

深基坑水平位移监测方法的分析与比较

胡园园¹, 黄广龙¹, 史瑞旭²

(¹ 南京工业大学 交通学院, 江苏 南京 210009; ² 江苏今迈工程勘察有限公司, 江苏 南京 210005)

摘要 在深基坑开挖的施工过程中, 采用何种方法进行水平位移监测, 既能够保证精度, 又可节省成本, 是基坑施工监测的关键问题之一。本文讨论了四种常用的支护结构顶部水平位移监测方法, 并将轴线法、单站改正法、前方交会法与测小角法进行精度比较, 得出: 测小角法与其他方法相比, 计算简单、操作方便、监测精度较高, 是目前基坑监测中运用较广泛的一种方法。

关键词 深基坑 水平位移监测 轴线法 测小角法 单站改正法 前方交会法

中图分类号: TU196 文献标识码: B 文章编号: 1672-4097(2012)01-0040-05

支护结构水平位移监测通常是测量基坑边线沿垂直于基坑边的方向的水平位移。如何根据基坑形状、施工现场条件等选择水平位移监测方法具有重要的现实意义。有关这方面的研究成果比较多, 熊春宝等介绍了基坑水平位移监测的四种方法: 视准线法、小角度法、极坐标法和前方交会法^[1]; 刘宝俊介绍了一种不用精确对中的测站设置方法——随机测站观测法^[2]; 王源、潘庆林等研究了一种基于导线测量原理的简易方法, 只需设站一次, 先测出站点的坐标, 再由支导线法测定位移变形观测点的坐标, 两期坐标差即为水平位移量^[3]; 徐建新提出了动点小角法的监测方法^[4]; 寇刚介绍了一种将小角法改进的适合于困难条件下基坑水平位移的监测方法^[5]。

传统的基坑水平位移监测, 一般是采用经纬仪进行观测。近年来, 随着仪器设备的发展, 基坑水平位移监测方法也越来越先进。林泽耿介绍了一种利用全站仪自由设站的观测方法, 该方法克服了视准线法在基坑周围环境恶劣而不能设置基准点的缺点^[6]; 吴华平随后提出了全站仪直接坐标法^[7]。

如上所述, 基坑水平位移监测方法很多, 精度高低也不相同, 但实际工程中量测方法的精度是人们普遍关心的问题, 能够达到合适的精度是保证施工安全的重要条件, 所以开展相关的研究很重要。本文主要对轴线法、测小角法、前方交会法、单站改正法四种水平位移监测方法进行精度分析, 并通过实际应用验证结果。从而为基坑水平位移监测提供科学、正确的参考依据。

1 几种水平位移监测方法

1.1 轴线法

沿基坑的一条直线边建一条轴线并在直线边上布设水平位移点, 如图 1 所示: 点 A、B 是轴线的两个

基准点(端点), 1、2、3...、n 为水平位移监测点。轴线法不需测角也不需测距, 只需将轴线用经纬仪投射到位移点的旁边, 并用小钢尺等工具分别量取水平位移监测点 1、2、3...、n 至 A-B 这条轴线的距离。通过两次偏距的比较来计算水平位移量 Δd 。

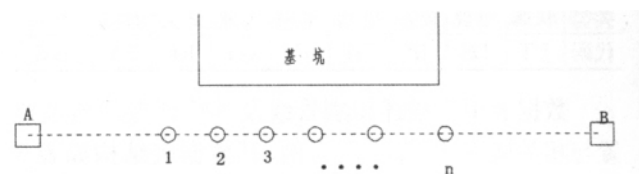


图 1 轴线法

所量取的偏距的精度主要受仪器对中误差 m_1 、轴线照准误差 m_2 、读数照准误差 m_3 、大气折光影响 m_4 的综合影响, 其位移量精度估算公式:

$$m_{\Delta d} = \sqrt{2m_d} = \pm \sqrt{2(m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2)} \quad (1)$$

式中:

m_d —量取一次偏距的中误差;

