

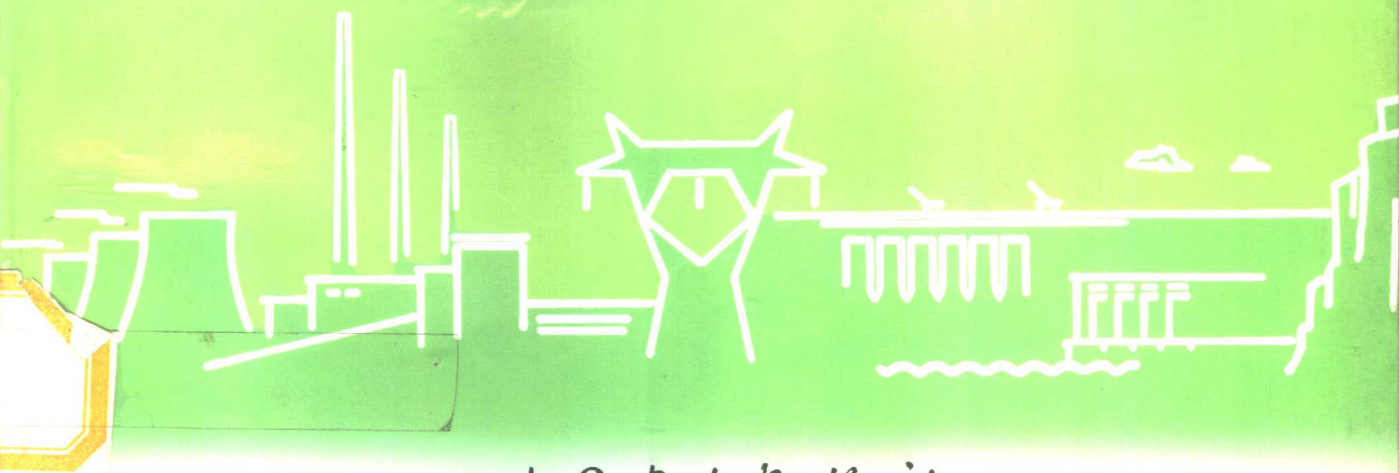


普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

特种结构

武汉水利电力大学 李传才 主编



中国电力出版社

995585

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

特种结构

武汉水利电力大学 李传才 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国电力出版社

内 容 提 要

本书讲述了水利水电工程中的混凝土坝内廊道和孔口结构,坝内及坝后压力管道,水电站厂房中的机墩、蜗壳、尾水管结构,以及引水隧洞、水工渡槽等水工特种结构;还讲述了建筑工程中的挡土墙、烟囱、筒仓、冷却塔等特种结构。对这些结构的选型、设计基本原理、计算方法和构造特点作了较为详细的论述。各章还附有工程设计实例和适量的计算图表。内容尽量依据最新的或现行的设计规范来编写,并尽量反映已在工程中广泛采用的科研成果和最新进展。

本书可作为高等学校水利水电工程类和建筑工程类专业本科学生的选修课教材,也可供土建类有关专业的师生和设计、施工、科研单位的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种结构/李传才主编. - 北京:中国电力出版社, 1998

高等学校教材

ISBN 7-80125-524-0

I. 特… II. 李… III. 水工结构 IV. TV3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 03105 号

出版社出版

<http://www.cepp.com.cn>

小学印刷厂印刷

所发行·各地新华书店经售

*

1998 年 11 月第一版 1998 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 439 千字

印数 0001—2350 册 定价 19.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书主要讲述了水利水电工程和建筑工程中常用的特种结构。主要有混凝土坝内的廊道和孔口结构，坝内及坝后压力管道，水电站厂房中的机墩、蜗壳、尾水管结构，以及引水隧洞、水工渡槽等水工特种结构；还有建筑工程中的挡土墙、钢筋混凝土烟囱、筒仓、双曲线冷却塔等特种结构。全书对这几类结构的选型、布置、设计基本原理，计算方法和构造特点作了较为详细的论述，并附有设计实例及其计算图表，以便于学生自学和对所讲内容加深理解。这几类特种结构所涉及到的各部门和行业的规范较多，这些规范编制和颁发实施的时间也不一致，本书在编写过程中尽量依据最新的规范来编写，并尽量反映业已在工程中广泛采用的研究成果及最新进展，使本书的内容具有先进性。

本书可做为高等学校水利水电工程类和建筑工程类专业本科的选修课教材，也可以做为土建类专业的师生及设计、施工和科研单位的工程技术人员的参考书。

本书由武汉水利电力大学李传才主编。编写分工为：第一章和第二章中的第一、二、三、八节由李传才编写；第二章中的第四、五、六、七节由武汉水利电力大学陈跃庆编写；第三、四章由合肥工业大学方诗圣编写；第五章由大连理工大学宋玉普编写；第六章由武汉水利电力大学田传谦编写；第七章由武汉水利电力大学侯建国编写。全书由河海大学周氏教授担任主审。周氏教授对书稿提出了宝贵意见，特在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

