

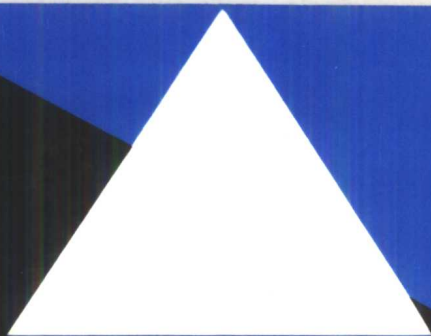
95 卷

大连理工大学教授学术丛书

水电站建筑物 结 构 分 析

STRUCTURE
ANALYSIS OF
HYDROELECTRIC
POWER
ENGINEERING

董毓新 李彦硕 著



大连理工大学出版社

大连理工大学教授学术丛书 95 卷

水电站建筑物结构分析

董毓新 李彦硕 著

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

图书在版编目(CIP)数据

水电站建筑物结构分析/董毓新,李彦硕著. —大连:大连理工大学出版社,1995.12

ISBN 7-5611-1146-0

I. 水… II. ①董…②李… III. 水电站-结构-分析 IV. TV731

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10421 号

水电站建筑物结构分析

董毓新 李彦硕 著

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连海事大学印刷厂印刷

* * *

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.375 字数: 301 千字

插页: 4

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

* * *

责任编辑: 刘 杰 责任校对: 春 杨

封面设计: 孙宝福

* * *

ISBN 7-5611-1146-0

TV • 20

定价: 20.00 元

本书由

**大连市学术专著资助出版评审委员会
大连理工大学学术著作出版基金**

资助

The book is financed by

**the Dalian Evaluation Committee
for Publishing Academic Works Financed
and
the Publishing Academic Works Foundation
of the Dalian University of Technology**

前 言

水电站建筑物结构分析的主要内容为:拱坝及混凝土重力坝下游坝面管结构、不均匀内水压力对管道结构强度的影响、取消厂坝间管道伸缩节的可行性及结构优化论证;地面压力管道动力分析、管道自激振动水击机理及密加劲环压力管道结构;单列式和双列式机组钢筋混凝土支承结构;钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳结构;坝上进水口拦污栅框架结构;进水塔结构等。这些内容是水电建设者们所关注的问题,近些年来国内外科技工作者结合工程实际做了许多工作,取得了一系列的科技成果。本书反映了我们十余年来结合工程所取得的科研成果,并在吸取国内外科研、设计和运行的最新成果的基础上编写而成。

