

结构与施工计算实例丛书

预应力混凝土 特种结构

宋玉普 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TU378/23

2008

结构与施工计算实例丛书

预应力混凝土特种结构

宋玉普 编著

机械工业出版社

本书为“结构设计与施工计算实例”丛书之一。全书共8章,主要内容为:水工结构中的预应力混凝土特种结构,包括预应力混凝土引水洞、排沙洞、闸墩、渡槽,预应力锚索加固坝体、闸墩、高边坡、地下洞室;核电站预应力混凝土安全壳;预应力混凝土电视塔和微波塔;预应力混凝土采油平台;预应力混凝土水处理池和水池;预应力混凝土球形水塔;预应力混凝土筒仓。本书各章均有典型的设计和施工实例,供读者参考和应用。

本书可供有关专业从事预应力混凝土结构设计、施工和监理的人员参考应用,也可供高等院校有关专业的教师、研究生和高年级本科生作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土特种结构/宋玉普编著. —北京:机械工业出版社, 2008.1

(结构设计与施工计算实例丛书)

ISBN 978-7-111-22880-6

I. 预… II. 宋… III. 预应力混凝土结构 IV. TU378

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182624号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:薛俊高 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:张静 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年4月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·16.375印张·599千字

标准书号:ISBN 978-7-111-22880-6

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国经济建设的飞速发展，预应力混凝土结构的应用越来越广泛，目前已遍及建筑、桥梁、电视塔、核安全壳、混凝土采油平台、坝体中引水洞和排沙洞等的衬砌、闸墩、渡槽、地下洞室、坝体和高边坡加固、水处理池和水池、球形塔和筒仓仓壁等。鉴于此，为便于建筑工程设计和施工人员掌握基本的计算方法，通过具体的工程实例达到举一反三的目的，机械工业出版社特组织编写了该套“结构设计 with 施工计算实例丛书”，该套丛书包括《混凝土结构设计和施工细部计算示例》、《预应力混凝土建筑结构》、《预应力混凝土桥梁结构》和本书。

在“21 世纪土木工程实用技术丛书”中的《钢筋混凝土结构》和《新型预应力混凝土结构》中已介绍了静定和超静定预应力混凝土结构和各种新型预应力混凝土结构的基本设计原理和方法。在此基础上本书重点介绍在工程中常遇到的预应力混凝土特种结构的设计与施工实例，以便于工程设计、施工、监理人员参考应用。

本书不同于设计手册和会议论文集，它是按结构类型和特点进行分类，将多篇关于同一工程实例的文章归纳总结，对各种预应力施工方法均进行了介绍，并有很多工程实例，只要是目前广泛应用的方法，均能查到，这样便于设计与施工和监理人员根据预应力工程的特点查找到相关的方法。

全书共 8 章。第 1 章绪论，介绍我国预应力混凝土特种结构在材料、计算模型、计算手段、设计方法、施工方法的发展特点。第 2 章水工结构中的预应力混凝土特种结构。介绍了预应力混凝土在水工引水洞和排沙洞衬砌中的应用；预应力混凝土闸墩、预应力混凝土渡槽的设计和施工；预应力锚索加固坝体和闸墩；预应力锚索加固高边坡；预应力锚索加固地下洞室。第 3 章核电站预应力混凝土安全壳。介绍

了安全壳的结构类型和预应力混凝土安全壳的特点；预应力混凝土安全壳的功能及其基本设计准则；改进的第三代预应力混凝土安全壳的概念设计和试验研究；核电站预应力混凝土安全壳耐久性和抗爆性能的安全分析；核电站预应力混凝土安全壳工程实例。第4章预应力混凝土电视塔和微波塔。介绍了预应力混凝土电视塔的设计；加拿大多伦多、我国上海、北京、天津、南京电视塔的预应力施工；部分预应力混凝土微波通信塔的施工；不同预应力混凝土电视塔的比较。第5章预应力混凝土采油平台。介绍了南海北部湾涠11—1油田预应力混凝土多用平台；辽河油田多功能轻质高强预应力混凝土平台的模型试验；北海康迪普平台的设计和弗里格平台预应力施工。第6章预应力混凝土水处理池和水池。介绍了缠丝预应力混凝土水处理池；无粘结预应力混凝土水处理池；有粘结预应力混凝土水处理池；环形预应力水池设计和施工；预应力水池抗震、抗浮、抗裂和加固的特殊问题。第7章预应力混凝土球形水塔。介绍了预应力混凝土球形水塔的结构设计与分析；预应力混凝土球形水塔的施工。第8章预应力混凝土筒仓。介绍了无粘结预应力混凝土筒仓仓壁的设计、计算和构造；无粘结预应力混凝土筒仓的工程实例；有粘结预应力混凝土筒仓仓壁的设计和施工实例。

