

大 坝 变 形 观 测

任 权 主 编

河 海 大 学 出 版 社

前 言

新中国建立以来，我国修建了数量甚多的混凝土大坝。对于这些大坝的安全监测工作，已从无到有地逐步开展起来了。目前全国有很多单位从事大坝安全监测的理论研究和实际工作，水电部为了加强对安全监测工作的领导，还成立了“水电站大坝安全监察中心”。最近十几年，大坝变形观测技术得到了飞快的发展，葛洲坝、白山、龙羊峡等著名大坝的变形观测设计，就是在这一时期完成的。在完成这些大坝变形观测设计的同时，还研究了新的观测方法和研制了新的观测仪器。观测直线型坝水平位移所采用的方法有波带板激光准直和连续引张线等；观测拱坝水平位移的方法则有精密边角导线、弦矢导线和激光导线；观测大坝垂直位移的方法有静力水准系统。上述方法有相当一部分可实现自动化观测。在变形监测网的优化设计方面，采用了可靠性及灵敏度等理论，在监测网的平差中采用了赫尔默特方差分量估计等方法。不难看出，我国的大坝变形观测技术已具有相当高的水平。

本书主要介绍国内目前所采用的理论、方法和有关仪器设备，同时也简要地介绍了变形观测设计中的有关问题。书中有的内容包含了作者参与变形观测实践的成果和体会。此外，本书还介绍了国外有关变形观测的先进经验。

本书第四、六、九章由华锡生编写，第二、三章由潘予生编写，第十一章由尹任祥编写，第一、五、七、八、十章由任权编写。限于作者水平，书中难免有不妥之处，欢迎批评指正。

作者

1989年5月

目 录

第一章 概论	
§ 1-1 大坝安全监测的重要意义	(1)
§ 1-2 我国变形观测的发展概况	(2)
§ 1-3 变形观测的频率和精度	(4)
§ 1-4 变形观测设计的若干问题	(5)
§ 1-5 混凝土重力坝变形观测设计实例	(8)
§ 1-6 混凝土拱坝变形观测设计实例	(10)
§ 1-7 垂线变化对观测成果的影响	(13)
第二章 几种高精度的变形观测仪器	
§ 2-1 精密测角仪器——威特T2000	(16)
§ 2-2 精密长度测量仪器	(20)
§ 2-3 精密自动安平水准仪——Ni002	(29)
第三章 垂直位移观测	
§ 3-1 概述	(31)
§ 3-2 点位标志和控制网布设	(31)
§ 3-3 垂直位移的观测方法	(37)
第四章 液体静力水准测量及倾斜观测	
§ 4-1 液体静力水准测量的原理	(43)
§ 4-2 液体静力水准测量的误差及精度	(46)
§ 4-3 倾斜观测和倾斜仪	(52)
第五章 光学准直	
§ 5-1 概述	(56)
§ 5-2 观测仪器和设备	(56)
§ 5-3 观测方法	(60)
§ 5-4 分段准直	(64)
§ 5-5 端点的校核及端点位移成果的处理	(66)
§ 5-6 光学准直的误差分析	(67)
第六章 垂线与引张线	
§ 6-1 正垂线及坝体挠度观测	(70)
§ 6-2 倒垂线及多点倒垂装置	(73)
§ 6-3 铅垂仪及其在垂准测量中的精度	(77)
§ 6-4 引张线测定水平位移	(81)
第七章 前方交会	
§ 7-1 概述	(86)

§ 7-2	测角交会	(86)
§ 7-3	测边交会	(91)
第八章 精密导线法		
§ 8-1	概述	(94)
§ 8-2	测角量边导线的布置和设备	(94)
§ 8-3	测角量边导线的平差计算	(96)
§ 8-4	测角量边导线的精度分析	(101)
§ 8-5	弦矢导线	(102)
§ 8-6	激光导线	(104)
第九章 激光准直		
§ 9-1	波带板激光准直原理	(106)
§ 9-2	大气折光及真空管激光准直	(110)
§ 9-3	波带板激光准直的应用	(114)
第十章 近坝区水平位移观测的监测网		
§ 10-1	概述	(118)
§ 10-2	监测网的优化设计	(118)
§ 10-3	权的估计	(124)
§ 10-4	监测网的可靠性	(128)
§ 10-5	监测网优化示例	(133)
§ 10-6	三维监测控制网	(134)
第十一章 变形分析		
§ 11-1	变形分析的基准	(141)
§ 11-2	点位稳定性分析	(147)
§ 11-3	变形模型的统计检验	(159)
§ 11-4	变形观测的物理分析	(169)

第一章 概 论

§ 1-1 大坝安全监测的重要意义

大坝安全运行对国家和社会至关重要，大坝失事会造成一场灾难。大坝失事的原因可能是多方面的，但对监测工作重视不够无疑是重要原因之一。法国的马尔巴塞拱坝，由于没有很好地设置观测仪器，致使失事之前未能争取有效措施，而导致大坝彻底崩溃。

最近一二十年来，世界各国都加强了大坝安全监测工作，并积累了不少经验，对于防止大坝事故的发生起了很好的作用。例如高为88m的梅山连拱坝，于1962年11月6日发现右岸大面积漏水，在此之前发现13号垛垂线读数向下游增大19.6mm，向左增大14.5mm，到11月7日向左突然增大至39.5mm，9日又增大到43.6mm，逐将水库放空，加固大坝，1965年再次蓄水至今，运行情况良好。佛子岭连拱坝通过长期观测，发现13号垛的沉陷量为9.6mm，比其他坝段大2mm左右。经查明，该处基础有破碎带并有倾向下流的夹泥层，后将水库放空进行基础处理，才使大坝能经受住1969年漫过坝顶高达2.18m而持续时间长达25小时之久的特大洪水的考验。瑞士高为156m的佐伊采尔混凝土拱坝，竣工20年后，大坝及基础突然开始变形，1976~1980年坝顶沉陷达10cm，两岸距离缩短了5cm，拱冠顶向上游移动9cm。放空水库后发现坝体有裂缝。经查明，变形的主要原因是离大坝1.5km、比坝低320m处开挖了一条用以排放地下水的隧洞。停止开挖隧洞以后的观测表明，变形有所减小。苏联高为46m的什洛柯夫土石坝，到1971年为止，坝顶沉陷达74cm，水平位移达96cm，通过观测而及时发现了问题，并相应地采取了加固措施。1985年6月12日凌晨，离三峡坝地仅27km的新滩产生了大滑坡。由于对其进行长期的监测，从而及时准确地作出了预报，人员无一伤亡，最大限度地减少了财产损失。