$m_{\Delta d}$ —水平位移量的中误差。

1.2 测小角法

小角度法与轴线法相类似, 亦是沿基坑的每一直线边建立一条轴线即一个固定方向, 通过测轴线即固定方向与测站至位移点方向的夹角即小角度 α , 并测得测站至位移点的距离 D , 从而计算出位移点离轴线的偏距^[1]:

$$d = D \cdot \frac{\alpha}{\rho} \quad (2)$$

式中:

D —工作基点 A 至观测点 P 的距离(m);

ρ —常数 206265'';

α —基准线与测站到观测点视线之间的夹角(°)。

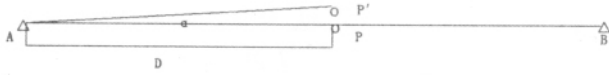


图 2 测小角法

由小角法的观测原理可知,水平位移观测精度受距离 D 和水平角 α 的观测误差的影响,由于 D 经一次观测后可作为固定值,水平位移观测精度可认为仅与测角精度有关,其观测中误差 $m_{\Delta l}$ 可按照公式(3)计算:

$$m_{\Delta l} = \sqrt{2}D \cdot \frac{m_{\alpha}}{\rho} \quad (3)$$

1.3 单站改正法

测小角法虽然操作方便,计算简单,但有时基坑周围没有足够的空间布置视准线,而在基坑附近建立基准点,则由于基准点位移比较大,会引起观测结果出现较大的偏差。

因此为保证测量精度,尽可能减少内、外业工作量,在此提出将测小角法改进并结合观测点设站法使用的方法。这种方法只需仪器一次设站加改正值就可完成数个位移观测点的位移量计算,解决了位移观测点无法设站的问题,故把这种方法称作单站改正法^[8]。测小角法中分段观测法可以视为简单的单站改正法。

如图 3 所示: A 、 B 两标志设在稳定的墙面上。每次监测时,先要测量 $\angle APB$ 角的变化量,求得 P 点的横向位移量,再测量 $\angle APi$ 角的变化量,从而求得观测点 i 的横向位移量^[9]。

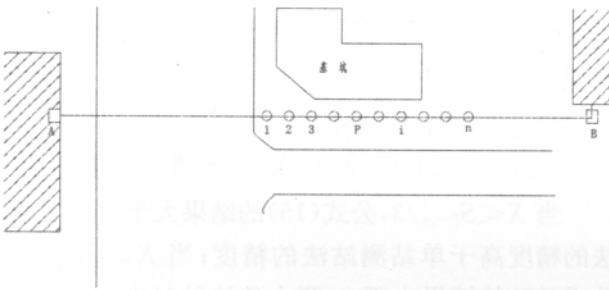


图 3 单站改正法

经过改正后,1、2、3、 i 各点的位移量

$$\begin{cases} \Delta P = -\frac{S_{P-A}S_{P-B}}{S_{P-A}+S_{P-B}} \cdot \frac{\Delta\beta_p}{\rho} \\ \Delta 1 = -\frac{S_{P-1}}{\rho} \Delta\beta_1 + \left(1 + \frac{S_{P-1}}{S_{P-A}}\right) \Delta P \\ \Delta 2 = -\frac{S_{P-2}}{\rho} \Delta\beta_2 + \left(1 + \frac{S_{P-2}}{S_{P-A}}\right) \Delta P \\ \dots\dots \\ \Delta i = -\frac{S_{P-i}}{\rho} \Delta\beta_i + \left(1 + \frac{S_{P-i}}{S_{P-A}}\right) \Delta P \\ \Delta n = -\frac{S_{P-n}}{\rho} \Delta\beta_n + \left(1 - \frac{S_{P-n}}{S_{P-A}}\right) \Delta P \end{cases} \quad (4)$$

式中:

S_{P-A} —测站点 P 至工作基点 A 的距离(m);

S_{P-B} —测站点 P 至工作基点 B 的距离(m);

S_{P-1} —测站点 P 至待测点 1 的距离(m);

S_{P-2} —测站点 P 至待测点 2 的距离(m);

以此类推; S_{P-i} 表示测站点 P 至待测点 i 的距离(m)。

对于每一个施工区,在测站和位移点设定后,就可求得各点之间的大致距离,水平边长 S_i 的测量误差对 Δi 的影响甚微,可略去不计。而且可以采用高精度的仪器(例如全站仪)多次观测边长,利用平差求得距离的最或然值。从而可事先算得各点系数,以后只要角度变化 $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$,即可算得位移量。其中: β_1 —上次量测的角度, β_2 —本次量测的角度。水平位移的符号相对基坑而言:向内为正,向外为负^[9]。