本书以理论与实际相结合为前提,注意加强基本理论和基本概念,总结工程实践经验,并适当引入现代计算技术和模型试验成果。

本书由大连理工大学董毓新和李彦硕合著。前言、总论、第一章、第二章、第三章和第四章由董毓新执笔。第五章和第六章(包括附录)由李彦硕执笔。

本书由武汉水利电力大学韩伯鲤教授主审。在编写过程中曾蒙中国水利水电科学研究院董哲仁副院长等提供了一些宝贵科技资料,在此表示感谢。

对本书中的缺点和意见,谨请读者批评指正。

著 者

1995年6月

目 录

前言

总论	1
----	---

第一章 大坝下游坝面管结构分析	5
-----------------	---

1.1 大坝下游坝面管结构设计的发展	5
--------------------	---

1.2 大坝下游坝面管的布置	6
----------------	---

1.3 大坝下游坝面管对内水压力的承载能力	10
-----------------------	----

1.4 非均匀内水压力作用下钢衬钢筋混凝土管道 非线性有限元分析	21
-------------------------------------	----

1.5 大坝下游坝面管的结构优化设计	31
--------------------	----

1.6 混凝土重力坝下游坝面管的动力分析	36
----------------------	----

1.7 拱坝及下游坝面管组合结构动力计算	47
----------------------	----

1.8 拱坝及下游坝面管组合结构的动力模型试验	59
-------------------------	----

1.9 大坝下游坝面管施工期的温度应力分析	69
-----------------------	----

1.10 大型压力管道取消厂坝间伸缩节的可行性分析	74
---------------------------	----

1.11 取消厂坝间钢管伸缩节后厂坝连接结构 优化研究	93
--------------------------------	----

参考文献	104
------	-----

第二章 压力管道的动静力分析	109
----------------	-----

2.1 地面压力管道的动力分析	109
-----------------	-----

2.2 压力管道的自激振动	123
---------------	-----

2.3 水电站加劲环压力钢管整体结构分析	129
----------------------	-----

2.4 水电站密间距加劲环压力钢管整体结构分析	142
-------------------------	-----

参考文献	153
------	-----

第三章 机组钢筋混凝土支承结构的动静力计算	
和试验分析·····	155
3.1 机组钢筋混凝土支承结构型式·····	155
3.2 钢筋混凝土支承结构动静力分析的发展·····	157
3.3 大型水电机组钢筋混凝土支承结构的 动力特性分析·····	158
3.4 机组支承结构动力分析的动态子结构法·····	164
3.5 大型水电机组支承结构的动力响应·····	169
3.6 双列式机组支承结构的动力分析·····	176
3.7 机组支承结构的静力分析·····	185
参考文献·····	186
第四章 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳的应力分析·····	188
4.1 蜗壳结构设计的发展·····	188
4.2 钢衬钢筋混凝土蜗壳联合承载方式·····	191
4.3 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳的模型试验 和应力分析·····	193
4.4 无垫层钢衬钢筋混凝土蜗壳联合承载模型 试验和应力分析·····	203
4.5 蜗壳钢衬及座环的现场应力测试和计算分析·····	207
4.6 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳的垫层材料特性·····	212
4.7 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳的温度应力·····	218
4.8 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳三维非线性 有限元计算分析·····	224
4.9 蜗壳加内水压力埋入法(打压法)·····	250
参考文献·····	259
第五章 水电站坝式进水口结构应力分析·····	262
5.1 水电站进水口类型概述·····	262
5.2 坝式进水口拦污栅框架静荷载内力分析·····	270

5.3 坝式进水口拦污栅框架间隔墙(或侧墙)结构三维 有限元分析	278
5.4 坝式进水口拦污栅框架牛腿支承结构应力分析	288
参考文献	300
第六章 水电站进水塔结构的应力分析	301
6.1 水电站进水塔典型结构的构造特性	301
6.2 水电站进水塔在静荷载作用下的应力分析	303
6.3 水电站进水塔温度应力分析	311
6.4 水电站进水塔结构静力与温度应力四结点矩形 板壳有限元分析通用源程序说明	335
6.5 水电站进水塔结构静力与温度应力四结点板壳 有限元分析通用源程序	354
参考文献	379

Contents

Preface

Introduction	1
Chapter 1 Structural Analysis of downstream Penstock	5
1.1 The development of downstream penstock structure	5
1.2 Arrangement of downstream penstock design	6
1.3 The bearing capacity of downstream penstock under the inner water pressure	10
1.4 Nonlinear element unit analysis of steel liner reinforced concrete penstock under nonuniform inner water pressure	21
1.5 Optimizing design of downstream penstock	31
1.6 Dynamic analysis of downstream penstock of concrete gravity dam	36
1.7 Dynamic calculation of composite structure of arch dam and downstream penstock	47
1.8 Dynamic model test of composite structure of arch dam and downstream penstock	59
1.9 Thermal stress of downstream penstock in the engineering construction period	69
1.10 Analysis abolition expansion joint of large penstock between dam and power house	74
1.11 Study optimizing connected structure without	

expansion joint of penstock between dam and power house	93
Chapter 2 Dynamic and static load analysis of pressure penstock	109
2.1 Dynamic load analysis of earth's surface pressure penstock	109
2.2 Self-excited vibration of pressure penstock	123
2.3 Analysis complete structure of stiffening rings penstock	129
2.4 Analysis complete structure of dense stiffening ring's penstock	142
Chapter 3 Analysis dynamic—static calculation and test of hydro-generating unit R. concrete supporting structure	155
3.1 Arrangement of R. concrete supporting structure ...	155
3.2 Development of dynamic and static calculation for hydro-generating unit R. concrete supporting structure	157
3.3 Analysis dynamic character of large hydro-generating unit R. concrete supporting structure	158
3.4 Dynamic analysis of hydro-generating unit R. concrete supporting structure by dynamic substructure method	164
3.5 Dynamic response of large hydro-generating unit R. concrete supporting structure	169
3.6 Dynamic analysis of supporting structure for arrangement in parallel units	176
3.7 Static analysis of unit supporting structure	185

