

混凝土面板堆石坝可靠度计算方法研究

Research on the method of reliability analysis of concrete faced rockfill dam

武清玺, 俞晓正

(河海大学 工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要: 由于混凝土面板堆石坝结构形式和坝体填筑材料物理性质的复杂性, 对这类结构进行可靠度分析十分困难, 目前国内外关于混凝土面板堆石坝结构可靠度方面的研究尚属罕见。首次提出用结构可靠度分析的响应面法计算混凝土面板堆石坝的可靠度, 并导出了相应的计算公式, 其中混凝土面板堆石坝的确定性分析采用三维非线性有限元法, 可靠度分析采用二次响应面法。结合工程算例, 对混凝土面板堆石坝的面板抗裂可靠度进行分析与计算, 得到了较好的计算结果。与其它可靠度分析方法相比, 本文提出的方法具有使用方便、计算效率高、计算精度好等优点, 是对混凝土面板堆石坝进行可靠度分析的好方法, 有进一步研究和推广价值。

关键词: 面板堆石坝; 非线性; 三维有限元; 响应面法; 可靠度分析

中图分类号: TV 641.43; TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0468-05

作者简介: 武清玺(1951-), 男, 博士, 教授。主要从事土木、水利工程的结构计算和可靠度分析与评价方面的研究工作。

WU Qing-xi, YU Xiao-zheng

(Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is very difficult to get the analytic expression of limit state equation in the reliability analysis of complicated and non-linear structures such as concrete faced rockfill dam (CFRD). Response surface method (RSM) is applied in analyzing the reliability of the concrete face slab in CFRD for the first time. CFRD is calculated by 3-D non-linear FEM and the reliability analysis of the concrete face slab in CFRD is calculated by two order RSM. The calculated results of an example of CFRD confirm the superiority in the precision and efficiency of RSM solving the reliability analysis of complicated structure such as CFRD.

Key words: CFRD; non-linear; 3-D FEM; RSM; reliability analysis

0 前言*

混凝土面板堆石坝具有工程量较小、工期短、造价低、施工简便和运行安全等优点^[1], 已成为坝型选择的主要类型之一, 并形成大规模推广的趋势。面板堆石坝中堆石材料的物理、力学特性非常复杂, 参数(如弹模、摩擦角等)取值离散性强, 不同区域变异性也较大。作用于面板堆石坝上的荷载(如水压、渗压、自重等)也具有一定的不确定性。以上因素导致混凝土面板堆石坝应力与变形的不确定性。因此, 对面板堆石坝进行可靠度分析, 用可靠指标度量结构的可靠度是较为科学合理的。由于混凝土面板堆石坝结构形式和坝体填筑材料物理性质的复杂性, 对其进行可靠度分析十分困难。

目前结构可靠度分析中常用的一次二阶矩法 JC 法、蒙特卡罗法以及随机有限元法等, 用于这类大型非线性结构的可靠度分析尚难得到满意的结果。本文提出用响应面法分析混凝土面板堆石坝的可靠度, 具有以下特点: ①可以直接使用已有的有限元计算程序; ②用非线性的响应面函数替代实际的复杂极限状态函数, 使得可靠度计算简捷、高效, 而且计算精度较高。

1 非线性有限元法概述

1.1 堆石材料的本构关系

堆石材料的本构模型表达了该材料的应力应变关系, 目前常用的模型^[2]有非线性弹性模型(如 Duncan E - μ 模型、Duncan E - B 模型、沈珠江模型等)和弹塑性模型(如沈珠江、殷宗泽提出的双屈服面模型等)。本文在对混凝土面板坝进行有限元计算时, 混凝土材料采用线弹性模型, 堆石材料采用 Duncan E - B 模型^[3]。

Kondner 等人根据常规三轴试验结果, 发现 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$ 关系可用双曲线拟合。随后 Janbu 由试验研究得出初始切线模量 E_i 与固结压力之间有如下关系:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中 p_a 为大气压力; K 、 n 是由试验确定的常数, 它们分别为弹性模量系数和弹性模量指数。

在加载情况下, Duncan 等人根据 Kondner, Janbu 等人的试验研究得出任一应力情况下切线模量的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