1998年6月

EA077106

目 录

前 言

第一章 概 论	1
第二章 水工非杆件结构	4
第一节 水工非杆件结构的设计原则	4
第二节 混凝土坝内廊道及孔口结构	10
第三节 混凝土坝内及下游坝面压力管道	24
第四节 机墩结构	37
第五节 蜗壳结构	54
第六节 尾水管结构	61
第七节 引水隧洞结构	68
第八节 钢筋混凝土有限元法在水工非杆件结构中的应用	84
第三章 水工渡槽	95
第一节 水工渡槽概述	95
第二节 梁式渡槽	97
第三节 拱式渡槽	109
第四节 新型渡槽和特大型渡槽设计方法简介	117
第五节 水工渡槽工程设计实例	123
第四章 挡土墙	130
第一节 挡土墙的型式及构造特点	130
第二节 作用于挡土墙上的荷载	133
第三节 挡土墙的设计计算方法	136
第四节 挡土墙设计实例	142
第五章 烟 囱	147
第一节 钢筋混凝土烟囱的结构组成	147
第二节 材料的力学和热工指标	153
第三节 烟囱上的作用和设计原则及基本规定	158
第四节 烟囱上作用的计算及内力计算	162
第五节 筒壁的承载能力计算	173
第六节 筒壁的正常使用极限状态验算	176
第七节 筒壁的配筋构造	193
第六章 筒 仓	196
第一节 概 述	196
第二节 筒仓的结构布置和结构选型	198
第三节 作用在筒仓上的荷载	203

第四节	筒仓的结构计算	210
第五节	筒仓的构造	231
第六节	计算实例	238
第七章	冷却塔	254
第一节	概 述	254
第二节	冷却塔的布置和选型	257
第三节	双曲线形冷却塔的结构组成和设计要求	260
第四节	冷却塔的荷载计算	267
第五节	塔筒的内力分析	272
第六节	冷却塔结构设计	282
第七节	工程实例	289

第一章 概 论

工程中的结构，无论是其结构的形式还是其功能要求都是多种多样的。不同的结构，其分析计算方法、设计方法也各不相同。严格来说，工程结构并无所谓“一般的结构”和“特种的结构”之分。更难以给出两者的划分界限。目前出版的钢筋混凝土特种结构的书籍，常常把烟囱、筒仓、水池、水塔、挡土墙等结构做为特种结构，这可能更多地是从课程教学的需要来设置的。对于建筑工程专业来说，其主干课程《钢筋混凝土结构》除了讲授钢筋混凝土基本构件外，结构部分仅涉及到建筑工程中最常见的应用最多的几种结构，即肋梁楼盖、单层工业厂房、多层和高层房屋，而其他一些结构，如前所述的烟囱、水池等结构，虽然并非十分普遍，但却常常会碰到，所以只好另设一门《特种结构》来讲授，做为主干专业课的补充。当然，这些结构的形式和设计计算的方法，与梁板结构、框架排架结构相比也确实存在一些特殊性。对于水利水电工程建筑专业，其主干课程《水工钢筋混凝土结构》的结构部分也只涉及到肋形结构和刚架结构，水工结构中常常遇到的其他钢筋混凝土结构，诸如电站厂房中的压力管道、机墩、蜗壳、尾水管结构，还有引水隧洞、坝内孔口、水工渡槽、挡土墙等结构，均未在该课程中讲授。而在水利水电工程建筑的专业主干课《水工建筑物》、《水电站建筑物》中，主要介绍混凝土重力坝、拱坝、土坝、堆石坝、水闸、船闸、电站厂房等主体建筑物的设计计算，对上述提到的其他水工钢筋混凝土结构的设计计算则大多只做原则的说明，并未详细讲述其具体的受力特性、计算方法和步骤、以及如何通过配筋来满足承载能力和裂缝控制的要求。

正是基于这种课程教学的需要，本书选编了建筑工程、水利水电工程和火力发电工程中的几类结构，做为主干课程外的选修课程的内容。这些结构是：

(1) 水工非杆件结构，包括混凝土坝内的廊道和孔口结构，混凝土坝内埋管和下游坝面管结构，水电站厂房中的机墩、蜗壳、尾水管结构，水电站引水隧洞结构。

(2) 水工渡槽，包括梁式和拱式，并对近年来采用的新型和特大型渡槽作简单介绍。

(3) 各种挡土墙。

(4) 火力发电厂及其他工业建筑中的烟囱、筒仓、双曲线冷却塔。

本书把这些结构做为特种结构，在有限的篇幅内尽量详细地阐述这些结构的布置和选型、内力和应力的计算方法、承载力计算、正常使用极限状态的验算以及构造特点，以适应水利水电工程建筑专业和建筑工程专业的学生未来从事这些特种结构的设计和施工的需要。

本书选编的这些特种结构，除了课程教学的特殊需要外，结构上还具有某些特点。这些特点主要是：结构形式复杂，计算方法较特殊，配筋构造也比较复杂。

水电站厂房中的蜗壳、尾水管结构，坝内埋管和下游坝面管结构，冷却塔、筒仓等特种结构，其结构形式都较复杂。有些外型尺寸还特别庞大。结构的空间整体性也很强，不

易简化成杆件结构, 往往要用弹性力学及其有限元的方法或求其解析解(如坝内圆孔)、或求得数值解。在用有限单元法求算数值解时, 由于结构形式和边界条件的复杂性, 往往还要做许多合乎实际的简化。一些结构还由于其空间整体性强而很难简化成平面结构。如若作为平面结构计算则可能造成较大的误差, 不能准确地反映结构真正的应力状态。虽然一些板系组成的结构(如矩形筒仓和扶壁式挡土墙)可以简化成单块板进行计算, 但在割离时板块的交接边可能产生内力的不平衡, 这种影响也应作适当的调整。另外, 像烟囱这样的高耸建筑物, 还应考虑结构挠曲变形后由自重产生的附加弯矩。同时由于烟气的高温作用, 还要进行专门的温度及温度应力计算, 等等。

