

前苏联钢衬钢筋 混凝土压力管道 设计与施工

《前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工》编辑委员会 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

前苏联钢衬钢筋 混凝土压力管道设计与施工

《前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工》

编辑委员会 编译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 简 介

前苏联是水电站钢衬钢筋混凝土压力管道的首创国,她的一些大型水电站如萨扬-舒申斯克、克拉斯诺雅尔斯克等,均采用了这种管道,至今仍安全运行。前苏联从20世纪60年代中期开始对钢衬钢筋混凝土压力管道进行了较系统的试验研究、理论分析和设计计算,提出了设计准则并修改了相应的设计规范,有一些专著问世,积累了丰富的经验。本书比较系统地介绍了前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道的试验研究成果、设计计算方法及所依据的钢筋混凝土规范,钢衬及钢筋骨架组织施工和采用的焊接机械。

本书可供从事水电、火电、核电和输水工程水工建筑的工程设计、施工和压力管道安装人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工/《前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工》编辑委员会编译. —北京:中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1169-2

I. 前… II. 前… III. ①钢筋混凝土压力管-压力管道-设计-经验-苏联②钢筋混凝土压力管-管道施工-经验-苏联 IV. U17

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第055835号

书 名	前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工
作 者	《前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工》编辑委员会 编译
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国人民大学印刷厂
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 36印张 840千字
版 次	2002年8月第一版 2002年8月北京第一次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	98.00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

《前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计与施工》

编辑委员会

主任：张超然 马善定

副主任：史振寰 戴会超 伏羲淑

委员：张超然 马善定 魏永辉

 赵锡锦 陈际唐 史振寰

 戴会超 伏羲淑 朱尔玉

 黄 伟 卢安民

主编：张超然

副主编：戴会超

序 一

三峡工程建设已走过 9 年的历程。现在无论从地面还是空中、乃至卫星遥感图像看，整个工程日新月异，枢纽轮廓日益清晰。昔日停留在人们脑海中、绘制于设计蓝图上的枢纽工程，正在滔滔的长江上、壮丽的峡谷中逐步成为现实。

三峡工程是世界最大的水利枢纽工程，不论工程规模效益，或工程建设涉及的科学技术难题，均居世界前列。自 1993 年开始建设以来，三峡工程建设已经在设计、施工和科研等方面取得了多项有世界领先水平的科技成果，确保了工程建设的顺利进展。三峡工程继 1997 年 11 月 8 日大江截流后，又在水深 60m 的河床中用 10 个月的时间，克服了河床复杂地形和深厚覆盖层的困难，并经历了 1998 年 8 次洪峰的考验，优质高速地完成了堰体混凝土防渗墙施工，建成了挡水 80m 的上、下游围堰，做到了“滴水不漏”，保证了大坝和发电厂房的全面施工。左岸双线五级船闸要深挖 175m，为了克服岩体地应力释放而引起的山体变形，采用了大规模的预应力锚索（3000kN，深 30~60m）进行深锚和高强锚杆（8~15m）作中浅层锚固，配合岩壁排水系统，成功地完成了 60m 深的直立闸室边坡开挖，稳住岩壁，保证了开挖安全和岩体永久稳定，从而解决了三峡工程的一个重大技术难题。大坝和发电厂房规模巨大，为确保二期导流期间河床溢流坝段、左侧发电厂房及挡水坝段建设，混凝土浇筑量巨大，必须在 3~4 年之内全部完成，采用常规的塔式起重机吊罐浇筑的方法已不能适应三峡工程，经过充分反复的科学论证，选定以塔带机为主，辅以大型门塔机和缆机的综合施工方案，1999~2001 年 3 年混凝土浇筑总量高达 1400 万 m^3 ，连续 3 年三破世界记录，有力地保证了第二阶段工程的顺利实施。

三峡电站引水管道也是三峡工程重大的科技成就，具有直径大（12.4m）、条数多（26）、 HD （1730 m^2 ）值高等特点，经综合比选，选用钢衬钢筋混凝土联合受力结构。三峡压力管道在设计内水压力下，外包混凝土按限裂设计，全部内水压力由钢衬、钢筋共同承担，总的安全系数大于 2.2。钢衬和钢筋各自单独承担全部内水压力时，要求安全系数均大于 1.0。该方案外包混凝土选用Ⅱ级钢筋，需布设 4~5 层环筋，施工难度大，不利于保证混凝土浇筑质量。在吸收前苏联经验的基础上，三峡总公司组织设计、施工和科研单位进行科技攻关，并优化设计，总的安全系数调整为 2.0；钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时安全系数分别为 1.2 和 0.8，选用Ⅲ级钢筋调整为 3 层环筋，可节约钢材 10% 左右，既节约投资，又有利施工。

