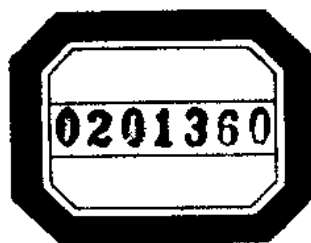


水利水电工程 结构可靠度设计统一标准 专题文集

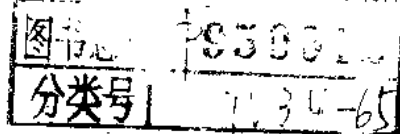
能源部、水利部水利水电规划设计总院
(水利水电工程结构可靠度设计统一标准)编制组



四川科学技术出版社



006921 水利部信息所



水利水电工程 结构可靠度设计统一标准 专 题 文 集

能源部、水利部水利水电规划设计总院
《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》编制组

四川科学技术出版社

1994 • 成都

(川)新登字 004 号

责任编辑:罗孝昌

特约编辑:陈关松 李永新

封面设计:李 勤

EW6/23

水利水电工程结构可靠度设计统一标准专题文集
能源部、水利部水利水电规划设计总院
《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》编制组

四川科学技术出版社出版发行
(成都盐道街三号)

成都市金桥彩印厂印刷
成都市锦江区勤慧激光照排中心排版
ISBN7-5364-2935-3/TV·11
1994年8月第1版 开本 787×1092 1/16
1994年8月第1次印刷 字数 380千
印数 1~2000册 印张 15 插页 4
定价:18.00元

前 言

国家标准《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(GB50199—94)(以下简称《水工统标》),已经建设部和国家技术监督局批准并联合发布。

《水工统标》在总结过去水工结构设计经验的基础上,引进了结构可靠度设计理论,采用概率极限状态设计原则,并以分项系数极限状态设计为实用设计方法,用以统一水利水电工程结构可靠度设计的基本原则、标准和方法,使水工建筑物结构设计符合安全适用、经济合理、技术先进的要求。

编制《水工统标》是一项开创性的工作,难度很大。在编制工作中得到建设部、能源部、水利部的正确领导和有力支持;中国科学院、中国工程院潘家铮院士,水利部何璟副部长,原水电部李鹏鼎副部长给予具体指导和关怀;能源部科技司拨给科研经费;建筑、铁道、航运等部门以及高等院校的专家和教授介绍了大量宝贵经验,为《水工统标》的编制创造了良好条件。

《水工统标》编制组由水利水电规划设计总院和北京、西北、华东、上海、成都等五个勘测设计研究院组成。在编制过程中,得到了高等院校、科研、设计等单位的支持与配合,吸取了国内外其它行业关于可靠度设计的有关规定,并针对编制的主要内容、结合水工结构的特点,进行了大量的调查研究、科研及规范的可靠度校准工作,共提出专题研究及科研成果报告 48 份。其内容主要包括以下几个方面:

1. 一些主要规定的论证,如设计基准期、建筑物结构的安全级别、概率理论设计原则和设计表达式的具体应用等。

2. 对一些设计基本变量的统计、分析研究,如作用、抗力、材料性能、几何参数等。尤其对水工结构中常遇的作用、常用的材料、岩、土性能等作了大量调查统计分析。如:

(1) 为确定混凝土性能统计参数,共搜集到 30 个水利水电工程的近 7 300 组混凝土现场抗压、抗拉强度试验数据。对强度的变异研究表明,150~300 号混凝土的抗压强度标准差为 4.00~4.66MPa,变异系数为 0.16~0.218,概率分布模型(27 个批量样本)大多数服从正态分布。

(2) 为进行重力坝可靠度分析,搜集了较多工程的野外大型抗剪试验和部分室内中型抗剪试验数据(共计 842 组),按坝基岩石及软弱结构面所属岩体类别进行统计分析,得出不同岩基和岩体软弱结面的抗剪断指标 f' 、 C' 和抗剪指标 f 、 C 的均值和变异系数。

(3) 大坝水压力特性的研究。水压力是大坝的主要荷载,水库水位变化与入库水量、运行调度、故障及其它人为因素有关。为研究其概率分布特性,曾组织多个单位重点研究。河海大学统计了 87 座水库的年最高水位,成都科技大学统计了全国 168 座水库的极值水位,华东、上海、北京、成都院也都对若干水库水位变化规律进行了统计分析。天津大学结合降维数值解法,直接利用水库洪水特征水位拟合其概率。

(4) 扬压力概率分布特性。对扬压力系数进行统计分析,统计了国内外 30 个已运行多年的混凝土坝工程的观测资料。

(5) 水电厂吊车轮压和发电机层楼板堆放荷载的调查统计分析。共调查了刘家峡、盐锅

峡、八盘峡、青铜峡四个水电厂，采用极值荷载的成因分析和专家估计方法，得到其统计参数。

3. 对现行规范进行可靠度校准。与《水工统标》有关的水工结构设计规范共 24 种。为使本标准定得切合实际，应对这些规范做出相应的研究。首先挑选了两本有代表性的规范《混凝土重力坝设计规范》和《水工钢筋混凝土设计规范》，按可靠度理论进行校准分析，以摸清现行规范的可靠度水平、可能存在的问题、按可靠度理论设计的具体方法、分项系数的设置、提出目标可靠指标和各分项系数的建议值，并作为本标准编制的两个附件。它们既为标准编制提供了依据，又是水工结构可靠度设计原则方法应用的范例，可供其它水工结构设计规范按可靠度修编时参考。此外，还初步探索了出现校核洪水、地震作用等偶然状况下的结构可靠度。

4. 对已建、正建和拟建工程的可靠度分析，包括对新安江等八座重力坝、二滩拱坝、松涛等土坝、江苏三河闸等六座水闸进行可靠度分析。

为了便于读者对《水工统标》的编制原则、内容和依据有进一步的了解，掌握可靠度理论在水工结构设计中的具体应用，特出版本专题文集供参改。由于专题涉及的面较为广泛，内容很多，限于篇幅，本文集选择了其中有代表性的 15 篇予以刊载。