式中 c 为凝聚力; R_f 为破坏比, 是破坏时主应力差与应力应变双曲线的渐近线的纵坐标的比值, 即 $R_f =$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}; \varphi \text{ 为内摩擦角, 对于粗粒土假定 } \varphi \text{ 是 } \sigma_3 \text{ 的}$$

函数, 即 $\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left| \frac{\sigma_3}{p_a} \right|$, 式中 φ_0 和 $\Delta \varphi$ 为试验参数。

1980 年 Duncan 等人提出从三轴试验结果整理出切线体积变形模量 B_t , 由 B_t 、 V_t 作为参数进而求得 μ_t 的方法。

$$B_t = K_b p_a \left| \frac{\sigma_3}{p_a} \right|^m \quad (3)$$

式中 K_b 、 m 为待定试验常数, 它们分别为体积模量系数和体积模量指数。

引入切线体积模量 B_t 后, 相当于假定土的泊松比

$$\mu_t = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{E_t}{3B_t} \right| \quad (4)$$

1.2 非线性有限元求解方法

一般来说, 非线性有限元的计算方法有迭代法和增量法两种。对于面板堆石坝的静力分析, 增量法既可以模拟施工加荷过程, 又可以得到各施工阶段的应力, 故本文采用增量法。用增量法计算时, 荷载逐级递增, 可以模拟施工过程, 便于将计算结果与观测结果对比。以 Duncan $E-B$ 模型为例, 中点增量法的计算步骤表示如下:

(1) 根据前一级应力全量 $\{\sigma\}_{i-1}$ 确定弹性常数 E_{i-1} 和 μ_{i-1} , 并以此形成刚度矩阵 $[K]_{i-1}$;

(2) 加第 i 级荷载增量 $\{\Delta R\}_i$ 的一半于结构, 用 $[K]_{i-1} \{\Delta \delta\}_{i-1/2} = \frac{\{\Delta R\}_i}{2}$ 计算位移增量, 然后计算应力和应变增量, 并求累计的应力、应变;

(3) 施加全荷载增量, 由 $[K]_{i-1/2} \{\Delta \delta\}_i = \{\Delta R\}_i$ 求出本级的位移增量, 再求相应的应力、应变增量, 得到第 i 级荷载增量 $\{\Delta R\}_i$ 下的结果;

(4) 重复上述步骤, 可得各级荷载增量下的解答。

2 结构可靠度计算的响应面法

在结构可靠度分析中, 描述结构安全与否的极限状态方程为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad (5)$$

式中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为随机向量。该方程将基本变量空间分成失效区和安全区两部分, 结构的失

效概率由下式给出:

$$P_f = \int_{Z \leq 0} \dots \int f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n, \quad (6)$$

式中 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 维基本变量的联合概率密度函数。

在大多数工程实际问题中, 极限状态方程(5)是高度非线性的, 而且联合概率密度函数 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 也难以得到, 因此, 精确求解式(6)非常困难。在进行大型复杂结构的可靠度分析中, 一般采用随机有限元法, 但这一方法用于大型复杂结构的非线性问题, 例如混凝土面板堆石坝的可靠度分析, 尚存在许多困难。由于混凝土面板坝中堆石料的非线性本构关系, 用随机有限元求解其可靠度需要逐级加载、多次迭代, 这样做不但计算繁杂, 而且精度难以保证。近年来日益受到重视的结构可靠度计算的响应面法, 用于这类结构的可靠度分析显示出良好的应用前景^[4-6]。

在结构可靠度计算中, 对于非线性极限状态方程, 一般采用在设计验算点处的一次 Taylor 展开式近似求得结构的可靠指标, 计算精度受随机变量的变异性和极限状态方程的非线性程度影响较大。结构可靠度分析的二次响应面法, 是用一个待定的二次函数逼近实际的非线性极限状态函数, 使可靠度计算过程大大简化, 并可获得较高的计算精度。