为借鉴前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计和施工经验，三峡总公司组织参加过三峡水电站优化设计研究的专家和部分翻译人员，编写此书，总结经验，为三峡第三阶段工程和国内其他工程压力管道的设计研究提供借鉴。

国务院三峡建设委员会副主任
中国长江三峡工程开发总公司总经理

陆佑楣

序 二

钢衬钢筋混凝土压力管道是一种内部钢管与外包钢筋混凝土联合受力的复合结构，它能充分发挥两种结构各自的特性，因而具有安全、经济、工艺简单等综合优点，特别适用于直径和水头特大的巨型压力管道，经反复论证，三峡工程的压力水管就采取这一形式。

水电站钢衬钢筋混凝土压力管道首创于前苏联，她的一些大型水电站如萨扬-舒申斯克、克拉斯诺雅尔斯克等，均采用了这种管道，迄今已安全运行二三十年。这种结构形式还成功地运用到了大型电站的分岔管和水轮机蜗壳。

近年来中国长江三峡工程开发总公司就压力管道设计问题曾多次邀请俄罗斯专家咨询，并组团赴俄罗斯考察，搜集到了一批有关的技术规范和资料，集中反映了前苏联在这一领域的发展过程和成就。现将这些资料整理翻译出版，相信一定会对我国工程技术人员更全面、系统地了解 and 吸收前苏联的经验，提供很大便利。

引进外国技术是为了消化吸收和提高。事实上，我国在 20 世纪 80 年代以来在吸收前苏联经验的基础上，已在东江、紧水滩、李家峡、五强溪等大型水电站成功地采用了钢衬钢筋混凝土压力管道，并有所创新。特别在三峡工程上，水电站引水管道的内径达 12.4m，承受设计水头 140m，为世界上规模最大的钢衬钢筋混凝土压力管道，在设计中，综合各家之长，出色完成任务，现正顺利建设中，投产发电已指日可待。由此可知，近二十年来，我国在钢衬钢筋混凝土压力管道的设计、研究、建造、运行和原型观测等方面，已完成大量科研工作，积累了宝贵经验，取得了重大成就，其中在非线形计算、大比尺仿真模型试验和原型观测分析等方面，均达到国际先进水平。希望今后尽早加以系统总结，编辑成书出版，以便向国内外展示我国的成就，进一步推动技术进步，并向国际市场进军。

中国工程院副院长

中国科学院、工程院院士

中国长江三峡工程开发总公司技术委员会主任

潘家铮

前 言

敷设在混凝土坝下游坝面上的钢衬钢筋混凝土压力管道是一种经济、安全,并具有广阔发展前景的水电站输水管道形式。它具有很多优点:①它是一种钢板衬砌与外包钢筋混凝土联合受内水压力的结构,钢衬的厚度可以较明管方案薄。这就解决了一些高水头、大直径的压力管道,当采用厚度超过32~40mm钢板时的材质要求和卷板、焊接的困难;②钢衬和钢筋混凝土联合受力,两者在同一部位同时出现缺陷,并都达到破坏的概率很小,万一发生事故,也不是撕裂性的突发事件,所以管道的整体安全度相对较高;③在工程布置上,改变了传统的坝内埋管形式,将压力管道布置在下游坝面,从而减少了管道空腔对坝体的削弱,减少了坝体施工与管道安装施工的干扰,有利于保证施工质量和进度;④由于减少了一些高强钢板的进口,在造价上相对经济些;⑤外包混凝土可以防止钢管受严寒或日照等温度影响。

前苏联是世界上首先采用钢衬钢筋混凝土压力管道的国家。他们在20世纪六七十年代兴建的大型水电站如克拉斯诺雅尔斯克、萨扬-舒申斯克和契尔盖,当压力输水管道的 HD 值(H 为设计水头, D 为管道内径)不低于 1200m^2 时,均采用了钢衬钢筋混凝土压力管道。扎哥尔抽水蓄能电站采用铺设在软基上的钢衬钢筋混凝土压力钢管。位于安加拉河上的鲍古昌水电站也采用了这种形式的压力管道。此外,阿里-瓦赫德水利枢纽的水轮机引水管道的岔管、努列克水电站($HD=1600\text{m}^2$)、英古里水电站($HD=1650\text{m}^2$)、萨扬-舒申斯克水电站($HD=1700\text{m}^2$)、罗贡水电站($HD=2280\text{m}^2$)的蜗壳均采用钢衬钢筋混凝土结构。对这种钢衬钢筋混凝土结构作了大量的科学试验研究工作,积累了丰富的经验,并编制和颁布了一整套设计、施工规范。