本文集第一、二两篇是以混凝土重力坝和水工钢筋混凝土结构为例，验证按《水工统标》编制水工结构可靠度设计规范是否可行的成果。它们具体体现了新一代水工结构可靠度设计规范的基本特点，曾作为《水工统标》专家审查会的主要论证附件。编写这两个文件花费了大量人力和很长的时间。第三、四、五、九、十及十一篇则是为了编写第一、二两个文件所做的专题研究成果，其余各篇均为编写《水工统标》有关条文的背景材料。

为了便于读者对照研究，特将《水工统标》的报批稿及条文说明纳入本文集内。

本标准的编制是学习、摸索和逐步深化的过程，由于各专题提出的时间先后、学术观点和对问题认识的程度不同，其内容有与标准规定不尽一致的地方，一些计算数据也不尽准确，但反映了编制过程中的主要思路和方法，可供进一步研究讨论。

本文集一些主要内容经编制组多次讨论后编写而成。此外，还编入了一些专题研究论文。文集由董育坚、袁玖、沈义生、张学义、黄振兴、苗琴生、黄东军、段乐斋共同审稿，袁玖统稿，董育坚核定。由于水平有限，文集中缺点、错误难免，请读者批评指正。

《水电站设计》编辑部李永新、陈关松及成都院的段乐斋负责了文集的编辑出版工作，在此表示谢意。

《水工统标》编制组

目 录

前 言

混凝土重力坝可靠度分析和分项系数确定——《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》附件一	1
水工钢筋混凝土结构可靠度分析和分项系数确定——《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》附件二	34
水工混凝土的强度特性	63
坝前年最高水位变量和设计基准期内可变水荷载的统计分析	77
西北几座水电站荷载调查和统计分析	91
水工结构概率极限状态设计分项系数设置	98
可靠度分析的数值解法	110
对水工结构可靠度设计中设计基准期的探讨	117
八座混凝土重力坝的可靠度分析	122
混凝土重力坝坝踵应力条件的可靠度分析	133
混凝土重力坝在校核洪水位下的目标可靠指标和偶然状况系数的确定	138
混凝土重力坝抗震可靠度的校准	144
二滩拱坝坝体可靠度分析	154
水闸结构可靠度的校准	162
已建两座土坝的可靠度分析	173

《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(报批稿)

《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(报批稿) 条文说明

混凝土重力坝可靠度分析和分项系数确定

——《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》附件一

黄东军 苗琴生

(华东勘测设计研究院)

聂广明 柏宝忠

(上海勘测设计研究院)

1 概 述

《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(以下简称《水工统标》**)是以结构可靠度理论为基础和按概率极限状态设计原则制定的。为了给《水工统标》的编制提供依据,并作为编修水工结构各类设计规范运用《水工统标》规定的范例,在编制《水工统标》的同时,对混凝土重力坝和水工钢筋混凝土结构进行了可靠度设计标准和分项系数极限状态设计方法的研究。本附件说明混凝土重力坝可靠度分析和分项系数确定的方法,以及用分项系数极限状态设计方法设计混凝土重力坝的过程。

本附件收集了影响混凝土重力坝可靠度的基本随机变量的原始资料并进行统计分析,对根据现行《混凝土重力坝设计规范》(SDJ21—78)及《混凝土重力坝设计规范》(SDJ21—78补充规定)设计的混凝土重力坝各种典型断面及八座已建和拟建混凝土重力坝进行了可靠度分析。研究确定了混凝土重力坝承载能力极限状态持久状况下的目标可靠指标,通过进一步的统计分析,确定了主要基本变量的标准值和分项系数。最后,以设计实例说明用分项系数极限状态设计方法设计混凝土重力坝断面的过程,并与按现行规范设计的断面进行了比较。

按现行规范设计混凝土重力坝时,各部位在不同的设计状态下都须进行计算,如果对整个规范中的有关结构计算都进行可靠度分析,工作量十分浩大。限于时间和财力以及资料的局限性,本附件只对控制大坝断面设计的坝体抗滑、坝趾抗压强度承载能力极限状态持久状况的可靠指标和分项系数进行了分析。对偶然状况(包括偶然水位、地震)和正常使用极限状态的可靠指标,以及相应的部分分项系数,有待修订混凝土重力坝设计规范时作进一步研究,附件中只作探索性的计算。本附件提供的混凝土重力坝分项系数极限状态设计方法及确定的基本参数和设计指标的原则,可作为现行混凝土重力坝设计规范相关条文修订时的参考。

2 混凝土重力坝断面设计原则

2.1 我国现行混凝土重力坝设计规范(包括补充规定)对坝体断面的设计,规定采用以材料力学为基础的单一安全系数设计方法,其原则归纳如下:

2.1.1 重力坝的断面原则上应由基本作用组合控制,并以特殊作用组合复核。特殊组合时允

* 本文经《水工统标》编制组讨论后由黄东军、苗琴生、聂广明、柏宝忠执笔,吴熙飞、韩焕文、黄东军、聂广明、苗琴生、柏宝忠参加编写。

** 为便于读者阅读,将《水工统标》(报批稿)附于本书末。

许考虑利用一些合理的安全潜力及其它措施, 尽量做到不由稀遇作用控制设计断面。

2.1.2 混凝土重力坝坝基面的垂直正应力, 在各种作用组合情况下(地震作用除外), 坝基面所承受的最小垂直正应力 $\sigma_{\min}$ 应大于零(计算时应计入扬压力)。

2.1.3 混凝土重力坝坝体的最大主压应力, 应不大于混凝土的容许压应力值。

2.1.4 混凝土的容许应力应按混凝土极限强度及相应的安全系数来确定。在基本组合情况下, 各级坝体混凝土抗压安全系数应不小于4; 在特殊组合情况下(地震情况除外)应不小于3.5。

