



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院

NORTHWEST HYDRO CONSULTING ENGINEERS, CHECC

水电技术专著系列

水工钢筋混凝土结构设计 技术研究

白俊光 魏坚政 石广斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院

NORTHWEST HYDRO CONSULTING ENGINEERS, CHECC

水电技术专著系列

水工钢筋混凝土结构设计 技术研究

白俊光 魏坚政 石广斌 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—1996)修订专题研究成果。全书系统介绍了新《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)采用的可靠度、设计和结构分析基本原则;详细地阐述和讨论了钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算方法和无抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法,配置抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算公式、裂缝开展宽度计算公式、预应力闸墩设计基本原则和计算公式,以及简单锚块预应力闸墩“应力修正法”计算公式、独立牛腿各种剪跨比条件下牛腿配筋计算公式,非杆件体系混凝土结构裂缝控制验算原则、非杆件体系结构配筋计算原则等所进行的结构模型试验、数值仿真分析、公式的推导和提炼过程。

书中所介绍的成果绝大部分已被写入 DL/T 5057—2009,对新的水工混凝土结构设计规范理解和应用具有重要帮助。本书可供工程设计人员、科研人员和工程管理人员阅读,也可供其他有关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢筋混凝土结构设计技术研究/白俊光,魏坚政,
石广斌著. —北京:中国水利水电出版社,2009
(中国水电顾问集团西北勘测设计研究院水电技术专著
系列)

ISBN 978-7-5084-6622-4

I. 水… II. ①白…②魏…③石… III. 水工结构:钢筋
混凝土结构-结构设计-研究 IV. TV332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116042 号

书 名	中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 NORTHWEST HYDRO CONSULTING ENGINEERS, CHECC 水电技术专著系列 水工钢筋混凝土结构设计技术研究
作 者	白俊光 魏坚政 石广斌 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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 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	184mm×260mm 16 开本 22.25 印张 528 千字
版 次	2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	89.00 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

QIAN YAN 前言

《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—1996)(以下简称《水工 96 规范》)自 1996 年 9 月 5 日发布,至今已实施 10 年,它对保证我国水工混凝土结构设计质量、推动技术发展,发挥了重要的指导作用。但在实施过程中,工程设计人员、科研人员提出许多宝贵意见或建议,如《水工 96 规范》考虑混凝土保护层厚度的影响是合理的,但存在着钢筋用量增长过多的问题;按理论分析采用主拉应力图形面积确定配筋数量是合理的,但在设计中如何应用也是较难处理的;独立牛腿承受竖向力所需的受拉钢筋计算公式中,当 $a \leq 0.3h_0$ 时,取 $a=0.3h_0$ 进行配筋计算,往往造成牛腿水平受拉纵筋配筋过多的不合理现象;配置抗冲切钢筋混凝土板与无抗冲切钢筋混凝土板在受冲切承载力计算上存在不衔接;钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算方法中存在抗力与作用有关的不合理现象;预应力闸墩已广泛应用,但缺乏统一的设计原则等。为了能在新的《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)修订过程中,把上述问题弄清楚,并提取出可靠的实践经验和科研成果写入规范,规范修订组在深入研究《水工 96 规范》同时,广泛收集各种资料、意见、建议,认真吸收全国有关单位和专家的有益建议和宝贵经验,经分析归纳,确定了《预应力闸墩设计方法研究》、《牛腿试验与牛腿配筋计算公式改进的研究》、《大体积混凝土结构裂缝宽度与钢筋应力关系研究》、《非杆件体系钢筋混凝土结构的配筋计算原则研究》、《大保护层钢筋混凝土梁正截面裂缝宽度的试验研究》、《钢筋混凝土裂缝开展宽度与钢筋应力之间关系的试验》、《配置抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力试验研究》、《无抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法改进的研究》、《钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算方法改进的研究》等 20 多项专题研究,经过近两年专题研究,取得了丰硕的成果,为《水工 96 规范》的修订奠定了坚实的理论和实践基础。

此次专题研究内容丰富,形成了 200 多万字专题研究报告,由于篇幅所限,本书不能一一叙述,而是加以归纳整理,吸取了其中的精华,重点介绍了部分具有重要创新的研究内容和成果。

