

拟附合水准路线在高速公路沉降观测中的应用

熊国萍¹, 何良德², 许永明²

(1. 苏州市高速公路建设指挥部, 江苏 苏州 215007; 2. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:根据高速公路沉降速率的变化规律和沉降稳定动态控制的需要, 提出不同施工期沉降增量的精度指标, 认为在填筑期、预压初期沉降增量中误差可取 2.5 mm, 预压末期和路面施工期可取 1.5 mm. 针对在工程实践中可供使用的水准网精度低于沉降观测精度要求的特点, 提出和研究了拟附合水准路线的平差和精度估算方法, 可在限定的条件下尽量提高观测精度, 并给出观测线路数的确定方法. 提出应采取有效措施减少观测点破坏次数、尽量固定测站等提高观测精度的若干建议.

关键词:高速公路; 沉降增量; 拟附合路线; 观测精度

中图分类号: U412.36+6

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2003)05-0043-03

根据高速公路沉降稳定动态控制的需要, 沉降观测一般采用三等水准测量^[1]. 由于高速公路是线形带状构造物, 沉降观测通常沿路线方向采用支水准路线、(拟)附合水准路线, 较少采用闭合水准路线. 理论上讲, 应布设高精度的沉降观测控制网, 以保证测量成果的精度及可靠性. 但在工程实践中, 一般只能利用构造物的高程控制网进行沉降观测, 由施工单位负责加密设置的四等水准点, 与沉降观测等级相比属于低级水准点. 为了提高水准点精度, 可在每次沉降观测后, 及时取已测得的水准点高差的最或是值, 不断修正水准点高程. 因此在平差时必须考虑水准点误差的影响, 这种附合路线的平差方法不同于通常的附合水准路线, 在此称为拟附合水准路线. 本文着重研究在现实条件的限制下, 如何利用拟附合路线来提高观测精度以及根据不同施工期的精度要求灵活确定观测线路数的方法.

1 沉降增量的观测精度指标

高速公路软土地基沉降速率的变化过程与软土地基性质、地基处理方法、路基高度、施工进度安排和沉降稳定控制方法等多种因数有关. 统计资料表明, 在填筑期和预压初期的月沉降速率一般为厘米级乃至分米级, 施工时需要严格控制填筑或加载速率, 使路基的沉降速率始终小于 10 mm/d, 以确保路基的整体稳定性. 在预压末期沉降速率由厘米级逐渐下降为毫米级, 为了控制后期沉降量, 要求预压结束前的沉降速率小于 3 ~ 12 mm/月, 其中欠载预压 3

mm/月, 等载预压 3 ~ 5 mm/月, 超载预压 8 ~ 12 mm/月. 在路面施工期, 路基经过有效的预压处理之后, 沉降速率一般小于 3 ~ 5 mm/月.

软土地基的沉降速率是沉降稳定动态控制的最主要指标, 因此宜取沉降增量中误差作为观测精度的控制指标. 沉降观测的精度直接关系到沉降稳定动态控制的成败, 必须能够真实反映路基沉降速率大小及其变化过程, 同时还应考虑到现场观测条件的影响. 通过比较分析后认为, 在填筑期和预压末期, 一般每月观测 2 ~ 4 次, 沉降增量较大, 观测频率高, 观测条件较差, 沉降增量中误差 m_{Δ} 取 2.5 mm 为宜. 在预压末期和路面施工期内, 一般每月观测 1 ~ 2 次, 沉降增量小, 观测频率低, 观测条件相对较好, 沉降增量中误差 m_{Δ} 取 1.5 mm 为宜.

2 拟附合路线的平差方法

2.1 拟附合路线的高程平差

现设拟附合水准路线两端有稳定的 A、B 水准点, 高程分别为 H_a, H_b , 中误差分别为 m_a, m_b . 由于沉降增量是观测点高程在不同时间的相对变化值, 因此可将 A 水准点作为基准点, 假设高程 H_a 为真值, 令 $m_a = 0$, 只计 B 水准点高程 H_b 中误差 m_b .