3.5. 混凝土的极限抗压强度, 一般指90天龄期的20cm立方体强度。

2.1.5 按抗剪断公式计算坝基抗滑稳定安全系数 K' 值不分工程级别, 基本组合采用3.0, 特殊组合(1)(即校核洪水情况)采用2.5, 特殊组合(2)(即地震情况)采用2.3。

2.1.6 混凝土重力坝各部位采用的混凝土最低标号不得低于90天龄期100号。

2.1.7 选用混凝土重力坝各部位混凝土标号时, 除由主压应力控制外, 还应考虑满足抗渗、抗裂、抗磨和抗冻等耐久性要求。

现行规范规定的安全系数不能准确地描述混凝土重力坝的安全度, 而且抗滑稳定和抗压强度两者的安全度不统一。混凝土抗压极限强度的标准与《水工钢筋混凝土设计规范》(SDJ20—78)规定混凝土极限强度不统一。

2.2 按《水工统标》的要求, 重力坝断面设计应遵循下列原则:

2.2.1 采用概率极限状态设计方法。各基本变量均应作为随机变量来处理, 以分项系数极限状态设计为实用方法。

2.2.2 建立极限状态方程, 应以现行规范规定的计算方法为基础。

2.2.3 重力坝断面设计, 不但要满足抗滑稳定和坝趾抗压强度等承载能力极限状态, 而且还要满足坝踵应力约束条件等正常使用极限状态。

2.2.4 重力坝的设计应考虑持久状况、短暂状况和偶然状况。每种设计状况应考虑相应的作用组合, 尽量做到断面由持久状况控制, 以短暂状况、偶然状况作为复核。

2.2.5 对持久状况应考虑承载能力和正常使用两种极限状态, 对短暂状况和偶然状况只考虑承载能力极限状态。

可靠度理论把影响结构安全的作用和作用效应、材料性能和抗力等主要设计变量看作随机变量, 以统计资料为基础, 结合工程经验, 以结构可靠指标或失效概率作为度量水工结构安全程度的客观的统一标准, 从而使水工结构在安全、适用、耐久及经济等方面获得最佳的平衡。

3 作用的概率分析和取值

重力坝上的作用有自重、上下游水压力、扬压力、浪压力、泥沙压力、冰压力和地震力等。按《水工统标》规定, 这些作用分属永久、可变和偶然作用, 其统计参数和概率分布可根据实际观测或试验数据用数理统计方法确定, 或结合工程经验及采用向专家调查的方法分析判定。

3.1 自重

对于坝体混凝土的自重作用, 现行规范规定以坝体尺寸和单位体积重量的平均值相乘确定。一般水工结构的尺寸、容重、制作方式等均有变异, 是随机变量, 但坝体尺寸较大, 尺寸的变异影响很小, 可作为定值处理。对于混凝土的单位体积重量, 曾对两个混凝土坝进行

取样调查统计。一是从浙江新安江大坝坝体钻孔取芯样,共得 198 组子样,混凝土为三、四级级配,骨料为砂岩,统计所得饱和容重的均值为 24.31kN/m^3 ,变异系数为 0.017。另一是在贵州花溪大坝钻孔取芯样 163 组,统计所得饱和容重的均值为 24.72kN/m^3 ,变异系数为 0.028。两者的概型检验均服从正态分布。由于变异系数较小,故变异性对大坝可靠度的影响较小,可作为定值处理。

3.2 大坝上、下游水压力

水压力是坝体的最主要作用,按坝前、坝后水位的水深计算。这些水位由水利规划设计人员根据工程所在河流的天然径流、洪水特性、工程所在地区水利水电用水计划、社会经济条件、水库调蓄能力、经济分析等综合分析后确定,而且严格由人为加以控制。设计的特征水位为正常蓄水位、设计洪水位及校核洪水位。

大坝上、下游水压力分为汛期和非汛期两种情况确定。

3.2.1 汛期

分别调查了丰满等 15 个多年或年调节和西津等 12 个季、周或日调节的水电站汛期水库水位资料。超过校核洪水位的有佛子岭、磨子潭水电站,各发生一次。超过设计洪水位的还有丰满水电站,发生过一次。分析大坝可靠度时采用各频率洪水相应的特征水位转换为设计基准期的概率分布。汛期大坝可靠度采用降维数值解法计算,上游水位的验算点通常是位于正常蓄水位和设计洪水位之间的某一水位。下游水位作为上游水位的相关变量,按上游水位概率分布和泄量,推求其概率分布。

3.2.2 非汛期

统计了上述 27 个水库非汛期的水位资料。在多年或年调节水库中,实测与非汛期最高水位相应的水压力为与正常蓄水位相应的水压力的 1.02 倍,季、周或日调节的水库为 1.03 倍。但 27 个水库最高水位的平均值低于正常蓄水位,因此上游可以正常蓄水位作定值,下游选用相应于上游为正常蓄水位时所可能发生不利的水位按定值分析大坝可靠度。这种处理是偏安全的。

3.3 扬压力

按现行规范规定的图形计算扬压力,以扬压力系数作为基本变量。调查统计已建成多年的混凝土坝,坝基有帷幕、排水设施,在基础廊道内有扬压力全断面观测点的坝段,对同一坝或所调查的混凝土坝,按相近的地质条件和基础处理,分类统计分析了 28 个坝的河床坝段在主排水孔处的扬压力系数,得均值 μ_c 为 0.185,变异系数为 0.30,概率分布为正态分布。

3.4 其它作用

泥沙压力、浪压力、冰压力等限于调查资料不足,且其变异性对中等以上的混凝土重力坝影响很小,暂作定值处理,用公式计算确定。

4 结构构件抗力的统计特性

4.1 材料性能和岩石性能的统计分析

混凝土重力坝坝体的混凝土抗压强度、坝体混凝土与坝基岩石间的抗剪强度,均将以往工程所做的试验成果作为子样,用数理统计方法进行分析,其概率分布采用 K-S 法和 A-D 法检验,显著性水平取 0.05。

