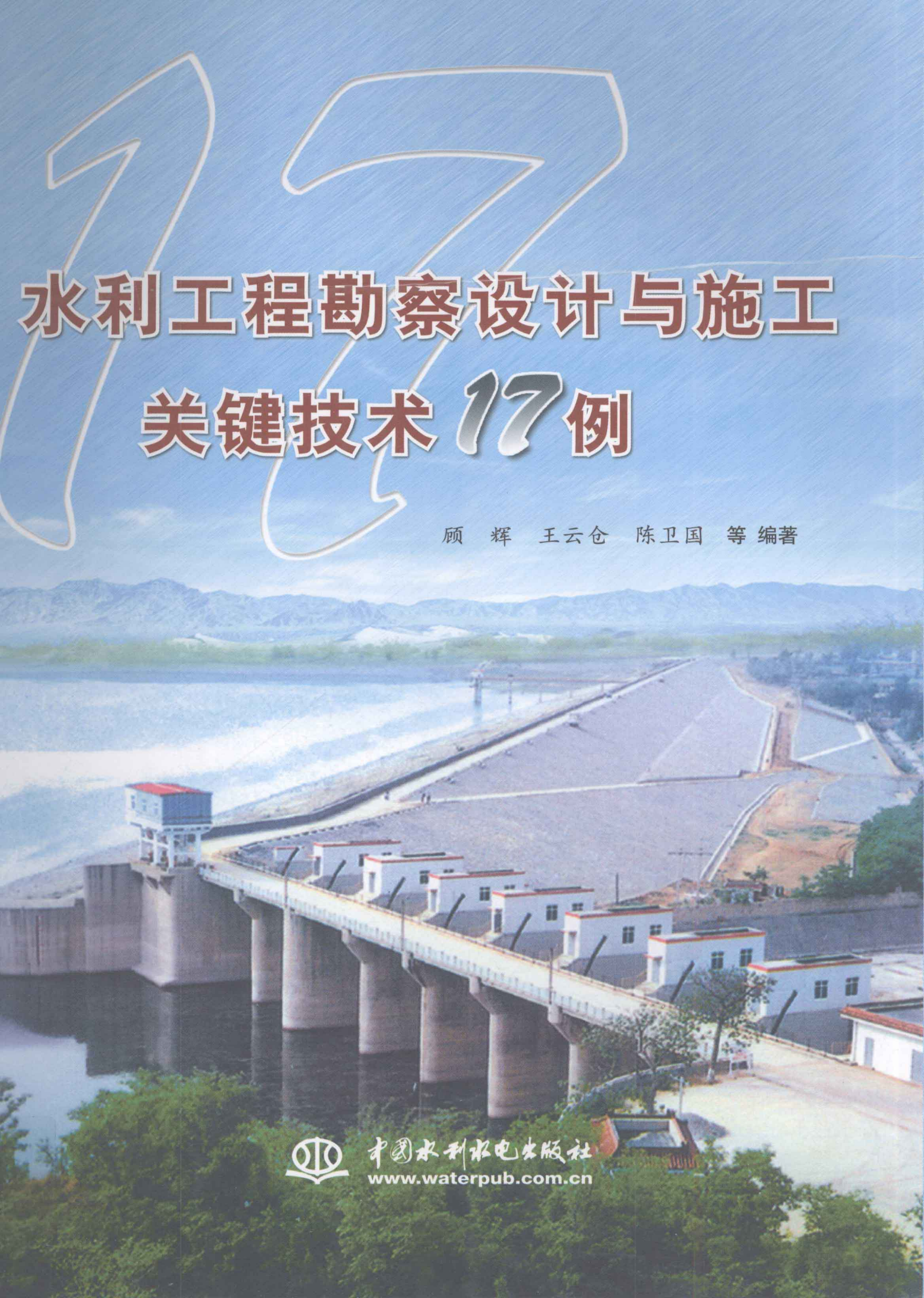




水利工程勘察设计与施工 关键技术 17 例

顾 辉 王云仓 陈卫国 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利工程勘察设计与施工 关键技术17例

顾 辉 王云仓 陈卫国 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 摘 要

本书介绍了跨流域调水工程、水库工程、水电站工程、生态与环境工程等技术，每部分内容精选出多个工程实例，对其中应用的关键技术做深入研究，成果满足了工程建设要求，并总结了设计建设经验。该书内容全面、系统，具有较高的使用和借鉴价值。全书共 18 章，对水利水电工程设计中经常遇到的设计和施工问题给出了方案分析和解决方法，其中包含倒虹吸和渡槽工程及其施工技术，水库工程的高边坡、建基面、底孔、坝体深层稳定、优化调度、除险加固、河床冲刷、防渗墙、平原水库堤防技术，水电站的防雾化、水利机械、二拖一水轮发电机组技术，河道险工加固、生态屏障修复技术等。

本书可供从事水利水电规划、设计、施工和其他工程技术人员使用，亦可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

水利工程勘察设计与施工关键技术 17 例 / 顾辉等编
著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2010. 7
ISBN 978-7-5084-7730-5

I. ①水… II. ①顾… III. ①水利工程—勘测②水利工程—工程设计③水利工程—工程施工—施工技术 IV.
①TV22②TV52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 142788 号

书 名	水利工程勘察设计与施工关键技术 17 例
作 者	顾辉 王云仓 陈卫国 等 编著
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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	210mm×285mm 16 开本 25 印张 757 千字
版 次	2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	78.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



水利工程实现防洪减灾，兴水利，除水害。新中国成立以来的科学治水方略不断完善，传统水利正在向现代水利转变。20 世纪 80 年代正式将水利纳入国家基础产业范畴，水利改革发展取得新突破，民生水利带给百姓越来越多的实惠，水利事业越来越成为经济社会可持续发展的动力。目前，全国已建成江河堤防约 28.69 万 km，修建各类水库 8.5 万多座，重点堤防设防标准提高到 50 年一遇。水利工程年实际供水量达到 5000 多亿 m^3 ，基本满足了城乡经济社会和生态环境的用水需求。但在转变治水思路，创新治水实践，水利日益成为建立资源节约型和环境友好型社会的基础产业过程中，既积累了丰富的建设经验，也出现了大量关键技术问题，影响着水利工程建设进度或工程效益的发挥。在跨流域调水工程中常用倒虹吸和渡槽工程的设计和施工技术，水库工程中的高边坡、建基面、底孔、坝基深层抗滑稳定、河床冲刷、防渗墙、优化调度、除险加固、平原水库堤防技术，水电站工程中的防雾化、水利机械设计、二拖一水轮发电机组技术，水生态与环境治理中的河道险工加固、生态屏障修复等关键技术都是水利工程设计、施工、运行管理中经常出现的挑战性难题，往往需要反复论证、研究才能给出最佳解决方案。