(1) 通过国内外钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算方法对比分析研究,

提出了适用于各种荷载情况的受剪承载力统一的计算公式,受剪承载力公式不因荷载形式的不同而不同,即抗力与作用无关,计算方法简便。

(2) 通过对国内外无抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法研究成果分析,在计算公式中增加了考虑荷载作用面形状影响、板中孔洞影响和截面高度影响等因素,比《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和美国《房屋建筑混凝土结构规范》(ACI 318)规范对荷载作用面形状影响和荷载作用位置两种因素取小值的规定更简化。

(3) 通过配置抗冲切钢筋混凝土板的冲切试验研究,提出了配置抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力的改进计算公式,使混凝土板冲切破坏计算理论更趋于合理。

(4) 通过 65~150mm 大保护层钢筋混凝土梁正截面裂缝宽度的试验研究,并结合前人的钢筋混凝土梁正截面裂缝宽度的试验成果,提出了新的裂缝开展宽度计算公式。

(5) 通过对国内外有关混凝土结构裂缝控制方法分析,开展了钢筋混凝土裂缝宽度与钢筋应力之间关系的试验研究,以及应用平面钢筋混凝土有限单元法对非杆件体系混凝土结构的钢筋应力、裂缝分布及宽度的影响分析,提出了非杆件体系混凝土结构裂缝验算方法和裂缝控制的基本原则。

(6) 通过预应力闸墩模型试验和理论与数值仿真分析,建立了预应力闸墩的“悬吊拉杆拱”受力模型,把预应力闸墩数值分析和模型试验的数据与材料力学法计算结果进行对比分析,提出了预应力闸墩设计基本原则和计算公式以及简单锚块预应力闸墩“应力修正法”计算公式。

(7) 根据独立牛腿模型试验数据分析和破坏现象分析,提出了各种剪跨比条件下牛腿配筋计算公式。

(8) 通过应力图形法、有限单元法与按内力配筋三者之间的比较分析,提出了按主拉应力分量图形面积确定配筋的新方法,完善了非杆件体系结构配筋计算基本原则和方法。

(9) 通过调研国内外混凝土结构耐久性研究成果和国内部分水工建筑物的调查结果,对影响混凝土结构耐久性的混凝土裂缝、渗漏和溶蚀、冲刷磨损和气蚀破坏、冻融破坏、钢筋锈蚀、化学侵蚀、碱-骨料反应等因素的机理和治理措施进行了归纳整理。

本书是集体智慧的结晶,作者只是在《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)修订各项专题成果基础上进行了归纳整理而撰稿成书。参加专题研究的单位有西北勘测设计研究院、郑州大学、河海大学、武汉大学、

大连理工大学。全书共分 10 章，以下分别列出各章研究内容的主要参加人。第 1 章，西北勘测设计研究院石广斌、余培琪、冯兴中，武汉大学侯建国、安旭文；第 2~第 5 章，西北勘测设计研究院魏坚政、石广斌、石波、费秉宏，郑州大学李平先、韩菊红；第 6 章，西北勘测设计研究院石广斌、魏坚政、张曼曼，河海大学汪基伟，郑州大学李平先、韩菊红；第 7 章，西北勘测设计研究院张尚信、魏坚政、石广斌、余培琪，武汉大学侯建国、何亚伯、曾又林；第 8、第 9 章，西北勘测设计研究院石广斌、魏坚政、张曼曼，河海大学汪基伟、陈礼河；第 10 章，西北勘测设计研究院石广斌、石波，大连理工大学贡金鑫。

在本项目专题科研试验、数值分析的数据整理和分析中，河海大学的周氏教授，郑州大学丁自强教授，武汉大学的贺采旭教授等，提出了大量的宝贵意见，在此一并致谢。

《水工混凝土结构设计规范》修订专题研究项目总负责：白俊光；技术总负责：杨经会；技术总顾问：魏彩章；项目负责：魏坚政；专题负责：石广斌。

本书第 1、第 9、第 10 章由白俊光执笔编写；第 2、第 5、第 7 章由魏坚政执笔编写；第 3、第 4、第 6、第 8 章由石广斌执笔编写；全书由白俊光审阅并统稿。

