

基于全站仪的隧道自动化监测

张超¹, 黄宝森², 胡雷鸣³, 朱林辉³

[1.上海市岩土工程检测中心有限公司, 上海 200436; 2.绍兴京越地铁有限公司, 浙江 绍兴 312099;

3.上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200032]

摘要:近年来,越来越多的城市地下空间开发邻近既有地铁隧道、公路隧道,需要对既有隧道进行实时的自动化监测。全站仪是一种高效、高精度的三维测量设备,可较为方便的在狭长型分布的地下隧道内组建自动化监测系统。主要介绍了基于全站仪的隧道自动化监测技术,探讨了隧道沉降、收敛、水平位移监测的精度与可靠性。从多个工程实例来看,采用高精度的全站仪组建自动化监测系统具有良好的适用性,用于隧道的监测精度较高,可满足实时监测的需要。

关键词:地下隧道;全站仪;自动化监测;精度

中图分类号:U456.3

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)12-0175-06

0 引言

随着城市地下空间开发的持续推动,近年来越来越多地下工程项目靠近地铁隧道、公路隧道等既有结构,在施工过程中需要对地下隧道进行有效、实时的保护性监测。全站仪是一种高精度、高可靠性、具备三维测量、可远程操控的测量手段,目前已广泛应用于上海、杭州、南京、苏州、广州、深圳等大中城市的自动化监测项目中。不同于常规的地面监测,在地下隧道内布设全站仪自动化监测系统需要考虑隧道狭长型的分布特点,往往只能将控制点布设于待监测范围之外,形成类似多点后方交会或是无定向附和导线的控制网型。国内多名学者已开展了基于全站仪的监测系统研究,取得了大量的研究成果^[1-8]。本文分别探讨了基于单台全站仪和多台全站仪的自动化监测系统的组网方式,给出了相应的平差计算模型,通过不同的工程案例,给出了相关的实测精度情况,可为后续类似工程提供有益的参考。

1 基于单台全站仪的自动化监测网

1.1 控制点的平差计算

当监测范围较小(一般小于200 m)、现场通视情况良好时,可在隧道内设置1台全站仪满足监测需求。通常,将全站仪置于监测区域中部位置,将控

制点设置于两侧变形影响范围外的隧道衬砌上,形成多点后方交会的测量网型,如图1所示。

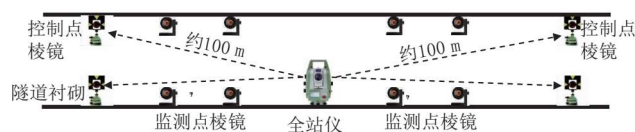


图1 基于单台全站仪的监测网型图

其中,控制棱镜一般成对布设在隧道衬砌两侧,确保足够的通视条件;监测点棱镜成断面布设,每断面一般布设4个棱镜,以地铁隧道为例,一般将监测棱镜分别布设在隧道两侧衬砌(作为隧道收敛之用)及道床钢轨旁(作为沉降及水平位移之用),如图2所示。

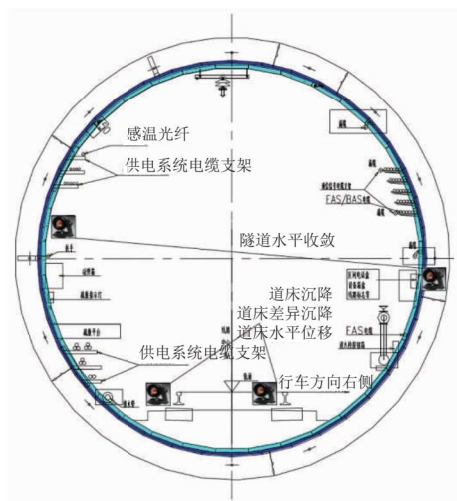


图2 隧道监测点的布设示意图

监测工作开展前,先布设好全站仪、控制点棱镜及监测棱镜,通过远程控制软件组建自动化监测系统。然后,以全站仪及控制点棱镜为基础建立独立坐

收稿日期:2022-11-29

作者简介:张超(1982—),男,本科,助理工程师,从事隧道自动化监测,岩土工程监控分析工作。

标系,通常以沿隧道走向方向为坐标系的 X 轴(Y 轴),垂直方向为 Y 轴(X 轴),再以极坐标和三角高程测量的方式得到各个控制点棱镜、监测棱镜的三维坐标,作为控制点坐标及监测初始值。

