

三门峡大坝的观测与分析

赵志仁 著

天津科学技术出版社



序 言

中国人民为开发黄河兴利除害作出了巨大的努力,取得了举世瞩目的成就。三门峡水利枢纽工程就是我国在黄河上最早兴建的大型水利水电工程。30多年来,经过原建、增建、改建和扩建,陆续发挥了防洪、防凌、灌溉、供水、发电等综合利用效益。

在三门峡大坝建设过程中,存在着许多技术问题需要研究和解决,为此,陆续开展了原型观测和现场试验工作,取得了数百万个测试数据,为掌握大坝工作性态提供了依据。本书紧密结合生产实际,针对工程需要,对大坝观测的设计、施工、仪器及观测技术进行了总结,对观测成果进行了分析研究,为工程确定合理的设计、施工方案创造了条件,从而保证了工程安全和各种建设项目的顺利实施。书中提出和采用了多种先进的科学技术理论和方法,不仅总结了多泥沙河流上高坝大库径流发电运用的特殊规律,丰富了坝工理论知识,而且所提出的学术观点和技术措施均经过了实践检验,具有重要的应用价值。

大坝是水库的主要建筑物,坝的正常工作和安全运行是关系到经济效益和社会效益的大事,为此有必要加强大坝观测和分析评价工作,一方面利用观测资料对坝体未来性态作出及时有效的预报并控制大坝的合理运用,另一方面通过正分析和反分析,对坝的设计和施工技术进行革新和优化,从而充分发挥大坝观测的作用。本书结合三门峡大坝,全面系统地介绍了这一领域中的技术理论及其应用,具有很高的学术水平。

虽然我国已经出版过几本有关大坝观测的书籍,但至今还未见到象本书这样针对某个具体工程进行全面论述和总结的技术专著,这本书正好填补了这个空白,不仅对三门峡工程是必要的,而且可为其它有关工程借鉴,是非常适合生产需要的一本著作。相信本书的出版将会对这个技术领域工作的开展起到良好的推动和示范作用。

赵志仁总工程师从事大坝安全监测技术工作30余年,主持和完成过许多水利水电工程的安全监测设计、施工、运行和科研项目,发表过大量的学术论文和专著,为我国大坝安全监测工作的开展做出了突出贡献,是我国水利水电工程界知名的学者和专家,借本书出版的机会,对他为三门峡工程作出的重要贡献表示感谢!

水利部三门峡水利枢纽管理局局长、高级工程师

杨庆安

1993年5月

前 言

黄河是一条伟大的河流,被誉为中华民族的摇篮,数千年来,中国人民为征服黄河、兴利除害,进行了不懈的探索,本书即属于这种探索的继续和发展。

三门峡大坝是在黄河干流上建设的第一座大坝,1960年建成蓄水后,发现库区泥沙淤积严重,为延长水库寿命,陆续进行了一系列的增建、改建、扩建等工程,使得效益不断增大,但大坝的性态变化和环境影响也非常复杂,工程运用和设计、施工方案是否合理,需要对大坝进行观测和分析来验证。

为此,在建设过程中,先后安装理设了较多的观测仪器和观测点,30多年来,三门峡水利枢纽管理局的有关人员进行了一系列正常观测,取得了数百万个数据,为了解、掌握大坝的性态提供了依据。本书对大坝观测技术进行了总结,对观测成果进行了分析研究,所提出的学术观点和技术措施均具有普遍意义。

目前我国开展大坝观测的工程较多,但进行系统总结和分析的则较少,这在很大程度上影响了观测效果,因此迫切需要有一本针对具体工程进行总结分析的指导性的参考书。本书在满足三门峡工程需要、解决三门峡生产问题的同时,试图提供一个范例,使得广大的大坝安全监测工作者能参照本书的内容对自己管理的大坝进行相应的总结和分析工作,从而使大坝观测成果服务于生产建设,发挥应有的作用。如果本书能对我国众多的在水利水电部门从事大坝安全监测与安全管理工作的设计、施工、运行、科研和教学人员有所裨益,作者将甚感欣慰。

三门峡大坝观测工作在我国是开展较早的,先后参加过工作的人员较多,其中参加总结工作的人员主要有:天津大坝安全监测研究中心朱化广、吴百进、张晏明、印文豪、赵凤敏、褚德珊;三门峡水利枢纽管理局乐金苟、王天保、赵国民、张秦芳、冀坚、王国松、张冠军、郭宗俊、周建强;本书第四章的第二、三两节由吴百进编写。

三门峡水利枢纽管理局局长杨庆安高级工程师非常重视工程的监测和管理,对本书的出版给予很大支持,并在百忙中为本书撰写序言,作者十分感谢。

本书在出版过程中,得到水利部能源部天津勘测设计研究院及科研所,水利部三门峡水利枢纽管理局及工程管理局,天津大坝安全监测研究中心及天津科学技术出版社的大力支持,在此表示深切的感谢!

