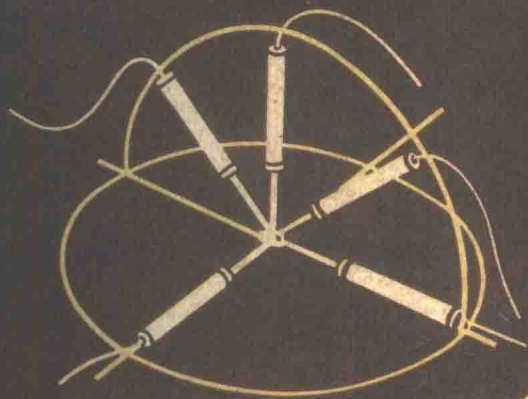




混凝土坝的 内部观测

混凝土坝的 内部观测

中国科学院
水利电力部水利水电科学研究院編

水利电力出版社

內 容 提 要

本书主要是介绍混凝土坝的内部观测仪器及观测技术的基本知识。在仪器方面，着重介绍目前国内所生产的差动电阻式观测仪器的原理、构造、种类、规格，以及各种观测仪器的率定及使用方法。

在仪器布置设计和施工方面，阐述了观测仪器布置设计的原则，以及埋设仪器的方法与要求，同时介绍了一些有关布置设计的实例及施工详图。此外，在资料整编及分析方面，为了配合原型结构的观测工作，强调了进行室内试验的重要性，并介绍了室内试验的方法。在最后一章内所介绍的是各种观测资料的计算、整编及有关实例，特别着重介绍的是由应变换算应力的计算过程。

本书可供水工建筑物观测工作的设计人员、施工人员，以及管理人员和水利科学研究者参考。

混凝土坝的内部观测

中国科学院
水利电力部水利水电科学研究院编

2714S713

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里内）

北京市书刊出版业营业许可证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

850×1168 $\frac{1}{32}$ 开本*5 $\frac{1}{2}$ 印张*144千字*定价(第9类)0.74元

1960年4月北京第1版

1960年4月北京第1次印刷(0001—4,500册)

編者的話

在党的社会主义建設总路綫的光輝照耀下，为了适应我国水利水电建設事业的蓬勃发展，及其对于原型結構觀測工作所提出的要求，我們在院党委及院領導的正确領導与亲切关怀下，参考了国内外已有資料，吸取了三門峽、新安江及古田等工程的觀測工作經驗和参考了上海科学仪器館制造厂、上海科培仪器厂、南京水利电力仪表厂及水利水电科学研究院仪器工厂制造仪器的經驗，編写了这本书。但由于時間短促及編者經驗不足，书中难免有欠妥和遺漏的地方，誠懇地請讀者予以指正。本书在出版工作上得到水利电力出版社的領導和工作同志的大力帮助，在編写过程中得到以上有关单位同志的援助，特致謝意。

本书是由本院結構材料研究所赵佩鈺、經萱祿、梁学礼、庄万康、曾修級、李永貴、赵志仁、惠荣炎等同志編写的。

目 录

緒論	5
第一章 仪器的基本概念和原理	9
§1-1 基本概念	9
§1-2 仪器的构造原理	12
§1-3 电纜电阻的影响	15
§1-4 电纜的芯数	17
§1-5 比例电桥的原理	18
§1-6 絕緣电阻	20
§1-7 电阻比变化的符号	21
第二章 仪器的种类及构造	23
§2-1 应变計	23
§2-2 測縫計	27
§2-3 裂縫計	29
§2-4 滲压計	29
§2-5 鋼筋計	31
§2-6 应力計	33
§2-7 溫度計	36
§2-8 比例电桥	37
§2-9 附属設備	38
第三章 觀測布置設計	42
§3-1 溫度的觀測	44
§3-2 应力及应变的觀測	49
§3-3 自由体积变形的觀測	53
§3-4 伸縮縫的觀測	54
§3-5 混凝土內滲透压力的觀測	56
§3-6 其他一般的觀測	58

