

等效法收敛计变形监测

杨 浩

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

Equivalent Method of Convergence Gauge Deformation Monitoring

YANG Hao

摘要:等效法收敛计变形监测,用以等效代替用收敛计直接量距方法所进行的高空变形监测作业带来的高风险和高代价问题,实现变高空高风险作业为无危险的地面安全作业,可降低工程造价,节省人力、物力和财力。还推荐一种简单易行的特征边组成功方法,使得监测工作安全方便且投资小,需要增加的主要辅助设备仅是一些普通细钢丝和一根伸缩杆,基本上实现一人独立作业。

关键词:收敛计; 断面; 大型隧道围岩收敛变形监测; 等效三角形; 偶基点; 特征边

一、引言

使用收敛计的变形监测,目前采取的主要方法是直接量距法,即观测者手持收敛计,先将收敛计钢尺挂钩挂到一个监测点上,再将收敛计的挂钩挂到另一个监测点上或基准点上,然后观测两点之间的位移情况。

目前大多使用的是电子收敛计,精度很高,以基康 GK-1610 型钢尺收敛计为例,其一次观测精度可以达到 $\pm 0.3 \text{ mm}$,甚至更高,是迄今为止最精确的简单测距设备之一。但是,这种设备的实际使用受到以下限制:

1) 高空作业存在的高风险问题。对于处于高空的监测点,采用直接量距法需要将收敛计和钢尺端的挂钩挂到高空处的监测点上进行观测,由于监测工作是一项长期的反复性工作,因此,经常进行高空作业非常危险。如果出动大量人力或使用大量财力进行各种防护措施勉强开展高空监测工作,由此带来的高代价也是一般工程经费所难以承受的,所以不能充分发挥这一廉价高效的高精度量距设备的作用。

2) 对于水平位移来说,直接量距法只能监测两个点之间的相对水平位移,无法知道两点各自的实际水平位移变化情况。例如对于隧道围岩收敛变形监测来说,只能依据随机介质理论,假设隧道断面的收敛变形是在均匀发生的条件下开展监测工作,即两洞壁或两拱脚等高对称两点的水平位移量是相等的。

3) 直接量距法监测一个点的垂直位移时需要

在监测点垂直投影到地面上的地方建立一个固定标志点,由于位置选择唯一,所以往往易受诸多施工因素影响和破坏而无法进行周期性的垂直位移监测工作。

二、解决方案

1. 等效三角形和偶基点

如图 1 所示,由一个监测点 j 和基点 i 为斜边构成的直角三角形称为等效三角形,其直角在斜边的下方,其斜边称为特征边,另外两条边分别称为垂直直角边和水平直角边。因此,等效三角形由特征边、垂直直角边和水平直角边组成。由等效三角形所决定的面是一个垂直面,该面垂直于过该面处的隧道中心线(洞轴线)。

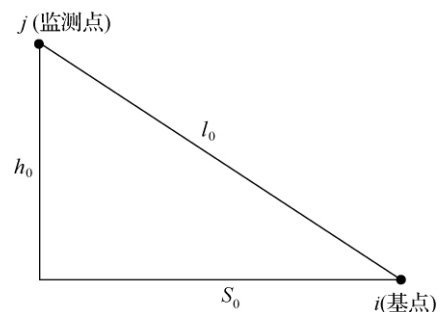


图 1 等效三角形示意图

收敛监测时,用收敛计观测到的特征边变化量通过等效三角形关系换算为监测点的水平位移或垂直位移。在开始变形监测工作之前,等效三角形特征边的长度及其两条直角边或其中之一必须事

收稿日期: 2010-12-16

作者简介: 杨浩(1957—),男,河南孟津人,高级工程师,主要从事航空摄影测量与工程测量及计算机软件研发工作。

先较精确地测出初始值。一般情况下初始值在监测期间不需要观测,后次监测中只观测特征边。特征边的长度应该是其两端挂钩接触点之间的距离。等效法所监测的位移是指被监测点在等效三角形垂直面内发生的垂直位移、水平位移和实际位移。

