

水电站钢筋混凝土岔管 结构与数值仿真分析

SHUIDIANZHAN GANGJIN HUNNINGTU CHAGUAN
JIEGOU SHEJI YU SHUZHIFANGZHEN FENXI

马文亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电站钢筋混凝土岔管 结构与数值仿真分析

马文亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分为6章,系统阐述了岔管的类型及布置方式、水利工程地下结构及地下钢筋混凝土岔管发展概况,研究了钢筋混凝土岔管结构分析方法、设计理论和非线性分析理论,并结合落脚河、黄鱼塘和楼下河水电站等实际工程,对这三个水电站的钢筋混凝土岔管进行了结构设计与数值仿真分析。对岔管结构的各种设计参数进行了比较分析,研究了各个参数对岔管结构的受力影响。研究内容采用图表等形式表达,丰富易懂,研究成果为钢筋混凝土岔管结构的设计和施工提供了一定的参考依据。

本书可为水工结构工程领域工程师、设计人员、施工技术人员和研究人员提供参考,也可供大中专院校水利工程相关专业师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站钢筋混凝土岔管结构设计与数值仿真分析 /
马文亮著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5170-3630-2

I. ①水… II. ①马… III. ①水力发电站—钢筋混凝土结构—岔管—结构设计—数值分析—计算机仿真②水力发电站—钢筋混凝土结构—岔管—结构设计—数值分析—计算机仿真 IV. ①TV732.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第206449号

书 名	水电站钢筋混凝土岔管结构设计与数值仿真分析
作 者	马文亮 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.5印张 273千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
定 价	42.00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

我国水力资源丰富，居世界首位，但绝大部分集中在西南地区，如长江干流、澜沧江、南盘江等流域。西南水电基本处于高山峡谷地区，水工建筑物大多布置在地下，规模逐渐加大。如乌江的洪家渡、构皮滩，雅砻江上的锦屏一级、二级，澜沧江上的小湾、糯扎渡，金沙江上的溪落渡、向家坝、虎跳峡工程等，均具有相当数量与规模的地下工程。地下工程的设计与施工已是水利水电工程的重要课题之一。

作为地下工程之一的水工隧洞，我国已建成水工隧洞总长度超过600km，已建成长度在4km以上的引水发电隧洞22座。深埋的水工隧洞存在着高地下水、高地应力及高内水压力等一系列高难度的复杂工程技术问题。对于高水头地下电站，装机容量较大或者发电引水隧洞洞线较长时，为降低工程造价，减小土石方的开挖，常常不可避免地要采用联合供水或分组供水的方案，这样就需要采用较大洞径的发电引水隧洞和分岔管。由于岔管的主支管交叉部位的应力应变复杂，因此该部位是影响工程稳定的重点部位之一。由于岔管形态复杂，在高内水压及高地下水作用下，必然出现应力集中和衬砌开裂等现象，因此一直以来岔管衬砌的设计及开挖施工技术都是要重点考虑的内容。

本书梳理了水电站钢筋混凝土岔管结构的发展概况，阐述了钢筋混凝土岔管结构分析方法和设计理论，研究了钢筋混凝土岔管非线性分析理论。并结合落脚河、黄鱼塘和楼下河水电站等实际工程，对这三个水电站的钢筋混凝土岔管进行了结构设计与数值仿真分析。本书可为水工结构工程领域工程师、设计人员、施工技术人员和研究人员提供参考，也可供大中专院校水利工程相关专业师生学习和参考。

本书在成稿过程中得到了贵州省水利水电勘测设计研究院、贵州中水建设项目的管理有限公司、河南省水利勘测设计研究有限公司、华北水利水电大学刘东常教授和白新理教授的大力支持与帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2015 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 岔管结构的发展概论	1
1.1 岔管的类型及布置方式	1
1.2 水利工程地下结构发展概况	3
1.3 地下钢筋混凝土岔管发展概况	7
第 2 章 钢筋混凝土岔管结构	10
2.1 钢筋混凝土岔管结构特点	10
2.2 钢筋混凝土岔管结构分析方法	11
2.3 钢筋混凝土岔管结构设计理论	14
2.4 钢筋混凝土岔管结构配筋计算	18
第 3 章 钢筋混凝土岔管非线性分析理论	20
3.1 非线性分析概述	20
3.2 混凝土计算模型	21
3.3 混凝土本构模型	22
3.4 混凝土模型的破坏面	22
3.5 压碎与开裂模拟	25
3.6 钢筋模型	25
第 4 章 落脚河水电站钢筋混凝土岔管结构设计与分析	27
4.1 工程概况	27
4.2 计算模型	30
4.3 岔管结构分析	34
4.4 围岩结构分析	63
4.5 岔管结构设计	66