由于预应力混凝土结构的应用十分广泛，本书难免有缺漏；另外由于编者水平有限，书中也难免有缺点乃至错误，敬请读者批评指正。

宋玉普

2007年10月于大连理工大学

目 录

前言

第1章 绪论 1

参考文献 3

第2章 水工结构中的预应力 混凝土特种结构 5

2.1 预应力混凝土引水洞和
排沙洞 5

2.2 预应力混凝土闸墩 59

2.3 预应力混凝土渡槽 87

2.4 预应力锚索加固坝体和
闸墩 121

2.5 预应力锚索加固高边坡 167

2.6 预应力锚索加固地下洞室 185

参考文献 195

第3章 核电站预应力混凝土 安全壳 199

3.1 安全壳的结构类型和预应力
混凝土安全壳的特点 199

3.2 预应力混凝土安全壳的功能及
其基本设计准则 203

3.3 改进的第三代预应力混凝土安
全壳的概念设计和试验研究 206

3.4 核电站预应力混凝土安全壳耐
久性和抗爆性能的安全分析 216

3.5 核电站预应力混凝土安全壳
工程实例 228

参考文献 279

第4章 预应力混凝土电视塔和 微波塔 281

4.1 预应力混凝土电视塔的

设计 281

4.2 预应力混凝土电视塔的
施工实例 293

4.3 部分预应力混凝土微波
通信塔 330

4.4 不同预应力混凝土电视塔的
比较 336

参考文献 343

第5章 预应力混凝土采油 平台 345

5.1 概述 345

5.2 南海北部湾涸 11—1 油田预应力
混凝土多用平台 346

5.3 辽河油田多功能轻质高强预应力
混凝土平台的模型试验 352

5.4 北海康迪普平台 361

5.5 弗里格 (Frigg-CDP1) 平台
预应力混凝土施工 366

参考文献 376

第6章 预应力混凝土水处理池和 水池 377

6.1 概述 377

6.2 缠丝预应力混凝土圆柱形水
处理池 377

6.3 无粘结预应力混凝土水
处理池 383

6.4 有粘结预应力混凝土水
处理池 429

6.5 环形预应力水池设计和
施工 446

VI

6.6 预应力水池抗震、抗浮、抗裂和 加固的特殊问题	450	7.3 预应力混凝土球形水塔的 施工	469
参考文献	461	参考文献	476
第7章 预应力混凝土球形 水塔	463	第8章 预应力混凝土筒仓	477
7.1 工程概况	463	8.1 概述	477
7.2 预应力混凝土球形水塔的结构 设计与分析	465	8.2 无粘结预应力混凝土筒仓	477
		8.3 有粘结预应力混凝土筒仓	502
		参考文献	510

第 1 章 绪 论

预应力混凝土特种结构包括水工结构中的预应力混凝土特种结构（预应力混凝土引水洞、排沙洞、闸墩、渡槽和预应力锚索加固坝体、闸墩、高边坡和地下洞室）核电站预应力混凝土安全壳，预应力混凝土电视塔和微波塔，预应力混凝土采油平台，预应力混凝土水处理池和水池，预应力混凝土球形水塔及预应力混凝土筒仓等。在这些预应力混凝土特种结构的设计和施工中，反映了我国预应力混凝土技术的水平。这主要表现在所采用的材料逐渐向高强方向发展，所考虑的计算模型逐渐向真实结构方向发展，所采用的分析手段逐渐向计算机化和有限元化方向发展，所采用的设计和施工方法逐渐向新技术方向发展，所采用的施工设备逐渐向机械化方向发展，所采用的施工队伍逐渐向专业化方向发展。