西北勘测设计研究院魏彩章教授级高工对全书进行了认真的评阅，并提出了宝贵意见，在此表示感谢！

书中引用了国内外专家和同行的相关研究成果，在此一并致谢！

鉴于水工混凝土结构体形的复杂性、受载的多样性，许多问题一时还难以彻底弄清，再加之我们研究水平有限和时间仓促，书中的疏漏之处在所难免，敬请阅者斧正。

作者

2009 年 3 月 31 日于西安

符 号

- E_c ——混凝土弹性模量
 E_s ——钢筋弹性模量
 G_c ——混凝土剪变模量
 ν_c ——混凝土泊松比
C20——表示边长为 150mm 的立方体抗压强度标准值为 20N/mm^2 的混凝土强度等级
 f_{ck} 、 f_c ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值
 f_{tk} 、 f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值
 f_{yk} ——普通钢筋强度标准值
 f_{ptk} ——钢棒、钢丝、钢绞线、螺纹钢筋作为预应力钢筋时的强度标准值
 f_y 、 f'_y ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值
 f_{py} 、 f'_{py} ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度设计值
 f_{yv} 、 f_{yh} ——竖向、水平箍筋抗拉强度设计值
 M 、 N 、 T 、 V ——由各作用（荷载）标准值乘以相应的作用分项系数后所产生的效应总和并再乘以结构重要性系数 γ_0 及设计状况系数 ψ 后的弯矩、轴向力、扭矩、剪力设计值
 M_k 、 N_k ——由各作用（荷载）标准值所产生的效应总和并乘以结构重要性系数 γ_0 后的弯矩、轴向力
 N_p ——后张法构件预应力钢筋及非预应力钢筋的合力
 N_{p0} ——混凝土法向应力等于零时预应力钢筋及非预应力钢筋的合力
 V_c ——混凝土的受剪承载力
 V_{sv} 、 V_{sh} ——竖向、水平箍筋的受剪承载力
 V_{sb} ——弯起钢筋的受剪承载力
 σ_{ck} ——在荷载效应的标准组合下抗裂验算边缘的混凝土法向应力
 σ_{pc} ——由预加应力产生的混凝土法向应力
 σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土中的主拉应力、主压应力
 σ_s 、 σ_p ——正截面承载力计算中纵向普通钢筋、预应力钢筋的应力
 σ_{sk} ——按荷载效应的标准组合计算的构件的纵向受拉钢筋应力
 σ_{con} ——预应力钢筋张拉控制应力
 σ_{p0} 、 σ'_{p0} ——受拉区、受压区预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力
 σ_{pe} 、 σ'_{pe} ——受拉区、受压区预应力钢筋的有效预应力

σ_1 、 σ'_1 ——受拉区、受压区预应力钢筋在相应阶段的预应力损失值
 a ——纵向非预应力和预应力受拉钢筋合力点至截面近边的距离
 a_s 、 a'_s ——纵向非预应力受拉钢筋合力点、受压钢筋合力点至截面近边的距离
 a_p 、 a'_p ——受拉区纵向预应力钢筋合力点、受压区纵向预应力钢筋合力点至截面近边的距离
 b ——矩形截面宽度，T形、I形截面腹板的宽度
 b_f 、 b'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区翼缘的计算宽度
 c ——混凝土保护层厚度
 d ——钢筋直径
 e 、 e' ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点的距离
 e_c ——混凝土受压区的合力点到截面重心的距离
 e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距
 e_{p0} 、 e_{pn} ——换算截面重心、净截面重心至预应力钢筋及非预应力钢筋合力点的距离
 h ——截面高度
 h_0 ——截面有效高度，即受拉钢筋的重心至截面受压边缘的距离
 h_f 、 h'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区翼缘的高度
 h_w ——截面腹板的高度
 i ——回转半径
 l_a ——纵向受拉钢筋的最小锚固长度
 l_0 ——计算跨度或计算长度
 r_c ——曲率半径
 s ——箍筋或分布钢筋的间距
 x ——混凝土受压区计算高度
 x_b ——界限受压区计算高度
 y'_c ——混凝土截面重心至受压区边缘的距离
 y_0 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维的距离
 y_p 、 y'_p ——受拉区、受压区的预应力合力点至换算截面重心的距离
 y_s 、 y'_s ——受拉区、受压区的非预应力钢筋重心至换算截面重心的距离
 z ——纵向受拉钢筋合力点至混凝土受压区合力点之间的距离
 A ——构件截面面积
 A_c ——混凝土截面面积
 A'_c ——混凝土受压区的截面面积
 A_0 ——构件换算截面面积
 A_n ——构件净截面面积
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的截面面积
 A_{te} ——有效受拉混凝土截面面积
 A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积