§3-7	觀測站的布置	59
§3-8	觀測設計圖例及符號	61
§3-9	各類模型的觀測布置設計圖例	61
第四章	儀器的率定	67
§4-1	比例電橋的使用方法	67
§4-2	應變計的率定	69
§4-3	測縫計的率定	79
§4-4	鋼筋計的率定	81
§4-5	應力計及土壓計的率定	86
§4-6	滲壓計的率定	91
§4-7	溫度計的率定	93
§4-8	比例電橋的率定	93
第五章	儀器的埋設與施工	96
§5-1	觀測組的建立及籌備工作	96
§5-2	儀器埋設前的準備工作	98
§5-3	儀器的保管	102
§5-4	儀器的附件	103
§5-5	儀器的埋設	107
§5-6	橡皮電纜的埋設	119
§5-7	儀器埋設後的觀測	120
§5-8	儀器埋設後的一些工作	121
第六章	室內試驗及實測	123
§6-1	溫度膨脹系數的試驗	123
§6-2	自生體積變化的試驗	124
§6-3	彈性模數與波松比的試驗	126
§6-4	徐變的試驗	129
§6-5	熱性能的實測	137
第七章	資料的整編	140
§7-1	現場資料的收集	140
§7-2	資料整編的注意事項	141
§7-3	基準值的選擇	142

§7-4 电阻溫度計的計算方法.....	144
§7-5 測縫計及裂縫計的計算方法.....	145
§7-6 鋼筋計的計算方法.....	146
§7-7 应力計的計算方法.....	149
§7-8 滲压計的計算方法.....	149
§7-9 应变計的应力分析.....	149
§7-10 应变計的計算方法.....	153
§7-11 应变計組的計算方法.....	155
§7-12 应变計的应力計算方法.....	157
§7-13 应用松弛曲綫的应力計算方法.....	165
参考文献.....	175

緒 論

在水工建築物的設計中，常不免要借助于一些假設，使設計條件簡化，以便進行理論計算。對於較為複雜的結構，還要通過小比例尺的模型（包括軟膠、光彈、立體模型等）試驗，來校核計算結果及驗證設計上的假定。

雖然通過計算工作及模型試驗可以了解水工建築物結構設計中的問題，可是由於施工上產生的難於預見的影響，以及在試驗中邊界條件及試驗材料的模擬上的困難，因此計算工作及模型試驗畢竟還是有一定的局限性的。

為了切實掌握水工建築物在施工期間和運行過程中的實際工作情況，以達到校核設計和監督建築物安全運行的目的，並為將來同類水工建築物的設計和施工提供有價值的資料，有必要展開原型結構的觀測研究。原型的觀測研究，實質上就是一種完全合乎實際條件的大比例尺的立體模型試驗。近20年來，世界上不少的国家已經認識到這項觀測研究工作的必要性，並在這方面做了不少的探討和研究。因此，原型結構的觀測給人們增加了一項求解問題的工具。特別是近年來隨着觀測儀器和觀測技術的進步，以及對於混凝土性質研究的進展，使原型結構的觀測工作有了極大的發展。

原型結構的觀測工作，必須使用相當精密的觀測儀器，並以正確的方法裝置儀器，求得真實的記錄；並對多年積累的資料進行分析，才能獲得預期的成果。雖然從表面上看來，它是一件費用較多、組織規模較大和時間較長的工作，但是就它所产生的效果及作用來說，乃是完全值得的。

隨着我國水利水电建設事業的蓬勃發展，原型結構的觀測工作近年來在我國也有了高速度的進展。但是較早時期的觀測工作

一般是不够全面的。1956年我院在苏联专家B.Б.布林可夫(B.Б. БЛИНКОВ)的亲自指导下,开始了原型观测工作的研究,曾对观测仪器的制造、布置设计、施工埋设及观测资料的整理分析等方面进行了系统的研究,并在一些工程中进行了实际的观测工作。这样就使我国的原型结构观测工作展开了一个新的局面。