(1) 在应用的材料方面，逐渐向高强方向发展。目前在预应力混凝土特种结构中采用的钢筋基本都为高强钢丝和钢绞线，我国生产的低松弛钢绞线的抗拉强度标准值已达到 1860MPa，消除应力钢丝的抗拉强度标准值达到 1770MPa。在这些预应力混凝土特种结构中，采用的混凝土强度普遍达到 C40 ~ C50，从而使截面尺寸减少，结构逐渐向轻巧方向发展。

(2) 由于预应力混凝土特种结构多为大型非杆件结构体系，计算模型很难确定。以前由于受试验和计算手段的限制，常把三维问题简化为二维或一维问题进行分析。现在由于试验技术和计算手段有了很大发展，复杂的边界条件和多维的模型均能通过试验和计算模拟确定，所以大型预应力混凝土特种结构的计算模型逐渐向真实结构方向发展，计算手段逐渐向多维和计算机化方向发展。如小浪底排沙洞采用了 1:1 的两种模型实验，并进行了现场实测试验，确定了预应力损失，混凝土预压应力等；并考虑三维计算模型，采用有限单元法利用计算机进行分析^[3~7]。目前对大型预应力混凝土排沙洞、预应力混凝土安全壳、采油平台、地下洞室均按三维结构采用 ANSYS、ADINA、SAP 等通用软件进行分析，从而考虑的因素大大增加，并提高了计算精度。在结构试验中，不仅进行了试验室和现场试验，并在施工中安装了大批观测检测试验仪器，长期检测结构的运行状态，如在预应力束中贴应变片，监测预应力筋的应变变化；在大型预应力锚索结构中采用监测锚索，它采用无粘结预应力束并在 PVC 管和钢管内涂油脂（高边坡）或灌油（安全壳），保护钢绞线不锈蚀^[8~10]，从而可长期检测预应力筋的应变变

化。

(3) 目前预应力混凝土特种结构采用的设计和施工方法逐渐向新技术方向发展, 如无粘结预应力混凝土技术在水工结构中的排沙洞衬砌、预应力混凝土渡槽、预应力混凝土电视塔、预应力混凝土水处理池和预应力混凝土筒仓等均得到普遍应用。

在小浪底 3 条排沙洞衬砌中, 首次采用了无粘结预应力筋双层环绕两圈后张拉预应力的混凝土施工技术, 这样与单圈甚至半圈布置相比既节省了锚具, 又加快了施工进度^[11]。

第三代预应力混凝土安全壳将扁穹顶改为半球, 并采用了倒 U 字形的钢束把竖向束与穹顶束合并, 从而消除了环梁, 既改善了原环梁附近复杂的受力状态, 又减少了预应力束。但穹顶部分预压应力还是不够均匀, 所以上海核工程研究院在安全壳的概念设计中, 提出了穹顶部分钢束布置为三个方向的倒 U 形束, 取消了穹顶 45°仰角部分的三个扶壁, 同时又把筒壁的环向束扶壁也减为两个, 使预压应力均匀分布^[12~14]。

中央电视塔是目前世界上按 9 度设防的最高建筑物, 设计中采用了低预应力度的部分预应力混凝土, 保证了塔体在设计烈度地震作用下, 处于弹性状态, 在遭受高于设计烈度的强震后, 有较好的延性和变形恢复能力^[15]。

电视塔塔体竖向预应力均较长, 属于超长钢绞线束, 如上海电视塔最长竖向预应力束为 303m, 穿束、张拉、灌浆难度均较大, 施工单位根据各自的施工设备和结构形式的特点, 采用“自上而下”或“自下而上”穿束, 两端张拉, 分段连续灌浆工艺, 利用浆体的缓凝解决分段灌浆的连续和堵孔问题, 并采用整体和局部两次性压浆工艺保证了灌浆的饱满^[16]。

(4) 目前在预应力混凝土特种结构的施工中, 所采用的施工设备逐渐向机械化方向发展, 混凝土搅拌由搅拌厂电子秤控制配比, 搅拌机搅拌, 混凝土运输采用混凝土罐式运输车, 混凝土浇灌采用泵送。另外引进了很多国际上的先进设备, 如小浪底排沙洞内层钢筋、锚索定位采用意大利 CGIC 承包商设计制造的可移动内层钢筋、锚索定位台车^[11]; 排沙洞混凝土模板的安装和混凝土振捣利用由意大利 CIFA 公司设计制造的全断面上置式针梁钢模台车进行^[11]。隔河岩引水洞衬砌混凝土浇筑采用自行式混凝土衬砌, 施工用钢模台车行进入衬砌仓位就位, 然后进行混凝土浇筑^[17]。

