

# 三峡大坝安全监测系统布置优化的几个问题

华锡生 · 周卫娟

(河海大学测量工程系 南京 210098)

**摘要** 大坝的安全监测是研究坝体工作的性态、反馈多种信息和确保正常运行的重要工作。本文根据作者的大量实验结果及资料分析数据,结合三峡工程大坝监测系统的具体布置情况,论述了对正垂、倒垂、引张线等广泛应用的坝体监测系统的优化,分析建立统一基准的重要性及实施方案,并对三峡大坝的监测系统布设提出了一些建议。

**关键词** 安全监测 统一基准 倒垂系统 监测系统优化 监测网 三峡大坝

三峡工程是一项具有防洪、发电、航运等综合效益的巨大工程项目。该工程建成后,对减轻和防治长江中下游地区的洪涝灾害,缓解华中、华东地区的电力供需矛盾,改善坝区到重庆河段的航运条件都具有十分重大的意义。

根据工程重新论证后的方案,水库正常蓄水位 175 m,防洪限制水位 145 m,枯水期低水位 155 m,最低下游水位 62 m。大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 185 m,最大坝高 175 m,大坝轴线长 2 335 m。泄洪坝段位于河床中部,两侧是厂房坝段及非溢流坝段,左、右岸厂房内分别装机 14 台和 12 台,总容量 1 820 万 kW。

三峡工程规模宏大、技术复杂,工程建成后运行期很长,确保其安全运行,对广大人民的生命财产有至关重要的作用。因此,建筑物监测系统的布置,必须在保证满足安全监控要求的前提下,采用先进的技术设备、节约经费、加快施工速度等方法来实施优化设计。

## 1 安全监测系统的整体性

### 1.1 统一基准问题

安全监测中,测点的观测量是相对于各自的基点而言的,如果观测各周期内基点产生了变化,则获得的观测量中包括基点的变形值。大坝高坝通常均布置多种监测系统以有效地实施监测,把这些不同的监测系统纳入同一基准中,才能进一步发挥互相检核、互相补充的作用,并与水工建筑物工作性态分析的结果协调一致。因此,统一基准是涉及安全监测系统有效性范畴的问题。

由于坝地质条件的复杂性而建立坝区安全监测统一基准的必要性是十分明显的。以陈村大坝为例,在 8 号坝段设置有靠得很近的 8 倒 2 和 8 倒 3 两个倒垂系统,它们的孔底锚块分别位于经过此坝段的断层  $F_{11}$  的上、下盘,通过 1974~1986 年的观测,并以两倒垂为基准点,计算 8 号坝段年变形最大值和最小值的差异量,如表 1 所示。

表 1 8 号坝段年变形最大值和最小值的差异量(单位:mm)

| 年 份 | 1974 | 1975  | 1976  | 1977  | 1978  | 1979  | 1980 | 1981 | 1982  | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|
| 最小值 | -0.1 | -0.45 | -0.11 | -0.92 | -0.16 | -0.43 | 0.04 | 0.22 | -0.21 | 0.18 | 0.42 | 0.38 | 0.49 |
| 最大值 | 0.84 | 0.72  | 1.36  | 1.30  | 1.40  | 0.99  | 1.19 | 1.27 | 1.38  | 1.32 | 1.11 | 1.26 | 0.99 |

8号坝段是完好的整体,所以表中的差异值实际上就是 $F_{11}$ 断层的上、下盘活动量。由此可知,地质条件复杂的区域,倒垂之间缺乏联系而把它们视作绝对不变的基准是不可取的。倒垂间的相对稳定性以及它们的活动情况,在一些大坝中均有不同程度的反映。

## 1.2 三峡水利枢纽监测系统的整体性

三峡水利枢纽包括的范围十分广阔,要把监测系统高精度地完全纳入同一基准中,存在一定困难;但是,就最低的要求而言,应达到三峡枢纽区的各监测系统之间有良好的联系。

a. 设立全范围的GPS网,监测库区地面变形情况。目前根据国外的一些最新资料表明,用于变形观测的GPS定位,精度可以达到 $\pm 2\text{mm}$ 。因此,三峡库区的GPS网应该有两大大作用:一是监测库区在各种环境条件下地面变化情况,一是加强对枢纽统一基准的检核。

b. 坝区统一基准的布置。整个坝区的基准点不宜太多,如果以目前布置的各倒垂点均为独立基准点而不联成整体纳入统一基准中,那么,将难于克服和发现由于倒垂点的稳定性而产生的误差,给今后整体分析带来困难。以大坝为例,可根据具体情况,选择少数几条倒垂线作为坝体监测的独立基准,并考虑以高精度监控网等方法精密联系其它倒垂线,使坝体所有观测值皆能归到此坝体独立基准内而形成一个整体。