令常数 $-\frac{S_{P-A}S_{P-B}}{S_{P-A}+S_{P-B}} \cdot \frac{1}{\rho} = A$, 则根据误差传播定律可得:

$$m_{\Delta P}^2 = A^2 m_{\Delta\beta}^2 \quad (5)$$

令 $-\frac{S_{P-1}}{\rho} = A_1$, $(1 - \frac{S_{P-1}}{S_{P-A}}) = B_1$, 则有:

$$m_{\Delta 1}^2 = A_1^2 m_{\Delta\beta}^2 + B_1^2 = m_{\Delta P}^2 \quad (6)$$

同理可得:

$$m_{\Delta i}^2 = A_i^2 m_{\Delta\beta}^2 + B_i^2 = m_{\Delta P}^2 \quad (7)$$

1.4 前方交会法

前方交会法是在距基坑一定距离的稳定地段设置一条交会基线,或者设两个或多个工作基点,以此为基准,用交会法测出各测点的位移量^[10]。

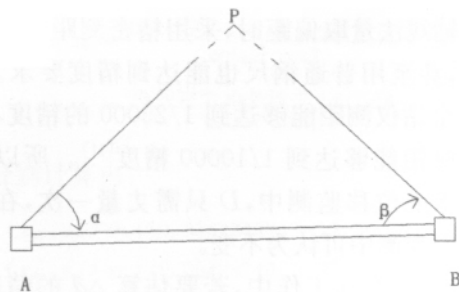


图 4 前方交会法

如图 4 所示, A 、 B 为平面基准点, P 为变形点,由于 A 、 B 的坐标为已知,在观测了水平角 α 、 β 后,即可求算 P 点的坐标。对于不同周期, P 点纵横坐标变化量,就是 P 点的水平位移,并可计算其位移的方向。 P 点坐标 (x_p, y_p) 可按(8)式计算:

$$x_p = \frac{x_A \cot\beta + x_B \cot\alpha - y_A + y_B}{\cot\alpha + \cot\beta} \quad \frac{60}{v \cdot s} \quad (13)$$

$$y_p = \frac{y_A \cot\beta + y_B \cot\alpha + x_A - x_B}{\cot\alpha + \cot\beta} \quad (8)$$

点位中误差的估算公式为:

$$m_p = \frac{m_\beta D \sqrt{\sin^2\alpha + \sin^2\beta}}{\rho \sin^2(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

式中 m_β —测角中误差(");

D —两已知点间的距离(m)。

2 精度比较

2.1 轴线法与测小角法的精度比较

由公式(1)可知:轴线法所量取的偏距的精度主要受仪器对中误差 m_1 、轴线照准误差 m_2 、读数照准误差 m_3 、大气折光影响 m_4 的综合影响。由于经纬仪或者全站仪都可以固定在设有强制对中仪器的观测点上,仪器对中误差可控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 之内,此项误差在角度观测中和长距离观测中可以忽略不计;同时每次观测环境(同人、同仪、同方法及定方向等)几乎完全相同,如地球曲率等的影响就可完全抵消,不予考虑^[5]。所以主要的误差来源是轴线照准误差和读数照准误差。因此可以将公式(1)简化为:

$$m_{\Delta d} = \pm 2 \frac{60}{v \cdot \rho} \cdot D \quad (10)$$

而测小角法中,其观测点的位移量如式(2)所示,将其转换成中误差形式:

$$m_{\Delta d}^2 = \frac{D^2}{\rho^2} m_{\Delta\beta}^2 + \frac{\Delta\beta^2}{\rho^2} m_D^2 \quad (11)$$

式中, m_D 是距离 D 的中误差, $m_{\Delta\beta}$ 是小角 $\Delta\beta$ 中误差。

而轴线法量取偏距时,采用精密测距仪量测一次即可,甚至用普通钢尺也能达到精度要求。 $2 + 2\mu\text{m}$ 的全站仪测距能够达到 $1/25000$ 的精度,钢尺的精密量距能够达到 $1/10000$ 精度^[11]。所以在测小角法水平位移监测中, D 只需丈量一次,在以后的各周期观测中可认为不变。