限于作者水平,书中难免有不妥之处,欢迎批评指正。

著 者

1993年2月

目 录

第一章 结论	(1)
第一节 观测目的	(1)
第二节 工程概述	(2)
第二章 观测设计与施工	(5)
第一节 观测设计	(5)
第二节 观测施工	(9)
第三节 观测规程	(22)
第三章 观测仪器与设备	(26)
第一节 仪器原理与检验	(26)
第二节 设备原理与检验	(38)
第三节 附件结构与使用	(62)
第四节 电缆选型与连接	(65)
第四章 观测数据处理	(68)
第一节 数据处理方法	(68)
第二节 数学模型的建立	(80)
第三节 观测数据库与分析软件包	(83)
第五章 溢流坝分析	(89)
第一节 坝体变形	(89)
第二节 自由体积变形	(100)
第三节 混凝土应力	(115)
第四节 基岩应变	(122)
第六章 安装场坝分析	(132)
第一节 坝体变形	(132)
第二节 混凝土应力	(141)
第三节 温度	(150)
第四节 扬压力	(156)
第五节 接缝开度	(159)
第七章 排沙底孔分析	(161)
第一节 底孔设计与施工	(161)

第二节	现场与室内试验.....	(166)
第三节	观测与理论计算.....	(171)
第四节	实测结果与数学模型.....	(174)
第五节	综合分析与安全评价.....	(182)

Contents

Chapter I	Introduction	(1)
Section 1	Purpose of dam monitoring	(1)
Section 2	A brief introduction of the project	(2)
Chapter II	Observation design and construction	(5)
Section 1	Observation design	(5)
Section 2	Observation construction	(9)
Section 3	Observation specifications	(22)
Chapter III	Instruments and devices	(26)
Section 1	Principles and testing of instruments	(26)
Section 2	Principles and testing of devices	(38)
Section 3	Structure and application of accessories	(62)
Section 4	Type selection and cable connection	(65)
Chapter IV	Observed data processing	(68)
Section 1	Method of data processing	(68)
Section 2	Formulation of mathematic model	(80)
Section 3	Observed data base and analytic software library	(83)
Chapter V	Analysis of the overflow dam blocks	(89)
Section 1	Deformation of the dam body	(89)
Section 2	Free volumetric deformation	(100)
Section 3	Stress of concrete	(115)

Section 4	Strain of rock foundation	(122)
-----------	---------------------------------	-------

Chapter V	Analysis of the dam blocks for installation	(132)
------------------	--	--------------

Section 1	Deformation of the dam body	(132)
-----------	-----------------------------------	-------

Section 2	Stress of concrete	(141)
-----------	--------------------------	-------

Section 3	Temperature	(150)
-----------	-------------------	-------

Section 4	Uplift pressure	(156)
-----------	-----------------------	-------

Section 5	Joint opening	(159)
-----------	---------------------	-------

Chapter VI	Analysis of the bottom sand-sluicing outlets	(161)
-------------------	---	--------------

Section 1	Design and construction of the bottom outlets	(161)
-----------	---	-------

Section 2	Site and indoor experiments	(166)
-----------	-----------------------------------	-------

Section 3	Observation and theoretical computation	(171)
-----------	---	-------

Section 4	Observed result and mathematic model	(174)
-----------	--	-------

Section 5	A synthetical analysis and safety evaluation	(182)
-----------	--	-------

第一章 绪 论

第一节 观 测 目 的

大坝包括永久性挡水建筑物以及其配合运用的泄洪、输水和过船建筑物等,确保大坝长期安全运行十分重要,如果由于设计施工不当或管理不善造成工程破坏或事故,除工程本身加固处理的费用外,对下游人民生命财产的影响也是巨大的.因此,大坝的正常工作和安全运行是关系到能否取得经济效益和社会效益的大事,为此就必须加强大坝观测和分析,以便掌握大坝的运行性态并对未来性态作出及时准确的预报,从而控制大坝的合理运行,充分发挥工程效益.

一、一 般 目 的

一般来讲,大坝观测和分析的目的可归纳为以下几方面:

首先是监视大坝运行安全.根据观测结果可以了解大坝在正常情况下各种物理量的变化范围和变化规律,在遇到观测值异常或出现不利的发展趋势时,就能及时发现问题并作出判断,从而采取措施防止问题进一步恶化.此外,运用长期积累的观测资料进行大坝未来性态的有效预报也是很重要的,这种预报有可能指出从运行良好变化到严重险情,甚至威胁大坝安全,因而有必要采取改善措施.反之,在保证大坝安全的前提下,可以控制运用条件,以便发挥更大效益.