在观测仪器设备的研究和制造方面,我院与上海科学仪器馆制造厂、南京水利电力仪表厂及上海科培仪器厂合作制成了十余种差动电阻式的观测仪器,这不仅为国家节省了大量外汇,更重要的是满足了工程观测上的要求,为我国观测工作的发展提供了重要的物质条件。

在党的总路线的光辉照耀下,我国修建了许多大型的水利枢纽,特别是在党的八届八中全会发出反右倾、鼓干劲的号召以后,全国人民积极响应,在党的正确领导下,在全国范围内掀起了一个轰轰烈烈的水利运动,修建了许多水工建筑物。这样就把原型结构的观测工作推上了更高的阶段。根据共产主义大协作的精神,我院同有关设计和施工等单位密切协作,在若干重点工程中已经完成了或者正在进行着观测的布置设计、仪器的装置等工作。

为了适应目前国内迫切的需要,我们拟将原型观测分为两部分来编写:一是混凝土坝的内部观测,一是混凝土坝的外部观测。本书是以混凝土坝的内部观测为对象,介绍如何进行结构内部的应变、应力、温度、渗压、钢筋应力、伸缩缝的开合、裂缝及体积变化等主要项目的观测。至于混凝土坝的挠度、位移、倾斜、沉陷及基础扬压力等项目的观测,无疑地对于了解坝的稳定性和安全性同样是十分重要的,拟另在“混凝土坝的外部观测”一书中介绍。

对于其他型式的混凝土水工建筑物,如船闸、厂房等的内部观测,亦可参考本书进行,但应考虑到这些建筑物本身的特点和它们在观测上的要求。

本书所包括的内容,只限于观测工作者在观测技术上所必须掌握的基本知识,除此之外,观测工作者还必须熟悉结构力学及

混凝土材料的知識，这样才能更好地进行观测工作。

在原型結構观测工作中，首先要掌握仪器的知識。一般内部观测仪器有鋼弦式及差动电阻式两种，它們在使用上各有利弊。本书主要介紹目前国内生产及使用的差动电阻式仪器的原理、构造及規格。观测工作者必須預先熟悉仪器的性能，这样才能正确地运用仪器，使它能完滿地合乎实际使用上的目的及要求。

在进行混凝土坝的观测布置設計时，必須密切地注意到坝体結構的型式、构造、設計計算及模型試驗的成果。还应考虑到坝体所处的具体的地形、地质及气象等条件的不同，重点地选择具有代表性的坝段或截面进行各种观测仪器的綜合性的布置。总之，要做到合理地布置，使将来获得的資料具有分析的可能性，同时还要掌握經濟的原則。

在有关混凝土坝的观测問題上，設計部門应当与施工部門密切配合，施工部門有必要明了設計者在观测上的布置設計意图，同时設計部門也应当密切注意施工期間观测工作进行的情况，以及观测所得的成果。

为了完滿地进行仪器的埋設工作，施工部門必須事前有充分的准备。及早地建立观测小組是十分必要的，这个小組的責任是：熟悉观测的布置設計意图，学习仪器的埋設方法与技术，筹备观测仪器、設備及所用的工具，校核仪器制造厂家的率定值，以及进行仪器的裝置工作及施工期間的观测及資料整理工作。

應該強調指出的是，为了分析应变計的观测成果，必須进行混凝土的彈性模数及徐变等試驗（此項試驗工作往往是被忽視的），否則将会引起資料整理分析上的困难，甚至无法进行分析工作。

仪器一經埋設后就要按照規定的观测日期进行观测，并且必須随时对观测所得的原始資料进行校核、計算并繪在图上，切不可使資料积压。如在观测中发现有反常現象时，应迅速查明原因，及时糾正，以免日后无从查对及难于判断当时的情况。

負責观测工作的单位，应当注意搜集坝体的施工記錄，因为

这对于观测成果的分析，是具有一定意义的。

有了施工期及竣工后坝体处于水荷重及温度变化作用下的相当时期内的仪器实测记录以后，才有可能作出合理的和接近实际的观测结论。关于资料的分析方法，目前还没有一套完整而系统的经验，事实上这种工作必须结合每一个具体工程的具体情况加以研究，才能做出准确的分析及判断。为了便于读者进一步分析和研究混凝土坝的内部观测工作，在本书末列有参考文献的目录，可供读者参考。

