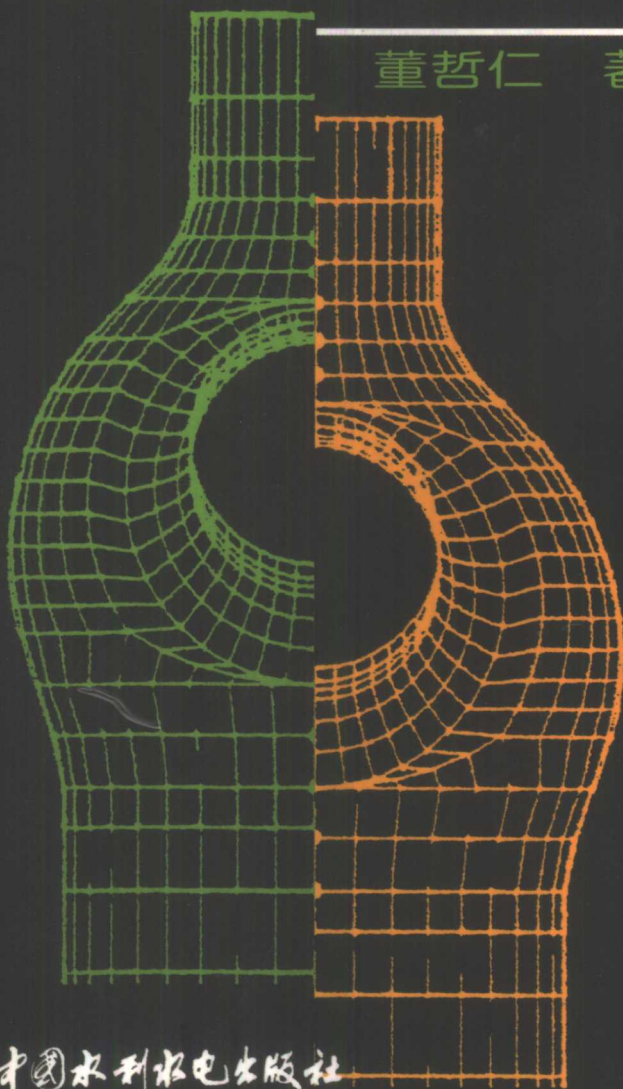


钢衬钢筋混凝土压力管道 设计与非线性分析

董哲仁 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

钢衬钢筋混凝土压力管道 设计与非线性分析

董哲仁 著

中国水利水电出版社

**DESIGN AND NONLINEAR ANALYSIS
OF STEEL LINED REINFORCED
CONCRETE PENSTOCKS**

Dong Zheren

China WaterPower Press

图书在版编目 (CIP) 数据

钢衬钢筋混凝土压力管道设计与非线性分析/董哲仁著. —北京: 中国水利水电出版社, 1998

ISBN 7-80124-808-2

I. 钢… I. 董… III. ①钢筋混凝土压力管, 钢衬-设计
②钢筋混凝土压力管, 钢衬-结构分析 N. U173.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 20861 号

书 名	钢衬钢筋混凝土压力管道设计与非线性分析
作 者	董哲仁 著
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	北京密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	850×1168 毫米 32 开本 10 印张 276 千字
版 次	1998 年 4 月第一版 1998 年 4 月北京第一次印刷
印 数	0001—2200 册
定 价	29.60 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

内 容 提 要

水电站钢衬钢筋混凝土压力管道是一种新型结构。该书为这种结构提供了一套完整实用的结构计算方法。首先,阐述了结构布置和设计原则,扼要介绍了结构模型试验概况。在此基础上,该书提出了适用于混凝土开裂前后钢衬与钢筋混凝土联合承载的结构计算公式,给出了适用于混凝土开裂后的以正交各向异性材料模型为基础的准解析递推公式。该书还提出了管道结构优化设计方法及求解经济管径的计算机方法。对这种管道温度应力分析方法,该书进行了详细阐述。为计算混凝土径向裂缝宽度,该书建议了一套内压荷载作用下的裂缝宽度计算公式及因温度变化引起的裂缝张合度计算公式。为对大型结构进行更细致的分析,该书还阐述了钢筋混凝土非线性有限元的若干最新模型。最后,给出了包括三峡工程在内的工程计算实例。书后附录提供了结构分析及优化设计的计算机源程序。