其次是检验设计的正确性.根据观测结果收集到的信息,有助于考虑现场实际影响条件来修正纯理论计算.坝工设计通常要对各种作用力进行严格的有时是复杂的研究,这种研究通常是以有关材料特性和结构性态的传统假定为基础,这些假定是用来为设计中的未知数或不确定因素提供数据.因此,通过观测和反演分析有助于减少未知数或准确的确定某些影响因素,从而可以提高设计水平,进一步还可通过反馈分析对设计规范、计算方法和坝型等方面进行改进和优化,以取得节省工程量、降低造价的效果,同时也可积累经验、发展坝工科学技术.

再者是改进施工技术,加快施工进度.通常开工前制定的施工技术和措施,并不能肯定是既安全又经济的,现今都采用“观测法”进行施工,这种方法是基于设计在竣工时才能趋于完善的假定而进行的,观测结果不仅可在施工过程中求得设计的合理和完善,而且也可不断地指导和改进施工方法.

此外,大多数新的或改进的施工技术,在没有得到以实际效果为基础的验证之前,难以为设计和施工人员很好地接受,观测结果则可以帮助评价新的或改进的施工技术的优越性.

二、专门目的

对三门峡大坝来讲,其观测和分析工作更具有特殊的专门目的和重要意义.这是因为:

首先,经过一系列的原建、增建、改建、扩建等,使得大坝的性态变化异常复杂,这种情况在国内外都尚无先例,没有现成的经验可循,在建设过程中所采用的设计方案和技术措施的合理性、经济性、可行性均需通过大坝观测和分析来了解和确定,以保证大坝和底孔等结构的正常运行,保证安全发电及各种增建和改建项目的顺利实施,逐步发挥防洪、防凌、灌溉、供水、发电等巨大的综合效益.

其次是“打开底孔、排沙放淤、迳流运用”的方案是一个前人未曾实践过的新课题,存在着很多疑问,要想解决这些问题难度很大,为了通过实践进行检验,必须紧密结合生产实际来开展大坝观测和分析,为大坝的合理运用提供科学依据.

再者是为了总结开发多泥沙河流水力资源的经验,30多年来,在不断建设的过程中已陆续积累了数百万个观测数据,其中蕴藏着大量的宝贵信息,必须通过分析才能从繁多的观测资料中找出关键问题,深刻地揭示出变化规律和作出正确判断.此外,为了对大坝观测值作出物理解释,预测未来测值出现的范围及可能的数值等,也需要及时进行分析.

实践证明,三门峡大坝观测与分析不仅为三门峡大坝的建设和管理提供了科学依据、创造了有利条件,而且在总结多泥沙河流上高坝大库、迳流发电运用的特殊规律,丰富坝工理论知识方面也发挥了重要作用,因此,对发展坝工技术具有重要意义.

第二节 工程概述

三门峡水利枢纽是治理黄河的重点工程,位于黄河中游的下段,横跨晋、豫两省,在河南省三门峡市东北20km处,该工程于1957年4月13日正式开工,1958年11月17日截流,1960年7月大坝全断面浇筑至340m高程,9月开始蓄水运用,1962年3月第一台15万kW机组进行试运转.

主坝顶面修筑至353m高程,相应坝轴线长731.2m,其中自右至左为:右岸非溢流坝段长223m,安装场坝段长48m,电站坝段长184m,隔墩坝段长23m,溢流坝段长124m,左岸非溢流坝段长111.2m.最大坝高106m,位于电站坝段第5段.副坝为双铰混凝土心墙土坝,亦称斜丁坝,全长144m,最大坝高24m,主坝加副坝的总长为957.2m.控制流域面积688400km²,占全流域面积的92%.

溢流坝于280m高程上设有12个施工导流底孔,在300m高程上设有12个深泄水孔,从右至左依次编号为1~12.每孔断面尺寸均为3m×8m(宽×高),导流底孔于1960年11月至1961年6月回填封堵.

大坝340m高程以下的纵、横缝于1959年12月至1961年5月期间进行了灌浆,压力一般为0.4MPa,个别为0.6MPa,设计规定灌浆温度为多年平均气温15℃,但溢流坝因受水温影响而采用12℃,要求缝张开度≥0.5mm.1962年4月曾对4个灌区作了钻孔取样,取出

的岩芯较完整,缝宽一般在1~3mm,缝内充填黑色胶体,胶结良好。

坝基为坚固的中生代闪长玢岩,呈浅灰色或灰绿色的块状结晶,饱和极限抗压强度平均为120.0~200.0MPa,风化层厚度一般为0.5~3.0m,岩石基本属于不透水性,自1958年3月至1961年7月进行了基础接触灌浆和固结灌浆,灌浆压力一律采用0.5MPa。在浇筑混凝土前,对基岩作了严格处理,除去风化破碎岩石,用压力水冲洗并排净积水,基岩实测弹性模量大于 2.0×10^4 MPa,与混凝土有效弹性模量接近。

