

隧道净空收敛量测精度分析^①

马 莉

(石家庄铁道学院交通工程系, 石家庄 050043)

摘 要 运用协方差理论, 对影响机械式收敛计量测隧道净空收敛精度的各种误差来源进行了严密的分析与论证, 结果发现基线长度的量测标准差对各测点的收敛量的影响可忽略不计。
关键词 隧道净空收敛 绝对收敛量 相对收敛量 标准差

隧道开挖后, 围岩应力将重新分布。在开挖过程中, 周边围岩及支护将产生变形, 此变形是围岩和支护力学行为变化最直接的反映。当围岩应力趋于平衡时, 周边变形趋于稳定, 该变化过程称为“收敛”。坑道内表面的收敛可通过专门的测量仪器测得。通过周边位移观测, 可量测出拱顶下沉和水平收敛量的大小及发展, 从而可判别隧道围岩是否稳定, 同时也能判别支护工作状态及施工方法是否合理。隧道收敛量测是喷锚构筑法施工中的必测项目。

隧道收敛量测时通常使用机械式收敛计对洞室周边少数几个重要点位的位移或收敛进行量测。

在现行技术规范中^[1], 仅对净空收敛量的量测频率、量测断面的间距等做出了规定, 而对收敛值的量测精度要求未做具体说明。本文根据室内量测试验(见表 1)对隧道净空收敛量测的精度进行了一些分析探讨, 供量测工具选择及量测数据分析时参考。

表 1 室内收敛量测试验数据

序号	测试日期	平均气温 / °C	基线 方向	量测 组数	σ_{n-1} / mm
1	96. 6. 7	27. 0	斜向	9	0. 101
2	96. 6. 11	26. 9	斜向	22	0. 093

1 净空收敛量的测算及精度分析

目前, 隧道净空收敛量测, 主要是使用收敛计测定隧道周边各测点连线方向上的相对位移值, 然后再计算出各测点绝对的水平收敛量及垂直收敛量。收敛量测需要在断面内布设测点, 构成基线。基线数量有 1 条、2 条、3 条和 6 条等几种形式, 这里仅以 3 基线布设形式为例加以探讨。

3 条基线布设形式如图 1 所示。测点 1, 2, 3 所构成的基线长度分别为: l_{12} , l_{13} , l_{23} , 其中 l_{12} 为水平基线。若 3 基线方向上的相对位移量分别为 C_{12} , C_{13} , C_{23} ; 各测点的绝对水平收敛

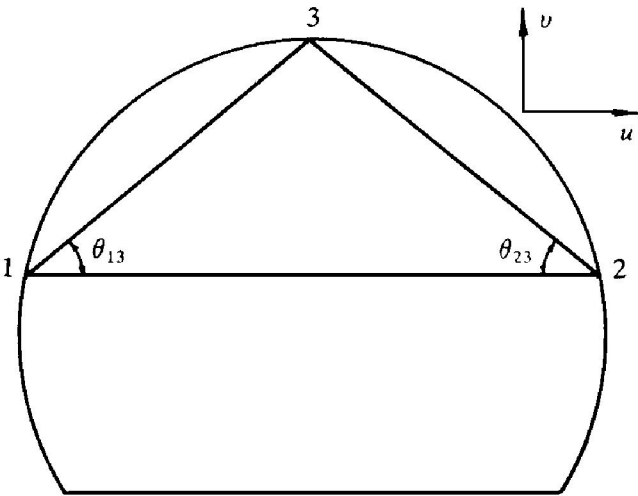


图 1 三条基线的布设形式

① 收稿日期: 1996- 08- 30; 修回日期: 1996- 11- 28 马 莉, 女, 42 岁, 讲师

量为 U_i , 绝对垂直收敛量为 $V_i (i = 1, 2, 3)$, 则根据几何关系有

$$\begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ C_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} & 0 & 0 & \sin \theta_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{13} & 0 & 0 & \sin \theta_{13} & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta_{23} & 0 & 0 & \sin \theta_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 - U_2 \\ U_1 - U_3 \\ U_2 - U_3 \\ \text{通过 } V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_2 - V_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 θ_{ij} 为 i, j 两测点连线与水平线间的夹角。式中共有 6 个未知数, 3 个方程, 为解出该方程需引入 3 个已知数。当围岩比较均匀, 无显著不对称侧压力, 开挖顺序也对称于中轴, 不产生非均匀沉降时, 可认为 $U_3 = V_1 = V_2 = 0$; 又考虑到 1, 2 点基线为水平, 即 $\theta_{12} = 0$, 则有

$$\begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ C_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ \cos \theta_{13} & 0 & -\sin \theta_{13} \\ 0 & \cos \theta_{23} & -\sin \theta_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