建国40年来，我国部分大坝已开始进入老龄期，最为典型的是丰满大坝。该坝位于吉林省第二松花江上，1937年开始修建，1942年蓄水，是一座高为91m、长为1080m的混凝土重力坝。该坝混凝土绝大部分在日伪时期浇注，质量差，1943~1945年期间浇注的混凝土质量尤为低劣，加之该坝地处严寒地区（一年有5个月的平均气温低于零度），混凝土冻融破坏严重，老化加剧，由观测结果发现，坝面已多处局部隆起，1986年8月6日泄洪时，12~13溢流坝段坡面又被冲刷破坏800多平方米，冲走混凝土2000m³，1987年汛前抢修完成，目前正在全面加固，并加强观测。可见，为了防止事故的发生，必须加强对病坝险坝的观测。

综上所述，大坝安全监测是防止大坝发生灾难性事故的重要手段。第Ⅶ届国际大坝会议指出：研究水工建筑物，包括大坝变形，乃是目前能说明大坝实际情况唯一可靠的方法，而确定这种状况的因素，通常在设计过程中难以探明。

因此，我国在混凝土重力坝设计规范和混凝土拱坝设计规范中都编写了“观测设计”这一章。例如混凝土重力坝设计规范第173条指出：混凝土重力坝应根据下列要求，并考虑坝的

等级、坝高、地质、坝型等条件，设置必要的观测设备。

- (1) 监视大坝运行安全；
- (2) 掌握施工期大坝状况，满足施工需要；
- (3) 检验设计的正确性；
- (4) 为科学研究提供观测资料。

综上所述，大坝在施工期和运行期进行安全监测，可以对大坝的状况、设计质量、施工质量和计算参数作出合理的评价。这就是说，大坝安全监测是监视大坝运行、验证坝工设计的一个重要手段。

大坝安全监测包括变形、应力、应变和渗流、渗压等项观测。由于变形观测提供的变形量比较直观，数据处理与分析比较简便，所以都将变形观测作为大坝安全监测的重点。

本书讨论大坝变形观测的各种方法、手段以及它们所能达到的精度。此外，本书也讨论变形观测设计中的有关问题。

§ 1-2 我国变形观测的发展概况

50年代初期，我国在丰满混凝土大坝开展了水平位移和垂直位移观测，随后又在淮河上的佛子岭、梅山、响洪甸等大坝以及上犹江、流溪河、三门峡、新安江等混凝土大坝进行了水平位移和垂直位移等项变形观测工作。当时观测大坝的水平位移主要采用光学基准线法和交会法，观测垂直位移主要采用精密水准法。1964年在新安江水电站召开了首次水工建筑物原体观测学术讨论会。到会专家与学者介绍了各自在变形观测方面所取得的试验研究成果。会议前后，从国外引进垂线和引张线等观测技术。同时在国内也积极开展观测技术和观测方法的研究工作。

近十年来，观测技术和观测仪器有了很大的发展。1976年10月底，安徽省水利厅主持召开了接触式遥测垂线坐标仪的鉴定会，在此前后一二年内，长江流域规划办公室主持召开了数次葛洲坝变形观测设计科研讨论会，邀请专家讨论并审查了葛洲坝工程的变形观测设计。这些会议说明了我国变形观测技术和设计工作已达到了相当高的水平。葛洲坝能安全渡过1981年的长江特大洪水，安全监测工作发挥了重要的作用。

70年代末和80年代初，随着激光技术的发展，激光准直方法也相继应用于大坝观测中。例如：武汉测绘科技大学在刘家峡电站安装了两套长各为156m和171m的波带板激光准直系统，长江流域规划办公室研制的JZB-800型波带板激光准直系统，安装在葛洲坝二号船闸的廊道中，精度都达到了 1×10^{-6} 的量级。1981年，水电部东北勘测设计院在太平哨大坝建立了我国第一套真空激光观测系统，全长557m，随后又在丰满大坝建成了长为1000m的真空激光观测系统。这种系统既能测水平位移，又能测垂直位移。1987年已实行了自动化遥测，精度可达 $3 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-7}$ ，是目前国内精度最高的一种准直方法。该系统于1988年10月9日通过鉴定。

在该时期内，国内有关工厂也生产了多种光学观测仪器。如南京测绘仪器厂生产的SD-65大坝视准仪，既适用于活动觇标法观测，又适用于小角法观测，也可进行垂直位移观测，其精度与T₂经纬仪大致相当。四川水电设计院研制的FCP-A型多用式强制对中基座，通用性好，有利于提高观测精度。东北勘测设计院等单位所研制的JQL-50型两用仪，既可用于

垂线观测，又可用于引张线观测，精度也较好。该院还研制了双丝(钢丝及铅丝)金属标及三维垂线。此外，武汉地震研究所研制的CG-2A垂线观测仪更具有特色，它可同时读出 x 、 y 方向的偏离值，精度可达 0.1mm 。武汉地震研究所与长江流域规划办公室合作研制的遥测水管倾斜仪，已在葛洲坝二江泄水闸使用，精度高，效果良好。

随着国内拱坝的增加，拱坝的观测技术也获得了新的发展。在拱坝观测上，白山拱坝首先采用了布置在廊道中的导线来观测水平位移，随后东江、龙羊峡等拱坝以及丹江口重力坝也相继采用，效果良好。由于观测的方法不同，导线又分为测角量边导线和弦矢导线，从发展趋势看，弦矢导线更具有生命力。

