



水电站坝后背管 工程技术



蒋锁红 夏 忠 谢小平◎编著



科学出版社
www.sciencep.com

水电站坝后背管工程技术

蒋锁红 夏 忠 谢小平编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书结合水电站压力钢管设计规范修订,收集大量资料,对我国水电站坝后背管技术进行了全面总结与回顾,介绍了坝后背管技术研究的最新进展及坝后背管技术的发展方向。内容包括工程设计、结构计算、原型观测分析、模型试验研究、混凝土裂缝研究等方面。

本书内容翔实、资料丰富,对坝后背管工程设计、技术研究等都有重要参考价值。

本书可供水利水电行业广大工程技术人员及相关专业的高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站坝后背管工程技术/蒋锁红,夏忠,谢小平编著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018902-8

I. 水… II. ①蒋…②夏…③谢… III. 水力发电站-压力钢管-管道工程 IV. TV732.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 061415 号

责任编辑:沈 建/责任校对:陈丽珠

责任印制:刘士平/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年5月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007年5月第一次印刷 印张: 25

印数: 1—2 500 字数: 484 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

我国自 20 世纪 80 年代初引进坝后背管技术以来,大批专家学者、工程技术人员开展了大量的研究工作,使我国的坝后背管技术得到了较快发展。坝后背管这种新管型被成功运用到包括三峡水电站等十多个大型水电工程中,我国 2001 年颁布执行的《水电站压力钢管设计规范》(DL/T 5141—2001)也增加了坝后背管的条文,标志着我国的坝后背管技术已经较为成熟。本书作者多年来一直进行着坝后背管的研究工作,结合规范修订,收集了大量的资料,从坝后背管的设计、安全系数的取值、结构计算方法、有限元计算成果、模型试验研究、原型观测、外包混凝土裂缝研究等方面,对坝后背管技术进行了全面总结。书中收集的大量资料不仅对今后坝后背管工程的设计和施工提供了重要的参考依据,而且对坝后背管技术的研究,提供了十分难得的技术资料。

坝后背管这种管型和其他管型相比,仅有 40 多年的发展历史,它有不少明显的优点,如钢管受力比较明确,可以节省一些钢板,能减少钢管与大坝浇筑之间的施工干扰等,但也有许多技术方面的难题还需要进一步研究解决,如坝后背管外包混凝土裂缝的发展问题、裂缝处的钢筋应力和钢管应力的发展变化问题、坝体变位作用对外包混凝土裂缝处钢筋应力和钢管应力的影响问题等,都需要进一步研究。对坝后背管外包混凝土裂缝变化、裂缝处的钢筋应力和钢管应力的变化进行长期观测是十分必要的。

当前,我国有一批大型水电站工程正在或即将进行建设,随着我国水电建设的发展,水电工程的大坝越来越高,水电站引水管道承受的内水压力越来越大,压力管道的布置和型式对整个工程的枢纽布置也会产生较大影响。为了减小大直径高压管道对坝体产生的不利影响,在大型工程中,采用坝后背管的会越来越多。坝后背管这种新管型的出现使设计人员进行枢纽布置设计时多了一种选择。

本书是我看到的有关水电站背管最为全面系统的一本专著,反映了作者深入、细致、踏实的工作。尤其是明确地指出了外包混凝土裂缝与钢筋应力的问题还需要进一步研究解决,这是基于大量实测资料的分析所做的实事求是的说明。人们可以在此基础上进一步工作,有望解决这个问题,使背管这种具有创新意义的结构能更趋完善,为我国的水电站建设做出更大的贡献。本书由科学出版社出版,对坝后背管工程的设计、施工和研究工作必将起到积极的推动作用。

