

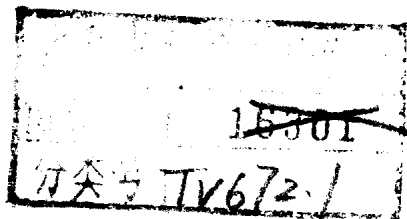
段乐琦等 编著

水工隧洞和调压室

水工隧洞部分

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水利电力出版社



**THE HYDRAULIC STRUCTURE
DESIGN SERIES
DESIGN OF HYDRAULIC
TUNNELS AND SURGE
CHAMBERS**



PART OF TUNNELS

006163 水利部信息所

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水工隧洞和调压室
水工隧洞部分

**段乐斋 杨欣先 夏广逊
吕祖珩 张有天**

编著

水利电力出版社

215/60

内 容 提 要

本书共分概述、隧洞布置和洞型选择、水力设计和计算、隧洞结构设计原则、圆形有压隧洞衬砌静力计算、无压隧洞衬砌静力计算、分岔段和渐变段衬砌静力计算、不衬砌隧洞、喷锚支护、有压隧洞衬砌限裂设计、隧洞应力分析的有限元方法和边界元法, 以及其边值问题的数值解法等共12章。并附有实例和实用程序。

本书根据最新隧洞规范, 并广泛搜集了国内外资料编写而成的。内容新颖, 说理清楚, 计算简捷。可供水利水电、铁路、冶金、矿山等工程技术人员使用, 也可供有关院校师生和科研等单位的技术人员参考。

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水工隧洞和调压室

水工隧洞部分

段乐斋 杨欣先 夏广逊 吕祖珩 张有天 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

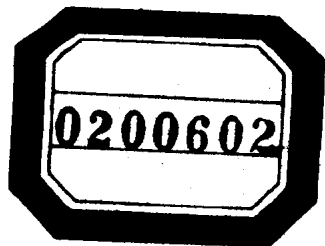
787×1092毫米 32开本 16.375印张 364千字

1990年6月第一版 1990年6月北京第一次印刷

印数0001—1640册

ISBN 7-120-01062-X/TV·358

定价10.50元



序 言

二十多年前笔者曾写过一套《水工结构应力分析丛书》，虽然体例庞杂，取材不精，而且有不少讹误，但在当时尚能满足实际设计同志的需要，所以受到欢迎。直到目前，笔者还经常接到各地读者来信的鼓励，并建议重版。这不仅是对笔者的勉励，更是一种鞭策。但在跨入八十年代的今日，原书内容显然不能满足要求了，所以再重版旧笈是不适宜的。

为了满足许多读者的期望，在有关领导的关心和鼓励下，我们试图以一套新的丛书来替代旧著，这就是即将陆续与读者见面的《水工建筑物设计丛书》。编写这套丛书的目的，仍在弥合教科书、论文文献和实际设计工作间的距离，供广大的水利水电设计同志，特别是基层设计同志在实际工作中参考，还可作为有志进修者的自学材料。在编写时，我们除力图保持原著一本书一个专题、篇幅精简短小的特点外，还想有所提高。即除了仍以结构的分析计算为中心外，适当论述一点有关设计上的问题，同时尽量反映国内外在近二十年来的成就和进展，力求跟上当前形势的需要。全书以实用为主，但也适当注意理论上的论述和概括，并不写成像手册一样。当然，要做到这些是很困难的。每种水工建筑物都有它的特点和复杂的一面，要详尽地讨论它们的设计问题，不仅是我们的水平所不及，而且也断非小小的篇幅所能容纳。所以，本书在选材时力求在篇幅所及的范围内结合分析计算，择要介绍一些主要设计原则。基于同样理由，对理论分析中

的许多详细的推导过程,也不得不割爱,而只列出基本理论、假定和重要的成果和公式。当然,我们也力求写得清晰连贯,使读者不难自行导证,并尽量给出有关的文献名称,使读者在必要时可以找到出处。

要编写这样一套丛书,已非笔者个人的能力和时间所及,因此邀请了有较丰富实践经验的同志来共同撰写,笔者只分担了小部分编写任务并做了力所能及的校阅工作。

根据原丛书的内容,并在征求了一些同志的意见后,本丛书将暂定为以下十种分册:压力钢管、水工隧洞和调压室、重力坝、拱坝、土石坝、溢洪道、坝内的孔口和廊道、水工建筑物的温度控制、水工建筑物的有限单元分析以及工程地质计算和基础处理。各分册将视撰稿进度陆续出版。