大型渡槽混凝土浇筑一般均采用机械化施工, 如深圳市东江引水工程渡槽采用了布料机浇筑混凝土。布料机的软管直接伸入到底板和腹板内, 距混凝土面 1m 高度布料^[18]。金湖渡槽施工中借鉴有轨滑模和架桥机制造了造槽机, 用于模

板的支护、钢筋布置和混凝土浇筑^[19]。东湖供水工程的孔道灌浆采用真空灌浆法^[20]。在龙羊峡水电站无粘结预应力锚索加固高边坡时,在锚索体中安装了氯丁胶囊阻浆器,解决了大吨位水平或上仰锚孔内锚固段止浆技术^[21]。

(5) 目前预应力混凝土结构的施工队伍均与大批施工队伍分离,由科研院所或高等院校等单位组织具有一定技术水平和施工经验的人员组成,从而使预应力混凝土的施工质量得到了很大的提高,特别是张拉工序、灌浆工序和封锚工序的质量是保证预应力混凝土质量的关键,由于由专业队伍施工,技术水平高、施工经验丰富,保证了这些关键环节的施工质量,从而使整个工程质量大大提高。

参 考 文 献

- [1] 宋玉普,王清湘. 钢筋混凝土结构[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 宋玉普. 新型预应力混凝土结构[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 亢景付,胡玉明. 小浪底排沙洞预应力衬砌结构模型对比试验研究[J]. 土木工程学报. 2003, 6, 36(6): 80—84.
- [4] 沈凤生,张阳,李斌,等. 小浪底工程排沙洞无粘结预应力结构的设计研究[M]//杜拱辰,米祥友,等. 世纪之交的预应力新技术. 北京:专利文献出版社,1998: 823—828.
- [5] 陈惠玲,周荣芳,陈惠如. 黄河小浪底工程后张环形无粘结预应力衬砌结构技术[M]//陈惠玲. 高效预应力结构设计施工实例应用手册. 北京:中国建筑工业出版社,1998: 933—947.
- [6] 亢景付,赵宏. 小浪底排沙洞无粘结预应力衬砌现场试验[J]. 施工技术,2003, 32(7): 56—57.
- [7] 亢景付,胡玉明,侯新华. 小浪底排沙洞混凝土衬砌不同阶段预应力变化实测分析[J]. 预应力技术,2006, (2): 10—33.
- [8] 邹俊. 三峡船闸高边坡预应力锚固施工技术[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004, 15(2): 98—103.
- [9] 高大水. 三峡船闸高边坡锚固及新型无粘结锚索开发[J]. 水力发电,2003, 29(1): 36—40.
- [10] 陈增元,赵树明,林松涛,等. 预应力钢束灌油对改进摩擦系数的影响和预应力损失的监测[J]. 工业建筑,2000, 32(4): 76—77.
- [11] 祖铁华. 小浪底水利枢纽工程排沙洞无粘结预应力混凝土施工[J]. 水利水电科技进步,2001, 21(6): 46—50.
- [12] 杜拱辰,米祥友. 世纪之交的预应力新技术[M]. 北京:专利文献出版社,1998: 722—726.
- [13] 夏祖讽,王明弹,黄小林,等. 百万千瓦级核电厂安全壳结构设计与试验研究[J].

核动力工程, 2002, 23(2 增刊): 123—129.

