

# 水电站 钢衬钢筋混凝土 压力管道

伍鹤皋 生晓高 刘志明 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 水电站钢衬钢筋 混凝土压力管道

伍鹤皋 生晓高 刘志明 著

中国水利水电出版社

## 内 容 提 要

本书对水电站钢衬钢筋混凝土压力管道结构进行了系统的数值分析和模型试验,并提出了相应的设计计算方法。首先,介绍了坝下游面压力管道的布置、结构形式、设计原则、结构分析方法以及模型试验结果。其次,对混凝土坝内埋管在坝体荷载、内水压力和温度荷载作用下的应力应变状态、承载机理和承载力进行了全面的研究,提出了坝内埋管极限状态设计方法。最后,对钢衬钢筋混凝土分岔管进行了数值分析和结构模型试验,分析了钢衬钢筋混凝土分岔管的构造,并提出了设计原则和方法,为高水头电站分岔管的设计提供了一条有效途径。

该书可供工程设计和研究人员使用,也可供有关高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

2P22/32

水电站钢衬钢筋混凝土压力管道/伍鹤皋,生晓高,刘志明著. —北京:中国水利水电出版社,2000.7

ISBN 7-5084-0384-3

I. 水… I. ①伍…②生…③刘… II. 水力发电站-钢筋混凝土压力管  
N. TV732.42

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第60604号

|       |                                                                                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | 水电站钢衬钢筋混凝土压力管道                                                                                                                   |
| 作 者   | 伍鹤皋 生晓高 刘志明 著                                                                                                                    |
| 出版、发行 | 中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sale@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) |
| 经 售   | 全国各地新华书店                                                                                                                         |
| 排 版   | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                  |
| 印 刷   | 水利电力出版社印刷厂                                                                                                                       |
| 规 格   | 850×1168毫米 32开本 5.75印张 148千字                                                                                                     |
| 版 次   | 2000年6月第一版 2000年6月北京第一次印刷                                                                                                        |
| 印 数   | 0001—2200册                                                                                                                       |
| 定 价   | 16.00元                                                                                                                           |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

水电站压力管道是水电站建筑物的重要组成部分之一，它有明管、地下埋管、坝内埋管、坝下游面管以及回填管等多种结构形式，应用于各种水电站和抽水蓄能电站。

《水电站钢衬钢筋混凝土压力管道》一书的主要内容包括三个方面：

第一，介绍了坝下游面压力管道的布置、结构形式、设计原则、结构分析方法以及模型试验；重点介绍了钢衬钢筋混凝土结构的非线性有限元方法，并结合实际工程对坝下游面管的承载机理和承载力进行了系统研究。

第二，对混凝土坝内埋管在坝体荷载、内水压力和温度荷载等作用下的应力应变状态、承载机理和承载力等进行了全面研究；在分析现行设计方法所存在问题的基础上，提出了坝内埋管极限状态设计方法，并与三峡水电站坝内埋管段大比尺仿真材料结构模型试验进行了比较，证明了这种设计新方法的可行性和经济性。

第三，对水电站分岔管新型结构形式——钢衬钢筋混凝土分岔管进行了计算分析和结构模型试验，提出了钢衬钢筋混凝土岔管的构造、设计原则和方法，已经成功地将这种方法应用于两个水电站工程，取得了良好的效果，为高水头电站分岔管的设计提供了一条有效途径。

本书由浙江大学钟秉章教授主审。编写和研究过程中，笔者得到了国内许多同行专家学者的大力支持，特别是马善定教授的精心指导和课题组熊德炎教授、秦继章高工、匡会健高工、龚国芝副教授等的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