最后,笔者代表所有参加编写的同志,向热情审阅和加工本丛书的同志们表示衷心的感谢。对本丛书的批评和改进意见请寄水利电力出版社转。

潘家铮

1981年

目 录

序 言

第一章 概述	1
第一节 水工隧洞的定义	1
第二节 水工隧洞的分类	1
第三节 采用水工隧洞的条件	2
第四节 水工隧洞建设及隧洞科学的发展	3
第五节 本书内容简要介绍	5
第二章 隧洞布置和洞型选择	8
第一节 布置的重要性	8
第二节 洞线选择	11
第三节 洞身形状和尺寸	29
第四节 进水口结构型式选择	36
第五节 多用途隧洞	41
第三章 水力设计和计算	45
第一节 一般水力计算	45
第二节 高流速的防蚀设计	64
第四章 隧洞结构设计原则	95
第一节 岩体的力学特性	95
第二节 衬砌的作用	109
第三节 作用于隧洞的荷载	110
第四节 隧洞结构计算方法	125
第五章 圆形有压隧洞衬砌静力计算	131
第一节 概述	131
第二节 计算公式	132

第三节	渗流场力作用下衬砌应力计算	161
第四节	压浆式预应力衬砌	166
第六章	无压隧洞衬砌静力计算	176
第一节	圆拱直墙形隧洞衬砌的计算	177
第二节	计算例题	215
第三节	马蹄形隧洞衬砌计算	227
第七章	分岔段和渐变段衬砌静力计算	232
第一节	概述	232
第二节	计算公式	234
第三节	算例	259
第八章	不衬砌隧洞	268
第一节	概述	268
第二节	初始地应力场及其分析	272
第三节	不衬砌隧洞应力分析	277
第四节	不衬砌压力隧洞埋深	280
第五节	不衬砌隧洞的水头损失	283
第九章	喷锚支护	287
第一节	“新奥法”原理及喷锚支护	287
第二节	围岩特征分析法	293
第三节	工程类比法	311
第四节	水工隧洞喷锚衬砌设计	338
第十章	有压隧洞衬砌限裂设计	347
第一节	概述	347
第二节	圆形有压隧洞衬砌在内水压力作用下裂缝发展 规律	352
第三节	裂缝参数计算	355
第四节	衬砌裂缝渗水量计算	368
第十一章	隧洞应力分析的有限元方法和边界元方法	370
第一节	概述	370

第二节	线弹性问题有限元方法	371
第三节	隧洞水荷载的静力计算	389
第四节	弹塑性问题有限元方法	395
第五节	支护作用的有限元分析	407
第六节	边界元方法及其在隧洞应力分析中的应用	412
第十二章	衬砌边值问题的数值解法	424
第一节	概述	424
第二节	衬砌边值问题的建立	424
第三节	基本方程式的数值解	429
第四节	程序使用说明 (PC-1500机) 及算例	432
附录	隧洞衬砌边值问题计算程序 (PC-1500机)	449
附表 1	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 及 φ_4 函数表	455
附表 2	$\Phi_1 \sim \Phi_6$ 函数表	465
附表 3	$\Phi_{2,0} \sim \Phi_{2,5}$ 函数表	480
附表 4	$\kappa_2, \kappa_1, \mu_1$ 函数表	490
附表 5	$\sigma_1, \tau_1, \omega_0, \omega_1, \omega, \tau_2, \sigma_2, \pi$ 函数表	495
附表 6	$\lambda_1, \varphi_1, \eta_1, \lambda_1$ 函数表	497
附表 7	长梁函数 $\varphi, \psi, \theta, \zeta$ 表	503
参考文献		511

第一章 概 述

第一节 水工隧洞的定义

在地基内或基岩中通过开挖而形成的空间称为地下洞室。如地下洞室的长度远较其横断面为大，延伸到相当距离，形成两端都有出口（通至地面或通至其他建筑物）的地下通道，则称为隧洞（仅一端有出口的称为坑道）。过水的隧洞称为水工隧洞。不是通过地下开挖而成的地下通道（例如埋管）不能称为隧洞，因为它虽可能与隧洞有相同的用途，但两者的结构特点差别很大，不能混为一谈。本书所讨论的限于上述定义的水工隧洞。

