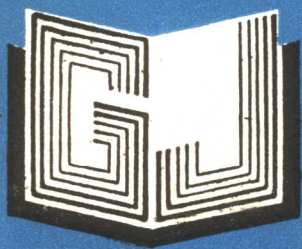


936315



高等学校教材



水工建筑物专题

(混凝土坝设计)

清华大学 吴媚玲 主编

642
11



986315

高等学校教材

水工建筑物专题

(混凝土坝设计)

清华大学 吴媚玲 主编

中国水利水电出版社

内 容 简 介

本书是作者学习了国内外混凝土坝先进设计经验, 结合自己近年来教学、科研工作, 汇编、总结而成的专题著作类型的教材。内容包括: 混凝土坝可靠性分析, 碾压混凝土筑坝技术, 拱坝体形选择、优化设计与智能优化辅助设计, 混凝土坝的施工分缝和分期加高, 断裂力学在混凝土坝设计中的应用等。本书既着重于科学理论上的创新, 又有较多的工程应用实例, 理论密切联系实际, 以帮助读者提高对混凝土坝设计和分析研究的能力和水平。

本书可作为水利水电类各专业大学生和研究生的选修课教材, 以及学习水工建筑物课程的教学参考书, 还可供从事水利水电工程科研、设计、施工、管理等工作的技术人员, 以及其他有关专业人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工建筑物专题: 混凝土坝设计/吴媚玲主编. -北京: 中国水利水电出版社, 1995

高等学校教材

ISBN 7-80124-070-7

I. 水… II. 吴… III. ①水工建筑物-高等学校-教材②水工建筑物-混凝土坝-设计-高等学校-教材 IV. ①TV6②TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 14131 号

书 名	高等学校教材 水工建筑物专题 (混凝土坝设计)
作 者	清华大学 吴媚玲 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 10 印张 219 千字
版 次	1996 年 6 月第一版 1996 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	7.90 元

前 言

由于水利水电工程的大量建造,促使相应的科学技术得到了飞速的发展。同时,要求广大水利工作者除掌握基本的水工建筑物知识外,应学习、了解更多的新技术,以便更好地服务于工程建设。为此,水利部高等学校水利水电专业水工建筑物教学组特组织编写若干集《水工建筑物专题》,各集的内容均有所侧重,作为水利水电类各专业大学本科生和研究生的选修课教材;也供有关专业的工程设计、科学研究、施工生产、运行管理等技术人员学习参考。本书是水工建筑物专题之一——混凝土坝设计。

由于混凝土坝涉及的科学技术内容十分广泛,材料极为丰富,目前各院校开设的选修课又无统一的教学大纲,故作者在考虑本书具体内容时,主要选择理论先进、技术可靠、适用面广、有重要发展前景的、且大多为作者近年来教学及科研所涉及的有关混凝土坝的资料。因此,文中除汇集了国内外学者的科学技术成果外,并有相当部分为作者所研究创新的内容。作者十分重视理论联系实际,既力求理论上的创新,又密切结合应用于工程实际。既有科学上的新成就,又有工程实例,故本书是一本实用型的教材兼科技参考书。

本书第一章由姚耀武、吴媚玲编写,第三章由朱伯芳编写,第五章由张镜剑编写,吴媚玲编写第二、四章,并担任主编。夏颂佑教授为第四章提供了他的研究成果,并对书稿进行全面审阅,提出了宝贵意见,在此表示感谢。组织编写本书曾得到广泛的响应,不少学者提供了很有意义的题目,由于篇幅所限,不能一一编入,特致深切的歉意。

由于作者所见所识均极有限,有许多重要内容均未能列入本书;又限于作者的水平,所列内容也不免有不妥之处,热诚欢迎广大读者批评指正。

主编 吴媚玲

1995.6

目 录

前 言

第一章 混凝土坝可靠性分析	1
一、概述	1
二、结构可靠性计算方法简介	2
(一) 结构可靠性的基本概念	2
(二) 失效概率与可靠指标	2
(三) 改进的一次二阶矩法	4
(四) 可用于非正态变量的 JC 法	5
(五) 截尾处理在 JC 法中的应用	6
(六) 变量相关下的结构可靠度计算	7
(七) 工程结构可靠度程序设计	8
三、重力坝可靠性分析	8
(一) 重力坝可靠度分析常用的两种方法——JC 法和降维数值解法	9
(二) 重力坝稳定可靠指标标准的探讨	14
(三) 分项系数法计算重力坝可靠度	19
四、蒙特卡洛方法	22
(一) 蒙特卡洛方法的基本原理及其改进	22
(二) 随机数的产生和检验	23
(三) 蒙特卡洛法分析重力坝可靠性	24
五、随机有限元法	26
(一) 随机有限元理论概述	26
(二) 用随机有限元法重力坝可靠度计算模型	28
(三) 随机有限元程序主框图	29
六、随机边界元法	30
(一) 随机边界元原理简述	30
(二) 随机边界元计算可靠度程序设计	31
(三) 随机边界元程序的检验和应用	33
七、基于可靠度理论的重力坝优化设计	35
(一) 可靠度优化设计的提出	35
(二) 重力坝可靠度优化设计的方法	35
参考文献	39
第二章 碾压混凝土筑坝技术	40
一、碾压混凝土筑坝发展概况	40
(一) 国外碾压混凝土筑坝概况	40
(二) 国内碾压混凝土发展概况	41