该书可供工程设计人员和科学研究人员使用,也可供有关高等院校师生参考。

About the Book

This book presents readers with practical approach of structural analysis for use in the design of steel lined reinforced concrete penstock, which is a new type of hydro-structures. Firstly, the author offers a comprehensive review of design consideration and layout. The experimental results of structural models' tests in the large scale are summarized, on the basis of which the mathematical models is developed. In the following parts the presentation provides a quasi-analytical solution that can give reasonable predictions on the overall deformation behavior and the ultimate failure strengths of penstocks in question. The optimum design of steel lined reinforced concrete penstocks is suggested for determining both economic diameters and reinforcement. The approaches of thermal stress analysis for the penstocks are explained thoroughly. The mathematical model for calculating the width of concrete radial cracks caused by both water pressure and thermal loads are formulated in greater details. The fundamentals and latest models of nonlinear finite element analysis for reinforced concrete are addressed which provides refined calculation for the design of large penstocks. Finally, the numerical examples of structural analysis including Three Gorges hydropower project are illustrated with particular emphasis on application in engineering.

The book is aimed at engineers, researchers and professionals in hydropower engineering.

序

我国蕴藏着得天独厚的水力资源。经过近 50 年的努力，到 1997 年底全国水电装机总容量达 6000 万 kW，取得了举世公认的成就。但已开发的水能按电量计仍只占技术可开发量的 10%。可见水电开发在我国还是朝阳工业，前景无量。

1997 年是中国水利史上值得纪念的一年。在这一年中，胜利实现了长江三峡和黄河小浪底两大枢纽工程的截流。整治长江和黄河的骨干工程的胜利推进，标志着我国水利水电建设又登上新的台阶。这些挑战性工程的实践需要，促进了水利科研的大发展，而高层次科技成果的出现，又推动了更多工程的建设，一个良性循环正在形成之中。

水电站的压力管道是其关键性结构物之一。随着水电工程规模的日趋巨大，压力管道也日趋巨型乃至超巨型化。常规的形式和设计方法已难以满足需要，人们不断探索新结构、新材料和新的设计理论与方法。钢衬钢筋混凝土压力管道结构就是近年发展起来的新结构型式。我国在 80 年代中期首先应用于东江和紧水滩电站，取得明显的技术经济效益。现在，经过进一步的研究探索和专家组论证，在世界最大的三峡水电站的设计中，26 根直径达 12.4m 的压力管道采用了浅槽式钢衬钢筋混凝土压力管道结构，这是一个很大的跃进。

为什么要采用这种联合受力型式？除了可以减薄钢衬，降低对板材的要求和减轻加工、安装的难度并比较经济外，主要着眼于降低发生事故的风险度。任何材料不可能完全均匀，加工、焊接和安装中也难免存在缺陷。所以压力管道的失事风险，特别经长期运行后总是存在的。巨型压力钢管一旦爆裂，后果不堪设想。将钢衬和钢筋混凝土两种性能迥异的材料组合在一起受力，而且各取适当的安全度后，要使两者刚巧同时达到破坏而造成毁灭性事故的风险就大幅度降低了。这是在三峡这样的工程中毅然决策

采用联合受力方案的主要因素。

但是要对这种巨型联合体系作精确分析却有相当难度，而常规的简单计算或线性分析又显然不能满足工程需要。因为，在分析中，不仅要考虑两种体系联合受载，而且必须考虑钢筋混凝土的开裂、开裂后的非线性性质并控制裂缝宽度；在荷载方面，除内水压力外必须考虑变温荷载以及坝体影响。要进行这样的精密分析，国内外的经验均感不足。