因此,在实际工作中,若要估算 Δd 的精度,则可以忽略测距误差影响,因此位移量精度的估算公式变为如公式(3)所示。

将公式(10)与公式(3)相除可得:

$$\frac{\sqrt{2} \cdot 60}{v \cdot m_e} \quad (12)$$

进一步将公式(12)简化,可得:

式中:

S —仪器测角精度(")

经纬仪放大镜倍率一般为 $30x$,从公式(13)可知:当测角精度大于 $2''$,结果小于 1,即在忽略了轴线法中的对中误差及大气折光影响后,同等条件下,测小角法比轴线法精度略低;当测角精度小于等于 $2''$,结果大于等于 1,即测小角法精度高于轴线法。

轴线法操作方便,成本低,在基坑等级要求不高的情况下,使用较为广泛。

2.2 测小角法与单站改正法的精度比较

单站改正法是对测小角法的改进,同时兼有测小角法和观测站设点法的优点,不仅能在困难环境下使用此方法,而且也能保证精度。

首先就单站改正法的测站点精度进行比较,一般而言,设站点 P 架设在基点 A 、 B 中间,即 $S_{P-A} = S_{P-B}$ 。为了便于比较,令 $D = S_{P-A} = S_{P-B} = X$,将公式(5)与公式(3)相减,可得:

$$[(X/2)^2 - 2X^2] \frac{m^2 \Delta\beta}{\rho^2} \quad (14)$$

显然公式(14)结果小于 0,即用测小角法测量的测站点精度略低。

根据单站改正法的精度公式(5)、(6)、(7),并且以图 3 中的 1 点为例与测小角法进行比较。

将公式(6)与公式(3)相减,并令 $S_{P-A} = S_{P-B}$, $D = S_{P-1} = X$,可得:

$$\frac{(S_{P-1A} - 3X)(S_{P-1A} + X)}{4} \cdot \frac{m^2 \Delta\beta}{\rho^2} \quad (15)$$

当 $X < S_{P-A}/3$,公式(15)的结果大于 0,测小角法的精度高于单站测站法的精度;当 $X > S_{P-A}/3$,公式(15)的结果小于 0,测小角法的精度低于单站测站法的精度。

由分析可知,单站改正法特别适用于观测点较多,点距较远,且变形方向一致的位移变形测量。

2.3 前方交会法与测小角法的精度比较

目前水平位移监测中广泛采用的前方交会法,即先求出观测点的坐标,后求出其相对位移量,这是一种间接的方法。要提高位移量的测定精度,就必须提高测定坐标的精度。相对来说,测小角量测方法更加直接。

上节中提到基线长对测小角法精度可以忽略不计,位移量精度公式直接采用式(3),这里就不再

详述。而对于前方交会法,其水平位移点的精度如式(9), m_p 主要与测角误差 m , 交会角 $\gamma(\gamma=180^\circ - (\alpha+\beta))$ 、 α 、 β 及基线 D 有关。但考虑到点位位移为两次坐标之差,因此,式(9)需要变化为:

$$m_{\Delta d} = \sqrt{2} \frac{m_{\beta} D \sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}}{\rho \sin^2 (\alpha + \beta)} \quad (16)$$

现将公式(16)与公式(3)相除可得:

$$\frac{m_{\beta}}{m_{\alpha}} \cdot \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}}{\sin^2 (\alpha + \beta)} \quad (17)$$

由于采用同人、同仪器的方法观测,有 $m_{\beta} = m_{\alpha}$,故公式(17)可简化为:

$$\frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta}}{\sin^2 (\alpha + \beta)} \quad (18)$$

我们取 $\alpha = \beta$ 的特殊情况来讨论前方交会法位移精度与 γ 角的关系。当 $\gamma = 90^\circ$ 时,公式(18)的结果等于 1,即前方交会法与测小角法精度相当;当 $\gamma > 90^\circ$ 时,公式(18)的结果大于 1,测小角法精度比前方交会法精度高,前方交会法位移值误差在平行于基线方向误差增大;当 $\gamma < 90^\circ$ 时,公式(18)的结果大于 1,测小角法精度比前方交会法精度高,前方交会法位移值误差在垂直于基线方向误差增大^[12]。