第一章 仪器的基本概念和原理

埋設在坝內的遙測仪器，主要是用来觀測混凝土水工建筑物的內部状态，例如觀測其应力、应变、温度等。埋設在混凝土坝內的遙測仪器，主要有差动电阻式及鋼弦式两种型式，它們在构造及原理方面各不相同。前者是利用所埋設的仪器由于受到外力作用而使其內部电阻綫发生电阻的变化，从而計算出所作用的物理量；后者是利用所埋設的仪器內部的鋼弦发生自振頻率的变化，而获得所作用的物理量。目前國內多采用差动电阻式仪器，因而本书仅就此类仪器的基本作用原理作一概略性的介紹。

关于鋼弦式仪器的构造原理請參閱苏联 A.A. 烏金丘斯及 B. II. 博姆布琴斯基合著的“水工建筑物的測驗設備”(1954年)^①一书。

§1-1 基本概念

一般金属导綫的电阻与其截面积、长度具有下述关系：

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (1-1)$$

式中 R ——导綫电阻(欧)；

ρ ——电阻率(欧-平方毫米/米)；

l ——导綫长度(米)；

A ——导綫截面积(平方毫米)。

通常电阻变化有两种特性：一是随着导綫的应变而变化；另一是电阻随着导綫的温度而变化。这两者在一定的範圍內，都存在着正比例的关系。前者可用下式表示：

① 本书中譯本1957年由原水利出版社出版。

$$\frac{\Delta R}{R} = \lambda \frac{\Delta l}{l}, \quad (1-2)$$

式中 ΔR ——导线的电阻变化量；

R ——导线的电阻；

Δl ——导线的变形量；

l ——导线的长度；

$\frac{\Delta l}{l}$ ——导线的应变；

λ ——导线的电阻应变灵敏系数，对于同种类的导线，此值为一常数。

后者可用下式表示：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1-3)$$

式中 R_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时导线的电阻(欧)；

R_0 ——温度为 0°C 时导线的电阻(欧)；

α ——电阻温度系数。普通取温度在 0°C 及 100°C 间的平均值，即

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}. \quad (1-4)$$

一般常用的金属材料的 α 值为

铜线 42.5×10^{-4}

镍线 64×10^{-4}

白金线 39×10^{-4}

利用根据惠斯登电桥原理所装置的仪表来测量电阻是较为简便的。这个仪表是由四个形成桥臂的电阻、检流计及电池所组成的，如图 1-1 所示。调整桥臂中的可变电阻 R ，使检流计两端的电位差等于零，即当检流计的指针静止时，电桥四臂的电阻即成平衡状态。此时，彼此之间的关系可用下式表示：

$$\frac{R}{M} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (1-5)$$

在一般使用的惠斯登电桥仪表中, R 为仪表内的可变电阻,

R_1 、 R_2 为仪表内的比率臂电阻, M 则为外部的被测未知电阻。在本文中, 为了结合说明差动电阻式仪器及其量测用的仪表起见, 各桥臂的含义与一般惠斯登电桥有所不同, 请参看图 1-1 的图注。

当导线产生应变而使其电阻 R_1 变化 ΔR_1 时, 为了维持电桥的平衡, 可将可变电阻 R 变化 ΔR 。因此, 式 (1-5) 可写成:

$$\frac{R \pm \Delta R}{M} = \frac{R_1 \pm \Delta R_1}{R_2} \quad (1-6)$$

根据式(1-5)的关系, 式(1-6)又可写成:

$$\frac{R \pm \Delta R}{R} = \frac{R_1 \pm \Delta R_1}{R_1} \quad (1-7)$$

设 $R_1 = R_2$, 根据式(1-2)的关系, 则式(1-6)及式(1-7)可写成:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta R_1}{R_1} = \lambda \frac{\Delta l}{l}, \\ \text{或} \quad \frac{\Delta R}{M} &= \frac{\Delta R_1}{R_2} = \lambda \frac{\Delta l}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