每次监测时,全站仪对各个控制点棱镜进行测量,通过对水平方向、斜距、天顶距等三类观测值进行严密平差计算,得到全站仪的平面坐标及高程。设全站仪架站点为 j ,其概略坐标分别为 (X_j^0, Y_j^0, H_j^0) ;照准控制点为 k ,其坐标为 (X_k, Y_k, H_k) ,则 j 点到 k 点的水平方向观测值 L_{jk} 的误差方程可表示为:

$$\hat{\alpha}_{jk} = L_{jk} + \hat{W}_j + v_{Ljk} = \arctan \frac{Y_k - (Y_j^0 + \hat{y}_j)}{X_k - (X_j^0 + \hat{x}_j)} \quad (1)$$

其中: $\hat{W}_j$ 为该测站的定向角平差值, v_{Ljk} 为水平方向改正数; $\hat{\alpha}_{jk}$ 为 j 点到 k 点的坐标方位角平差值; $\hat{x}_j$ 、 $\hat{y}_j$ 分别为平面坐标改正数。

对式(1)进行泰勒展开可得:

$$v_{Ljk} = a_{jk} \hat{x}_j + b_{jk} \hat{y}_j - \hat{W}_j - \left(L_{jk} + W_j^0 - \arctan \frac{Y_k - Y_j^0}{X_k - X_j^0} \right) \quad (2)$$

其中: W_j^0 、 $\hat{W}_j$ 分别为定向角概略值及其改正数; $\hat{\alpha}_{jk} = \frac{Y_k - Y_j^0}{D_{jk}^0 D_{jk}^0}$; $b_{jk} = -\frac{X_k - X_j^0}{D_{jk}^0 D_{jk}^0}$; $D_{jk}^0 = \sqrt{(X_k - X_j^0)^2 + (Y_k - Y_j^0)^2}$ 。

j 点到 k 点的斜距观测值 S_{jk} 的误差方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{s}_{jk} &= S_{jk} + v_{Sjk} \\ &= \sqrt{(X_k - X_j^0 - \hat{x}_j)^2 + (Y_k - Y_j^0 - \hat{y}_j)^2 + (H_k - H_j^0 - \hat{h}_j)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)进行泰勒展开可得:

$$v_{Sjk} = c_{jk} \hat{x}_j + d_{jk} \hat{y}_j + e_{jk} \hat{h}_j - (S_{jk} - S_{jk}^0) \quad (4)$$

其中: $c_{jk} = \frac{X_k - X_j^0}{S_{jk}^0}$; $d_{jk} = \frac{Y_k - Y_j^0}{S_{jk}^0}$; $e_{jk} = \frac{H_k - H_j^0}{S_{jk}^0}$;

$$S_{jk}^0 = \sqrt{(X_k - X_j^0)^2 + (Y_k - Y_j^0)^2 + (H_k - H_j^0)^2}。$$

j 点到 k 点的天顶距观测值 Z_{jk} 的误差方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{z}_{jk} &= Z_{jk} + v_{Zjk} = \\ &= \arccos \frac{H_k - H_j^0 - \hat{h}_j}{\sqrt{(X_k - X_j^0 - \hat{x}_j)^2 + (Y_k - Y_j^0 - \hat{y}_j)^2 + (H_k - H_j^0 - \hat{h}_j)^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