- [14] 张心斌, 林松涛. 先进核电厂安全壳结构模型试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(9): 33—35.
- [15] 陈惠玲. 高效预应力结构设计施工实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 806—825, 892—897, 911—919.
- [16] 李海光. 上海广播电视塔筒体预应力混凝土结构施工技术[C]. 中国土木工程学会第八届年会论文集. 北京: 清华大学出版社, 1998: 137—145.
- [17] 汪健斌. 环形预应力锚束在隔河岩水电站发电引水隧洞衬砌中的应用[J]. 湖北水力发电, 2004, (4): 54—57.
- [18] 戴金水, 郭雁平. 大型输水混凝土箱形渡槽设计与施工[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(6): 58—60.
- [19] 唐圣斌, 何锡贤, 汪永剑. 两项新技术在金湖薄壳渡槽工程中的应用[J]. 施工技术, 2003, 32(11): 51—52.
- [20] 陆岸典, 丁仕辉. 大型 U 形薄壳渡槽预应力施工[J]. 施工技术, 2002, 31(7): 18—19.
- [21] 刘俊柏. 6000kN 无粘结预应力锚索岩体加固施工技术[M]//陈惠玲 高效预应力结构设计施工实例应用手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 875—878.

第2章 水工结构中的预应力混凝土特种结构

预应力技术在水工结构中的应用十分广泛,如大直径,高水头的引水隧洞、排砂洞等的预应力混凝土衬砌、预应力闸墩、预应力渡槽、预应力锚索加固混凝土坝、闸墩、高边坡和地下洞室,等。下面分别介绍这些结构的预应力设计和施工。

2.1 预应力混凝土引水洞和排沙洞

2.1.1 无粘结预应力混凝土技术在小浪底排沙洞中的应用^[1~7]

1. 工程概况

小浪底排沙洞按 I 级建筑物设计。3 条排沙洞均设在左岸,平面上为直线布置。每条洞全长 1100m,由进口段、压力洞段、出口闸室及明流段组成(见图 2-1)。进口高程 175m,压力段出口高程 153m,最大运用水头 122m。



图 2-1 1 号排沙洞纵剖面图

排沙洞压力洞段在上游段即防渗帷幕前,由于内、外水位较高而采用普通钢筋混凝土衬砌,下游段即防渗帷幕后由于外压低,内压高,经方案比选后决定采用后张无粘结预应力混凝土衬砌。隧洞内径 6.5m,预应力混凝土衬砌厚度为 0.65m。衬砌混凝土选用两级配 C40,锚具槽回填混凝土为一级配 C40 无收缩混凝土。

根据现场模型试验结果及三维有限元计算分析,洞身衬砌结构中,每束无粘结预应力锚索由 8 根钢绞线组成,在混凝土衬砌中分双层布置,内外两层钢绞线的间距为 0.13m。沿洞轴线方向每米布置 2 束锚索,间距 0.5m。

预应力锚固系统包括锚索、锚具及张拉设备。

锚索采用高强、低松弛的带 HDPE 套管的无粘结钢绞线,其标准强度为

1860N/mm², 标称直径 15.7mm, 公称面积 150mm², 弹性模量 1.8×10^5 N/mm², 单束绞线破断力为 279.0kN, 钢绞线摆动系数 k 为 0.0007degree/m, 绞线与 PE 管间摩擦因数 μ 为 0.05。

所用锚具为规范(GB/B14370)中规定的I类锚具。制作锚具用的钢材符合中国规范(GB699)和(ASTM A36)的要求。锚具、夹具及张拉设备符合中国标准(GB/T 14370)、(JGJ85—1992)、(JG/T 5028—1993)和(JGJ/T 92—1993)或欧洲规范 Eurocode 2 的要求。

考虑排沙洞的受力状况及施工条件, 洞内锚具槽分两列交错布置在洞断面下半圆范围内, 与隧洞垂直中心线夹角为 $\pm 45^\circ$ 。根据锚具及张拉设备的布置, 锚具槽长为 1.54m, 上部宽为 0.28m, 下部宽 0.30m, 槽的最小高度为 0.25m (见图 2-2、图 2-3)。