我国在20世纪70年代开始在东江、紧水滩、五强溪和李家峡等水电站选用了钢衬钢筋混凝土压力管道,取得了一些设计和施工经验。长江三峡工程水电站压力管道引水流量大($966\text{m}^3/\text{s}$),钢管直径大(12.4m),钢管最大水头(计入水锤压力)为139.5m, HD 值达 1730m^2 。在技术设计阶段,经过比较论证,选定钢衬钢筋混凝土作为压力管道的结构形式,并为此进行了大量的科学试验研究和设计计算。为了吸收前苏联的钢衬钢筋混凝土压力管道的设计、施工经验,中国长江三峡工程开发总公司于1997年5月邀请了三位俄罗斯专家进行了咨询,并于1997年9月组团赴俄罗斯考察,还委托了俄罗斯专家对三峡工程水电站压力管道按前苏联规范作复核计算。在上述活动中,三峡总公司收集到一些前苏联有关钢衬钢筋混凝土结构的设计规范、文章和手册等资料,经过编委会的翻译编辑和审定,出版了本书。

《水工建筑物钢衬钢筋混凝土结构设计参考资料》II-780-83是一本手册,对前苏联《水工建筑混凝土和钢筋混凝土结构设计规范》CHuII56-77中的一章作了进一步阐述,对计算方法作了具体补充,并附有计算实例。需要指出,俄罗斯已采用新的规范《水工建筑物的混凝土和钢筋混凝土结构》CHuII2.06.08-87替代CHuII-56-77,因此使用本参考

资料 П-780—83 时，应与 СНиП2.06.08—87 配合使用。后者在国内已有译本，与之配合的参考手册即本书的第四篇。

《地下埋藏式和钢衬钢筋混凝土压力管道》一文，介绍了与岩体共同工作的水轮机引水管道管壳的构造和计算问题，以及钢衬钢筋混凝土结构水轮机引水管道的试验研究成果和各种计算方法。

《水工建筑物钢管道设计规程》MY34 747—76 是明钢管设计规范。明钢管按此设计，同时对钢衬钢筋混凝土的钢衬部分也是有用的。

《水工建筑混凝土与钢筋混凝土结构设计参考资料（非预应力）》Ⅰ—46—89 内容包括非预应力水工建筑混凝土与钢筋混凝土结构计算与设计的基本原则、建议和实例，是配合前苏联规范 СНиП2.06.08—87 而编写的，可用于永久或周期性地处于水介质作用下水工建筑物的设计。

《高水头超大型压力管道的焊接》介绍了布拉茨克、克拉斯诺雅尔斯克等四座水电站的高水头大型压力管道的结构和安装方法以及焊接工艺。

另外，对《水工建筑机械设备安装手册》将专门组织翻译出版，本书只择其第五章《压力输水管的安装》作了介绍。

这些资料有的虽然出版较早，但从中可以看出前苏联在这一技术领域的发展。据了解，本书中属于规范性的内容目前俄罗斯仍在执行，但也在进行修订工作，需要密切注意其发展和新规程的颁布实施。

以上这些材料的编辑出版，集中地介绍了前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道的设计、施工经验，对正在建设的长江三峡工程会有借鉴作用，对提高我国钢衬钢筋混凝土压力管道的设计、施工水平也是有裨益的。

本书编辑委员会

2002 年 4 月

目 录

序一

序二

前言

绪论..... 1

第一篇 水工建筑物钢衬钢筋混凝土结构设计参考资料

1.1 总则.....	16
1.2 钢衬钢筋混凝土水工结构及其特性.....	17
1.3 荷载、作用及其组合.....	20
1.4 基本计算原则.....	22
1.5 结构计算简图.....	23
1.6 第一类极限状态下的强度计算.....	28
1.7 钢衬钢筋混凝土构件裂缝开度计算.....	31
1.8 构造.....	33
1.9 钢衬钢筋混凝土结构安装和混凝土浇筑特点.....	36
附录 1.1 钢衬钢筋混凝土结构中推荐采用的材料	38
附录 1.2 考虑温度作用的计算	41
附录 1.3 计算例题	43