由弹性连续体组成的结构, 当按弹性理论或有限单元法进行分析计算时, 得到的结果是应力而不是内力。混凝土结构按内力进行截面的承载能力计算, 理论上是成熟的, 规范有明确的计算公式。而按应力图形进行配筋计算, 则有许多问题还需做进一步的研究。因此, 一些特种结构, 特别是水工中的非杆件结构, 其承载能力的计算也与一般的杆件结构有些不同。非杆件结构的裂缝控制的验算在许多方面还很不完善。

由于结构形式复杂, 空间整体性强, 致使配筋构造也比较复杂。如水电站蜗壳、尾水管结构等的配筋构造的复杂性是其他结构无法比的。筒仓、冷却塔等结构的构造处理也相当复杂。

作用在特种结构上的荷载也具有某些特性, 如水工非杆件结构和水工渡槽中的水的作用(包括静水压力和动水压力)是十分重要和经常的作用, 而在一般的工业和民用建筑中, 水的作用则不多见。又比如筒仓中贮料的作用也是在其他的结构中不多见的。烟囱中高温烟气的作用和大型冷却塔中风的作用等都有某些特殊性。

还需特别指出的是, 上述各类特种结构, 无法遵循一个统一的规范进行设计计算。它们都是钢筋混凝土结构, 从总体上说, 均应遵循第一层次的国家标准 GB 50153—92《工程结构可靠度设计统一标准》的原则规定。但第二层次的标准和规范是由各部委制定的。它们考虑了部门和行业的特点。因此, 特种结构的设计也应遵循有关部委制定的标准和规范。如水工非杆件结构和水工渡槽结构, 要按照 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》和 DL/T 5057—1996《水工混凝土结构设计规范》进行设计; 而火力发电厂中的特种结构则应符合 DL 5022—93《火力发电厂土建结构设计技术规定》的规定。由于特种结构的特殊性, 设计工作还必需按照某些专门的规范和规程来进行。如烟囱要按《烟囱设计规范》进行设计; 筒仓要按照 GBJ 77—85《钢筋混凝土筒仓设计规范》进行设计; 水工中的非杆件结构和渡槽结构的设计除了应符合上述标准 GB 50199—94 和规范 DL/T 5057—1996 外, 还应符合 SDJ 21—78《混凝土重力坝设计规范》、SD 144—85《水电站压力钢管设计规范》、SD 134—84《水工隧洞设计规范》等规范的规定; 火力发电厂中的双曲线冷却塔的设计也应符合 NDGJ 5—88《火力发电厂水工设计技术规定》的规定。

几十年来, 特种结构的计算理论和设计方法也经历了一个逐步发展和完善的过程。由于计算理论和计算工具的限制, 早期的特种结构的计算不得不进行比较充分的简化。这种简化主要有两个方面, 一是把空间问题简化成平面问题; 二是把弹性连续体结构简化成杆件结构。例如水电站厂房中的蜗壳结构, 它本是形状复杂的空间连续体结构, 边界情况也

十分复杂,但在 20 世纪 70 年代以前,大都简化成平面的“Γ”形钢架进行计算;矩形筒仓在分析计算时也是把整体的空间结构割离成单块板或杆件结构进行计算。这些简化方法虽然与真实的应力状态有差异,但其基本的规律却与实际相符。因此,直到目前为止,在一定的条件下仍被广泛地采用。弹性力学计算理论的发展为双向板、双曲线冷却塔、无限域中的孔口结构等特种结构的分析计算开辟了广阔的前景。这些结构由于其明确的边界条件以及轴对称性,因此可以由弹性理论求得解析解,并制成了计算数表,为设计工作提供了极大的方便,这些表至今仍得到广泛的应用。20 世纪 70 年代以后计算力学及有限单元法的发展使水电站蜗壳、坝内埋管、下游坝面管等形式和边界都十分复杂的特种结构能够按平面的或空间的问题求得相当精确的数值结果。同时,还能考虑各种介质间联合受力的作用,如坝内钢管与混凝土的联合受力作用,隧洞衬砌与山岩之间的联合受力作用等。还可以应用钢筋混凝土有限单元法对复杂的结构进行非线性全过程分析,探讨结构的受力特征和破坏形态,得到结构的抗裂荷载和极限承载力。有限元法和计算机软件的广泛应用,使这些复杂的结构在计算模型上可以更好地反映其实际的工作状态,从而得到较为精确的结果。更由于近 10 多年来计算机辅助设计软件的开发,使一些特种结构的设计工作效率得以大大地提高。例如,烟囱、双曲线冷却塔等结构,许多设计院都有专门的设计软件。

