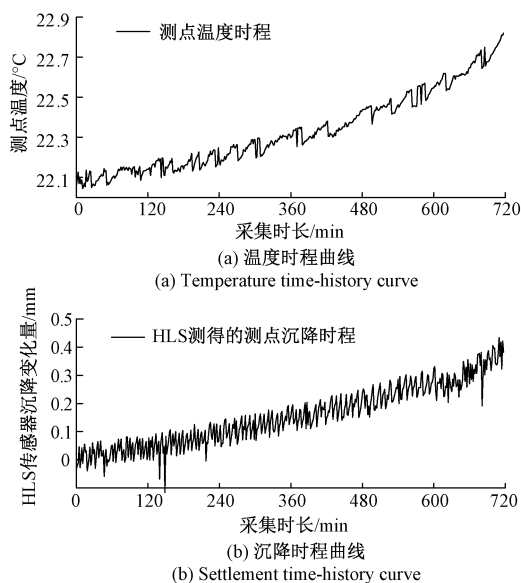


图15 太湖隧道测点K25+010的温度及沉降时程

Fig. 15 Temperature and settlement time history of measure point K25+010 in Taihu tunnel

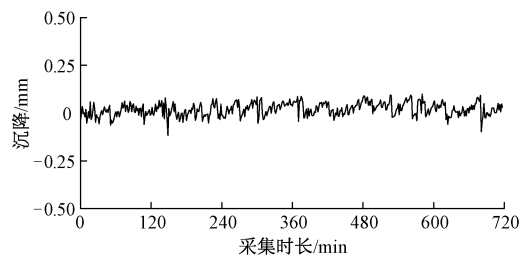


图16 太湖隧道测点K25+010修正后沉降时程

Fig. 16 Modified settlement time history of measure point K25+010 in Taihu tunnel

4 结 论

本文在已有研究基础上,进一步搭建温度梯度试验平台,对升/降温模式、温度梯度 T_G 变化量、冷媒膨胀系数 γ_{di} 和联通管系数 γ_{pi} 、测点间距 D_{test} 的影响程度进行了量化研究。在此基础上,提出一种考虑测距影响的温度效应引起HLS测试误差的修正模型,并进行了现场试验验证,相关结论如下:

1) 温度梯度对于双HLS测点测试精度的影响主要由测点与基站的相对温度差异决定,与基站自身所处的环境温度没有明显相关性。

2) 双HLS测点引起的测试误差是由于基站和测点之间的联通管和该段连接管中冷媒的膨胀差异引起,且联通管材质和 D_{test} 与 ΔP_{t-G} 有明显的相关性, ΔP_{t-G} 随 $(\gamma_{di}-\gamma_{pi})$ 的增大而线性增大,随 D_{test} 的增大而增大。

3) 建立了考虑测距影响的温度效应(环境温度及温度梯度)引起HLS测试误差的修正模型。通过南京长江隧道和太湖隧道现场沉降监测试验验证了修正模型的有效性。本文研究成果可直接应用于实际重大工程,并具有较高的适用性。

参考文献

- [1] MU B G, XIE X K, LI X, et al. Monitoring modeling and prediction of segmental lining deformation and ground settlement of an EPB tunnel in different soils [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 113(4): 103870.
- [2] SHEIKH M R, YUKIO N, SHITANO M, et al. Rainfall-induced unstable slope monitoring and early warning through tilt sensors [J]. Soils and Foundations, 2021, 61(4): 1033-1053.
- [3] 宫思艺,孔宪光,刘丹,等. 融入复杂地层动态识别的盾构施工地表沉降预测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 228-236.
- [4] GONG S Y, KONG X G, LIU D, et al. An approach for predicting shield construction ground surface settlement of complex stratum using dynamical strata identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 228-236.
- [4] 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(A1): 181-182.