谷兆祺

2007 年 2 月 8 日

目 录

序

前言

第 1 章 水电站坝后背管工程技术综述	1
1.1 坝后背管技术发展过程	1
1.2 背管工程中面临的主要技术问题	5
1.2.1 钢管和外包钢筋混凝土联合承载问题	5
1.2.2 安全系数的取值问题	6
1.2.3 结构计算方法	7
1.2.4 外包混凝土裂缝控制问题	7
1.2.5 背管的结构安全度评价问题	7
1.3 坝后背管的主要特点	8
参考文献	9
第 2 章 水电站坝后背管工程实例	11
2.1 克拉斯诺雅尔斯克水电站背管	12
2.2 契尔盖水电站背管	12
2.3 萨扬舒申斯克水电站背管	14
2.3.1 工程简介	14
2.3.2 结构设计原则	15
2.4 库尔普沙伊斯克水电站背管	16
2.5 东江水电站背管	17
2.5.1 工程简介	17
2.5.2 东江水电站背管结构设计	19
2.5.3 东江水电站背管技术研究	23
2.5.4 管坝接缝面键槽模型试验研究	24
2.6 紧水滩水电站背管	26
2.6.1 工程简介	26
2.6.2 紧水滩水电站背管结构设计	27
2.7 五强溪水电站坝后背管简介	27
2.7.1 工程简介	27
2.7.2 背管结构设计	29

2.7.3 背管技术研究	31
2.8 李家峡水电站坝后背管	32
2.8.1 工程简介	32
2.8.2 背管结构设计	34
2.8.3 背管技术研究	36
2.8.4 李家峡水电站背管仿真材料接缝面剪切模型试验研究	37
2.9 三峡水电站坝后背管	39
2.9.1 工程简介	39
2.9.2 背管结构设计	41
2.9.3 三峡水电站背管技术研究	43
2.10 万家寨水电站坝后背管	46
2.10.1 工程简介	46
2.10.2 管道结构设计	48
2.10.3 压力钢管结构仿真模型试验	50
2.10.4 万家寨工程压力管道管型讨论	50
2.11 扎戈尔抽水蓄能电站钢衬钢筋混凝土管	50
2.12 依萨河二级水电站钢衬钢筋混凝土管	53
2.12.1 工程简介	53
2.12.2 结构设计	54
2.12.3 技术研究	56
2.13 隔河岩水电站外包钢筋混凝土钢管	58
2.14 公伯峡水电站钢衬钢筋混凝土管	59
2.14.1 工程简介	59
2.14.2 结构设计	60
2.14.3 技术研究	62
参考文献	64
第3章 水电站坝后背管工程设计	65
3.1 坝后背管的设计方法	65
3.1.1 各国压力钢管的设计方法	65
3.1.2 坝后背管结构计算的基本原则	69
3.1.3 坝后背管设计中的作用及作用组合	70
3.2 坝后背管联合承载安全系数研究	71
3.2.1 已建背管工程安全系数比较	71
3.2.2 前苏联“规范”中的安全系数	71
3.2.3 傅金筑计算式综合安全系数	72

3.2.4 陈际唐计算公式综合安全系数	73
3.2.5 可靠度套改中背管与其他管型结构系数 γ_d 的比较	74
3.2.6 小结	76
3.3 坝后背管结构计算方法	77
3.3.1 结构计算方法	77
3.3.2 上下弯段计算原则	77
3.3.3 管坝接缝面	77
3.3.4 抗外压设计	78
3.3.5 温度应力计算	78
3.4 坝后背管布置	79
3.4.1 平面布置	79
3.4.2 立面布置	79
3.5 坝后背管工程材料	81
3.6 坝后背管构造设计	82
3.6.1 横截面外轮廓形状	82
3.6.2 管坝接缝面的连接	83
3.6.3 钢筋接头位置	85
3.6.4 钢筋直径	85
3.6.5 纵向钢筋	85
3.6.6 小结	85
3.7 背管外包混凝土裂缝控制	86
3.8 坝后背管结构安全度初步评价	87
3.8.1 钢筋混凝土结构复核计算	89
3.8.2 背管结构安全度评价	91
3.8.3 背管安全度评价结论	93
参考文献	93
第4章 水电站坝后背管结构力学计算方法研究	95
4.1 概述	95
4.2 基本假定及计算模型	97
4.2.1 基本假定	97
4.2.2 计算模型	98
4.3 内水压力作用下的内力计算	99
4.3.1 计算公式推导	99
4.3.2 计算步骤	101
4.3.3 需要说明的几个问题	102