由分析可知,前方交会法在最理想的情况下可与测小角法保持同等的精度,但是实际环境并不始终存在理想的交会图形,当 $\gamma > 90^\circ$ 或者 $\gamma < 90^\circ$ 时,前方交会法的误差不可避免的会随着图形的改变而增大。因此,测小角法比前方交会法优越。

当然在基坑形状不规则,无法布置视准线时,小角法也就不适用了,此时可以采用前方交会法。

3 实际应用

基于上章已对四种方法进行比较,为了验证其结果,在室内进行了检验测量。下面四个实验均采用型号 Topcon GTS-336,测角精度为 $6''$ 的全站仪进行观测。

3.1 轴线法

采用全站仪将视线投射到位移点的旁边,然后采用毫米刻划的钢尺量取偏距。两次量取的距离分别为 $d_1 = 4.5 \text{ mm}$, $d_2 = 2.3 \text{ mm}$,则水平位移量 $\Delta d = 2.2 \text{ mm}$ 。

Topcon GTS-336 全站仪的望远镜的放大倍率为 $30x$,测得的距离 D 为 15.345 m ,采用公式(10)进行简化计算,可得: $m_{\Delta d} = 0.30 \text{ mm}$ 。

3.2 测小角法

结合图 2 所示,用全站仪观测出:

$$S_{AP} = 14.370 \text{ m} \\ \alpha_1 = 2^\circ 54' 55'', \alpha_2 = 2^\circ 55' 15''$$

采用公式:

$$\Delta d = D \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\rho} \quad (13)$$

计算出两次偏距之差,即水平位移量 $\Delta_d = 1.39 \text{ mm}$ 。观测中误差 $m_{\Delta d}$ 可按照公式(3)计算,式中 $D = S_{AP} = 14.370$, $P = 206265''$, $m_{\alpha} = 6''$

则有: $m_{\Delta d} = 0.59 \text{ mm}$ 。

3.3 单站改正法

为了简化实验,在单站改正法中只检验点 P 的水平位移量及精度。结合图 3 所示,采用全站仪观测得:

$$\angle APB_1 = 179^\circ 07' 41'', \angle APB_2 = 179^\circ 07' 23'' \\ S_{P-A} = 15.651 \text{ m} \\ S_{P-B} = 15.484 \text{ m}$$

采用公式(4)中的第一个公式计算 P 的水平位移量,其中 Δ_{BP} 为 $\angle APB$ 的两次观测结果之差,则 $\Delta P = 0.68 \text{ mm}$ 。

根据公式(5)可得出: $m_{\Delta P} = 0.23 \text{ mm}$

3.4 前方交会法

结合图 4,以基准点 A 、 B 两点所在的直线为 x 轴,则 A 、 B 两点的坐标为: $A(1, 0)$ $B(16.360, 0)$,则用全站仪观测的数据如下:

$$\alpha : \angle BAP_1 = 62^\circ 13' 58'', \angle BAP_2 = 62^\circ 13' 34'' \\ \beta : \angle ABP_1 = 69^\circ 52' 22'', \angle ABP_2 = 69^\circ 52' 40'' \\ D : S_{AB} = 15.360 \text{ m}$$

根据公式:

$$x_p = \frac{x_A \cot \beta + x_B \cot \alpha - y_A + y_B}{\cot \alpha + \cot \beta} \\ y_p = \frac{y_A \cot \beta + y_B \cot \alpha + x_A - x_B}{\cot \alpha + \cot \beta}$$

分别计算出:

$$(x_{p1}, y_{p1}) = (10.05623463, -17.20052168) \\ (x_{p2}, y_{p2}) = (10.05828749, -17.19956568)$$