用克莱姆法则解此方程, 得:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ V_{3\text{基线}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin(\theta_{23} - \theta_{13})} \begin{bmatrix} -\sin \theta_{13} \cdot \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} & -\sin \theta_{13} \\ -\cos \theta_{13} \cdot \sin \theta_{23} & \sin \theta_{23} & -\sin \theta_{13} \\ -\cos \theta_{13} \cdot \cos \theta_{23} & \cos \theta_{23} & -\cos \theta_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{13} \\ C_{23} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.1 相对位移量 C_{ij} 的计算及其精度分析

基线方向上的相对位移量 C_{ij} 由下式计算:

$$C_{ij} = l_0 - l_t + X_t - X_0 \quad (3)$$

式中 l_0 —为第一次观测时所用尺孔刻划值, l_t — t 时刻观测时所用尺孔刻划值, X_t — t 时刻观测时经温度改正后的千分表读数, $X_t = X'_t + \Delta t$; X_0 —第一次观测时经温度改正后的千分表读数。

$$X_0 = X'_0 + \Delta t_0$$

$$\Delta t = \alpha(20 - T)l_t$$

$$\Delta t_0 = \alpha(20 - T)l_0$$

式中 α —为钢尺的线膨胀系数, T —为测试时的平均气温, X'_t — t 时刻观测时千分表读数, X'_0 —第一次观测时千分表读数。

由式(1)可以看出, 测点的绝对水平位移量 U_i 和绝对垂直位移量 V_i 的测算精度是由基线长度 l_{ij} 和相对收敛量 C_{ij} 的量测精度所决定, 而基线长度与相对收敛量又是相互误差独立的观测值。

根据式(3)可以看出, 两测点间的相对位移量 C_{ij} 的误差, 主要由测温误差、换孔误差、钢尺垂曲、尺长误差、拉力误差、挂尺配合误差、读数误差与现场环境影响等因素引起。其中钢尺垂曲、尺长误差、换孔误差、拉力误差、测温误差等属于系统误差(或部分属于系统误差, 但有随机性质), 可采取一定措施(在计算收敛值时或引入修正值后)加以消除或削弱。挂尺配合误差、读数误差、现场环境的影响等因素引起的误差则属于随机误差。这些误差往往与环境因素、观测人员的鉴别能力及仪器制造的不完善有关。作者采用中科院武汉岩土所研制的弹簧式收敛计在室内进行了收敛量测试, 所用仪器为 WRM-3 型丝尺两用收敛计, 根据 2 次共 31 组有效数据估算出读数 X 的标准差 σ_{n-1} 如表 1 所示。

取工作条件系数为 1.3(见文献[2]), 则 $\sigma_{\text{现}}$ 为表 1 所列实测 σ_{n-1} 值乘以工作条件系数, 即: $\sigma_{\text{现}} = 1.3 \times 0.093 = 0.121 \text{ mm}$, 根据协方差传播律, 基线方向上的相对收敛值的标准差为:

$$\sigma_c = \sqrt{2} \sigma_{\text{现}} = 0.172 \text{ mm} \approx 0.2 \text{ mm}$$

1.2 基线长度的量测精度分析

基线长度的量测误差与基线的量测方法有关。通常的量测方法有两种。当所用收敛计给出仪器各部分的长度时,基线长度为钢尺长度与收敛计各部分长度之和,其基线量测误差在1 mm以下^[2]。当所用收敛计未给出各部分长度时,基线长度可用钢尺量测。基线长度的量测误差主要由对点误差、温度变化、尺长误差、拉力误差、读数误差等因素引起,其中温度变化误差、尺长误差和拉力误差属于系统误差,可以采取措​​施消减到可忽略不计的程度,其它因素引起的误差则属于随机误差。由于测点设置为球状,对点难度