对式(5)进行泰勒展开可得:

$$v_{Zjk} = m_{jk} \hat{x}_j + n_{jk} \hat{y}_j + p_{jk} \hat{h}_j - (Z_{jk} - Z_{jk}^0) \quad (6)$$

其中: $m_{jk} = -\frac{(X_k - X_j^0)(H_k - H_j^0)}{D_{jk}^0 S_{jk}^0 S_{jk}^0}$;

$$n_{jk} = -\frac{(Y_k - Y_j^0)(H_k - H_j^0)}{D_{jk}^0 S_{jk}^0 S_{jk}^0};$$

$$p_{jk} = \frac{D_{jk}^0}{S_{jk}^0 S_{jk}^0};$$

$$Z_{jk}^0 = \arccos \frac{H_k - H_j^0}{\sqrt{(X_k - X_j^0)^2 + (Y_k - Y_j^0)^2 + (H_k - H_j^0)^2}}$$

根据上述公式,采用最小二乘平差即可得出全站仪的三维坐标。

1.2 监测数据计算

平差得到全站仪的三维坐标后,采用全站仪极坐标和三角高程测量的方式可方便地测得各个监测棱镜的三维坐标。对比上次及初始的高程数据,计算相应的本次沉降量及累计沉降量,如以下公式所示:

$$\Delta h_i^k = h_i^k - h_i^{k-1} \quad (7)$$

$$\Delta H_i^k = h_i^k - h_i^1 \quad (8)$$

式中: Δh_i^k 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的当次沉降变化量; ΔH_i^k 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的累计沉降变化量; h_i^k 、 h_i^{k-1} 、 h_i^1 分别表示第 i 个监测点的本次、上次及初始高程值。

对比上次及初始的平面坐标数据,计算相应的本次位移量及累计位移量,如式(8)、式(9)所示(Y 轴为水平位移方向):

$$\Delta d_i^k = Y_i^k - Y_i^{k-1} \quad (9)$$

$$\Delta D_i^k = Y_i^k - Y_i^1 \quad (10)$$

式中: Δd_i^k 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的当次平面位移变化量; ΔD_i^k 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的累计平面位移变化量; Y_i^k 、 Y_i^{k-1} 、 Y_i^1 分别表示第 i 个监测点的本次、上次及初始东坐标值。

根据全站仪测得的隧道衬砌两腰部的测点坐标,计算其三维距离,得到水平弦长,比较上次及初始值数据,计算本次收敛量及累计收敛量。

$$\Delta s l_i^k = E_i^k - E_i^{k-1} \quad (11)$$

$$\Delta S L_i^k = E_i^k - E_i^1 \quad (12)$$

$$E_i^k = \sqrt{(X_i^k - X_{ip}^k)^2 + (Y_i^k - Y_{ip}^k)^2 + (h_i^k - h_{ip}^k)^2} \quad (13)$$

式中: $\Delta s l_i^k$ 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的当次水平收敛变化量; $\Delta S L_i^k$ 表示第 i 个监测点的第 k 次观测得到的累计水平收敛变化量; E_i^k 、 E_i^{k-1} 、 E_i^1 分别表示第 i 个监测点的本次、上次及初始的该环管片水平直径值; X_{ip}^k 、 Y_{ip}^k 、 h_{ip}^k 分别表示测点 i 管片对测的观测棱镜三维坐标。

2 基于多台全站仪的自动化监测网

当监测范围超过200环或是通视条件较差,使用一台全站仪无法满足各个测区的监测时,需要布设多台全站仪,串联组建自动化监测控制网。以3台

全站仪串联观测为例,一般可采用以下(见图3)的监测网型。

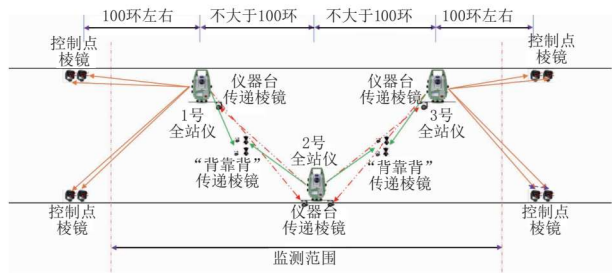


图3 基于3台全站仪的监测网型图

自动化监测需要多台全站仪实时观测,无法在全站仪基座上安装传递棱镜进行传递测量,因此,通常采用图3的方式,在全站仪基座下方安装仪器台传递棱镜,或是在相邻全站仪中部位置安装成对的“背靠背”传递棱镜,以完成相邻全站仪的传递测量。