高兴地看到本书作者根据多年积累的建设经验，进行了深入系统的总结和提炼，编著此书，对作者勇于探索的精神深表钦佩。

相信本书的出版将对国内外水利工程建设产生一定的影响，对水利工程关键技术的研究者将受益匪浅，也期望本书能在水利事业中起到催化剂的作用，让水利事业更加蓬勃发展。

中国工程设计大师 林昭

2010 年 4 月

目 录

序

第1章 综述	1
1.1 跨流域调水工程	1
1.2 水库工程	2
1.3 水电站工程	5
1.4 生态与环境	7
第2章 大孔口倒虹吸薄壁结构混凝土防裂缝综合技术	10
2.1 概述	10
2.2 倒虹吸工程防裂缝技术	11
2.3 结构防裂缝措施	15
2.4 施工仿真计算	22
2.5 严格施工工序确保施工质量	30
2.6 工程检测及评价	32
2.7 结语	32
第3章 特大型渡槽工程三向预应力结构设计与计算	34
3.1 概述	34
3.2 槽身单向预应力修改为三向预应力	34
3.3 槽身单向预应力结构计算	35
3.4 槽身三向预应力结构计算	39
3.5 槽身结构有限元分析复核	45
3.6 槽身结构优化前后的工程量和投资比较	51
3.7 结语	51
第4章 跨流域调水工程施工进度控制关键技术及应用	52
4.1 概述	52
4.2 跨流域调水工程施工场地优化布置	54
4.3 跨流域调水工程施工进度优化	60
4.4 跨流域调水工程施工进度控制	70
4.5 网络环境下跨流域调水工程施工进度优化与控制系统的研制开发	80
4.6 南水北调中线应急供水工程应用	85
4.7 结语	89
第5章 重力坝高岸坡坝段的稳定计算分析	91
5.1 概述	91
5.2 重力坝岸坡坝段三维稳定分析原理	94
5.3 重力坝岸坡坝段三维稳定分析	97
5.4 计算实例分析	100
5.5 重力坝岸坡段三维荷载计算	103
5.6 结语	113

第 6 章 大型水库重力坝利用定量参数确定最优建基面的研究	114
6.1 概述	114
6.2 坝基建基岩体质量评价研究	114
6.3 坝基弱风化岩体经固结灌浆试验后对可利用程度分析	121
6.4 对坝基建基岩面开挖控制的岩体表层 n 项参数的建议	124
6.5 结语	129
第 7 章 大型水库重力坝底孔三维有限元应力计算与分析	130
7.1 概述	130
7.2 桃林口水库底孔概况	131
7.3 技术原理	132
7.4 主要参数	134
7.5 计算模型	135
7.6 计算工况与荷载	138
7.7 计算结果分析	139
7.8 结语	146
第 8 章 水库大坝深层抗滑稳定分析及处理措施	147
8.1 概述	147
8.2 工程概况	148
8.3 工程地质条件	148
8.4 坝基深层抗滑稳定分析	150
8.5 大坝基础处理措施	161
8.6 结语	163
第 9 章 大型水库优化调度研究	165
9.1 概述	165
9.2 数学模型的建立	165
9.3 优化调度结果	172
9.4 结语	173
第 10 章 大中型病险水库土石坝加固措施研究	174
10.1 概述	174
10.2 大型现场碾压试验	174
10.3 洋河水库大坝加固断面优化分析	179
10.4 非常溢洪道引冲式自溃坝冲刷模拟计算	184
10.5 水库优化调度管理研究	188
第 11 章 大型水库溢洪道下游河床冲刷数模分析	198
11.1 概述	198
11.2 二维数学模型分析研究	200
11.3 结语	218
第 12 章 大型病险水库土坝混凝土防渗墙塌坑机理与处理	220
12.1 概述	220
12.2 塌坑机理分析	226
12.3 槽孔壁砂层塌落解析	227
12.4 塌坑过程的非连续介质数值模拟	232

12.5	塌坑过程的连续介质数值模拟	236
12.6	多塌坑相继发生的连续介质数值模拟	241
12.7	塌坑预防措施	242
12.8	塌坑处理技术	248
12.9	结语	258
第 13 章	平原大型调蓄水库工程关键技术研究	260
13.1	概述	260
13.2	高含水量土料筑堤技术	260
13.3	改性粉细砂筑堤技术	266
13.4	调蓄池围堤护坡工程技术	269
13.5	原型观测资料分析与护坡型式确定	276
13.6	平原引调水调蓄工程防渗技术	280
第 14 章	水电站采用 110kV GIS 全封闭组合电器防雾化设计	288
14.1	概述	288
14.2	应用实例	288
14.3	应用领域和技术原理	289
14.4	主要技术特点	290
14.5	结语	291
第 15 章	水力机械新技术在水电站的应用	292
15.1	概述	292
15.2	主要参数	292
15.3	新技术内容	293
15.4	技术原理	293
第 16 章	二拖一水轮发电机组控制系统开发及应用	299
16.1	概述	299
16.2	新技术内容	301
16.3	技术原理	303
16.4	结语	309
第 17 章	海河流域河道险工加固治理技术应用	310
17.1	概述	310
17.2	河道险工治理技术	318
17.3	河道治理效益分析与评价	347
第 18 章	环京津生态屏障修复技术	353
18.1	概述	353
18.2	主研区自然概况与水资源供需现状	353
18.3	主研区水环境变迁与水利建设关系的分析	357
18.4	环京津生态环境修复工程作用评价	363
18.5	生态环境修复工程投资效果模糊评价与投资结构优化计算	369
18.6	环京津上游生态环境修复战略	383
18.7	结语	387
编后语		389