Bucher 于 1990 年提出以下形式的二次响应面函数并得到广泛应用, 即

$$g(\tilde{X})' = a + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (7)$$

式中 系数 a 、 b_i 、 b_{ii} 需由 $2n+1$ 个样本点得到足够多的方程来确定。

下面阐述这一方法求可靠指标的计算过程。首先以均值点为中心点, 在区间 $(\mu_x - f\sigma_x, \mu_x + f\sigma_x)$ 内选取样本点, 根据有关文献的建议, f 一般在 1~3 之间取值。用 $g(\tilde{X})$ 在样本点处的 $2n+1$ 个函数值, 可以确定响应面函数中的系数。响应面函数得到以后, 即可求出原极限状态面上设计验算点的估计值 x_D 。第二步是选取新的样本中心点, 新的样本中心点 x_M 选在由均值点 μ_x 到 x_D 的直线上, 并保证在新的中心点处满足 $g(\tilde{X}) = 0$, 即

$$x_M = \mu_x + (x_D - \mu_x) \frac{g(\mu_x)}{g(\mu_x) - g(x_D)} \quad (8)$$

这样选取新中心点的目的, 是使所选样本点包含原极限状态面的更多信息。下一步是以 x_M 为中心点选取新的一组样本点。重复上述过程, 即可得到要求的响应面函数, 并由此计算结构的可靠指标。这一方法的图形表示如图 1。

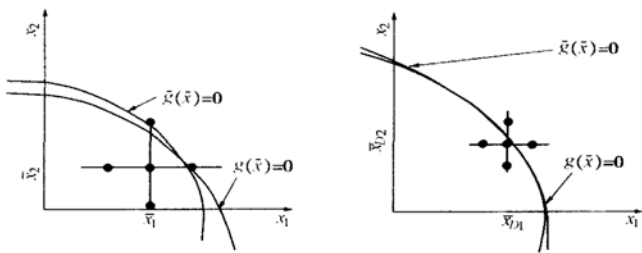


图1 计算过程的图形表示

Fig. 1 Schematic sketch of suggested procedure

3 面板堆石坝的可靠度计算与分析

3.1 概述

某混凝土面板堆石坝的剖面图如图2所示,坝体建筑在刚性岩基上。设计坝轴线长240 m,最大坝高60 m,坝顶宽10 m,最大底宽178 m,上、下游坡度均为1:1.4,钢筋混凝土面板按16 m分缝,坝址处河谷呈对称U形。坝体填筑料分区从上游到下游依次为垫层区、过渡层区、主堆石区和次堆石区,垫层区水平宽3 m,过渡层区水平宽4 m,混凝土面板厚度从坝顶的0.30 m渐变到坝址板处的0.48 m。

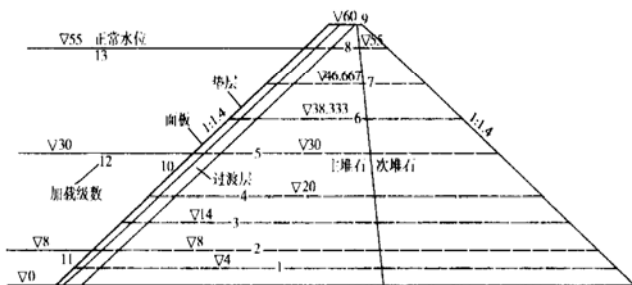


图2 混凝土面板坝结构与加荷级数示意图

Fig. 2 Profile of concrete faced rockfill dam

3.2 随机变量及其统计特征

严格地说,混凝土面板堆石坝应力与变形分析中涉及到的计算参数都是随机变量。为了简化计算,一般将变异性较小的随机变量作为常量。参考有关文献,本文计算中假设随机变量及其统计特性如表1所示,其余各量在分析时作为定值。

表1 随机变量及其统计特性

Table 1 Statistical information of random variables

变量	分布类型	均值	变异系数
次堆石摩擦系数 $\tan \varphi_1$	正态	1.192	0.10
主堆石摩擦系数 $\tan \varphi_2$	正态	1.280	0.10
垫层摩擦系数 $\tan \varphi_3$	正态	1.376	0.10
过渡层摩擦系数 $\tan \varphi_4$	正态	1.483	0.10
混凝土弹性模量 E/GPa	正态	26.0	0.10
混凝土抗拉强度 R/MPa	正态	1.88	0.10
上游水位 H/m	正态	50.0	0.06

