

倒垂基准稳定性研究

黄红女, 华锡生, 王铁生

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 分析了垂线的复位误差与垂线长度、张拉应力、浮体受到的粘滞阻力间的关系, 研究了不同库水位对倒垂锚固点稳定性的影响, 建立了倒垂组垂线之间的修正模型, 并将其应用于实例. 结果表明, 不必布置很深的倒垂, 只要用不同埋深的倒垂构成倒垂组, 通过模型修正, 就可有效地消除因库水位变化引起倒垂锚块不稳定而对测量结果所产生的影响, 从而解决了过深倒垂不仅施工困难, 而且会降低倒垂灵敏度的问题.

关键词: 安全监测; 基准稳定性; 倒垂系统

中图分类号: TU196. +1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2003)05-0539-04

大坝安全监测, 通常都考虑以倒垂系统作为监测的基准. 相对于大地监控网基准, 倒垂可直接设置在坝基下, 观测精度高、操作简便、易于实现自动化而更具优越性. 但是, 以倒垂作为基准, 首先必须保证其稳定性, 此外还应该满足监测的灵敏性要求^[1].

布置在岩体有限深度内的倒垂锚块, 不可能完全不动. 据岩土力学分析, 倒垂锚块处的基岩, 若不考虑地壳运动, 则主要受坝体荷载及变化着的库水荷载作用. 在大坝运行期, 坝体自重为恒载, 锚块的稳定性主要取决于库水的变化荷载作用.

倒垂垂线越长, 所需钢丝半径越大, 当钢丝半径较大时, 必须施加较大的张拉力才能克服钢丝内原有的残余应力而把钢丝张紧. 此时, 应考虑采用有较大浮力的浮体. 反过来, 浮体体积较大时, 则液体粘滞力等将直接影响倒垂的灵敏度.

随着我国水电建设事业的深入发展, 将会建设更多的特高大坝, 如小湾大坝就是高达 290 多 m 的双曲拱坝. 在以倒垂系统作为这些大坝安全监测的基准中, 考虑倒垂稳定性和灵敏性相结合就显得十分重要. 如果倒垂埋设深度不足, 将直接影响基准的稳定性, 使坝体变形观测值含有显著的基准变化量, 进而影响坝体安全监控的分析. 如果倒垂埋得很深, 虽然其稳定性得到了保障, 但倒垂施工等技术上的难度会很大, 造价会很高, 而且将显著降低其灵敏性并影响其观测精度.

本文就倒垂灵敏性和稳定性不能兼得的问题, 研究了由多个倒垂所构成的倒垂组基准稳定性问题.

1 倒垂系统的误差分析

倒垂系统误差主要来源于 2 个方面: 其一是倒垂观测系统本身的误差, 是由浮体的粘滞阻力、钢丝内部残存的应力、观测设备的误差等影响所产生的, 并且与倒垂的长度、结构、施加浮力的大小等有关; 其二是倒垂锚固点的稳定性以及由于库水位显著变化而造成的局地重力异常变化对倒垂的影响.

1.1 垂线仪的观测误差

经对安徽省水利厅设计院修配厂生产的一维短量程光学垂线仪(共 16 台)所进行的照准误差、隙动差、定位误差等的检验, 获得了仪器的观测误差量值.

由实测结果知, 该种光学垂线仪在垂线观测中, 仪器产生的误差 Δ_1 不超过 0.07 mm. 目前, 我国大坝垂线观测仪器均可达到这个精度, 所以仪器的观测精度不是垂线系统误差的主要因素. 因此, 对于观测仪器(包括光学及自动化仪器), 目前需要提高仪器本身的稳定性和长期工作的可靠性, 而不是以进一步提高精度为努力目标.

1.2 复位误差

坝体发生水平位移时,垂线处于严格的铅直位置,通过量测坝体与垂线的相对变化量,可获得以垂线为基准的坝体位移值.垂线的铅垂位置是靠浮体产生的浮力来维持的.垂线的浮桶以坝体为支撑,会随坝体一起位移.如果垂线过长、拉张力不足,而液体粘滞力较大,则坝体位移时浮力产生的垂线指向铅垂方向的复位分力将不足以克服液体的粘滞阻力,使垂线不能完全恢复到严格的铅垂位置,会产生复位误差.

垂线的复位误差也体现了垂线的灵敏度,它表示垂线对坝体位移所能反映的最小变形量值.