挂收敛计的点称为基点,基点一般选在稳定的不易受干扰的近地面处或地面上,使得人站在地面上就可以很方便地操作收敛计进行监测作业,但由于有时基点也可能会存在微小的位移,当其位移量达到不可忽略的程度时,则应该对它们进行观测,为了观测两个等高基点之间的相对水平位移而建立的两个基点称为偶基点。偶基点之间的相对水平位移是人工能够在非高空作业条件下使用收敛计直接量距得到的。建立偶基点的概念,是为了当基点存在位移时,能够对由它引起的相关高空点的位移误差进行改正。对于隧道工程而言,偶基点是位于隧道两臂上的对称等高点,其连线垂直于洞轴线。将观测得到的偶基点之间的相对水平位移各分一半给两个基点。

2. 水平位移监测

将隧道断面围岩收敛变形监测工作中朝向隧道中心方向的位移定为正值,所以由于监测点的位移所引起特征边的变化量 Δl 为

$$\Delta l = l_0 - l \quad (\Delta l \geq 0)$$

式中 l_0 为特征边的初始值; l 为该特征边的后次观测值。

(1) 水平位移的基本公式

由图2的几何关系可以看出,监测点的水平位移为

$$x = \sqrt{l_0^2 - h_0^2} - \sqrt{l^2 - h_0^2} - d \quad (1)$$

式中 x 为水平位移; h_0 为垂直直角边; d 为基点的水平位移。若偶基点之间存在相对水平位移,则 d 取其之半;若基点稳定,则 $d = 0$ 。

对式(1)求全微分并转换为中误差方程得水平位移中误差估计式为

$$m_x = \pm \frac{1}{s_0} \sqrt{[s_0 \Delta l - l_0(x+d)]^2 m_0^2 + h_0^2(x+d)^2 m_{h_0}^2 + s_0^2 l_0^2 m_{\Delta l}^2 + s_0^4 m_d^2} \quad (2)$$

$$x = \frac{\sqrt{l_0^2 - h_0^2} - d + h_0 \tan \theta - \sqrt{(1 + \tan^2 \theta) l^2 - [(\sqrt{l_0^2 - h_0^2} - d) \tan \theta - h_0]^2}}{1 + \tan^2 \theta} \quad (5)$$

求得 x 以后,还可以求出实际位移量 x' ,即

$$x' = x / \cos \theta \quad (6)$$

式中 Δl 可通过给定的水平位移 x 求出, $\Delta l = l_0 - \sqrt{h_0^2 + (s_0 - d - x)^2}$; s_0 为水平直角边; m_{l_0} 为 l_0 的中误差; m_{h_0} 为 h_0 的中误差; $m_{\Delta l}$ 为 Δl 的中误差,它是影响 m_x 的主项。当 l_0 与 l 精度相同时,则 $m_{\Delta l} = \sqrt{2} m_l$ (m_l 为收敛计一次观测中误差),若 l_0 的误差可以忽略不计时,则 $m_{\Delta l} = m_l$ 。

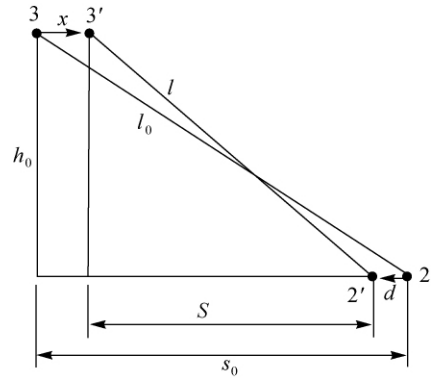


图2 水平位移示意图

m_d 为 d 的中误差,如果基点稳定,则 $m_d = 0$;否则,设偶基点之间的相对水平位移为 Δl ,则 $d = \Delta l / 2$,当偶基点之间特征边的初始值和后次观测值精度相同时,则 $m_d = m_l / \sqrt{2}$ 。