第二节 水工隧洞的分类

水工隧洞可按不同原则分类。例如按其用途，水工隧洞可以分为：

发电隧洞——根据隧洞与水电站相对位置又可分为引水隧洞和尾水隧洞；

灌溉隧洞——为灌溉供水隧洞；

供水隧洞——供给生活用水，工业用水的隧洞；

导流隧洞——施工期将河道水流引至下游河床的隧洞，目的是保证施工地段正常作业。导流隧洞亦称施工导流隧洞，是临时性建筑物；

排水隧洞——用作降低地下水位的隧洞，放空水库用的

隧洞，尾矿坝排水隧洞均属此类；

泄洪隧洞——宣泄洪水的隧洞；

航运隧洞——用于通航的隧洞；

漂木隧洞——用于流放木材的隧洞；

排沙隧洞——定期排放水库淤砂的隧洞；

多用途隧洞——一条隧洞兼有多种用途，如发电及泄洪，灌溉及供水，导流及泄洪等；

按隧洞过水流态可分为有压隧洞和无压隧洞，在同一条隧洞中允许有不同流态，如上游为有压隧洞，下游为无压隧洞；

按对围岩加固方式可分为不衬砌隧洞，喷锚衬砌隧洞，混凝土或钢筋混凝土衬砌隧洞；

按流速大小可分为低流速隧洞和高流速隧洞。

第三节 采用水工隧洞的条件

水工隧洞不是过水建筑物的唯一型式。渠道，渡槽，倒虹吸，坝内泄水孔，坝下埋管，涵管，溢洪道等都是过水建筑物。应根据工程对象所处的自然条件和技术经济要求选择适当的过水建筑物型式。以下情况采用水工隧洞是必须的或在技术经济上是合理的。

1) 水工隧洞不受地形影响，可以在两点间取直线，以最小的水头损失换取最大的落差，因而最适合用于山岭起伏地区的引水式水电站；

2) 过水建筑物设计高程在地面以下，用明渠因挖方过大而不经济时；

3) 修建明渠可能受到滑坡、塌方、泥石流、雪崩及冰

冻威胁时；

4) 深山峡谷中修建当地材料坝无条件采用其他导流及泄洪建筑物时；

5) 水电站厂房采用地下结构时。

第四节 水工隧洞建设及隧洞科学的发展

建国以来，我国水利水电工程取得很大发展，修建的水工隧洞不计其数。据不完全统计，已建和在建长度超过1km的水工隧洞达50余条，其中近半数隧洞长度超过4km，在建的甘肃省引大灌区盘道岭隧洞长度超过15km。已建成有压隧洞直径达11m，无压隧洞尺寸达15×16m，设计中的无压隧洞尺寸达17.5×22.5m。国外水工隧洞建设也有很大发展。30年来，隧洞施工技术几经革新，隧洞开挖除爆破作业的矿山法外，出现了机械法。利用隧洞掘进机已能开挖直径达12m的隧洞。据美国芝加哥一直径10.8m隧洞施工记录，用隧洞掘进机开挖日进尺35.8m，月进尺551m，日开挖方量达3276m³。这样的隧洞掘进机已开始在我国天生桥水电站引水隧洞中应用。掘进机开挖隧洞不仅速度快，而且基本不破坏围岩的结构。目前，另外一些非爆破掘进方法如火焰法，超高频法，激光法等新方法正处于研究阶段^[1]。60年代，在奥地利隧洞施工采用锚杆和喷混凝土支护的实践经验的基础上总结出“新奥法(NATM)”，即奥地利隧道施工新方法，这不仅是隧洞施工技术的重大变革，也是人们对隧洞科学在认识上的飞跃。“新奥法”改变了以往把衬砌视为结构，把围岩看成荷载那种不反映实际的观点，促进了对岩石力学的研究，也促进了隧洞设计理论的革新。

在水工隧洞设计和施工中，喷锚支护不仅作为临时支护手段得到推广应用，而且还有进一步的发展。锚杆和喷混凝土被进一步用作永久衬砌。70年代以来，结合实际工程，国内对水工隧洞喷锚衬砌进行了大量试验研究工作，在这个基础上，初步形成了水工隧洞喷锚衬砌的设计方法。

在50年代，有压隧洞的衬砌被视为主要的支承结构，认为衬砌一旦开裂，隧洞就已破坏。并按照混凝土结构和钢筋混凝土结构要求来设计衬砌、确定厚度和配置钢筋。但实际情况是，即使衬砌有足够的厚度，并按强度要求配置了大量钢筋，衬砌仍然出现裂缝。另一方面尽管有裂缝，隧洞仍能长期正常工作。60年代以后，有一批隧洞按允许开裂，但限制裂缝开展的方法设计，并得到成功，显著地节省混凝土方量和钢筋用量。