第 1 章 综 述

由于我国水资源的日益短缺,许多水利工程正在按照水资源利用规划的要求加紧设计和建设。正在设计和建设的水利工程,按照工程发挥作用分,包括解决流域内水资源短缺的跨流域调水工程,拦蓄河流水体的水库工程,利用河流水位的落差发电的水电站工程,为解决环境生态要求而建设的生态与环境工程等。由于工程技术发展的局限性,现阶段出现了大量的水利工程关键性技术需要进行研究,以解决工程设计和建设的迫切需要。本书对目前引起普遍关注的关键技术进行了研究,并对取得的实用成果进行了阐述。

1.1 跨流域调水工程

跨流域调水工程中常用的建筑物类型是倒虹吸和渡槽,关键技术包括大孔口倒虹吸薄壁结构混凝土防裂缝综合技术,特大型渡槽工程三向预应力结构设计与计算,工程施工进度控制关键技术及应用,对这些问题进行研究并取得预期的成果是控制设计和施工的一个关键因素。

1.1.1 倒虹吸薄壁结构混凝土防裂技术

在南水北调中线工程中布置了大量的钢筋混凝土箱涵倒虹吸,它们具有流量大、断面大、构件体积大、结构受力大且复杂、安全及耐久性能高等特点,其温度控制和裂缝防止难度大。混凝土结构初始缺陷(裂缝、裂纹、裂隙等)的存在,使得耐久性破坏的进程大大加速。为防止裂缝,针对同一工程从结构设计、施工技术、温度控制和配合比四个方面来防止薄壁结构大体积混凝土裂缝的技术,提出合理优化混凝土配合比,降低混凝土水化热,减少水泥用量,并提出根据不同的月份气温情况,采用动态仿真跟踪法计算来确定混凝土保温和混凝土降温两种不同的温控措施,避免混凝土温度裂缝的发生。

通过对大孔口薄壁结构钢筋混凝土倒虹吸管设计基础理论和施工工艺的研究,提出了优化创新技术,解决了预防钢筋混凝土管涵产生裂缝的技术问题。

1.1.2 三向预应力渡槽设计和计算技术

渡槽由槽身、支承结构、基础等部分组成。渡槽的类型,按施工方法分,有现浇整体式、预制装配式及预应力渡槽等。

通过对南水北调中线特大型渡槽漕河渡槽槽身三向预应力受力状态研究,从设计角度解决了三维受力到平面受力模型的转化,解决了渡槽槽身结构型式设计优化问题,而且可改善槽身结构梁体的受力状态,提高构件的抗裂度与防渗性,减小构件变形,提高受剪承载力,减小混凝土梁的主拉应力,增强结构的耐久性,同时可以减轻自重,节约材料降低了造价。

1.1.3 长距离大型输水工程施工进度控制关键技术及应用

跨流域调水工程施工线路长、投资大、建设周期长、工程规模大、参建单位多、地域分布广,给工程施工组织与管理带来了很大的困难,成为工程建设管理的一个重要课题。传统的水利工程施工进度优化与控制方法已不能完全满足现代化工程施工管理的需要。

采用科学的理论分析方法和先进的技术手段,研究网络环境下跨流域调水工程施工进度优化与控制的理论方法和工程应用,一是系统地分析研究了跨流域调水工程施工场地布置的特点和复杂性,建立了施工场地布置方案的评价指标体系和施工场地布置方案的优选模型,为施工场地布置方案的综合

优选提供了一种可行的决策分析方法,为跨流域调水工程施工进度优化提供了基础;二是基于工程实体的三维数字模型和施工横道图,提出了施工进度的三维动态可视化分析方法,可直观、方便地进行施工进度与施工面貌的可视化交互分析,用以优化施工进度计划,并为工程管理提供辅助手段;三是提出了基于 Web 的跨流域调水工程施工进度优化与控制技术,并在此基础上,应用数据库技术和网络技术开发施工进度优化与控制系统,通过施工组织设计优化、施工进度控制、施工合同实施管理等功能模块,可以提高跨流域调水工程的施工组织设计和建设管理的现代化水平。

1.2 水 库 工 程

水库工程往往是水利工程系统中重要的组成部分,它为水资源利用提供了宝贵的水体或落差能量。因为水库工程设计、建设和运行管理中涉及的因素繁多,其复杂性表现为需多学科交叉研究,由此产生了一系列的关键性课题,需专门研究。本书对其中的水库高边坡岸坡稳定计算与分析,水库工程利用定量参数确定最优建基面研究,水库底孔三维有限元应力计算与分析,水库大坝深层抗滑稳定分析及处理措施,大型水库优化调度研究,大中型水库加固措施研究,大型水库溢洪道下游河床冲刷数模分析,大型病险水库土坝混凝土防渗墙塌坑机理与处理和平原大型调蓄水库工程关键技术研究进行了较为详细的阐述,并给出了研究成果。

1.2.1 水库高边坡岸坡稳定计算与分析

重力坝岸坡坝段的稳定分析是一个重要而复杂的问题,随着坝工设计技术的不断发展,作为设计时必须考虑的重要问题,而引起人们越来越多的重视和研究。如果采取合理的计算方法,平台尺寸选取适当,不但能优化坝体断面,提高坝体抗滑安全度,且节省工程量,因此,合理地定量地描述具有平台的岸坡坝段的稳定性,是坝工设计亟待解决的问题。

对于具有平台的岸坡坝段的稳定计算,目前国内外尚无合理和统一的计算方法,在工程设计中一般根据经验,工程类比和保守的计算方法定型地描述其安全度。

基岩重力坝岸坡坝段的稳定条件一般较河床坝段差,为定量的描述岸坡坝段的稳定性,在刚体力学范畴内,按静力等效的原则,确定计算假定条件,建立数学模型,求解力学方程,编写电算程序,方便地定量地描述具有平台岸坡段的安全度。岸坡坝段三维稳定分析主要核算按抗剪强度和抗剪断强度计算的稳定安全系数,坝基面垂直正应力。