钢筋混凝土特种结构的计算原则和方法同样经历了容许应力法、破坏阶段法、以安全系数表达的半经验半概率的极限状态法和以概率理论为基础的以分项系数表达的极限状态法等各个阶段。由于我国各部委各行业规范修订工作的进展不一样,因此前述各特种结构的现行规范所处的发展阶段也不同步。建筑工程行业自 1984 年 GBJ 68—84《建筑结构设计统一标准》颁行以后,其下属层次的规范大部分都已修订颁行,但是 GBJ 77—84《钢筋混凝土筒仓设计规范》与 GBJ 68—84 和 GBJ 10—89《混凝土结构设计规范》并不配套,而与 70 年代的 TJ 10—74《钢筋混凝土结构设计规范》配套。水利水电工程建筑行业于 1994 年颁行 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》后,下属层次的规范已颁行的有 DL/T 5057—1996《水工混凝土结构设计规范》、DL 5077—1997《水工建筑物荷载设计规范》及 DL/T 5073—1997《水工建筑物抗震设计规范》,其他的则正在修订之中。但无论哪一部门和行业,工程结构的设计工作都将逐步结束以往的安全系数法,而改用以分项系数表达的近似概率法。正是由于各类特种结构所采用的标准和规范并不同步,却给本书的编写工作带来了一定的困难。读者在阅读本书时,也应充分注意这一点,设计时更应十分慎重,注意配套使用而不要相混。

本书在选编教材内容时,还兼顾了水利水电工程和建筑工程两个专业的不同需要。对于水利水电工程专业,主要选修水工非杆件结构、水工渡槽、挡土墙,适当选修其他内容。对于建筑工程专业,主要选修挡土墙、烟囱、筒仓、冷却塔,适当选修其他内容。

第二章 水工非杆件结构

为了满足防洪、发电、灌溉、城市供水、通航等多方面的需要,往往要在河流的适宜河段修建不同类型的建筑物,用来控制和支配水流,这些建筑物统称为水工建筑物。不同类型的水工建筑物组成的综合体并具有综合开发治理特点的大型水利工程称为水利枢纽。枢纽工程的兴建对发展国民经济、加速实现四个现代化具有重大的意义。几千年来,我国人民在与洪水作斗争和开发利用水资源方面创下了辉煌的业绩。从大禹治水、南北大运河、都江堰工程等都充分反映了我国文明发达的水利史。中华人民共和国建立以来,更是修建了一大批大、中、小型的水利工程。修建了丹江口、葛洲坝、龙羊峡、白山、水口、鲁布革等数十座大型的水利枢纽工程。举世瞩目的长江三峡工程已于 1997 年 11 月胜利截流,“高峡出平湖”的伟大设想即将成为现实。

一个大型的水利枢纽包括挡水和泄水建筑物、输水和取水建筑物、发电建筑物等。挡水坝(混凝土重力坝和拱坝等)和水电站厂房是水利枢纽工程中最主要的建筑物,如图 2-1 所示。在这些主要建筑物中有许多是属于需要配筋的非杆件结构,例如,混凝土重力坝内的孔口结构,即设置于坝内的各种廊道、泄水孔及其他孔口;混凝土坝内压力管道(坝内埋管)和坝后压力管道(下游坝面管);水电站枢纽中的引水隧洞;水电站厂房中的机墩、蜗壳、尾水管结构;泄水建筑物中的弧门闸墩及其支承体结构(弧门牛腿、预应力锚块)等。

在本章中,将首先讲述水工非杆件结构的一些设计原则,再分别介绍坝内廊道和孔口结构、水电站坝内埋管和下游坝面管、水电站引水隧洞以及水电站厂房中的机墩、蜗壳、尾水管等结构的计算方法。最后再介绍钢筋混凝土有限元分析方法及其在水工非杆件结构中的应用。

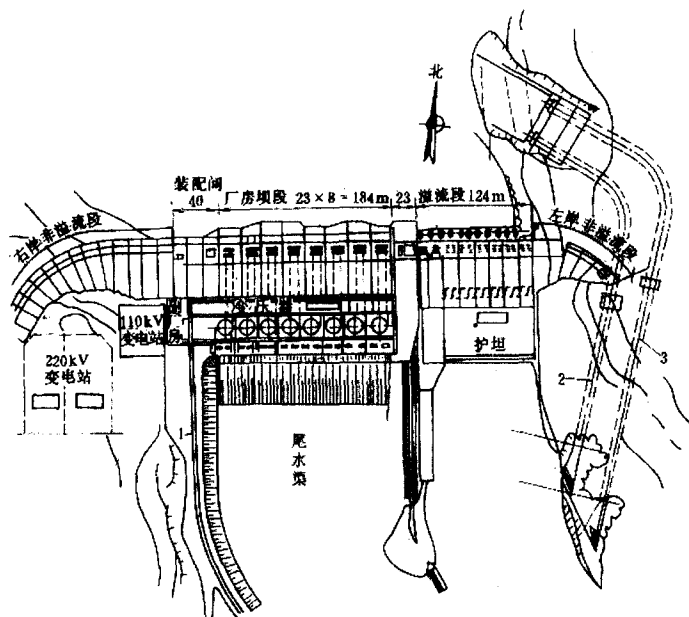
第一节 水工非杆件结构的设计原则

水工非杆件结构的设计与其他水工结构一样,都必需按照 GB 50199—94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[1]和 DL/T 5057—1996《水工混凝土结构设计规范》^[2]所确定的原则进行,即按照以概率理论为基础的极限状态法进行设计。对于承载能力和正常使用极限状态的计算,其设计表达式分别为