二、碾压混凝土的特点及压实机理	42
(一) 碾压混凝土的压实机理	42
(二) 碾压混凝土的特点	43
三、碾压混凝土的材料	46
(一) 材料的选择	46
(二) 配合比设计	48
(三) 稠度的影响因素	50
(四) 碾压混凝土的物理力学性能	52
四、碾压混凝土重力坝设计	55
(一) 枢纽布置的特点	55
(二) 坝体剖面设计	56
(三) 防渗设计	61
(四) 温度控制	64
五、碾压混凝土坝施工和质量控制	66
(一) 施工导流	66
(二) 施工特点	67
(三) 质量检测与控制	69
参考文献	71
第三章 拱坝体形选择、优化设计与智能优化辅助设计	72
一、拱坝的几何模型	72
(一) 拱坝几何模型的构造方法	72
(二) 离散型几何模型	72
(三) 连续型几何模型	73
(四) 拱坝的实用几何模型	73
二、拱坝的体形设计	73
(一) 拱坝的最优中心角	73
(二) 单曲拱坝与双曲拱坝	76
(三) 水平拱圈的形态	78
(四) 影响拱坝体形设计的因素	82
(五) 手工设计方法	84
(六) 计算机辅助设计 (CAD)	87
(七) 拱坝满应力设计	87
三、拱坝体形优化设计	89
(一) 河谷形状与坝轴线位置	89
(二) 设计参数与设计变量	89
(三) 目标函数	91
(四) 约束条件	91
(五) 拱坝优化的数学模型	93
(六) 优化过程中的应力分析与稳定分析	93
(七) 优化方法	96
(八) 拱坝优化的工程应用	97

四、拱坝的智能优化辅助设计	98
参考文献	100
第四章 混凝土坝的施工分缝和分期加高	101
一、混凝土坝坝体分缝的布置和构造	101
(一) 分缝的目的和类型	101
(二) 横缝的布置和构造	102
(三) 纵缝的布置	107
二、施工纵缝对混凝土坝工作性态的影响	108
(一) 纵缝的工作状况	108
(二) 有缝坝的应力分析	109
(三) 直缝对坝体工作性态的影响	113
(四) 斜缝不灌浆坝的工作性态	116
(五) 缝对重力拱坝工作性态的影响	118
三、混凝土坝分期施工和加高设计	119
(一) 混凝土坝的加高方式	121
(二) 应力计算和分析	124
(三) 用预应力钢索加高混凝土坝	125
参考文献	128
第五章 断裂力学在混凝土坝设计中的应用	129
一、断裂力学的基本概念	129
(一) 最大周向应力判据 ($\sigma_{\theta\max}$ 判据)	132
(二) 应变能密度因子 (或称比应变能) 判据 (S 判据)	132
(三) 最大应变能释放率判据 (G 判据)	135
二、混凝土坝的断裂力学数值分析	134
(一) 我国的应用情况	134
(二) 国外的应用情况	136
(三) 国内的新进展	137
三、混凝土坝的断裂力学模拟试验	144
四、总结与展望	147
参考文献	151

第一章 混凝土坝可靠性分析

一、概述

工程结构的设计长期以来不计及量的随机性，而是按确定性的概念，即采用最大荷载和最小强度的方法。传统的安全系数就是最小强度与最大荷载之比。“最大”和“最小”常用经验确定，但它们和实际情况的符合程度，则常常说不清楚。然而，结构设计理论和方法始终是伴随着科学技术进步而不断创新和完善的。50年代初期发展起来的结构可靠性理论，不同于以安全系数为标志的确定性传统设计方法。它以统计数学为基础，考虑结构强度与结构所受的荷载均是随机变量，研究结构或构件在规定的条件下，在给定的时间内，完成规定任务的概率，即结构或构件的可靠度。这样就可以在给定的、数量化的、统一的目标可靠度下，通过对设计、施工、使用及维修的有效控制，使工程结构在整个设计基准期内的实际可靠度，不低于目标可靠度。由于有了统一的数量化的可靠指标，不但使结构与结构之间，同类结构的构件与构件之间有了可比性，而且也研究工程的安全可靠与经济合理之间的关系提供了条件。利用优化理论还可以在一定的目标可靠度下，设计出比较经济的工程结构。