第二篇 地下埋藏式和钢衬钢筋混凝土压力管道

2.1 地下埋管的现行状况与存在的问题.....	67
2.2 隧洞式水轮机引水管道的实例.....	73
2.3 与岩体共同工作的钢衬计算.....	83
2.4 钢衬钢筋混凝土结构水轮机引水管道试验研究	113
2.5 均质厚壁圆筒的计算	122
2.6 利用薄壁筒形壳体理论计算厚壁圆筒	123
2.7 按克列恩罗格法计算厚壁钢筋混凝土管道	125
2.8 按 A. B. 别洛夫法计算厚壁钢衬钢筋混凝土管壁	128
2.9 弹性厚壁圆筒的温度应力	132
2.10 按允许应力法计算钢衬钢筋混凝土管壳.....	134
2.11 按破坏力法计算钢衬钢筋混凝土管壳.....	135

2.12 弹塑性变形的基本规律·····	138
2.13 均质圆筒里发生塑性变形的条件·····	143
2.14 按极限状态法计算钢衬钢筋混凝土管壳·····	144
参考文献·····	148

第三篇 水工建筑物钢管道设计规程

3.1 适用范围、基本规定、主要符号·····	155
3.2 一般构造要求·····	158
3.3 材料和技术要求·····	163
3.4 外荷载和作用力·····	169
3.5 计算分析·····	172
3.6 水力学计算·····	175
3.7 热力学计算(结冰)·····	176
3.8 通气设施·····	177
3.9 钢结构强度验算·····	179
3.10 管道的水力试验·····	183
附录 3.1 连续梁式管道计算·····	185
附录 3.2 作用于镇墩支墩上的各种力·····	192
附录 3.3 支承环和刚性环的强度计算·····	194
附录 3.4 支座结构计算·····	199
附录 3.5 法兰联接和温度(套筒式)伸缩节计算·····	202
附录 3.6 沉陷和温度——沉陷伸缩节计算的建议·····	216
附录 3.7 露天弯管计算·····	219
附录 3.8 对称联接的圆锥壳体计算·····	220
附录 3.9 堵头计算·····	249
附录 3.10 进入孔计算·····	254
附录 3.11 管道稳定性计算·····	257
附录 3.12 确定水头损失的建议·····	262
附录 3.13 临时放空管道计算·····	269
附录 3.14 初步设计阶段确定管道主要结构尺寸的建议·····	271
附录 3.15 第三篇中的附表·····	275

第四篇 水工建筑混凝土与钢筋混凝土结构设计参考资料(非预应力)

4.1 计算的基本原理、荷载和作用·····	281
4.2 混凝土与钢筋混凝土结构的材料·····	288
4.3 混凝土与钢筋混凝土结构构件强度和疲劳计算·····	294

4.4	钢筋混凝土构件裂缝形成的计算	379
4.5	钢筋混凝土构件裂缝开度计算	388
4.6	钢筋混凝土结构构件变形计算	399
4.7	混凝土与钢筋混凝土结构构件在温度和湿度作用下的计算	407
4.8	构造要求	419
附录 4.1	主要符号 (强制性)	447
附录 4.2	废除的物理量单位和国际单位制单位的对照 (参考性)	449
附录 4.3	钢筋的主要类型及根据荷载特性和计算温度确定在钢筋混凝土结构中的 使用范围 (强制性)	450
附录 4.4	用来制造钢筋混凝土和混凝土结构的埋设件的碳钢使用范围 (强制性)	452
附录 4.5	在 T 形、I 形和箱形截面混凝土构件强度计算中计算系数 K 的曲线图 (强制性)	453
附录 4.6	计算混凝土受压区高度曲线图 (参考性)	454
附录 4.7	混凝土与钢筋混凝土结构中裂缝宽度允许值 (参考性)	456
附录 4.8	钢筋混凝土构件裂缝开度 (参考性)	459
附录 4.9	按 CHyΠ2.03.11-85 ^[16] 混凝土的渗透性指标 (参考性)	461
附录 4.10	水介质侵蚀性指标 (一) (参考性)	462
附录 4.11	水介质侵蚀性指标 (二) (参考性)	463
附录 4.12	根据裂缝开展计算确定矩形截面构件开裂区段刚度系数的曲线图 (参考性)	464
附录 4.13	温度作用下结构计算时混凝土的特征值 (推荐性)	465
附录 4.14	钢筋焊接接头的基本类型 (强制性)	467
附录 4.15	钢筋与钢板焊接连接的基本类型 (强制性)	470
附录 4.16	热轧钢筋的规格 (参考性)	472
附录 4.17	电力工程建设中建议采用的钢筋规格 (参考性)	473
附录 4.18	混凝土抗压标号和抗压强度等级之间的关系 (参考性)	474
	参考文献	475