对本书中的错误不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2000年1月于武汉

# 目 录

## 前 言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>第一章 混凝土坝下游面压力管道</b> .....       | 1  |
| 1.1 混凝土坝下游面压力管道布置 .....            | 1  |
| 1.2 混凝土坝下游面压力管道结构形式 .....          | 3  |
| 1.2.1 坝下游面明钢管 .....                | 3  |
| 1.2.2 坝下游面钢衬钢筋混凝土管 .....           | 4  |
| 1.3 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道构造 .....          | 6  |
| 1.4 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道设计原则 .....        | 8  |
| 1.4.1 荷载组合 .....                   | 8  |
| 1.4.2 设计要求及准则 .....                | 9  |
| 1.5 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道结构计算方法 .....      | 10 |
| 1.5.1 混凝土开裂前管道应力分析 .....           | 12 |
| 1.5.2 混凝土开裂后管道应力分析 .....           | 17 |
| 1.5.3 温度荷载作用下的管道应力分析 .....         | 21 |
| 1.6 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道结构模型试验 .....      | 21 |
| 1.6.1 模型设计 .....                   | 22 |
| 1.6.2 大小比尺模型试验成果比较 .....           | 23 |
| 1.6.3 管道混凝土开裂特征 .....              | 25 |
| 1.6.4 钢材强度、结构超载系数和极限承载能力 .....     | 27 |
| 1.6.5 减小缝宽的措施 .....                | 28 |
| 1.6.6 温度荷载下钢材应力变化特征 .....          | 29 |
| 1.6.7 温度荷载下混凝土裂缝宽度变化特征 .....       | 30 |
| <b>第二章 钢衬钢筋混凝土结构非线性有限元方法</b> ..... | 31 |
| 2.1 钢筋混凝土非线性有限元方法研究现状 .....        | 31 |
| 2.2 钢筋混凝土非线性有限元基本理论 .....          | 35 |