结构可靠度设计从40年代开始，当时应用的一次二阶矩理论只适用于正态分布的随机变量。到70年代，A. H-S. Ang（洪华生）对各种结构不定性作了分析，提出了广义的可靠度概率法。1970年，“国际结构安全度联合委员会（JCSS）”采用 Rackwitz 等提出的，“当量正态”的方法。该方法考虑随机变量实际分布的二阶矩模式，提高了计算精度，扩大了应用范围，使二阶矩模式的结构可靠度表达式与设计方法开始进入了实用阶段，并成为公认的结构可靠度计算方法。加拿大的林德（N. C. Lind）提出了分项系数概念，便于给出与现行设计规范相联系的多系数的设计表达式。所有这些都大大促进了可靠性理论在结构设计中的推广应用。

目前在国外的结构设计中，正推行基于概率的极限状态理论。北美、西欧、北欧、东欧、日本等国家，相继编制出版了以结构可靠性理论为基础，以失效概率为标志的概率极限状态设计理论的新一代工程结构设计标准、法规和规范。我国继1984年公布实施的国家标准《建筑结构设计统一标准》（GBJ68—84）之后，各部门正在编制同一层次的《统一标准》。例如《港口工程结构设计统一标准》、《公路工程结构设计统一标准》、《铁路工程结构设计统一标准》、《水工结构设计统一标准》等，以及作为这些《统一标准》必须共同遵循的更高层次的《工程结构设计统一标准》，及其下一层次的《混凝土与钢筋混凝土规范》等。我国将会形成一个比较完整的、新一代的工程结构设计技术标准、规范。

与建筑结构设计相比较，水工结构的可靠度研究则起步较晚。究其原因在于：水利工程影响因素较多，水工建筑物具有超静定、大体积等种类繁多的结构型式，作用变化多端的荷载，再加上复杂的地基影响，原始资料牵涉到水文、地质等多方面。而这些资料的测试往往由于财力和观测时间等因素的限制，常不能满足随机统计分析的精度对样本数的要

求,使可靠度分析缺乏必要的原始统计分析资料。水工建筑物破坏原因众多,破坏型式复杂,结构体系的极限状态不很明确,而又不允许进行原型破坏试验,缺乏原型实测验证,因此水工结构可靠性分析工作直到70~80年代才有较大的开展。如1984年“国际大坝安全会议”的论文中,就有不少涉及概率设计的论文;我国土木工程学会桥梁及结构工程学会结构可靠度委员会的学术会议中,水工结构方面的学术论文亦占相当的数量,在可靠度分析技术的某些方面甚至有后来居上之势。总之,在水工设计中推广应用可靠度理论是一项重要的任务。

二、结构可靠性计算方法简介

较全面的叙述结构可靠性的著作已有若干,其中尤以洪华生等所著、已有中译本的《工程规划与设计中的概率概念》一书的论述最为系统全面。本书则对可靠性分析理论中的一些基本要点作一简介。

(一) 结构可靠性的基本概念

结构的可靠性,是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能(或性能)的能力,这种能力的概率度量称为可靠度。

在工程结构设计中,“规定的时间”一般指结构的设计基准期 T ;“规定的条件”指的是设计预先确定的结构各种施工和使用条件;“预定功能”一般指结构能够承受可能作用的正常荷载和强迫变形,并保持良好的工作性能,具有一定的耐久性等。

结构功能函数是用来描述结构的各种功能的,是相应功能设计基本变量的函数。以承载功能为例,当设计基本变量均为随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 时,功能函数

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-1)$$

用以表达承载功能。以功能函数不取负值

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \quad (1-2)$$

为可靠条件进行的设计,叫做概率极限状态设计。等式

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1-3)$$

称为承载能力极限状态方程。

概率极限状态设计的特点是,按结构功能函数的取值符号严格地把结构区分为三种不同状态:

当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态;

当 $Z = 0$ 时,结构处于极限状态;

当 $Z < 0$ 时,结构处于失效状态。

可见,结构的极限状态是结构达到使它不能完成预定功能前的一种临界状态,用极限状态描述:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

它是结构可靠度分析中的重要依据。

(二) 失效概率与可靠指标

当(1-1)式所示的功能函数出现小于零($Z < 0$)的概率称为结构(或构件)的失效概率(P_f)。 P_f 值原则上可通过多维积分式

$$P_f = \iiint_{Z \leq 0} f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1-4)$$

计算求得。但是当功能函数中有多个基本随机变量，或函数为非线性时，上述积分变得十分复杂，对许多实际问题都难于用式 (1-4) 求解。因此，工程设计并不用这种直接积分法，而是用比较简便的近似方法求解，而且往往是先求得结构的可靠指标 β ，然后再求得其相应的失效概率 P_f 。