第五篇 高水头超大型压力管道的焊接

5.1	布赫达日明斯克、布拉茨克、克拉斯诺雅尔斯克和库班-卡劳斯 2 号水电站 压力管道的特征	482
5.2	水轮机引水管道管环在拼装基地上的焊接	488
5.3	引水管道的拼装基地	495
5.4	水轮机引水管道在线路上的安装	515
5.5	引水管道的质量检查	527
5.6	水轮机引水管道安装的成本	530

5.7 结论 533

第六篇 压力输水管的安装

6.1 一般情况 537

6.2 安装前输水管道管节的拼装 541

6.3 输水明钢管的安装 547

6.4 在隧洞内安装输水钢管 551

6.5 钢衬钢筋混凝土输水管道的安装 557

6.6 输水管道启用前的压水试验 562

绪 论

三峡工程厂房坝段分为钢管坝段和实体坝段,对应每个机组段长 38.3m,引水压力钢管采用一机一管引水方式,共 26 条。由于单机容量为 700MW,引水流量为 966m³/s,钢管直径为 12.4m,在当今世界上居首位。钢管最大静水头为 113m,计入水锤压力为 139.5m,HD 值达 1730m²。

在初步设计审查意见中,同意采用坝后浅槽背管布置形式,但对明管和钢衬钢筋混凝土联合受力未作结论,需要在技术设计中做进一步确定。中国长江三峡工程开发总公司(以下简称“三峡总公司”)技术委员会于 1994 年 1 月 28~30 日在北京召开了“长江三峡水利枢纽工程水电站压力管道形式选择专题报告审查会”。专家们一致认为,两个方案均是可行的。对于方案的选择绝大多数专家倾向选用钢衬钢筋混凝土联合受力方案。主要理由是:钢衬较薄,有利于保证钢材材质和焊接质量;只要认真浇好外包钢筋混凝土,可以保证钢衬和钢筋混凝土联合受力,因而安全度要比明管方案相对较高;采用本方案可基本采用国内钢材,受国外条件的制约小;另外前苏联对钢衬钢筋混凝土联合受力的技术已有丰富的经验可资借鉴,我国几个大型水电站也成功地采用了下游坝面钢衬钢筋混凝土管道,积累了一些实践经验。

一、前苏联钢衬钢筋混凝土压力管道设计和制造工艺

应三峡总公司邀请,俄罗斯专家(莫斯科水工金属结构设计局局长尼古拉耶夫、水工安装公司外经处处长埃利曼诺夫、莫斯科动力建筑研究院结构实验室主任里辛奇金)于 1997 年 5 月来宜昌三峡总公司对三峡水电站钢衬钢筋混凝土管道进行了咨询。

咨询的主题是管道的施工技术,包括钢管及螺旋形外包钢筋的制造及连接、运输、现场吊装及焊接、外包混凝土施工等。同时还对管道的设计和构造、取消伸缩节等问题介绍了经验并提了建议。

1. 钢衬钢筋混凝土压力管道的设计方法

管道按第一类(强度)极限状态用式(1)计算

$$K_H n_c N \leq m_a (F_a R_a + F_o R_o) \quad (1)$$

式中 K_H --- 可靠系数,一级建筑物用 1.25;

n_c --- 荷载组合系数,基本荷载用 1.0;

N --- 构件中的拉力;

m_a --- 工作条件系数,一级建筑物用 0.92;

F_a 、 F_o --- 钢筋、钢衬截面积;

R_a 、 R_o --- 钢筋、钢衬设计强度值。

钢衬厚度应尽量取结构最小厚度,如果所需钢筋面积太大,难于布置,可增加钢衬厚度以减少钢筋面积。

莫斯科附近的扎戈尔抽水蓄能电站有 6 条预制式钢衬钢筋混凝土压力管道,5 条已投

入运行, 1 条正在施工。它的构造代表了俄罗斯当前水平。管道内径 7.5m, 设计内压 171m 水头, 每条管长约 800m。钢衬 ($R_0=290\text{MPa}$) 厚 10mm, 内外层用 $\phi 40\text{A III}$ 钢筋 ($R_s=365\text{MPa}$), 每米管长共 20 根, 成正反螺旋形, 内层钢筋直接绕在钢衬外表面上。外包混凝土 M300, 壁厚 40cm, 粗骨料最大粒径 40mm, 坍落度 8~10cm。