大,读数误差大,根据量测实例,取钢尺量测

基线的标准差为 $\sigma_l = \pm 3 \text{ mm}$ 。

1.3 绝对收敛量的精度分析

为说明绝对收敛量的计算及其精度,特以某地下巷道断面测点布设实例进行计算说明,巷道断面测点布设如图2。

其中基线 l_{12} 为水平线,基线长度标注于图2(长度单位为 mm)。通过量测得出 $C_{12} =$

35.1 mm, $C_{13} = 16.0 \text{ mm}$, $C_{23} = 20.8 \text{ mm}$ 。

θ_{13} , θ_{23} 可由下式计算:

$$\begin{aligned} \theta_{13} &= \cos^{-1} \frac{l_{12}^2 + l_{13}^2 - l_{23}^2}{2l_{12} \cdot l_{13}} \\ \theta_{23} &= \cos^{-1} \frac{l_{12}^2 + l_{23}^2 - l_{13}^2}{2l_{12} \cdot l_{23}} \end{aligned} \quad (4)$$

为求得绝对收敛量 U_1 , U_2 , V_3 的标准差,将式(2)全微分,并按式(4)计算出 θ_{ij} ,求出相应的偏导数值,则有:

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dV_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5237 & 0.8290 & 0.8571 \\ -0.4763 & 0.8290 & 0.8571 \\ 0.3676 & -0.6398 & 0.6016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dC_{12} \\ dC_{13} \\ dC_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.9712 & 0.9282 \\ 4.0800 & 0.9282 \\ -0.4800 & 2.5260 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_{13} \\ d\theta_{23} \end{bmatrix} \quad (5)$$

同理,将式(4)全微分,有

$$\begin{bmatrix} d\theta_{13} \\ d\theta_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0020 & -0.0010 & 0.0033 \\ 0.0019 & -0.0033 & 0.0010 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dl_{12} \\ dl_{13} \\ dl_{23} \end{bmatrix} \quad 3$$

将上式代入(5)式,得

$$\begin{bmatrix} dU_1 \\ dU_2 \\ dV_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5237 & 0.8290 & 0.8571 \\ -0.4763 & 0.8290 & 0.8571 \\ 0.3676 & -0.6398 & 0.6061 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dC_{12} \\ dC_{13} \\ dC_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0077 & -0.0060 & 0.0107 \\ -0.0064 & -0.0071 & 0.0144 \\ 0.0058 & -0.0079 & 0.0009 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dl_{12} \\ dl_{13} \\ dl_{23} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据(6)式运用协方差传播律,则有

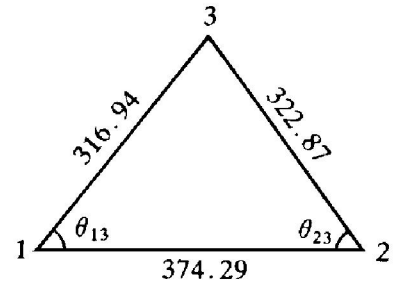


图2 地下巷道断面测点布设图

$$\begin{vmatrix} \sigma_{U_1}^2 & \sigma_{U_1 U_2} & \sigma_{U_1 V_3} \\ \sigma_{U_2 U_1} & \sigma_{U_2}^2 & \sigma_{U_2 V_3} \\ \sigma_{V_3 U_1} & \sigma_{V_3 U_2} & \sigma_{V_3}^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5237 & 0.8290 & 0.8571 \\ -0.4763 & 0.8290 & 0.8571 \\ 0.3676 & -0.6398 & 0.6016 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \sigma_c^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_c^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_c^2 \end{vmatrix} \times \\
\begin{vmatrix} 0.5237 & -0.4763 & 0.3676 \\ 0.8290 & 0.8290 & -0.6398 \\ 0.8571 & 0.8571 & 0.6016 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -0.0077 & -0.0060 & 0.0107 \\ -0.0064 & -0.0071 & 0.0144 \\ 0.0058 & -0.0079 & 0.0009 \end{vmatrix} \\
\begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_l^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -0.0077 & -0.0064 & 0.0058 \\ -0.0060 & -0.0071 & -0.0079 \\ 0.0107 & 0.0144 & 0.0009 \end{vmatrix} \quad (7)$$