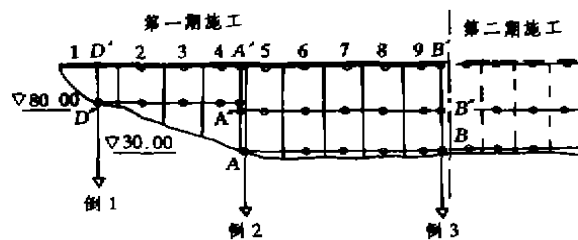
c. 应该很好处理各种监测系统间的有机联系,从而有可能把各种监测值归到独立基准中。以三峡坝体监测为例,设置15条引张线和20个倒垂,各引张线均以倒垂点为工作基点。由于20个倒垂间缺乏有机联系,各成体系,而且许多倒垂处于断层附近,因此可以想象15条引张线之间的测值不可能协调一致。以各自对应的倒垂为基准而描述坝体变形情况,缺乏整体性,这对坝体的监测是极为不利的。

## 2 监测系统布置的优化问题

### 2.1 安全监测的结构系统

三峡大坝安全监测系统设计中应特别重视组合式框架网络体系的组成,这种系统不仅应结合建筑物的结构形式进行布置,还应根据施工计划及进程的安排而考虑,应特别注意框架的整体性(处于同一个独立基准体系内)和网络结点的稳定可靠性(两种不同观测系统在同一部位坚强联系)。从对基础监测的重要性出发,根据施工的特点,底层主要框架应放在基础部位,使工程施工初期就能获得高精度的、有利用价值的资料。

以重力坝体监测系统为例,若第一期施工为右岸1~9坝段,监测系统底层主框架采用引张线AB,倒垂作为引张线的基点,则框架网络结构如附图所示。施工中,先打好倒垂孔1~3,分层分块浇筑到30.00m高程后即可布置引张线AB,实施对5~9坝段的监测。当继续浇到80.00m高程后,又可布置A'B'D'引张线,并把A和B点以正垂接倒垂,引到80.00m高程,实施对1~9坝段的80.00m高程监测。当第二期施工坝段浇筑时,可相互联系成整体,在大坝工程结束时,监测系统网络就完全建立了。这种监测系统中,必须特别考虑各倒垂间的联系测量。如果条件有限,那末至少应在正垂线点A'B'D'处设固定观测墩,以ME-5000等精密光电测距仪,根据坝区控制网点对倒垂定期进行检核,同时也有利于把各倒垂纳入同一独立基准中,使正垂线、引张线等观测值达到完全协调一致而实现其整体性目的。



附图 监测系统框架网络结构图

## 2.2 倒垂监测系统

根据大量不同长度、不同应力的倒垂复位误差的测定资料,经统计分析后可求得如下关系式

$$\Delta = 0.121 - 0.0041\sigma + 0.0062L$$

式中  $\Delta$  为倒垂观测精度,单位为 mm;  $\sigma$  为垂线作用的应力,单位为  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ;  $L$  为垂线全长,单位为 m。若浮桶能产生 50 kg 浮力,对于直径为 1.2 mm 的钢丝,要使观测误差小于  $\pm 0.3 \text{ mm}$ ,则倒垂线全长不要超过 60 m。此外,倒垂装置埋设精度要求高,倒垂钻孔时有报废,费用很大。从有限的资料来看,国内外大坝设置倒垂观测系统并不多,特别是深埋的倒垂很少见。这主要是涉及到监测系统的可靠性和经济性问题。倒垂埋设很深不仅在技术上难度较大,而且精度不易保证,费用也昂贵。

## 2.3 正垂线监测系统

从正垂线观测精度出发,存在着优化布置的问题。对 55 条不同长度、不同悬重的正垂线复位误差研究表明,正垂线观测误差  $\Delta$  与垂线长度  $L$ ,钢丝拉应力  $\sigma$  的关系如下

$$\Delta = 0.042 - 0.00155\sigma + 0.00275L$$

由上式可以计算得,一条长 80 m 的正垂线,若观测精度要求不低于  $\pm 0.2 \text{ mm}$ ,则垂线上施加的拉应力至少应达到  $40 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 。可见,从保证精度出发,过长的正垂线布置形式也是不适宜的,对于高坝,应该采用正垂线接倒垂线的方法布置。此外,若正垂线过长时,还应把它分段连接。垂线系统的精度,有一个难于克服的误差影响,即由于库水位的升降而引起的局部地区的垂线偏差问题。以龙羊峡大坝研究结果为例,从正常水位到低水位,可以发生 2" 的垂线偏差,对于 200 m 的垂线,将有 2 mm 的误差影响,这是必须引起重视的问题。