|            |                           |           |
|------------|---------------------------|-----------|
| 2.2.1      | 混凝土应力—应变关系 .....          | 35        |
| 2.2.2      | 混凝土裂缝的处理方法 .....          | 39        |
| 2.2.3      | 钢筋的模拟 .....               | 42        |
| 2.2.4      | 钢筋与混凝土的联结 .....           | 43        |
| 2.2.5      | 非线性求解方法 .....             | 45        |
| 2.2.6      | 程序框图 .....                | 47        |
| 2.3        | 工程应用实例——云南景洪水电站压力管道 ..... | 47        |
| <b>第三章</b> | <b>混凝土坝内埋管 .....</b>      | <b>53</b> |
| 3.1        | 概论 .....                  | 53        |
| 3.2        | 坝内埋管的设计原理和方法 .....        | 56        |
| 3.3        | 现行设计方法存在的问题和研究概况 .....    | 58        |
| 3.3.1      | 现行设计方法存在的问题 .....         | 58        |
| 3.3.2      | 坝内埋管研究概况 .....            | 60        |
| 3.4        | 钢管与钢筋混凝土联合承载非线性分析 .....   | 61        |
| 3.4.1      | 问题的提出 .....               | 61        |
| 3.4.2      | 基本资料 and 计算组合 .....       | 63        |
| 3.4.3      | 坝内埋管的受力特征 .....           | 64        |
| 3.4.4      | 坝内埋管的承载力及其影响因素 .....      | 68        |
| 3.5        | 混凝土裂穿后坝内埋管非线性分析 .....     | 72        |
| <b>第四章</b> | <b>坝内埋管温度应力 .....</b>     | <b>76</b> |
| 4.1        | 坝内埋管的稳定温度场 .....          | 78        |
| 4.1.1      | 利用变分原理求解稳定温度场 .....       | 78        |
| 4.1.2      | 二维稳定温度场的有限元计算 .....       | 80        |
| 4.1.3      | 坝内埋管的稳定温度场 .....          | 82        |
| 4.2        | 坝内埋管温度应力线性分析 .....        | 85        |
| 4.2.1      | 温度应力的有限单元法 .....          | 85        |
| 4.2.2      | 坝内埋管的温度应力 .....           | 87        |
| 4.3        | 坝内埋管温度应力非线性分析 .....       | 89        |
| 4.3.1      | 坝内埋管的稳定温度场 .....          | 90        |
| 4.3.2      | 温度应力非线性有限单元法 .....        | 90        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 4.3.3      | 考虑混凝土非线性本构关系时的温度应力计算   | 91         |
| 4.3.4      | 坝内埋管顶部和底部混凝土裂穿后的温度应力计算 | 94         |
| <b>第五章</b> | <b>设垫层坝内埋管结构分析</b>     | <b>96</b>  |
| 5.1        | 垫层管的研究现状及存在的问题         | 97         |
| 5.2        | 垫层管线性有限元分析             | 99         |
| 5.2.1      | 计算方案                   | 100        |
| 5.2.2      | 垫层弹模对管道应力的影响           | 101        |
| 5.2.3      | 垫层包角对管道应力的影响           | 106        |
| 5.2.4      | 垫层厚度对管道应力的影响           | 107        |
| 5.2.5      | 钢管下部与混凝土粘结状态的影响        | 108        |
| 5.3        | 垫层管非线性有限元分析            | 108        |
| <b>第六章</b> | <b>坝内埋管极限状态设计方法</b>    | <b>115</b> |
| 6.1        | 坝内埋管抗裂极限状态             | 116        |
| 6.2        | 坝内埋管强度极限状态             | 116        |
| 6.3        | 安全系数的选定                | 117        |
| 6.4        | 坝内埋管极限状态设计步骤           | 118        |
| 6.5        | 算例                     | 120        |
| 6.6        | 与模型试验和实际工程的比较          | 123        |
| 6.6.1      | 模型制作和测试                | 124        |
| 6.6.2      | 试验成果与分析                | 125        |
| 6.6.3      | 结论                     | 130        |
| <b>第七章</b> | <b>钢衬钢筋混凝土岔管</b>       | <b>132</b> |
| 7.1        | 钢衬钢筋混凝土岔管构造和设计原则       | 132        |
| 7.1.1      | 构造                     | 132        |
| 7.1.2      | 设计原则与方法                | 133        |
| 7.1.3      | 国外钢衬钢筋混凝土岔管模型试验        | 134        |
| 7.2        | 大七孔水电站钢衬钢筋混凝土岔管设计      | 139        |
| 7.2.1      | 岔管结构形式的选择              | 139        |
| 7.2.2      | 钢衬厚度和钢筋用量的初步确定         | 140        |
| 7.2.3      | 钢衬钢筋混凝土岔管结构应力分析        | 141        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 7.3 大七孔电站钢衬钢筋混凝土岔管结构模型试验 ..... | 145 |
| 7.3.1 模型设计与测试 .....            | 145 |
| 7.3.2 试验结果与分析 .....            | 148 |
| 7.3.3 结论 .....                 | 153 |
| 7.4 柴石滩水电站钢衬钢筋混凝土无梁岔管设计 .....  | 153 |
| 7.4.1 明钢岔管三维有限元分析 .....        | 153 |
| 7.4.2 钢衬钢筋混凝土无梁岔管设计 .....      | 155 |
| 7.4.3 钢衬钢筋混凝土无梁岔管平面有限元分析 ..... | 156 |
| 7.5 钢衬钢筋混凝土无梁岔管结构模型试验 .....    | 159 |
| 7.5.1 模型制作与测试 .....            | 159 |
| 7.5.2 试验成果与分析 .....            | 163 |
| 7.5.3 结论 .....                 | 167 |
| 参考文献 .....                     | 170 |

# 第一章 混凝土坝下游面压力管道

## 1.1 混凝土坝下游面压力管道布置

在混凝土坝坝后式水电站中,通常是将压力引水管道布置在混凝土坝内。从 20 世纪 60 年代开始,国外开始在较高水头的这类电站中,将压力管道布置在下游坝面上(以下简称坝下游面管,有时也称坝后背管或坝后管,图 1-1 所示)。进水口仍设在上游坝面上,压力管道近于水平地穿过坝体上部,再沿坝下游面铺设,并以弯段及水平段与水轮机蜗壳连接。坝下游面管道与坝体分开施工,但固定在坝体上。

与坝内管道相比,坝下游面管有以下优点<sup>[1]</sup>:

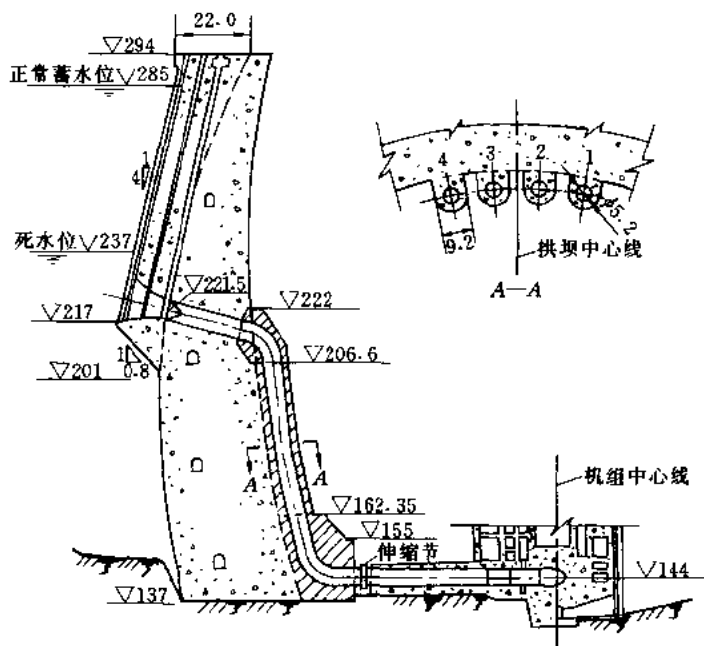


图 1-1 东江水电站

(1) 便于布置。对于较薄的混凝土高坝,如果将大直径管道布置在坝体内,往往需要将进水口放低,将管道布置在坝体下部,这就增加了进水口设施的困难。采用坝下游面管道可以将进水口尽量抬高。

(2) 将管道布置在坝体轮廓线以外的下游面上,内水压荷载基本上不传递到坝体内,减少了管道空腔对坝身的削弱,有利于保持大坝特别是薄高拱坝的整体稳定性,从而确保坝身安全。

(3) 管道布置在坝下游面上,可以晚于坝体施工,使坝体施工不受管道施工与安装的干扰,可以提高坝体施工质量,并加快速度,提前发电。

(4) 管道可以随机组的投产先后分期施工,有利于合理安排施工进度,且减少投资积压,机组台数较多时,效益更为显著。

对于高的较轻型混凝土坝和大直径压力管道,这些优点就更加明显。正因为以上优点,在国内外不少水电工程,特别是高坝情况下布置坝后式厂房的水电站,都选用了坝下游面管布置方案,表 1-1 列出了采用坝下游面管的一些工程实例。

表 1-1 坝下游面管工程实例

| 电站名称     | 所在国家   | 坝 型  | 坝 高<br>(m) | 最大水头<br>(m) | 钢管直径<br>(m) | 结 构 形 式 |
|----------|--------|------|------------|-------------|-------------|---------|
| 克拉斯诺雅尔斯克 | 前苏联    | 重力坝  | 124        | 101         | 7.5~9.3     | 钢衬钢筋混凝土 |
| 泽 雅      | 前苏联    | 支墩坝  | 115        | 98.8        | 7.8         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 契尔盖      | 前苏联    | 拱 坝  | 232.5      | 207         | 5.5         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 萨扬舒申斯克   | 前苏联    | 重力拱坝 | 242        | 222         | 7.5         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 占勃萨依     | 前苏联    | 重力坝  | 101        | 101         | 7.0         | 明钢管     |
| 伊泰普      | 巴西、巴拉圭 | 重力坝  | 196        | 128         | 10.5        | 明钢管     |
| 瑞维尔斯托克   | 加拿大    | 重力坝  | 136        |             | 7.9         | 明钢管     |
| 东 江      | 中 国    | 拱 坝  | 157        | 175         | 5.2         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 紧水滩      | 中 国    | 拱 坝  | 99         | 85          | 4.5         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 锦 江      | 中 国    | 重力坝  | 59.45      |             | 3.4         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 桃林口      | 中 国    | 重力坝  | 72.5       | 50          | 3.0         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 五强溪      | 中 国    | 重力坝  | 87.5       | 73.8        | 11.2        | 钢衬钢筋混凝土 |
| 李家峡      | 中 国    | 拱 坝  | 165        | 122         | 8.0         | 钢衬钢筋混凝土 |
| 景 洪      | 中 国    | 重力坝  | 107.0      | 89.7        | 10.8        | 钢衬钢筋混凝土 |
| 三 峡      | 中 国    | 重力坝  | 175        | 146         | 12.4        | 钢衬钢筋混凝土 |