4.1.1 混凝土与基岩抗剪强度

统计了国内从 50 年代中期至 80 年代中期共 30 多年间在现场所做的大型抗剪试验,包括三大类 52 种岩石(火成岩 19 种、沉积岩 23 种、变质岩 10 种) 229 组试验资料,分布在全国 40 个大、中型水利水电工程。大部分工程抗剪试验仅 2~4 组,少数工程超过 10 组。对坝基岩体按岩性特征、物理力学指标大致相同的条件,参考现行规范的坝基岩体分类参考表,将坝基岩体分为 I、II、III、IV、V 五级,其抗剪强度的子样组数顺次为 60、64、66、27、12,分别进行了统计分析。

已建和在建工程的坝基大部分位于 II、III 级岩体上,少数工程或同一工程少数坝段位于 I、IV 级岩体上。结合工程经验并参照现行规范经分析后采用的统计参数见表 1。由于 IV、V 级岩体统计子样较少,其参数均待今后进一步收集资料和补充研究后确定。

由统计检验并结合工程经验,抗剪断摩擦系数概率分布模型采用正态分布,抗剪断凝聚力采用对数正态分布。

表 1 所列参数仅作参考,拟建工程的参数应根据工程所在地现场取样的试验,经统计分析确定。

4.1.2 混凝土抗压强度

大体积混凝土抗压强度统计参数系根据我国从 60 年代至 80 年代所建 17 个工程的大坝混凝土机口取样约 63 800 组标准试件、28 天龄期 100 号至 300 号混凝土试验强度,换算成 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 立方体混凝土强度统计得出,均值和变异系数列于表 2。

水工混凝土强度的概率分布模型检验,以同一混凝土级别、原材料配比和生产流程基本相同的混凝土为一批,统计期按年、季或月划分。为了检验混凝土抗压强度的概率分布,经对两个工程现场施工中的大量试件(机口取样)强度抽样实测资料进行统计,按年统计期,同一混凝土级别按不同水泥品种,制作尺寸及部位一致的试件进行概率分布模型的假设检验。在 23 个批量样本中,18 个样本服从正态分布,4 个样本服从对数正态分布,1 个样本服从极值 I 型分布。统计分析时,不论区分水泥品种与否,所有级别混凝土基本上为正态分布,故混凝土的抗压强度的概率分布模型采用正态分布。

4.2 结构构件抗力的统计分析

结构构件抗力的随机性是由于材料性能的不定性、构件几何特征的不定性、构件设计计算模式的不定性及构件抗力实际值与试件抗力试验值之间关系的不定性引起的。

本附件采用间接的方法确定结构构件的抗力统计特性,即先对影响抗力的主要因素进行分析,确定其统计参数,然后通过构件抗力与各因素之间的函数关系,推求出抗力的统计参数和概率分布模型。

4.2.1 结构构件材料性能的不定性

结构构件材料性能的不定性,主要是指材质因素、工艺、加荷等引起的结构中材料性能的变异性。还需考虑实际材料性能与标准试件材料性能的差别、实际工作条件与标准试验条件的差别等。 K_M 为反映此不定性的换算系数,是一个随机变量。

4.2.1.1 混凝土与基岩抗剪强度

考虑到现场大型抗剪试验试件尺寸较大,其混凝土骨料规定的粒径与坝体现场浇筑所用的混凝土骨料粒径相近,试验一般选在与大坝基坑地质单元相近的部位,最后取用的抗剪强度已打折扣,偏于安全,因此取 $\mu_{K_M} = 1.0$, $\delta_{K_M} = 0.0$ 。

表 1 混凝土重力坝坝基岩体分类统计参数参考表

岩体工程分类	坝基岩体特征	岩体基本参数变化范围类比值	统计参数特性值		
			均值	变异系数	概率分布
I	致密坚硬的、裂隙不发育的、新鲜完整的、块状及厚~巨厚层结构的岩体。裂隙间距一般大于100cm,无贯穿性的软弱结构面、稳定的性好。 如岩性较单一的岩浆岩及火山岩类、深变质岩(块状片麻岩、混合岩等)、巨厚层沉积岩	$R_b > 100\text{MPa}$ $V_f > 5000\text{m/s}$ $E_0 > 2.0 \times 10^4\text{MPa}$	(1)抗剪断摩擦系数 $\mu_f' = 1.53$	抗剪断摩擦系数 $\delta_f' = 0.20$	正态分布
			(2)抗剪断凝聚力 $\mu_c' = 1.4\text{MPa}$	抗剪断凝聚力 $\delta_c' = 0.36$	对数正态分布
II	坚硬的、裂隙不发育的、轻微风化的块状及厚~巨厚层状结构的较完整岩体,厚层砂岩、砾岩、未溶蚀的石灰岩、白云岩、石英岩、火山碎屑岩等。 除局部地段外,整体稳定性较好。 (包括裂隙发育,经过灌浆处理的岩体)	$R_b = 100 \sim 60\text{MPa}$ $V_f = 5000 \sim 4500\text{m/s}$ $E_0 = 2.0 \sim 1.0 \times 10^4\text{MPa}$	(1)抗剪断摩擦系数 $\mu_f' = 1.2$	抗剪断摩擦系数 $\delta_f' = 0.21$	正态分布
			(2)抗剪断凝聚力 $\mu_c' = 1.2\text{MPa}$	抗剪断凝聚力 $\delta_c' = 0.36$	对数正态分布
III	中等坚硬的、完整性较差的、裂隙发育的风化块状岩体,厚层~中厚层状结构岩体。岩体稳定性受结构面控制。 如弱风化的I类岩;石灰岩、砂岩、砾岩及均一性较差的熔结凝灰岩集块岩等。 (作为坝基,必须进行专门性地基处理)	$R_b = 60 \sim 30\text{MPa}$ $V_f = 4500 \sim 3500\text{m/s}$ $E_0 = 1.0 \sim 0.5 \times 10^4\text{MPa}$	(1)抗剪断摩擦系数 $\mu_f' = 1.0$	抗剪断摩擦系数 $\delta_f' = 0.22$	正态分布
			(2)抗剪断凝聚力 $\mu_c' = 0.9\text{MPa}$	抗剪断凝聚力 $\delta_c' = 0.4$	对数正态分布
IV	完整性差的、裂隙发育、强度较低的、强风化的块状及厚层状岩体,中~薄层状结构岩体,如砂岩、泥灰岩、粉砂岩、凝灰岩、云母片岩、千枚岩等。 岩体整体强度和稳定性较低	$R_b = 30 \sim 15\text{MPa}$ $V_f = 3500 \sim 2500\text{m/s}$ $E_0 = 0.5 \sim 0.2 \times 10^4\text{MPa}$	统计资料不足		
V	裂隙较发育、强度较低的全~强风化岩体或软质岩。 包括全风化或风化破碎的I、II类岩体以及泥质胶结的砂岩、砾岩、泥岩,新生代以来沉积的泥岩、页岩、火山碎屑岩、凝灰岩等	$R_b < 15 \sim 5\text{MPa}$ $V_f = 2000 \sim 1500\text{m/s}$ $E_0 = (0.2 \sim 0.02) \times 10^4\text{MPa}$	统计资料不足		