作用在坝体上的基本荷载和特殊荷载。在扬压力荷载计算中根据《重力坝设计规范》岩基重力坝静力渗透及对数十座水库实测扬压力分布规律的分析,确定扬压力模型图形、计算扬压力值。在地震强度计算中,对于总地震惯性力对坝基面中点的弯曲力矩计算,按我国《水工建筑物抗震设计规范》求坝体重心处惯性力,计算繁琐精度差。基于积分学理论,借助计算机不但简化了计算工作,且计算速度快精度高,微机上重力坝岸坡坝段稳定分析程序 GDSA (1.0) 包括两个方面的内容:计算部分包括荷载、支反力、应力及安全系数、坝基应力求解的全部工作。后处理部分利用 AUTOCAD 作为支撑软件来实现,它通过对计算结果数据的处理,形成 AUTOCAD 识别的图形命令文件,并可以显示打印和绘出我们所关心的图表。

1.2.2 水库工程利用定量参数确定最优建基面研究

桃林口工程为碾压混凝土重力坝,按规程建在微风化岩面上,拟定建基面 65m 高程,挖方量过大,是控制施工期的关键因素。通过初设后期勘探测试成果的研究,在招标期将建基面上调至 65、67、72m 高程,但仍然较深。

为解决深挖,施工技术阶段又补充部分勘探试验工作,在坝基岩体质量评价研究的基础上,针对桃林口工程坝基岩性构造具体地质条件,重点应用了以下指标优选建基面。

(1) 主要指标:①岩体纵波波速;②岩石饱和抗压强度;③岩石回弹强度;④岩石点荷载强度;

⑤混凝土/岩抗剪强度；⑥岩体变形模量；⑦岩石质量指标（RQD）等。

（2）控制指标：①岩体纵波波速 $v_p > 3500\text{m/s}$ ；②岩石饱和抗压强度 $R_c > 45\text{MPa}$ ；③岩石回弹强度 $N > 32$ ；④岩石点荷载强度 $I_s(50) > 4\text{MPa}$ 。

（3）采用定量参数所选建基面高程较初设拟定高程上抬了 4~11m。通过开挖对各坝块建基面所测试的各项参数均达标。

1.2.3 水库底孔三维有限元应力计算与分析

国内外结合工程建设的实际，对采用三维有限元方法进行重力坝底孔结构的应力分析做了大量的研究，总结分析已有的成果表明，以往底孔三维有限元应力分析的成果精度还很低，尚不能满足结构设计要求。其关键问题主要是选择的单元模型不合理，缺乏单元网格剖分疏密度的控制原则，需要探索超大型三维有限元应力分析在计算机上实现的途径。各种单元模型有其各自的特点，采用三维有限元方法对大型结构进行应力分析，尤应选择合适的单元模型，以提高效率；底孔结构体积庞大，结构复杂，应力分布也复杂，不可能采用简单的离散模型，准确地分析计算结构的内力分布，必须遵循一定的单元剖分疏密度控制原则，才能取得满足工程要求的计算成果；超大型结构三维有限元应力分析，解题容量巨大，在实现上存在着计算机容量的限制和错误查找困难等问题，将会直接影响到分析计算的成败，需要有一条有效的实现途径。

该研究着力从单元模型选择，单元网格剖分疏度的控制原则，超大型结构三维有限元应力分析在计算机上实现的途径，几方面进行探索，建立一套有效的分析计算模式，提高底孔结构三维有限元应力分析成果的精度，使其达到工程实用的程度。

经过计算分析和论证，提出了底孔三维有限元应力分析应采用 20 节点等（次）参三维实体单元模型；确定了底孔三维有限元应力分析单元剖分疏密度的控制原则，探索了一条用多层子结构的理论方法，解决总体单元数和自由度数极大的超大容量题目，在计算机上实现的途径。研究成果发展和完善了底孔三维有限元应力分析方法，极大地提高了计算成果的精度。

成果在桃林口水库工程中应用，提高了设计水平，优化了底孔结构，使工程设计达到了安全、经济、合理的要求。减少了工程量，加快了施工进度，创造了显著的经济效益。研究成果在水利水电工程中的推广应用，将进一步提高重力坝底孔结构的设计水平，达到减少工程投资，加快施工进度，提高工程建设质量的效果，具有显著的经济和社会效益。

1.2.4 水库工程大坝深层抗滑稳定分析及处理措施

根据桃林口水库大坝基础存在缓倾角断层，有软弱夹层的情况，对深层抗滑稳定问题进行了深入研究。分别采用刚体极限平衡法和非线性有限元法对抗滑安全系数、坝踵水平错动、坝趾平均水平抗力等进行了计算，并进行了对比分析。依据计算分析结果和对各种处理措施的比选，提出了适当调整坝体结构和局部开挖为主的综合处理措施。

（1）在研究坝基软弱夹层对坝体抗滑稳定的影响时，对周边岩体的侧面阻滑力进行了计算分析。分别给出了不计侧面阻滑力和计入侧面阻滑力的稳定计算结果。得出了在考虑岩石侧面阻滑力的作用时，安全系数提高 20%~30% 的结论。

（2）同时研究了由坝基、断层、抗体组成的“三折坡滑动面”和坝基断层为多折坡情况的稳定计算方法，提出了计算公式，推导出了数学模型，分别采用刚体极限平衡法和非线性有限元法进行了稳定计算和对比分析。

（3）对开挖处理方案、混凝土键方案、预应力锚索和高压喷射冲洗灌浆的软弱夹层处理措施进行了比较优选，提出了适当调整坝体结构和局部开挖为主的综合处理措施。解决了工程抗滑稳定问题。

1.2.5 大型水库优化调度研究

水库的来水是以年为周期的连续随机过程，它有两个基本特点：在固定时间内进行观察，水库流量是一个随机变量；对于一个水库来水的具体实现，它是一个随时间变化的函数。将径流分

为若干个时段,研究采用二次关系描述相邻时段间径流的相关关系。由目标函数及约束条件,在动态规划最优化原理进行计算,得到新的控制规律。如此重复几年,直到整个计算收敛为止,从而得到稳定的优化控制规律。再进行回检计算确定最终的放水量,可计算出该时段的出力、发电量、水位、库容等。

(1) 对于桃林口水库,在相同的约束条件下,优化调度与常规调度相比,多年平均发电量增加3%~4%。

(2) 如果低谷不允许发电,则会产生大量的电能损失。

(3) 由于桃林口水库来水和供水的特点,在许多时候放水流量低于一台机组的最小过流量而引起弃水。因此,增加一台较小容量的水轮发电机组是必要的。机组型式及容量应在优化调度计算和技术经济比较之后确定,建议进一步开展这方面的工作。