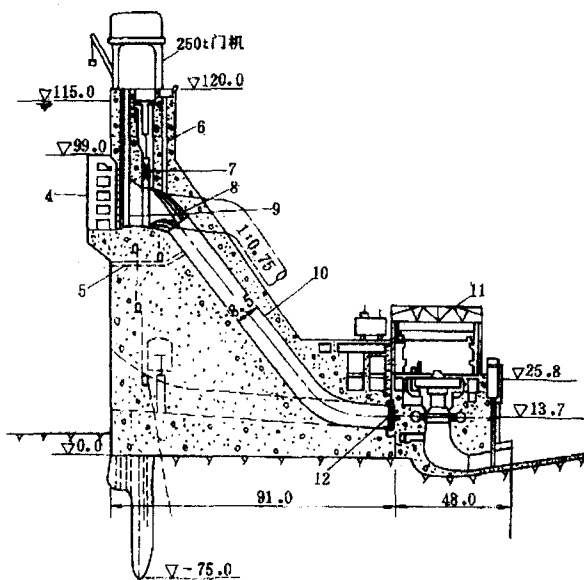
$$\gamma_0 \psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, a_k) \leq \frac{1}{\gamma_d} R(f_d, a_k) \quad (2-1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{短期组合} \quad \gamma_0 S_s(G_k, Q_k, f_k, a_k) \leq c_1 / \gamma_{ds} \\ \text{长期组合} \quad \gamma_0 S_l(G_k, \rho Q_k, f_k, a_k) \leq c_2 / \gamma_{dl} \end{array} \right\} \quad (2-2)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,对结构安全级别为 I、II、III 级的结构及构件,分别取 1.1、1.0、0.9;



(a)



(b)

图 2-1 水电站枢纽及混凝土重力坝 (单位: m)

(a) 坝后式水电站枢纽布置; (b) 混凝土重力坝及电站厂房剖面图

- 1—进厂铁路; 2—2号泄洪洞; 3—1号泄洪洞; 4—拦污栅; 5—旁通管; 6—通气孔;
7—工作闸门; 8—渐变段; 9—机修门槽; 10—压力钢管; 11—厂房; 12—伸缩节

ϕ ——设计状况系数, 对应于持久、短暂、偶然三种状态, 可分别取 1.0、0.95、0.85;

$S(\cdot)$ ——作用(荷载)效应函数;

$R(\cdot)$ ——结构构件抗力函数;

γ_d ——结构系数;

γ_{dS} 、 γ_{dL} ——正常使用极限状态短期组合和长期组合的结构系数;

γ_G 、 γ_Q ——分别为永久作用和可变作用分项系数;

G_k 、 Q_k ——分别为永久作用和可变作用标准值;

f_d 、 f_k ——分别为材料强度的设计值和标准值;

a_k ——结构构件几何参数的标准值;

$S_s(\cdot)$ 、 $S_L(\cdot)$ ——作用效应的短期组合和长期组合;

C_1 、 C_2 ——结构的功能限值, 指允许裂缝宽度或允许挠度;

ρ ——可变作用标准值的长期组合系数。

水工非杆件结构在具体应用这两个表达式时, 却有许多特殊性。下面就非杆件结构设计中几个主要的问题做原则性的说明。

一、水工非杆件结构的内力和应力计算

1. 内力计算

水工混凝土结构中, 有些属于杆件结构, 如水电站厂房的上部结构、渡槽的排架、水闸的上部结构等。也有一些结构虽其形状不像杆件, 但经简化后仍可作为杆件计算, 如水闸的底板(可简化成弹性地基梁)、船闸的闸室、矩形渡槽的槽身等都可简化成梁、柱、刚架进行计算。一些非杆件结构, 初步设计时也可以简化成杆件结构, 如蜗壳简化成“Γ”形刚架, 尾水管下段简化成平面刚架等。简化成杆件结构后, 内力即可用结构力学的方法进行计算。

2. 应力计算

多数水工非杆件结构, 如果把它们简化成杆件结构计算可能带来较大的误差, 而用弹性力学及其有限单元法进行计算可以得到较精确的结果。例如坝内孔口结构, 一定条件下可以看成无限域中的小孔口结构, 可用弹性理论求得解析结果, 并制成数表, 供设计人员查用。复杂的结构则可用有限元法求出应力, 还可以直接由计算机画出各种应力等值线和应力分布图形。对于特别重要的结构, 还经常用试验方法求得应力, 用以与理论计算结果进行比较。

二、水工非杆件结构承载力计算

如果把实际的非杆件结构简化成杆件结构求其内力, 则其配筋承载力的计算可按规范 DL/T 5057—1996 第 6 章的规定进行。

当用弹性力学或试验方法求得弹性阶段的截面应力图形时, 则可按规范 DL/T 5057—1996 的附录 H 所确定的原则进行配筋承载力计算。

(1) 当截面的应力图形接近线性分布时, 可换算成内力, 按内力进行配筋计算。

(2) 若截面应力图形偏离线性分布较大, 可按下式计算受拉钢筋面积

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + f_y A_s) \quad (2-3)$$

式中 T ——由荷载设计值 (包含结构重要性系数 γ_0 及设计状况系数 ψ) 确定的弹性总拉力, $T = Ab$, A 为弹性应力图形中主拉应力图形的总面积 (见图 2-2), b 为结构截面的宽度;

T_c ——混凝土承担的拉力, $T_c = A_{ct} b$, A_{ct} 为弹性应力图形中主拉应力小于混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 的图形面积, 见图 2-2 所示;

A_s 、 f_y ——受拉钢筋的面积及钢筋抗拉强度设计值;