复位观测时,首先精确测定垂线的坐标值,然后用手将垂线轻微地向左拨动,待垂线完全静止后观测其坐标值;再将垂线轻微地向右、向前、向后拨动,依次待垂线静止后观测其坐标值.各次拨动后观测得到的坐标值与未拨动时的坐标值之差即为复位误差,所取4个方向复位误差的平均值为最终值.

对4座大坝11条倒垂线进行了复位误差的观测,结果见表1.

垂线复位误差主要与垂线长度、钢丝的残余及挠曲应力和浮体所受的粘滞阻力有关.而粘滞阻力受液体粘滞系数、浮桶形状、浸入体的表面积等因素的影响.在忽略微小项作用影响时,对上述11条倒垂观测的复位误差进行拟合^[2],得

$$\Delta_2 = 0.122 - 0.00041\sigma + 0.00640L$$

(1)

式中: Δ_2 ——复位误差,mm; σ ——垂线拉应力,MPa; L ——垂线长,m.由式(1)知,若浮力为600N,钢丝直径为1.2mm,要使复位误差不大于0.5mm,则垂线长度 L 不能大于93m.若要求复位误差不大于0.1mm,则垂线长度 L 不能大于35m.

进一步分析可知,为减小垂线复位误差,垂线布置不宜太长,并应适当增加对垂线的张拉应力.但拉应力的增加,必将造成浮体体积的增大,使影响复位的粘滞阻力加大,降低倒垂的灵敏度和变形值的观测精度.从这个意义上讲,大坝安全监测中不应采用埋设很深的倒垂系统.

2 倒垂系统的稳定性分析

2.1 库水位的影响

不同类型的坝体,因自重荷载、坝基工程地质条件的不同,特别是运行期间库水位的变化,对倒垂锚固点稳定性的影响也是不同的.为研究此问题,以某重力拱坝为例,利用非线性有限元法并以坝体自重为基准对5种不同库水位进行了有限元计算,得出了不同坝基深度处 y 方向(顺河方向)的基础变形情况,结果如表2所示.

表2 不同库水位时 y 方向的变形计算值

Table 2 Calculated results of deformation in y direction at different reservoir levels

mm

深度/m	水位/m					
	0	25.0	40.0	55.0	70.0	80.0
0	0	0.45	0.68	0.97	1.52	1.81
10	0	0.30	0.47	0.71	1.17	1.39
20	0	0.13	0.29	0.50	0.78	1.02
24	0	0.12	0.27	0.45	0.68	0.88
30	0	0.10	0.24	0.38	0.51	0.67
40	0	0.08	0.18	0.27	0.39	0.46
50	0	0.02	0.05	0.12	0.20	0.28
60	0	0.00	0.01	0.05	0.11	0.16
62	0	0.00	0.01	0.04	0.10	0.14
70	0	0.00	0.00	0.01	0.04	0.05
80	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

以库水位由25~80m变化产生的差值 Δ 进行不同深度的拟合,可得拟合方程为

$$\Delta_3 = 1.3820 - 0.0331L + 0.0002L^2$$

(2)

上述计算结果表明,高坝由于库水位变幅较大,对坝基及库盆荷载变化而引起的坝基地层不同深度处的顺河向位移有一定影响.如果倒垂锚块埋设深度不足,则其稳定性得不到保证.上例计算中,在库水位由25m变化到80m时,为使倒垂本身的稳定性不低于0.1mm,则锚块埋深应大于70m,约为坝高的0.8倍,对应的施加浮力为1143MPa.

2.2 垂线偏差的影响

库水位的变化,反映了水库内蓄水体积的变化.对于大型水库来说,体积的变化将引起局地重力场,包括

表1 垂线复位误差

Table 1 Reposition error of plumb line

序号	垂线长度 /mm	张拉应力 /MPa	复位误差 /mm
1	64.7	266	0.30
2	45.8	260	0.22
3	40.4	364	0.16
4	41.2	364	0.21
5	85.7	364	0.56
6	62.0	398	0.27
7	61.5	398	0.33
8	61.7	237	0.42
9	27.3	566	0.13
10	64.7	364	0.24
11	41.1	364	0.19