## 2.4 引张线系统

引张线观测系统的精度仍有不少因素影响,如钢丝的拉应力、钢丝不均匀性、浮托体的粘滞阻力、读数误差等。若设引张线各测

点以间距  $d$  等距分布,共有  $n$  个测点,每个浮托体所受的液体阻力均为  $F$ ,引张线两端水平拉力为  $H$ ,由力学分析可得引张线中央部位  $n/2$  测点处,因液体阻力而产生的复位误差为

$$\delta_{\text{中}} = \frac{Fd}{H} \frac{7n^2 - 8n}{4}$$

由上式可知,这个误差与  $F$ ,  $d$  成正比,与  $H$  成反比,此外还与测点数  $n$  有关,  $n$  越大,则误差越大。如果某引张线全长 500 m,测点间距  $d = 20 \text{ m}$ ,水平拉力  $H = 60 \text{ kg}$ ,  $F = 0.001g$ ,则可以算得  $\delta_{\text{中}} = \pm 0.35 \text{ mm}$ 。因此,引张线的布置形式,测点不宜太多,两端点间隔不要太长(不宜大于 500 m),两端拉力要大。此外应特别注意浮托体的形状,应做成水阻力较小的船形而不要矩形。

## 2.5 资料分析结果对监测系统精度的评价

为了对以上三种监测系统的精度有更好的了解,表 2 所示为一些大坝监测资料利用统计模型分析的结果,可供进一步参考之用。

表 2 三种监测系统精度的评价

| 监测系统 | 大坝名称 | 测点部位  | 监测系统长度(m) | 复相关系数 R | 回归中误差 |
|------|------|-------|-----------|---------|-------|
| 正垂线  | 佛子岭  | 3*    | 41.2      | 0.99    | 0.30  |
| 正垂线  | 佛子岭  | 7*    | 42.1      | 0.97    | 0.23  |
| 正垂线  | 佛子岭  | 11*   | 41.7      | 0.96    | 0.26  |
| 正垂线  | 陈村   | 8*    | 57.0      | 0.99    | 0.25  |
| 正垂线  | 陈村   | 18*   | 57.0      | 0.98    | 0.31  |
| 正垂线  | 陈村   | 26*   | 21.3      | 0.96    | 0.28  |
| 倒垂线  | 陈村   | 8*~2  | 23.6      | 0.88    | 0.16  |
| 倒垂线  | 陈村   | 4*~1  | 34.0      | 0.94    | 0.19  |
| 倒垂线  | 陈村   | 29*~1 | 29.0      | 0.90    | 0.13  |
| 倒垂线  | 丹江口  | 31*   | 53.0      | 0.94    | 0.34  |
| 倒垂线  | 丹江口  | 1*    | 72.0      | 0.91    | 0.40  |
| 倒垂线  | 丹江口  | 36*   | 25.6      | 0.84    | 0.24  |
| 引张线  | 丹江口  | 31*   | 644       | 0.89    | 0.87  |
| 引张线  | 丹江口  | 27*   | 644       | 0.90    | 0.81  |
| 引张线  | 丹江口  | 28*   | 408       | 0.91    | 0.41  |
| 引张线  | 丹江口  | 31*   | 408       | 0.92    | 0.32  |
| 引张线  | 丹江口  | 14*   | 151       | 0.64    | 0.33  |

由结果可知,正、倒垂线只要拉应力足够,全长不大,在观测人员技术熟练的情况下,观测值的误差可保证在  $\pm 0.2 \sim \pm 0.3 \text{ mm}$  范围内。但是,引张线的观测精度就比较复杂,丹江口 644 m 这条引张线的误差为  $\pm 0.84 \text{ mm}$ 。这可能是由于该引张线较长,测点

过多,水平拉力不够,测船阻力过大等结构不合理而造成的。因此,引张线设计中应特别注意系统的优化布置。

### 3 对三峡工程混凝土大坝安全监测的几点建议

三峡工程安全监测设计中,加强了基础的监测和坝区渗流的监测,其目的和作用是十分明显的。但就各个主要水工建筑物的监测而言,监测系统众多,测点数量惊人,需较好地顾及到经济性。