考虑基线测量误差的影响, 若取 $\sigma_c = \pm 0.172 \text{ mm}$, $\sigma_l = 3 \text{ mm}$ 代入上式可解得:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{U_1}^2 & \sigma_{U_1 U_2} & \sigma_{U_1 V_3} \\ \sigma_{U_2 U_1} & \sigma_{U_2}^2 & \sigma_{U_2 V_3} \\ \sigma_{V_3 U_1} & \sigma_{V_3 U_2} & \sigma_{V_3}^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.0521 & 0.0368 & 0.0054 \\ 0.0368 & 0.0514 & -0.0053 \\ 0.0054 & -0.0053 & 0.0277 \end{vmatrix} \quad ($$

从而算得 $\sigma_{U_1} = \pm 0.23 \text{ mm}$, $\sigma_{U_2} = \pm 0.23 \text{ mm}$, $\sigma_{V_3} = \pm 0.17 \text{ mm}$ 。考虑到精度估算时标准差只进不舍, 则取

$$\sigma_{U_1} = \pm 0.3 \text{ mm}, \sigma_{U_2} = \pm 0.3 \text{ mm}, \sigma_{V_3} = \pm 0.2 \text{ mm}$$

若不考虑基线测量误差的影响, 即取 $\sigma_c = \pm 0.172 \text{ mm}$, $\sigma_l = 0$, 代入(7) 式可解得:

$$\sigma_{U_1} = \pm 0.22 \text{ mm}, \sigma_{U_2} = \pm 0.22 \text{ mm}, \sigma_{V_3} = \pm 0.16 \text{ mm}$$

即, 最终绝对收敛量 U_1 , U_2 , V_3 的标准差为:

$$\sigma_{U_1} = \pm 0.3 \text{ mm}, \sigma_{U_2} = \pm 0.3 \text{ mm}, \sigma_{V_3} = \pm 0.2 \text{ mm}。$$

2 结束语

通过对机械式收敛计(千分表式) 进行净空收敛量测时的精度分析, 可以得出如下结论:

- (1) 基线长度标准差对测点的绝对收敛量影响很小, 即使达 $\pm 3 \text{ mm}$, 其影响亦可忽略不计;
- (2) 基线方向上的相对位移量 C_{ij} 的量测标准差 σ_c 在一般情况下可取 $\sigma_c = \pm 0.2 \text{ mm}$, 取 2 倍中误差, 则相对位移量的极限误差为 $\pm 0.4 \text{ mm}$;

- (3) 绝对收敛量测算标准差达 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 时, 极限误差仅为 $\pm 0.6 \text{ mm}$ 。

上述结论基于实验资料, 可对理论研究和实际应用起参作用。

参考文献

- 1 铁道部专业设计院. 铁路隧道喷锚构筑法技术规则(TBJ108-92). 北京: 铁道部建设司标准科学情报所, 1992: 38-42.
- 2 翁汉民编. 地下工程量测与试验, 第1版. 成都: 西南交通大学出版社, 1989: 208-231.

ACCURACY ANALYSIS OF MEASURING CONSTRUCTION GAUGE OF TUNNEL

Ma Li

*Department of Jiaotong Engineering,
Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043*

ABSTRACT The sources of all sort of error that affect the accuracy of measuring construction gauge of tunnel with mechanical convergence meter, were analysed and argufied strictly by applying the variance theory in this paper. The result indicates that the measurement standard deviation of base line is inconsiderable to convergence value of every measuring point.

Key words convergence of tunnel construction gauge absolute convergence value relation convergence value
standard deviation

(编辑 何学锋)

(上接 27 页)

- 2 李德仁等. 地理信息系统导论, 北京: 测绘出版社, 1993.
- 3 郭仁忠. 见: '94 见地理信息系统学术研讨会论文集. 北

京: '94 地理信息系统学术研讨会学术组, 1994: 56- 60.

- 4 Landis, J. GIS 技术综述, 咄咄逼人的地理信息系统世界. 北京: 测绘出版社, 1995.

DEFINITION AND CONTENTS OF SPATIAL ANALYSIS

Xiang Nanping, Han Xianjue

*College of Resources, Environment and Civil Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The thesis studied the definition and contents of spatial analysis. From the view point of the simulation of the geographical space, the authors defined the spatial analysis as a system which describes the spatial relationship and spatial action of the object in the geographical space. Further on, the thesis extended the contents of spatial analysis to spatial query and spatial relative analysis.

Key words geographical information system(GIS) spatial analysis spatial query relative analysis

(编辑 何学锋)