大坝基本建成后,曾于1960年9月开始蓄水,经过一年半时间,水库发生了严重的泥沙淤积,使上游潼关处河床抬高了4.5m,1962年3月水库改为敞泄,但由于枢纽建筑物的泄流能力过小,水库泥沙淤积发展迅速,如不加控制将危及西安。为解燃眉之急,1964年决定扩大枢纽泄流能力,增建左岸两条隧洞,并改建5~8号四条发电引水钢管为泄流排沙钢管,此两洞及四管工程先后于1966~1968年投入使用,也称为第一次改建。

经过第一次改建后,水库泥沙淤积有所减缓,排沙比达到80%,但库区冲刷范围有限,潼关以上继续淤积,渭河洪涝灾害仍然严重。为了改善渭河排泄,延缓水库寿命,1969年原水利电力部及晋、陕、豫、鲁四省领导在三门峡会议上决定对三门峡枢纽进行第二次改建。

第二次改建设计原则是“合理防洪、迳流发电、排沙放淤”,其具体要求为:库水位315m下泄能力为 $10000\text{m}^3/\text{s}$,库水位300m下泄能力为 $3000 \sim 4000\text{m}^3/\text{s}$,并规定汛期水位一般为300~305m,非汛期水位一般为310m。为了实现上述规划指标,要求在溢流坝打开1~8号八个施工导流底孔,将其改建为永久泄水排沙孔,同时在电站坝下卧1~5号5个发电钢管进口,在厂房内安装5台单机容量为5万kW的水轮发电机组。

第二次改建于1969年底动工,边设计、边施工,于1970~1971年分两次先后打开了1~8号8个底孔,1973、1975、1976、1977、1978年分别安装了5台机组,并建成110kV和220kV升压开关站,1990~1991年又打开9~12号4个底孔。

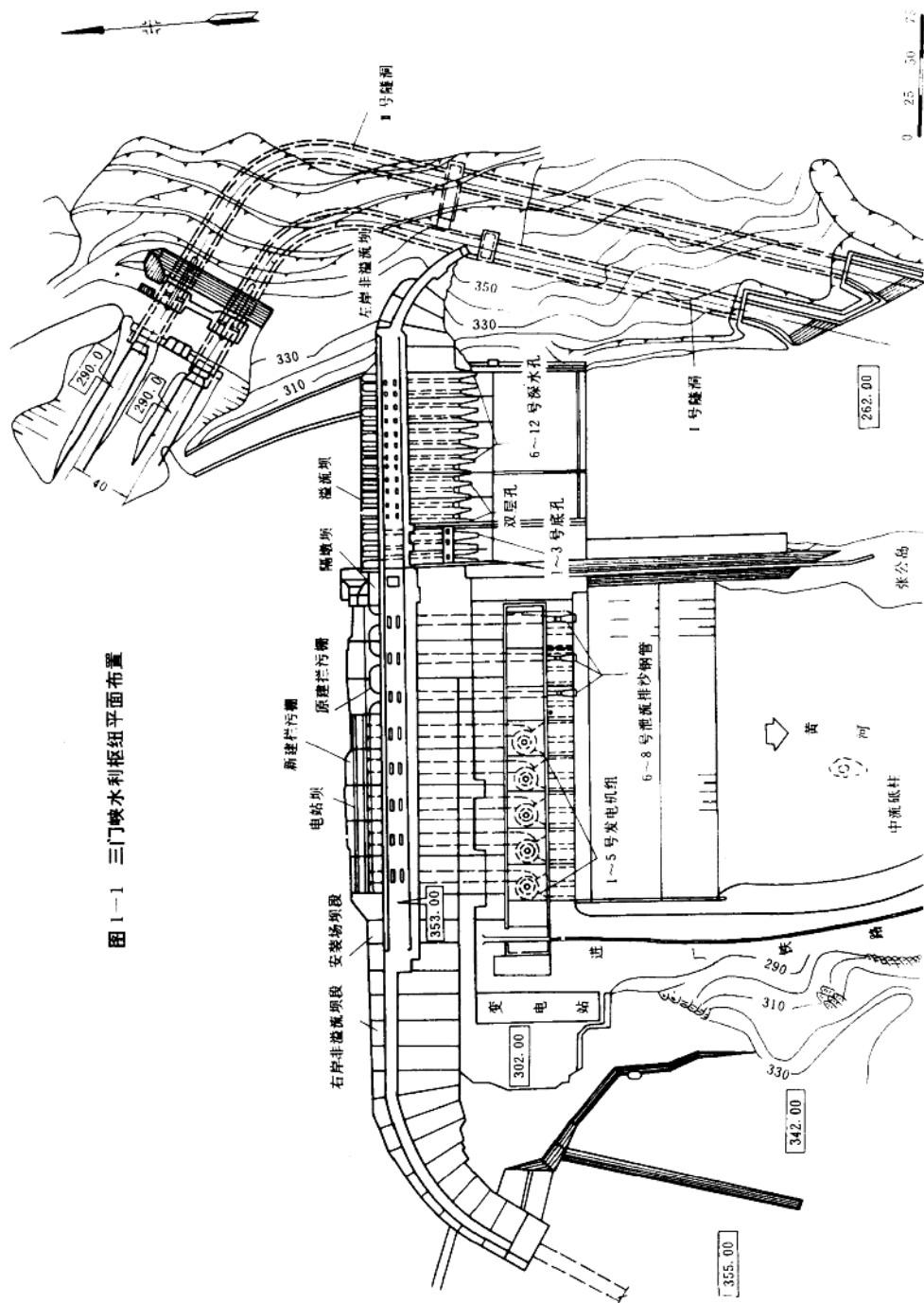
经过两次改建,扩大了枢纽泄流能力,降低了泄水孔高程。1973年汛末以后,水库采取了“蓄清排浑”的运用方式。依靠足够的泄流规模和合理的运用方式,使两次改建工程发挥预期的效果:实现水库年内泥沙冲淤平衡,保持了有效库容;降低潼关淤沙高程,改善了渭河排泄条件;发挥了水库的防洪、防凌、灌溉、发电和供水等综合利用的巨大效益。

