

隧道工程监测过程中的数值计算及原理

张爱萍¹ 张项铎²

(1 中铁隧道集团二处有限公司 河北三河 101600 2 中铁隧道勘测设计院有限公司 洛阳 471009)

摘要: 地铁监测过程中的数值计算是监控量测技术中的重要环节,它直接影响监测成果的质量和可靠性。本文综合部分地区隧道施工监测情况,全面介绍了隧道工程监测过程中隧道位移分配值、常用观测物理量、相临地下管线监测、地面建筑差异沉降监测等的计算方法及原理,可供同行参考。

关键词: 隧道 监控量测 数值计算

1 隧道位移分配计算方法

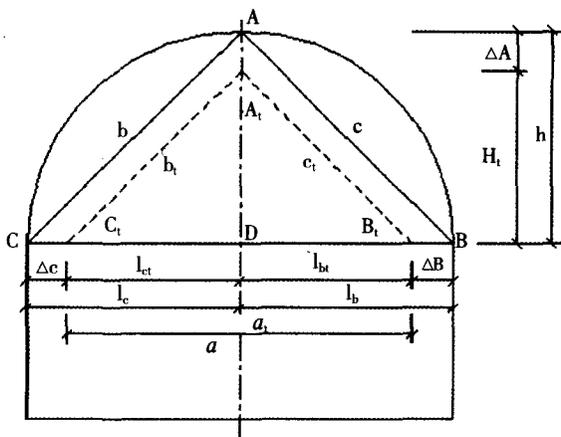
收敛观测断面上各测点的位移,可以用实测的收敛位移以下列假设条件近似计算求得。

1) 洞壁轮廓线上测点的位移为径向位移,

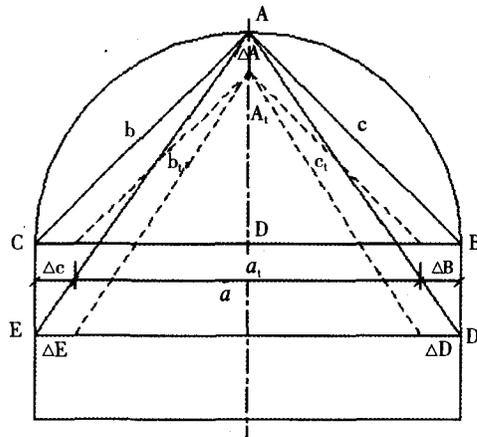
除有较大切向位移外,一般该位移忽略不计。

2) 基线的角度变化忽略不计。

1.1 轴对称三角形测点位移计算方法



轴对称三角形测点位移计算图(一)



轴对称三角形测点位移计算图(二)

图1

如图1(一),当有三条基线测设时A、B、C三点的位移为:

$$\begin{aligned} \Delta A &= h - h_t \\ \Delta B &= l_b - l_{bt} \\ \Delta C &= l_c - l_{ct} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $l_c = (a^2 + b^2 - c^2) / 2a$

$$l_b = a - l_c$$

$$h = \sqrt{(c^2 - l_b^2)}$$

同理可得出 l_{ct} 、 l_{bt} 、 h_t 的相应值。

$$\begin{aligned} \text{则: } \Delta A &= \sqrt{(b^2 - ((a^2 + b^2 - c^2) / 2a)^2)} \\ &- \sqrt{(b_t^2 - ((a_t^2 + b_t^2 - c_t^2) / 2a_t)^2)} \\ \Delta C &= (a^2 + b^2 - c^2) / 2a - (a_t^2 + b_t^2 - c_t^2) / 2a_t \end{aligned}$$

$$\Delta B = a - a_t - \Delta C \quad (2)$$

式中 a 、 c 、 b 和 a_t 、 c_t 、 b_t 分别为相应基线的基准值和 t 时刻的测值。

如图1(二),当有五条基线测设时,在 $\triangle ADE$ 中,同样可以计算A、D、E三点的位移。当 $\triangle ABC$ 和 $\triangle ADE$ 计算出A点的下沉量一致时,说明边墙不产生垂直位移。否则,其差值便是BD或CE范围内所产生的垂直位移。令 ΔB_y 、 ΔC_y 分别代表B、C两点的垂直位移,假设: $\Delta B_y = \Delta C_y$ 则:

$$\begin{aligned} \Delta B_y = \Delta C_y &= \sqrt{(b^2 - ((a^2 + b^2 - c^2) / 2a)^2)} \\ &+ \Delta A - \sqrt{(b_t^2 - ((a_t^2 + b_t^2 - c_t^2) / 2a_t)^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ΔA 为A点实测沉降值。

同理可计算 ΔD_y 、和 ΔE_y 。

1.2 规则三角形测点位移计算方法

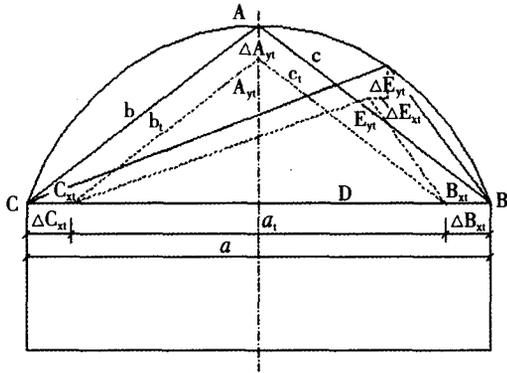


图2 规则三角形测点位移计算图

1.2.1 求 t 时刻 A、B、C 测点的位移

$$\begin{aligned} \Delta A_{yt} &= A_y - A_{yt} \\ \Delta B_{xt} &= B_x - B_{xt} \\ \Delta C_{xt} &= C_x - C_{xt} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $A_y = c \sin \arccos[(a^2 + c^2 - b^2) / 2ac]$

$$B_x = \sqrt{(c^2 - A_y^2)}$$

$$C_x = -\sqrt{(b^2 - A_y^2)}$$

同理可得 A_{yt} 、 B_{xt} 、 C_{xt} 值。

1.2.2 求 t 时刻 E 测点的位移

当 E 点向中线偏移时: $\Delta E_{xt} = E_x - E_{xt}$

$$\Delta E_{yt} = E_y - E_{yt}$$

当 E 点远离中线偏移时: $\Delta E_{xt} = E_{xt} - E_x$

$$\Delta E_{yt} = E_y - E_{yt} \quad (5)$$

式中: E_y 、 E_x 、 E_{yt} 、 E_{xt} 可参照 (4) 式求得。

1.3 任意三角形测点位移计算方法

1.3.1 任意三测点位移计算方法

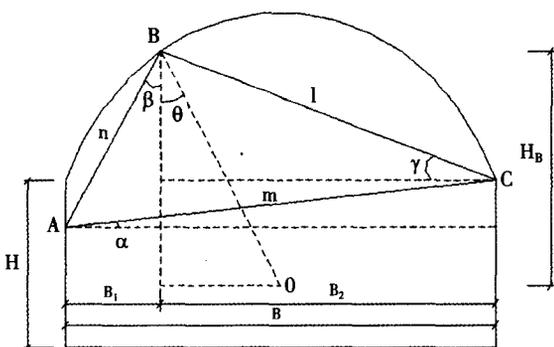


图3 任意三角形三测点位移计算图

如图3, A、B、C 为洞壁上任意三个测点, 解下列方程可求得三测点垂直洞壁的位移 u_a 、 u_b 、 u_c :

$$u_a \cos \alpha + u_c \cos \alpha = S_m$$

$$u_a \sin \beta + u_b \cos(\beta + \theta) = S_n$$

$$u_c \cos \gamma + u_b \cos(90^\circ - \gamma - \theta) = S_l$$

当 B 点在拱顶, A、C 点在同一高程时, $\alpha = \theta = 0$, 则上述方程为:

$$u_a + u_c = S_m$$

$$u_a \sin \beta + u_b \cos \beta = S_n$$

$$u_c \cos \gamma + u_b \sin \gamma = S_l \quad (6)$$

式中: $\cos \alpha = B / m$, $\sin \alpha = \sqrt{(1 - B^2 / m^2)}$;

$$\cos \gamma = B_2 / l, \sin \gamma = \sqrt{(1 - B_2^2 / l^2)}$$

$$\cos \beta = \sqrt{(1 - B_1^2 / n^2)}, \sin \beta = B_1 / n;$$

$$\tan \theta = (B / 2 - B_1) / H_B;$$

l、m、n—基线长度;