近几年来，我国自制的遥测仪器有了很大发展。其中南京自动化研究所研制的电容感应式遥测垂线坐标仪、福建水电开发公司生产的步进马达式遥测垂线坐标仪，已在一些大坝上使用。另外，南京自动化研究所和南京自动化设备厂还研制了YZ-1型引张线遥测仪。

由于水电部门引进了几台高精度的ME3000测距仪，这样就有可能在电站布设高精度变形观测边角网，以观测近坝区的变形，同时也给校核基准线端点、导线端点以及倒垂的稳定性提供了可能。随着竖角观测精度的提高和测距仪的广泛使用，对位于山区的变形监测网，可采用三维网平差。三维网的平差包括水平角、斜距、竖角、垂线偏差、折光差等观测数据和未知量。有的坝(如白山、清江隔河岩等拱坝)已采用三维网作为变形监测网。

近年来，全球定位系统(GPS)已逐步运用到工程测量中来。一个明显的用途是监视大坝的安全。例如，一系列的天线能永久地安置在大坝顶上，每天进行观测，并将观测结果用电话传输到数据处理中心。使用这种系统，大坝上测点的三维坐标，有可能被监测到毫米级精度($1\sim 3\text{mm}$)；而且可以自动检测，对大坝的变形过程提供预报。

80年代以来，全国相继召开了外部观测经验交流会、拱坝观测技术经验交流会、激光准直经验交流会。如1982年召开了第二次混凝土坝工建筑物原型观测学术讨论会，1984年召开了大坝外部观测技术讨论会，1985年召开了水工建筑物观测情报网大会暨学术讨论会，1986年10召开了观测设计经验交流会，1987年又召开了大坝安全监测及资料分析学术讨论会。这些会议的召开，标志着我国变形观测技术已达到了新的水平，对于提高我国大坝安全监测技术和资料分析水平，起到了很好的促进作用。

为了提高变形观测的技术水平和推广资料分析的方法，在水电部的支持下，河海大学、武汉水利电力学院及其他有关部门均举办过外部观测及资料分析研究班和短训班。

为了使观测工作有章可循，1986年水电部颁发了《混凝土坝观测仪器设备系列型谱》，1987年水电部颁发了《水电站大坝安全条例》，《混凝土大坝安全监测技术规范》也已送审。

为了协调大坝安全监测工作和大坝安全监测科研规划的制订和执行，1983年9日在北京成立了属水电部科技司领导的“水电站大坝安全监测技术组”。该技术组负责制定大坝安全监测科研规划，并付诸实施，同时还指导全国大坝安全监测的技术工作。经水电部批准，在杭州成立了“水电站大坝安全监察中心”。其任务是对部属水电部大坝安全监察工作实行领导。为了加强观测工作的学术交流，1982年成立了“水工建筑观测情报网”，1987年又成立了“水力发电学会运行分会”。

回顾我国变形观测的历史，我们对变形观测工作的前景充满信心。可以相信，在水电部的领导下，在观测界同行的共同努力下，我国的变形观测工作一定能取得更大的成绩。

§ 1-3 变形观测的频率与精度

一、变形观测的频率

变形观测的频率与所测项目、测点所在部位的重要性、观测目的以及观测一次所需时间长短有关。

第一周期的观测有特别重要的作用，因为延误第一周期的观测可能会丢失已经发生变化的重要数据，所以，应组织好第一周期的观测。水库开始蓄水后，有时应该每隔几天或库水位每上升5~10m就进行一次观测。在特殊情况下，如特大暴雨、水位猛涨及地震等，应该每天进行观测。例如1981年长江百年一遇特大洪水，葛洲坝的监测工作者日夜坚守岗位，及时、准确地向上级有关部门报告与大坝安全有关的数据。大坝运行期间各观测周期应尽可能在每年相同的条件下进行(例如在一年内相同的季节、库水位相同条件下进行观测)，在这种情况下，弹性变形以及某些系统误差不致使研究变形衰减的过程变得复杂化，这也会给今后的资料分析带来方便。

时效变形停止以后(有的大坝这一过程可能要延续5年以上)，大坝可以按正常的周期进行观测。这时的观测就是为了证实时效变形已经停止及大坝的工作是正常的。瑞士的佐依采尔拱坝的事故和我国梅山、佛子岭连拱坝以及丰满重力坝所发生的事故都说明这一时期的观测仍然是很重要的，必须继续定期进行观测。

根据规范的规定，各项目各阶段的观测周期如表1-1所示。

表1-1

测次 项目	各阶段 第一次蓄水前	第二次蓄水期	第一次蓄水期后 的头5年运行	第一次蓄水期后 运行超过5年以后
水平位移	1次/旬—1次/月	1次/天—1次/旬	1次/旬—1次/月	1次/月—1次/季
垂直位移	1次/旬—1次/月	1次/天—1次/旬	1次/旬—1次/月	1次/月—1次/季
挠度	1次/旬—1次/月	1次/天—1次/旬	1次/旬—1次/月	1次/月—1次/季
倾斜	1次/月—1次/季	1次/旬—1次/月	1次/月—1次/季	1次/季—1次/年
大坝外部接缝、裂缝	1次/旬—1次/月	1次/天—1次/旬	1次/旬—1次/月	1次/月—1次/季
近坝区岸坡稳定	1次/季—1次/年	1次/月—1次/季	1次/季—1次/年	1次/年—1次/3年

二、变形观测的必要精度

变形观测的精度是一个极为重要的问题。它决定着观测方法和观测仪器的选用，各种技术措施的制订，甚至还可以影响到观测技术的发展。应该说，合理的变形观测精度指标，取

决于必要性和现实的可能性。精度要求过高，将使观测工作更加复杂，费用更大，精度规定太低，又不可能得出有关大坝变形的正确信息。然而随着科学技术的发展，变形观测的精度也应逐步有所提高。