在沉降观测时, 从 A 水准点经 F 观测点测至 B 水准点, 可同时获得 F 和 B 的高程. 一般情况下, 观测时应尽量固定测站位置和测站数, 但在路基填筑期、预压初期随着路堤高度的增大或施工场地的变化, 测站位置和测站数会有所变动. 设第 s 次沉降观

测路线共有 n_s 个测站, 观测点 F 距 A 点 k 个测站, 距 B 点 $n_s - k$ 个测站, 单程测站高差分别为 h_i ($i = 1, n_s$)、中误差为 m_r , 则由 A, B 水准点分别求得观测点 F 高程及其中误差为

$$\begin{cases} H_f' = H_a + \sum_1^k h_i \\ m_{f'} = \sqrt{km_r^2 + m_a^2} = \sqrt{k}m_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H_f'' = H_b - \sum_{k+1}^{n_s} h_i \\ m_{f''} = \sqrt{(n_s - k)m_r^2 + m_b^2} = \sqrt{n_s - k + \zeta_b}m_r \end{cases} \quad (2)$$

式中已令

$$\zeta_b = m_b^2/m_r^2 \quad (3)$$

设 m_r 为单位权中误差, 根据权定义可得

$$\begin{cases} p_{f'} = 1/k \\ p_{f''} = 1/(n_s - k + \zeta_b) \end{cases} \quad (4)$$

顾及通常水准路线闭合差 f_h 的定义, F 点高程最或是值(加权平均值)为

$$H_f = \frac{p_{f'}H_f' + p_{f''}H_f''}{p_{f'} + p_{f''}} = H_f' - f_h \frac{p_{f''}}{p_{f'} + p_{f''}}$$

将式(4)代入上式得

$$H_f = H_f' - \frac{k}{n_s + \zeta_b} f_h \quad (5)$$

式(5)说明, B 水准点误差的影响相当于在 B 端延长了 ζ_b 个测站, 平差后闭合差不能完全被消除。

第 s 次沉降观测的 B 水准点高程中误差为

$$m_{bs} = m_r \sqrt{n_s} \quad (6)$$

由于 B 是稳定的水准点, 为了提高 B 水准点高程精度, 可取前 $s-1$ 次观测值的最或是值, 其中误差为

$$m_b = \frac{m_r}{\sqrt{\sum_{i=1}^{s-1} \frac{1}{n_i}}} = \frac{m_{bs}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{s-1} \frac{n_s}{n_i}}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 并令 $\zeta_b = \zeta_s n_s$, 可得

$$\begin{aligned} \zeta_b &= \frac{m_b^2}{m_r^2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{s-1} \frac{1}{n_i}} \\ \zeta_s &= \frac{\zeta_b}{n_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{s-1} \frac{n_s}{n_i}} \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(8), 式(7)可表示为

$$m_b = \sqrt{\zeta_s} m_{bs} = \sqrt{\zeta_s} m_r \sqrt{n_s} \quad (9)$$

再将式(8)代入式(5), 可得第 s 次观测点高程平差公式为

$$H_f = H_f' - \frac{k}{n_s} \frac{f_h}{1 + \zeta_s} = H_f' - \frac{k}{n_s} \xi_s f_h \quad (10)$$

式(10)中 $\xi_s = 1/(1 + \zeta_s)$ 是考虑 B 水准点误差影响后, 在平差时闭合差 f_h 的折减系数。具体计算时, 只要将闭合差 f_h 乘折减系数 ξ_s 后, 以相反符号按测站数平均分配在所有测站上, 由改正后高差可求得任意点高程最或是值。

2.2 平差后观测点高程的精度

最或是值的权等于各观测值的权之和, 由式(4)得

$$p_f = p_{f'} + p_{f''} = \frac{n_s + \zeta_b}{k(n_s - k + \zeta_b)}$$

上式当 $k = (n_s + \zeta_b)/2$ 时为精度最低的最弱点, 其位置及相应的中误差为

$$k_{\text{最弱点}} = \frac{1 + \zeta_s}{2} n_s = \frac{n_s}{2\xi_s} \quad (11)$$

$$m_{\text{最弱点}} = \frac{m_r}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n_s}{2\xi_s}} = \frac{1}{2\sqrt{\xi_s}} m_r \sqrt{n_s} \quad (12)$$

式(11), (12)说明, 最弱点位于延长后路线的中点, 平差可使最弱点的精度提高 $\sqrt{2}$ 倍。若 $\zeta_b = 0$, 式(10), (12)可退化为通常附合路线的平差公式和精度估算公式。