管道环向钢筋早期曾用 $\phi 60$ 、 $\phi 70$ 的粗钢筋, 现趋向用 $\phi 40$ 以下强度较高的 A—III 钢筋, 纵向用 A—II 钢筋。

温度作用列入特殊荷载组合, 可降低安全系数。

弯段与直段同样设计, 材料设计强度可不降低。

早期一些管道, 如库普沙伊斯克电站管道的钢衬外设加劲环, 但后来在萨扬-舒申斯克等电站管道的钢衬上, 未设加劲环。

钢衬钢筋混凝土压力管道的混凝土管壁允许开裂, 露天管道的裂缝宽度限制值为 0.3mm。裂缝宽度可用式 (2) 计算

$$a_T = 7KC_g\eta \frac{\sigma_a}{E_a} (4 - 100\mu) \sqrt{d} \quad (2)$$

式中 K ——可用 1.2;

C_g ——对长期荷载用 1.3;

η ——对螺纹筋用 1.0;

σ_a ——钢筋拉应力值;

E_a ——钢筋弹性模量;

μ ——截面含筋率;

d ——钢筋直径, mm。

克拉斯诺雅尔斯克、萨扬-舒申斯克、扎戈尔等电站管道外包混凝土均发生了裂缝, 有的缝宽大于 0.5mm。有些裂缝在充水前就已发生, 是施工质量不好和气候条件引起。裂缝宽度和应力与季节有关。裂缝对建筑物运行未发现有明显影响, 克拉斯诺雅尔斯克电站管道已正常运行 30 多年。

2. 钢衬与钢筋框的制造和安装工艺

关于钢筋框的制作, 由于三峡管道尺寸大, 环向钢筋有 4 层, 不能完全套用俄罗斯现有工艺, 但可参考扎戈尔电站的方法: 内层螺旋形钢筋直接绕在置于水平轴旋转台架上的钢衬上, 并在此台架上, 在内层钢筋上焊上钢筋制的骨架, 再在此钢筋骨架上绕外层螺旋形钢筋。

对于三峡水电站管道, 每一管节长 4m, 钢衬及内支撑重 50t, 钢筋框重约 50t, 总重约 100t。钢衬与钢筋框是否联成整体后运输到现场安装就位, 取决于运输及起吊能力。如果二者分别运输和安装, 则先将钢衬在坝体上以悬臂方式支吊好, 然后再在其外部套上钢筋框。

浇筑管道, 混凝土以萨扬-舒申斯克电站管道 (钢筋混凝土壁厚 1.5m, 标号 200-300) 为例, 是采用专门的滑移式钢模板, 可进行无缝面的连续浇筑 (见图 1)。

钢筋布置很密时, 可用流态混凝土, 坍落度大于 20cm, 不必振捣。80 年代在英古里电站已应用过, 但在下游坝面管尚未用过。

根据咨询建议, 三峡总公司会同长江委及有关专家进行了专门讨论, 提出以下意见:

(1) 三峡电站钢衬钢筋混凝土管道原设计方案总的的安全系数 K 大于 2.2, 钢衬、钢筋各自单独承担全部内水压力时要求安全系数均大于 1.0。前苏联萨扬-舒申斯克电站管道 K 值为 1.8~2.0, 且按俄罗斯现行规范, K 值已进一步降低。建议适当降低 K 值, 并选用强度更高的钢板和钢筋以减少环筋层数, 取消加劲环, 以简化施工。

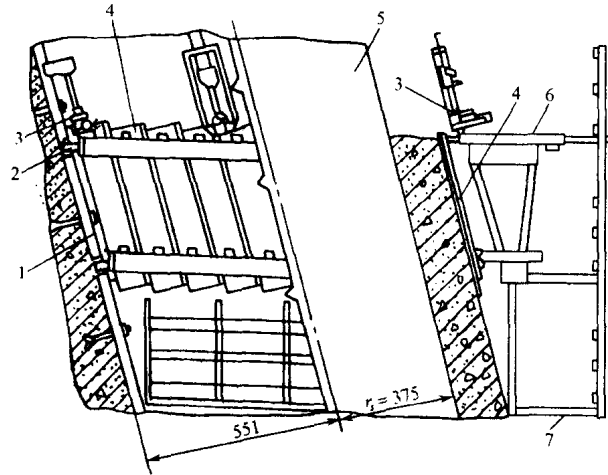


图 1 滑动模板结构

1—导轨; 2—滑轮支座; 3—传动; 4—模板;
5—管道内腔; 6—工作平台; 7—悬桥

(2) 三峡管道可采用螺旋形外包环筋的加工方法, 钢衬与环筋在工厂组装好, 整体运到坝面安装, 这有利于钢衬和钢筋的焊接质量和简化现场施工, 对此要进行认真研究。