因此可以得出,

$$\Delta X = 2.052859 \text{ mm} \\ \Delta Y = 0.955996 \text{ mm}$$

即其水平位移量 $\Delta_d = 2.26 \text{ mm}$

将数据代入公式(9)可得: $m_p = 1.51 \text{ mm}$

为便于比较,将四种监测方法的水平位移量及

点位精度列于表 1 中。

表 1 水平位移量及点位精度一览表

监测方法	水平位移量 $\Delta d(\text{mm})$	中误差 (mm)
轴线法	2.2	0.3
测小角法	1.39	0.59
单站改正法	0.68	0.23
前方交会法	2.26	1.51

从表 1 中可知,室内检验测量的结果与理论分析一致:单站改正法的优势比较明显,水平位移量小,监测精度高;测小角法其次,如果考虑成本、工期等,单站改正法不如测小角法简单方便;轴线法水平位移量较大,但是中误差小于测小角法,主要是因为室内测量时,外界环境因素(风、大气折光等)可以忽略不计,但是使用轴线法测量水平位移精度,影响因素众多,误差均不易定量计算,而且检核条件少,一般精度要求较高的工程不宜采用;前方交会法不仅操作繁琐,精度也不如测小角法高。

4 结 论

(1) 当仪器测角精度不高时,使用测小角法监测的位移点误差变大,此时忽略环境因素,轴线法优于测小角法,因此需要根据仪器设备及工程环境选择测量方法。

(2) 单站改正法是对测角法的改进,比小角法更能保证精度,适用于较复杂的施工环境,但如果环境允许,考虑到成本等因素,采用测小角法更加合适。

(3) 使用前方交会法,要求较多,图形条件就是首先要考虑的问题,如果交会角布置得不好,精度不能保证,另外操作复杂,需要两次后视,在量测过

程中费时、费力。当然在基坑形状不适合布置视准线时,轴线法与测小角法不能实行的情况下,前方交会法是不错的选择。

总之,无论采用哪种方法,能否达到精度要求是先决条件,在此基础上考虑人力,物力因素,力求做到最经济。

参考文献

- 熊春宝,潘延玲,岳树信. 基坑水平位移监测的方法比较与精度分析[J]. 城市勘察. 1996(4):15-22.
- 刘宝骏. 水平位移基准线随机测站观察法[J]. 工程勘察. 1998(2):54-57,53.
- 王源,刘建永等. 简易导线法在基坑水平位移监测中的应用研究[J]. 工程勘察. 1999(4):50-54.
- 徐建新,张兵良,杨伯宏. 小角法在深基坑支护监测中的应用研究. 现代测绘, 2002(S1):147-149.
- 寇刚,姚连璧. 基坑水平位移监测方法的探讨[J]. 地矿测绘. 2002,18(4):13-15.
- 林泽耿. 自由设站法监测基坑水平位移[J]. 广州建筑. 2003(2):36-38.
- 吴华平. 基坑变形监测方法及误差分析[J]. 建筑安全. 2008(9):33-35.
- 黄北华. 单站改正法在位移测量中的应用[J]. 浙江水利科技. 1999(S1):74-76.
- 夏才初,潘国荣. 土木工程监测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- 伊晓东,李保平. 变形监测技术及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2007.
- 龙四春,杨命青等. 两种实用的水平位移观测方法及其精度分析[J]. 测绘与空间地理信息. 2005,28(5):63-65.
- 华锡生,田林亚. 安全监测原理与方法[M]. 南京:河海大学出版社,2007.

Monitoring Methods and Accuracy Analysis of Horizontal Displacement of Deep Foundation

HU Yuan-yuan¹, HUANG Guang-long¹, SHI Rui-xu²

⁽¹⁾ College of communication, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China;

⁽²⁾ Jiangsu Jinmai Engineering Investigation Co., Ltd, Nanjing Jiangsu 210005, China)

Abstract During the excavation of deep foundation pit, which method we can adopt to monitor the horizontal displacement, that can not only ensure accuracy, but also cut costs, is a key issue to the foundation for the construction monitoring. This paper analysed four methods that are commonly used to monitor horizontal displacement of the top of supporting structure, the axis method, single-point correction method, forward intersection method were compared with small-angle measurement method, and that: small-angle measurement method has a simple calculation and a convenient operation and a high accuracy of monitoring, and is wider used in excavation monitoring.

Key words deep foundation pit; horizontal displacement monitoring; axis method; small-angle measurement method; single-station method to correct; forward intersection method