从式(1-8)中可以知道, 当一根导线的电阻 R_1 产生应变后, 调整可变电阻 R , 即可测出导线所产生的应变。

若采用两根导线, 使其电阻差动的变化, 即当一导线电阻 R_1 由于受拉发生拉应变而增加 ΔR_1 , 而另一导线电阻 R_2 受压发生压应变而减少 ΔR_2 时, 这时, 调整电阻 R 亦可使之平衡, 其关系式可写成:

$$\frac{R + \Delta R}{M} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 - \Delta R_2} \quad (1-9)$$

利用式 (1-5) 的平衡条件, 将 $M = R \frac{R_2}{R_1}$ 代入式 (1-9), 即

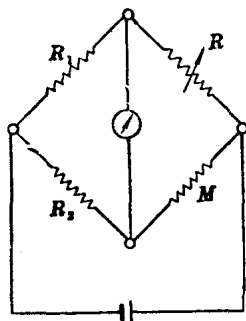


图 1-1

R —仪表内的可变电阻;
 M —仪表内的固定电阻;
 R_1 、 R_2 —仪表外的两导线电阻。

得:

$$\frac{R + \Delta R}{R} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)}{\left(1 - \frac{\Delta R_2}{R_2}\right)}. \quad (1-10)$$

設 $R_1 = R_2$ 及两电阻受大小相等而方向相反的应变作用, 則 $|\Delta R_2| = |\Delta R_1|$, 式(1-9)及(1-10)将成为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &\approx 2 \frac{\Delta R_2}{R_2} \approx 2 \lambda \frac{\Delta l}{l}, \\ \frac{\Delta R}{M} &\approx 2 \frac{\Delta R_2}{R_2} \approx 2 \lambda \frac{\Delta l}{l}. \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由此可見, 若使两相等导綫的电阻差动的变化, 式(1-11)中 ΔR 的变化量将为式(1-8)的 2 倍。

以上是电阻式仪器中的几个基本概念。

§1-2 仪器的构造原理

差动电阻式仪器是由外力作用部分及电气感应部分所組成的, 其中的电气感应部分的构造原理, 对于差动电阻式各类仪器几乎是相同的。它們都是采用高强度的細鋼絲作为电阻綫, 其直徑約为 0.05~0.06 毫米, 抗拉强度在 350 公斤/平方毫米以上。对这两根电阻几乎相等的电阻綫, 預先給予一定的拉力, 并使交錯地圍繞在两鋼杆上的瓷制綫框上。为了使两綫圈具有相同的温度, 将两綫圈圍繞在同一中心軸上, 形成內外两綫圈。同时又为了使两綫圈的电阻近似地相等, 外綫圈繞三周, 而內綫圈繞四周, 这样当仪器受到外力作用而使电气感应部分的两綫圈发生变位时, 則其中一綫圈的增加量与另一綫圈的减少量几乎相等, 亦即差动地使两綫圈的电阻发生变化。

图1-2为仪器的电气感应部分的示意图, 图1-3为仪器内部的接綫图。

由图1-3中的两电阻綫引出的三芯綫与量測的仪表相接(其中的中芯綫与电桥的电池相接, 另两芯綫与檢流計的两端相接), 則

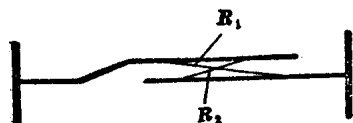


图 1-2

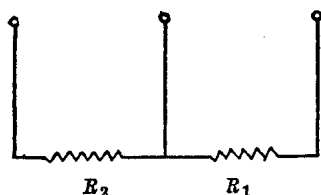


图 1-3

可形成一电桥的桥路，如图1-1所示。

所采用的量测仪表，名为比例电桥(请参看§1-5)。比例电桥中有两桥臂，一为可变电阻 R ，其最小值为0.01欧，最大量测范围为111.10欧；另一为固定电阻 M ，其值为100欧。