4.4	内水压力作用下的应力计算	104
4.4.1	计算公式推导	104
4.4.2	矩形组合截面 A_m 计算	106
4.4.3	混凝土开裂后的应力计算	108
4.5	内水压力作用下的计算例题	108
4.5.1	内力计算	109
4.5.2	应力计算	110
4.5.3	轴力和弯矩对混凝土和钢筋应力的影响	112
4.5.4	分段数对计算结果的影响	113
4.5.5	135°模型和 180°模型计算结果对比	114
4.5.6	计算结果讨论	116
4.6	温度应力计算	117
4.6.1	背管温度分布研究	118
4.6.2	温差引起的结构内力计算	120
4.6.3	温度应力计算	121
4.6.4	计算例题	121
4.6.5	根据坝后背管实测温度缝宽计算温度应力	123
4.6.6	小结	124
4.7	自重作用应力计算	125
4.7.1	计算公式推导	125
4.7.2	计算例题	126
4.8	坝后背管结构计算其他方法介绍	127
4.8.1	弹性力学法	128
4.8.2	正交异性法	129
4.8.3	近似多层环法	130
4.8.4	苏萨法	132
4.8.5	弹性支座法	132
4.8.6	小结	135
4.9	背管结构力学计算与试验、有限元计算及现场实测成果对比分析	136
4.9.1	东江水电站背管结构力学计算结果与试验及有限元计算结果对比	136
4.9.2	三峡水电站背管结构力学计算结果与实验与试验结果对比	143
4.9.3	李家峡水电站背管结构力学计算结果现场实测应力结果对比	146
4.9.4	小结	146
4.10	背管结构力学弹性中心法的应用	147

4.10.1 工程应用	147
4.10.2 对已建工程的结构分析	149
4.10.3 小结	156
4.11 背管计算程序 BJC-99 的编制与使用说明	156
4.11.1 计算原理与程序功能简介	156
4.11.2 程序设计框图	157
4.11.3 程序中几个特殊问题的处理	157
4.11.4 程序使用说明	158
4.12 小结	159
参考文献	159
第5章 水电站坝后背管有限元法分析	161
5.1 坝后背管有限元法分析原理及目的	161
5.1.1 钢筋混凝土非线性有限元法简介	161
5.1.2 坝体变位作用对背管结构的影响分析	163
5.1.3 管坝接缝面的应力状况分析	163
5.1.4 背管上弯段和下弯段的应力状况分析	163
5.2 李家峡水电站坝后背管有限元法分析	164
5.2.1 计算条件	164
5.2.2 平面有限元计算	165
5.2.3 三维非线性有限元分析	176
5.3 三峡水电站坝后背管有限元法分析	200
5.3.1 平面有限元分析	200
5.3.2 三维非线性有限元分析	205
5.4 公伯峡水电站钢衬钢筋混凝土管有限元法分析	209
5.4.1 计算方案及荷载组合	209
5.4.2 计算成果分析	211
5.5 万家寨水电站压力管道有限元法分析	226
5.5.1 三维有限元分析	226
5.5.2 平面有限元分析	227
5.6 小结	228
参考文献	229
第6章 水电站坝后背管原型观测分析	230
6.1 克拉斯诺雅尔斯克与契尔盖水电站背管原型观测资料介绍	230
6.1.1 克拉斯诺雅尔斯克水电站背管原型观测资料介绍	230
6.1.2 契尔盖水电站背管原型观测资料介绍	231

6.1.3	分析结论	232
6.2	东江水电站背管原型观测资料介绍	233
6.2.1	斜直段观测成果	233
6.2.2	管坝接缝面观测成果	234
6.2.3	上弯管段观测成果	234
6.2.4	分析结论	234
6.3	紧水滩水电站背管原型观测资料介绍	235
6.3.1	上弯段观测成果	235
6.3.2	斜直段观测成果	236
6.3.3	下弯段观测成果	237
6.3.4	管坝分缝面	237
6.3.5	结论	237
6.4	李家峡水电站坝后背管原型观测资料分析	238
6.4.1	背管内观仪器布置	238
6.4.2	上弯段钢筋应力原观成果分析	239
6.4.3	上弯段钢管应力观测资料分析	242
6.4.4	斜直段钢筋应力观测资料分析	245
6.4.5	斜直段钢管应力观测资料分析	248
6.4.6	背管原观资料分析结论	249
6.5	万家寨水电站压力管道原型观测成果分析	250
6.6	小结	251
	参考文献	252
第7章	钢管与外包混凝土联合承载仿真模型试验研究分析	253
7.1	概述	253
7.2	模型试验技术简介	253
7.2.1	模型试验裂缝量测技术	253
7.2.2	极限承载力的确定	254
7.3	龙羊峡水电站钢管与混凝土联合作用模型试验研究	254
7.3.1	试验目的	254
7.3.2	模型设计与制作	254
7.3.3	测试仪器及测试项目	256
7.3.4	荷载级别及加荷方法	256
7.3.5	小模型主要试验成果及分析	257
7.3.6	大模型主要试验成果及分析	271
7.3.7	模型试验温度测试成果	280