但是从三门峡水库10余年运用情况看,不仅汛期有大量弃水,而且非汛期也有可观的弃水,因此决定对三门峡电站再扩装2台7.5kW机组,目前正在施工中。

三门峡水利枢纽总布置见图1-1。

应该说明的是,1980年年底通过现场检查发现,底孔在运用10余年且缺乏维修的情况下,磨蚀严重,尤以2号底孔底板破坏最重,在工作闸门后形成多处大面积冲坑,最大坑深达20cm,钢筋裸露。深孔和隧洞也有不同程度的损坏,因此进行了大修处理。

图 1-1 三门峡水利枢纽平面布置



第二章 观测设计与施工

第一节 观 测 设 计

在大坝建设过程中,设计布置了比较系统的观测仪器,这对于了解大坝结构性态及发展变化过程是十分有益的。

在建设不同阶段,观测设计工作也是由几个不同单位分别承担的:1957年开始的原建工程是委托前苏联电站部水电设计院列宁格勒分院设计的;1965年开始的第一次改建(增建两洞四管)是由原水利电力部北京勘测设计院设计的;1970年开始的第二次改建(打开底孔、下卧钢管、安装机组)工程是由原水利电力部第十一工程局勘测设计研究院设计的;在1980年开始的大修及扩建工程是由水利部能源部天津勘测设计研究院设计的。

三门峡大坝为一级建筑物,主要观测项目有:

- (1)垂直和水平位移;
- (2)挠度和倾斜变形;
- (3)接缝和裂缝开度;
- (4)坝体和坝基扬压力;
- (5)基岩应变;
- (6)混凝土和钢筋应力;
- (7)温度(水温、气温、混凝土及基岩温度);
- (8)淤沙压力及土压力;
- (9)渗流量;
- (10)水库水位及尾水位。

现将观测设计情况分别说明如下。

一、溢 流 坝

溢流坝共分8个坝段,观测基面选择在第5段,该段坝高75m基础宽78.5m,设有2个施工导流底孔和2个永久泄水深孔。在观测基面内布设3个观测截面,详见图2-1。

(1)在278m高程坝基岩石内,在中间墩与墩轴线对称布置有平面3向基岩变形计组,共7个测点,每个测点平行布置2组仪器,共42支。

(2)在284m高程导流底孔中墩和边墩上布置有6组5向应变计,33组2向应变计,19支无应力计,23支钢筋计和18支压应力计。

(3)在301m高程深水孔中墩布置有5组5向应变计,5支无应力计,3支压应力计,5支温度计。

(4)在大坝上游面 281、283、291、298m 高程布置有土压计 8 支,孔隙压力计 3 支。

(5)在 290、320、340、351m 高程竖井内布置有正垂线观测点,并在 290、316、336m 高程布置有倾斜仪 3 台,水准点 2 个。

(6)在第 5、6、7、8 坝段 293m 高程纵横缝布置有测缝计 4 支。

(7)在边墩内布设有观测坝基扬压力的测压管 7 个,其中有 2 个倾斜的,4 个垂直的和 1 个曲折的,引入 290m 高程廊道进行观测。

此外,在整个溢流坝 8 个坝段内均布置有测压管,共 36 个。

上述观测仪器由于各种原因,有一部分已经陆续失灵,详见表 2—1。其中正常仪器占 78.0%。

表 2—1

溢流坝第 5 坝段观测仪器统计

名 称	安 装 数	失 灵 数	正 常 数
基岩变形计	42	3	39
应变计	145	13	132
压应力计	21	1	20
钢筋计	23	23	0
孔隙压力计	3	3	0
温度计	5	0	5
土压计	8	8	0
测缝计	4	4	0
倾斜仪	3	3	0
正垂线仪	1	0	1
水准点	2	0	2
测压管	7	0	7
合 计	264	58	206
比例(%)	100	22.0	78.0