S_l 、 S_m 、 S_n —分别为基线 l、m、n 测得的并经温度修正后的收敛值;

O—洞拱圆心;

H—边墙高度;

H_B —为 B 点至圆心垂直高度。

1.3.2 考虑一侧边墙下沉的四测点位移计算方法

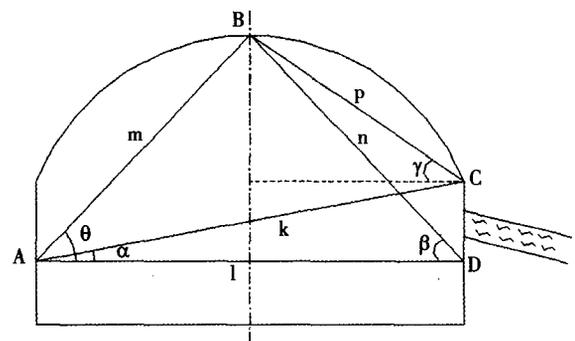


图4 任意三角形四测点位移计算图

解下列方程组, 计算 A、B、C、D 四测点垂直洞壁的位移 u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_d 和 C 测点下沉位移 v_c (向下为正值):

$$u_a + u_d = S_l$$

$$u_a \cos \alpha + u_c \cos \alpha + v_c \sin \alpha = S_k$$

$$u_a \cos \theta + u_b \sin \theta = S_m$$

$$u_b \sin \beta + u_b \cos \beta = S_n$$

$$u_b \sin \gamma + u_c \cos \gamma - v_c \sin \gamma = S_p \quad (7)$$

式中: l 、 m 、 n 、 k 、 p —基线长度;

S_1 、 S_m 、 S_n 、 S_k 、 S_p —分别为基线 l 、 m 、 n 、 k 、 p 五条测线测得的并经温度修正后的收敛值;

1.3.3 考虑两侧边墙下沉的五测点位移计算方法

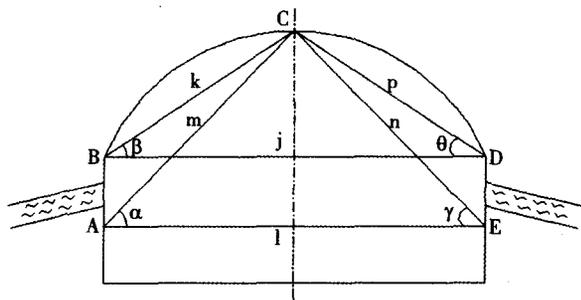


图5 任意三角形五测点位移计算图

解下列方程组, 计算A、B、C、D、E测点垂直洞壁的位移 u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_d 、 u_e 和B、C测点下沉位移 $v_b = v_c = v$ (向下为正值):

$$\begin{aligned} u_a + u_e &= S_1 \\ u_a \cos \alpha + u_c \sin \alpha &= S_m \\ u_e \cos \gamma + u_c \sin \gamma &= S_n \\ u_b + u_d &= S_j \\ u_b \cos \beta - v \sin \beta + u_c \sin \beta &= S_k \\ u_d \cos \theta - v \sin \theta + u_c \sin \theta &= S_p \end{aligned} \quad (8)$$

式中: l 、 m 、 n 、 j 、 k 、 p —基线长度;

S_1 、 S_m 、 S_n 、 S_j 、 S_k 、 S_p —分别为基线 l 、 m 、 n 、 j 、 k 、 p 六条测线测得的并经温度修正后的收敛值;