4.6 本章小结	68
第5章 黄鱼塘水电站钢筋混凝土岔管结构设计与分析	70
5.1 工程概况	70
5.2 计算模型	74
5.3 岔管结构分析	76
5.4 岔管结构设计	106
5.5 本章小结	108
第6章 楼下河水电站钢筋混凝土岔管结构设计与非线性分析	110
6.1 工程概况	110
6.2 计算模型	113
6.3 岔管结构线弹性分析	118
6.4 岔管结构非线性分析	161
6.5 岔管结构设计	172
6.6 本章小结	175
参考文献	176

第 1 章 岔管结构的发展概论

1.1 岔管的类型及布置方式

岔管是水电站输水系统的重要组成部分之一，当电站采用联合供水或分组供水，即一条管道向两台或两台以上的机组供水，需要采用分岔管^[1]。

1.1.1 岔管布置形式

岔管的布置形式通常有四种^[2]：

1. 非对称 Y 形

当主管斜向分出几条支管，且主管与支管流量不相等，或两条支管的轴线因故不能做对称布置时，通常采用非对称 Y 形布置，如图 1.1 (a) 所示。

2. 对称 Y 形

当一条主管对称地分为两条相同的支管，分岔后压力管道轴线方向不变且正向引进厂房时，通常采用对称 Y 形布置，如图 1.1 (b) 所示。

3. 三岔形

当一条主管直接分为三条相同支管，分岔后压力管道轴线方向不变且正向引进厂房

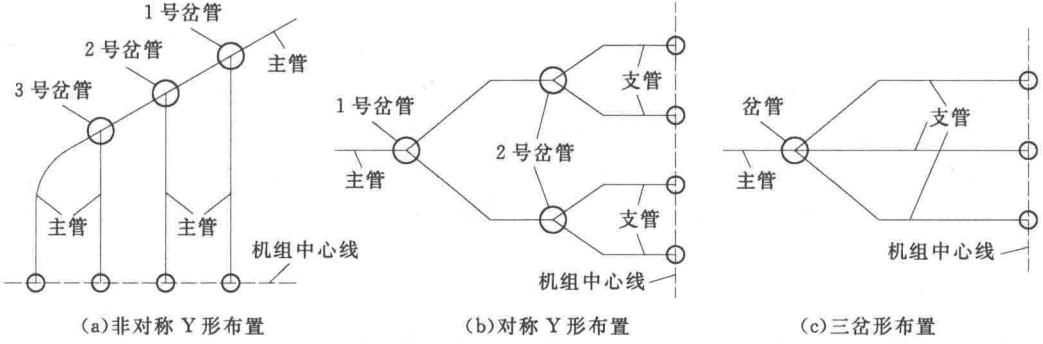


图 1.1 岔管布置形式



时,通常采用三岔形布置,如图 1.1 (c) 所示。

4. 上述各种布置形式的组合

当机组台数较多时,可采用此种布置方式。

我国已建中小型电站钢岔管的布置形式以非对称 Y 形布置居多,主要是因为非对称 Y 形布置灵活简便,且钢岔管规模较小。

岔管的主管、支管中心线宜布置在同一高程上,使结构简单。三梁岔管和贴边岔管的主管、支管底部也可布置在同一高程上。岔管的最底部位宜设置排水管,便于岔管的维护,排水口应与管壁焊缝和加强构件错开。

1.1.2 岔管结构形式

根据岔管布置形式、制作材料及承受不平衡力的加强方式不同,岔管有多种结构形式。

1. 贴边岔管

在主管、支管相贯线两侧一定范围内用补强板焊贴加固,岔管的不平衡力由管壁和补强板共同承担。补强板可以贴在外壁或内壁,也可以内外壁都贴。

贴边岔管为组合薄壳结构,应力分布较为复杂,但构造简单、施工方便。适用于埋藏在较好的岩体中的中、低水头的地下埋管。

2. 三梁岔管

在岔管主管、支管三条相贯线外侧各设置加强梁,由于这三根梁构成的空间梁系加强结构共同承担不平衡力。通常将沿两支管相贯线的梁称为 U 梁,沿主管、支管相贯线的梁称为腰梁。