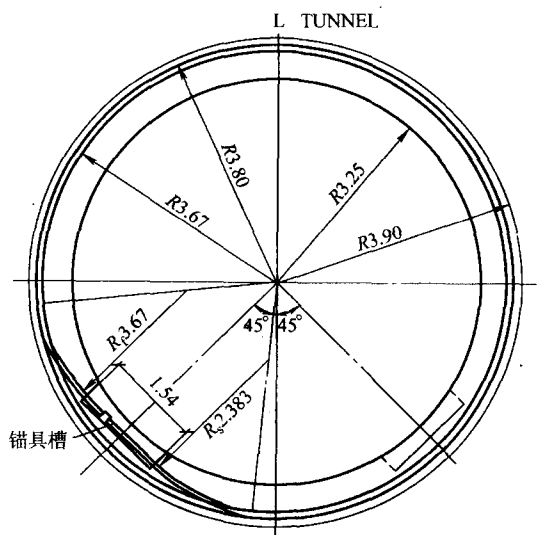


图 2-2 排沙洞横剖面图

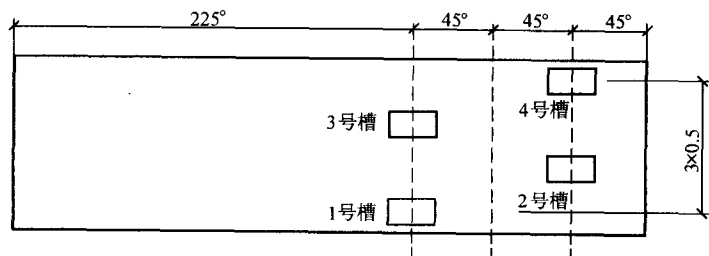


图 2-3 锚具槽展开布置图

2. 结构分析^[1]

(1) 初估预应力钢绞线的数量

根据工程经验, 当隧洞环锚的预应力荷载达到一定程度时, 混凝土衬砌与围岩之间会形成一定的缝隙。因此, 在预应力结构计算时, 衬砌体作为一个独立的结构考虑, 锚索预应力作为外加荷载作用于洞身。隧洞横剖面假定为平面问题, 根据内外水压计算每延米洞长所需的预应力锚索的数量, 然后用三维有限元理论分析各种荷载作用下的衬砌结构应力状况。

由于小浪底工程的重要性和复杂性,排沙洞衬砌按抗裂设计,以保证运行期内水不外渗。因此衬砌结构按全预应力进行设计,即在长期最大运行荷载情况下,混凝土衬砌中不会出现拉应力。

根据排沙洞的运行条件,选定两种运行工况进行计算比较,即①当库水位为 275.0m,工作弧门关闭挡水;②库水位为 251.0m 时工作弧门局部开启,控泄流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 。

经比较,压力段末端为预应力衬砌控制设计断面,库水位 275.0m,工作弧门关闭挡水为控制工况。假定锚索中的每根钢绞线在同一环向位置的应力相等。张拉控制应力值 σ_{con} 为

$$\sigma_{\text{con}} = 0.75f_{\text{ptk}} \quad (2-1)$$

式中 f_{ptk} ——钢绞线强度标准值, $f_{\text{ptk}} = 1860\text{N}/\text{mm}^2$ 。

在张拉和锚固过程中,预应力的损失包括锚具变形,摩擦损失,钢绞线的松弛及回缩、混凝土的收缩与徐变等因素。

初估钢绞线用量是根据预应力损失值的控制情况确定,其计算值:

$$A'_p = Pr/\sigma_{\text{AV}} \quad (2-2)$$

式中 A'_p ——钢绞线计算截面积;

P ——隧洞中心线以上作用的内水头;

r ——隧洞半径;

σ_{AV} ——考虑损失后的钢绞线平均应力值。

根据计算结果确定沿每米长设 2 束锚索,每束为 8 根 $7\phi 5$ 绞线,绕 2 周,实际采用钢绞线面积 A_p 为 4800mm^2 。

(2) 结构应力分析

结构应力分析采用三维有限元分析方法,使用 SAP 3D 软件模拟了施工及运行过程中可能出现的各种情况,以及预应力锚索在张拉及内水压力作用下张拉力增加的过程,分析研究的重点在锚具槽的布置形式上。计算模型分别选取一个施工段的中部及端部两个部位。

根据排沙洞实际开挖状况,计算模型考虑了 0.65m 和 0.90m (考虑超挖 0.25m) 两种衬砌厚度情况。在锚具槽间距布置上,考虑了 0.45m 和 0.50m 两种方案。对应这四种情况及洞内试验段分别进行荷载组合,组合情况见表 2-1。

