

重力坝与基岩弹模比的最佳点 及安全区间概念*

王 博 董耀星 王宗敏

(郑州工学院)

摘 要: 在水工结构的设计与分析中,坝体与地基的相互作用越来越受到人们的重视。本文通过对弹性地基上重力坝的可靠度分析计算,首次提出了重力与民基岩弹模比的最佳点及弹模比的安全区间的概念。从这两个概念出发,可以对重力坝设计的优劣及坝体所具有的整体安全度作出定性或定量评价,具有一定的理论意义和实际应用价值,可供制定规范及设计时参考。

关键词: 重力坝,可靠度,可靠指标。

中图分类号: TV314

结构设计的一个重要任务是保证结构安全运行。由于水工结构尤其是大坝的安全性对国民经济和人民生命财产具有重大影响,所以应确保其具有足够的安全度;另一方面,大坝的体积庞大,建设投资多,过分保守的设计将导致大量的资金浪费。因此,大坝安全度的恰当确定显得尤为重要。

影响大坝安全度的因素很多,其中基岩弹模的影响十分显著^[1]。对重力坝与地基相互作用的分析表明,基岩弹模的变化对重力坝坝体应力产生较大影响,从而影响坝体的安全度^{[2][3]}。

本文用随机特解边界元法定量分析了基岩弹模的变化对坝体应力可靠度的影响,在此基础上定义了重力坝与基岩弹模比的最佳点和安全区间两个概念,以便于对大坝的整体安全度及设计的优劣作出定性或定量评价。

1 功能函数

对图1所示重力坝剖面,由于其在静荷载作用下的最大拉压应力出现在坝踵及坝趾,

* 收稿日期: 1992-06-22

故这两处是整个坝体应力可靠度的控制区。作为代表, 考察坝踵 A 点及坝趾 B 点的可靠度。

计算中考虑的随机变量有: 坝体混凝土抗压极限强度、抗拉极限强度、上游水深 H 和坝体混凝土容重 γ 。各随机变量的统计参数列于表 1。各随机变量间互相统计独立。

考虑建成无水和正常蓄水两种工况。功能函数取为:

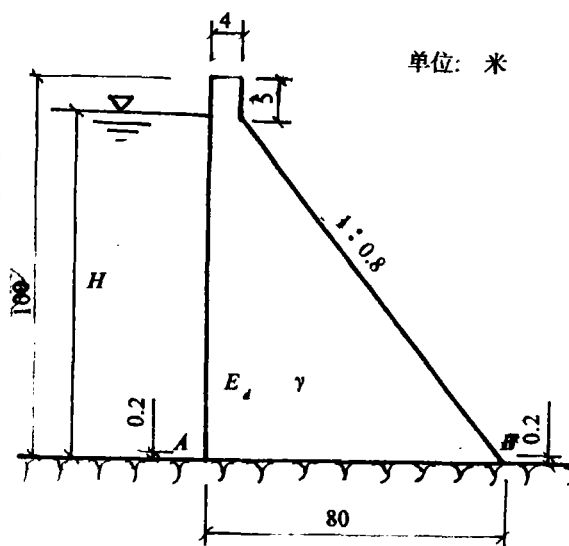


图 1 计算坝例示意图

表 1 随机变量及其参数

随机变量	单位	均值	标准差	分布
R_c	MPa	22.736	3.140	正态
R_t	MPa	1.819	0.273	正态
H	m	90.02	9.00	正态
γ	KN/m ³	24.0	2.4	正态

$$\text{对抗拉极限: } Z = R_t - \sigma_1 \quad (1)$$

$$\text{对抗压极限: } Z = R_c - |\sigma_2| \quad (2)$$

式中, σ_1 、 σ_2 为计算点的第一、第二主应力, 计算出的应力以拉为正, 压为负。

对以上功能函数, 当 R_c 、 R_t 、 σ_1 、 σ_2 的统计参数已知时, 用一次二阶矩法可以求出对应的可靠指标。 R_c 、 R_t 的统计参数已给出, 通过结构随机分析可以求出 σ_1 、 σ_2 的均值及其对基本随机变量的导数在基本随机变量均值点的值。由文献[4]可知, 问题归结为求应力雅可比阵 J_σ 。