考虑到全站仪与基座下方的传递棱镜固定在一座仪器台,其空间相对关系非常稳定,且仪器台固定在隧道管片上,考虑到隧道管片通过螺栓连接,当临近基坑施工时,易发生沉降、位移、管片收敛等变形,但是两环管片之间难以发生水平方向的旋转。因此,固定仪器台上的全站仪与偏置小棱镜之间的坐标方位角相对非常稳定,通过固定全站仪与偏置小棱镜之间的三维坐标差作为平差条件,即可完成平差计算。

同理,相邻全站仪中部位置安装的成对“背靠背”传递棱镜安装在同一环管片上,两个传递棱镜之间的三维坐标差相对稳定,也可以采用固定两个棱镜的三维坐标差作为平差条件,实现平差计算。

j 点到 k 点的三维坐标差 ΔX_{jk} 、 ΔY_{jk} 、 ΔH_{jk} 的误差方程分别可以表示为:

$$v_{X_{jk}} = -\hat{x}_j + \hat{x}_k - (\Delta X_{jk} - \Delta X_{jk}^0) \tag{14}$$

$$v_{Y_{jk}} = -\hat{y}_j + \hat{y}_k - (\Delta Y_{jk} - \Delta Y_{jk}^0) \tag{15}$$

$$v_{H_{jk}} = -\hat{h}_j + \hat{h}_k - (\Delta H_{jk} - \Delta H_{jk}^0) \tag{16}$$

其中: ΔX_{jk}^0 、 ΔY_{jk}^0 、 ΔH_{jk}^0 为三维坐标差的初始值(固定不变)。

为避免平差计算出现秩亏现象,将式(14)至(16)作为观测方程加入平差计算,并将其权重加大(如设置先验中误差为0.1 mm),使三维坐标差改正量接近零,以完成平差计算。

3 后方交会精度估算

为简单分析自动化监测控制网的点位精度,依据常规隧道监测项目情况,选取只使用1台仪器进

行自动化组网的情况,探讨全站仪的点位精度。如图1,当全站仪布设在测区中部,两侧各使用1个控制点棱镜,全站仪与两侧控制点距离基本相等,则全站仪的点位精度可表示为^[9]:

$$m_P = m_s \sqrt{\frac{2\left(s^2 + \frac{m_s^2 \rho^2}{m_\beta^2} - \frac{m_s^2 \rho^2}{m_\beta^2} \cos \beta\right)}{s^2 \sin^2 \beta + 2 \frac{m_s^2 \rho^2}{m_\beta^2} (1 - \cos \beta)^2}} \tag{17}$$

其中: m_s 、 m_β 分别为测距、测角精度; s 为全站仪与两侧控制点棱镜形成的水平距离; β 为全站仪与两侧控制点棱镜形成的水平夹角; $\rho=206\,265$ 。

全站仪与两侧控制点棱镜的水平距离普遍在100 m左右,计算不同水平夹角对应的全站仪点位精度,如表1所示。

表1 不同水平夹角对应的全站仪点位精度 单位:mm

s	β							
	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
100 m	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1

根据隧道的直伸敷设特点,当控制点全部位于全站仪某一侧时,显然会导致全站仪坐标解算精度较低,由表1也可以看出,应适当扩大全站仪与两侧控制点棱镜形成的夹角,以提高点位精度。