第一次观测的最弱点即为 B 水准点, 因此在初读数建立后不能立即进行平差, 需要在第二次观测后开始对观测成果进行平差。为了便于分析说明, 现假设每次测站数相同, 最弱点及其中误差随观测次数的变化见表1。随着 B 水准点精度的提高, 路线的最弱点从 $1.0n_s$ 向 $0.5n_s$ 移动, 观测点高程中误差不断减小, 观测精度不断提高。如第6次观测后, 观测精度增幅小于2%, 因此水准点 B 高程可不再作修正, 平差折减系数 ξ_s 取为 $\frac{5}{6}$, 平差后观测精度是支水准路线最弱点 ($n_s/2$ 处) 的1.3倍, 是通常附合路线平差后精度的0.9倍。

表1 拟附合水准路线最弱点及其中误差的变化情况

观测次数 s /次	系数 ξ_s	水准点 B 中误差	闭合差折减系数 ξ_s	最弱点相对位置	最弱点中误差	最弱点精度提高值/%
1		1.00 m_b		1.00	1.00 m_b	
2	1.00	1.00 m_b	0.50	1.00	0.71 m_b	29.29
3	0.50	0.71 m_b	0.67	0.75	0.61 m_b	13.40
4	0.33	0.58 m_b	0.75	0.67	0.58 m_b	5.72
5	0.25	0.50 m_b	0.80	0.63	0.56 m_b	3.18
6	0.20	0.45 m_b	0.83	0.60	0.55 m_b	2.02
∞	0	0	1.00	0.50	0.50 m_b	

2.3 拟附合路线的测量限差

往返测高差较差之限差或通常附合路线闭合差之限差 Δ_1 、单程双测站所测高差较差之限差 Δ_2 以及检测与已测高差较差之限差 Δ_3 等计算公式可参见有关测量规范^[2]。对于拟附合水准路线, 利用式

(6),(9)可得两者较差之限差应为

$$\Delta_4 = 2\sqrt{m_b^2 + m_{b_s}^2} = 2\sqrt{1 + \zeta_s} \sqrt{n_s} m_r$$

式中,当 $s=2$ 时, $\zeta_s = 1$,其较差相当于检测与已测段的较差,此时 $\Delta_4 = \Delta_3$;当 $s \rightarrow \infty$ 时, $\zeta_s = 0$,其较差相当于通常附合路线的较差,此时 $\Delta_4 = \Delta_1$. 为了简便起见, Δ_4 可近似取 Δ_1 和 Δ_3 的平均值:

$$\Delta_4 = (1 + \sqrt{2}) m_r \sqrt{n} \quad (13)$$

对三等水准测量, $m_r = 0.77 \text{ mm}$, 可取 $\Delta_4 = 1.9 \sqrt{n}$.

3 测站固定时沉降增量的精度

在预压期末期、路面施工期,沉降观测时可以做到固定测站,对此种观测路线可假设 A, B 水准点的名义高程为 H_a, H_b , 其真值与名义高程之差分别为 Δ_a, Δ_b , 则第 s 次由 A, B 水准点真值分别求得观测点 F 的高程及其中误差为

$$H'_{f,s} = H_a + \Delta_a + \sum_1^k h_{i,s}, \quad m'_{f,s} = \sqrt{k} m_r$$

$$H''_{f,s} = H_b + \Delta_b + \sum_{k+1}^n h_{i,s}, \quad m''_{f,s} = \sqrt{n-k} m_r$$

两式相减得

$$H'_{f,s} - H''_{f,s} = f_{h,s} + \Delta_a - \Delta_b \quad (14)$$

式中 $f_{h,s}$ 为按水准点名义高程求得的水准路线闭合差. 令 m_r 为单位权中误差, 可得观测点 F 高程最或是值及其中误差为

$$H_{f,s} = H'_{f,s} - \frac{k}{n} f_{h,s} - \frac{k}{n} (\Delta_a - \Delta_b) \quad (15)$$

$$m_{f,s} = m_r \sqrt{k(n-k)/n} \quad (16)$$

在固定测站的水准路线中, 式(15)中等式右边第三项是个未知常量. 同理, 求出第 $s+1$ 次高程后, 可得沉降增量及其中误差为

$$d_{f,s} = H_{f,s} - H_{f,s+1} =$$

$$H'_{f,s} - \frac{k}{n} f_{h,s} - (H'_{f,s+1} - \frac{k}{n} f_{h,s+1}) \quad (17)$$