(4) 提高水库的蓄水位对发电、供水等综合效益影响显著。在充分考虑水文自动测报、泄水建筑物的功能后,适当提高蓄水位是可能的。

1.2.6 大中型水库加固措施研究

将大中型病险水库加固措施的应用研究和今后除险加固工程建设新技术的发展趋势结合起来,针对病险水库的特点及现状运用管理、当地天然建材等条件,立足于创新,提出具有实用和推广应用的新技术、新理论以及采用弃渣材料筑坝的方法。

以洋河水库为背景,论证保留原护坡垫层砂砾卵石混合料作为坝体一部分的可行性;通过自溃坝冲刷模拟计算,描述溃坝及泄流过程,确定溃坝时间;建立适合洋河水库优化调度管理的应用模型,使水库的调蓄过程得到动态监测,为水库调度、防洪决策提供依据。

(1) 大坝加固断面优化研究。解决了保留原护坡垫层砂砾卵石混合料作为坝体的一部分,在护坡垫层料下游直接填筑贴坡代替料;两岸均质壤土坝段贴坡填筑料改为代替料;坝脚排水棱体及排水沟结构优化。拦河土坝在新老坝料之间形成夹砂层,在断面结构、材料分区以及开挖弃渣利用等方面具有创造性和先进性。

(2) 非常溢洪道引冲式自溃坝冲刷模拟计算分析。采用离散元原理,结合水利学、流体动力学等理论,对溃坝过程进行模拟计算,描述溃坝及泄流过程,确定了合理的溃坝时间。以创新的理论为自溃坝的设计提供了依据,对制定水库的防洪预案起到了非常重要的作用。

(3) 水库优化调度管理方案的研究。建立了适合洋河水库优化调度管理的应用模型,与流域的暴雨、洪水、径流结合起来,使水库的调蓄过程得到动态监测。为水库优化调度、防洪决策提供了科学的理论依据。

1.2.7 大型水库溢洪道下游河床冲刷数模分析

黄壁庄水库正常溢洪道建成后,在1963年和1996年遭遇了两次特大洪水,汛后检查均发现溢洪道出口河床和两岸边坡冲刷破坏严重,降低了工程运用的安全性。为此需找到下游河床及岸坡冲刷破坏的根本原因,即利用二维数学模型的先进技术,模拟计算溢洪道工程现状和修改方案情况下的洪水流场,以及洪水对河床及岸坡冲刷破坏影响,由此找出下游河床及岸坡冲刷破坏的根本原因,为工程加固提供有力的技术支持。

研究依托二维数学模型的计算方法,寻求下游河床及岸坡冲刷破坏的诱因,并根据研究结论提出工程加固措施,为工程加固提供技术支持。根据黄壁庄水库正常溢洪道工程存在的问题,利用二维数学模型的先进技术,创建了溢洪道泄洪及出口河床冲刷分析的数学模型,模型采用“96.8”实测洪水进行验证,确保研究成果的可靠度和实用性。验证成功后分别计算了现状条件下50、100、500、10000年一遇洪水工况下溢洪道的流场及洪水对河床、岸坡冲刷破坏的影响,然后根据计算结论,提出工程修改方案并进行流场及冲刷破坏计算分析。根据上述计算成果提出研究结论,并提出工程加固改造意见及建议。

1.2.8 大型病险水库土坝混凝土防渗墙塌坑机理与处理

黄壁庄水库地理位置非常重要,承担着京、津、冀地区的防洪保安任务。黄壁庄水库除险加固工程是国务院特批项目,在我国除险加固工程中目前是规模最大的,其中副坝混凝土防渗墙面积达 30 万 m^2 ,为同类单项工程世界之最。由于地质条件复杂,在混凝土防渗前施工中,先后共发生过 7 次塌坑,其中最大一次塌坑的地表塌陷可见深度 12.1m,长 46.2m,宽 53.5m,塌陷方量约 3900 m^3 ,影响范围长 127m,宽 79.5m。

土石坝地基防渗墙施工中经常发生槽孔坍塌情况,但黄壁庄水库副坝防渗墙发生的塌坑却与其完全不同,属于坝基地层局部流失后造成的顶部坝体坍塌,是国内外唯一仅见的,其规模和影响在防渗墙建造史上是空前的和巨大的,影响深远,因而引起了有关方面的高度重视。塌坑能否处理成功,成了防渗墙能否顺利施工、工期是否延误、投资是否增加、水库能否顺利竣工的关键。

由于塌坑是国内外未见的,没有理论和经验可以借鉴,因此研究工作必须从塌坑机理和原因入手,借助地球物理学、岩体力学、散体力学、渗流力学、计算机数值分析等多学科理论和方法,通过分析、计算研究坝体一坝基渗透与变形的规律,阐明坝体坍塌的机理及其影响因素,并采用数值模拟技术予以验证。在此基础上,结合工程管理和施工,采用多方面计算分析方法提出预防和处理措施。

(1) 结合防渗加固工程之前坝体一坝基土层的地质条件、渗流状态与应力状态,分析总结了防渗墙施工期相继发生的塌坑形态与特点,定性分析了塌坑机理的主要环节。

(2) 采用力学解析方法,建立了砂层塌落力学模型。

(3) 采用了离散单元法的颗粒流 PFC 程序,对砂层塌落流失至地面塌陷的全过程进行了仿真模拟,演示了砂土层流失及坝体塌陷的机理。

(4) 采用连续介质数值方法,对泥浆—土体漏失形成塌落空洞之后的坝体塌陷形态进行了模拟分析。

(5) 根据防渗墙施工程序、理论分析计算以及类似工程的成功经验,分析论证了预防坝体塌陷的技术措施。

1.2.9 平原大型调蓄水库工程关键技术研究

为协调南水北调总干渠供水和需水在时程上的矛盾,尽量减小总干渠的规模,在总干渠沿线拟建平原调蓄池工程百余座,河北省南水北调总干渠配套工程共计安排调蓄工程 29 座。其中规模较大(5000 万 m^3 以上)的 3 座,较小的 26 座,调蓄工程规划总库容近期 3.8 亿 m^3 ,远期 7.1 亿 m^3 ,围堤总长度达 130 多 km。这些调蓄池大都是通过开挖及四周筑堤形成,与山区型水库工程相比具有显著的差异和自身特点。