该书作者董哲仁教授长期研究这一课题。他自1966年清华大学毕业后，先经历了12年的设计和施工的实践锻炼，然后进入国内外著名研究院所深造和从事科研工作几近20年，最近才转到科技管理岗位上。长期以来，他结合我国各大型水电站的建设，锲而不舍地研究联合受力管道的力学特性和破坏机理，探索结构分析的新模型、新方法，提出了一套较完整的计算分析方法。包括：混凝土开裂前后的结构计算公式、经济管径和配筋的优化设计、温度应力分析、混凝土裂缝计算模型等。值得一提的是他在80年代中期就开始把非线性有限元方法引入水工钢筋混凝土结构分析领域，为结构的全过程仿真分析提供了有效的现代工具。作者前后提出和发展的这些计算模型，在不少工程设计或研究中已得到采用，在三峡水电站压力管道的最终技术设计报告中，就引用了他提出的正交各向异性模型的计算公式。放在读者面前的这本书，就是作者在多年研究工作基础上，系统地阐述这种新型结构设计方法和非线性分析的一本专著。

我有幸先读到本书大部分的原稿，深感其理论严谨、内容丰富，既有创新性，又具实用性。当然，科学技术的发展是无止境的，我未敢说本书已达完善境界，但深信可对水电设计工程师以有益的帮助。我祝贺这部专著的出版，因为它为我国的水电技术宝库增加了新的内容，故乐为之作序。

潘家铮

1998年4月

前 言

水电站钢衬钢筋混凝土压力管道是一种新型结构，具有经济安全和施工简便等优点。这种管道布置在混凝土坝的下游坝面，对大坝整体结构削弱较少，又能避免坝体混凝土浇筑与钢管安装之间的施工干扰。由于具有这些优点，近年来，这种新结构被国内外一批水电站工程设计所采用。我国自80年代中建成的东江和紧水滩水电站率先采用了钢衬钢筋混凝土下游坝面压力管道设计方案，至90年代后期，在世界最大的水电站——三峡水电站的设计中，其26根直径为12.4m巨大的压力管道敷设在混凝土重力坝下游坝面的浅槽中，采用了钢衬钢筋混凝土联合受力的新结构，实现了技术创新和突破。

钢衬钢筋混凝土压力管道的设计原则是钢衬与外围钢筋混凝土联合受力，同时允许在工作内水压作用下混凝土出现若干径向裂缝以发挥钢材强度，但需控制裂缝宽度。工程技术人员关心的是：这种复合式结构的力学特征和破坏机理是怎样的，联合承载是否安全可靠；特别是对这样一种三维复杂结构，在材料处于非线性弹性状态下，如何进行结构分析等。在这些方面，国内外尚无成熟完整的经验可供借鉴。为解决这些工程关键技术问题，近年来，一些水利水电科研、设计、施工部门和高等院校，团结协作，开展了大规模的模型试验和理论研究。笔者自80年代初便开始了对这种新型结构分析计算理论的研究探索，相继参加并负责了国家“七五”“八五”科技攻关和国家自然科学基金相关项目的研究工作，又密切结合李家峡、五强溪、龙滩（方案）、伊萨河二级等水电站，特别是三峡水电站的工程实践，力图建立起这种新型结构的计算分析方法体系。可以说，本书是笔者历时十余年在这个课题上研究成果的总结。