注:表中所列岩石名称仅供参考,同一岩石的分类主要由基本参数决定。

表 2 混凝土重力坝抗力统计特性表

名 称	级 别	材料和岩石性能的统计特性			抗力的统计特性		
		均值	变异系数	概率分布	均值	变异系数	概率分布
基岩抗剪断 摩擦系数 f'	I	1.35	0.20	正态	1.25	0.20	正态
	II	1.20	0.21		1.20	0.21	
	III	1.00	0.22		1.00	0.22	
基岩抗剪断 凝聚力 C' (MPa)	I	1.40	0.36	对数正态	1.40	0.36	对数正态
	II	1.20	0.36		1.20	0.36	
	III	0.90	0.40		0.90	0.40	
混凝土抗压 强度 R_a (MPa)	C10	12.53	0.24	正态	8.82	0.284	对数正态
	C15	18.40	0.22		12.96	0.267	
	C20	24.04	0.20		16.93	0.251	
	C25	29.45	0.16		20.73	0.235	
	C30	34.66	0.16		24.40	0.220	

4.2.1.2 混凝土抗压强度

混凝土材料换算系数由以下四部分组成：

$$K_M = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \quad (1)$$

式中 λ_1 ——试件由边长 15cm 立方体改为边长 20cm 立方体强度的换算系数， $\mu_{\lambda_1} = 0.95$ ， $\delta_{\lambda_1} = 0.0$ ；

λ_2 ——由立方体强度换算至棱柱体强度的系数， $\mu_{\lambda_2} = 0.80$ ， $\delta_{\lambda_2} = 0.0$ ；

λ_3 ——机口混凝土材料性能经运输、振捣、养护等工艺后的抗压强度性能的换算系数，它的随机变异性一般可根据试验研究的成果及工程经验判断，大致确定 λ_3 的变化幅度，按《水工统标》附录 B 递增三角形分布计算 $\mu_{\lambda_3} = 0.88$ ， $\delta_{\lambda_3} = 0.053$ ；

λ_4 ——混凝土强度随龄期增长系数。28 天标准强度到 90 天强度增长系数 $\mu_{\lambda_4} = 1.2$ ， $\delta_{\lambda_4} = 0.0$ ；28 天标准强度到 180 天强度增长系数 $\mu_{\lambda_4} = 1.3$ ， $\delta_{\lambda_4} = 0.0$ 。虽然现行混凝土重力坝设计规范规定大坝混凝土强度为 90 天龄期，但考虑到混凝土重力坝施工期一般将超过 180 天，国外同类规范常取用 180 天，有时还取用 365 天龄期强度，故本附件取 $\mu_{\lambda_4} = 1.3$ ， $\delta_{\lambda_4} = 0.0$ 。

因此，

$$\mu_{K_M} = \mu_{\lambda_1} \cdot \mu_{\lambda_2} \cdot \mu_{\lambda_3} \cdot \mu_{\lambda_4} \quad (2)$$

$$\delta_{K_M} = \sqrt{\delta_{\lambda_1}^2 + \delta_{\lambda_2}^2 + \delta_{\lambda_3}^2 + \delta_{\lambda_4}^2} \quad (3)$$

4.2.2 结构构件几何特征的不定性

结构构件几何特征的不定性，主要是指制作尺寸偏差、开挖和安装偏差等引起的构件几何特征的变异性。它反映所设计的构件与制作安装后的实际构件之间几何上的差异。对于混凝土重力坝，几何特征不定性影响相对很小，设计中一般不予考虑。

4.2.3 结构构件计算模式的不定性

结构构件计算模式的不定性 K_P ，主要是指基本假设的近似性和计算公式的不精确性等引起的对结构构件抗力计算的不定性。一般可通过抗力试验结果与计算结果的比较来确定 K_P 。 K_P 可表达为：

$$K_P = \frac{\text{构件抗力的试验值}}{\text{构件抗力的计算值}}$$

本附件对于混凝土与基岩抗剪强度取 $\mu_{K_P} = 1.0$ ， $\delta_{K_P} = 0.0$ ；对于混凝土抗压强度取 $\mu_{K_P} =$

0.90, $\delta_{K_P}=0.1$ 。

4.2.4 构件抗力实际值与构件试验值之间关系的不定性

此不定性可表达为:

$$K_z = \frac{\text{构件抗力实际值}}{\text{构件抗力试验值}}$$

本附件对于混凝土与基岩的抗剪强度 $\mu_{K_z}=1.0$, $\delta_{K_z}=0.0$; 对于混凝土抗压强度取 $\mu_{K_z}=0.90$, $\delta_{K_z}=0.1$ 。