二、安 装 场 坝

如图 1—1 所示,靠电站坝段右岸 3 个坝段即称为安装场坝段,设计选择安装场坝第 2 段为观测基面,是因为本坝段没有泄水孔和压力钢管,是典型的重力坝段,坝高 74m,底宽 65m。

在观测基面内共设 5 个观测截面,详见图 2—2。仪器代表符号同图 2—1。

(1)在 287m 高程坝基岩石内布置有单向变形计测点 6 个,平面 3 向变形计测点 3 个,其中分别各有一个测点布置了双倍的仪器。另外布置有基岩温度计测孔 2 个,上游测孔设 8 支仪器,下游测孔设 4 支仪器。

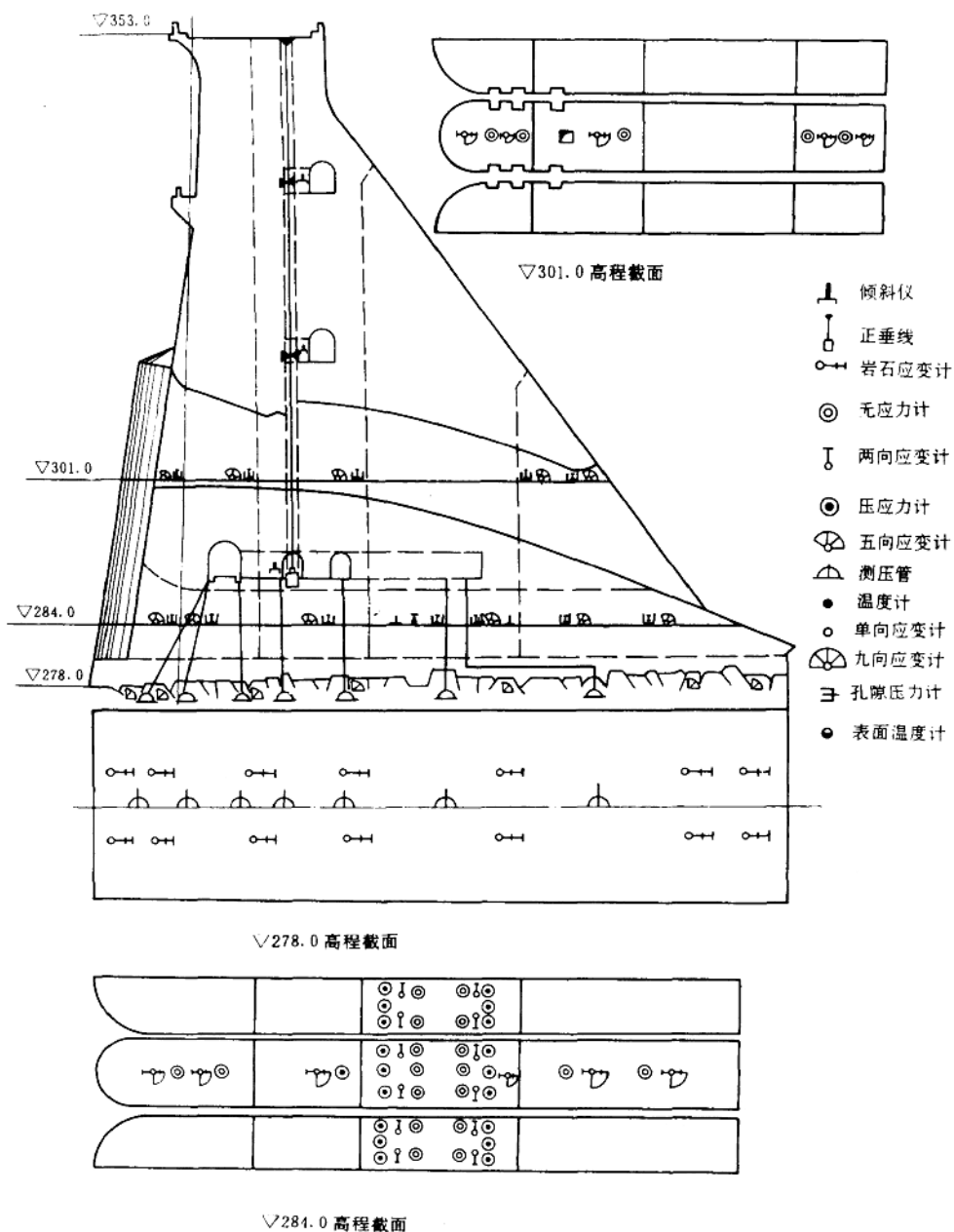


图 2 1 溢流坝第 5 段观测仪器布置

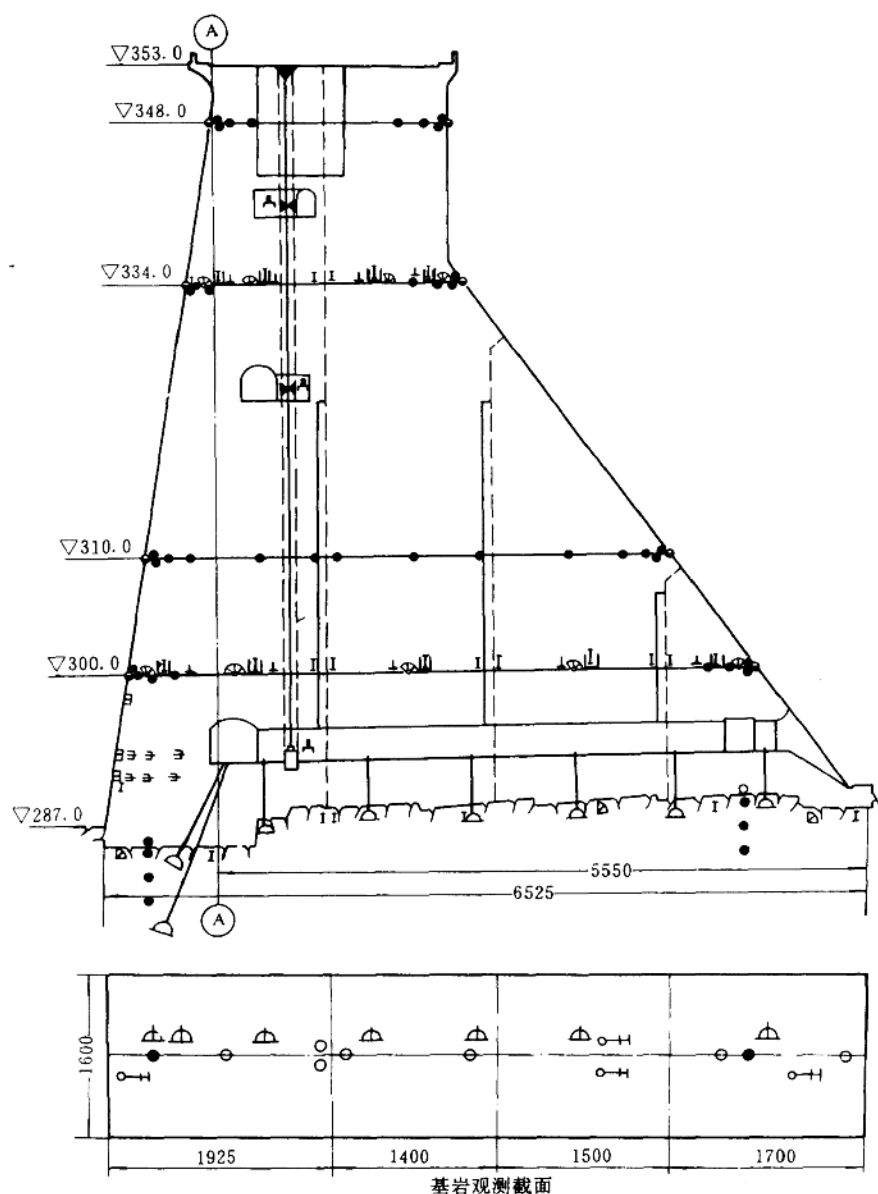


图 2-2 安装场坝第 2 段仪器布置 (单位:cm)

(2) 在 300m 高程布置有空间 9 向应变计测点 2 个, 5 向应变计测点 6 个, 单向应变计 5 支, 无应力计 12 支, 压应力计 8 支, 温度计 18 支。

(3) 在 310m 高程布置有温度计 19 支。

(4) 在 334m 高程布置有 5 向应变计测点 8 个, 单向应变计 6 支, 无应力计 12 支, 压应力计 8 支, 温度计 18 支。

(5) 在 348m 高程布置有温度计 16 支。

(6)在 291m 高程上游面布置有土压计 4 支,在 293m 及 298m 高程各布置孔隙压力计 2 支,另在 291 及 293m 高程距上游面 5m 范围内布置有孔隙压力计 8 支。