虽然坝下游面管具有以上优点,但由于上弯段以上的坝内埋管段加长,斜管段向下游平移,使厂房和坝纵轴线的距离加大(即厂房要向下游移动),既增加了引水道的总长度和其它工程量,又使引水道中的水力损失增加。如果混凝土坝下游面上要布置施工栈桥及施工机械,对管道施工也会有有一定的干扰。因此,是否采用坝下游面管,应结合工程的具体情况,经过技术经济比较后确定。

举世瞩目的三峡水电站,在初步设计阶段,压力管道拟采用全部布置在坝体轮廓线以外的钢衬钢筋混凝土结构,由于这种布置使得工程量(如左岸厂房“1~5”机组段的基础开挖量)增加较多,因此经过技术经济比较,在技术设计阶段,决定采用浅槽式(有时也称浅埋式)钢衬钢筋混凝土管道布置形式。这种布置形式既保留了坝下游面管的所有优点,又使得工程量增加最小,实现了坝下游面管布置的最优化。

## 1.2 混凝土坝下游面压力管道结构形式

混凝土坝下游面管主要由进水口、渐变段、上水平段、上弯段、斜直段、下弯段和下水平段组成,其中进水口、渐变段和上、下水平段与坝内埋管布置基本相同,只是将斜直段和上、下弯段布置在坝下游面上。上、下弯段通过锚筋锚固在坝体上,成为斜直段的锚固端。斜直段可以采用钢衬钢筋混凝土结构,也可以采用明钢管结构,可以根据国家的技术经济发展水平和工程的具体条件作出决定。

### 1.2.1 坝下游面明钢管

钢管从坝体穿出以后,连接上弯管,上弯管锚固在坝体上,是下游坝面管的上固定端。明钢管用支承环支承在坝下游面上的支墩上,其布置和构造与一般的露天钢管相似。钢管斜直段以下连接下弯管,下弯管亦固定在坝体上,成为坝下游面明钢管的下固定端,然后进入厂房与蜗壳相连。比如目前已建成的世界上最大的水电站——伊泰普水电站,其双支墩重力坝高196m,钢管直径

10.5m，斜直段为明钢管，管壁厚度为 30~65mm，单机容量 715MW，如图 1-2 所示。又如加拿大的瑞维尔斯托克水电站，重力坝高 136m，钢管直径 7.9m，斜直段也采用了明钢管。

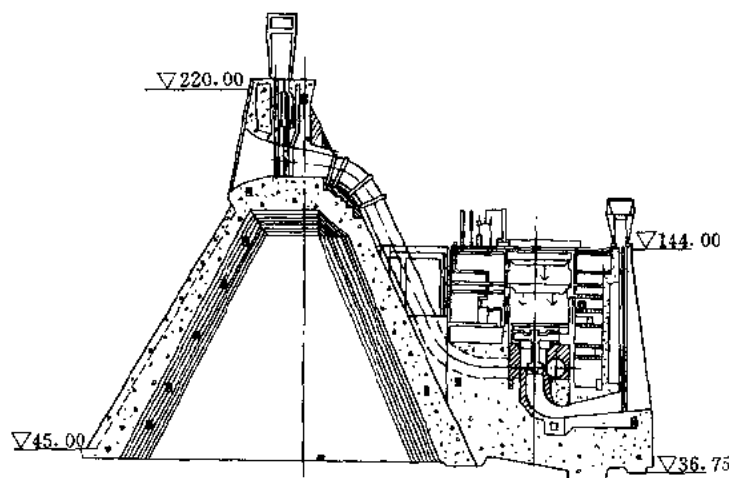


图 1-2 伊泰普水电站

坝下游面明钢管的现场安装工作量小，进度快，与坝体施工干扰小。但是当钢管直径和水头很大时，可能要加大钢管材料的强度和施工工艺上的困难。敷设在下游坝面上的明钢管一旦失事，水流直冲厂房，将产生灾难性的后果，因此必须要求钢管具有极高的安全可靠性能。