4 单台全站仪自动化监测案例

4.1 项目概况

某地铁保护区施工项目基坑尺寸约153×95 m,与临近的地铁隧道最近距离约15 m。基坑对应地铁隧道埋深从东往西逐渐加深,东侧埋深约10 m,西侧埋深约14 m,地下车库承台底标高为-11.90 m,A、B主楼部位承台底标高为-12.70 m,坑内电梯井底标高分别为-14.40~-17.10 m。项目情况如图4所示。

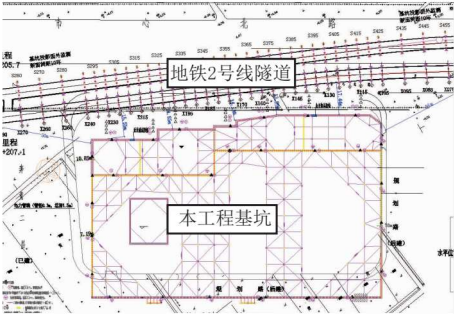


图4 单台全站仪自动化监测案例图

基坑施工过程中地铁集团要求对临近2号线隧道进行保护监测,采用自动化的方法,进行二十四小时不间断测量。根据业主要求,对临近的下行线隧道需要进行自动化监测,监测范围为65~280环(每环

1.2 m 宽),共计 258 m 长度。设置 36 组监测断面,每组断面分别在隧道管壁两侧、道床钢轨两侧共布设 4 个监测棱镜,采用单台全站仪进行自动化监测,监测范围为 65~280 环(每环 1.2 m 宽),共计 258 m 长度。

4.2 实测控制网夹角精度情况

由于地铁隧道的结构特点,隧道内采用较为直伸的布网方式,全站仪与后视控制棱镜之间的夹角精度直接反应出全站仪控制点的坐标精度。因此,通过对平面控制网中各个实测夹角的分析,可以直观了解测量的精度与稳定性。

本项目控制网历次观测采用 4 测回进行测量。以 12 月 6 日观测数据作为初始值,比较项目基坑施工前的 12 月 7 日至 12 月 30 日期间,下行线仪器台与前后共 8 个后视控制大棱镜 CFXJD01~08 之间的夹角变化情况(以 CFXJD06 作为零方向),如图 5 所示。

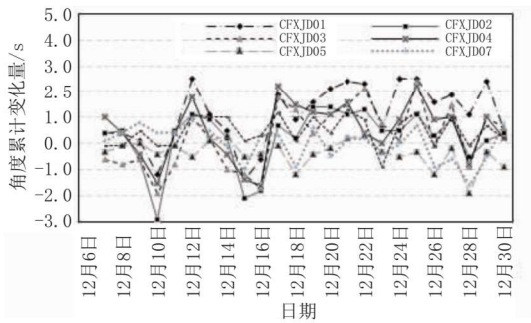


图5 仪器台观测夹角的历时变化曲线

统计各个夹角的观测值中误差,采用以下公式进行:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \tag{18}$$

其中: Δ 为历次观测的累计角度变化量; n 为观测次数。

得到各个夹角重复观测 24 d 的测角中误差,如表 2 所示。

表 2 观测夹角的精度统计情况

前视方向	统计测角精度 /s
CFXJD01	1.59
CFXJD02	1.11
CFXJD03	1.22
CFXJD04	1.18
CFXJD05	0.62
CFXJD07	0.65
CFXJD08	0.74

由表 2 结合曲线变化图可以看出,该项目下行线全站仪对各个后视控制大棱镜的测角精度基本能达到 1 s 左右,可以满足隧道内自动化监测需求。同

时,由于隧道内多种环境因素的影响,包括列车震动、粉尘、隧道管壁与机电设备遮光效应等多种因素影响,全站仪测角精度往往达不到标称精度。

4.3 实测控制网水平距离精度情况

以同样的方式,以 12 月 6 日观测数据作为初始值,比较项目基坑施工前的 12 月 7 日至 12 月 30 日期间,下行线仪器台与前后共 8 个后视控制大棱镜 CFXJD01~08 之间的水平距离变化情况,如图 6 所示。