如果 m_{l_0} 和 m_{h_0} 对水平位移 x 的影响可以达到忽略不计的程度,则

$$m_x = \pm \frac{1}{s_0} \sqrt{l_0^2 m_{\Delta l}^2 + s_0^2 m_d^2} \quad (3)$$

如果基点稳定,并设 $\lambda_s = l_0 / s_0$,则

$$m_x = \lambda_s m_{\Delta l} \quad (4)$$

(2) 带倾斜角 θ 的监测点的水平位移计算方法
有些情况下,点位可能是沿着在其垂直面内与水平方向成一定倾斜角 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) 的实际方向存在位移的,这时为了得到水平位移分量 x ,则可以按下述方法进行,由图3的几何关系可以看出

$$x = \sqrt{l_0^2 - h_0^2} - \sqrt{l^2 - h_0^2} - d, \quad h = h_0 - y$$

$$y = x \tan \theta, \quad h = h_0 - x \tan \theta$$

综合以上各式得 x 与 θ 角的关系方程为

$$x = \sqrt{l_0^2 - h_0^2} - \sqrt{l^2 - (h_0 - x \tan \theta)^2} - d$$

式中 x' 为实际位移量; y 为垂直位移分量。

解方程得

而 θ 角中误差 m_θ 引起水平位移的中误差为

$$m_x = \left| h_0 - \frac{(l_0^2 - S^2) \tan \theta + S h_0}{(S' + h_0 \tan \theta) - x(1 + \tan^2 \theta)} - 2x \tan \theta \right| m_\theta \quad (7)$$

式中 $S' = \sqrt{l_0^2 - h_0^2} - d$; m_θ 的单位为弧度。

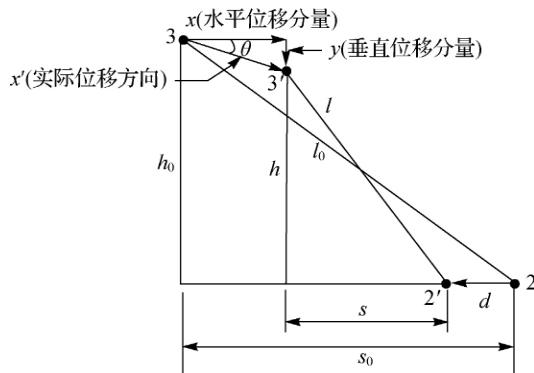


图 3 带倾斜角 θ 的水平位移示意图

对水平位移影响的主要项是 $m_{\Delta l}$ 和 m_d , 由此可得水平位移中误差为

$$m_x = \pm \frac{1}{(S' + h_0 \tan \theta) - (1 + \tan^2 \theta) x} \sqrt{l_0^2 m_{\Delta l}^2 + S^2 m_d^2} \quad (8)$$

如果基点稳定, 则

$$m_x = \frac{l_0}{(S' + h_0 \tan \theta) - (1 + \tan^2 \theta) x} m_{\Delta l} \quad (9)$$

在式 (7) 中, 令 $\theta = 0^\circ$ 得

$$m_x = \left| \frac{x h_0}{s' - x} \right| m_\theta \quad (10)$$

这就是在两个拱脚建立监测点时, 如果点位建立得靠近拱弧部分而导致有倾斜角误差产生时对水平位移的影响估计式, 估算时可以将 x 用预计的最大值代入计算。另外, 由式 (5) 和式 (6) 可得

$$x' = \cos \theta S' + h_0 \sin \theta - \sqrt{l^2 - (S' \sin \theta - \cos \theta h_0)^2}$$

对 θ 求微分得

$$dx' = \left[-\sin \theta S' + h_0 \cos \theta + \frac{(S' \sin \theta - \cos \theta h_0)(S' \cos \theta + \sin \theta h_0)}{\cos \theta S' + h_0 \sin \theta - x'} \right] d\theta$$