通过以上各种工况的结构应力分析,锚具槽的二列布置和轴向 0.5m 间距的布置可以满足排沙洞运行条件下环向全预应力的设计要求。

施工过程中,第一束锚索张拉至 100% 设计荷载时,衬砌会产生一定的沿洞轴向拉应力,并在锚具槽口部位产生应力集中,拉应力超过混凝土抗拉强度值,

可能会出现小范围裂缝,故设计中在锚具槽两侧 2m 范围内设置了加强箍筋。但若考虑超挖因素,即在 0.90m 衬砌厚度情况下,此轴向拉应力有所降低,不会造成混凝土开裂。预应力锚索必须分步张拉,控制相邻两束锚索的张拉力差值在 50% 的设计荷载范围内。

表 2-1 不同设计工况的荷载组合

工况	荷载工况	预 应 力	内水压力	外水压力	衬砌自重	山岩压力	备 注
工况 1	施工期 A	50% 张拉力			√		
工况 2	施工期 B	100% 张拉力			√		
工况 3	空洞情况	预应力 1		√	√	√	
工况 4	运行期 A	预应力 2	√		√	√	考虑围岩
工况 5	检修期	30% 预应力 1		√	√	√	试验段

注: 1. 施工期 A 模拟第一张拉工序,张拉力为最大张拉力的 50% (单束)。

2. 施工期 B 模拟第一张拉工序,张拉力为 100% 最大张拉力 (全部)。

3. 空洞情况预应力 1 为张拉完毕全部锁定后的预应力荷载。

4. 运行期预应力 2 为预应力 1 经长期运行松弛后的预应力荷载。

在设计控制工况即 275m 水位关门挡水情况下,衬砌结构尚有至少 1.2MPa 的预压应力储备。

对于检修工况,衬砌中的压应力较大,但并未超过混凝土的抗压承载力,设计中按构造要求配置普通环向和纵向钢筋即可。

3. 无粘结预应力混凝土施工^[2]

(1) 主要施工设备及材料

排沙洞无粘结预应力混凝土主要施工设备和材料见表 2-2。

表 2-2 排沙洞无粘结预应力混凝土施工用主要设备和材料

设备名称及材料	生产厂家及型号	数量
可移动内层钢筋、锚索定位台车	CGIC 承包商设计制造	3
全断面上置式针梁钢模台车	意大利 CIFA 公司	3
HOZ950/100 型千斤顶,DSI77-159A 型电动液压泵	德国 Dywidag 公司	6
无粘结高强度低松弛钢绞线	天津市第一预应力钢绞线有限公司	
OVM, HM15-18 环锚锚具,张拉锚板(40Cr)	柳州欧维姆(OVM)建筑有限公司	
防腐材料 DIS-6808 型等	德国 DSI 公司	

(2) 锚索和锚具槽的布置及锚索张拉顺序

小浪底水利枢纽工程 3 条排沙洞首次在国内使用了无粘结预应力筋双层环绕后张拉预应力混凝土施工技术。

排沙洞预应力混凝土每个衬砌单元长 12.05m，衬砌厚度 0.65m，每个衬砌单元布置了 24 束锚索，分内、外两层布置，每束锚索水平间距 0.5m，层间距 0.13m，锚索环绕两圈 720°包角后相交于锚具槽内；每个衬砌单元左右侧预留 24 个锚具槽，锚具槽为两侧不对称间隔布置，锚具槽为倒楔形棱台状，几何尺寸为 1.54m × (0.28m, 0.3m) × 0.25m(长 × 宽(顶宽, 底宽) × 深)，锚索、锚具槽的布置及锚索张拉顺序见图 2-4。排沙洞预应力段混凝土施工参数见表 2-3。