针对平原调蓄池工程多坐落在城镇郊区的低洼沼泽地或滨海地区缺少砂石料等特点,提出:①如何就地取材,用滨海或低洼沼泽地区高含水量土料筑堤或用粉细砂质土料筑堤技术;②调蓄池围堤及堤基防渗技术;③调蓄池围堤护坡技术。

平原引调水调蓄工程新技术成果适合我国国情,符合实际,经济效益显著,研究成果可在平原水库工程、河道治理工程、海堤工程等领域应用,推广应用前景广阔。

1.3 水电站工程

在水电站工程建设过程中,同样出现了许多关键技术急需研究解决,本书选取了大坝泄洪时出现雾化对电器产生严重影响,水电站水利机械新技术,二拖一水轮发电机组控制操作系统开发及应用 3 个典型的课题进行阐述,并给出了研究成果和应用情况。

1.3.1 桃林口水电站采用 110kV GIS 全封闭组合电器防雾化研究

工程位于河北省青龙与卢龙两县交界处,地处深山峡谷,电站坐落于大坝右岸高边坡开挖的底

部, 110kV 变电站位于厂坝之间。在溢流坝段设 11 孔泄洪闸门。桃林口水库工程溢流坝泄洪方式最终选定采用表孔宽尾墩与消力池联合消能的消能形式。消能效果较好, 但加剧雾化程度。桃林口水库亦属高坝泄洪。从该工程的地形条件分析, 由于电站与泄洪闸门仅 30m 之隔, 正处于雾化形成的强风暴袭击范围内, 在电站和升压站上空形成强大降雨, 这将会直接给水电站厂房和 110kV 升压站室外配电装置的安全运行带来严重威胁。

桃林口水库工程雾化问题是随着优化设计, 消能型式的改变而提出的。当提出雾化问题时工程已进入施工阶段, 主体工程基础已开挖完毕, 电站进水钢管已安装完毕。在水工结构设计上解决雾化问题由于投资等诸多因素已不易实现, 故而从电气设计对 110kV 室外配电装置考虑防雾化方案势在必行, 同时也是该工程要解决的一项关键技术。根据桃林口水电站面临的雾化问题, 为确保大坝汛期泄洪供电电源可靠性要求, 原 110kV 常规高压设备室外中式布置方案已不能适应强雾化这种特殊环境, 结合该工程总体布置, 进行具体分析对桃林口水电站和 110kV 升压站防雾化设计开始研究探讨。经大量的工作, 在多方案比较的基础上确定了选用国产的 110kV GIS 全封闭组合电器作为防雾化设计方案。并采用变电站高程相对抬高和在变电站及厂区增设排水设施的综合防护措施。

在桃林口水电站采用 SF₆ 全封闭组合电器防雾化技术, 主要是由于 SF₆ 具有可靠的灭弧性能。它的灭弧能力约为空气的 100 倍, 特别适用于高压大电流的开断。因此它广泛应用于高压超高压电力系统中。GIS 集断路器, 隔离开关, 母线 PT, PC, 避雷器于一体, 接上主变压器就是一个完整的系统。具有可靠性高, 故障率低, 运行噪率小, 检修周期长, 对环境适应性强等独特的性能。

通过该项目应用研究逐一解决了制约工程进展的多项技术难题, 填补了以 110kV GIS 全封闭组合电器防雾化的空白。通过工程的实际运行证实, 设备运行安全可靠, 为今后在水电系统中采用该技术获得成功经验, 取得了显著地经济效益和社会效益。

1.3.2 水力机械新技术在桃林口水电站的应用

桃林口水电站是河北省境内的一座中小型水电站, 水电站一期工程装机容量为 $2 \times 10\text{MW}$, 多年平均发电量 6275 万 kW·h, 二期工程装机容量为 $3 \times 10\text{MW}$, 多年平均发电量 9330 万 kW·h。

针对桃林口水电站的具体情况和特点, 在以下 7 个方面进行了专题研究。

(1) 调速器的应用研究。研制了适合桃林口水电站特点的微机调速器。该调速器容量介于大中型之间, 装设有事故配压阀。

(2) 不等高桥式起重机的应用研究。在桃林口水电站起重设备中, 采用新型不等高桥式起重机。

(3) 4.0MPa 油压装置和 6.0MPa 高压供气系统的应用研究。在桃林口水电站高压供气系统设计中, 采用了 6.0MPa 压力减至 4.0MPa 压力的二级压力供气方式。油压装置的油压从 2.5MPa 提高到 4.0MPa, 从而使调速器体积减小, 造价降低, 并省掉了复杂的控制系统和附属设备 (漏油箱), 给主厂房布置带来了方便, 同时有效地减少了压缩空气中的水分, 提高了供气质量。油压装置补气采用自动补气装置。

(4) 水轮机流量监测计量装置的应用研究。水轮机流量监测计量装置, 选用了具有数字显示功能、通讯输出功能、自动控制功能、数据掉电保护功能、清零功能和装置精度为 $\pm 0.5\%$ 的 YLX-03 型微机监测计量仪。

(5) 供排水系统新技术、新设备的应用研究。在供水系统中, 采用了大口径电磁阀取代传统的 DP 型电磁配压阀和 YY 型液压操作系统, 相应取消了漏油装置及供、排油管路。

在排水系统中, 将厂房渗漏排水和机组检修排水分开设置。在尾水检修平台处, 对应每台机组, 分别设置检修集水井; 采用 QWDL 型机电一体式无堵塞、防缠绕排污泵。

(6) 油系统新设备的应用研究。在油系统设计中, 采用新型的无滤纸滤油机取代传统的带滤纸滤油机, 不仅取消了烘箱及附属房间, 而且从根本上根除了油处理室火灾的隐患。