结构失效概率的计算，必需应用概率论与数理统计理论。设一个结构的强度或抗力为 R ，所施加的荷载的效应为 S 。 R 和 S 都不是固定值，而是服从某种分布的随机变量，具有确定的概率密度函数 (PDF)。图 1-1 (a) 和 (b) 表示假定的 R 和 S 的 PDF。如果将图 1-1 (a) 减去图 1-1 (b)，则得 $Z=R-S$ 的概率密度曲线，见图 1-1 (c)，并表明 R 小于 S 时发生失效。

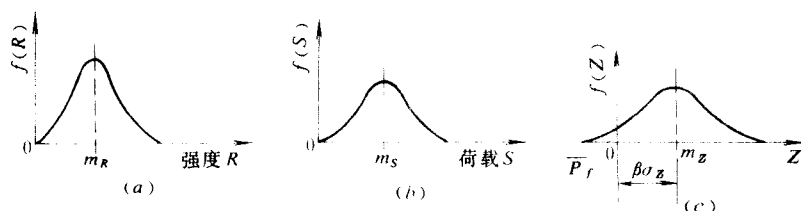


图 1-1 可靠指标 β

失效概率 P_f 等于 $P[(R-S) \leq 0]$ ，它等于 $P[Z \leq 0]$ ， Z 就是所考虑的某种失效模式的功能函数。图 1-1 (c) 上的阴影部分面积即等于失效概率 P_f 。

通常，有关 Z 分布的尾部情况，我们了解得并不充分。假定极限状态方程 $Z=R-S$ 的两个随机变量为正态变量，则失效概率 P_f 等于 $P[Z \leq 0]$ ，可以被一个含有 Z 的平均值和标准差的参数所替代。

在图 1-1 (c) 中，从 Z 的平均值 m_Z 到失效边界 (Z 等于零的点) 的距离，可以用 Z 的标准差 σ_Z 来表示，并等于 $\beta\sigma_Z$ 。 β 称为可靠指标。即

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} \quad (1-5)$$

而均值

$$m_Z = m_R - m_S \quad (1-6)$$

β 为一无量次的系数，它与失效概率 P_f 存在对应关系。即

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1-7)$$

由失效概率 P_f 和可靠度 P_r 的互补关系，可以导出可靠指标 β 与可靠度 P_r 的关系为

$$P_r = 1 - P_f = 1 - \Phi(-\beta) = \Phi(\beta) \quad (1-8)$$

可靠指标 β 的公式 (1-5) 是在两个正态分布变量 R, S 下得到的。如果 R 或 S 非正态分布，也能算出 Z 的平均值 m_Z 和标准差 σ_Z ，但由式 (1-5) 算出的 β 值是近似的，不过仍可在工程设计时参考。

在基于可靠度理论的结构设计中， β 的重要程度与基于安全系数法设计中的安全系数 K 是相似的。目前各国有关部门都已制定或正在制定目标可靠指标以作为设计的依据。

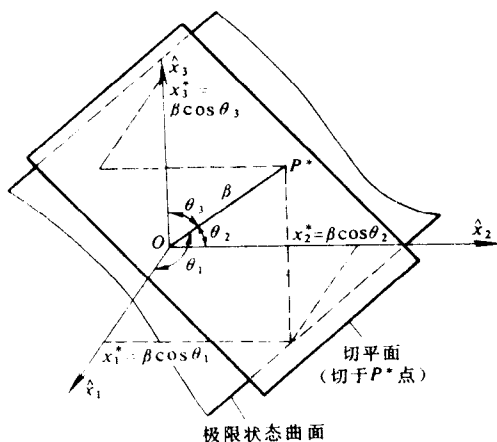


图 1-2 计算示意图

(三) 改进的一次二阶矩法

当结构功能函数 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ($n > 2$) 为非线性函数时, 极限状态方程 $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ 成为 n 维欧氏空间上的一个曲面, 见示意图 1-2。为了求出这种情况下的可靠指标 β , 一个现实可行的方法, 即改进的一次二阶矩法。

最初的可信度分析的二阶矩法是: 将功能函数在其平均值点处展开, 经线性化以得到线性失效边界的局部近似。因此, 这一方法称为均值一次二阶矩法。但是这一方法有很大缺点, 其一为因略去二阶及更高阶项而均值点 (线性化点) 一般不在失效边界上而带来较大误差; 其二是同一问题选择不同的

极限状态方程, 将导致得到不同的 β 值。

拉克维茨 (Rackwitz) 提出了改进的一次二阶矩法, 下面简要的加以叙述。

已经阐明, 结构的失效, 即结构的极限状态, 可表示为有关基本变量的函数

$$Z = g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

如果把线性化点选在失效边界上, 而且选在与结构最大可能失效概率对应的设计验算点 P^* 上 (图 1-2), 可以证明能克服一次二阶矩法中存在的问题, 即可得到一个不变的可靠指标。