- LI N F, ZHAO Y F. Application of hydrostatic leveling system in Xiangjiaba hydropower station[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(A1): 181-182.
- [5] CRISTINA C, ELEONORA B, ALESSANDRO C. Monitoring leaning towers by geodetic approaches: Effects of subsidence and earthquake to the Ghirlandina Tower[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(3): 580-593.
- [6] KOBRYN A. Modelling of the refraction in trigonometric leveling using polynomial transition curves [J]. Measurement, 2021, 181(1): 109392.
- [7] XIA R J, JIANG W P, MENG X L, et al. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques[J]. Measurement, 2018, 120: 128-139.
- [8] SUN Z Y, ZHANG D, FANG W. An ASIC chip with pipeline ADCs for CCD sensor imaging system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 284-292.
- [9] MORAES M V A D, TOMMASELLI A M G, SANTOS L D, et al. Monitoring bank erosion in hydroelectric reservoirs with mobile laser scanning[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 9(12): 5524-5532.
- [10] 夏晓鹏,张钰民,初大平,等. 基于啁啾光栅的温度与应变测量解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 131-137.
- XIA X P, ZHANG Y M, CHU D P, et al. Research on decoupling method of temperature and strain measurement based on chirp fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 131-137.
- [11] EPIN V, GLOT I, GUSEV G, et al. Hydrostatic leveling system for monitoring the headframe of the mine shaft[J]. Procedia Structural Integrity, 2021, 32: 64-70.
- [12] GUSEV G, YEPIN V V, TSVETKOV R V. On some problems of measuring systems based on hydrostatic leveling for long-term measurements[J]. Perm Scientific Center Journal, 2017, 10(4): 70-76.
- [13] TSVETKOV R V, YEPIN V V, SHESTAKOVA A P. Numerical estimation of various influence factors on a multipoint hydrostatic leveling system [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 208: 8-11.
- [14] 陈继华. 温度不均匀对液体静力水准仪精度的影响[J]. 工程勘察, 2000, 55(1): 54-55, 57.
- CHEN J H. Influence of temperature unevenness on the accuracy of hydrostatic leveling system[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2000, 55(1): 54-55, 57.
- [15] 许少峰. 粒子加速器中复杂静力水准系统的精度理论与验证研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- XU SH F. Studies on accuracy theory and validation of HLS used in particle accelerators[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [16] 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.
- LI D Q. Studies on the remote settlement monitoring system based on magnetostrictive hydrostatic leveling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [17] 陈龙浩, 郭广礼, 朱晓峻, 等. 液体静力水准仪变形监测精度分析[J]. 煤矿安全, 2015, 45(3): 201-204.
- CHEN L H, GUO G L, ZHU X J, et al. Precision analysis of deformation monitoring by hydrostatic level system [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 45(3): 201-204.
- [18] LEKOMTSEVA S V, TSVETKOV R V. Estimation of the possibility to equalize the fluid temperature in a hydro leveling system by mixing [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, 60(7): 1197-1208.
- [19] JIA H W, CHENG G W, LI J X, et al. A correction method for the ambient temperature-induced error in hydrostatic leveling systems and application [J]. Measurement, 2021, 172: 108880.
- [20] 陈果, 李波, 吴琪. 环境温度对压差式静力水准仪测试精度影响试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 92-99.
- CHEN G, LI B, WU Q. Experimental investigation on the effects of ambient temperature on the test accuracy for differential pressure hydrostatic leveling system [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(1): 92-99.

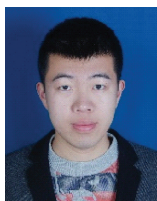
作者简介



肖兴,2018 年、2021 年于江苏科技大学先后获得学士学位、硕士学位,现于南京工业大学攻读博士学位,主要研究方向为隧道工程、海洋土动力特性试验研究。

E-mail: xx_0524@126.com

Xiao Xing received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from the Jiangsu University of Science and Technology in 2018 and 2021. He is currently pursuing his Ph.D. degree at Nanjing Tech University. His main research interests include geotechnical earthquake engineering and the dynamic characteristics of marine soils.



吴琪(通信作者),2019 年于南京工业大学获得博士学位,现为南京工业大学交通运输工程学院副教授,主要研究方向为试验设备改进与研发、室内岩土测试试验方法、复杂应力条件下土体动力特性研究。

E-mail: qw09061801@163.com

Wu Qi (Corresponding author) received his Ph.D degree from the Nanjing Tech University in 2019. He is currently a associate professor with the College of Transportation Engineering at Nanjing Tech University. His main research interests include development of indoor geotechnical testing methods and equipment seismic evaluation method of the sites and dynamic characteristics of soil under complex stress states and improvement.



张先伟,2010 年于吉林大学获得博士学位,现为中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室副研究员,主要研究方向为特殊土土力学的基础研究与工程应用。

E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn

Zhang Xianwei received his Ph.D. degree from Jilin University in 2010. He is currently an associate research fellow with the State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering at Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science. His main research interests include basic research and engineering application of special soil mechanics.