(7) 新型自动化监测元件的应用研究。结合桃林口水电站的实际情况, 采用了新型自动化监测元

件。如采用了 HW-1000C 组合型超声波水位监测装置; LB100 型压力变送器; 1151DP 电容式差压变送器; ZJXY 型振动监视仪等。

1.3.3 二拖一水轮发电机组控制操作系统开发及应用研究

水电站双挑机组微机监控保护系统设计应用研究以大桑园水电站为背景, 其双挑机组为国内首台, 它突破了常规的一台水轮机带动一台发电机的形式, 而由两台水轮机拖动一台发电机, 以适应该电站水能条件多变而导致机组运行工况复杂的要求, 同时还节省了发电机及其相关设备(励磁装置、开关柜等)的投资, 但却增加了机组运行工况的多样性、协联关系的复杂性, 对水电站监控保护系统提出了更高的要求。针对大桑园水电站双挑机型的特殊性, 如两台水轮机间的控制协联关系、两台水轮机和一台发电机的协联关系、单机和双机运行工况下 35kV 线路保护运行方式自动切换等, 进行微机监控及综合保护系统的应用研究。

作为研究背景的大桑园水电站位于河北省宽城满族自治县境内潘家口水库瀑河入口处, 距宽城满族自治县县城 21km。该电站为无压引水式的非洪水期日调节水电站, 主要工程包括引水枢纽、隧洞和厂区枢纽三大部分。大桑园水电站的主要任务是引水发电, 电站装机容量 2200kW, 为双挑机型, 即两台水轮机拖动一台发电机。多年平均发电量 895~104kW·h。电站最大水头 39m, 设计水头 36.2m, 最小水头 32.6m; 设计引用流量 8.37m³/s, 水轮机额定流量 7.32m³/s, 最低水位 221.15m。电站以 35kV 输电线路并入宽城 110kV 变电站。

水电站双挑机组微机监控保护系统的应用研究为国际国内首例, 它的成功应用不仅解决了双挑机型微机监控及综合保护系统的总体设计、系统接线等一些具体问题, 还开创了中小型水电站微机监控及综合保护的新型式, 对微机监控保护系统的理论发展及工程应用具有重要意义, 对提高水电站经济效益, 降低建设投资, 具有显著作用, 对今后中小水电站建设开发提供了新的可借鉴模式。

水电站双挑机组微机监控保护系统的应用研究中小型水电站具有显著作用, 具体表现为: ①提高机电设备工作的可靠性; ②可以提高电能质量指标; ③加快开机并网过程; ④能更有效地利用水能, 提高水电站经济效益; ⑤提高劳动生产率, 改善运行人员的工作条件。

1.4 生态与环境

随着经济的发展和生态环境退化, 生态与环境问题已经到了不容忽视的程度。因为海河流域有其特殊的政治地位和地理位置, 所以海河流域的生态与环境更显示出其重要性。本书对海河流域河道险工加固治理技术应用和环京津生态屏障修复技术进行分析, 并提出了具有实用价值的工程措施。

1.4.1 海河流域河道险工加固治理技术应用

海河流域的特点是先旱后涝, 连年受灾。历次较大洪水受灾及淹没耕地均在万公顷以上, 京山、京广、京九、津浦铁路及天津市、石家庄市处于威胁之中。海河流域 5 大水系中, 仅子牙河、大清河主要河流就有险工、险段 1200 余处, 每遇较大洪水, 即威胁到区域人民生命财产安全, 河北省河道是防洪体系中最重要和最直接的措施, 亦是抵御洪水的最后屏障。1963 年大洪水后, 实施的根治海河工程, 大大减轻了洪水对京、津地区的洪水威胁。33 年后, 海河流域发生了“96.8”洪水(“96.8”洪水总量仅为“63.8”的 1/4, 径流系数是“63.8”的 1/2), 致使大清河、子牙河流域造成较大洪灾, 滹沱河、潞龙河、白沟河等主要河道出现多处险情, 经抢险才免遭决口, 直接经济损失 456.3 亿元。1998 年长江、嫩江大洪水, 更使人们认识到河道整治的重要性。河北省突出问题是: 防洪标准低, 河堤条件差, 堤身隐患多, 崩岸较严重, 穿堤建筑物多等。为此, 针对河北省河道险工治理现状, 需进一步研究险工成因、演变趋势、防护措施, 研究新技术、新工艺、新材料。在经济安全合理的原则下探讨河北省防洪工程出现的问题, 在传统治河基础上进行革新, 以适应当前工程科技和社会发展的需要。海河流域每年都要投入大量的人力、物力, 进行大规模抗洪抢险和汛后维修工作,

随着保护区社会、经济发展,河道进行有效的整治显得更为重要,一旦洪水成灾,将严重影响河北省经济发展。目前国内外在河道治理中,取得了一系列成果,尤其是新垂直防渗技术和土工合成材料技术等的大规模应用以及采用稳定河岸、河床;修建导流堤、护岸、护脚、丁坝、裹头等措施,大大提高了河堤工程施工水平和高科技含量,治理效果明显。

研究海河流域子牙河、大清河主要河道河势变迁、险工类型,通过古洪水考证,提出危害成因和治理措施及新材料、新工艺、新技术的应用。主要内容为:

(1) 充分调查研究本流域主要河道河势变迁情况,搜集包括顺直图在内的不同年代河道地形图,并以水利志等历史资料作参考,绘制不同年代河道变迁趋势图,分析河道冲淤及演变规律和特点,在资料翔实、准确可靠的基础上,为研究采用新材料、新技术、新成果,提供第一手资料和可靠依据。

(2) 在大量的调研工作基础上,并通过古洪水考证,分析本流域险工类型、成因、发展及危害;通过工程实践、工程原形观测,提出河道险工综合治理技术、险工护岸工程施工技术要求;在工程实践中推广新材料、新技术,提出土工合成材料护岸工程技术、河道砂堤砂基防渗技术。

(3) 通过研究,提出多种治理护岸结构形式的设计方法和技术参数以及施工工艺,并结合海河流域地处寒冷区的特点,提出土工织物软体排、土工模袋、垂直防渗、生物防护等方面的创新成果。

1.4.2 环京津生态屏障修复技术

京津两大城市由于其特殊的政治地位和地理位置,对营造友好型生态环境提出了更高要求。城市自身发展有水资源保护与环境协调的问题的要求,再由于环京津永定河、潮白河、滦河受上游环境水利演变的直接影响,水土流失严重。国家在20世纪后期和21世纪开端期,先后实施了京津风沙源治理工程和环京津上游地区54项生态保护区试点工作。这些具有针对性、综合性和可持续发展战略的科学措施,已经显现并正在取得明显效果。故研究环京津生态屏障修复战略,不仅为全面贯彻以人为本的科学发展观,统筹协调地解决流域上下游入水和谐,实现经济社会可持续发展的现代水利发展方向问题具有现实意义,并对干旱、半干旱地区的水利建设具有借鉴与指导意义。