将系数中用 $\theta = 90^\circ$ 代入得 $dx' = \frac{x' s'}{h_0 - x'} d\theta$ 转换为中误差式得

$$m_{x'} = \left| \frac{x' s'}{h_0 - x'} \right| m_\theta \quad (11)$$

这就是在正洞顶建立监测点时, 若点位偏向拱弧方而导致有倾斜角误差时对垂直位移的影响估计式, 估算时可将 x' 用预计最大值代入计算。倾斜

角误差越大对位移的影响越大, 且位移越大对自身的误差影响也越大。

3. 垂直位移监测

(1) 间接法求垂直位移

如果给出一个很小的正数 $\varepsilon = 0.0011^\circ$, 使 θ 左接近 90° , 即令 $\theta = (90 - \varepsilon)^\circ$, 让 $\tan \theta$ 既存在又能保证计算精度, 这样式 (5) 和式 (6) 可成为垂直位移 x' 的计算方法之一。先用式 (5) 计算出 x , 再用式 (6) 计算出 x' 。

(2) 直接法求垂直位移

监测点的垂直位移计算公式可用下述方法求得: 对于式 (5), 当 $\theta = 90^\circ$ 时将达到一个极限状态, 此时的实际位移量 x' 将变成垂直位移, 式中的 $\tan 90^\circ$ 将不存在, 水平位移 x 达到了极限值 0, 于是出现不定型式

$$x' = \frac{x}{\cos \theta} = \frac{0}{\cos 90^\circ} = \frac{0}{0}$$

因为 x' 的极限是存在的, 所以

$$x' = \lim_{\theta \rightarrow 90^\circ} \frac{x}{\cos \theta}$$

将式 (5) 代入上式化简整理得

$$x' = h_0 - \sqrt{l^2 - (\sqrt{l_0^2 - h_0^2} - d)^2} \quad (12)$$

而垂直位移的中误差用下式估计

$$m_x = \pm \frac{1}{h_0 s_0} \sqrt{(s_0 \Delta l - l_0 d)^2 m_{l_0}^2 + (s_0 x' - h_0 d)^2 m_{h_0}^2 + s_0^2 l_0^2 m_{\Delta l}^2 + s_4^0 m_d^2} \quad (13)$$

式中 Δl 可以通过给定的垂直位移 x' 求出

$$\Delta l = l_0 - \sqrt{(h_0 - x')^2 + (s_0 - d)^2}$$

如果 m_{l_0} 和 m_{h_0} 对水平位移 x 的影响可以达到忽略不计的程度时, 则

$$m_x = \pm \frac{1}{h_0} \sqrt{l_0^2 m_{\Delta l}^2 + s_0^4 m_d^2} \quad (14)$$

如果基点稳定, 并设 $\lambda_h = l_0/h_0$, 则

$$m_x = \lambda_h m_{\Delta l} \quad (15)$$

4. 复测次数 ω 的确定

为了提高监测精度, 可以进行多余复测。假设一个点的位移量用 x 表示, 则一般地可以近似表示成 $x = \lambda \Delta l$, 则其复测次数 ω 可用下述方法确定: 在考虑特征边初始值误差时为 $\omega = 2\lambda^2$; 若不考虑特征边初始值误差时为 $\omega = \lambda^2$, λ 为图形条件系数, 根据不同的图形条件则 $\lambda = \lambda_h$ 或 λ_s 。

注意, 因考虑到每次监测时的第一次观测为必要观测, 所以对 ω 的计算结果为只舍不进, 得到的结果正好就是多余复测次数, 若 ω 正好为整数则减 1。

三、具体实施方法

本方法对大型施工隧道地质围岩收敛变形监测可以使用两种方法对特征边进行量距: ① 完全使用收敛计钢尺; ② 只使用一小部分收敛计钢尺, 其他部分使用一段定长钢丝和一个特殊挂钩。不推荐第①种方法, 因为从实际操作来看, 若稍有不慎, 钢尺就会脱落而损坏。推荐使用第②种方法, 先将定长钢丝与特殊挂钩的下方环挂接好, 在伸缩杆的顶端固定一个类似衣服撑钩顶住副钩将特殊挂钩的主钩预先挂到高空监测点的环上, 然后作业员站在地面上将收敛计钢尺的挂钩挂到定长钢丝垂下来的一端的环上, 再将收敛计的挂钩挂到基点上, 即可进行量距操作。实践证明, 该方法效果好, 达到了预期的目的, 还基本上可以实现一人独立作业。