### 1.2.2 坝下游面钢衬钢筋混凝土管

如上所述，当钢管直径和水头很大时，如果坝下游面管采用明钢管结构，可能要提高钢管材料的强度和增加施工工艺上的困难，尤其是在钢铁工业相对落后的发展中国家，这时就可以采用钢衬钢筋混凝土结构。钢衬钢筋混凝土管道是内衬钢板外包钢筋混凝土的组合结构，管道用坝下游面上的键槽及锚筋与坝体固定。钢衬与混凝土之间不设垫层，二者共同承受内水压力。这种结构的实质是用钢筋混凝土代替了部分钢板，它的优点是：

(1) 管道位于坝体轮廓线以外，所以允许混凝土开裂，使钢衬

和钢筋可以较充分地发挥承载作用。

(2) 利用了钢筋承载,可以减少钢板厚度,避免采用高强钢、厚钢板引起的技术、经济上的问题。

(3) 由于环向钢筋接头分散,钢管和钢筋在同一个地方破裂的机率极小,所以减少了钢管焊缝缺陷引起爆破的危险性。

(4) 减少外界因素对管道破坏的可能性,在严寒地区有利于管道防冻。

前苏联由于高强钢材比较稀缺,而且认为钢衬钢筋混凝土组合结构更加安全,因此从 60 年代起已经有 5 座水电站,采用了这种结构形式,取得了技术经济上的好处,并积累了一定的设计、施工经验。其中,前苏联最大的萨扬舒申斯克水电站,如图 1-3 所示,总装机容量 6400MW,重力拱坝坝高 236m,最大工作水头 278m,钢管直径 7.5m,外包钢筋混凝土厚 1.5m。由于采用了钢衬钢筋混凝土联合受力的结构,钢管壁厚大为减薄,仅为 16~30mm。其

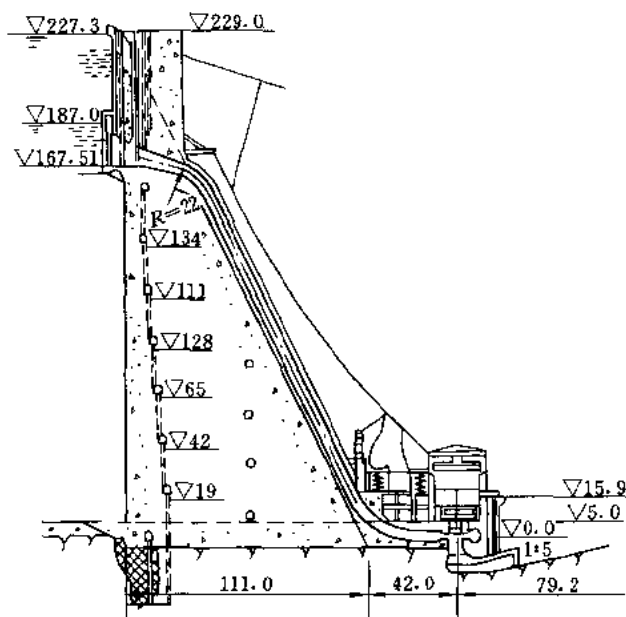


图 1-3 萨扬舒申斯克水电站

它 4 座水电站钢衬钢筋混凝土管道的主要参数如表 1-1。

由于这种形式的管道不仅具有这些优点，而且又能适应所有的混凝土坝型，所以这种管道有被广泛采用的趋势。我国已经建成的湖南东江水电站、浙江紧水滩水电站、湖南沅江五强溪水电站、青海黄河李家峡水电站，都采用了坝下游面钢衬钢筋混凝土管道。正在兴建的三峡水电站，经过十几年的科学研究，反复论证，已经决定采用坝下游面钢衬钢筋混凝土管道，布置在坝下游面浅槽内，管道露出坝面以外约一半多点，如图 1-4 所示，其主要参数列于表 1-1。以下主要对这一种结构形式进行论述。