因此在式(1-5)中，当电桥平衡时， R 的读数即为两电阻线的比值，亦称为电阻比。由于 M 为100欧，所以其读数可读到0.01%。令 Z 为两电阻线的电阻比，则式(1-5)可写成：

$$Z = \frac{R}{M} = \frac{R_1}{R_2}, \quad (1-12)$$

而式(1-11)则为电阻比的变化量，令其为 ΔZ ，则可写成：

$$\Delta Z = \frac{\Delta R}{M} \approx \frac{2\Delta R_2}{R_2} \approx 2\lambda \frac{\Delta l}{l} = \text{常数} \times \text{应变}. \quad (1-13)$$

式(1-13)中的应变为电气感应部分的电阻线受外力的作用发生变位而获得的。由于应变测距 l (即线圈两端的距离) 在加工上存在着误差，以及常数 2λ 在电阻线制造过程(拉线过程)中的不均匀，所以在同一外力状态下，对于各同类的仪器电阻比的变化量略有不同。各仪器都是以外力作用的量对此相应的电阻比的变化量 ΔZ 的单位比例常数，作为此仪器的灵敏度，以 f 表示之。

当仪器与仪表处在不同温度情况下，电桥的平衡在理论上可用下式表示：

$$\frac{R(1+\alpha_1 t_1)}{M(1+\alpha_1 t_1)} = \frac{R_1(1+\alpha_2 t_2)}{R_2(1+\alpha_2 t_2)}, \quad (1-14)$$

式中 α_1, α_2 ——仪表及仪器的电阻温度系数；

t_1, t_2 ——仪表及仪器的温度变化量。

由式(1-14)可得出与式(1-5)相同的关係式, 即

$$\frac{R}{M} = \frac{R_1}{R_2},$$

因此电桥仍能保持平衡。

若仪器不仅受外力的作用, 且受温度变化的影响时, 则电桥的平衡式可用下式表示:

$$\frac{(R + \Delta R)(1 + \alpha_1 t_1)}{M(1 + \alpha_1 t_1)} = \frac{R_1 \left(1 + \lambda - \frac{\Delta l}{l}\right)(1 + \alpha_2 t_2)}{R_2 \left(1 - \lambda - \frac{\Delta l}{l}\right)(1 + \alpha_2 t_2)}. \quad (1-15)$$

由式(1-15)可得:

$$\frac{R + \Delta R}{M} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 - \Delta R_2}. \quad (1-16)$$

式(1-16)与式(1-9)相同, 因此亦可得出式(1-11)的結論。从式(1-14)及式(1-15)中可看出, 如果两电阻綫不能保持同温, 则在观测上会引起很大的誤差。

电阻比在理論上虽不受温度的影响, 但某些仪器因其构造上的关系, 亦会引起电阻比的变化。这种变化的影响, 必須在观测資料的計算过程中考虑进去, 它是以单位温度变化的比例常数来表示的, 此比例常数亦即称为仪器温度补偿系数。对于各类仪器的温度补偿系数, 皆可通过試驗求得。各类仪器的温度补偿系数的含义及試驗方法, 請參看第二及第四章所述。

以上是差动电阻式仪器由电阻比的变化而求得所作用的物理量的一些基本原理。这里还应指出, 应用这类仪器还可量测温度。

若在与式(1-15)同一条件下, 将仪器的两电阻綫串联起来进行观测时, 由于 $R_1 \approx R_2$, 于是可以得到下式:

$$\begin{aligned} R_1 \left(1 + \lambda - \frac{\Delta l}{l}\right)(1 + \alpha t) + R_2 \left(1 - \lambda - \frac{\Delta l}{l}\right)(1 + \alpha t) \\ = (R_1 + R_2)(1 + \alpha t). \end{aligned} \quad (1-17)$$

由此可見, 两电阻綫在串联状态下的变化仅与温度有关, 并