7.3.8 小结	281
7.4 东江水电站钢管与混凝土联合作用试验研究	282
7.4.1 概述	282
7.4.2 大模型试验	282
7.4.3 小模型试验	291
7.5 李家峡水电站钢管与混凝土联合作用试验研究	294
7.5.1 概述	294
7.5.2 武汉水利电力学院试验成果	295
7.6 三峡水电站钢管与混凝土联合作用试验研究	297
7.6.1 大模型试验	297
7.6.2 上弯段模型试验	301
7.7 结语	306
参考文献	306
第8章 坝后背管外包混凝土裂缝研究	308
8.1 概述	308
8.2 背管外包混凝土裂缝的现状和规律	310
8.2.1 李家峡水电站背管裂缝原型观测及成果分析	310
8.2.2 其他坝后背管混凝土裂缝调查	325
8.2.3 背管外包混凝土裂缝成因分析	331
8.2.4 小结	333
8.3 钢筋混凝土管裂缝分布情况介绍	334
8.3.1 柘林水电站钢筋混凝土压力管道裂缝情况简介	334
8.3.2 湖南云里坳倒虹吸管裂缝情况简介	335
8.3.3 背管外包混凝土裂缝与混凝土管裂缝比较	336
8.4 混凝土裂缝的相似性研究	336
8.4.1 问题的提出	336
8.4.2 理论分析	337
8.4.3 小结	347
8.5 坝后背管外包混凝土裂缝处钢筋应力状况的探讨	347
8.6 坝后背管外包混凝土裂缝宽度计算方法的探讨	349
8.6.1 规范 DL/T5057—1996 中正截面裂缝宽度验算方法	349
8.6.2 董哲仁法	352
8.6.3 陶然法	355
8.6.4 前苏联钢管钢筋混凝土结构设计参考资料中裂缝宽度计算方法	358
8.6.5 我国港口工程设计规范 (JTJ220—82) 中裂缝宽度计算公式	359

8.6.6 各种方法计算结果比较	360
8.6.7 小结	363
8.7 外包混凝土裂缝对坝后背管正常运行的影响及裂缝处理措施	364
8.7.1 外包混凝土裂缝对坝后背管正常运行的影响	364
8.7.2 外包混凝土裂缝处理的工程措施	369
8.8 背管外包混凝土裂缝宽度的限制问题	372
8.8.1 背管设计中限制混凝土裂缝宽度的必要性	372
8.8.2 背管裂缝宽度限制值的确定	373
8.8.3 背管混凝土裂缝控制措施	379
参考文献	380
后 记	383

第1章 水电站坝后背管工程技术综述

1.1 坝后背管技术发展过程

敷设在混凝土坝下游坝面上的高水头钢衬-钢筋混凝土输水管道（сталежелезобетонные турбинные трубопроводы, расположенные на низовых гранях высоконапорных бетонных плотин），起源于前苏联，至今已有40多年历史。传入我国后，俗称“坝后背管”或“背管”，既是一种新型的布置方式，又是一种新型的结构型式。最早首先在克拉斯诺雅尔斯克水电站使用，据分析是由于当时若采用坝内埋管布置时管径太大，有裂穿坝体的危险。坝内布置不下时需要布置在坝外，并且用两根 $D=7.55\text{m}$ 的管道代替，采用了“两管一机”的特殊布置方式。因克拉斯诺雅尔斯克地区天气寒冷，所以没有采用坝坡明管，而是在钢管外包了钢筋混凝土，按防冻要求，混凝土50cm厚就可满足要求，但由于混凝土中布置了大量的钢筋，为了方便施工才将混凝土厚度确定为1.5m。当时，认为钢管与环向钢筋单独发挥作用，钢管安全系数为1.6。环向钢筋的安全系数为1.1，总体安全系数为2.7。外包混凝土仅作为防护设施考虑。我国老的钢管规范（SD144—85）（试行）^[1]规定明管的允许应力为 $0.55\sigma_s$ ，相当于安全系数为1.82，坝内埋管的允许应力为 $0.67\sigma_s$ ，相当于安全系数为1.49，明管和坝内埋管安全系数的平均值为1.65，与前苏联背管结构中钢管的安全系数1.6较为接近，说明前苏联的技术人员在提出背管时认为其安全度要介于坝内埋管和明管之间。后来经过大量试验研究，证明钢管和外包钢筋混凝土能够联合受力，所以，以后建成的萨扬舒申斯克水电站便按照钢管和钢筋混凝土环联合工作，作为一个整体结构进行强度计算，安全系数有所降低，在正常使用荷载作用下，总体安全系数为1.8~2.0。