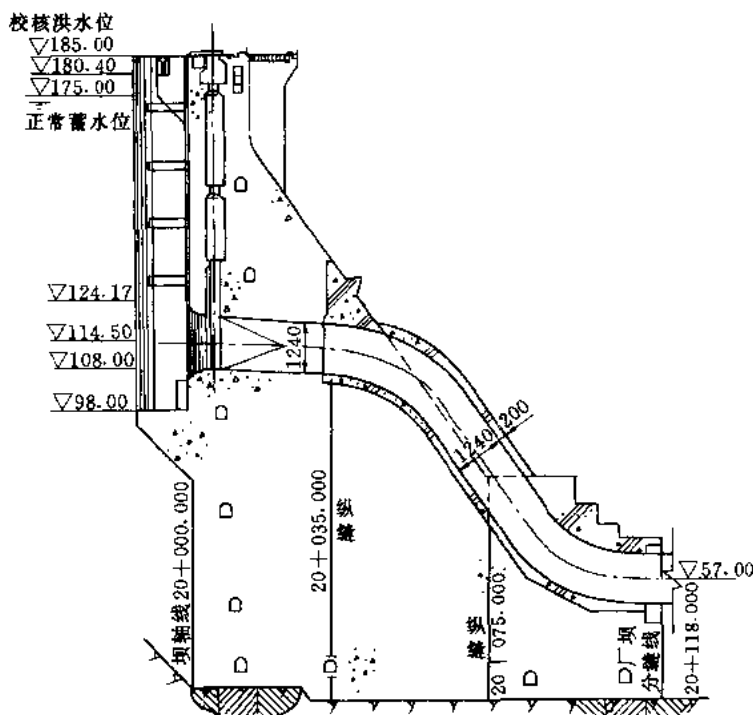


图 1-4 三峡水电站

### 1.3 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道构造<sup>[1]</sup>

坝下游面钢衬钢筋混凝土管道的内层为钢管，由钢板卷制焊

成，按运输吊装条件制成一定长度的管节，运至现场进行环缝焊接组装。因为钢管埋设在混凝土内，又无外水压力作用或外水压力很小，所以如果能采取必要措施（如在钢管内加临时支撑结构）保证钢管在施工期间（包括运输和浇筑外包混凝土时）不变形，就不需要或仅需少量地在钢管外壁加设刚性环等加劲措施。

环向钢筋可设二或三层，应合理选择钢筋直径，使钢筋间距适中，利于受力和控制裂缝宽度，并便于混凝土浇筑。环向钢筋接头的焊接质量必须严格保证，并应经试验检定。前苏联已采用专门的装置将大直径（达70mm）钢筋对接焊并卷成与钢衬管节长度对应的螺旋状钢筋环，这样不仅节约了钢材，而且减少了焊接接头，提高了质量和施工速度。内外层钢筋用角钢加工成的支撑桁架来固定，布置在每节骨架的两端。为了便于架设环向钢筋以及改善坝下游面管承受轴向力的性能，要加设纵向钢筋。与每一管节对应，组成有足够刚性的钢筋构架，整体吊运至现场，与钢管管节配合组装。内层钢筋与钢管之间用少量辐射向钢撑定位，二者之间留有150mm以上的间隙以利浇筑混凝土。必须指出，钢衬内外层钢筋的联合受力是靠将它们连成整体的混凝土而不是靠它们之间连接用的钢材，因此固定钢筋与钢衬的支撑应尽量少设，以免影响混凝土的浇筑质量，并避免钢衬与支撑连接处的局部应力。

管道与坝面之间有剪应力，可以在接触面上布置键槽，并加设法向钢筋。弯管段设有锚杆以防止管道与坝体脱离。

坝下游而钢衬钢筋混凝土管道的混凝土壁厚，根据钢筋布置和混凝土施工条件选定。用增加壁厚的办法来改善应力状况和抗裂性，效果是不显著的，也是不经济的。此外，增加壁厚也不能减小由坝体变形引起的管道内的轴向应力，因为管道的刚度相对坝体来说是比较小的，增加一些管壁厚仍然难于减小坝体的变形。实践说明，内径为7~8m坝下游而管，混凝土壁厚1.5m或更小些就可以了。