三梁岔管应用较早,运行安全可靠,各种布置形式均能适用。随着我国水电建设的发展,钢管 HD 值日渐增大,导致三梁岔管的加强梁断面加大,给岔管的制作、运输和安装带来困难,若为埋管,将增加地下工程量,目前已较少使用,但可用于中、小型岔管。

3. 月牙肋岔管

月牙肋岔管是在三梁岔管基础上发展起来的一种新型岔管,是由相切于同一公切球的主锥管、支锥管组成的圆锥管并和沿支锥管相贯线内插一焊接在管壁上的月牙肋板组成。这不仅从结构上改善了三梁岔管腰部转折处的应力状态,使得取消两根腰梁成为可能,而且从体型上改善了水流流态,避免了涡流,扩大分岔区的过流面积,使水头损失减小。月牙肋岔管是目前国内应用得最多的岔管形式,大型、中型、小型水电站压力管道都适用。

4. 球形岔管

球形岔管的主管、支管均直接与球壳相接,各管道的轴线通过球心,沿连接处的相贯



线设置圆形补强环,内部则设置导流板以改善水流条件,导流板上设置平压孔,不承受内水压力。球形岔管的优点是布置灵活,支管可为任意方向。球壳受力均匀,在内水压力作用下,球壳应力仅为同直径圆管管壳环向应力的一半。缺点是工艺复杂,球壳制作不便,补强环要用锻钢制作,造价较高,水头损失较大。球形岔管适用于高水头电站。

5. 无梁岔管

无梁岔管是球形岔管的一种演进。为避免管壁与球壳急剧转折所产生的很大的应力集中,主管、支管先与逐渐扩大的锥管相接,锥管再与中心的球壳较平顺地连接,不设置任何加强构件。无梁岔管不仅克服了补强环与管壳刚度不协调的缺点,而且可以充分发挥壳体结构的承载能力,结构合理,外形尺寸小,运输、安装均较方便。对埋管情况,有利于利用围岩的弹性抗力。缺点是体型较为复杂,球壳片须模型成型,工艺复杂,在球壳顶部和底部易产生涡流,分岔处水流较紊乱,为此需在岔管内部设置导流板。无梁岔管在我国20世纪80年的开始采用,适用于大型、中型、小型地下埋管。

6. 钢衬钢筋混凝土岔管

钢衬钢筋混凝土岔管即钢岔管外包钢筋混凝土,两者共同承受内水压力。内部钢衬同时还可以防止内水外渗,而外部混凝土允许开裂,这样,钢衬和钢筋混凝土都能充分发挥作用。钢衬可以根据需要采用钢岔管的某种形式,但由于钢筋混凝土参加承载,减轻了钢衬负担,因而钢衬与单独承载的明钢岔管相比,管壁可以减薄,加强构件也可以减小甚至取消。这种结构不仅可以节省钢板用量,使选材和工艺要求更简单,降低造价,而且结构安全性也比明钢岔管高。

7. 钢筋混凝土岔管

岔管衬砌采用钢筋混凝土材料,与围岩组合成整体承载结构。当岔管尺寸较小,内压较低时,依靠围岩分担内水压,钢筋混凝土可以不开裂,同时起防渗和承载的作用。当岔管较大,特别是内压很高时,由于围岩承载后必然有相当大变形,岔管形状复杂,必然出现应力集中,因此钢筋混凝土很难保证不开裂。开裂后的钢筋混凝土在高内水压下成为“透水衬砌”,内水压基本上由围岩来承受,这样围岩成为承受内压和抗渗的主体。钢筋混凝土衬砌可以减小内壁粗糙度和水头损失,钢筋可以减小裂缝宽度,有利于减小渗漏。