#### 3.1 倒垂系统的布置建议

三峡工程坝体部位设置的倒垂,按设计思想来看,可以分为两类。一类是作为引张线工作基准,设计中左岸非溢流 1<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup> 坝段,左厂房 1<sup>#</sup>, 10<sup>#</sup> 坝段,泄洪段 1<sup>#</sup>, 16<sup>#</sup>, 23<sup>#</sup> 坝段,右厂房 21<sup>#</sup>, 26<sup>#</sup> 坝段及右岸非溢流 8<sup>#</sup> 坝段处共 12 个左右;第二类是用于监测坝基断层上、下盘活动情况而设置的,如左厂房 5<sup>#</sup>, 11<sup>#</sup>,泄洪段 9<sup>#</sup>, 18<sup>#</sup>,右厂房 17<sup>#</sup> 等。大坝作为一个整体,这些倒垂必须有机地联系起来。此外,倒垂的布置也宜进一步精简,使其发挥更大的效用。

a. 在泄洪段 17<sup>#</sup> 坝段上设置倒垂,作为  $\nabla 53.0$  和  $\nabla 44.0$  引张线的公共端点(工程上稍作处理就可),取消 16<sup>#</sup> 坝段的倒垂。18<sup>#</sup> 坝段的倒垂主要用于监测  $F_{37}$  断层上、下盘活动情况,取消后利用 17<sup>#</sup> 坝段的倒垂及 18<sup>#</sup> 坝段引张线值的分析,同样可起到原有的作用。

b. 若在工程中可行,取消左非溢流 9<sup>#</sup> 坝段的倒垂,把  $\nabla 110$  引张线端点延伸到左厂房 1<sup>#</sup> 坝段倒垂处。

c. 取消左厂房 10<sup>#</sup> 坝段倒垂和正垂, $\nabla 44.0$  引张线各测点不变,但其左工作基点以 11<sup>#</sup> 坝段倒垂为准。基础廊道布置的引张线主要用于监测基础的变形情况,处于断层上引张线测点的变化量就是反映了断层活动的量值。

d. 对于监测断层活动情况的倒垂,可有

选择地确定 1 或 2 处主要部位布置。因为这些垂线十分邻近断裂区,其稳定性没有可靠保障,作为引张线工作基点是不适宜的。此外,基础廊道布置的引张线测点即反映了断层的活动量。对此,可考虑取消左厂房 5<sup>#</sup> 坝段、右厂房 17<sup>#</sup> 坝段处的倒垂和正垂线。

#### 3.2 引张线的设置

坝体如果以引张线为骨干观测系统,则其布置是比较合理的。但是,对于左、右两岸的岸坡坝段布置,可作进一步优化。例如右岸非溢段  $\nabla 157.0$  引张线及其右端点正、倒垂(6<sup>#</sup> 坝块上),可以考虑取消,而代之以右岸非溢流 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 坝段布置直伸到基础廊道的正垂线。这三条正垂线的基点可由坝顶引张线相应的测点负责。

#### 3.3 高程监测系统

坝体高程监测以坝顶精密水准为骨干,再以 4 个传高系统把高程传递到坝体各廊道和基础廊道内,形成一个整体网络。此外,建议取消左厂房 11<sup>#</sup> 坝段及右厂房 21<sup>#</sup> 坝段处的两座双金属标,而以已有的倒垂布置成三维倒垂代替。这是由于双金属标本身埋入坝基下,受坝体、库水直接作用,其稳定性是不可靠的。以丹江口水准观测为利,库区下游数公里范围处的地面沉陷受到库水作用的影响,故直接埋设于坝基下的双金属标,其稳定性将不会有可靠保障。

此外,利用坝区控制网及 ME-5000,定期观测坝顶位置处的左非溢流 1<sup>#</sup>, 11<sup>#</sup>,泄洪段 1<sup>#</sup>, 16<sup>#</sup>, 23<sup>#</sup>,右厂房 21<sup>#</sup>, 26<sup>#</sup> 等 8 个正垂接倒垂的端点,使整个倒垂系统联系起来,形成坝体独立基准系统,此外,正垂线的长度宜进行控制,对于超过 80 m 长度的正垂线,应考虑实施分段设置的形式处理。

#### 参考文献

- 1 章书寿,华锡生.工程测量.北京:水利电力出版社,1994
- 2 黄张裕,华锡生.正垂线观测的误差及精度.水利水电测量,1993(3):13~19

(收稿日期:1995-03-02)