(7)在 290~300m 高程布置有测缝计 3 支。

(8)在 290、321、341、351m 高程竖井内布置有正垂线观测点,并在 290、316、336m 高程布置有倾斜仪 3 台,水准点 2 个。

(9)在坝段中心轴线上布置有扬压力测压管 8 个,引入 290m 高程廊道进行观测。

上述观测仪器由于各种原因,有少部分已经陆续失灵,详见表 2-2,其中正常仪器仍占 93.6%,与上述溢流坝合计正常数占 85.8%。

表 2-2

安装场坝第 2 坝段观测仪器统计

名 称	安 装 数	失 灵 数	正 常 数
基岩变形计	19	4	15
应变计	126	3	123
温度计	87	6	81
压应力计	16	2	14
土压计	4	0	4
孔隙压力计	12	0	12
正垂线仪	1	0	1
倾斜仪	3	3	0
测缝计	3	0	3
水准点	2	0	2
测压管	8	0	8
合 计	281	18	263
比例(%)	100	6.4	93.6

第二节 观 测 施 工

观测仪器的施工安装是大坝监测中至关重要的环节,施工单位必须给予足够的重视,施工人员要认真细致地工作,如果出现问题,往往是难以补救的。即使仪器已装进坝内,其安装方法和精度不合要求,也不能取得高质量的观测成果。

观测仪器的安装工作是随着大坝工程的施工进度陆续进行的,做好充分的准备工作、适时的进行安装施工、避免现场忙乱甚至遗漏,对保证安装质量和满足观测工期要求是十分重要的,同时在观测施工过程中,还要做好详细记录及绘制竣工图,以备将来查考及进行观测资料整理分析之用。

一、准备工作

为了有专人负责,三门峡工程局及时地成立了观测组和安装班,规定其负责人和技术人员要熟悉和了解观测设计及施工进度,制定安装施工计划和安排各项准备工作,对成员要进行技术培训,使他们能胜任业务工作。主要任务包括以下几方面:

1. 按设计要求购置和配置观测仪器、设备、工具和材料,并妥为保管。
2. 根据有关规程、规范,结合本工程的特点,编制仪器检验、安装埋设、现场观测及整理计算等操作细则。
3. 安排仪器施工附件及预埋件的加工,进行各种观测仪器和设备的检验工作。
4. 对准备施工安装的仪器及附件分类保存并预先进行试安装,以检查是否配套及准备工作是否完善。
5. 进行现场埋设点的测点放样,记录坐标位置,完成现场钻孔、预留孔、壁龛及各种预埋件及材料的施工准备。
6. 对于遥测仪器应按规范要求进行仪器和电缆之间的连接和编号,这是一项认真细致的工作,应有专人承担并对接头质量进行试验检查和记录。
7. 按照设计要求作好仪器的安装埋设准备,包括准备现场详细记录和量测检查用表格,安排绘制安装施工竣工图及电缆牵引路线图及填写施工卡片,重要部位仪器及新仪器安装后要准备进行拍照片等。

二、变形观测仪器的施工

三门峡工程在建坝初期的 1960 年曾在坝顶左岸山坡和右岸安装场坝段之间建立视准线一条,中间布置 42 个水平位移观测点,同时在坝下游 1km 处布置了校核基点,用 7 个三角形网传递至坝顶,传距角在 $49^{\circ}\sim 91^{\circ}$ 之间。此外,在坝顶及 290m 廊道共设立 132 个量测垂直位移的水准测点,工作基点分别设在 353m 和 290m 高程,左右两岸各两组,水准基准点设在大坝下游左岸桥头附近。这套系统由于观测周期长、精度低,到 1963 年底就停测了。

下面着重介绍有系统观测资料且至今仍在继续观测的几种变形测量仪器的施工方法。

(一)垂线仪

如上所述,在三门峡溢流坝和安装场坝各安装正垂线观测仪一台,采用瑞士胡根伯式机械座标仪,该仪器的施工安装方法可参见图 2-3 和图 2-4,观测结果表明,这种安装方法是成功的,对其它类型的垂线仪施工可作参考。

如图 2-3 所示,铅垂线悬挂装置 F 的组成部分是一根放在两个轴承内的辊子,钢丝 Q 绕在槽内,摆锤 G 把钢丝拉紧,罩子的作用是防止水滴在悬挂装置上。在安装时用两块压板将底板压紧在两根梁上,夹线装置 K 的作用是在最高的那个铅垂线转折点处将铅垂线夹紧。装置 K 由一块板组成,在这板的前部端面上有一个燕尾槽,在槽内装有一块导向板,铅垂线就夹紧在导向板上的 V 形槽内,轻轻地将两只六角头螺丝旋紧,压紧板就会将线夹住。为了避免受到滴水,用螺丝将盖子固定在底板上。位于上述夹线装置下面的那个夹线装置是