当选择设计验算点 x_i^* ($i=1, 2, \dots, n$), 作为线性化点, 利用泰勒展开式, 并只取线性项

$$Z \approx g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \cdot \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \quad (1-9)$$

Z 的均值为

$$m_Z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (m_{x_i} - x_i^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*}$$

由于设计验算点就在失效边界上, 即有 $g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$, 因此 m_Z 变成

$$m_Z = \sum_{i=1}^n (m_{x_i} - x_i^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \quad (1-10)$$

在变量相互独立的假定下, 可由 (1-9) 式求得 Z 的标准差 σ_Z 为

$$\sigma_Z = \left[\sum_{i=1}^n \left(\sigma_{x_i} \cdot \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-11)$$

如果我们将任一变量 x_i 对于 σ_Z 值贡献的度量称为变量的敏感系数, 记为 α_i , 可以这样定义:

$$\alpha_i = \frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i}}{\sigma_Z} \quad (1-12)$$

由式 (1-11)

$$\begin{aligned}\sigma_z^2 &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot \sigma_z) \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i} \\ &= \sigma_z \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i}\end{aligned}$$

从而可得

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i} \quad (1-13)$$

又

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{x_i} - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \sigma_{x_i}} \quad (1-14)$$

从而

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x^*} [(m_{x_i} - x_i^*) - \alpha_i \beta \sigma_{x_i}] = 0 \quad (1-15)$$

满足这个方程的 x_i^* 值可由下式给出:

$$x_i^* = m_{x_i} - \alpha_i \beta \sigma_{x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-16)$$

上述计算一般采用迭代法求解, 其步骤如下:

- (1) 假设一个 β ;
- (2) 对每一个 i 值, 令 $x_i^* = m_{x_i}$;
- (3) 对每一个 i 值, 计算 $x = x^*$ 处的 $\frac{\partial g}{\partial x_i}$;
- (4) 对每一个 i 值, 计算 α_i ;
- (5) 计算新的 x_i^* 值;
- (6) 重复步骤 (3) ~ (5), 直到所得的 x_i^* 值稳定为止;
- (7) 计算 $Z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$;
- (8) 修正 β , 重复步骤 (3) ~ (7) 直到 $Z \approx 0$;
- (9) 最后由 $P_f = \Phi(-\beta)$ 计算失效概率。

上述的改进一次二阶矩法, 只适用于基本随机变量为统计独立的正态分布变量。

(四) 可用于非正态变量的 JC 法

在实际结构工程设计中, 有些基本变量 x_i 为非正态随机变量, 此时不能直接用改进的一次二阶矩法, 而需进行当量正态化处理。所谓“当量正态化”, 即根据在设计验算点 x_i^* 处当量正态变量与非正态变量的概率分布函数值 (尾部面积) 相等以及概率密度函数值 (纵坐标) 相等的条件, 见

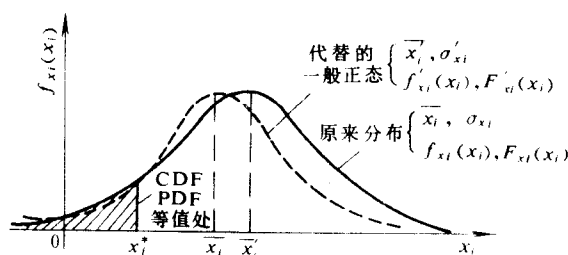


图 1-3 JC 法的等效正态分布图

图 1-3. 求出当量正态变量 x_i' 的平均值和标准差。

设非正态分布随机变量 x_i 的概率分布函数为 $F_{x_i}(x)$, 概率密度函数为 $f_{x_i}(x)$, 变换后的当量正态分布为 $N(\mu_{x_i'}, \sigma_{x_i'})$ 。根据在 x_i^* 处概率分布函数值相等的条件, 可得

$$\Phi\left[\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right] = F_{x_i}(x_i^*) \quad (1-17)$$

即

$$\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}} = \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)]$$

或

$$\mu_{x_i'} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)]\sigma_{x_i'} \quad (1-18)$$

式中 $\Phi^{-1}(\cdot)$ ——标准正态分布函数的反函数。

又根据在 x_i^* 处概率密度函数值相等的条件, 可得

$$\phi\left[\frac{x_i^* - \mu_{x_i'}}{\sigma_{x_i'}}\right] / \sigma_{x_i'} = f_{x_i}(x_i^*) \quad (1-19)$$

将式 (1-18) 代入, 整理后得

$$\sigma_{x_i'} = \phi(\Phi^{-1}[F_{x_i}(x_i^*)]) / f_{x_i}(x_i^*) \quad (1-20)$$