1.2 水利工程地下结构发展概况

1.2.1 地下结构发展概况

随着国民经济的发展和西部大开发的全面展开,水利水电工程正在迅猛发展,继三峡工程之后,西部开发的大型、特大型水电站与水利设施都已进入施工或前期施工阶段,其发展趋势是不断的大型化与复杂化。我国水力资源丰富,可供开发的水电容量达3.78亿



kW，居世界首位，但目前开发量不足 19%。中国水力资源的绝大部分集中在西南地区，如长江干流、澜沧江、南盘江等流域。东北、华北、华东及华南地理位置优越，但水力资源较少，已基本开发完毕。水电建设重点正逐步向西南转移，西南水电基本处于高山峡谷地区，水工建筑物布置在地下的工程数量不断增多，规模大已成为明显的趋势。如乌江的洪家渡、构皮滩，雅砻江上的锦屏一级、二级，澜沧江上的小湾、糯扎渡，金沙江上的溪落渡、向家坝、虎跳峡工程等，均具有相当数量与规模的地下工程。地下工程的设计与施工已是水利水电工程的重要课题之一^[3]。

据统计，目前我国已建成的地下厂房约 100 多座，其中装机容量大于 100MW 的 21 座。地下工程的一个显著特点是断面尺寸越来越大，大跨度、高边墙地下洞室已成为大型水电站地下主厂房发展的主流。另一方面，构成地下厂房的洞室越来越多，不同功能，不同断面的洞室相互交错，形成了庞大复杂的地下洞室群。地下洞室的大型化与洞室群的复杂化的发展趋势，相应带动了地下工程围岩稳定及支护工程设计等方面的研究和发展。

作为地下工程之一的水工隧洞，我国已建成水工隧洞总长度超过 600km（包括有压隧洞、无压隧洞、地下埋管、压力竖井及斜井等），已建成长度在 4km 以上的引水发电隧洞 22 座，不少 20km 以上的引水发电隧洞正等待修建。工程规模趋于大型化具体体现为引水隧洞埋深增大，导流、泄洪断面增大，隧洞承压水头增大，如在建的锦屏二级引水隧洞埋深达 2600m，已建成的二滩导流隧洞，断面达 403m²，已建成的天湖抽水蓄能电站的水头则高达 1074m，在长度方面，1991 年建成的太平驿引水隧洞就达 10km。已建的鲁布革水电站，其引水隧洞长 9.77km，引滦入津隧洞长 11.4km，锦屏二级水电站引水隧洞长约 20km。我国已建的水工有压隧洞见表 1.1。深埋的水工隧洞存在着高地下水、高地应力及高内水压力等一系列高难度的复杂工程技术问题。如今，隧洞的布置、围岩的稳定问题、内外水压作用下衬砌的应力应变状态等问题已是水工隧洞设计和施工重点研究的对象。

表 1.1 中国已建有压力隧洞统计表（长度 5km 以上）

序号	工程名称	地质	长度 /km	断面形式及尺寸 /m	衬砌形式	流量 /(m ³ /s)	压力水头 /m
1	鲁布革（云南）	白云岩、灰岩	9.4	D=8.0	A	214	44~74
2	天生桥二级（贵州）	灰岩	3×9.8	D=8.7~9.8	A	566	
3	太平驿（四川）	花岗岩	10.6	D=9	A	250	125
4	西洱河二级（云南）	黑云母片岩	8.2	D=4.3	A、B、C	57	12~40
5	渔子溪一级（四川）	花岗闪长岩	8.4	D=4.7~5.0	A、B、C	69.2	25~60
6	渔子溪二级（四川）	花岗闪长岩	7.7	D=6.5~7.4	A、B、C	72	22~61
7	南桢河三级（四川）	花岗岩	7.3	D=4.5	A	54	18~50
8	下马岭（河北）	灰岩	7.6	D=5.62	A	81	10~24
9	小干沟（青海）		7.6	D=4.0			
10	大桥（四川）		6.6	D=5.1			
11	石板（四川）		6.0	D=4.6			
12	大七孔（贵州）		5.7	D=3.2			



续表

序号	工程名称	地质	长度 /km	断面形式及尺寸 /m	衬砌形式	流量 /(m ³ /s)	压力水头 /m
13	大化（广西）	灰岩	5.2		A、B	18	18~62
14	猫跳河五级（贵州）	白云岩	5.1	D=6.0	A	96.9	20~34
15	羊卓雍湖（西藏）	变质灰岩、板岩	5.9	D=2.5	A、D	20~40	
16	齐溪（浙江）	流纹斑岩	5.0	D=4.0	B	16.6	29
17	古田二级（福建）	流纹斑岩	5.3	D=6.4~6.9	A	118.5	22~58