1.3.4 不考虑边墙下沉的五测点位移计算方法

在洞室观测断面上, 需要设五点或更多点时, 可采用最小二乘法或其它数学方法求解方程。假定 $v=0$, 则上节方程为:

$$\begin{aligned} u_a + u_e &= S_1 \\ u_a \cos \alpha + u_c \sin \alpha &= S_m \\ u_e \cos \gamma + u_c \sin \gamma &= S_n \\ u_b + u_d &= S_j \\ u_b \cos \beta + u_c \sin \beta &= S_k \\ u_d \cos \theta + u_c \sin \theta &= S_p \end{aligned}$$

可变成: $[K] \{u\} = \{S\}$ (9)

其中:

$$[k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$[u] = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \end{bmatrix} \quad [S] = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_m \\ S_n \\ S_j \\ S_k \\ S_p \end{bmatrix}$$

方程可变为: $\sum_{i=1}^5 k_{ij} u_j = S_i$

设误差函数: $S = \sum_{i=1}^6 \left(\sum_{j=1}^5 k_{ij} u_j - S_i \right)^2$ 当 $\frac{\partial S}{\partial u_i} = 0$ 时,

$S \rightarrow \varepsilon$ 有极小值

可列出五个方程式: $\frac{\partial S}{\partial u_a} = 0$

$$\frac{\partial S}{\partial u_b} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial u_c} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial u_d} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial u_e} = 0$$

即可求唯一解: u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_d 、 u_e 。

2 常用观测物理量的计算

2.1 差动电阻式仪器物理量的计算

2.1.1 应变计的应变计算

$$\text{总应变: } \varepsilon_m = f' \Delta Z + b \Delta t \quad (10)$$

式中:

f' —应变计最小修正读数 ($10^{-6} / 0.01\%$);

b —温度补偿系数 ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$);

ΔZ —电阻比变化量 (0.01%);

ΔT —温度变化量 ($^\circ\text{C}$)。

$$\text{岩体应变: } \varepsilon = f' \Delta Z + (b - \alpha_r) \Delta t \quad (11)$$

式中: α_r —岩石的线膨胀系数 ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)。

2.1.2 钢筋计的应力计算

$$\text{钢筋应力 (MPa): } \sigma = f' \Delta Z + b \Delta t \quad (12)$$

式中: f' —钢筋计最小修正读数 (MPa/

0.01%) ;

b—钢筋计温度补偿系数 (MPa/℃)。

2.1.3 渗压计的渗透压力计算

渗透压力 (MPa) : $P=f' \Delta Z-b \Delta t$ (13)

式中: f' 和 b 符号意义同钢筋计。

2.1.4 压力计的应力计算

压应力 (MPa) : $\sigma=f' \Delta Z+b \Delta t$ (14)

式中: f' 和 b 符号意义同钢筋计。

2.2 钢弦式仪器物理量的计算

2.2.1 应变计的应变计算

t时刻的应变量 ($\times 10^{-6}$) : $\varepsilon =K(f_t^2-f_0^2)+A$ (15)

式中: K —传感器仪器系数 ($10^{-6}/\text{Hz}^2$) ;

A —应变计仪器修正值 (10^{-6}) ;

f_0 —基准频率值 (Hz) ;

f_t —t时刻频率值 (Hz)。

2.2.2 钢筋计的应力计算

钢筋应力 (MPa) : $\sigma =K(f_t^2-f_0^2)+A$ (16)

式中: K —钢筋计仪器系数 (MPa/Hz²)。

2.2.3 渗压计的渗透压力计算和压力计的压力计算

压力 (MPa) : $P=(f_t^2-f_0^2)+A$ (17)