式中 $\phi(\cdot)$ ——标准正态概率密度函数。

公式 (1-18) 和 (1-20) 即为非正态分布随机变量 x_i 转换为当量正态分布随机变量 x_i' 后的平均值 $\mu_{x_i'}$ 和标准差 $\sigma_{x_i'}$ 。

以 x_i' 的统计参数 $\mu_{x_i'}$ 、 $\sigma_{x_i'}$ 代替 x_i 的统计参数 μ_{x_i} 、 σ_{x_i} 后, 则可用上述改进的一次二阶矩法求出 β 、 P_f 和 x_i^* , 这就是所谓 JC 法。JC 法是拉克维茨 (Rackwitz) 和菲斯莱 (Berndt Fiessler) 等人提出的, 所以有时也称为 R-F 法。由于该法已经为国际安全度联合委员会 (JCSS) 所采用, 故称为 JC 法, 《建筑设计结构统一标准》(GBJ68—84) 也推荐此计算方法。

(五) 截尾处理在 JC 法中的应用

在实际的工程结构设计中, 在我们考虑的随机变量中, 有些随机变量分布在两端受几何或物理上的限制等原因, 因此, 在进行结构可靠度分析时往往需要对某些随机变量的分布进行截尾处理。截尾值对不同性质的变量是不同的。如反映抗力的材料抗拉强度、抗压强度, 摩擦系数、凝聚力等, 一般不能小于零; 亦即在最小值方面有限制, 这就需要根据实际情况进行左截尾。又如对反映荷载的变量, 其最大值可能有限制; 如对坝体上游水位, 其最大值一般不能大于坝高, 这就需要根据实际情况进行右截尾, 见图 1-4。

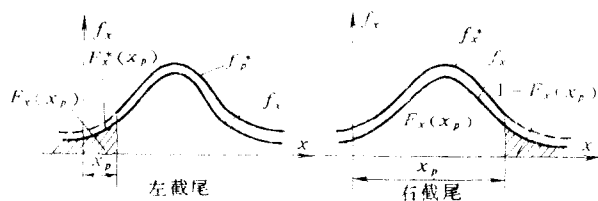


图 1-4 截尾分布图

对变量分布是这样进行截尾处理的:

1. 假设截尾分布

设有随机变量 x , 其均值为 μ_x , 标准差为 σ_x , 概率分布 F_x , 概率密度 f_x 。在 x_p 处有截尾分布 (左截尾或右截尾), 则其截尾后的概率函数假定为:

左截尾下

$$\left. \begin{aligned} f_x^* &= \frac{f_x}{1 - F_x(x_p)} & x \geq x_p \\ f_x^* &= 0 & x < x_p \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

右截尾下

$$\left. \begin{aligned} f_x^* &= \frac{f_x}{F_x(x_p)} & x < x_p \\ f_x^* &= 0 & x > x_p \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

式中 f_x^* ——考虑截尾后的概率密度函数。

2. 不同截尾情况下概率密度函数 f_x^* 和累积分布函数 F_x^* 的计算公式

JC 法对随机变量的要求有完整的分布, 即要求分布曲线有尾巴部, 对分布进行当量正态化。而截尾处理后, 由于分布没有尾部, 因此必需进行专门处理, 这一部分的推导从略, 现只将计算公式汇总如下。

(1) 左截尾情况: 当 $x^* > x_p$ 时,

$$f_x^*(x^*) = \frac{f_x(x^*)}{1 - F_x(x_p)} \quad (1-23)$$

$$F_x^*(x^*) = \frac{1}{1 - F_x(x_p)} [F_x(x^*) - F_x(x_p)] \quad (1-24)$$

当 $x^* \leq x_p$ 时, 令

$$x^* = x_p + \Delta x (\Delta x \text{ 为一很小值}) \quad (1-25)$$

$$f_x^*(x^*) = \frac{f_x(x_p)}{1 - F_x(x_p)} \quad (1-26)$$

$$F_x^*(x^*) = \frac{1}{1 - F_x(x_p)} [F_x(x^*) - F_x(x_p)] \quad (1-27)$$

(2) 右截尾情况: 当 $x^* < x_p$ 时,

$$f_x^*(x^*) = \frac{f_x(x^*)}{F_x(x_p)} \quad (1-28)$$

$$F_x^*(x^*) = \frac{F_x(x^*)}{F_x(x_p)} \quad (1-29)$$

当 $x^* \geq x_p$ 时, 令

$$x^* = x_p - \Delta x (\Delta x \text{ 为一很小值}) \quad (1-30)$$

$$f_x^*(x^*) = \frac{f_x(x^*)}{F_x(x_p)} \quad (1-31)$$

$$F_x^*(x^*) = \frac{F_x(x^*)}{F_x(x_p)} \quad (1-32)$$

求出 $f_x^*(x^*)$ 和 $F_x^*(x^*)$, 已为非正态分布。所以必需先对 $f_x^*(x^*)$ 和 $F_x^*(x^*)$ 进行当量正态化, 然后用改进一次二阶矩法计算结构构件的可靠指标, 这就是考虑截尾分布的 JC 法。