本书全面阐述了结构布置和设计原则，扼要介绍了结构模型试验概况，借以说明建立数学模型的基础。本书提出了混凝土开裂前后联合受力的结构计算公式，给出了以正交异性材料为基础的准解析递推公式，提出了确定经济直径的计算机方法和解决优化配筋和钢板选择的结构优化设计方法，阐述了温度场和温度应力分析方法，提出了混凝土径向裂缝宽度计算公式和温度引起张合量计算公式。为了对大型结构进行更细致的分析，本书引进了钢筋混凝土非线性有限元方法，介绍了若干最新数学模型，论述了进行管道结构全过程分析的方法。本书在最后，举出了包括三峡工程在内的工程设计计算实例。

阅读这本书时，如果读者是设计工程师，建议先读第一章，以便掌握这种结构的力学特征和破坏机理，从而正确理解设计要点。随后的第二、三、四章提供了设计工作中需要解决的有关结构计算、优化设计、温度应力及限裂计算等方面的方法和技巧。每一部分都附有算例，便于实际应用。第六章提供的工程实例，对设计工作无疑是有益的参考资料。本书附录提供的计算机程序，更为设计工作提供了高效的现代工具。如果读者是研究人员，除了上述章节以外，第五章有关非线性有限元原理和模型的阐述，为进一步理解和研究其理论提供了必要的基础知识。

在笔者的研究过程中，一直得到了同行专家学者的许多宝贵支持和启迪。在课题合作研究中得到了中国水利水电科学研究院董福品、沈星源、张武、夏朴淳、鲁一晖、王我宁、姚向红诸位同仁的大力帮助。

承中国工程院副院长潘家铮院士慨允撰写序言，对此一并诚挚谢忱。

书中尚有错误不当之处，敬请读者指正。

作 者

1998年2月于北京木樨地

符 号

1. 应力和应变

e_{ij} ——偏应变张量

S_{ij} ——偏应力张量

S_1, S_2, S_3 ——主应力偏量

γ ——工程剪应变

$$\gamma_{oct} = 2\sqrt{\frac{2}{3}J'_2} \text{——八面体工程剪应变}$$

ϵ_{ij} ——应变张量

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{3}I'_1 \text{——八面体正应变}$$

$\epsilon_v = I'_1$ ——体积应变

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ——主应变

σ ——正应力

σ_θ ——环向应力

σ_r ——径向应力

σ_a ——管轴向应力

σ_{ij} ——应力张量

$\sigma_m = \sigma_{oct}$ ——平均正应力

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}I'_1 \text{——八面体正应力}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力

τ ——剪应力

$$\tau_m = \sqrt{\frac{2}{5}J_2} \text{——平均剪应力}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2} \text{——八面体剪应力}$$

2. 不变量

$I_1 = \bar{I}_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_{ii}$ ——第一应力张量不变量

$I'_1 = \bar{I}'_1 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_{\nu}$ ——第一应变张量不变量

$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$ ——第二应力张量不变量

$I_3 = |\sigma_{ij}| = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$ ——第三应力张量不变量

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ji} = \frac{1}{2}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$$

$$\bar{I}_3 = \frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{jk}\sigma_{ki} = \frac{1}{3}(\sigma_1^3 + \sigma_2^3 + \sigma_3^3) = \frac{1}{3}I_1^3 - I_1I_2 + I_3$$

$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}$ ——第二应力偏量不变量

$$= \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] \\ + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

$J'_2 = \frac{1}{2}e_{ij}e_{ij}$ ——第二应变偏量不变量

$$= \frac{1}{6}[(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2] \\ + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2$$

$J_3 = \frac{1}{3}S_{ij}S_{jk}S_{ki}$ ——第三应力偏量不变量

$$= |S_{ij}| = \frac{1}{3}(S_1^3 + S_2^3 + S_3^3) = S_1S_2S_3$$

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{\frac{3}{2}}} \quad \text{角度}$$

$$r = \sqrt{2J_2} \quad \text{长度}$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}}I_1 \quad \text{静水压轴长度}$$