4.3 混凝土重力坝结构抗力的统计特性和概率分布模型

对于混凝土重力坝, 在考虑上述因素的情况下, 其抗力 R 可用下式表达:

$$R=K_z \cdot K_P \cdot K_M \cdot R_P \quad (4)$$

式中 R_P ——材料性能。

K_z 、 K_P 之间存在相关性, 为了简化计算, 假定它们相互独立, 按随机变量函数统计参数的运算法则, R 的统计参数为:

$$\mu_R = \mu_{K_z} \cdot \mu_{K_P} \cdot \mu_{K_M} \cdot \mu_{R_P} \quad (5)$$

$$\delta_R = \sqrt{\delta_{K_z}^2 + \delta_{K_P}^2 + \delta_{K_M}^2 + \delta_{R_P}^2} \quad (6)$$

根据 K_z 、 K_P 、 K_M 、 R_P 的统计参数, 求得的基岩抗剪强度抗力的统计参数和混凝土抗压强度抗力的统计参数见表 2。

混凝土抗压强度的抗力系由多个随机变量相乘而得, 取为对数正态分布。

由表 2 可见, 混凝土抗压强度从材料性能 (15cm 立方体 28 天试件强度), 转换到坝体混凝土抗力时, 转换系数为 0.54 左右。若计及混凝土抗压强度随龄期增长, 则龄期 180 天构件的抗力转换系数为 0.704 左右。

我国近年来在一些大型水电工程上进行了大试件全级配混凝土强度试验, 试件尺寸为 $\phi 45\text{cm} \times 90\text{cm}$ 或 $45\text{cm} \times 45\text{cm} \times 45\text{cm}$ 。其抗压强度为湿筛二级配 15cm 立方体试件抗压强度的 0.6 左右 (均不计湿筛混凝土强度随龄期增长)。例如: 东江工程为 0.6~0.65, 二滩工程为 0.52~0.57, 铜街子工程为 0.55~0.66, 五强溪工程为 0.75~0.85。美国 40 年代建造胡佛坝时也曾进行了大量试验。试验结果表明, 全级配大试件抗压强度为湿筛后试件 (折合成 15cm 立方体试件) 的 0.568。再考虑混凝土重力坝其它的一些不定性因素后, 混凝土抗压强度从材料性能转换为坝体混凝土抗力的系数本附件取用 0.54。

5 混凝土重力坝目标可靠指标确定

混凝土重力坝的目标可靠指标应根据坝体结构的重要性、坝高、失效后果、破坏性质、经济指标等因素以优化方法分析并结合工程经验研究确定。重力坝实际上是一个结构体系, 理论上应该采用体系可靠度的方法分析其可靠度设计标准。混凝土重力坝还存在破坏机理不明、坝地质条件模糊不清、计算模式存在着较大的不定性等问题, 在常规设计中也是尚需进一步研究的问题。而结构体系可靠度是一个非常复杂的问题, 目前还没有达到实用程度, 如再计入上述不定性, 则更为复杂。在结构分析时, 我国土木工程设计规范虽然有时按整体结构考虑, 但在结构设计时, 则通常通过考虑结构的一个截面或一个局部的安全来保证结构的整体安全。现行混凝土重力坝设计规范也是如此。《水工统标》第 6.0.3 条规定, 在分析水工结

构可靠度时建立极限状态方程应以规范规定的方法为基础。本附件进行混凝土重力坝可靠度分析时,就是按此原则。具体做法是:一方面按现行规范拟定不同地基条件、不同坝高和不同坝坡的各种重力坝断面,再按现行规范规定的材料力学公式导出各种极限状态方程,分析其可靠指标,也就是考虑设计规范的继承性,采用校准法对现行规范进行反演算分析,确定现行重力坝设计规范总体的可靠度水准;另一方面根据工程实际经验,对已运行多年的经过考验的重力坝进行分析,确定其可靠度水平。经这两方面分析,按上述原则研究确定目标可靠指标。

5.1 按现行规范设计的重力坝可靠指标分析

5.1.1 极限状态方程

本附件计算混凝土重力坝三种极限状态的可靠指标:

- (1) 坝基面抗滑稳定极限状态;
- (2) 下游坝趾抗压强度极限状态;
- (3) 上游坝踵不出现拉应力极限状态。

上述三个控制条件是重力坝断面设计主要控制因素,但重力坝坝踵即使出现了拉应力,大坝并不一定破坏。如上所述,坝踵破坏机理有待重力坝设计规范修改时进一步研究,本附件不加讨论。

根据表 2 所列 I、II、III 三类基岩的统计参数,按 80% 保证率取设计值。按上游边坡 $m_1 = 0.00, 0.05, 0.10$ 三种情况依据现行规范有关规定,拟定了坝高从 30~190m 的 3×22 个混凝土重力坝优化断面。考虑到 III 类基岩上修建坝高超过 90m 的坝不多,故拟定的最大坝高为 90m。所拟定基本断面按实体重力坝单宽计算,示意图参见图 1。

5.1.2 三个极限状态函数

5.1.2.1 坝基面抗滑稳定承载能力极限状态函数

$$Z_1 = f' \sum W + C' mH - \sum P \quad (7)$$

5.1.2.2 下游坝趾抗压强度承载能力极限状态函数

$$Z_2 = R_a - \left[\frac{\sum M}{T} + \frac{6 \sum M}{T^2} \right] (1 + m_2^2) \quad (8)$$

5.1.2.3 上游坝踵不出现拉应力正常使用极限状态函数

$$Z_3 = \frac{\sum W}{T} - \frac{6 \sum M}{T^2} \quad (9)$$

式中 f' ——基岩抗剪断摩擦系数;

C' ——基岩抗剪断凝聚力;