Chapter 4	Analysis of combined undertaking scroll case of steel liner and R. concrete	188
4.1	The development of scroll case structure design	188
4.2	Combined undertaking fashion of steel liner and R. concrete scroll case	191
4.3	Model test and stress of steel liner and R. concrete scroll case	193
4.4	Large scale model test and stress analysis of steel liner and R. concrete scroll case without spring pad	203
4.5	Site test and calculating analysis of stay vane and steel liner of scroll case	207
4.6	Characteristic of pad material of combined undertaking scroll case	212
4.7	Temperature stress of combined undertaking scroll case	218
4.8	Three-dimensional nonlinear element calculation of combined undertaking scroll case	224
4.9	Pouring of concrete scroll case under a certain inner water pressure in the steel liner	250
Chapter 5	Structure stress analysis of the dam intake of hydropower station	262
5.1	General review of the intake type of hydropower station	262
5.2	Static load internal force analysis of the trash rack frame of dam intake	270
5.3	Three-dimensional finite element analysis of the	

wall on trash rack frame of dam intake	278
5. 4 Corbel structure stress analysis of the trash rack frame of dam intake	288
Chapter 6 Structure stress analysis of the intake tower of hydropower station	301
6. 1 Typical structure characteristic of intake tower of hydropower station	301
6. 2 Static load stress analysis of intake tower of hydropower station	303
6. 3 Temperature stress analysis of intake tower of hydropower station	311
6. 4 Illustrate of finite element computing program for static and temperature stress analysis of intake tower of hydropower station	335
6. 5 Finite element computing program for static and temperature stress analysis of intake tower of hydropower station	354

总 论

本书着重介绍大坝下游坝面管、地面压力管道、机组钢筋混凝土支承结构、钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳、坝上进水口拦污栅框架和进水塔建筑物的静、动和温度应力分析。由于这些建筑物的结构型式比较复杂,多属于空间结构。过去对这些建筑物多按平面问题方法简化设计,难于反映某些建筑物整体结构的实际应力应变状态。随着较大比尺的结构模型试验、有限元计算方法和结构优化理论的发展,有条件对这些水电站建筑物进行优化设计、三维空间有限元计算和整体结构模型试验。使计算与模型试验适当配合,吸取已建工程的经验,优选结构型式,并抓住结构承载能力的薄弱部位,使结构既安全,又能节省一定的建筑材料。

第一章 大坝下游坝面管结构分析

首先扼要介绍了国内外下游坝面管结构设计的发展和布置型式。除 1.10 节为浅埋式压力管道外,1.3~1.9 节均为外悬式钢衬钢筋混凝土联合承载的下游坝面管。

本章主要分为以下几部分内容:①管道在均匀内水压力作用下,拱坝和重力坝下游坝面管的模型试验和有限元计算。随内水压力增加,外包混凝土结构经过弹性、塑性、开裂、裂后等各种应力状态,钢衬和钢筋则经过弹性、塑性和屈服极限过程。在允许外包混凝土开裂,但限制裂缝宽度,经优化设计,使外包混凝土减薄,钢衬和钢筋均接近满应力;②当 D/P 愈大和管线与地平线夹角愈小,则管内不均匀水压力的影响愈大。对于平面有限元,钢衬不仅承受轴向力,而且要考虑抗弯和抗剪效应;③下游坝面管的动力模型试验和计算分析。当管道外包混凝土开裂后,为计算管坝相互作用三

维动力计算,提出了空间分布裂缝面模型的动弹模理论及空间正交各向异性块体夹膜单元,并结合工程进行了实例计算。对拱坝及下游坝面管组合结构进行了空、满库模型试验,分析了管坝的相互作用及下游坝面管对岩基动应力影响;④介绍了下游坝面管施工期的温度应力计算分析,说明施工期大坝对管道温度应力的影响不容忽视;⑤在静力和温度荷载作用下,计算模型包括厂房、大坝、管道和岩基,对取消厂坝间伸缩节的可行性进行了计算分析,完全是可行的。为解决厂坝间混凝土分缝使钢衬受 X, Y, Z 三个方向的应变集中,经优化可在厂坝间取一段明管段模拟伸缩节,以改变厂坝间钢衬的应力应变集中问题。