3. 材料参数

E ——弹性模量

f'_{bc} ——等双轴抗压强度 ($f'_{bc} > 0$)

f'_c ——圆柱体单轴抗压强度 ($f'_c > 0$)

f'_t ——单轴抗拉强度

$G = E/2(1 + \nu)$ —— 剪切模量

$K = E/3(1 - 2\nu)$ —— 体积模量

k ——Drucker-Prager 强度准则常数

a ——Drucker-Prager 强度准则常数

ν ——泊松比

c ——摩尔-库仑准则中粘着力

φ ——摩尔-库仑准则中摩擦角

4. 其他

C_{ijkl} ——材料刚度张量

$f(\cdot)$ ——屈服函数

$W(\epsilon_{ij})$ ——应变能张量

$x, y, z; x_1, x_2, x_3$ ——笛卡尔坐标轴

δ_{ij} ——Kronecker delta, 记号

$\{ \}$ ——列矢量

$\{ \}^T$ ——行矢量

$[]$ ——矩阵

$| |$ ——行列式

注：有关矢量、张量概念和算法详见本书附录 I，附录 I。

目 录

序

前 言

符 号

第一章 水电站钢衬钢筋混凝土压力管道的布置与

设计原则..... 1

1.1 混凝土坝下游坝面压力管道的布置 3

1.1.1 布置原则 3

1.1.2 工程实例 5

1.2 钢衬钢筋混凝土地面压力管道的布置..... 14

1.3 结构模型试验..... 17

1.3.1 概述 17

1.3.2 下游坝面管斜直段模型试验 22

1.3.3 下游坝面管上弯段模型试验 26

1.3.4 钢衬钢筋混凝土地面管模型试验 28

1.3.5 小结 36

1.4 钢衬钢筋混凝土压力管道的设计原则..... 37

1.4.1 设计特点及荷载组合 37

1.4.2 下游坝面压力管道的受力状态 39

1.4.3 下游坝面压力管道的合理外形 43

1.4.4 下游坝面压力管道与坝体的连接 46

1.4.5 伸缩节问题 48

1.4.6 钢衬与混凝土之间的间隙 50

1.4.7 强度安全系数 54

1.4.8 钢衬钢筋混凝土下游坝面压力管道的设计原则 60

第二章 结构计算方法 62

2.1	概述	62
2.2	混凝土开裂前联合受力计算公式——弹性模型	63
2.3	混凝土强度 Kupfer 判据	67
2.4	混凝土开裂后联合受力计算公式——正交异性模型	70
2.5	程序实现和算例	79
2.5.1	程序实现	79
2.5.2	算例	80
第三章	结构优化设计	85
3.1	概述	85
3.1.1	结构优化的基础知识	86
3.1.2	钢衬钢筋混凝土压力管道优化的任务	90
3.2	经济直径的优化模型	92
3.3	管道的结构优化设计	103
3.3.1	优化数学模型	103
3.3.2	齿行法	104
3.3.3	程序实现及算例	107
第四章	温度应力分析和混凝土裂缝宽度计算	110
4.1	温度场和温度应力分析	110
4.1.1	概述	110
4.1.2	计算原理	111
4.1.3	下游坝面管温度场和温度应力计算特点	118
4.2	混凝土裂缝宽度计算	121
4.2.1	概述	121
4.2.2	公式推演	126
4.2.3	算例和讨论	131
第五章	非线性有限元分析	138
5.1	材料非线性有限元的基础知识	138
5.1.1	线性有限元法简介	138
5.1.2	材料非线性有限元的基本概念	141