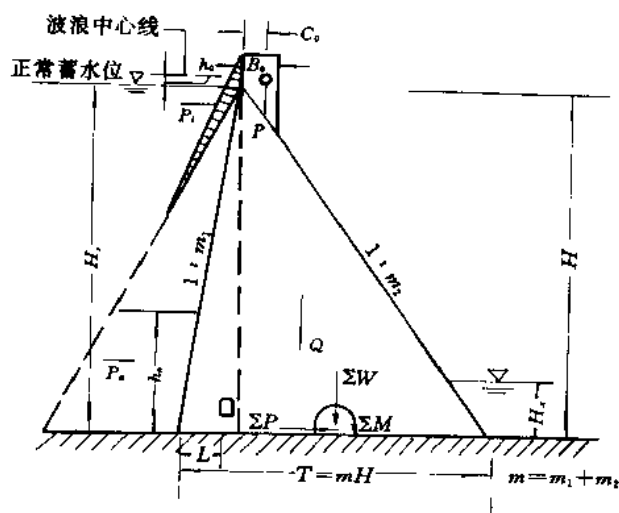
R_a ——坝趾处混凝土抗压强度;

$\sum W$ ——竖向力总和;

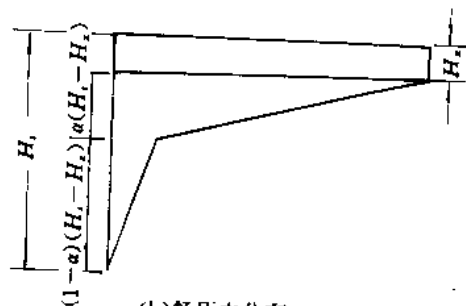
$\sum P$ ——水平力总和;

$\sum M$ ——所有力对坝底面形心的力矩总和,以顺时针方向为正;

T, m_2 含义见图 1。



(a)基本三角形断面



(b)扬压力分布

图 1

$$\sum W = A_1 \gamma_c + \frac{1}{2} (m_1 H_1^2 + m_2 H_2^2) - 0.5 (aT + L) H_1 - [(1 - 0.5a) T - 0.5L] H_2 + m_1 P_n \quad (10)$$

$$\sum P = \frac{H_1^2}{2} - \frac{H_2^2}{2} + P_1 + P_n \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum M = & \frac{1}{6} (1 + m_1^2) H_1^3 - \frac{T}{4} m_1 H_1^2 + \left(A_3 a + 0.25LT - \frac{1}{6} L^2 \right) H_1 \\ & - \left[\frac{1}{6} (1 + m_2^2) H_2^3 + \frac{T}{4} m_2 H_2^2 + \left(A_3 a + 0.25LT - \frac{1}{6} L^2 \right) H_2 \right] \\ & + A_2 \gamma_c + P_1 (H_1 + h_0) + \frac{1}{3} h_n \cdot P_n - m_1 P_n \left(\frac{T}{2} - \frac{m_1 h_n}{3} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$A_1 = B_0 h_0 + \frac{B_0^2}{2m_2} + 0.5m_1 H^2 + 0.5m_2 H^2; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_2 = & \frac{1}{2} m_2 H^2 \left(\frac{T}{2} - \frac{2}{3} m_2 H \right) - \frac{1}{2} m_1 H^2 \left(\frac{T}{2} - \frac{2}{3} m_1 H \right) \\ & - \left(B_0 h_0 + \frac{B_0^2}{2m_2} \right) \left(\frac{T}{2} - m_1 H \right) + \frac{B_0^2 H_0}{2} + \frac{B_0^3}{3m_2} \end{aligned} \quad (14)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} (T - L) \left(\frac{T}{6} - \frac{2}{3} L \right) + \frac{1}{2} (T - L) L - \frac{L}{12} (3T - 2L) \quad (15)$$

式中 α —— 扬压力系数;

γ_c —— 混凝土容重;

P_l ——波浪压力；

P_n ——泥沙压力；

h_n ——泥沙淤积高度；

m_1 、 H_1 、 H_z 、 H 、 h_0 、 B_0 、 L 含义见图 1。

由式 (7) ~ (15) 可见, 按现行规范规定的公式导出的混凝土重力坝极限状态方程比较复杂, 难于采用综合作用和综合抗力的线性方程表达。但采用上述方程, 可先将定值安全系数设计方法转轨到概率极限状态设计法的新体系上来, 使新体系在具体设计时与现行规范差别不大, 设计人员易于接受。

5.1.3 可靠度计算

进行可靠度分析时, 主要作用和抗力的统计参数和概率分布模型见本附件第三、四节。本附件只计算非汛期基本组合可靠度, 作用有正常蓄水位时的上下游水压力、自重、泥沙压力和波浪压力等。

按《水工统标》第 3.4.2 条规定, 运用一次二阶矩法计算可靠指标, 成果见表 3。

5.2 八座混凝土重力坝可靠指标校核

5.2.1 概 况

为了校核实际的混凝土重力坝可靠指标, 以供确定混凝土重力坝目标可靠指标时参考, 选择了新安江、富春江、湖南镇、黄坛口、池潭、古田一级、丰满和棉花滩八座已建或拟建的混凝土重力坝进行可靠度分析。新安江、古田一级为混凝土宽缝重力坝, 湖南镇为混凝土梯形坝, 富春江、黄坛口、池潭、棉花滩、丰满为混凝土实体重力坝。八座大坝都属于中、高坝。新安江、湖南镇、丰满及棉花滩大坝属一级建筑物, 黄坛口大坝属三级建筑物, 其他三座按二级建筑物设计。八座大坝除棉花滩为拟建外, 丰满大坝建成于 40 年代初, 黄坛口、新安江、古田一级大坝是 50 年代到 60 年代初建成的, 富春江大坝建成于 60 年代末期, 湖南镇、池潭在 70 年代末到 80 年代初建成。因此, 七座已建大坝可根据大坝运行观测资料校核其可靠指标。在校核过程中, 查阅了八座大坝设计文件、设计图纸、原始计算书和坝基岩石大型抗剪试验报告, 收集了七座已建大坝浇筑时混凝土机口或现场取样强度试验资料和新安江、丰满大坝坝体混凝土钻孔取样强度试验资料, 还调查了七座已建大坝投产以来水库水位、大坝下游水位和坝体扬压力等实测资料。对于进行可靠指标校核的每座大坝, 一般取 1~2 个有代表性的且运行观测资料比较齐全的坝段进行计算分析。经对收集到的原始资料进行统计分析, 结合经验判断, 可以得到八座大坝中每一座坝上的作用和所用材料性能统计参数及概率分布模型。按本附件第三、四节的原则, 将求得结构构件抗力的统计参数和分布模型用于计算可靠指标。