对于变形观测的精度指标问题，目前还没有真正解决。有的作者认为应以允许变形值的若干分之一作为精度指标。这一原则在大坝变形观测中应用有实际困难。首先，大坝的允许变形值，目前很难给出一个确切的数字。这是因为大坝基础的实际弹性模量往往比计算时所取用的弹性模量大得多，因此，计算出的允许变形值不可能太可靠。另外，为了监视大坝安全，必须观测出大坝在正常情况下的一般变形规律，只有观测出一般变形规律，才能及早地发现异常现象，通过分析判断，找出异常的根源，采取必要措施，防患于未然。因此，必要的精度指标，应该用大坝在正常情况下的一般变形规律的变形量来确定。

由几十年来大坝的实测资料可知，大坝的一般变形规律是：首次蓄水的最初几年，存在着不可逆的时效变形，在以后的正常运行期，大坝变形主要受温度和水位的影响，大致以年为周期，呈近似于正弦曲线型的弹性变形，其变形幅度(即变形量 Δ)随年温差、坝型、坝高以及部位等有所不同。例如苏联高为242m的萨扬-舒申斯克拱坝，坝顶拱冠处最大位移，包括不可逆的时效变形共为60mm，基础位移为18mm。这样看来，必要的精度指标，也不应该是一成不变的。为此，苏联萨扬-舒申斯克大坝，规定坝顶水平位移的必要精度为3mm，而基础的必要精度为1mm。

因此，各个国家对变形观测必要精度的规定都有所不同，即使同一国家，随着温差、坝型、坝高等的不同，其必要精度也有所不同。规范中规定得比较笼统，如苏联的《水工建筑物及其基础的变形观测规范》(见表1-2)。

表1-2

观 测 项 目	测定变形的中误差(mm)	
	垂直位移	水平位移
岩基上的混凝土坝	1	1
软基上的混凝土坝	2	2

我国的《混凝土大坝安全监测技术规范》，对必要观测精度的规定见表1-3。

表1-2所规定的是绝对误差，而表1-3中的规定，有的属于绝对误差，有的则可能属于相对性的误差。根据文献*记载，瑞士高为153m的库涅尔拱坝，根据倒垂锚块所测成果，在坝基下28m处仍有4mm的位移。因此，如果将倒垂观测成果作为绝对位移，必须将倒垂锚块埋到足够的深度，否则其所测位移只能是以倒垂为基准的相对位移。有的国家(如苏联)规定，相对性的位移，精度应比绝对位移的精度高出1~2倍，混凝土坝及其基础的相对变形误差0.2~0.3mm。

§ 1-4 变形观测设计的若干问题

大坝变形观测涉及的问题很多，变形观测设计人员除了懂得本专业的有关知识以外，还

* A. A. Карлсон, измерение деформаций гидротехнических сооружений, 1984

表1-3

项 目			移位值中误差限值	
水 平 位 移	坝 体	重力坝		$\pm 1.0\text{mm}$
		拱 坝	径向	$\pm 2.0\text{mm}$
			切向	$\pm 1.0\text{mm}$
	坝 基	重力坝		$\pm 0.3\text{mm}$
		拱 坝	径向	$\pm 1.0\text{mm}$
			切向	$\pm 0.5\text{mm}$
坝体及坝基垂直位移			$\pm 1.0\text{mm}$	
坝体及坝基挠度			$\pm 0.3\text{mm}$	
倾 斜	坝 体		$\pm 5''.0$	
	坝 基		$\pm 1''.0$	
坝体表面接缝和裂缝			$\pm 0.2\text{mm}$	
近 坝 区 岩 体	水 平 位 移		$\pm 2.0\text{mm}$	
	垂 直 位 移	坝 下 游	$\pm 1.5\text{mm}$	
		库 区	$\pm 2.0\text{mm}$	
滑 坡 体 和 高 边 坡	水 平 位 移		$\pm 0.5 \sim 3.0\text{mm}$	
	垂 直 位 移		$\pm 3.0\text{mm}$	
	裂 缝		$\pm 1.0\text{mm}$	

应尽可能掌握一些坝工和工程地质知识。此外，变形观测设计还应考虑以下几个问题：

(1) 大坝安全监测的主要目的是利用变形、应力应变和渗流渗压等观测来监视大坝的安全。从大坝安全监测的角度出发，当发现变形观测成果异常时，应及时对应力应变和渗流渗压观测成果进行分析，并作出适当处理，以确保大坝安全。

大坝变形观测设计应考虑今后资料分析的需要，认真考虑应在哪些部位设点观测，才能提供资料分析中所需要的数据，以便建立确定性模型和统计模型，使观测方案能满足预期目标。同时，大坝安全监测还为了合理地、科学地分析大坝各部位的结构性态，在设计时要考虑到通过观测来提供改善施工及运行条件的数据。

(2) 变形观测设计人员应很好地熟悉设计对象, 了解枢纽地区的水文、气象、地形、地质及地震(也包括重力异常分布)等条件, 特别是要了解坝工设计及大坝基础的地质条件, 这样才能使观测设计有一定的针对性, 并掌握哪些是重点观测部位, 哪些是一般观测部位, 做到有的放矢, 以满足安全监测的要求。

(3) 大坝安全监测要求测定整个建筑物的变形, 为此, 应在适当位置布设一定数量的测点, 测定这些点的变形来表征整个大坝的性态。变形观测设计的原则应该是: “全面研究, 总体布置, 分期分批实施, 从高级到低级, 建立总体和局部的可靠联系, 确保观测系统的可靠性和完整性”。

在工程初步设计阶段, 坝体及基础监测系统的设计应有个总体方案。它是不同的方案、不同的观测方法通过可靠性、连续性和合理性等论证后, 从中优选出来的最优方案和观测方法。不言而喻, 这个方案应该做到: 观测项目简化、测点少而精, 在施工和运行期都能连续进行观测, 精度高而造价不太高。