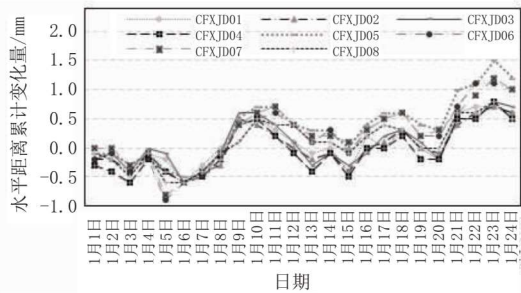


图6 仪器台观测水平距离的历时变化曲线

统计全站仪控制网内各条边长的角重复观测 24 d 的测距中误差,如表 2 所示。

表 2 观测水平距离的精度统计情况

前视方向	统计测角精度 /s
CFXJD01	0.36
CFXJD02	0.36
CFXJD03	0.39
CFXJD04	0.40
CFXJD05	0.63
CFXJD06	0.56
CFXJD07	0.54
CFXJD08	0.39

从以上实测距离统计情况可以看出,在隧道内钻孔埋设固定仪器台、固定大棱镜的方式,重复观测的测距精度可优于 ± 1 mm。考虑到本工程项目的控制网较为直伸布设的网型,距离测量的精度对位移方向影响较小。因此,下行线全站仪测距精度完全能满足测量要求。

4.4 实测监测数据情况

根据前述项目情况,同样选取 2016 年 12 月 3 日至 12 月 30 日基坑暂未施工期间的监测数据进行精度分析。考虑到该时间段基坑未施工,监测数据的变化直接可反映出自动化监测系统的稳定性与可靠性。