所以作者推断，坝后背管是在管道 HD （承受的水头 H 和管径 D 的乘积）值过大，已经无法再布置坝内埋管的水电站技术发展阶段中，新创出来的一种管型。坝内埋管不允许外围混凝土裂穿，坝后背管正是以允许外包混凝土出现通缝为特征，而区别于坝内埋管，并与坝内埋管分立而独自成为一种新的管型。坝后背管可减少坝内管道长度，从而可减少施工干扰和加快施工进度，亦可实现随机组发电先后而分期施工管道，可解决坝断面较窄难以布置坝内埋管的问题，所以在坝后背管出现以后，一些混凝土坝上 HD 值不太高的管道也采用了这种管型。

我国的背管技术是在学习前苏联经验的基础上逐步发展起来的。国内最早使

用坝后背管的工程为东江和紧水滩水电站,随后又有五强溪、李家峡等工程相继采用了背管技术。和前苏联后期相比,在联合承载安全系数方面,我国的背管工程安全系数取值要大一些,20世纪70年代建成的萨扬舒申斯克为1.8~2.0,而代表我国目前最高水平的三峡背管联合承载安全系数为2.0。但我国在背管斜直段的布置上有所创新,三峡背管将三分之一的管体嵌入坝体,有的工程师甚至把浅埋于坝体的万家寨水电站引水管道也称做背管;在伸缩节布置方面,前苏联在高水头拱坝契尔盖和萨扬舒申斯克背管都取消了伸缩节,我国则只有李家峡四台机组、三峡的六台机组和公伯峡的五台机组取消了伸缩节。前苏联是根据大型有限元计算成果取消伸缩节,我国主要是根据对现有伸缩节的长期观测,并结合有限元计算取消了伸缩节。在施工技术方面,前苏联采用了螺旋钢筋网,提高了施工的机械化强度。在构造方面,选用钢筋直径不同,前苏联背管均采用了较粗的钢筋,如萨扬舒申斯克环向钢筋用了 $\phi 70\text{mm}$,而我国背管钢筋最大直径为 $\phi 40\text{mm}$,一般尽可能选用不太粗的钢筋,这是由于长期以来,我们认为采用较细的钢筋对于限制裂缝宽度有利。截止至2001年以前双方都没有背管的设计规范,苏联方面仅在1984年出了一本《水工建筑物钢衬钢筋混凝土结构设计参考资料》,还不能算是规范。

坝后背管作为一种相对新兴的水电站发电引水管道管型,近半个世纪以来有了长足的发展,成为巨型和大型水电站工程中的主力管型。利用这种管型的水电站和抽水蓄能电站的总装机容量约达4000万kW,我国约占60%。最近几年我国对《水电站压力钢管设计规范》(试行)(SD144-85)^[1]进行了修订,于20世纪初完成的两本修订规范(DL/T5141-2001)和(SL281-2003)^[2,3],已将该管型纳入规范,可见坝后背管技术已日趋成熟。这种管型在(SD144-85)和(DL/T5141-2001)中称为坝后背管,在前苏联和(SL281-2003)中称为钢衬钢筋混凝土管。我们把布置在边坡上的与坝后背管结构相同的管道称为地面外包钢筋混凝土钢管,或简称外包钢筋混凝土管(或外包管)。

表1.1和表1.2分别列出了前苏联和我国的水电站坝后背管与地面外包钢筋混凝土管工程实例^[4~13]。在所列的14个工程中:

1) 前苏联为6个,我国为8个。

2) 最早采用坝后背管的工程是克拉斯诺雅尔斯克水电站,始建于20世纪60年代。

3) 坝后背管11个,地面外包钢筋混凝土管3个。

4) 最大作用水头 H 为267m(萨扬舒申斯克),最大管径 D 为12.4m(三峡),最大 HD 值为2003 m^2 (萨扬舒申斯克)。

坝后背管是一种与混凝土坝(重力坝、拱坝、支墩坝)相匹配的管道布置型式。在坝后背管出现以前,布置在混凝土拦河大坝上的引水管道,多为坝内埋

管, 自 20 世纪 50 年代以来, 水轮发电机组单机容量越来越大, 从 20 万~30 万 kW, 发展到目前的 70 万 kW, 随着单机容量的增大, 布置在混凝土坝上的管道作用水头 H 、管径 D 以及 HD 值亦相应增大, 使布置坝内埋管愈渐困难, 对断面较窄的拱坝此问题更加突出。

表 1.1 前苏联水电站坝后背管与地面外包钢筋混凝土管工程实例

工程名称	克拉斯诺雅尔斯克	契尔盖	萨扬舒申斯克	库尔普沙伊斯克	泽雅	扎戈尔
管 型	坝后背管					外包管
坝 型	重力坝	双曲拱坝	重力拱坝	重力坝	支墩坝	土坝
最大坝高/m	125	233	245	113	115	60
静作用水头/m	112	209	226	91.5		
最大作用水头 H /m	130	229	267	101	100	170
钢管半径 $r=D/2$ /m	3.75	2.75	3.75	3.5	3.9	3.75
HD/m^2	975	1260	2003	707	780	1275
管壁厚度 t /mm	32~40	20	16~30		14~16	10
最大环筋折算厚度 t_3 /mm	14.2	11.5	26.7		22.4	25.1
t_3/t	0.355	0.575	0.893		1.40	2.51
纵筋折算厚度 t_{31} /mm	4.0	5.9	10.4		15.0	
$t_{31}/t_3/\%$	28	51	39		67	
外包混凝土厚度 t_4 /m	1.5	1.5	1.5	1.0	3.0	0.4
配筋率 $\rho=t_3/t_4/\%$	0.95	0.77	1.78		0.75	6.28
t_4/r	0.397	0.545	0.400	0.286	0.769	
钢管单独承载安全系数 K_1	1.6	1.3				
环筋单独承载安全系数 K_2	1.1	1.1				
总体安全系数 K	2.7	2.4	1.8~2.0			
实测混凝土表面裂缝最大宽度/mm			0.5 以上			
上弯段半径 R_1 /m						
R_1/D						
下弯段半径 R_2 /m						
R_2/D						
上弯段施工分缝	正应力					
接缝面应力计算	剪应力					
值/ (N/mm)						
接缝面插筋数量/ (cm ² /m ²)			43			

表 1.2 中国水电站坝后背管与地面外包钢筋混凝土管工程实例

工程名称	东江	紧水滩	李家峡	五强溪	三峡	万家寨	隔河岩	公伯峡
管 型	坝后背管						外包管	
坝 型	双曲拱坝	双曲拱坝	双曲拱坝	重力坝	重力坝	重力坝	重力拱坝	面板坝
最大坝高/m	157	102	155	87.5	175	105	151	139
静作用水头/m	141	90.7	138.5	60.15	118	85.5	103	113.1
最大作用水头 H /m	162	105	152	80	139.5	111	121.5	135
钢管半径 $r=D/2$ /m	2.6	2.25	4.0	5.6	6.2	3.75	4.0	4.0
HD/m^2	842	473	1216	896	1730	833	972	1080
管壁厚度 t /mm	14~16	14~18	18~32	18~22	30~34	18~32	30~46	16~34
最大环筋折算厚度 t_3 /mm	12.2	6.5	14.5	13.0	16.1	12.2	构造筋	13.1
t_3/t	0.763	0.359	0.557	0.592	0.699	0.381		0.390
纵筋折算厚度 t_{31} /mm	3.4	1.4	4.2		8.1			5.5
$t_{31}/t_3/\%$	28	22	29		50			36
外包混凝土厚度 t_4 /m	2.0	1.0	1.5	3.0	2.0	1.5	1.0	1.5
配筋率 $\rho=t_3/t_4/\%$	0.61	0.65	0.97	0.43	0.81	0.81		0.87
t_4/r	0.769	0.444	0.375	0.535	0.322	0.400		0.375
钢管单独承载安全系数 K_1	1.38		1.37	1.2				2.0
环筋单独承载安全系数 K_2	1.2			1.0				0.8
总体安全系数 K	2.58		2.2	2.2	2.0	3.3		2.8
实测混凝土表面裂缝 最大宽度/mm	1.50	1.00	2.20	0.65	施工期 0.83	0.53	1.70	
上弯段半径 R_1 /m	10.4	9.0	24.0	23.0	35.0	19.75	24.0	30.0
R_1/D	2.0	2.0	3.0	2.1	2.8	2.6		3.75
下弯段半径 R_2 /m	10.4	13.5	16.0	23.0	30.0	23.0	24.0	30.0
R_2/D	2.0	3.0	2.0	2.1	2.4	3.1		3.75
上弯段施工分缝	坝内 预留槽		悬出坝外	坝内 预留槽	坝内 预留槽	坝内 预留槽		
接缝面应 力计算值 (N/mm)	正应力	-0.50 ~0.7		-0.75	-1.53			
	剪应力	1.2	0.59	1.13	0.23			
接缝面插筋数量 (cm^2/m^2)	32		56	20				