重力值及重力方向)的变化,以重力作用为基础的倒垂系统,由于重力方向的变化,将影响垂线方向的变化而产生垂线偏差的误差,从而直接影响垂线的测值.这种影响会因坝体到水库的距离、库型的不同及垂线锚块的深度情况而异.局地垂线偏差对观测值的影响为

$$\Delta_4 = \Delta u L / \rho \tag{3}$$

式中 Δu ——垂线偏差角度,其大小与库型、垂线位置、库水位的变化量等因素有关; L ——倒垂线长度, μm .
库水位变化较显著的大型水库,垂线偏差有一定的量值.以龙羊峡为例,当库水位由 2 600 m 降到 2 540 m 时,计算出的垂线偏差角度 $\Delta u = 0.51''$.若垂线全长为 90 m,则可算得

$$\Delta_4 = 0.51 \times 9 \times 10^4 / \rho = 0.23 \text{ mm}$$

由此可见,局部重力场变化对垂线观测精度的影响也会达到一定数量级,并随垂线长度的增加而增大.为减小局部重力场变化的影响,要求垂线布设不宜过长.

综合垂线系统本身的误差、库水位变化的影响及垂线偏差可知,大坝运行阶段垂线基准的总误差,以上述结果为例,不计仪器误差时为

$$\begin{aligned} \Delta = \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 = & 0.122 - 0.000\,411\sigma + 0.006\,4L + \\ & 1.382 - 0.033\,1L + 0.000\,2L^2 + \Delta uL \times 10^3 / \rho \end{aligned} \tag{4}$$

若垂线长度 $L = 60 \text{ m}$, $\sigma = 600 \text{ MPa}$, $\Delta u = 0.51''$,则垂线的总误差 $\Delta = 0.52 \text{ mm}$.
上述计算结果表明,此重力坝的倒垂埋深为坝高的 0.7 倍.库水位变化达 60 m 时,倒垂基准的误差有可能达到 0.52 mm,其稳定性并不理想.而进一步埋深倒垂,将大大增加技术难度及费用,同时 will 影响其灵敏性.

3 组合倒垂系统

实际工作中,由于库水位变化而影响倒垂的稳定性是比较复杂的问题,但是库水位变化对坝基岩体位移的影响将随深度的增加而逐渐减弱.对于高坝倒垂基准,为克服深埋倒垂的困难,可采用倒垂组形式进行处理,即根据需求和实际情况,在布设基准的同一坝段,设置两三个靠得很近的埋深不同的倒垂构成倒垂组.建立在不同库水位作用时倒垂组各垂线锚块位移间存在的相互关系模型,求出相应的修正值,对倒垂观测值进行改正,消除库水位变化的影响,可确保其稳定性.

3.1 数学模型

对于倒垂,由于各锚块埋深是确定的,因此它们的位移变化主要与库水位的改变有关.考虑每个倒垂锚块的稳定性与水位的 1、2、3 次方有关,则可以列出如下统计模型:

$$\Delta = a_0 + a_1H + a_2H^2 + a_3H^3 \tag{5}$$

对于倒垂组,各垂线靠得很近,不同埋深锚块的变形,可看作为同一垂线不同高程处的位移.但在不同水位作用下,不同埋深锚块位移建立的统计模型(5)中各系数值是不同的.若由 2 个倒垂构成的倒垂组,锚块埋深分别为 L_1 和 L_2 ,则在水位 H 作用下,它们观测得到的同一坝基位移的差值为

$$\Delta_y = (a_{01} - a_{02}) + (a_{11} - a_{12})H + (a_{21} - a_{22})H^2 + (a_{31} - a_{32})H^3 \tag{6}$$

3.2 模型系数的修正

式(6)是根据有限元计算结果得到的,会因计算中参数估计不准而与实际结果存在差异,因此必须利用实际观测值对模型进行修正.由于倒垂组对同一坝段位移观测值之差是可以直接获得的,故可像建立确定性模型那样,将上述模型修正为

$$\Delta_y = A_0(a_{01} - a_{02}) + A_1(a_{11} - a_{12})H + A_2(a_{21} - a_{22})H^2 + A_3(a_{31} - a_{32})H^3 \tag{7}$$

以多个库水位实际观测得到的坝基位移差值进行最小二乘拟合,可求得各修正系数 A_0, A_1, A_2, A_3 ,并对式(5)进行修正,即可获得经修正后的各垂线在不同库水位下的实际位移模型,供观测中对垂线锚块稳定性修正之用.