注 衬砌代码：A—混凝土或钢筋混凝土；B—喷锚；C—不衬砌；D—钢板。

对于高水头地下电站，装机容量较大或者发电引水隧洞洞线较长时，为降低工程造价，减小土石方的开挖，常常不可避免地要采用联合供水或分组供水的方案，这样就需要采用较大洞径的发电引水隧洞和岔管。由于岔管的主支管交叉部位的应力应变复杂，因此该部位是影响工程稳定的重点部位之一。尤其在施工开挖阶段，因在开挖过程中洞壁围岩应力和变形较大，围岩的塑性区分布也广，其稳定性受到影响。由于岔管形态复杂，在高内水压及高地下水作用下，必然出现应力集中和衬砌开裂等现象，因此一直以来岔管衬砌的设计及开挖施工技术都是要重点考虑的内容。

1.2.2 地下结构计算理论的发展

早期地下工程的建设完全依据经验，19 世纪初才形成自己的计算理论，开始用于指导地下结构的设计与施工。

在地下结构计算理论形成的初期，人们仅仿照地面结构的计算方法进行地下结构的计算。经过较长时间的实践，地下结构的受力变形特点才逐渐被认识，并形成以考虑地层对结构受力变形约束为特点的地下结构计算理论。20 世纪中期起，电子计算技术的出现和进步大大推动了岩土力学和工程结构等学科的发展，地下结构的计算理论也因此有了更大的发展。例如，岩土介质的性态、地层自承力的特点及与结构相互作用的规律等因素，目前都已经可以在地下结构计算中按连续或不连续介质力学和材料非线性的原理加以考虑。其发展过程大致可以分为以下 7 个阶段^[4]。

1. 刚性结构阶段

19 世纪的地下结构大多是用石砌筑而成，这类材料的抗拉强度较低，且结构存在较多接缝，故容易产生裂缝。为了维持结构稳定，这时的地下结构截面都定得很大，使结构受力后产生的弹性较小，因而最先出现的计算理论是将地下结构视为刚性结构的压力线理论。

2. 弹性结构阶段

19 世纪后期，由于混凝土和钢筋混凝土材料在地下工程中的应用，衬砌结构整体性



有了很大提高,从这时起,地下结构开始按弹性连续框架进行内力计算。荷载为主动地层压力,按超静定结构力学原理进行计算。这种计算方法的缺点是没有考虑地层产生的弹性抗力的约束作用,但有了比较可靠的力学理论基础。

3. 假定抗力阶段

地下结构在受主动荷载的作用产生弹性变形的同时,受到地层对其变形产生的约束作用。假定抗力计算理论就是将地层对衬砌的约束,按衬砌受有与其变形相适应的弹性抗力的假设形式进行考虑。

4. 弹性地基梁阶段

由于假定抗力法对抗力图形的假定带有较大的任意性,人们开始研究将衬砌视为弹性地基梁的结构计算理论。首先应用的是局部变形理论,稍后共同变形理论也被用于地下结构的计算。相比之下,按共同变形理论计算衬砌结构的优点,在于它以地层的物理力学特征为依据,并能考虑各部分地层沉陷的相互影响,在理论上比局部变形理论有所进步。

5. 连续介质阶段

鉴于人们逐渐认识到地下结构与地层是一个受力整体,按连续介质力学计算地下结构内力的方法也逐渐有所发展。史密斯和温德耳斯提出了圆形衬砌的简化弹性解析解。费道洛夫得出了有压水工隧洞衬砌的弹性解,缪尔伍特提出了圆形衬砌的简化弹性解析解,克铁斯又对此法做了改进。塔罗勃和卡斯特奈得出了圆形洞室的弹塑性解。赛拉塔和柯棣斯采用岩土介质的各种流变模型进行圆形隧道的黏弹性分析。