压浆式预应力混凝土衬砌是积极利用围岩承载能力的另一途径。南斯拉夫，澳大利亚、苏联和我国都结合具体工程进行过试验研究。实践证明，通过压浆给衬砌预加应力可以大大提高水工隧洞所可承受的内水压力。

50年代，水工隧洞应力分析方法主要采用解析法。可以用弹性力学方法求解的，如轴对称问题（围岩为均质无限体，圆形断面，均匀内压），都用弹性力学方法，否则则用文克尔地基梁方法。实际隧洞围岩并非均质，软弱结构面（如断层）对应力场干扰很大，上述方法计算带来较大误差。此外，岩体初始应力对隧洞工作状态有显著影响，地下水在围岩中渗流形成渗流场力是水荷载作用于隧洞的主要形态，这些都难以用解析法进行分析。近30年来，水工隧洞建设的发展，隧洞施工方法和技术的发展，地勘技术的发展，岩石力学的发展，计算机和计算方法的发展全面地促进隧洞

科学的发展。隧洞应力分析方法的发展尤为迅速。已经可以按照围岩实际条件（非均质、非线性）和荷载的实际分布（初始应力，渗流场力）用数值方法对隧洞应力场进行分析。对于水工隧洞而言，当前正处在由主要按经验设计向主要按分析设计的过渡之中。

水工隧洞另一个重要问题——水力设计问题也取得了重大进展，特别是对高速水流水工隧洞空蚀研究及其防止有所突破，用通气槽防止气蚀在水工隧洞得到成功的应用。

众多的工程实践以及计算分析方法的发展提供了总结经验的素材和手段，认真地总结这些经验教训将能从根本上提高水工隧洞设计水平。

第五节 本书内容简要介绍

人们的认识常落后于实践，设计方法也常落后于生产和科学的发展。尤其是近30年来隧洞科学发展如此迅速，远来不及形成完整的反映新水平的系统设计准则和方法。本书是这个新旧交替过程中的产物，力求既反映现状，又立足于新的发展，起到继往开来的作用。

本书与旧版相比，内容有了较大扩充。除应力分析仍为基本内容外，还包括工程布置，水力计算，不衬砌隧洞，喷锚支护等内容。在应力分析方面除传统的方法外，增加了水荷载作为渗流场力的解析解，衬砌问题边值方法数值解，分岔洞结构力学解法，衬砌裂缝参数计算，有限元方法及边界元方法的应用等。兹将各章内容简述如下：

第二章讲述隧洞布置和洞型选择。我国水工隧洞建设表明，发生的问题大多数都是因为在布置上考虑不周。为引起

设计人员重视，本书首先介绍布置问题上的经验教训。

第三章介绍水力设计和计算。这个内容与隧洞布置关系密切。以往设计人员常重视结构设计而忽视水力设计，出了一些问题。把这两章放在最前叙述，以期引起重视。本章着重介绍高流速水工隧洞有关的一些问题。

第四章以后主要介绍水工隧洞结构设计。第四章为总的原则，叙述了衬砌的作用，荷载分析，特别是水荷载的分析。本书认为隧洞设计应着眼于围岩加固，为此，在本章简要介绍了与水工隧洞有关的岩石力学基础知识。对隧洞应力分析两种方法——弹性力学方法与结构力学方法的发展概况及存在的问题也作了评述。

第五章是圆形隧洞应力分析解析解，除传统方法外补充了作为渗流场力的水荷载作用下隧洞应力的解析解。

第六章是针对无压隧洞介绍了衬砌应力分析结构力学方法。

第七章介绍弹性地基上分岔洞衬砌的计算方法，这一方法不必事先假定抗力图形，因而可得出较满意的结果。本法曾成功地用于碧口水电站设计。

第八章为不衬砌隧洞的设计方法，除国内经验外还重点介绍了挪威的经验。在挪威，不衬砌隧洞应用广泛，是水工隧洞设计中首先考虑的方案。挪威的经验值得我们借鉴。

第九章介绍“新奥法”原理和喷锚支护在水工隧洞中的应用，全面介绍了喷锚支护的分析方法。介绍了我国水工隧洞中采用喷锚作永久性衬砌的情况和经验。

第十章专论浓裂设计问题，论述了国内外关于衬砌裂缝参数计算方法，衬砌裂缝后渗水量计算方法。分析了限裂设计标准问题，建议用允许渗流量来决定允许的裂缝宽度。

第十一章简要介绍了有限元方法及边界元方法的原理及其在水工隧洞中的应用，给出了一些实例。

第十二章介绍了隧洞衬砌结构力学分析方法的最新发展——衬砌边值问题的数值方法，这一方法不须事先假定衬砌所受围岩抗力图形，并可在计算中当衬砌径向变位为负值时自动不考虑抗力。在附录中列入可在PC-1500袖珍机上衬砌边值方法计算程序供参考。