A_{svl} 、 A_{stl} ——受剪、受扭计算中单肢箍筋的截面面积
 A_{sv} 、 A_{sh} ——同一截面内各肢竖向箍筋、水平箍筋的全部截面面积
 A_{sb} 、 A_{pb} ——同一弯起平面内非预应力、预应力弯起钢筋的截面面积
 w_{max} ——最大裂缝宽度
 w_{lim} ——最大裂缝宽度限值
 α_{cr} ——裂缝宽度验算时考虑构件受力特征的系数
 α_{ct} ——混凝土拉应力限制系数
 α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值
 β_1 ——混凝土局部受压时的强度提高系数
 γ_d ——结构系数
 γ_G ——永久作用（荷载）分项系数
 γ_Q ——可变作用（荷载）分项系数
 γ_A ——偶然作用（荷载）分项系数
 γ_0 ——结构重要性系数
 η ——偏心受压构件考虑二阶效应影响的轴向压力偏心距增大系数；局部荷载或集中反力作用面的形状系数
 λ ——剪跨比
 ξ ——相对受压区计算高度
 ξ_b ——相对界限受压区计算高度，即纵向受拉钢筋屈服和受压混凝土破坏同时发生时的相对受压区计算高度
 ρ ——纵向钢筋配筋率
 ρ_{min} ——最小配筋率
 ρ_{sv} ——竖向箍筋或竖向分布钢筋的配筋率
 ρ_{sh} ——水平箍筋或水平分布钢筋的配筋率
 ρ_{te} ——纵向受拉钢筋的有效配筋率
 ρ_v ——间接钢筋的体积配筋率；箍筋的体积配筋率
 φ ——轴心受压构件的稳定系数
 ψ ——设计状况系数；裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数
 ω ——荷载分布的影响系数

目 录

前言

符号

第1章 概述	1
1.1 水工混凝土结构特点	1
1.2 水工混凝土结构设计可靠度	2
1.3 水工混凝土结构设计基本原理	3
1.4 混凝土结构分析基本原则	5
1.5 材料	7
参考文献	11
第2章 钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算方法的改进	13
2.1 概况	13
2.2 不同荷载形式的试验研究结果	22
2.3 受弯构件受剪承载力计算方法的改进	22
2.4 受弯构件受剪承载力计算方法	25
2.5 算例分析	29
参考文献	34
第3章 无抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法的改进	36
3.1 概况	36
3.2 国内外研究现状简介	36
3.3 影响钢筋混凝土板受冲切承载力的主要因素	42
3.4 无抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法的改进	49
3.5 算例分析	50
参考文献	51
第4章 配置抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算	54
4.1 概况	54
4.2 配置抗冲切钢筋混凝土板抗冲切试验	58
4.3 试验结果及分析	62
4.4 新的配置抗冲切钢筋混凝土板受冲切承载力计算方法	72
4.5 算例分析	77
参考文献	82

第5章 大保护层钢筋混凝土裂缝宽度验算	84
5.1 概况	84
5.2 大保护层钢筋混凝土梁正截面裂缝宽度试验	95
5.3 大保护层钢筋混凝土梁正截面裂缝宽度试验结果及分析	99
5.4 对比分析	111
5.5 梁底裂缝宽度	114
5.6 算例分析	116
参考文献	118
第6章 非杆件体系混凝土结构裂缝控制验算	120
6.1 概况	120
6.2 混凝土裂缝宽度与钢筋应力关系的试验	122
6.3 材料本构关系	135
6.4 钢筋混凝土有限元分析的工程实例	138
6.5 非杆件体系混凝土结构裂缝控制验算原则	160
6.6 算例分析	161
6.7 小结	162
参考文献	163
第7章 预应力闸墩结构设计技术的研究	167
7.1 概况	167
7.2 预应力混凝土闸墩的结构形式	170
7.3 基于模型试验的预应力闸墩受力性能的研究	174
7.4 基于数值仿真分析的预应力闸墩受力性能的研究	184
7.5 闸墩体内锚固区受力性能分析	200
7.6 应力修正法的研究	204
7.7 预应力闸墩的预应力作用	210
7.8 弧形闸门预应力混凝土闸墩设计基本原则	227
7.9 工程实例	243
参考文献	261
第8章 独立牛腿配筋计算技术	264
8.1 概况	264
8.2 小牛腿试件试验	266
8.3 大牛腿试件配筋试验	278
8.4 独立牛腿结构配筋计算基本原则	290
8.5 算例分析	291
参考文献	293
第9章 非杆件体系结构配筋设计技术	295
9.1 概况	295