定长钢丝的两端是利用细钢丝的两头弯制而成的椭圆形小环并固紧, 一端与特殊挂钩相接, 另一端与收敛计挂钩相接。也可以通过焊接技术, 在定长钢丝的两端焊接上两个直径为 2 cm 的小圆环。

细钢丝应该首选直径为 2 mm 的细钢丝, 当前市场价为每米 200 元左右, 但也可选择伸缩性极小价格为每米 1 元的普通细钢丝代替, 既节约了经费, 又满足了精度要求, 并能收到同等的技术效果。定长钢丝首先要考虑的是随温度变化的长度伸缩率, 以及受拉力影响的敏感程度, 这可以通过试验得出是否可选用的结论, 必要时可测定具体使用的钢丝受温度影响的改正系数。通过试验对比可知, 应该选用那种外包型细钢丝(如图 4 所示), 直径为 3 ~ 5 mm, 而不要选用有明显扭卷的细钢丝(如图 5 所示)。特殊挂钩的规格以方便使用为宜, 其大小一般掌握在长度 0.11 m、宽度 0.08 m, 分主钩、副钩和下方环组成(如图 6 所示), 用一段直径为 2 ~ 4 mm 的钢丝、使用手钳弯制而成即可, 也可以委托工厂加工。8 m 以下的高洞顶用普通的 9 m 长铝合金伸缩杆即可, 对过高的隧道, 在不影响日常施工的同时可以在监测点上预先挂上一段永久性钢丝, 在监测期间不再取下。注意, 断面上各个监测点的建立应尽可能不要偏离断面太大, 这个偏离程度建议在 0.3 m 以内为宜。

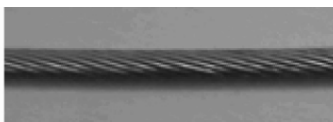


图 4 可以选用的细钢丝

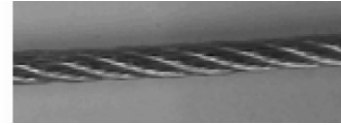


图 5 不可选用的细钢丝

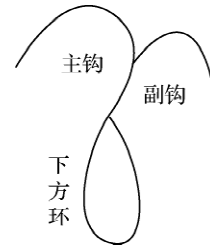


图 6 特殊挂钩示意图

四、实例分析

图 7 为中国科学院物理研究所大亚湾中微子实验站隧道建设工程 3#主隧道桩号为 1 + 575 断面围岩收敛变形监测 3 号点水平位移曲线图。从本断面的所有监测点的图像曲线可以看出, 从第一次监测之日起, 连续追踪 38 天, 共监测 9 次, 没有发现围岩收敛变形位移现象, 说明本断面在这一时期处于稳定状态。

本断面的特征边中误差为 $m_{l_0} = \pm 10 \text{ mm}$; 垂直直角边中误差为 $m_{h_0} = \pm 20 \text{ mm}$; 特征边的量距中误差为 $m_l = \pm 0.3 \text{ mm}$, 所以 $m_d = \pm 0.21 \text{ mm}$, $m_{\Delta l} = \sqrt{2}m_l = \pm 0.42 \text{ mm}$ 。

因为本断面的 $\lambda = \lambda_h \approx \lambda_s = 1.2$, 所以在不考虑特征边初始值误差时 $\omega = \lambda^2 \approx 1$ 。因此, 后次监测时都进行了 1 次复测, 将连续 2 次观测结果取平均值作为此次监测的最后位移量。

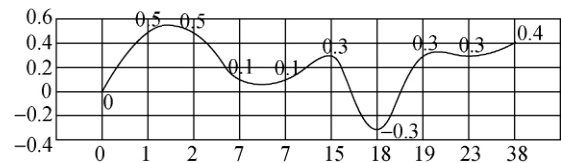


图 7 实例效果图

五、结束语

采用本文所述的方法, 廉价高效, 大大降低了工程造价, 更重要的是实现了变高空高危险作业为无危险的地面安全作业。而且本方法是以点为监测对象, 可以实现单个点的位移监测, 而不像直接量 (下转第 36 页)