3.3 面板堆石坝的三维有限元计算

用三维非线性有限元法计算坝体的应力与变形,计算中坝体堆石料的应力应变关系采用邓肯 $E-B$ 模型,面板的应力应变关系采用线弹性模型,面板与垫层料之间设置 Goodman 接触单元模拟接触面特性。单元剖分时,沿坝轴线将坝体分成16个横剖面,各横剖面的位置与面板的垂直缝一致,沿坝高分为9层,每层厚度为7 m左右。整个坝体共有824个单元,1116个节点,其中面板和接触面单元均为103个。

为了模拟大坝施工和蓄水过程中各阶段应力和变形的情况,较好地体现材料的非线性影响,计算时采用分级加载的方式,共将荷载分为13级(见图2)。其中堆石体分9级填筑,面板1级浇筑,第11级开始蓄水,至13级蓄水深达55 m。各种材料的计算参数如表2所示。

按照响应面法计算面板堆石坝可靠度的方法,需要对随机变量的每一个样本点作确定性计算,得到坝体应力或变形的相应量,才能确定响应面函数的系数,并进而计算结构的可靠度。由于计算结果颇多,考虑到本文主要分析混凝土面板的抗裂可靠度,所以,下面仅给出蓄水期随机变量取均值时混凝土面板的应力和挠度计算结果。图3为蓄水期混凝土面板的应力等值线图。

从蓄水期面板沿顺坡方向的应力分布图可见:面板中部区域为压应力,最大值为4.9 MPa,发生在面板中部1/2坝高处;面板底部部分区域则出现拉应力,最大拉应力为0.93 MPa。从蓄水期面板沿坝轴向的应力分布图可见:面板坝沿坝轴向的最大压应力为2.8 MPa,发生在面板中部2/3坝高处;最大拉应力为0.72 MPa,发生在坝肩附近的面板边缘局部区域。从蓄水期挠度等值线图可以看出,面板挠度基本上呈对称分布,其最大值为11.6 cm,发生在面板中部2/3~3/4坝高处。

3.4 混凝土面板的抗裂可靠度计算与分析

在混凝土面板堆石坝的设计中,面板的抗裂计算非常重要。如果面板的拉应力超过了混凝土的抗拉强度,面板就会产生裂缝,对大坝的安全运行造成危害。

引起面板产生裂缝的原因很多,如温度应力、混凝土干缩、堆石体的压缩变形以及面板上作用的水压力等,都有可能使面板产生裂缝。温度应力和混凝土干缩的影响,可以通过精心施工、精心维护来减少或避免,而堆石体的压缩变形和面板上作用的水压力则是不可避免的因素,因此,本文主要考虑水压力的作用和堆石体的压缩变形等因素对面板抗裂可靠度的影响。混凝土面板的抗拉裂极限状态方程为

表 2 材料计算参数

Table 2 Parameters of the materials

材料	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /(rad)	K /MPa	n	R_f	K_b /MPa	m	$\Delta\varphi$ /(rad)	K_{ur} /MPa
次堆石	21.5	0.0	0.873	850	0.250	0.80	400	0.05	0.147	1700
主堆石	21.5	0.0	0.908	1110	0.350	0.82	600	0.10	0.148	2200
过渡层	21.8	0.0	0.942	1000	0.400	0.85	450	0.15	0.150	2000
垫层	22.0	0.0	0.977	1200	0.450	0.78	750	0.20	0.183	
面板	24.8	0.0	0.419	26000	0.167	0.00	1000	0.00	0.000	0
接触面	0.0	0.0	0.639	4800	0.560	0.74	0	0.00	0.000	0