9.2	弹性应力图形法配筋基本原则	295
9.3	受力钢筋方向拉应力图形配筋与主拉应力图形配筋的比较	297
9.4	杆件体系构件按内力配筋与按弹性应力图形法配筋的比较	299
9.5	弹性应力图形面积配筋与钢筋混凝土有限元法计算的比较	310
9.6	小结	315
	参考文献	316
第 10 章	钢筋混凝土耐久性	318
10.1	概况	318
10.2	混凝土裂缝	321
10.3	渗漏和溶蚀	325
10.4	冲刷磨损和气蚀破坏	327
10.5	冻融破坏	327
10.6	钢筋锈蚀	330
10.7	化学侵蚀	333
10.8	碱-骨料反应	337
	参考文献	339

第1章 概述

1.1 水工混凝土结构特点

混凝土结构可分为杆件和非杆件两大结构体系。非杆件结构体系在水工建筑物中是普遍存在的，如水电站厂房蜗壳和尾水管、混凝土大坝孔口、泄洪闸预应力闸墩、压力钢管镇墩、隧洞混凝土衬砌等。这些非杆件体系结构根据其形状、尺寸比值、体积、受力特性可归纳为4类。

(1) 形状不规则。这类结构的断面形状不仅不规则，而且轮廓尺寸在空间变化很大，例如水电站厂房蜗壳（图 1.1-1）。

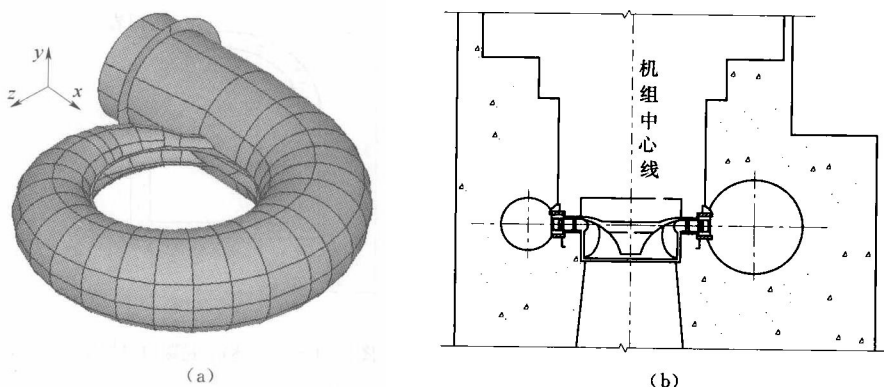


图 1.1-1 蜗壳

(a) 流动立体图；(b) 横剖面图

(2) 构件尺寸比值偏小。这类结构形状虽较规整，但尺寸比值已超出一般杆件的范畴，例如水电站厂房尾水管顶板（图 1.1-2）， $h=762\text{cm}$ ， $l=670\text{cm}$ ， $l/h=0.88<3.0$ ，一般 $l/h>3.0$ 可按杆件体系结构进行分析。

(3) 体积大、孔口多。这类结构的外部混凝土范围很大，其局部与整体之间很难确定明确界限，例如混凝土坝内廊道（图 1.1-3），廊道断面面积相对坝体断面面积很小（一般不到 1.0%）。

(4) 地下结构。这类结构与外部围岩接触，例如隧洞混凝土衬砌（图 1.1-4）。

非杆件体系结构一般具有如下特点：①结构计算很难简化成杆件，若简化为杆件，常会引起结构内力计算过于偏大或过于偏小；②有些结构除体形复杂外，同时还具有大体积混凝土结构特点，因此，需要考虑温度应力；③有些结构的两端或底部受到老混凝土或基岩的约束，需要考虑温度变化的影响；④有些结构较难进行原型或模型试验，因此，难以明确其破坏机理；⑤有些结构空间整体性强，不仅体形很难简化成平面应变问题，就其所