(六) 变量相关下的结构可靠度计算

在工程实际问题中基本随机变量往往是相关的, 而这种相关性对 β 的计算是有影响

的, 因此必需讨论变量相关下的可靠度计算。由于这部分计算公式复杂, 为了便于计算程序的编制, 故在此公式推导和表示中均使用矩阵符号。

对变量相关情况的处理方法, 是通过矩阵变换将其相关矩阵化为不相关矩阵。

设有随机变量 x_1, x_2 , 其均值为 m_{x_1}, m_{x_2} 。 x_1 与 x_2 的相关性可用协方差确定, 即

$$\text{Cov}(x_1, x_2) = E[(x_1 - m_{x_1})(x_2 - m_{x_2})] \quad (1-33)$$

设有 n 个随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 用向量表示 $\{x\} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 其协方差矩阵 $[C_x]$ 则为

$$[C_x] = \begin{bmatrix} \text{Var}(x_1) & \text{Cov}(x_1, x_2) & \cdots & \text{Cov}(x_1, x_n) \\ \text{Cov}(x_2, x_1) & \text{Var}(x_2) & \cdots & \text{Cov}(x_2, x_n) \\ \vdots & & & \\ \text{Cov}(x_n, x_1) & \text{Cov}(x_n, x_2) & \cdots & \text{Var}(x_n) \end{bmatrix} \quad (1-34)$$

其中 $\text{Var}(x_i) = \text{Cov}(x_i, x_i) = \sigma_i^2$ 。显然, 当任意两个变量都不相关时 $[C_x]$ 为一对角矩阵。

现在考虑一组新的变量 $\{Y\} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, 其中 y_i ($i=1, 2, \dots, n$) 是 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的线性函数。根据线性代数的理论, 采用适当的变换, 可以使 $\{Y\}$ 成为一组不相关的随机变量, 作变换

$$\{Y\} = [A]^T \{x\} \quad (1-35)$$

其中 $[A]$ 为正交矩阵, 它的列向量为 $[C_x]$ 的规格化正交特征向量, 这时 $\{Y\}$ 的协方差矩阵则为对角矩阵

$$[C_y] = \begin{bmatrix} \text{Var}(y_1) & & & \\ & \text{Var}(y_2) & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \text{Var}(y_n) \end{bmatrix} \quad (1-36)$$

并且有

$$[C_y] = [A]^T [C_x] [A] \quad (1-37)$$

$[C_y]$ 的对角元素就等于 $[C_x]$ 的特征值, 经 (1-35) 式变换, $\{Y\}$ 成立独立的随机变量。

(七) 工程结构可靠度程序设计

根据上述 JC 法原理, 考虑变量相关情况编制通用的工程结构可靠度程序, 使其能适合一般可靠度计算的各种情况。为此, 程序中变量分布可以是正态、对数正态和极值 I 型的任何一种; 每个随机变量都可以进行左截尾或右截尾处理; 随机变量相关时经过相关转换, 同样可计算可靠指标; 对于各种不同的受力构件, 只要改变极限状态方程的形式就可以进行计算, 这样的程序功能较为完善, 通用性强, 只需对个别子程序进行修改, 就能完成多种结构的可靠度计算。程序主框图见图 1-5。

三、重力坝可靠性分析

混凝土坝可靠性分析到目前为止, 进行得比较多、研究得比较深入的是混凝土重力坝的可靠度。而且 1991 年 6 月已经编制出国家标准《水利水电工程结构可靠度设计统一标