由于重力坝处于复杂应力状态之中, 故应选用合适的数值方法计算应力及应力雅可比阵 J_σ 。下面介绍随机特解边界元法。

2 随机特解边界元法

文献[4]提出了结构随机分析的随机特解边界元法, 该法适用于含有体力的大体积结构的随机分析。

由文献[4]知, 含有体力的结构的随机特解边界元法的基本方程为:

$$hu - gt = ju' - gt' \quad (3)$$

$$h \frac{Du}{Dx} - (I_n \otimes g) \frac{Dt}{Dx} = h \frac{Du'}{Dx} - (I_n \otimes g) \frac{Dt'}{Dx} + W \quad (4)$$

其中:

$$W = \frac{Dh}{Dx}(u' - u) - \frac{Dg}{Dx}(t' - t); \quad (5)$$

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$: 基本随机变量列向量;

n : 基本随机变量个数;

I_n : $n \times n$ 阶单位矩阵;

\otimes : 矩阵的Kronecker乘积;

h, g : 系数矩阵, 为基本随机变量的函数;

u, t : 分别为结构边界节点的位移与面力列向量;

u', t' : 对应于特解的结构边界节点的位移与面力列向量。

解随机特解边界元的基本方程 (3)、(4), 可以求出边界节点的位移 u 、面力 t 以及导数项 $\frac{Du}{Dx}$ 和 $\frac{Dt}{Dx}$ 。

边界点应力可由下式求出:

$$\sigma_{ij} = \frac{2\mu V}{1-2V} \delta_{ij} u_{kk} + \mu(u_{ij} + u_{ji}) \quad (6)$$

式中 $u_{i,j}$ 可由面力与应力关系式

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (7)$$

及多变量复合函数求导法则

$$u_{i,j} \frac{dy_j}{d\xi} = \frac{du_i}{d\xi} \quad (8)$$

联立求出。

将 (6) 式对第 l 个基本随机变量 x_l 求导可得 J_l 的第 l 列为:

$$J_{il} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_l} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\frac{2\mu V}{1-2V} \right) \delta_{ij} u_{kk} + \frac{2\mu V}{1-2V} \delta_{ij} \frac{\partial u_{kk}}{\partial x_l} + \frac{\partial \mu}{\partial x_l} (u_{ij} + u_{ji}) + \mu \left(\frac{\partial u_{i,j}}{\partial x_l} + \frac{\partial u_{j,i}}{\partial x_l} \right) \quad (9)$$

式中 $\frac{\partial u_{i,j}}{\partial x_l}$ 的求法可参见文献[4]。

求出 J_l 后代入一次二阶矩法的迭代格式即可进行可靠度计算。

3 坝体与基岩弹模比的最佳点及安全区间概念

用随机特解边界元法对 A、B 两点在两种工况下的应力可靠度进行计算, 计算结果示于图 2、图 3 及图 4。

图 2 是建成无水工况的 $\beta \sim \alpha_E$ 关系图, 其中

$$\alpha_E = E_d / E_f$$

(10)