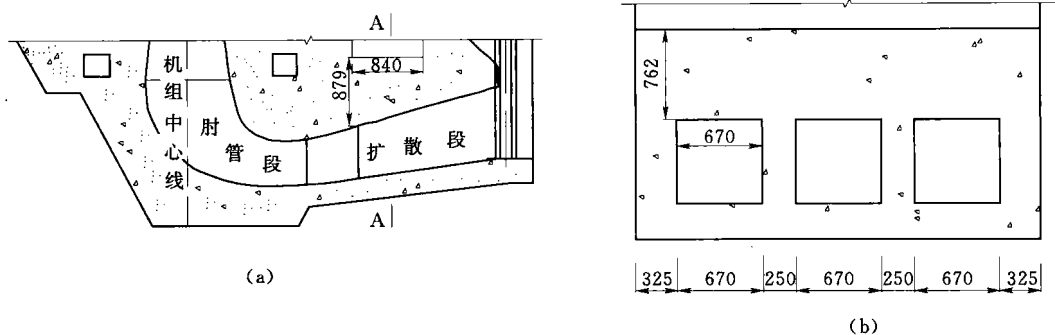


图 1.1-2 尾水管 (尺寸单位: cm)

(a) 流道纵剖面; (b) A—A 剖面



图 1.1-3 混凝土坝内廊道

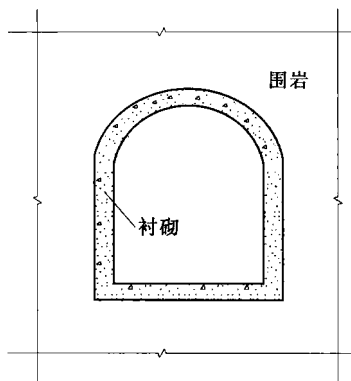


图 1.1-4 隧洞混凝土衬砌

受的外荷载也很难简化到二维分析平面内,若简化为平面问题分析,常会引起较大的失真;⑥有些则缺乏实际工程的破损实例,其承载能力及正常使用极限状态很难提出明显标志和计算模型。

1.2 水工混凝土结构设计可靠度

新修订的《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)(以下简称《新规范》)分项系数设计表达式仍继续沿用《水工 96 规范》的 5 个系数,即结构重要性系数 γ_0 、设计状况系数 ψ 、材料性能分项系数 $\gamma_s(\gamma_c)$ 、作用分项系数 $\gamma_Q(\gamma_G)$ 和结构系数 γ_d 。其中,除材料性能分项系数 $\gamma_s(\gamma_c)$ 略有提高外,其他 4 个系数基本没有改变。钢筋材料性能分项系数 γ_s 由原来的“1.08”调整到“1.10”;混凝土材料性能分项系数 γ_c 由原来的“1.35”调整到“1.40”。为了了解材料性能分项系数 $\gamma_s(\gamma_c)$ 改变后的轴拉、受弯、大偏压、轴压、受剪、受扭、小偏压、受冲切等构件可靠度的变化,规范修订组进行了“水工混凝土结构设计规范可靠度校准分析”专题研究。可靠度计算结果见表 1.2-1。由表 1.2-1 可得如下结果。

(1) 与《水工 96 规范》的安全度设置水平相比,由于混凝土及钢筋的材料性能分项

系数有所提高，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级结构构件的总体安全度水平略高于《水工 96 规范》相应结构安全级别的安全度水平，但提高幅度不超过 5%。

表 1.2-1 可靠指标计算结果

结构安全级别	计算方案	符号	轴拉	受弯	大偏压	受剪	受扭	轴压	小偏压	受冲切	延性		脆性		总平均 β_z
											β_r	$[\beta]$	β_c	$[\beta]$	
Ⅰ	水工 96 规范	β_1	4.076	4.042	4.158	3.922	4.120	4.342	4.264	3.982	4.092	3.7	4.126	4.2	4.113
	新规范	β_z	4.186	4.144	4.290	4.080	4.286	4.498	4.414	4.130	4.207	3.7	4.277	4.2	4.251
		$D(\%)$	2.70	2.52	3.17	4.029	4.03	3.59	3.52	3.72	2.80		3.65		3.34
Ⅱ	水工 96 规范	β_1	3.418	3.434	3.590	3.468	3.630	3.882	3.796	3.594	3.481	3.2	3.674	3.7	3.602
	新规范	β_z	3.532	3.540	3.722	3.636	3.800	4.042	3.947	3.744	3.598	3.2	3.827	3.7	3.741
		$D(\%)$	3.33	3.09	3.67	4.84	4.68	4.11	3.97	4.160	3.36		4.16		3.87
Ⅲ	水工 96 规范	β_1	2.682	2.754	2.954	2.968	3.090	3.370	3.272	3.168	2.797	2.7	3.174	3.2	3.032
	新规范	β_z	2.795	2.862	3.087	3.142	3.257	3.533	3.427	3.317	2.914	2.7	3.327	3.2	3.172
		$D(\%)$	4.21	3.91	4.49	5.86	5.39	4.85	4.730	4.690	4.210		4.82		4.610