(4) 采用行之有效的观测方法和设施是保证设计可靠的前提。对大坝变形观测所采用的方法、仪器仪表和设备有几点要求: ①观测精度要求高; ②操作简便, 使观测人员易于迅速掌握, 观测一次所需时间要短; ③观测仪器必须具有高度可靠性和连续性; ④观测仪器的操作记录、数据的校核、筛选、计算及各种过程线的绘制均应逐步做到自动化。

在40~50年代, 人们普遍采用大地测量方法来测定大坝变形。这是因为: ①能全面控制, 并可测得绝对位移值; ②具有多功能性; ③可以自定基准面; ④可以评定其测量精度。但该法的缺点是需要有熟练的大地测量人员和较长的观测周期。

到了60年代中期, 普遍推广使用正、倒垂线、引张线(包括连续引张线)、光学基准线、激光准直(包括激光波带板衍射大气三点法、真空管道法和棱镜折射准直)、水管式倾斜仪、静力水准、几何水准、精密导线(测边量角导线和弦矢导线)等。它们的特点是: ①不要太长的观测周期; ②操作较为简便, 易于掌握; ③能及时在现场提供大坝性态的有关信息; ④容易借助于数字化系统储存或传输信息。其缺点是: 观测点只能设在特殊位置上, 各测点的观测值不能构成一个通用独立系统。

自高精度红外测距仪ME3000(精度为 $0.2\text{mm} + 1\text{ppm}$)问世, 70年代水电部门引进以来, 高精度边、角网在大坝变形观测中就得到了广泛使用。

对大坝观测的新仪器和新方法, 只要经过技术鉴定, 确认其各项技术指标达到设计要求, 能连续使用的, 就可以在设计中采用。

(5) 要重视变形监测网的设计。变形监测网有相对网和绝对网两种基本形网:

相对网 假设各控制点均在变形范围以内, 即都是动点, 此时, 只能确定其相对位移。

绝对网 假定在全部控制点中有部分点位于变形区以外, 将其作为不动点, 用作确定形体上各点绝对位移的参考点(拟稳点)。当重复观测后, 比较各点各测次坐标值和高程值, 用以肯定各参考点的稳定性, 并同时测定形体上各点的相对位移和绝对位移。

在变形监测网的优化设计时, 首先应该对网进行一类优化(图形优化)设计, 并顾及可靠性研究。在水利枢纽地区, 由于地形所限和施工干扰, 对网点的选择余地不多, 因此控制网的图形以边角网为宜。高山区可考虑布设同时测定水平方向斜距和天顶距的三维网。对于高程网, 基点应选在没有施工干扰及水库建成蓄水后对基点的稳定没有影响的岩基上。

(6) 由于各次观测值都是和首次观测值进行比较,以求得其变形量,因此首次观测值正确与否,直接影响到全部变形值的精度。首次观测值不一定是第一次观测值,设计时应考虑并作出规定,针对不同项目的不同情况在什么时间段内进行若干次观测,然后将其进行分析,从中选用最优的一次或几次观测的平均值作为首次观测值。

(7) 各单项设计应区别对待,各不同建筑物或同一建筑物的不同部位应观测的项目、方法和测点的多少,应因地制宜区别对待。

变形观测在整个监测系统中有相对独立性,但在设计中仍应在整体考虑与应力应变、渗流渗压等观测互相协调,以满足资料分析的需要。

(8) 设计时应为今后的自动化留有余地,这就要求所选用的仪器和方法应便于今后的自动化。在廊道和必要的地方留有一定的空间。但是,对于自动化不能全面铺开,只宜集中力量在大坝的需要部位布设,待取得实际效果后,再逐步推广,切忌操之过急。

以上是变形观测设计中应注意的问题,一个好的变形观测设计,大致应满足上述各点要求。

§ 1-5 混凝土重力坝变形观测设计实例

一、太平哨重力坝

太平哨重力坝坝顶长度为547m,最大坝高为40m,坝顶高程为196m。大坝共分36个坝段,0~3及24~25坝段为挡水坝段,3~23坝段为溢流坝段。

坝内有两条纵向廊道,即灌浆廊道(底高程为156m)和观测廊道(底高程为176m)。

该坝的水平位移观测系统为倒垂加基准线(光学准直、引张线及真空激光准直)即以光学准直法、引张线及真空激光准直观测大坝不同高程不同部位的水平位移,并以倒垂作为上述基准线的控制。大坝垂直位移观测也分两级控制,以坝址下游的一等水准环线作为一级控制,再以此来观测各高程不同部位的垂直位移。

按设计规定,确定水平位移的中误差应小于1mm。垂直位移的精度为:工作基点相对。于水准基点的中误差应小于1.5mm;垂直位移观测点相对于工作基点的中误差应小于1mm

(一) 水平位移观测系统的布置

(1) 光学基准线布置在坝顶,全长约600m(图1-1),挡水坝段的测点布置在坝轴线上,高程为195.25m。溢流坝段的测点布置在坝轴线上游3.5m处,高程为194.85m。每坝段设一个测点,共36个测点。在左、右岸山坡分别设立工作基点A、B,并在A、B点附近设立倒垂作为校核工作基点的依据,A点(即左岸)倒垂锚块的深度23m,为B点(即右岸)倒垂锚块的深度为34m。

采用T₂经纬仪以测小角法进行观测,每个端点观测一半测点的偏离值,所以测点最远距离约有300m,观测中误差应小于1mm。

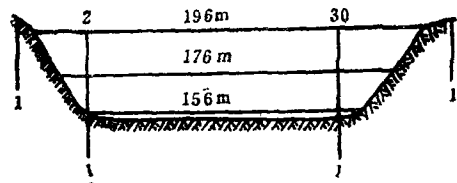


图1-1

(2) 引张线布置在176廊道内(图1-1),从第2坝段到第30坝段每坝段各设一测点,

全长约430m。引张线的端点分别布置在第2、第30坝段(引张线观测精度为0.5mm),并与该两坝段的倒垂相连,倒垂锚块的深度为10m。2°坝段倒垂线的长度约40.5m,30°坝段倒垂线的长度为43.8m,并分别在基础廊道、观测廊道、浮筒室(位于坝顶附近)设置垂线观测站籍以观测大坝挠度。垂线观测的精度为0.2~0.3mm。