统计基坑施工前的 12 月 6 日至 12 月 30 日期间,实测仪器台的水平位移与竖向位移(沉降)的变化情况,如图 7 所示。

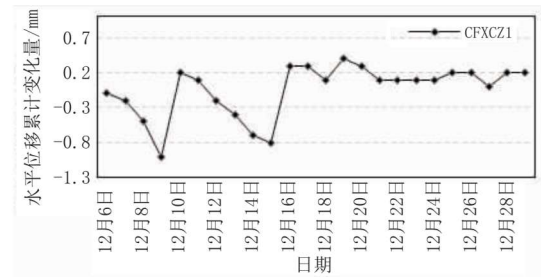


图7 仪器台水平位移的历时变化曲线

从图 7、图 8 中可以看出,根据后视控制大棱镜反算仪器台坐标,实测数据显示,仪器台水平位移与竖向位移的测量精度优于 1 mm,满足监测需求。

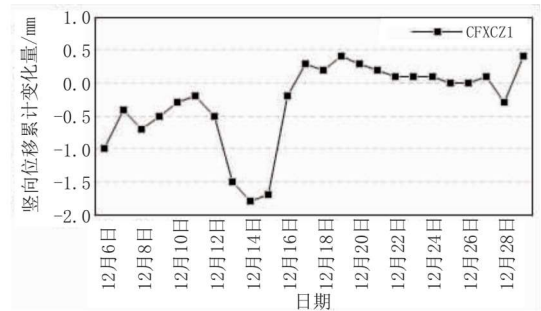


图8 仪器台竖向位移的历时变化曲线

统计基坑施工前的 12 月 3 日至 12 月 30 日期间,本项目下行线 65~145 环的水平位移监测情况,如图 9 所示。

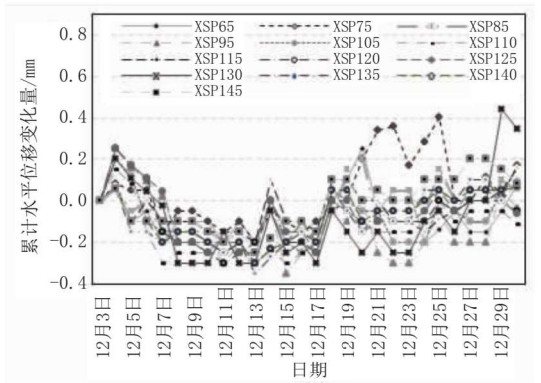


图9 各监测点水平位移的历时变化曲线

由图 9 可以看出,根据基坑施工前的数据,采用一台全站仪进行自动化监测,本项目监测点的水平位移精度基本优于 $\pm 0.5\text{ mm}$,完全满足自动化监测的需求。

5 多台全站仪自动化监测案例

同前述的自动化监测项目,在距离较远的上行线隧道内同样布设 36 组监测断面,由于隧道内通视情况不佳,使用两台全站仪进行自动化监测,全站仪之间的联测采用第 3 节的方式进行。

统计基坑施工前的 12 月 6 日至 12 月 30 日期间,实测仪器台的水平位移与竖向位移(沉降)的变

化情况,如图 10、图 11 所示。

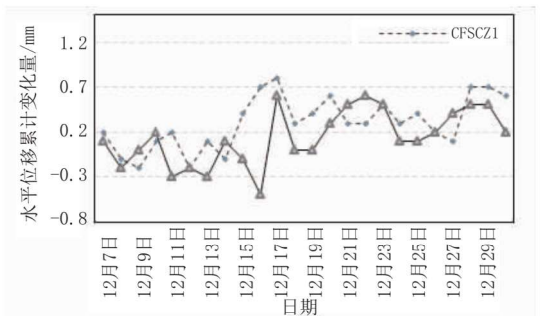


图10 仪器台水平位移监测历时变化曲线图

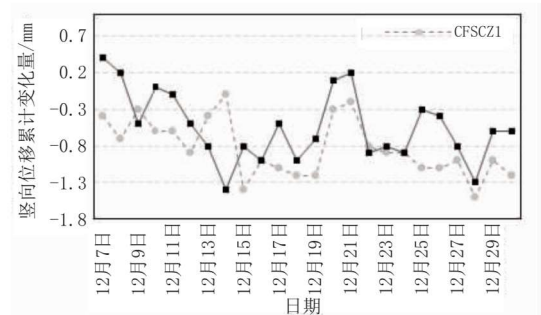


图11 仪器台竖向位移监测历时变化曲线图

从图 10、图 11 可以看出,两个仪器台水平位移与竖向位移的测量精度基本在 1 mm,满足监测需求。

统计基坑施工前的 12 月 3 日至 12 月 30 日期间,本项目上行线 250~330 环的水平位移监测情况,如图 12 所示。

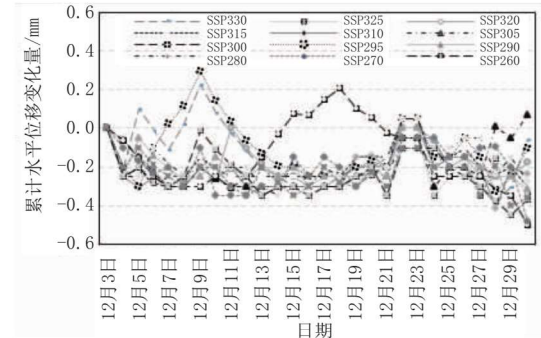


图12 各监测点水平位移监测历时变化曲线图

由图 12 可以看出,根据基坑施工前的数据,监测点的水平位移精度基本在 $\pm 1\text{ mm}$,完全满足自动化监测的需求。

统计基坑施工前的 12 月 3 日至 12 月 30 日期间,本项目上行线 65~230 环的竖向位移(沉降)监测情况,如图 13 所示。

由图 13 可以看出,监测点的竖向位移监测精度与水平位移基本一致,采用 2 台全站仪组网观测,精度基本在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内,完全满足自动化监测的需求。