为坝体与基岩的弹模比, 为表示清楚起见, 横座标取为 $\lg \alpha_E$ 。

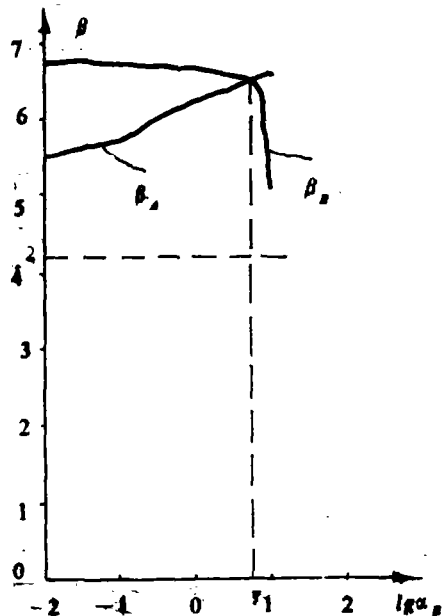


图 2 建成无水 $\beta \sim \alpha_E$ 关系图

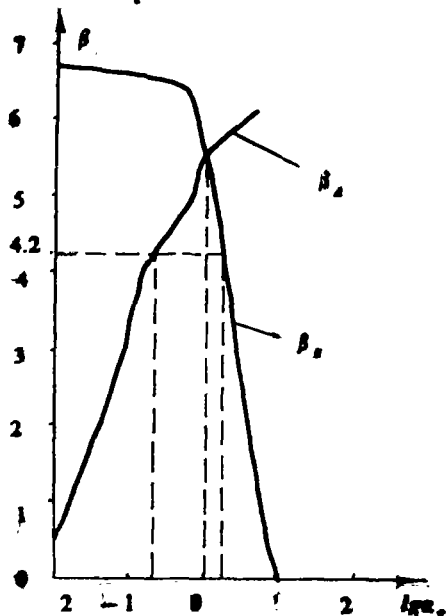


图 3 正常蓄水 $\beta \sim \alpha_E$ 关系图

由图 2 可见, A 点可靠指标 β_A 随 α_E 增大而增大, B 点可靠指标 β_B 随 α_E 增大而减小。当 $\alpha_E = 6.3$ 时, 两条曲线相交, 交点处的 β 值为 6.48。在整个计算区间 $\alpha_E = 0.01 \sim 10$ 之内 β 均大于 4.2。

图 3 示出了正常蓄水工况下 $\beta \sim \alpha_E$ 关系图, 由图 3 可见, 正常蓄水时, A 点可靠指标 β_A 随 α_E 的增大而增大, B 点可靠指标 β_B 随 α_E 的增大而减小。当 $\alpha = 1.0$ 时, 两条曲线相交, 交点处的 β 值为 5.55。对应于 $\beta > 4.2$ 的 α_E 的范围为 0.2~1.6。

将两种工况下的 $\beta \sim \alpha_E$ 曲线一并示于图 4。

可以看出,对图 1 所示重力坝剖面,在表 1 所示随机变量作用下,当弹模比 $\alpha_E = 1.0$ 时,对应的 $\beta = \bar{\beta}$ 为所有曲线下包线的最高点,如图 4 所示, $\bar{\beta} = 5.55$,对应的 $\bar{\alpha}_E = 1.0$ 即为弹模比的最佳点。

如果大坝的目标可靠指标 $\bar{\beta} = 4.2$,则由图 4 可见,当弹模比在 0.2~1.6 区间内变化时,对应的 β 值都大于 4.2,因此区间 $\bar{\alpha}_E = 0.2 \sim 1.6$ 定义为安全区间。当弹模比在安全区间内取值时,对应的可靠指标大于目标可靠指标。

由上面讨论可抽象出如下定义:

弹模比的最佳点:对应于坝体内各点在各种工况下所有 $\beta \sim \alpha_E$ 曲线的上包线上最大 β 值的 α_E 称为弹模比的最佳点,记为 $\bar{\alpha}_E$ 对应的可靠指标记为 $\bar{\beta}$ 。

弹模比的安全区间:坝体内各点在各种工况下所有 $\beta \sim \alpha_E$ 曲线的下包线上对应于 $\beta \geq \bar{\beta}$ 的所有 α_E 所组成的区间称为弹模比的安全区间,记为 $\bar{\alpha}_E$ 。其中 $\bar{\beta}$ 为目标可靠指标。由弹模比的最佳点和安全区间的概念出发,可对重力坝的设计作出一些定性判断,例如:

如果 $\bar{\beta} > \beta$,且 $\bar{\alpha}_E$ 较大,即最佳点对应的可靠指标远大于目标可靠指标,且在较大弹模比范围内坝体应力可靠指标大于目标可靠指标,则由 $\beta \sim \alpha_E$ 曲线的连续性可知,坝体的设计过于保守。同理,当 $\bar{\beta} < \beta$ 时,坝体未能达到规定的安全度。

如果 $\bar{\alpha}_E$ 较大,说明坝体与地基的弹模比在较大范围内取值时都可达到预定的安全度,则基础处理,如固结灌浆等将有较大的选择范围,而当 $\bar{\alpha}_E$ 较小时,基础处理时则应特别重视基岩要达到的弹模值的选择,以保证实际的 α_E 落在 $\bar{\alpha}_E$ 之中。由此可见,基岩弹模并非越大越好。

一般来讲,当 $\bar{\beta}$ 稍大于 β 且 $\bar{\alpha}_E$ 较小时,结构设计较为合理但对坝体混凝土施工和基础处理质量的要求较为严格。

另一方面,坝体的设计应使 $\bar{\alpha}_E$ 位于工程实际能方便达到的 α_E 附近,以实现节省造价又保证足够安全度的目的。

4 结 论

本文在对重力坝典型剖面进行可靠度分析计算的基础上提出了坝体与地基弹模比的最佳点和安全区间的概念,以此可对重力坝的设计及坝体所具有的整体安全度做出一些定性评价,具有一定的理论意义和工程应用价值。

应当指出,弹模比的最佳点及安全区间受到多种因素的影响,如随机变量的统计特征,坝体尺寸、作用荷载、施工质量、破坏准则等,对于具体工程应根据实际情况具体分析确定。

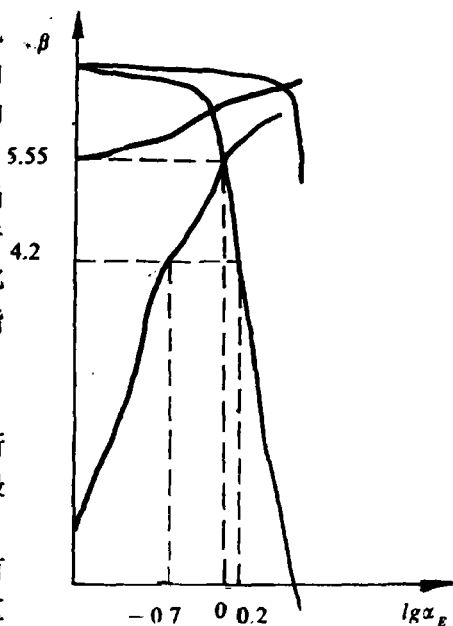


图 4 弹模比的最佳点及安全区间

参 考 文 献

- (1) 吴媚玲, 姚耀武著. 重力坝的应力、稳定与可靠性. 中国科学技术出版社. 1990.
- (2) 董耀星, 周鸿钧, 王博. 弹性地基上重力坝坝踵界面裂缝断裂可靠度分析. 郑州工学院学报. 1992. No. 3.
- (3) 董耀星. 蒙特卡罗边界法及重力坝可靠度分析. 郑州工学院硕士论文(导师: 周鸿钧). 1989.
- (4) 李庆斌, 周鸿钧, 林泉, 董耀星著. 特解边界元当及其工程应用. 科学技术文献出版社. 1992年

The Concepts of the Best Point and Safe Interval of the Ratio of Elastic Modules of Dam and its foundation

Wang bo Dong yaoxing Wang Zongmin
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In the design and analysis of hydraulic structures, the interaction of dam and its foundation is getting more and more attention. In this article the concepts of the Best Point and the Safe Interval of the ratio of elastic modules of dam and its foundation are presented with the illustrative calculations of reliability index of a dam. From these two concepts, one can evaluate the design of a dam and its safety qualitatively as well as quantitatively.

Keywords: dam, reliability, reliability index.