(3) 真空激光准直系统布置在高程为195.65m的坝面,全长为557m,距坝轴线为6.65m,在全坝36个坝段中有13个坝段各设置一个测点,共13个测点。激光发射端设置在右岸观测室内,接收端设置在左岸观测室内。为了校核两端观测平台(即点光源和探测器)的变位,在观测平台上各设有一个倒垂和双金属标,分别作为平面和垂直校核基准点。

(二) 大坝垂直位移观测系统的布置

(1) 在坝址下游区5km的范围内布置了I等水准环线(图1-2),全长约10km。I太₁及I太₁₀为大环的基点组,I太₀、I太₁₁为长期观测大坝垂直位移的小环的双金属基点,即工作基点。其他7个水准标点作为下游变形区的沉陷标点,间距为1~3km。

(2) 坝体垂直位移观测路线分为两条。

一条布置在坝顶,另一条布置在基础廊道。采用国产因瓦带尺竖直传递高程,从坝面传到基础廊道组成II等精密水准路线。

在坝顶上每一坝段设一垂直位移观测点。各测点位于坝轴线上游1.5m与各坝段中心线的交点处。自I太₁₁经由坝顶各测点至I太₀组成坝内附合水准路线。

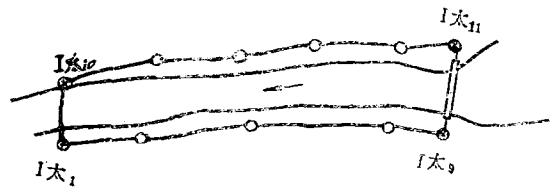


图 1-2

自坝顶垂直位移测点“坝沉30”采用竖直传递高程经“基沉30”(基础廊道30坝段测点)至“基沉3”,再传递至坝顶“坝沉3”组成基础廊道附合水准路线。基础廊道中其他观测点组成两条支水准路线,应往、返进行观测。

另外,在大坝基础廊道的5、10、20、29坝段有横向廊道,利用横向廊道观测坝体倾斜及基础的转动。每条横向廊道设两个测点。

二、苏联克拉斯诺雅尔斯克重力坝

克拉斯诺雅尔斯克重力坝高120m,坝顶长1065m。全坝共分75个坝段。坝体内有供观测用的纵向和横向廊道。按规范规定,确定变形观测的中误差应小于1mm。

(一) 水平位移观测系统的布置

坝顶采用光学基准线观测水平位移,端点由倒垂控制(锚块深度为20~40m)。为使基础廊道及高出基础40m廊道中引张线2与坝顶光学基准线3相连,在37、54坝段设置了正垂线5。此外,在22坝段设置了通向坝顶的倒垂线组6,这样就增加了基准线的控制点,缩短了基准线的长度,相应可提高观测精度。顾及37、54坝段的正垂线,实际上把坝顶基准线分成了四段。光学基准线的端点位置由倒垂核。在12、37、45、52、54坝段,也布置了倒垂线或倒垂组4(每组两个倒垂)。

克拉斯诺雅尔斯克大坝变形观测的布置如图1-3所示。

(二) 垂直位移观测系统的布置

由水准基点和工作基点所组成的水准环线，在大坝下游沿叶尼塞河两岸敷设，水准基点设置在大坝下游1.8km处的两岸，标志埋设在岩基上。

大坝的垂直位移观测在(基础灌浆廊道和高于基础20m、40m的两个廊道)三个高程上进行，采用精密水准测量方法进行观测，规定垂直位移的中误差为1mm。

测定大坝的垂直位移还采用电控的固定式静力水准系统，布置在高程有变化的纵向廊道中。纵向廊道全长795m，分作10段，每段单独布置连通管，通过一双重叠的标志将每段的连通管连接起来，并认为这对标志的垂直位移相同。静力水准系统通过横向廊道的下游面出口与工作水准基点相连接。静力水准系统确定垂直位移的中误差为0.1mm。

从上述两坝变形观测的布置可知，对于近坝区岩体的水平位移观测，并没有采取一定的措施。按我国《混凝土安全监测技术规范》规定，一、二级大坝应有此项目。

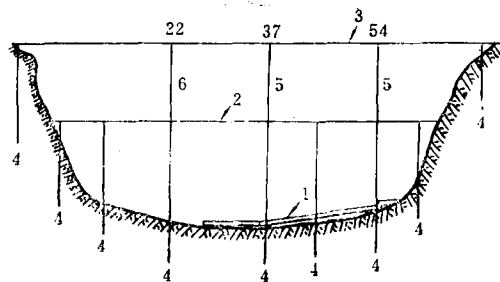


图 1-3

§ 1-6 混凝土拱坝变形观测设计实例

水准方法是观测重力坝水平位移的较好方法，但用以观测拱坝的水平位移则不理想。例如我国的陈村拱坝，虽布置了五条基准线，但仍只能测出四分之一拱处的径、切向水平位移和拱冠处的径向位移。因此，拱坝水平位移的观测，应该是倒垂加精密导线，将不同高程廊道中的导线与垂线连成垂线导线网。另外，按规范的规定，一、二级大坝必须布设近坝区变形观测边角网。一方面用以观测近坝区岩体的变形，另一方面也用以检验导线端点的稳定性。拱坝垂直位移观测的布置原则与重力坝相同。

下面介绍两座拱坝的变形观测布置：

一、白山拱坝

白山水电站位于吉林省桦甸县和靖宇县交界的第二松花江下游，大坝为三圆心混凝土重力拱坝，最大坝高149.5m，坝顶高程423.5m，顶宽9m，最大底宽63.7m，坝顶弧长463.5m。全坝分为40个坝段。在14~20坝段，交替设置了四个高孔和三个中孔为泄洪孔。大坝除基础廊道以外，还分别在高程为312m、325m、340m、375m和418m处设置了廊道。