$$m_{df,s} = \sqrt{2} m_r \sqrt{\frac{k(n-k)}{n}} \quad (18)$$

式(17),(18)说明, 对于固定测站的水准路线, 可根据水准点名义高程按通常附合路线进行平差, 虽然平差后观测点高程误差未知, 但由于水准点误差在不同周期对同一观测点高程的影响是相同的, 求解沉降增量时正好互相抵消, 所以并不影响沉降增量的精度. 由此可见, 固定测站可有效提高沉降增

量的精度.

4 沉降观测线路数

如果某观测周期采用单程观测不能满足施工期沉降增量精度要求, 需要在较短时间内按相同线路观测 r 次, 以求在提高观测精度后满足精度要求, 此处 r 称为观测线路数. 假设单程观测最弱点中误差为 $m_d = \alpha m_r \sqrt{n_s}$, 则观测线路数 r 应满足:

$$\frac{\sqrt{2} m_d}{\sqrt{r}} = \frac{\sqrt{2} \alpha m_r \sqrt{n_s}}{\sqrt{r}} = m_{ds}$$

于是有

$$r = \frac{2\alpha^2 n_s m_r^2}{m_{ds}^2} \quad (19)$$

式中: m_r 为单程测站高差中误差, 三等水准测量取 0.77 mm ; m_{ds} 为各施工期所要求的沉降增量中误差, 在填筑期和预压末期取 2.5 mm , 预压末期和路面施工期取 1.5 mm ; α 取值如下: 支水准路线 $\alpha = 1$, 通常附合水准路线 $\alpha = 1/2$, 拟附合水准路线 α 由式(12)得:

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{\xi_s}} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\sum_{i=1}^{s-1} \frac{n_s}{n_i}}}$$

一般沉降观测时测站数变动不大, 上式可简化为

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_s}{N_s - 1}} \quad (20)$$

式中: N_s 为该周期开始前观测总线路数, 即观测总次数. 不同施工期的观测线路数计算公式见表 2, 并根据计算值进行沉降观测线路数调整, 具体方法可参照 GB50026—93《工程测量规范》的有关规定.

5 结 语

a. 软土地基的沉降速率是沉降动态控制的最主要指标, 因此宜取沉降增量中误差作为观测精度的控制指标. 在不同的施工期采用不同的观测精度, 既可以满足沉降动态控制的需要, 又能适应路基沉降速率和观测条件的变化情况. 分析认为, 在填筑期、预压初期沉降增量中误差可取 2.5 mm , 预压末期和路面施工期可取 1.5 mm .

b. 高速公路工程实践中, 可供使用的水准网精度一般都低于沉降观测的精度要求, 因此不能直接采用通常附合路线的平差方法对观测成果进行平差. 本文提出了随着观测过程修正水准点高程的拟

表 2 各周期的观测线路数

施工期	沉降增量中误差 m_{ds}/mm	观测线路数/次						
		支路线	$N_s = 1, 2$	$N_s = 3$	$N_s = 4$	$N_s = 5$	$N_s = 6$	附合路线
填筑期, 预压初期	2.5	0.190 n_s	0.095 n_s	0.071 n_s	0.063 n_s	0.059 n_s	0.056 n_s	0.048 n_s
预压末期, 路面施工期	1.5	0.527 n_s	0.264 n_s	0.198 n_s	0.176 n_s	0.165 n_s	0.158 n_s	0.132 n_s

注: N_s 为某周期开始前观测总线路数, 即观测总次数; n_s 为路线测站数.

(下转第 50 页)

3.3 隔热体结构设计重点

整个防结露隔热体结构设计重点在于保冷层的计算.在防止保冷层外表面结露的前提下,通过计算确定合理的保冷层厚度及冷量损失,以防止供排水管道及其保冷层外表面结露.

据日本 JISA9501—90 的规定,为减少冷量损失,保冷层厚度是以保冷后表面不结露为原则计算的.按该标准规定,保冷层外表面温度应高于环境露点温度 0.3°C ,这样,比外表面为露点温度的计算厚度约厚 12%.而英国标准(BS)规定比露点温度高 1°F (约为 0.56°C)^[3].