γ_d ——钢筋混凝土结构的结构系数, γ_d 取 1.2。

上式是根据与原 SDJ 20—78《水工钢筋混凝土结构设计规范》中附录四^[3]的公式相衔接的原则而提出的。附录四的公式可写成

$$K_s(T - [A_{ct}]b) = A_s \bar{f}_y \quad (2-4)$$

式中 $[A_{ct}]$ ——弹性应力图形中拉应力小于混凝土容许应力 $[f_t]$ 的图形面积,

$$[f_t] = \bar{f}_t / K_c;$$

K_s 、 K_c ——分别为钢筋混凝土结构和素混凝土结构的强度安全系数;

$\bar{f}_y$ 、 $\bar{f}_t$ ——原规范 SDJ 20—78 钢筋和混凝土的抗拉设计强度。

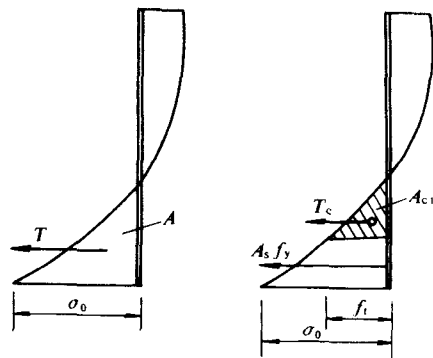


图 2-2 按弹性应力图形配筋示意图

在新规范中, K_s 、 K_c 改用 γ_d 和 γ_{dc} (γ_{dc} 为素混凝土结构的结构系数), $\bar{f}_y$ 、 $\bar{f}_t$ 改用 f_y 和 f_t , 并以 $\gamma_d = 1.2$, $\gamma_{dc} = 2.0$ 代入, 则上式写成

$$\gamma_d \left(T - \frac{A_{ct}}{\gamma_{dc}} b \right) = A_s f_y \quad (2-5)$$

改写成

$$T = \frac{1}{\gamma_d} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dc}} A_{ct} b + A_s f_y \right) = \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + A_s f_y)$$

式 (2-3) 也可以由武汉水利电力大学“大体积混凝土应力配筋研究”专题组的模型试验结果得出。具体说明如下:

设深梁或孔口结构在极限荷载 p_u 作用下, 受拉控制截面上弹性应力图形和实际应力图形如图 2-3 所示。由图 2-3 (b) 可知, 截面的抗拉承载力为

$$T_u = T'_c + T_s \quad (2-6)$$

由于混凝土的开裂, 图 2-3 (a) 所示的弹性应力图形已不复存在, 实际产生的总拉力也不再是 T , 现假定为 ξT , ξ 反映了截面上应力重分布后总拉力的变化程度, 于是上式可写成

$$\xi T = T'_c + T_s \quad (2-7)$$

这里的 T'_c 就是图 2-3 (b) 中阴影部分图形的面积 A'_{ct} 乘以结构的厚度 b , 但 A'_{ct} 很难直接求出, 现设

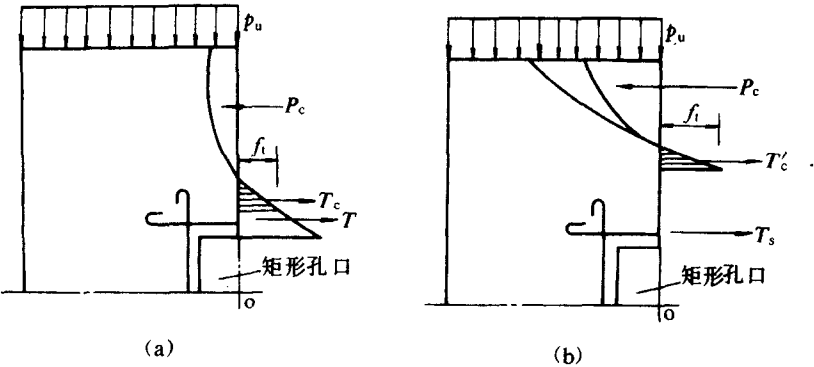


图 2-3 孔口结构极限状态下截面应力图形

(a) 弹性应力图形; (b) 实际应力图形

$$A'_{ct} = \alpha_c A_{ct}$$

则

$$T'_c = \alpha_c A_{ct} b = \alpha_c T_c$$

另有

$$T_s = \alpha_s A_s f_y$$

代入式(2-7), 得

$$\begin{aligned} T &= \frac{\alpha_c}{\xi} T_c + \frac{\alpha_s}{\xi} A_s f_y \\ &= \xi_c T_c + \xi_s A_s f_y \end{aligned} \quad (2-8)$$

这里的 A_{ct} 、 T_s 、 T_c 的意义与式 (2-3) 相同。 $\alpha_c = T'_c / T_c$, $\xi_c = \alpha_c / \xi$, $\xi_s = \alpha_s / \xi$; α_c 是截面上经应力重分布以后混凝土承担的总拉力与弹性拉应力图形中应力小于 f_t 的那一部分拉应力的合力的比值; α_s 为钢筋的应力系数。利用武汉水利电力大学专题组进行的模型试验数据 (图形孔口试件 6 个, 矩形孔口试件 2 个, 深梁模型试件 29 个) 分别求得各模型的 T 、 T_c 以及 $A_s f_y$, 把 T/T_c 和 $A_s f_y / T_c$ 的值点绘于图 2-4 上, 经回归得