(1) 环京津研究区在确保水资源可持续利用和环境逐年好转情况下,水资源的开发利用遵循全面建设节水型社会,以确保生活、兼顾生态,工业需水在全面提高水的重复利用率目标下优化配置,农业用水在确保粮食安全前提下实施中长期一人一亩高效节水农田(亩用水 220m^3)为低限,用5~10年时间从年用水 7.73亿 m^3 ,降至 4.4亿 m^3 ,用水比例从75%降至43%,最终实现生活、工业、农业和生态用水比例为23%、26%、43%和0.8%,使总用水控制在 10.3亿 m^3 ,占总资源量的46.7%,基本使水资源开发量不超总资源量阈值。

(2) 中长期水利发展方向,划分不同水资源功能区、保护区、涵养区和开发区,从单纯的农业供水向经济社会优化配置转变;从无序无节制开发向实现人水和谐依法自律转变;从单一取水工程向节水改造、中水利用、雨洪利用、水土保持和水环境恢复综合治理转变;从各自为政、盲目掠夺向流域上下游统一规划、统一调配水量、统一保护水体、统一批准新上需水项目,经过3~5年,从制度建设到取水行为真正实施水资源统一管理。

(3) 农业节水项目,按水量分配方案和供水计划调整种植结构,因地制宜、因水制宜推广不同形式农业节水技术;效益和学术价值。

工业节水,限期水的重复利用率达标,全面推广一级装表率100%,城区及水源区封闭工业自备水源井。

生活用水,新建楼房强制推行节水装置,逐步在旧城区推广节水马桶等节水装置。

生态需水,结合水土保持和京津风沙源治理工程、退耕还林还草工程和经济林、景观林、通道绿化建设等工程建设林草配水工程。

治源与治流相结合、推广水源地保护及涵养工程、加大河道治理与防洪、泥石流、治理有机结合,持续开展生态环境工程。

(4) 建立一个机制，完善五个体系，即建立实施总量控制下的由水权市场调节的水资源优化配置机制和民主科学的水利决策体系、节约可靠的水资源高效利用体系、法制科学的水资源保护体系、稳定多渠道水利投资体系、应急完善的防灾减灾体系和统一高效的水资源管理体系。

第2章 大孔口倒虹吸薄壁结构 混凝土防裂缝综合技术

2.1 概 述

倒虹吸工程是输送水通过山谷、河流、洼地、道路或其他渠道的压力管道，是一种渠道交叉建筑物，是引水、排水和灌区配套工程中重要的建筑物型式之一。倒虹吸管具有施工方便、造价低、不影响河道泄洪等优点，我国在农田水利建设和引调水工程中修建了大量的倒虹吸管，积累了丰富的经验，在结构型式、用材、施工方法和工艺上均有所发展和创新。目前，预应力钢筋混凝土管在迅速发展，因钢筋混凝土倒虹吸管具有耐久性强、施工方便、变形小、糙率变化小等特点，国内外仍在大量采用。

倒虹吸混凝土管上出现的任何裂缝，不论是纵向的还是横向的、表层的还是贯通的、宽裂缝还是微裂缝，都是影响质量的关键，同时工程上也是不允许的。特别是纵向裂缝的产生，将使管身的受力条件发生明显的变化，裂缝截面内受到渗透压力的作用，会显著增加管身的荷载。裂缝的出现将大大降低混凝土的抗渗性和耐久性，缩短管道的使用寿命。钢筋混凝土倒虹吸管存在抗裂性能差，出现裂缝后不易修补等缺点，目前国内外大量的钢筋混凝土管处在长期带裂缝工作状态。

南水北调中线工程中布置了大量的钢筋混凝土箱涵倒虹吸，由于引水流量大，并且分配的水头损失小，因此箱涵的断面比较大。首批开工的滹沱河倒虹吸工程采取大孔口钢筋混凝土箱涵，管身作为承受内水压力的偏心受压、受剪、偏心受拉等复杂受力的构件，必须严格控制其裂缝的开展。因此，开展滹沱河大孔口薄壁混凝土结构防裂缝新技术研究，对确保南水北调中线这一特大型水利工程的安全、有效保证工程的耐久性、改善结构性能具有重大意义。

滹沱河倒虹吸设计流量为 $200\text{m}^3/\text{s}$ ，分配水头为 0.884m ，管身为3孔一联的钢筋混凝土矩形箱涵结构，单孔过水断面尺寸为 $6\text{m} \times 6.2\text{m}$ （宽 $\times$ 高）；滹沱河河道在工程处的宽度为 7km ，300年一遇洪峰流量为 $19200\text{m}^3/\text{s}$ ，河床极不稳定且易决善迁，因此倒虹吸需要预留较大的口门，即要求设计较长的管身段和较大的埋深。经分析论证，确定滹沱河倒虹吸管身段总长为 2043m ，最大埋深为 11m 。对于低水头、大流量、高埋深、多孔口、大孔径、薄壁型的滹沱河倒虹吸工程来说，预防混凝土裂缝是十分重要的。

钢筋混凝土倒虹吸管产生裂缝的原因主要有如下几个方面：

- (1) 外荷载作用及管道的受力条件。
- (2) 混凝土本身的质量及体积变化。
- (3) 基础不均匀变形等。

混凝土体积变化主要是由收缩、温度变化及内部化学作用产生的。混凝土产生裂缝存在如下危害：①破坏管身结构的整体性，使承载能力降低；②降低工程的耐久性，减少使用寿命；③造成渗漏。

设计方面：通过对大孔口薄壁结构钢筋混凝土倒虹吸管的内外荷载计算、应力计算、配筋计算、抗裂验算以及分缝分块等的分析研究，提出和推荐合理的设计计算方法，并利用计算机对管身进行有限元计算分析，复核管身的内力及应力状态。

施工方面：通过对混凝土配合比的优选、混凝土温度控制、混凝土模板的架立、混凝土入仓和浇筑工艺、混凝土的养护和保温措施等的试验研究，提出管身混凝土预防裂缝的、经济合理的施工技术