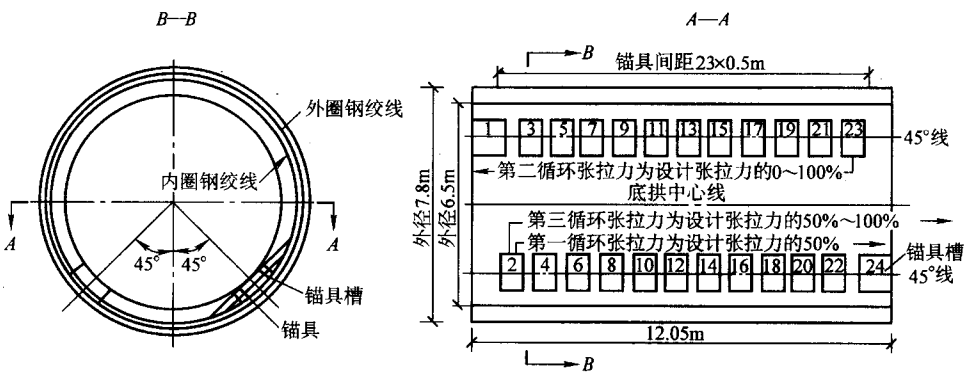


图 2-4 锚索、锚具槽布置及锚索张拉顺序

表 2-3 排沙洞预应力混凝土施工参数

部 位	衬砌洞径 /m	预应力段洞长 /m	锚索 /m	预应力混凝土 /m ³	工期 /月
1 号排沙洞	6.5	735.05	140251.2	16371.3	14
2 号排沙洞	6.5	723.00	137952.2	16571.9	10
3 号排沙洞	6.5	735.05	140251.2	17059.4	12
合 计		2193.10	418454.6	50002.6	

(3) 主要施工工艺

排沙洞无粘结预应力混凝土施工工艺流程见图 2-5。

(4) 预应力锚索的加工

锚索截长及缠绕成型是在加工厂进行的。加工厂内设有与排沙洞每一组张拉锚索实际缠绕轨迹相同的 1:1 加工平台和两个旋转平台，在加工平台上锚索的缠绕轨迹是由间隔 0.6m 的钢筋支撑点控制的，在这个缠绕轨迹上标有排沙洞底拱中心线和锚具槽中心线的标记，以便对缠绕加工的锚索作上安装标记。锚索加工时，将出厂的两盘锚索吊放在两个旋转平台上，从每个锚索盘中抽出一根锚索头

固定在加工平台标有锚具的位置，顺着加工平台将锚索沿设计轨迹缠绕，每间隔0.6m进行一次绑扎固定，同时在锚索上用油漆标明排沙洞底拱中心线和锚具槽中心线位置，以保证锚索的后续安装精度。最后，将加工好的锚索吊放在改装汽车上，运进洞内施工现场。

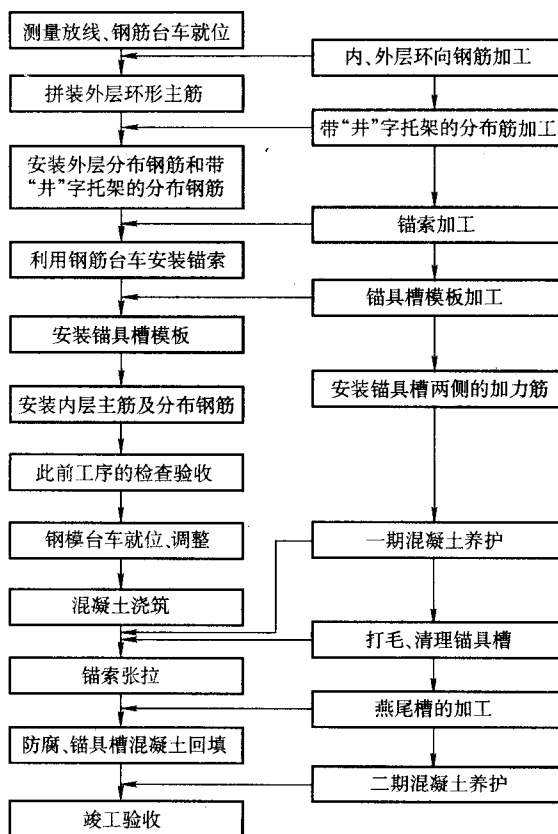


图 2-5 排沙洞预应力混凝土施工流程图

(5) 钢筋的加工

在加工厂按排沙洞钢筋图，将环形内、外层主钢筋加工成4节便于运输和现场组装的弧形段；锚索安装是利用焊接在分布钢筋上的“井”字托架进行的，“井”字托架的作用是控制锚索的安装位置、固定锚索。在加工厂按锚索布置的位置将“井”字托架焊接在分布钢筋上，这一加工措施进一步保证了锚索的安装精度，使经张拉后的预应力混凝土受力分布均匀，加快了施工进度，保证了施工质量，同时也减少了洞内施工工序。