式中: K —渗压计或压力计仪器系数 (MPa/Hz²)。

2.3 测斜仪物理量的计算

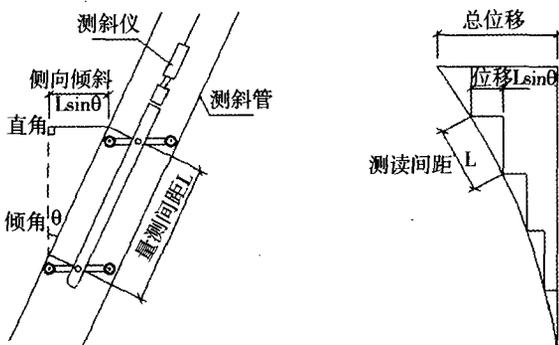


图6 测斜仪量测原理

2.3.1 伺服加速度计式滑动测斜仪计算

$\lambda=L \sin \theta$ (18)

式中: λ —测斜仪轮距长为 L 的相对铅垂线的位移量 (mm) ;

L —测斜仪轮距长 (mm) ;

θ —与铅垂线的偏角 (°)。

2.3.2 电阻片式滑动测斜仪的计算

$\lambda=K \Delta \varepsilon$ (19)

式中: K —仪器率定常数;

$\Delta \varepsilon$ —观测的应变 (10^{-6})。

3 相临地下管线监测的计算方法

地下管线的模拟和验算方法是基于刚性和柔性两类管线进行的。

3.1 刚性管道的检验计算

将管道视为弹性地基梁时, 地层数学模型描述见图7。

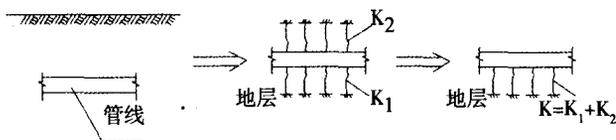


图7 弹性地基梁数学模型

如将管道位移计为 ω_p , 则有:

$$d^4 \omega_p / dx^4 + 4 \lambda^4 \omega_p = q / E_p I_p \quad (20)$$

$$\lambda^2 = \sqrt{(K / 4 E_p I_p)}$$

式中: K —基床系数;

E_p —管道材料弹性模量;

I_p —管道截面惯性距;

q —作用在管道上的压力。

地层无沉降时, $q=K \omega_p$; 地层发生沉降时, $q=K(\omega_p - \omega)$, 如图8所示。

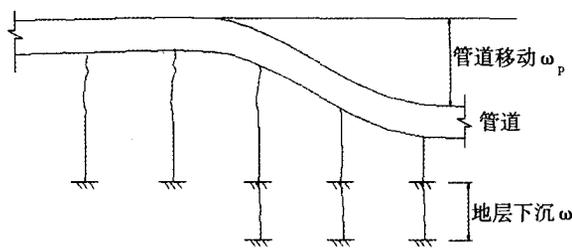


图8 弹性地基变形

隧道与管道轴线正交时, 地层沉降 ω 的表达式可以直接由 peck 公式计算:

$$S = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{x^2}{2i}} \quad (21)$$

式中: V_1 —地层损失量;

x —与隧道中心线的距离;

i —沉降槽宽度系数;

$X=i$ 处为沉降曲线的反弯点。

将 q 和 S 的表达式代入方程一，即可导出作用在管道上的弯矩 M 和发生的应变 ϵ_x 的计算表达式：(22)

$$M=EI \frac{\partial^2 \omega_p}{2\partial X^2} \quad \epsilon_x = \frac{d\partial^2 \omega_p}{2\partial X^2} \quad (22)$$

求得应变 ϵ_x 后，可按 $\sigma_w = E_p \epsilon_x$ 来确定管道是否将出现破坏。隧道与管道轴线斜交时，可令沉降槽宽度系数 $i_\theta = i_0 / \cos \theta$ ；管道与隧道平行时，则令 i_θ 等于半个沉降槽的宽度。模型详见图9。