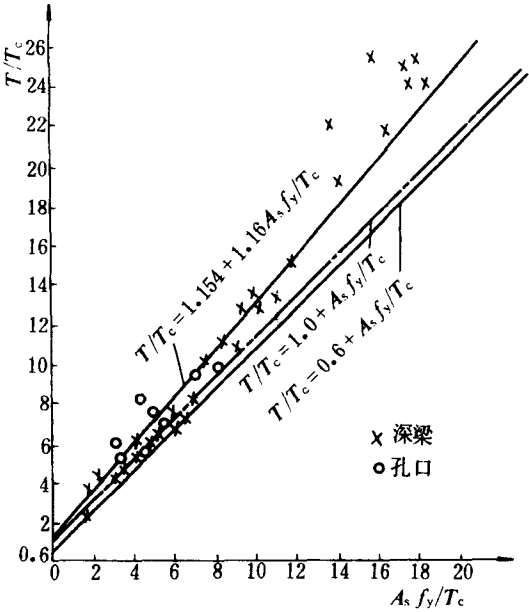


图 2-4 坝内孔口和深梁的模型试验结果

$$\xi_c = 1.154, \quad \xi_s = 1.160$$

为了安全可靠, 可把回归线下移, 使 $\xi_c = 0.6$, 并近似取 $\xi_s = 1.0$, 于是得

$$T = 0.6 T_c + A_s f_y \quad (2-9)$$

考虑结构系数 γ_d 后, 上式即为式 (2-3)。

三、水工非杆件结构的配筋构造

(1) 对于可简化成杆件结构按内力配筋的构件, 其配筋构造应符合规范 DL/T 5057—1996 第 9、10 章的规定。

(2) 当按应力图形配筋时, 还需满足规范 DL/T 5057—1996 附录 H 的如下规定:

1) 式 (2-3) 中 T_c 的存在是有条件的, 即弹性拉应力的范围相对于截面的总高度而言不能太大, 否则裂缝可能贯穿整个截面, 混凝土的抗拉能力即不复存在。因此, 附录 H 规定, 当弹性应力图形的受拉区高度大于结构截面高度的 $2/3$ 时, 式 (2-3) 中的 T_c 应取为零。

2) 为了保证混凝土承担拉力的可靠性, 按式 (2-3) 计算时, 混凝土承担的拉力 T_c 不宜超过总拉力的 30%。

3) 当弹性应力图形的受拉区高度小于结构截面高度的 $2/3$, 且截面边缘最大拉应力 σ_0 不大于 $0.5f_t$ 时, 可不配置受拉钢筋或仅配置适量的构造钢筋。

4) 受拉钢筋的配置方式应根据应力图形及结构的受力特点确定。当配筋主要是为了承载能力且结构具有较明显的弯曲破坏特征时, 可集中配置在受拉区边缘; 当配筋主要为了控制裂缝宽度时, 可在拉应力较大的范围内分层布置, 各层钢筋的数量宜与拉应力图形的分布相对应。

此外, 水工中的深受弯构件和弧形闸门支座等非杆件结构的配筋, 还应满足各自的配筋构造要求。

四、水工非杆件结构的裂缝控制

裂缝控制属于正常使用极限状态的设计问题, 规范 DL/T 5057—1996 指出: 对于持久、短暂和偶然三种设计状况均应进行承载能力的计算, 对持久状况尚应进行正常使用极限状态的设计; 对短暂状况可根据需要进行正常使用极限状态的设计; 对偶然状况则可不进行正常使用极限状态的设计。正常使用极限状态的设计应考虑荷载效应的短期组合和长期组合。水工非杆件结构同样应遵循这些基本规定, 对使用以上要求进行裂缝控制的结构和构件应进行抗裂和裂缝开展宽度的验算。

1. 抗裂验算

水工钢筋混凝土结构如果有可靠的防渗措施或不影响正常使用, 也可不进行抗裂验算。坝内埋管、蜗壳、下游坝面管、压力隧洞等非杆件结构, 一般都有钢板衬砌规范 DL/T 5057—1996 附录 H 以及其他专门的技术规范对水工非杆件的抗裂问题均未作出明确的规定。非杆件结构分析计算的结果为应力, 当有必要时建议用规范 DL/T 5057—1996 规定的原则进行抗裂验算, 即

$$\sigma_{tk} \leq \gamma_m \alpha_{ct} f_{tk} \quad (2-10)$$

式中 σ_{tk} ——受拉边缘由荷载标准值按短期或长期组合计算的应力;

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值;

α_{ct} ——拉应力限制系数, 对短期或长期组合分别取 0.85 和 0.7;

γ_m ——截面塑性抵抗矩系数,按具体情况选用。

2. 裂缝开展宽度验算

需要进行裂缝开展宽度验算的水工非杆件结构,其最大的裂缝开展宽度的计算值不应超过规范 DL/T 5057—1996 规定的允许值,这些允许值根据结构所处的环境和不同的荷载组合,可取 0.1 ~ 0.4mm 不等。但由于结构的复杂性,规范尚未对水工非杆件结构裂缝开展宽度提出具体的计算方法。若某些非杆件结构的截面受力特性与某种基本构件相似时,则可参照杆件结构裂缝开展宽度的公式进行计算。