根据有限元计算，白山大坝基础和位移为8mm，实测结果约为9mm。

(一) 水平位移、挠度观测的布置

白山拱坝由8组垂线、三条导线组成导线垂线网(图1-4)，作为全面观测基础、坝体水平位移以及坝体挠度的主要手段。并以下游联系边角网及前方交会作为校核手段。

(1) 垂线 8组垂线中，21坝段的倒垂仅到312m廊道，2、17、36坝段的垂线由基础直通坝顶，其余4条(位于6、10、26、32坝段)通到418m廊道。由于受到坝剖面的限制，较高坝段均采用正、倒垂结合设置。每条垂线在经过各高程廊道处均设垂线测点。8组垂线中，7坝段是拱冠典型坝段，26坝段是地质条件差的坝段，其余6组主要用于测定三条导线端点

的位移，倒垂线锚块深度为47m。32坝段倒垂线，设有三个不同深度的倒垂，形成倒垂组，以测定岩基不同深度的变形。

(2) 导线 在312m、375m、418m高程的三条纵向廊道中，各设一条导线。导线端点分别设在10、21坝段，6、32坝段，2、36坝段。三条导线的长度分别为267m、360m、648m。中间每隔16m(或18m)设一测点。

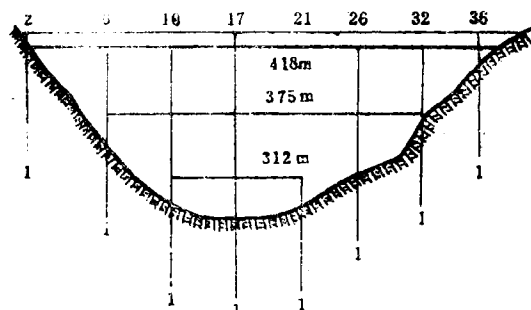


图 1-4

(3) 前方交会 在大坝下游面的四个高程位置部分坝段设置了32个测点，用下游两岸距大坝约100m的 C_3 、 C_4 两工作基点(参见图1-5)以前方交会法观测每一测点的径、切向位移，作为水平位移的校核手段。为校核工作基点的稳定性，另设 C_0 、 C_1 、 C_2 三个校核基点，共同组成下游平面控制网。该网还可兼测下游地区的基岩变形。

(4) 联系边角网 将下游控制网 C_3 、 C_4 两点与2、17、36坝段引至坝顶的倒垂组成为边角网进行联测(图1-5)，以检核倒垂锚锭和下游控制点的相对变形规律。

(5) 倾斜观测 在14~19河床坝段282m排水廊道和相距33m的基础灌浆廊道分别设墙上水准标志，用精密水准法测定这些点的高差变化，以换算径、切向转动角。

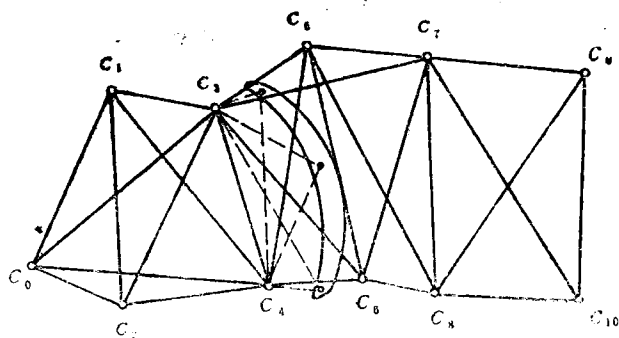


图 1-5

(二) 垂直位移观测的布置

在大坝下游3.5km处设一组水准原点(IS_1)，共4个，两个岩基标，两个双金属标，在312m、420m高程两岸近坝处各设一组工作基点(IS_4 、 IS_5 、 IS_6 、 IS_7)，并在距大坝700m的跨江桥两岸各设校核基点 IS_{11} 及 IS_{12} 。七组基点连同中间的过渡点组成有五个闭合环和一条支线的精密水准网，除校核工作基点外，还能观测下游地区的基岩垂直位移。精密水准网的布置如图1-6所示。

坝体垂直位移观测采用精密水准法。沿基础廊道每坝段设一测点，在312m、375m和418m高程三纵向廊道的导线点上均设水准标志，作为垂直位移测点。连同312m和418m廊道入口处到导线端点之间的坝段增设部分过渡测点，组成六条水准路线，在坝内形成三个闭合环，可以校核成果的正确性。

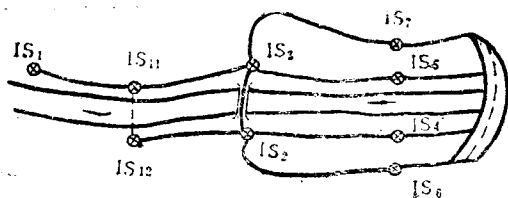


图 1-6

(三) 上、下游近坝区基岩变形观测

水准网是观测大坝下游地区基岩垂直位移的手段。由于联系边角网同时也观测了天顶距将其按三维网进行平差，则可以确定大坝上、下游地区2km范围内的水平位移和垂直位移。

按设计要求，白山拱坝提出了以下观测精度指标和观测频率：

- 垂线观测中误差 $<0.2\text{mm}$;
- 导线最弱点位移中误差 $<3\text{mm}$;
- 三角网测角中误差 $<0.5''$;
- 水准网每公里中误差 $<0.5\text{mm}$;
- 垂直位移最弱点中误差 $<1.0\text{mm}$;
- 水准法测转动角中误差 $<1.5''$;
- 垂线观测每半年一次;
- 导线法位移、水准法垂直位移、转动角每月一次;
- 三角网、水准网、每年两次(最高、最低水位各一次)。