6 结 语

本文介绍了全站仪的隧道自动化监测技术,分

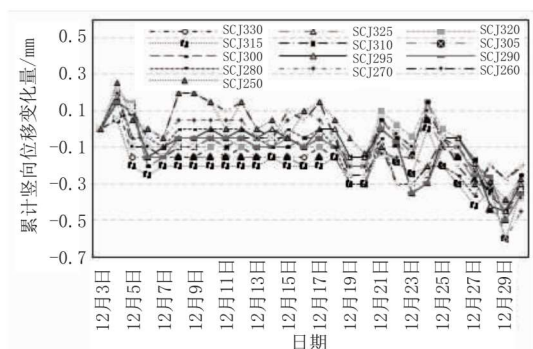


图13 各监测点竖向位移监测历时变化曲线图

别给出了基于单台和多台全站仪的组网方法,列举了相关的平差计算模型。通过工程案例可以看出,使用1台全站仪进行自动化监测,在测区两侧设置后视控制大棱镜,采用多点后方交会的平差计算方法,仪器台平差精度可优于 $\pm 0.5\text{ mm}$;当测区范围较广,为实现整个控制网的实时自动化监测,必须采用多台全站仪串联的方式进行组网,通过设置传递棱镜的方式,其控制网精度基本能控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 左右,

满足自动化控制网的观测需求。

参考文献:

- [1] 梅文胜,张正禄,郭际明,等.测量机器人变形监测系统软件研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2002(2):165-171.
- [2] 梅文胜,张正禄,黄全义.测量机器人在变形监测中的应用研究[J].大坝与安全,2002(5):33-35.
- [3] 梅文胜,张正禄.测量机器人控制网观测与数据处理自动化研究[J].大坝与安全,2003:37-38.
- [4] 潘国荣,李伟.多台测量机器人在地铁隧道自动化监测中的开发与应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015(2):79-85.
- [5] 段伟.地铁隧道结构稳定性自动化监测系统的应用[J].测绘通报,2015(9):91-94.
- [6] 杨帆,赵剑,刘子明,等.自动化实时监测在地铁隧道中的应用及分析[J].岩土工程学报,2012(8):162-166.
- [7] 梅文胜,刘涛.TS30/TM30 测量机器人变形监测系统研究[J].测绘地理信息,2014(2):45-48.
- [8] 徐春明,汪春桃,孙泽信,等.地铁保护区变形自动化监测技术应用研究[J].工程勘察,2014(12):70-74.
- [9] 徐正扬.边角后方交会的精度分析及应用[J].解放军测绘学院学报,1985(1):1-13.

(上接第174页)

5 结 语

采用管片内衬法实施管道修复过程中,除严格按照规范及设计要求切实注重质量以外,施工前还需对管片和填充砂浆的材料采购、管片运输装卸保护、材料送检等工程进场准备工作严格把关。施工过程中需持续加强管片拼装机注浆施工的质量控制,注意每道工序的施工管控与检验。管片拼接时,严格控制用于管片间密封的涂胶量及涂胶均匀度,控制承插位置及深度,采用专用扭矩扳手施工,保证管片拼接到位,接口严密。搅拌填充砂浆时严格按照设计配合比进行,并采用分层注浆,严格控制注浆高度,最

后一次注浆严格控制注浆速度及注浆压力以保障注满注实。针对管片内衬法修复施工的常见质量问题,及时采取预防措施,发现影响质量的因素应及时整改,才能有效保证施工质量。严格按照规范及设计要求进行验收工作,才能确保修复后的大管径箱涵平稳安全运行。

参考文献:

- [1] 杨后军,孙大为,孙跃平,等.管片模块法在特大型排水管道整体修复中的应用[J].非开挖技术,2021(6):29-33.
- [2] 杨万航,王丰,张超,等.市政HDPE缠绕增强结构壁管(B型)施工质量控制[J].中国给水排水,2022,38(6):14-19.