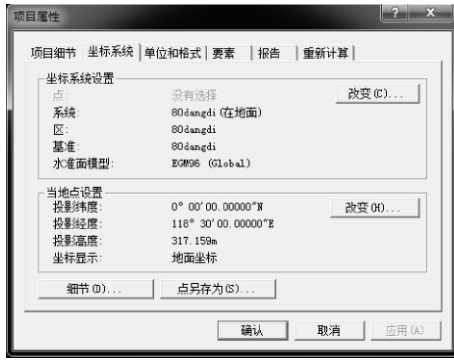


图1 当地点设置界面

表7 独立坐标成果(采用当地点设置并基于方法3)的地方椭球 $a_1 = 6\ 378\ 457.159\text{ m}$

点名	平面直角坐标/m		地方椭球大地坐标/(° ′ ″)	
	X	Y	B	L
IV01	...17 885.067	...6 608.310	40 47 35.960 83	118 13 22.270 67
IV02	...17 227.740	...6 735.863	40 47 14.666 04	118 13 27.799 28
IV03	...17 052.220	...5 295.624	40 47 08.825 17	118 12 26.399 69
IV04	...16 156.135	...3 845.164	40 46 39.616 33	118 11 24.675 84

六、结论

1) 椭球膨胀法其实是不同基准间的转换,虽然投影时的椭球参数与国家参考椭球的参数有所差异,但经投影后所得平面坐标在数值上与国家参考椭球的椭球面上的平面指标接近,两者有着较严密的换算关系,易实现转换。 ΔB 与 da 有关,采用3种方法计算 da 会有3种不同值,则 ΔB 亦有3种成果,每一种椭球膨胀法采用上述的两种计算方式所得结果是一致的。3种椭球膨胀法计算的坐标值虽然不同,但在坐标间的相对关系上是基本一致的。

2) 在建立独立坐标系统时,投影带和投影面的选择尤为重要。对于平坦的测区,距国家 3° 带中央子午线小于45 km的测区,投影面一般可选平均高程面;否则应选取抵偿高程面。如果测区高程起伏较大,可通过变换中央子午线位置与投影面高程来实现,或是分带计算(多见于线状工程测量)。

3) 通过对TGO中的坐标管理器及当地点设置

高度为317.159 m,即椭球长半轴变化量(根据选择膨胀法不同,数值不同),选择使用地面坐标和用投影位置计算比例尺选项。将表6中的地方椭球大地坐标导入到项目中,得到的网格坐标即为独立坐标系平面坐标,如表7所示。

可见,方法4)与方法3)的结果一致。对控制网进行无约束平差后,以表7坐标为起算数据,在该独立坐标系的基准下进行平差计算,就得到了控制网独立坐标系成果。

的操作,可以很好地解决投影面坐标转换问题,更方便建立独立坐标系统。

参考文献:

[1] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2007.
 [2] 北京市测绘设计研究院. CJJ 8—99 城市测量规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
 [3] 施一民. 现代大地控制测量[M]. 北京:测绘出版社,2003.
 [4] 施一民. 建立区域坐标系问题的我见[J]. 测绘工程,2000,9(1):38-41.
 [5] 冯林刚. GPS测量控制网纳入独立坐标系的方法[J]. 地矿测绘,2000,16(3):6-8.
 [6] 邱云峰,倪津. 不同投影归算面间的坐标换算[J]. 测绘通报,2001(9):12-13.
 [7] 畅开狮. 建立城市独立坐标系相关问题的探讨[J]. 城市勘测,2008(1):86-90.

(上接第21页)

距法那样只能监测两个点之间的相对水平位移。

参考文献:

[1] 韩焯,李宁. 隧道开挖不均匀收敛引起地层位移的预测模型[J]. 岩土工程学报,2007,29(3):347-352.
 [2] 李玉宝,杨丽. 收敛计检验与精度分析[J]. 测绘通

报,2009(3):45-48.

[3] 彭建国,田爱军,张希庆. 基于全站仪ATR的隧道围岩收敛测量系统[J]. 铁道勘察,2007,33(1):27-30.
 [4] 李冠军,王玉洁. 隧道断面的收敛监测方法[J]. 大坝与安全,2003(5):26-28.
 [5] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.