二、苏联萨扬-舒申斯克拱坝

萨扬-舒申斯克重力拱坝高为245m，坝顶长1066m，坝顶宽25m，坝底宽102m，共分60个坝段。设计任务书提出的精度要求为：

大坝和基础水平位移的中误差为1mm；坝顶拱冠处水平位移的中误差为3mm；大坝和基础垂直位移的中误差为1mm。

(一) 水平位移观测系统的布置

变形观测系统的布置如图1-7所示。

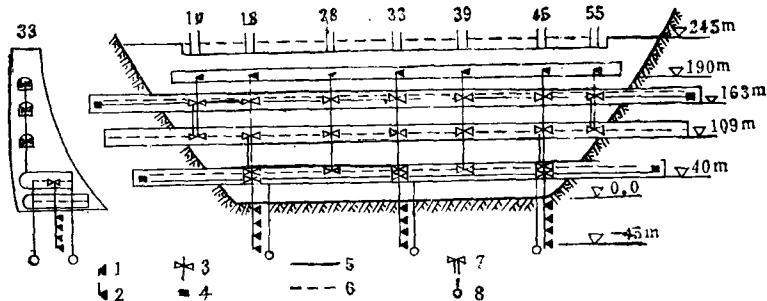


图 1-7

- | | | |
|--------------|-----------|-----------|
| 1—正垂线固定点; | 2—倒垂锚块; | 3—垂线的读数站; |
| 4—导线控制点; | 5—导线; | 6—静力水准系统; |
| 7—与测高仪结合的正垂; | 8—深埋水准点组; | |

(1) 坝体的水平位移由精密弦矢导线观测。导线布置在高程为40m、109m和163m的廊道和平洞中，平洞的深度为70~100m，平洞的末端为导线的端点，即为其位置不改变的起始点。由40m高程平洞末端的观测表明，导线端点的移动小于1.5mm，在观测精度范围以内，可认为端点不动。

(2) 在大坝的七个断面上，利用正垂确定其水平位移，正垂顶端悬挂在190m高程的廊道顶上。正垂读数站位于高程为40m、109m、163m的导线点附近，故可认为两者的位移相同，从而可以互相校核。

(3) 在18、33、45坝段各埋设一个倒垂组，用以确定基础的位移。这些倒垂是正垂的延长，每组倒垂有四个不同深度的锚块。最浅者在坝基附近，最深者在坝基以下44m处。这些倒垂组也可对导线的观测成果进行校核。

另外,该坝还采用三角测量法观测大坝与岸坡接触处的变形。

(二) 垂直位移观测系统的布置

(1) 由水准基点和工作基点组成的精密水准路线既可作为坝体垂直位移的控制,又可确定近坝区基岩的垂直位移。高程控制网见图1-8。图中标出了部分水准点。两水准基点组1、2在大坝下游3km处叶尼塞河两岸的水平坑道中。三个水准点为一组,离阳光照射面10m。另外两个水准基点组3、4在大坝下游1.5km处。可从3、4水准点组向40m高程廊道的固定式静力水准系统传递高程。

(2) 大坝垂直位移分别在40m、109m、163m高程的廊道和平硐中进行观测。灌浆廊道在基础以上5m处。为了研究大坝和基础的倾斜,又分别在18、25、33、39和45坝段高程为5m和40m的横向廊道中进行观测。横向廊道观测段的长度为30~57m。

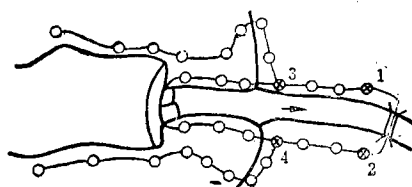


图 1-3

廊道和平硐的垂直位移,借助于固定式静力水准系统进行观测。该系统包括直径为150mm的管子和连接软管。管子的三分之二截面灌满水,利用手提式读数装置进行读数。在每一坝段的两接缝处各设置一个垂直位移标志。

除了40m高程廊道中的静力水准系统与左、右岸的高程控制网相联系外,其余廊道的静力水准系统均由安装在竖井中的测高仪传递高程。

(3) 根据五组深埋水准点观测基础的分层沉陷。在每一组深埋水准点中,埋设了带有锚块的4个水准点。锚块的深度从基础(0m)直至-60m。水准点的首部引至40m高程的廊道中,以便与左右岸的水准网相联系。

综上所述,混凝土重力坝的水平位移观测,一般是基准线(视准线、引张线、激光准直)加正倒垂,组成基准线垂线网,即以基准线观测坝体位移,以垂线检查基准线端点的位移。拱坝的水平位移观测,则是导线加垂线,组成导线垂线网,即以导线观测拱坝坝体的水平位移,而以垂线观测导线端点的水平位移,为了检核倒垂的稳定性,则应采用高精度的边角网或三维网。由于边角网或三维网的观测工作量一般都较大,观测周期也较长,为了节约经费、缩短观测时间,设计时可把监测网分为基本点和扩充点两种。基本点每次都要观测,扩充点则按实际需要进行选测,隔河岩大坝的监测网就采用了这一设计形式。

为了及时而迅速地获得大坝和两岸的变形信息,变形观测设计时,也可考虑观测拱肩处的弦线长度变化及观测谷幅(指大坝附近两岸山坡的张合)变化。这是一种简单易行且效果极好的方法。龙羊峡大坝及隔河岩大坝都采用了这种形式。

混凝土重力坝和拱坝的垂直位移一般采用几何水准测量及静力水准测量。即以静力水准测量或几何水准测量坝体垂直位移,以更高一级几何水准测量控制工作基点的垂直位移。

§ 1-7 垂线变化对观测成果的影响

在大地测量中,垂线偏差是指地面上一点的重力方向和过该点的椭球体法线间的夹角。对大坝观测来说,人们所关心的并不是垂线偏差本身,而是垂线偏差所发生的变化。如果大坝上(或大坝附近)某一点的垂线在不同周期观测时,因某种原因产生变化,必然会反映到观