五、非杆件结构按钢筋混凝土有限单元法进行分析计算的一些原则

钢筋混凝土有限单元法是近 30 年来发展起来的学科,根据我国近 20 年来在水工非杆件结构中应用的经验,规范 DL/T 5057—1996 附录 H 中,提出了一些应用这一方法进行设计计算的原则,以便工程技术人员掌握使用,这些原则是:

(1) 混凝土和钢筋的本构关系应由试验确定或采用经专门论证的数学模型。

(2) 在裂缝形成之前,钢筋和混凝土之间可认为完全粘结,不发生粘结滑移。裂缝形成之后,裂缝的模型可取为离散式或涂抹式(分布式)。若需模拟粘结滑移,则可加设粘结单元。

(3) 用有限元法计算结构的承载能力时,应考虑结构系数 γ_d ,荷载及材料强度均应取设计值,混凝土初始弹性模量 E_c 可由其强度等级除以分项系数 γ_c (γ_c 取 1.35) 后查表插值求得。验算裂缝控制时,荷载及材料强度应取标准值, E_c 可直接由混凝土强度等级查表求得。

(4) 所采用的钢筋混凝土有限元分析程序必需经过试验的考证。

钢筋混凝土有限单元法的基本原理及其在水工非杆件结构中的应用,将在第八节中做专门的介绍。

第二节 混凝土坝内廊道及孔口结构

混凝土重力坝内设置的廊道及孔口,主要是为了提供交通并进行施工期的灌浆、运行期的观测和排水等,还有的是做为施工导流、泄洪及输水用。根据其功能不同,可分为泄洪孔、导流孔、输水管道、排水廊道、灌浆廊道、监测廊道、交通廊道、闸门操作廊道、电梯井、电缆洞、通风孔、水泵房等。其形状主要有圆形、矩形、马蹄形(下方上圆)及椭圆形。为了满足上述各种功能的要求,在混凝土坝内设置这些孔口和廊道是不可缺少的,但却因此而破坏了坝剖面的连续性。其影响有两个方面:一是坝剖面整体的应力分布发生了改变;二是在孔口周围产生了较大的应力集中,从而提出了孔口周边的强度问题。前者的影响对于小孔口而言是微小的,一般可忽略不计,坝剖面的应力仍可按无孔口的情况作为连续体进行分析。后者的影响正是本节要讨论的问题。这些问题是:孔口周围的应力如何计算,如何保证孔口周围的强度。下面就几种主要的孔口和廊道的结构布置和选型、荷载、荷载效应(应力)的计算方法、配筋的计算方法和构造等问题做简要的说明。

一、坝内孔口和廊道的结构布置及型式的选择

(一) 孔口和廊道的结构布置

坝内孔口和廊道的布置及选型主要考虑功能的要求和应力的条件。在结构布置上应考虑如下原则:

(1) 沿坝轴线方向布置的纵向孔口和廊道不宜靠近坝的上下游面, 以免造成坝面一侧过大的应力集中。

(2) 与坝轴线垂直的横向廊道和孔口从坝段内通过时, 应尽量布置在坝段的对称轴上, 以免在一侧产生薄弱面。但对于无内水压力的横向廊道, 布置在坝的横缝上也是允许的。

(3) 相邻廊道和孔口不宜靠得太近, 以免产生应力重叠, 使孔口的应力状态更加复杂。

(4) 坝内孔口和廊道的布置还应符合 SDJ 21—78《混凝土重力坝设计规范》^[4]第 6 章的规定。

(二) 孔口和廊道的选型

孔口和廊道结构型式的选择应遵循如下原则:

(1) 对于有内水压力的输水道, 一般采用圆形。因为圆形孔的水力条件和应力条件均较为有利。但在输水道进口的渐变段, 则为矩形或带圆角的矩形。

(2) 坝内的廊道多采用马蹄形, 既利于交通, 顶部的应力条件也比较好。

(3) 吊物孔和电梯井一般采用矩形或方形, 以利于布置电梯。矩形孔的角部应力集中虽然较严重, 但由于竖向孔在坝内水平方向的应力一般不大, 因此角部应力也不会太大。

(4) 为了缓和矩形孔角部的应力集中, 四个角点常加贴角或做成圆弧角。

(5) 当坝体垂直应力较大时, 为了改善应力状态, 采用椭圆孔比圆孔更为有利, 采用矩形孔也比采用方孔更为有利。

二、作用在孔口和廊道上的荷载

(一) 内水压力

坝内孔口如按有无内水压力可分为有压孔口和无压孔口。对于坝内输水道, 内水压力则是最主要的荷载。水压力的由水力计算确定, 包括静水压力和水锤压力。简化计算时可把孔口中心处的水压力做为均匀的压力计算, 孔口尺寸较大时可考虑顶底部的压力差。

(二) 坝体应力

坝体应力是指坝剖面在孔口中心处的应力分量 σ_x , σ_y , τ_{xy} (或 σ_1 、 σ_2), 它是由作用在混凝土重力坝上的作用而引起的。这些作用包括永久作用、可变作用和偶然作用^[7]。

永久作用有: 坝体自重和永久设备的自重;

可变作用有: 正常蓄水位下的静水压力、扬压力、浪压力、动水压力、泥砂压力、冰压力、土压力;

偶然作用有: 校核洪水位时的静水压力、地震作用。

坝体应力的计算按标准 GB 50199—94 的规定, 还应考虑基本组合和偶然组合两大类。

混凝土坝在上述这些荷载作用下产生的应力一般可用材料力学的公式计算, 必要时需