表 3 按现行规范设计混凝土重力坝可靠度的校准 (上游面垂直即 0.0)

序号	坝高 (m)	正常蓄水位水深 (m)	下游 边坡	基岩 类别	混凝土 级别	抗滑稳定 安全系数 K'	坝趾主 压应力 /MPa	抗压安 全系数	上游坝踵 压应力 /MPa	可靠指标 β		
										承载力极限状态 抗滑稳定	坝踵应 力条件	坝踵应 力条件
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(12)
1	190	182.5	0.78	I	C20	3.03	4.61	4.95	0.37	4.3174	5.1277	>5.0
2	190	182.5	0.88	I	C15	3.00	3.92	4.36	1.04	4.1171	4.4088	>5.0
3	170	163.0	0.74	I	C15	3.01	4.42	5.15	0.03	4.3428	5.2920	1.5789
4	170	163.0	0.85	I	C15	3.03	3.66	4.67	0.77	4.1859	4.6693	>5.0
5	150	143.5	0.74	I	C15	3.18	3.89	4.39	0.03	4.5242	4.4398	1.6625
6	150	143.5	0.80	I	C15	3.01	3.49	4.89	0.42	4.2197	4.8495	>5.0
7	130	124.0	0.74	I	C15	3.41	3.36	5.09	0.03	4.7422	4.9999	1.7775
8	130	124.0	0.75	I	C15	3.01	3.30	5.19	0.09	4.2770	5.0715	3.0400
9	110	104.5	0.74	I	C10	3.72	2.83	4.03	0.03	5.0102	3.9325	1.9447
10	110	104.5	0.74	I	C10	3.24	2.83	4.03	0.03	4.5125	3.9325	1.9447
11	90	85.0	0.74	I	C10	4.17	2.30	4.96	0.03	5.3508	4.6808	2.2074
12	90	85.0	0.74	I	C10	3.63	2.30	4.96	0.03	4.8556	4.6808	2.2074
13	90	85.0	0.78	I	C10	3.01	2.13	5.34	0.19	4.0544	4.9441	>5.0
14	70	65.5	0.73	I	C10	4.83	1.80	6.34	0.005	5.7749	5.5578	1.3636
15	70	65.5	0.73	I	C10	4.20	1.80	6.34	0.005	5.2818	5.5578	1.3636
16	70	65.5	0.73	I	C10	3.28	1.00	6.34	0.005	4.3039	5.5578	1.3636
17	50	46.0	0.73	I	C10	6.16	1.26	9.07	0.02	6.4270	6.8448	2.3621
18	50	46.0	0.73	I	C10	5.33	1.26	9.07	0.02	5.9411	6.8448	2.3621
19	50	46.0	0.73	I	C10	4.13	1.26	9.07	0.02	4.9186	6.8448	2.3621
20	30	26.5	0.70	I	C10	9.02	0.77	14.90	0.001	7.4160	8.6259	1.2714
21	30	26.5	0.70	I	C10	7.79	0.77	14.90	0.001	6.9397	8.6259	1.2714
22	30	26.5	0.70	I	C10	5.97	0.77	14.90	0.001	5.8419	8.6259	1.2714
(上游边坡 0.05)												
1	190	182.5	0.71	I	C20	3.02	4.81	4.74	0.16	4.2933	4.9581	3.3579
2	190	182.5	0.82	I	C15	3.03	4.03	4.24	0.94	4.1215	4.3044	>5.0
3	170	163.0	0.70	I	C15	3.12	4.37	5.22	0.06	4.4124	5.3443	2.1886
4	170	163.0	0.78	I	C15	3.02	3.82	4.47	0.62	4.1622	4.5102	>5.0
5	150	143.5	0.70	I	C15	3.29	3.84	4.45	0.06	4.5896	4.4881	2.2623
6	150	143.5	0.74	I	C15	3.03	3.58	4.77	0.32	4.2226	4.7531	>5.0
7	130	124.0	0.70	I	C15	3.52	3.32	5.15	0.06	4.8026	5.0469	2.3634
8	130	124.0	0.70	I	C15	3.08	3.32	5.15	0.06	4.3115	5.0469	2.3634
9	110	104.5	0.69	I	C10	3.79	2.85	4.00	0.003	5.0354	3.9091	1.2358
10	110	104.5	0.69	I	C10	3.30	2.85	4.00	0.003	4.5433	3.9091	1.2358
11	90	85.0	0.69	I	C10	4.24	2.31	4.93	0.01	5.3703	4.6543	1.4679
12	90	85.0	0.69	I	C10	3.69	2.31	4.93	0.01	4.8803	4.6543	1.4679
13	90	85.0	0.72	I	C10	3.02	2.19	5.20	0.13	4.0577	4.8483	>5.0
14	70	65.5	0.69	I	C10	4.97	1.78	6.40	0.02	5.8169	5.5952	1.8748
15	70	65.5	0.69	I	C10	4.32	1.78	6.40	0.02	5.3306	5.5952	1.8748
16	70	65.5	0.69	I	C10	3.38	1.78	6.40	0.02	4.3732	5.5952	1.8748
17	50	46.0	0.68	I	C10	6.22	1.27	8.96	0.004	6.4318	6.8021	1.4174
18	50	46.0	0.68	I	C10	5.40	1.27	8.96	0.004	5.9502	6.8021	1.4174
19	50	46.0	0.68	I	C10	4.18	1.27	8.96	0.004	4.9439	6.8021	1.4174
20	30	26.5	0.66	I	C10	9.22	0.77	14.88	0.0005	7.4363	8.6208	1.2248
21	30	26.5	0.66	I	C10	7.96	0.77	14.88	0.0005	6.9653	8.6208	1.2248
22	30	26.5	0.66	I	C10	6.11	0.77	14.88	0.0005	5.8866	8.6208	1.2248