5.1.3	钢筋混凝土非线性分析主要数学模型简介	144
5.2	Willam-Warnke 混凝土破坏准则	151
5.2.1	混凝土破坏曲面的特点	151
5.2.2	Willam-Warnke 混凝土三参数破坏准则模型	155
5.2.3	Willam-Warnke 混凝土五参数破坏准则模型	162
5.3	混凝土弹塑性模型	167
5.3.1	弹塑性矩阵的一般表达式	167
5.3.2	混凝土弹塑性三参数模型	174
5.3.3	混凝土弹塑性五参数模型	176
5.4	混凝土弹性—塑性硬化模型	178
5.4.1	等向硬化模型	179
5.4.2	应力应变增量关系	181
5.4.3	三参数混凝土等向硬化模型	183
5.5	混凝土裂缝模型	190
5.5.1	分布裂缝模型	190
5.5.2	混凝土开裂时的应力释放	196
5.5.3	混凝土开裂时的应力重分布	200
5.6	钢筋数学模型	202
5.7	非线性有限元模型的数值实现	206
5.7.1	材料非线性分析的求解方法	206
5.7.2	弹塑性模型的数值计算步骤	206
5.8	工程应用实例——东江水电站压力管道	211
5.8.1	结构模型试验	211
5.8.2	非线性有限元分析	214
第六章 工程应用		220
6.1	三峡水电站下游坝面钢衬钢筋混凝土压力管道 设计和结构计算	220
6.1.1	三峡水电站压力管道的设计	221
6.1.2	常规荷载下管—坝整体结构三维有限元分析	226
6.1.3	混凝土正交异性准解析模型全过程分析	233

6.1.4	管道结构温度场和温度应力分析	234
6.1.5	混凝土径向裂缝宽度计算	242
6.2	依萨河二级水电站钢衬钢筋混凝土地面管 结构计算	243
6.2.1	结构优化设计	243
6.2.2	非线性有限元全过程分析	245
6.2.3	径向间隙值的计算及工程对策	250
6.2.4	试验与计算对比分析及原型观测分析	252
附录 I	矢量与张量	255
附录 II	应力分析	264
附录 III	结构全过程分析源程序 SAPDF4	273
附录 IV	结构优化设计源程序 OSDP	285
参考文献	300

第一章 水电站钢衬钢筋混凝土 压力管道的布置与设计原则

水电站钢衬钢筋混凝土压力管道是一种新型结构型式。大量的结构模型试验成果和原型观测资料表明,在内水压作用下,钢衬与外包钢筋混凝土壳可以良好地联合工作,共同承载。根据这一基本事实,对这种新型结构的基本设计原则是,考虑钢衬与外包钢筋混凝土壳联合承受内水压荷载,按整体结构进行设计。

钢衬钢筋混凝土压力管道具有一系列优点。首先,这种管道可将钢管承受的部分内水压荷载分散到外围钢筋混凝土壳上去,从而可以减薄钢衬的厚度,这对于高 PD 值压力管道的设计尤为重要。通常用最大内水压力 P 和钢管内径 D 的乘积 PD 值来反映压力管道的规模。一般认为, PD 值超过 $500\text{MPa}\cdot\text{cm}$ 时,可列为大型管道, $1200\text{MPa}\cdot\text{cm}$ 以上可称为巨型管道。对于高 PD 值管道,如果设计中采用低合金钢,屈服强度约为 $320\sim 350\text{MPa}$,钢板厚度往往超过 $32\sim 40\text{mm}$,在卷板制作和焊接安装中的技术难度增大。如果采用新型的钢衬钢筋混凝土管道,可以在设计中将钢衬厚度控制在易于加工焊接的范围之内,把用钢总量不足部分转移到外围环向钢筋上去,从而克服了施工工艺困难。当然,对于高 PD 值压力管道也可以选用高强合金钢,比如屈服强度达 $600\sim 700\text{MPa}$ 的特殊钢材,但是这类材料在我国尚属短缺,主要依赖进口。如果采用钢衬钢筋混凝土管道型式,钢衬材料完全可以选择国产低合金钢,这种设计方案具有明显的经济效益。最后还应指出,采用薄钢板、高配筋率的钢衬钢筋混凝土结构比明钢管或厚钢板、低配筋率的结构具有更高的安全度。原因是前一种结构在破坏试验中,表现出了很高的延展性,在混凝土裂缝出现