$$\Delta_y = A_0a_0 + A_1a_1H + A_2a_2H^2 + A_3a_3H^3 \tag{8}$$

3.3 应用实例

上述重力拱坝 8 号坝段埋设 2 号及 3 号 2 个倒垂构成的倒垂组,锚块埋深分别为 24 m 和 62 m.由不同库水位算得这 2 个深度位置 y 方向的位移值,见表 2.按式(5)所示模型进行统计分析,得

$$\Delta_{24} = -0.04 + 0.0058H + 0.000060H^2$$

(9)

$$\Delta_{62} = -0.02 + 0.0003H + 0.000017H^2$$

(10)

则 2 个倒垂在不同库水位时对同一坝体位移观测的差值为

$$\Delta_y = -0.02 + 0.0055H + 0.000043H^2$$

(11)

以 1974~1976 年 3 年期间 2 号及 3 号倒垂对同一坝体观测得到的 14 组差值(见表 3)进行模型式(11)的修正,经最小二乘拟合求得各系数的修正值为 $A_0 = 3.6$, $A_1 = 2.0$, $A_2 = 1.9$. 因此,模型(9)(10)修正后为

$$\Delta_y = -0.072 + 0.0110H + 8.170 \times 10^{-5}H^2$$

(12)

$$\Delta_{24} = -0.144 + 0.0116H + 11.400 \times 10^{-5}H^2$$

(13)

$$\Delta_{62} = -0.072 + 0.0006H + 3.232 \times 10^{-5}H^2$$

(14)

由式(13)(14),可根据实测库水位求得对应垂线测值的改正数 Δ . 以此对坝体位移的垂线观测值进行改正,发挥倒垂组的作用,可消除库水位变化对倒垂线观测值的影响.

4 结 论

a. 库水位的变化将显著影响倒垂的稳定性,因此应进行不同水位对锚固点稳定影响的分析计算,建立水位-埋深-变位模型,供倒垂埋深设计时参考.

b. 倒垂系统的复位误差是垂线观测的主要误差之一,它与垂线长度、张拉应力、浮体受到的粘滞阻力等因素有关. 通常而言,垂线越长,需要的张拉应力越大,则浮体受到的粘滞阻力就越大,倒垂的灵敏度就越低. 在高坝倒垂埋深设计中,应综合考虑锚固点的稳定性和倒垂系统的灵敏性. 单纯加大锚块深埋,不仅使施工变得十分困难,而且还不能真正提高倒垂观测的精度.

c. 用不同埋深的垂线构成倒垂组,并建立垂线组中各垂线位移侧值的修正模型,可有效地消除因库水位变化引起的倒垂锚块不稳定对测量结果产生的影响. 在高坝变形监测中,不必布置很深的倒垂就可解决倒垂施工困难而获得更为稳定的基准,是一种具有实用价值的方法.

参考文献:

[1] 华锡生,周卫娟.三峡大坝安全监测系统布置优化的几个问题[J].水利水电科技进展,1996,16(2):26—29.
[2] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.9—15.

Benchmark stability of inverse plumb lines

HUANG Hong-nu, HUA Xi-sheng, WANG Tie-sheng

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The relationships between the reposition error of plumb lines and some concerned factors, including the length of plumb lines, stress, and floating resistance, are analyzed. The influences of different water levels on the stability of anchor points of inverse plumbs are studied. A modified model for inverse plumb lines is established and applied to practical projects. It is concluded that, in determination of the depth of plumb lines in high dams, the stability of anchor points and sensitivity of the inverse plumb line system should be synthetically considered, that it is unnecessary to install very deep inverse plumbs, and that the inverse plumb line group, consisting of inverse plumbs with different embedded depths, modified by the model, can effectively eliminate the influence of instability of anchor points at different water levels on the measured results. The model can help avoid difficulties in construction of very deep inverse plumbs and the decrease of sensitivity induced by very deep inverse plumb system.

Key words safety monitoring; benchmark stability; inverse plumb line system

表 3 倒垂组的位移观测差值

Table 3 Difference between displacements
observed by inverse plumb line group

编号	水位/m	差值/mm	编号	水位/m	差值/mm
1	38.1	0.45	8	55.6	0.84
2	25.6	0.18	9	51.8	0.72
3	35.6	0.43	10	80.0	1.40
4	58.5	0.92	11	71.2	1.19
5	79.0	1.36	12	26.4	0.22
6	39.3	0.49	13	74.5	1.25
7	68.8	1.12	14	32.2	0.38