注 轴拉、受弯、大偏压等构件发生的破坏类型为延性破坏；受剪、受扭、轴压、小偏压、受冲切等构件发生的破坏类型为脆性破坏。

(2) Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级延性构件的可靠指标均大于《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50199—1994) 推荐的目标可靠指标，而Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级脆性构件的可靠指标则略低于 GB 50199—1994 推荐的目标可靠指标，但最大偏差幅度不超过 0.13。由此说明，《水工 96 规范》的安全度设置水平总体上是合适的，规范修订时可在《水工 96 规范》安全度设置水平的基础上，对脆性破坏构件的安全度水平作适当提高。

(3) 同一破坏类型的结构构件，可靠指标总平均值相差并不悬殊，以Ⅱ级构件为例，属延性破坏的构件除大偏压的可靠指标 β 为 3.59 外，轴拉、受弯构件的可靠指标 β 均在 3.2 ± 0.25 范围内；而属脆性破坏的构件如轴压、受剪、受扭、小偏压、受冲切的可靠指标 β 在 3.7 ± 0.25 范围内，由此说明，延性构件和脆性构件均具有较好的可靠度一致性。

1.3 水工混凝土结构设计基本原理

在《水工 96 规范》实施以前，我国水工混凝土结构设计采用的是单一安全系数极限状态设计方法；实施以后，采用以概率理论为基础的极限状态设计法，以可靠度指标度量结构构件的可靠度，采用分项系数的设计表达式进行设计。结构构件设计要进行承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算。

承载能力极限状态应考虑两种作用效应组合，即基本组合与偶然组合，与《水工 96 规范》的规定相同。所谓基本组合，是指承载能力极限状态设计时，在持久状况或短暂状况下，永久作用（荷载）与可变作用（荷载）的组合；所谓偶然组合，是指承载能力极限状态设计时，永久作用（荷载）、可变作用（荷载）与一种偶然作用（荷载）的组合。

对于正常使用极限状态，《水工 96 规范》规定，按荷载的持久性采用两种组合，即作用效应的短期组合与长期组合或短期组合并考虑部分荷载的长期作用的影响。《新规范》

参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)的规定,将作用效应的短期组合、长期组合改称为作用效应的标准组合、准永久组合或标准组合并考虑长期作用的影响,使作用效应组合的名称与作用代表值的名称相对应,方便设计应用。所谓标准组合,是指正常使用极限状态验算时,对永久作用(荷载)、可变作用(荷载)采用标准值为作用(荷载)代表值的组合,用于抗裂度验算;所谓准永久组合,是指正常使用极限状态验算时,对可变作用采用准永久值为作用代表值的组合,用于抗裂验算;所谓标准组合并考虑长期作用的影响,是指在裂缝宽度和挠度的计算公式中,结构构件的内力和钢筋应力按标准组合进行计算,并对标准组合下的裂缝宽度和刚度计算公式考虑长期作用的影响进行了修正。但由于可变作用标准值的长期组合系数 ρ 值,在GB 50199—1994中仅给出了计算方法,鉴于水工建筑物荷载统计的特殊性,相关规范均无法给出 ρ 值,使作用效应的长期组合(即相当于“准永久组合”)无法计算。因此,《新规范》对正常使用极限状态的作用效应组合的规定仅为“计算作用效应的标准组合或标准组合并考虑长期作用的影响”。

1.3.1 承载能力极限状态计算

水工结构构件的承载能力极限状态,应按作用效应的基本组合或偶然组合,采用下列极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 \psi S \leq \frac{1}{\gamma_d} R \quad (1.3-1)$$

$$R = R(f_d, a_k) \quad (1.3-2)$$

式中: S 为承载能力极限状态的作用效应组合的设计值; R 为结构构件的抗力设计值,应按各种结构构件的承载力计算公式确定; γ_0 为结构重要性系数,见表 1.3-1; ψ 为设计状况系数,对应于持久状况、短暂状况、偶然状况,应分别取为 1.0、0.95 及 0.85; γ_d 为结构系数,见表 1.3-2; $R(\cdot)$ 为结构构件的抗力函数; f_d 为材料强度设计值; a_k 为结构构件几何参数的标准值。