第二章 压力管道的动静力分析

首先提出了地面压力管道的径向自振特性计算公式,与已有计算公式相比,提高了计算精度,与原型观测结果符合很好,并能适应各种边界支承条件。其次是介绍管道横截回转半径与管段长(如加劲环间)之比较大的梁结构,要考虑剪切效应对横向自振特性的影响。第三介绍了自激振动机理和压力管道中的自激振动水击。最后给出了加劲环及密加劲环压力钢管结构分析的理论公式,是对现行压力钢管规范的补充。

第三章 机组钢筋混凝土支承结构的动静力计算和试验分析

结合几个实际工程,经几种动力模型试验和有限元计算结果表明,对大型机组支承结构的模型试验和计算模型的选取,应考虑机墩、风罩、蜗壳和发电机层以下楼板梁整体结构,并合理考虑边界条件。为减少有限元计算工作量,建议一种精度较高的动态子结构法。支承结构振动是由于机组的水力、机械和电气振源,以及强震区的地震引起的。对双列式机组支承结构的计算和试验模型应取发电机层以下整个机组段,在强地震作用下,地震应力显得特别突出。在各种静动荷载作用下,受载机架地脚螺丝附近及其它孔洞应加强配筋。

第四章 钢衬钢筋混凝土联合承载蜗壳的应力分析

扼要介绍蜗壳设计的发展概况,大型蜗壳的发展趋势是钢衬与外包钢筋混凝土间加垫层联合承载内水压力。当 PD 值很大时,趋向于不再加弹性垫层,以限制钢衬厚度,有利于保证钢衬的焊接质量,尤其对钢衬与座环碟边的应力集中部位,如前苏联的努列克等几座电站蜗壳均取消弹性垫层。大量的大比尺模型试验、三维有限元计算和一些现场测试资料表明,联合承载蜗壳在断面上半圆范围内加弹性垫层。根据 PD 值的大小选用合适的垫层材料弹模和厚度,以确定钢衬和外包钢筋混凝土的承载比,从而确定钢衬厚度和配筋量。大 PD 蜗壳的薄弱环节是:钢衬与座环碟边的连接部位;固定导叶与座环焊接部位;垫层末端钢衬及钢筋混凝土应力集中等。为解决前两个问题,一是在钢衬与座环碟边连接部位的一定范围内不设弹性垫层,并适当加固;二是加厚机墩和蜗壳外包混凝土厚度,以增强蜗壳的整体刚度,从而减小变形;三是加大固定导叶断面和加强固定导叶端部的焊接质量,以避免固定导叶端部开裂。为解决弹性垫层末端结构应力集中,可将垫层延伸到蜗壳断面水平轴线以下,并采用使垫层一段逐渐减薄的措施。介绍几种经模型试验优选的垫层材料,以及蜗壳运行初期的温度荷载及温度应力计算分析。

第五章 水电站坝式进水口结构应力分析

重点介绍了坝上进水口拦污栅框架、牛腿和隔墩的三维静力有限元分析结果,以某大型水电站坝式进水口结构为实例,对三维有限元和平面简化方法的计算结果进行了对比。

第六章 水电站进水塔结构的应力分析

以水电站进水塔空间薄壁结构为例,采用结构力学方法、平面有限元方法、空间板壳有限元方法和空间块体有限元方法等四种方法,进行了计算,并对计算结果进行了比较。可以对结构力学方法的误差和各类单元剖分适用条件加深理解。在本章的附录中,给

出了一个简单的水电站进水塔空间四节点板壳元的静力和温度应力计算通用 FORTRAN-77 源程序,对其各子程序模块介绍了编制原理,并举例做了输入数据的使用说明。通过对程序的阅读和使用,可以掌握编制有限元计算程序的方法和技巧。