二、赴俄罗斯考察

1. 概况

三峡总公司于 1997 年 9 月 3~16 日派出赴俄罗斯考察团。俄方由全俄国家外经技术工业出口联合公司 (下称俄技公司) 负责接待。考察团访问了三个设计科研单位、一个工厂和三个水电站。

考察团两次访问俄技公司, 签署了访问纪要。双方就钢衬钢筋混凝土管道强度及配筋计算、钢筋框制安设备的设计和制造、易流动混凝土的成分和生产技术, 用软垫层管替代伸缩节等方面提出加强技术交流和合作的意向。

访问列宁格勒水工设计院时, 院长、总工及萨扬-舒申斯克工程设总、施工处长等专家均与会, 重点介绍了该院设计克拉斯诺雅尔斯克、萨扬-舒申斯克等巨型电站及其钢衬钢筋混凝土压力管道的经验。

莫斯科水工金属结构制造厂是俄罗斯水工金属结构制作的主要工厂。考察团参观了该厂材料库、钢材预处理、下料、结构制作、机加工等车间。

在莫斯科动力建筑研究院, 由正、副院长等专家会见并陪同参观了地下结构及岩石力学、观测仪器等试验室。该院曾完成 250 个国内外大型水利水电工程的研究, 包括埃及阿斯旺坝和我国李家峡电站双排机厂房等。近年来其结构强度试验室在钢衬钢筋混凝土管道

的计算方面做了很多工作。

莫斯科附近的扎戈尔抽水蓄能电站装有 6 台 200MW 机组,最大水头 113m。管线位于土基上,管道支承在桩基上的混凝土纵向梁上。钢衬钢筋混凝土管道由预制管节组成,每节长 4.4m,重 140t,管道每隔 40m 长设一温度伸缩节。每节管道上端与上池连接处及下端与厂房连接处各设一个温度沉陷伸缩节。

位于西伯利亚叶尼塞河上的克拉斯诺雅尔斯克水电站装有 12 台 500MW 机组,混凝土重力坝高 128m。该电站第一次在前苏联采用下游坝面钢衬钢筋混凝土管道,内径 7.5m,混凝土管壁厚 1.5m,每两条管道在厂房前合成一条管道与蜗壳连接。1967 年头两台机组投产,1971 年全部机组运行。管道在最高、最低气温分别为 37℃ 和 -54℃ 条件下安全运行至今。

萨扬-舒申斯克水电站位于叶尼塞河上克拉斯诺雅尔斯克水电站上游,装有 10 台 640MW 机组,混凝土重力拱坝高 245m,为坝后厂房。该电站下游坝面钢衬钢筋混凝土管道是世界上已建成的同类管道中 *HD* 值最大者。本电站蜗壳也是钢衬钢筋混凝土联合承载结构,其参数也是世界之最。电站 1978 年 12 月开始发电。当地最高、最低气温分别为 40℃ 及 -44℃,电站安全运行至今。

2. 考察的主要技术问题

(1) 关于钢衬钢筋混凝土压力管道。

前苏联几个电站钢衬钢筋混凝土压力管道的基本情况见表 1。

表 1 前苏联几个电站钢衬钢筋混凝土压力管道情况表

电 站 名 称	克拉斯诺雅尔斯克	萨扬-舒申斯克	扎戈尔	契尔盖	泽雅	库普沙伊斯克
坝 型	重力坝	重力拱坝	土坝	拱坝	支墩坝	重力坝
坝 高 (m)	125	245	60	233	115	115
计算水头 (m)	112	226	170	129	100	101
管道直径 (m)	7.5 (9.30)	7.50	7.50	5.50	7.80	7.00
钢衬壁厚 (mm)	32~40	16~30	10	20	14~16	
外包混凝土壁厚 (m)	1.50	1.50	0.40	1.5	3.00	1.00
第一层环向钢筋	4φ50	4φ70	10φ40	3φ50	5φ40	
第二层环向钢筋	4φ50	4φ60	10φ40	3φ40	5φ40	