表 1.3-1 水工建筑物结构安全级别
及结构重要性系数 γ_0

水工建筑物级别	水工建筑物结构安全级别	结构重要性系数 γ_0
1	I	1.1
2, 3	II	1.0
4, 5	III	0.9

表 1.3-2 承载能力极限状态计算时
的结构系数 γ_d 值

素混凝土结构		钢筋混凝土及预应力混凝土结构
受拉破坏	受压破坏	
2.0	1.3	1.2

注 1. 承受永久作用(荷载)为主的构件,结构系数 γ_d 应按表中数值增加 0.05。

2. 对于新型结构或荷载不能准确估计,结构系数 γ_d 可适当提高。

对于基本组合,作用效应组合的设计值 S 应按式 (1.3-3) 计算:

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \gamma_{Q2} S_{Q2k} \quad (1.3-3)$$

式中: S_{Gk} 为永久作用效应的标准值; S_{Q1k} 为一般可变作用效应的标准值; S_{Q2k} 为可控制的可变作用效应的标准值; γ_G 、 γ_{Q1} 、 γ_{Q2} 为永久作用、一般可变作用、可控制的可变作用的分项系数,见表 1.3-3。

对于偶然组合,作用效应组合的设计值 S 应按下列公式计算,其中与偶然作用同时

出现的某些可变作用，可对其标准值作适当折减；偶然组合中每次只考虑一种偶然作用。

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \gamma_{Q2} S_{Q2k} + \gamma_A S_{Ak} \quad (1.3-4)$$

式中： S_{Ak} 为偶然作用的代表值产生的效应，偶然作用的代表值可按《水工建筑物抗震设计规范》（DL 5073—2000）和《水工建筑物荷载设计规范》（DL 5077—1997）的规定确定； γ_A 为偶然作用分项系数，见表 1.3-3。

表 1.3-3 作用（荷载）分项系数

作用类型	永久作用	一般可变作用	可控的可变作用	偶然作用
	γ_G	γ_{Q1}	γ_{Q2}	γ_A
作用分项系数	1.05 (0.95)	1.2	1.1	1.0

注 1. 当永久作用效应对结构有利时， γ_G 应按括号内数值取用。

2. 可控的可变作用是指可以严格控制使其不超出规定限值，如在水电站厂房设计中，由制造厂家提供的吊车最大轮压值；设备重力按实际铭牌确定、堆放位置有严格规定并加设垫木的安装间楼面堆放设备荷载等。

水工混凝土结构设计时，作用（荷载）的标准值可按 DL 5077—2000 和 DL 5073—2000 的规定确定。作用（荷载）分项系数，承载能力极限状态设计时，应按 DL 5077—1997 的规定采用，但不应小于表 1.3-3 中的数值；正常使用极限状态设计时，均应取为 1.0。

1.3.2 正常使用极限状态验算

结构构件的正常使用极限状态，应采用下列极限状态设计表达式：

$$\gamma_0 S_k \leq C \quad (1.3-5)$$

式中： S_k 为正常使用极限状态的作用效应组合值，按标准组合（用于抗裂验算）或标准组合并考虑长期作用的影响（用于裂缝宽度和挠度验算）进行计算； C 为结构构件达到正常使用要求所规定的变形、裂缝宽度或应力等的限值。

1.4 混凝土结构分析基本原则

由于结构布置和体形设计不合理或不科学，往往会造成结构受力、构造配筋等不合理的现象，因此，在对结构构件进行两种极限状态分析之前，应首先按照有关规范规定，确定合理的结构布置和结构构件体形。在所有的情况下均应对结构的整体进行分析；另外，还要对结构中的重要部位、形状突变部位以及内力和变形有异常变化的部分（例如较大孔洞周围、节点及其附近、支座和集中荷载附近等）作更详细的局部分析。

在进行结构的两种极限状态分析时，除要采取相应的荷载组合外，还要在模型建立、分析方法、荷载施加等方面遵循一定的原则。

1.4.1 模型建立

(1) 结构模型建立所采用的计算图形、几何尺寸、边界条件、作用取值与组合、材料性能计算指标、初始应力和变形状况等，应符合结构的实际工作状况，如果结构复杂，可对结构体形进行适当的简化，如在水电站厂房整体三维有限元分析时，蜗壳的座环可简化成杆件或板结构，发电机层以上的排架柱也可简化成杆件结构，楼板上的小孔洞也可以忽略，而蜗壳和尾水管轮廓应遵循厂家提供的蜗壳和尾水管单线图，简化后的模型应能反映