6. 数值方法阶段

由连续介质力学建立地下结构的解析计算方法是一个困难的任务,目前仅对圆形衬砌中的简化本构关系有了较多的研究成果。20世纪60年代以来,随着电子计算机的推广和岩土介质本构关系研究的进展,地下结构的数值计算方法有了较大的发展。莱亚斯和迪尔在1966年应用德鲁克-普拉格屈服准则进行了圆形洞室的弹塑性分析。1968年,晋齐维齐等按无拉应力分析研究了隧道的应力和变形,提出了可按初应力释放法模拟其开挖效应的概念。1975年,库尔荷威用有限元法探讨了几种因素对地下洞室受力变形的影响。1977年,维特基分析围岩节理及施工顺序对洞室稳定的影响。我国学者近几年来在地下洞室用有限元分析方面做了大量工作。

7. 极限和优化设计阶段

以上所述各种计算方法大都假定衬砌处于弹性受力阶段,这些方法常不能反映实际结构破坏时的极限承载能力。实际上,整体式衬砌的最大受力截面发生裂缝,并不意味着衬砌结构的承载力已消耗殆尽,衬砌结构此后仍可继续维持稳定,按极限状态计算地下结构理论是一个发展方向。正在兴起的结构优化设计理论着眼于各种可能设计方案中寻求最佳结构,从而使结构设计的质量达到新的水平。



1.3 地下钢筋混凝土岔管发展概况

1.3.1 钢筋混凝土岔管发展概况

我国岔管的发展，大致可分为四个阶段：20 世纪 50 年代所建造的岔管由于其所承受的内水压力值不高，一般多为贴边岔管，并且多为埋管；60 年代起，由于高水头电站的出现，则较多地应用了混合梁系及三梁岔管；到了 70 年代后，钢管的直径及内压值继续增大，高 HD 值造成相应的三梁岔管的制作安装困难较大，技术经济指标不佳，逐渐采用月牙形内加强肋岔管，个别工程还采用了球形岔管和无梁岔管，总体而言是以三梁岔管和内加强式月牙肋岔管为主；到 80~90 年代，由于电站的 HD 值越来越大，而且在地面式管道中，已经有些电站采用了钢衬钢筋混凝土岔管结构形式，除了内加强式岔管外，无梁岔也逐步得到较多的应用。对于地下岔管而言，宜采用无梁岔、贴边岔和内加强月牙肋岔管，这三种岔管形式可以较好地发挥钢衬与围岩的联合受力的特点，改善岔管结构本身的受力情况，并且由于体型较小，安装和施工较之其他类型岔管相对要方便。

近年来，随着越来越多的地下电站以及抽水蓄能电站的修建，岔管往往深埋于地下，且具有高水头、大直径的特点。当岔管 HD 值大时，若采用钢板衬砌，设计需要的钢衬较厚，使得钢岔管焊接工艺复杂，施工困难等。而且，钢衬抗外压稳定性差，当岔管处于高地下水的地质条件下，钢岔管抗外水压稳定问题是工程需要面临的主要问题之一。此外，在地下洞室中安装钢岔管要开挖比岔管本身体型尺寸大得多的断面，以满足安装设备所需净空要求。钢岔管的焊接以及混凝土的回填等问题，使得工期长，投资也大。因而在地形和地质条件允许的情况下，应尽量采用钢筋混凝土岔管，不仅可以使上述问题迎刃而解，还可以充分利用围岩来承担内水压力，减薄衬砌厚度，达到结构安全，经济合理的目的。

近代岩石力学研究的进展，已给传统的设计理论方法带来了新的突破，在大量不衬砌的水工隧洞成功实践的基础上，大型地下高压钢筋混凝土衬砌岔管已得到迅速发展，表 1.2 列举了国内外近期建成的部分大型钢筋混凝土衬砌岔管的工程实例。

表 1.2 国内外已建成的部分钢筋混凝土岔管

序号	电站	国家	装机容量 /MW	水头 /m	岔管直径 /m	岔管 分岔布置	围岩地质	衬砌厚度 /cm
1	Montezic（蓄能）	法国	4×20.5	423	5.3	2×1 分 2	花岗岩	40/75
2	Dinorwic（蓄能）	英国	6×300	542	9.5/3.8	1 分 6	板岩	100
3	Kvilldal（常规）	挪威	4×300	465	13.1	1 分 4	片麻岩	
4	Canan Mountain（常规）	美国	6×280	289	11.3/4.6	1 分 6	片麻岩	
5	Helms（蓄能）	美国	3×350	531	8.2/3.5	1 分 3	花岗岩	69
6	Bear Sramp（蓄能）	美国	2×300	235	7.6/5.3	1 分 2		
7	Northfield Mt（蓄能）	美国	4×250	248	9.5	1 分 4		