参观的三个电站的管道混凝土管壁均可见裂缝,有些裂缝处有白色游离钙泌出。据目测,克拉斯诺雅尔斯克管道外包混凝土裂缝为六边形,下游面 1~3 条,侧面 1~2 条,缝宽一般在 0.3mm 以下。萨扬-舒申斯克管道裂缝间距约 0.4~0.8m,宽度一般 0.3mm 以下,个别约 0.5mm。两电站管道的有些裂缝在充水前已产生,充水后条数及缝宽增加,裂缝处均未作防护处理,运行人员认为裂缝对管道运行无明显影响。扎戈尔管道裂缝间距约 0.3m,裂缝条数少,缝宽小,目测在 0.3mm 以下。第一条管道外表面已全部涂上白色防护料,已不能见到裂缝,看来俄方已决定对裂缝采取涂料封闭的保护措施。

管道外包混凝土中的配筋,有两层的,也有三层的,用 II 级及 III 级钢筋。配置的环筋量,有的相当于受力用钢量的一半,如萨扬-舒申斯克,也有的按全部内水压力由钢筋承担,

钢衬仅作为防渗，如扎戈尔。钢衬外一般不设加劲环，有的在弯段和岔管段设有加劲环。

(2) 关于钢衬钢筋混凝土预制管的制作工艺。

在扎戈尔抽水蓄能电站详细参观了钢衬钢筋混凝土预制管道的制造、安装工艺的全流程。

钢衬内径 7.5m，用 10~12mm 屈服强度为 320MPa 的钢板卷制而成，外部无加劲环。管节长为 4.4m，来料钢板尺寸为 9m×1.5m，每块钢板一裁为二，再拼焊纵缝成整体然后卷制成管节。纵缝平行于板材轧制方向，卷制方向与轧制方向垂直，这在我国是不允许的。据称设计中该钢衬仅起防渗作用，内压全部由外包钢筋混凝土承受。

由于钢板较薄，拼焊后的钢板直接卷绕在特制的鼓心上，焊接最后一道纵缝并探伤。该鼓心是一个曲率半径与钢衬内径相同的特制工艺设备，刚度较大，直径可调整。它也是钢衬钢筋网构架的内支撑，在外包混凝土浇筑后才撤除，为施工周转需要，共有 22 个。

钢衬外部为两层 $\phi 40\text{mm}$ 、屈服强度为 350MPa 的螺纹钢。每一管节的两层环筋均为连续的螺旋状，并组成整体网架。螺旋状钢筋网架制作的核心是钢筋对焊及绕制。对焊是在专用的钢筋对焊机完成的。对接时两极形成电弧，将接头部分融化，并施加压力使两接头熔为一体。每对焊一个接头约 1min。对焊后紧接着接头修整及钢筋调直。对焊机是俄罗斯国内生产的标准产品。这种工艺在俄罗斯已成熟。检验方式是在对接生产线上每个管节抽取 3 个试样进行测定。

将卷有钢衬的鼓心吊至转动台车上，调圆。在此台车上先将内层钢筋直接成螺旋形绕在钢衬外表面上，然后在内层钢筋上焊上钢筋支架，再在支架上将外层钢筋成螺旋状绕上。环筋外有纵向钢筋。钢衬钢筋网管节形成一个具有一定刚度的整体。

预制管节的外包混凝土厚度 40cm，二级配，骨料最大粒径 40mm。混凝土在预制厂内特制的振动模架上（管节呈轴线垂直状态）浇筑，但振捣效果不理想，后改用插入式振捣。养护脱膜及拆除管节内部鼓心支撑后，管节由轴线垂直状态翻转至水平状态，装到安装台车上经有轨运输送到安装管线就位。

就上所述，对于三峡工程，很有参照借鉴价值的是：钢筋连续对接及其在钢衬管节外部的连续螺旋形绕制。在对钢衬内支撑和外部钢筋网架采取适当加固措施后，钢衬及其外部钢筋网架在工厂内整体组装成安装管节，具有一定刚度，可满足运输、吊装要求，这将对加快压力管道安装进度及提高质量极为有利。

三、三峡压力管道设计复核

1997 年 12 月三峡总公司通过全俄国家外经技术工业出口联合公司，委托俄莫斯科动力建筑研究院及莫斯科水工金属结构设计局对三峡工程压力管道技术设计进行复核计算。俄方于 1998 年 8 月完成复核计算任务，提出书面报告，并派遣四位专家来宜昌与中方专家进行了讨论与交流。

俄专家根据三峡总公司提出的三峡管道技术设计资料，对岸坡坝段（#6 机坝段）、河床坝段（#12 机坝段）管道各四个横剖面（上弯段末端、斜直段中部、下弯段上端、下弯段下端）进行了计算复核。

计算采用解析法及平面有限元方法。

计算复核完全按照俄罗斯现行规范进行，其中主要包括下列内容：

计算环向内力的“锅炉公式”