20世纪80年代西北勘测设计研究院在设计龙羊峡水电站重力拱坝时,对坝内埋管的布置限制进行了研究,并进行了国内第一例大型抗内水压力仿真材料模型试验^[14,15]。理论推导和试验成果均表明,当内水压力 p 超过混凝土内圈部分开裂情况所能承受的最大内水压力 $p_{\max 2}$ 后,钢管外围的混凝土就可能裂穿。布置坝内埋管的 HD 值宜限制在 1300m^2 以内。此研究已过去二十多年,我们尚未查找到其他相关试验研究成果,也尚未查找到坝内埋管 HD 值超过龙羊峡(HD 为 1286m^2)的工程实例。为此在修订规范正文中,规定:“在最大内水压力作用下,不允许外围混凝土出现贯穿性裂缝。”并在(DL/T5141-2001)^[2]附录中以 p 不超过 $p_{\max 2}$ 作为布置坝内埋管的限制。

1.2 背管工程中面临的主要技术问题

1.2.1 钢管和外包钢筋混凝土联合承载问题

前苏联最早采用钢衬钢筋混凝土管道时,主要希望外包钢筋混凝土能提高管道的安全性,把外包钢筋混凝土仅作为防护措施,对外包钢筋混凝土能否参与承载还不太放心,因此钢管单独承载时的安全系数取为1.6,这是由于钢衬钢筋混凝土管首先是从明钢管演变而来的。实际上钢管和外包钢筋混凝土是一个整体,两者不可能独自发挥作用,外包钢筋混凝土对钢管的变形有约束作用,钢管对外包钢筋混凝土就会有反作用。而所谓的钢衬钢筋混凝土管,顾名思义其承载主体应是外包钢筋混凝土,钢管主要起防渗作用。苏联专家阿·米·阿尔希波夫(A. M. Arkhipov)来华讲学时说“有人误解了,把很厚的钢板外面一根钢筋也叫钢衬钢筋混凝土管道。因此看来要增加一个限制,看来这种管道钢筋用量要大于钢衬用量”。他还说“单纯的钢管受到钢管壁厚的限制,而钢筋混凝土管不受此限制,钢衬钢筋混凝土管从强度的观点看比钢管强10倍,建议钢衬厚度用的薄一些,以便保证材料质量和焊接质量,这样可以避免焊前的预热和焊后的热处理。我们认为比较成功的地方就在于使用较薄的钢衬,管道的强度由与钢衬联合工作的钢筋混凝土保证,这是钢衬钢筋混凝土管道最主要的优点所在”^[16]。在克拉斯诺雅尔斯克水电站之后修建的契尔盖水电站和萨扬舒申斯克水电站就开始逐步考虑外包钢筋混凝土的承载能力,并且在施工设计阶段按联合承载设计了萨扬舒申斯克水电站的钢衬钢筋混凝土管道,总体安全系数为1.8。我国20世纪80年代初在龙羊峡水电站首次成功进行了钢管与外包钢筋混凝土联合承载的大比尺仿真材料结构模型试验,证明了钢管与外包钢筋混凝土完全能联合承载,随后在东江、李家峡、三峡等工程中也进行了类似的试验,得出了一致的结论。我国首次采用背管技术的东江水电站背管设计中虽然肯定了钢管与外包钢筋混凝土联合承载,但其总体的安全系数为2.5,仍是比较高的。后来修建的李家峡水电站和