续表

序号	电站	国家	装机容量 /MW	水头 /m	岔管直径 /m	岔管 分岔布置	围岩地质	衬砌厚度 /cm
8	Raccon Mt (蓄能)	美国	4×350	310	10.7	1分4		
9	Rocky Mountain (蓄能)	美国	3×280	213	10.7/5.79	1分3	灰岩	
10	Bad Creek (蓄能)	美国	4×309	365	8.83	1分4	片麻岩	30~45
11	Bath County (蓄能)	美国	6×350	390	8.69/5.4	3×1分2	砂页岩	60
12	天荒坪 (蓄能)	中国	6×300	680	7.0/3.2	2×1分3	凝灰岩	
13	广蓄一期 (蓄能)	中国	4×300	535	8.0/3.5	1分4	花岗岩	60
14	广蓄二期 (蓄能)	中国	4×300	535	8.0/3.5	1分4	花岗岩	60
15	碧口 (常规)	中国	3×100	60	10.5/6.0	1分3	千枚岩	
16	察尔森 (常规)	中国		30	6.0		凝灰岩	
17	洞潭 (常规)	中国	2×10	62	2.0	1分2	白云岩	

国外的高水头、大直径的钢筋混凝土岔管往往采用较薄的衬砌，衬砌中所布设的钢筋也不多，并有成功的建设经验及提出相应的设计准则。20 世纪 60 年代，大直径的钢筋混凝土岔管在我国水电建设中也有过实践，但承担的内水压力均不高。由于设计中未能考虑围岩的承载能力，设计出的岔管往往是厚衬砌、密钢筋。90 年代我国相继建成了广蓄一期、二期和天荒坪蓄能电站等三座大型的钢筋混凝土岔管，最大设计水头达 700m 以上，解决了制约工程建设以及设计理论、方法等的关键问题，为我国水电建设提供了宝贵的经验。但钢筋混凝土岔管至今还没有指导设计的具体准则，对其工作状态特别是承受外压时并不完全了解，数值分析尚欠更深入的论证，用数值方法模拟钢筋混凝土的各工况的应力状态，用理论分析的结果和工程实践经验紧密的结合，对以后我国水利水电工程的建设会有较大的指导意义。

1.3.2 钢筋混凝土岔管研究概况

近代岩体力学研究的进展，水工地下工程结构设计充分利用和发挥围岩承载能力，已给传统的设计理论方法带来了新的突破，在大量不衬砌水工隧洞成功实践的基础上，大型地下高压钢筋混凝土衬砌岔管又得到发展^[5]。

我国早在 20 世纪 60 年代就建成了碧口、洞潭工程等几座钢筋混凝土衬砌岔管，水头均小于 100m，限于受传统设计理论方法制约，长期未再突破，一直到 80 年代鲁布格电站，水头达 430m，还是采用钢衬岔管，由日本川琦重工制作，分部运工地组装，耗钢材 106t。长期以来，国内设计钢筋混凝土岔管的理论水平及实际经验一直停留在结构力学方法上。结构力学法无法考虑围岩中的初始地应力及开挖引起的二次应力场，所以，无法对围岩的承载能力做出客观的判断，也就难以研究对围岩的加固措施。考虑用围岩的弹性抗力系数 K 值来衡量围岩的承载能力， K 值的选取多半凭经验给定，即使是做了水压试验，也常常认为试验结果偏大而不敢采用，采用较小的 K 值又无法充分利用围岩的承载能力，因此围岩的弹性抗力系数 K 值不是围岩承载能力的客观标准。一方面受传统设计理论的



制约,另一方面也由于我国在建造高水头、大直径的钢筋混凝土岔管方面缺乏经验,因而设计出的岔管往往是厚衬砌、密钢筋。90年代我国相继建成了广蓄一级、二期和天荒坪抽水蓄能电站等三座大型钢筋混凝土衬砌岔管,最大设计水头达700m以上,解决了制约工程建设的关键问题,设计理论方法突破传统理念约束,在充分利用和发挥围岩承载能力方面取得了成功经验。