我国幅员辽阔,气象差异悬殊,在其他保冷行业中多采用经济厚度法计算保冷层厚度,再用热平衡方法校核其外表面温度,并至少需高于露点温度 0.3°C ,以减少冷量损失及防止保冷层外表面结露.对于供排水管道由于不考虑冷量损失,则可采用表面温度法计算保冷层的厚度,以达到消除管道外表面结露的目的.

3.4 保冷层的计算

由于保冷结构的防锈层、防潮层、保护层很薄,热阻很小,故以保冷层外表面温度作为保冷结构表面温度.其计算即为防止外表面结露的保冷层厚度计算.

对于防止外表面结露的保冷层厚度计算是按给定的绝热层表面温度来计算绝热层厚度.当管道内表面热阻及金属壁热阻均可忽略时,介质温度与金属壁表面温度一致.在忽略金属保护层绝热的情况下,表面温度即为保冷绝热层的外表面温度.

供排水管道采用的计算公式^[1]如下:

$$\ln \frac{D_0}{D_i} = \frac{2\lambda(t - t_s)}{D_0\alpha(t_s - t_a)}$$
$$\delta = \frac{D_0 - D_i}{2} \quad (5)$$

式中: t, t_a, t_s 分别为供水管道外表面、环境、外表面露点温度, $^{\circ}\text{C}$; δ 为绝热层厚度, m ; α 为绝热层外表面面向大气的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; D_0 为绝热层外直

径, m ; D_i 为绝热层内直径, m ; 或多层或复合绝热层第 i 层外直径, m ; λ 为绝热层材料制品的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

3.5 保冷层计算的校核

在保冷层厚度计算完毕后,要校核供排水管道在保冷后的热扩散损失及实际的保冷层外表面的温度.

a. 圆筒面保温后的散热损失 q .

$$q = \frac{t - t_a}{R_i + R_s} = \frac{2\pi(t - t_a)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D_0}{D_i} + \frac{2}{\alpha D_0}} = \alpha D_0 \pi (t - t_a) \quad (6)$$

式中: R_i 为绝热层热阻, 圆筒: $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$; R_s 为绝热层表面热阻, 圆筒: $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$; δ_i 为第 i 层绝热层厚度, m ; q 为单位表面热损失量, 圆筒: W/m ; D_{i-1} 为多层或复合绝热层第 $i-1$ 层内直径, m ; λ_i 为多层或复合绝热层第 i 层材料制品的热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

b. 管道表面温度计算.根据圆筒面保温后的散热损失 q , 得:

$$t_s = \frac{q}{\pi D_0 \alpha} + t_a$$

或

$$t_s = t - \left(\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D_0}{D_i} \right) q / \pi \quad (7)$$

4 结 语

对于电站供排水管道的结露现象处理,可以采用对管道外壁施加隔热保冷层的措施.而保冷层厚度 α 的计算则可用式(5)来确定并用式(7)校核,以确保供排水管道外壁表面温度高于环境的露点温度,从而达到清除管道结露的目的.

参考文献:

- [1] 夏雅君.隔热技术[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [2] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1989.
- [3] 王巧云.设备及管道绝热应用技术手册[M].北京:中国标准出版社,1998.

(收稿日期:2002-12-25 编辑:张志琴)

(上接第 45 页)附合水准路线及其平差方法,可以在有限的条件下尽量提高观测精度.

c. 高速公路沉降观测测站的技术要求应符合三等水准测量要求,可以提高观测精度而不显著增加工作量,在经济上是合理的.在沉降观测过程中,应根据实际情况采用支水准路线或拟附合水准路线观测,应依据不同施工工期精度要求灵活确定观测线路数,力求做到技术可行和经济合理.

d. 累计沉降量的观测精度随着初读数的次数

增多而降低,因此观测过程中应采取有效措施防止或减少观测点破坏的发生.现场条件允许时应尽量固定测站,以便于消除水准网精度对沉降增量的影响,可有效地提高沉降增量的观测精度.

参考文献:

- [1] JTJ 017—96,公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].
- [2] JGJ/T 8—97,建筑变形测量规程[S].

(收稿日期:2002-12-25 编辑:张志琴)