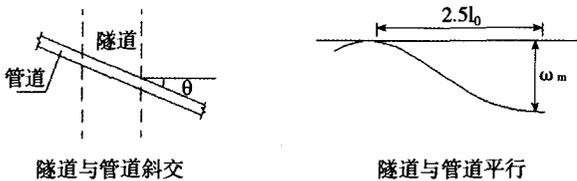


图9

3.2 柔性管道的检验计算

隧道与管道轴线正交时，管道接缝张开值的计算模型见图10。

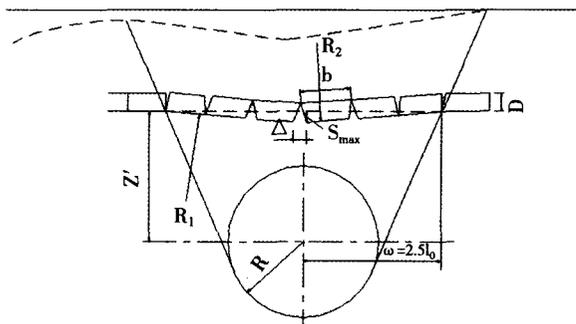


图10 隧道与管道正交时管道接缝张开值

- 1) 根据peck公式预测管道底面的沉降曲线；
- 2) 按几何关系求沉降曲线的曲率半径 R_1 、 R_2 ；
- 3) 直径为 D 的管段在曲率最大处接缝的张开值 Δ 按下式计算：

$$\Delta = Db / R_1 \quad \text{或} \quad \Delta = Db / R_2 \quad (23)$$

如在接头上设有内张圈固定的橡胶止水带，且接头张开 Δ 时仍不漏水和不破坏，则管道接头处于安全状态。

4 地面建筑差异沉降监测的计算方法

隧道施工对地面建筑物影响示意图11。

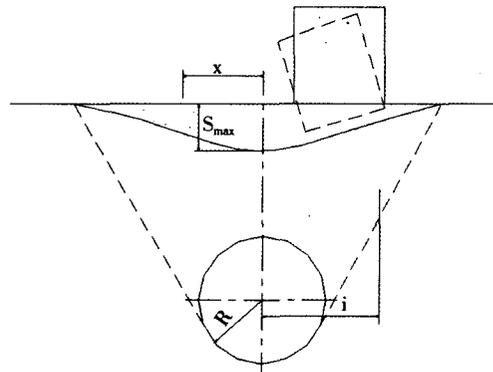


图11 隧道施工对地面建筑物影响示意图

根据以往经验，地表沉降规律（横向）可以采用Peck曲线描述：

$$S = S_{\max} \exp(-x^2 / 2i^2) \quad (24)$$

式中： x —距隧道中心的距离；

S —距隧道中心 x 处的地面沉降量；

S_{\max} —隧道中心处的地面最大沉降量；

i —沉降槽宽度系数，可通过回归求得，亦可采用经验公式：

$$i = (H+R) / \sqrt{2\pi \operatorname{tg}(45^\circ - \phi/2)} \quad (25)$$

H —覆土厚度；

R —计算半径。对于矩形结构，等效半径为： $R=0.29(a+b)$ ，其中 a 、 b 分别为矩形结构的长短边；对于其它非圆形结构，其等效半径为： $R=\sqrt{(A/\pi)}$ ，其中 A 为非圆形结构的面积。

由沉降槽曲线可知，在拐点 i 处曲线斜率最大；此时，差异沉降（不均匀沉降）达到最大。从而得到允许最大沉降为： $\Delta S=[f]i$ ，只要差异沉降小于这个值，安全就可得到保证。

5 结语

本文结合部分地区隧道的施工监测情况与成果，通过对监测过程中不同情况的数据整理、计算、分析，得出具有代表性的岩体力学参数和其它有关指标，为建立合理的计算模型提供可靠的资料。从而将不宜监测到的物理量转换为相应的容易监测、传输或处理的信号，以便使监测更好操作。

参考文献

- [1] 朱桂兰. 地下工程中围岩力学形态变化的量测技术(述评). 铁科院西南所
- [2] 刘永燮, 季良杰. 岩体原位监测设计及成果分析应用(上). 水电工程研究. 1993.1总第24期