## 1.4 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道设计原则

### 1.4.1 荷载组合

坝下游面钢衬钢筋混凝土压力管道的荷载主要有：

(1) 内水压力。内水压力是坝下游面管的主要荷载，由钢衬和钢筋混凝土共同承受。当荷载较小，混凝土不开裂时，内水压引起的环向拉力大部分由混凝土承受，钢衬和钢筋的应力不大。荷载较大时，混凝土内将发生径向裂缝，环拉力主要由钢衬及钢筋共同承受。由于与钢筋单价相比钢板较贵，而且含筋量高又有利于阻止裂缝发展，因此原则上钢衬可采用结构要求的最小厚度且多用钢筋。但迄今为止，实际工程采用的钢衬厚度仍大于或接近于同截面钢筋的折算厚度。

(2) 温度荷载。温度荷载，主要由管道施工期与运行期温度差以及运行期间管道内外温差所产生。坝下游面管属厚壁管，管外壁不设保温层，因此温度应力不可忽略。混凝土不开裂时，管壁内外温差引起的温度应力，在管道的内外壁符号相反，因此宜布置内外两层钢筋受力。混凝土开裂以后，混凝土内的温度应力被释放，但必须考虑温度荷载所引起的钢衬和钢筋的附加应力及对裂缝宽度的影响。

(3) 坝体变形引起的作用在管道上的轴向力。坝体受载后，引起坝下游面管的轴向应力以及管道与坝面之间的剪应力和正应力。坝下游面管道的轴向应力主要是压应力，沿管道横截面略呈不均匀分布，在钢衬和外周混凝土中都存在，使坝下游面管处于不利的三向复合受力状态，在设计中要进行核算。管道与坝体之间的应力要用合理的管坝连接措施来解决。此外，拱坝的拱向应力也会引起管道中的附加应力，但设计中一般忽略不计。固定在坝体上的管道，局部地增加了坝体的刚度，也会影响坝体的变形和应力，其影响与管道的尺寸有关，在坝体设计中要考虑这种影响。

(4) 振动荷载。坝下游面管道因管内动水引起的振动，用与坝

体固定的措施来消除。地震荷载下管道与坝体作为整体考虑。

#### 1.4.2 设计要求及准则

迄今为止,由于我国和国外的水电站压力钢管设计规范中均没有钢衬钢筋混凝土管道的内容,因此这种管道的荷载组合问题,在设计中可遵循压力钢管设计的一般性原则,参照其它管道形式进行设计。作为压力管道设计的一般性原则,要求在上述荷载各种可能的组合下,管道结构应该满足以下要求:①有足够的强度;②管壁混凝土允许开裂,但裂缝宽度应该限制在允许范围内,一般不超过 0.3mm;③管坝连接可靠;④结构尽可能简单、安装及施工方便、经济。

内水压力是坝下游面管的主要荷载,钢衬和钢筋的参数主要由它所决定。60年代,前苏联在克拉斯诺雅尔斯克水电站第一次采用这种管道时,没有考虑钢管与外包钢筋混凝土联合受力,只将后者视为预防钢管事故的防护性结构,在内水压力作用下,规定钢管和钢筋混凝土都能单独承受全部内水压力,安全系数前者取 1.3~1.8,后者取 1.1~1.3,总的安全系数为 2.4~3.1。

1966~1973年,前苏联一些水电设计和科研部门在一系列理论和试验研究的基础上,得到了一些原则性结论,即:①钢衬和混凝土能作为整体结构可靠地联合工作,即使钢衬与混凝土的粘结遭到破坏,也不影响管道的应力状态;②结构破坏前,混凝土内产生有限的径向裂缝,正常运用时允许混凝土中发生裂缝;③内水压力引起的钢衬和钢筋内的应力取值一样,与环的半径无关;④极限状态进行强度计算,在正常荷载作用下,钢衬和钢筋的应力不得超过规范所规定极限值。因而确认了按整体结构设计坝下游面管的原则,即不进行分部校核计算,只进行整体强度设计和校核。

在设计萨扬舒申斯克水电站坝下游面管时,就遵循了这个设计准则。根据上述准则完成的萨扬舒申斯克水电站坝下游面管的施工设计比以前有了很大进步,把二者作为整体结构,总安全系数取 1.8~2.0,钢衬不再按单独承受全部内水压力进行校核。同