1990年,Zagars A、Yeh CH、陆宏策^[6]利用结构力学法对广州抽水蓄能电站一期工程钢筋混凝土岔管进行了计算研究,并且采用了引自美国的混凝土裂缝开展宽度半理论半经验计算公式,按限裂方法设计衬砌结构。1994年,田斌、刘启钊^[7]结合天荒坪抽水蓄能电站的工程实际,利用二维及三维线弹性有限元法对地下钢筋混凝土岔管在内水及外水压力下的工作性态进行了研究,指出合理、安全的衬砌只能建立在围岩稳定的基础之上,围岩稳定是地下钢筋混凝土岔管设计中应解决的关键问题。1996年,卢兆康^[8]利用边界元法对广蓄电站二期工程高压钢筋混凝土平底岔管在外水压力下的受力情况进行了详细的分析。1999年,郭海庆^[9]运用三维弹塑性有限元方法对万家寨引黄入晋工程总干一级泵站出水岔管开挖工况进行了详细的计算分析,并编制了相应的计算程序。2001年,肖明^[10]根据岩体和混凝土衬砌联合受力特点,对不同体型结构的岔管作了计算分析,系统地提出了大型地下钢筋混凝土岔管结构体型优化的评估方法。2002年,肖明^[11]根据地下高压岔管受内水压力衬砌开裂后的渗流场变化特征,提出了高压管道内水外渗的渗流场与应力场耦合的三维有限元数值分析方法。2005年,苏凯、伍鹤皋^[12]提出了水工隧洞钢筋混凝土衬砌非线性有限元分析方法。2006年,陈卫忠^[13]研究了高压岔管附近的渗流场和位移的分布特点,通过现场监测结果,验证了计算模型的合理性和可行性。

第2章 钢筋混凝土岔管结构

2.1 钢筋混凝土岔管结构特点

在高内压水压力作用下,钢筋混凝土衬砌为透水衬砌,钢筋混凝土岔管下游为高压钢管,高压钢管为不透水衬砌,岔管为透水衬砌与不透水衬砌的相连接结构物。因此,钢筋混凝土高压岔管的结构设计直接关系到岔管本身及相邻建筑物的运行安全,进而影响到整个工程的运行安全。

根据混凝土岔管结构设计,内水压力主要是靠围岩和钢筋混凝土衬砌联合承担并防渗,且围岩是主要的承载和防渗结构,衬砌的作用还有平顺水流、减小糙率、保护围岩,确保灌浆顺利进行等。钢筋混凝土衬砌要和围岩共同承担内水压力,按常规设计方法,由于岔管部位外压水头较高,单独由衬砌结构承担外水压力较为困难,因此需要研究衬砌与围岩共同承担外水压力的可能性。故而,结构设计的主要任务是保证岔管洞室开挖施工期的安全和永久运行时衬砌与围岩结构的安全可靠,防止内、外水压力作用下衬砌破坏塌落危及机组运行安全。钢筋混凝土岔管在内水压作用下,如何考虑“内水外渗”和内水压力以体力的方式作用时岔管的应力应变分析,这方面的研究尚须更多的数值模拟来指导实际工程的设计。外水压较大时,钢筋混凝土岔管设计受外压工况控制,而钢筋混凝土岔管外压工况的计算分析尚无成熟的方法,如对外水压力的合理取值、如何考虑排水效果、如何考虑残余的灌浆压力、岔管承载外水压的计算模型等均需要进一步的探讨。结构设计中钢筋混凝土岔管的配筋计算,到目前为止尚无成熟的方法,但已有许多成功的工程经验可以借鉴。因而参考体形类似、数值相近的已建工程的岔管结构设计及其运行状况和放空检查后的性能等尤为重要。同时,岔管的体型和受力条件、边界条件以及与围岩联合承载的机理均十分复杂,为了全面了解高压岔管结构及围岩在各种复杂因素条件下的工作性态,优化和确定设计方案,本阶段有必要对岔管的体型和结构受力特性,以及围岩稳定性等关键技术问题进行深入细致的研究,为引水系统的设计和施工提供科学依据。由于常规的计算方法无法准确描述结构的变形和受力特征,采用数值计算方法是十分必要的。