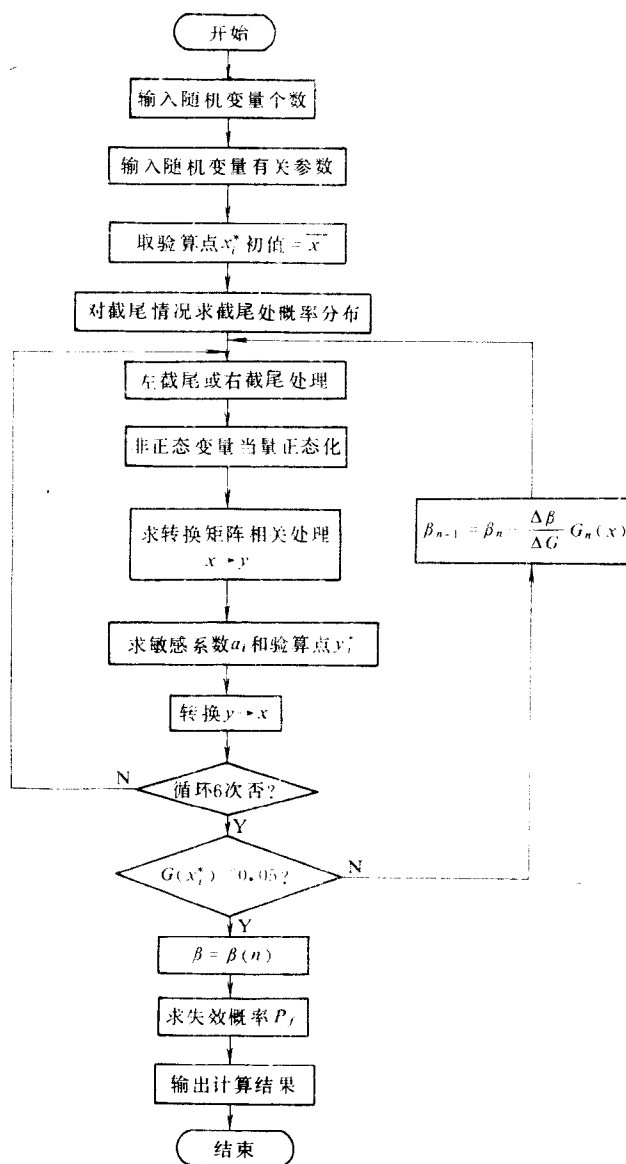


图 1-5 工程结构可靠度计算程序主框图

准》(送审稿)(以下简称“水工统标”)。因此,本书也主要结合重力坝可靠性分析来介绍有关内容。

(一) 重力坝可靠度分析常用的两种方法——JC法和降维数值解法

1. JC法计算重力坝可靠度

JC法的原理在上节作了介绍。作者根据混凝土重力坝设计规范,建立了混凝土强度和重力坝抗滑稳定的极限状态方程,考虑了各种荷载组合情况,编制了用JC法计算工程实用重力坝剖面的应力和稳定可靠度程序。该程序既可按现规范计算重力坝的应力和稳定,又

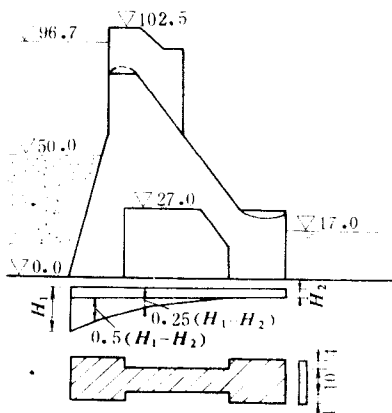


图 1-6 潘家口宽缝重力坝
计算剖面 (单位: m)

可得出相应的失效概率和可靠指标, 是用于重力坝设计和研究的简捷实用的程序。详细内容可参阅文献 [7] 的有关部分, 此处不再详述。

作为一个算例, 选用了潘家口宽缝重力坝, 其剖面尺寸及主要荷载情况见图 1-6。

计算中几个基本随机变量取值如下:

混凝土抗压强度 $[\sigma_p]$ 均值 23.34MPa, 标准差 4.668MPa;

混凝土抗拉强度 $[\sigma_t]$ 均值 1.895MPa, 标准差 0.379MPa;

混凝土容重 γ_c 均值 24kN/m³, 标准差 0.48kN/m³;

上游水压力 H 均值 96.7m, 标准差 3.024m;

地震惯性力系数 F_e 均值 1.5, 标准差 0.132。

为摸清 f' 、 c' 变化对稳定可靠指标 β 的影响, 以及 β 值与抗滑稳定安全系数 K' (抗剪断) 的关系, 选取了多组 f' 、 c' 值进行计算。各组的统计参数如表 1-1, 应力及稳定可靠指标计算结果见表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 f' 、 c' 统计参数表

		I	II	III	IV	V
f'	均 值	1.5	1.2	1.0	0.9	1.25
	标准差	0.3	0.24	0.2	0.18	0.25
c' (MPa)	均 值	1.5	1.3	1.1	0.7	0.65
	标准差	0.45	0.39	0.33	0.21	0.195

注 上述各组数据都具有相同的变异系数: f' 的 V 为 0.2, c' 的 V 为 0.3, 以便各组成果具有可比性。

表 1-2 应力可靠指标计算成果

荷载条件	部位	常值法正应力 σ_y (MPa)	可 靠 性 计 算					
			可靠指标 β	失效概率 P_f	验 算 点 值			
					$[\sigma]$	γ	H	F_e
正常情况	坝踵	1.352	8.247		10.99	2.341	102.82	—
	坝趾	0.92	4.802	7.7×10^{-7}	9.31	2.4	97.00	—
地震情况	坝踵	0.997	4.619	1.91×10^{-5}	-2.12	2.369	99.93	1.382
	坝趾	1.276	4.663	1.55×10^{-5}	15.79	2.4	97.00	1.353

注 压应力为正, 拉应力为负。