本书的第二、三章由杨欣先编写，第一、四、十、十一章由张有天编写，第五、六章由夏广逊编写，第七章由吕祖珩编写，第九章由段乐斋编写，第八章由段乐斋及张有天编写，第十二章由段乐斋与夏广逊编写。全书由张有天统稿，最后由主编定稿。本书第三章并请邵瑛瑛同志审阅提出宝贵意见，谨此致谢。

第二章 隧洞布置和洞型选择

第一节 布置的重要性

我国水利水电工程的建设实践表明，少数水工隧洞之所以发生问题多系布置上考虑不周所致。布置上的失误，轻则增加结构设计难度，或造成工期的拖延；重则迫使在施工中途改变设计线路，或不能按预定目的运行。应特别强调的是，布置中的失误所造成的不良水力条件，远非结构措施所能够补救。通过对已建水工隧洞的调查分析，造成不合理的工程布置的原因有以下几个方面：

1) 地质资料不足，使洞线选择欠佳：例如：中南地区某水电站的引水隧洞，开挖进洞200m后，遇到石灰岩溶洞，洞身塌方长达几十米，局部塌方通顶，临时被迫改变洞线，绕了九道弯才勉强通过；另一水电站的引水隧洞，开挖中遇到意外的大断层，发生大塌方，两个工作面抢挖两个月仍不能通过，只得被迫绕道；华东某水电站的引水隧洞，进口地段开挖 $2 \sim 3$ 万 m^3 后，才发现进水口位于风化的土层上，最后不得不放弃原定方案，另找进水口位置。又如，西南某水电站的引水隧洞，开挖后，洞顶暴露出大量的不稳定切割体，沿洞线塌方17处，最大塌方高度40m，为处理塌方，工期一拖再拖。再如，西北某水电站的引水隧洞，进水口洞脸开挖过程中，顺坡裂隙越挖越多，因事先没有准备，未充分研究就采用了混凝土挡墙处理方案，其混凝土量为进水塔的63.4%，由于工程量太大，影响工程进度，最终又改为预应力

锚索和混凝土锚杆加固方案，使设计和施工都很被动。

2) 忽视水力条件：例如，华东某水电站的引水隧洞，因进水口位置欠佳，受地形影响使进口产生相当严重的漩涡，把漂浮物吸附在拦污栅上，致使水头损失剧增，引水流量减少；不少电站的引水隧洞进口均有不同程度的漩涡发生。西南某水电站的引水隧洞，在低水位运行时，进口漩涡将空气吸入洞内产生气锤现象，响声雷鸣，水从进口旁的进入孔喷出，冲走铁盖板，水柱高达10m之多。顺便指出，隧洞由提升闸门充水，若开度过急过大也会产生气锤现象，我国有不少隧洞还不只一次发生气锤现象，造成了不应有的损失，应当引以为戒。中南某水电站的有压泄洪隧洞和华东某水库的有压输水隧洞，其出口断面不但没有逐渐收缩，反而还稍有扩大，运行中均产生负压并发生空蚀破坏。

3) 工程规划不周：例如，陕西某水库的龙抬头泄洪隧洞是在施工过程中决定由导流洞改建的，因受地形限制，只

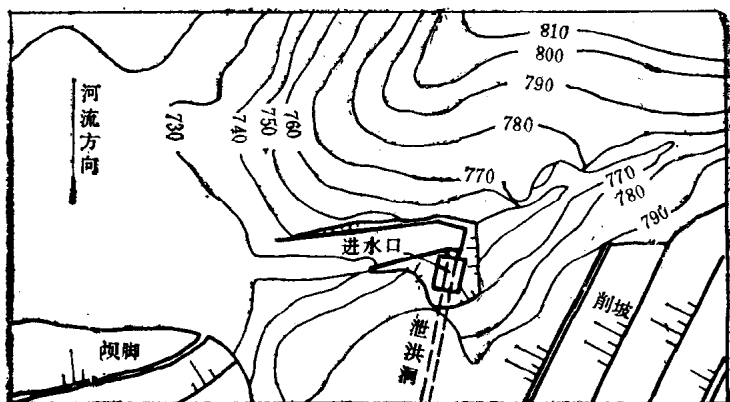


图 2-1 某水库泄洪洞进口布置图