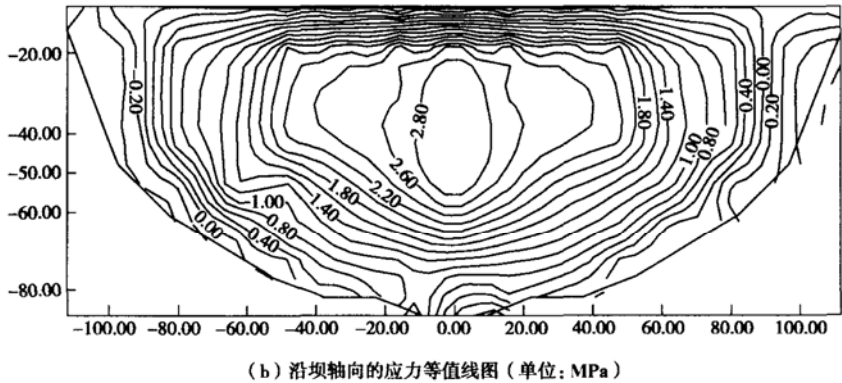
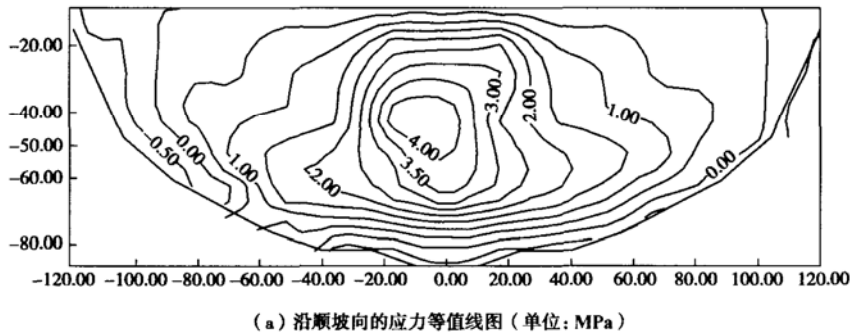


图 3 混凝土面板蓄水期应力等值线图

Fig. 3 The stress isoline of concrete slab of the dam under water pressure

$g(X) = R - S(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, E, H) = 0$, (9)
式中 R 为混凝土抗拉强度,是抗力项; S 为混凝土面板内产生的拉应力,是荷载效应项,它是基本随机变量 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, E, H$ 的函数。

下面介绍响应面函数的求解方法:

(1) 第一次近似,取随机变量的均值点为抽样的中心点,即 $X^{(1)} = (1.1974, 1.27994, 1.37639, 1.48255, 26.0, 50.0)$, 取样本点为 $x_i = \mu_i$ 及 $x_i = \mu_i \pm 3\sigma_i$, 共 13 个。

对每一样本点分别进行三维非线性有限元计算,求得混凝土面板的最大拉应力。将各样本点值及求得的应力值代入方程(7),求得系数 $a, b_i, c_i (i = 1, 6)$, 从而得到由响应面函数表示的极限状态方程,即 $g(X)' = R - 2.204067 + 0.9871527 \times \varphi_1 + 0.6691114 \times \varphi_2 + 0.3841908 \times \varphi_3 + 0.1340454 \times \varphi_4 - 0.004868607$

$\times E - 0.03110608 \times H - 0.3305607 \times \varphi_1^2 - 0.1789386 \times \varphi_2^2 - 0.06249889 \times \varphi_3^2 + 0.02388852 \times \varphi_4^2 + 0.0003197 \times E^2 + 0.0004105892 \times H^2$ 。

由 JC 法求得设计验算点 $X^{*(1)}$ 和可靠度指标 $\beta^{(1)}$ 分别为: $X^{*(1)} = (1.138, 1.217, 1.307, 1.558, 24.781, 48.702)$, $\beta^{(1)} = 3.317269$ 。

(2) 第二次近似,由式 $X_M^{(k)} = \mu_x + (X^{(k)} - \mu_x) \frac{g(\mu_x)}{g(\mu_x) - g(X^{(k)})}$ 求得新的抽样中心点为 $X_M^{(1)} = (1.138, 1.217, 1.307, 1.558, 24.781, 48.702)$ 。重复步骤(1),即可得到新的由响应面函数表示的极限状态方程为 $g(X)' = R - 8.763819 + 8.79861 \times \varphi_1 + 5.465586 \times \varphi_2 + 2.514316 \times \varphi_3 - 0.02391625 \times \varphi_4 - 0.1311089 \times E - 0.1291473 \times H - 3.565251 \times \varphi_1^2 - 1.946556 \times \varphi_2^2 - 0.6816792 \times \varphi_3^2 + 0.2127868 \times \varphi_4^2 + 0.0034612 \times E^2$

$+ 0.0015322390 \times H^2$ 。由 JC 法解得新的验算点为 $X^{*(2)} = (0.882, 1.054, 1.184, 1.444, 23.311, 47.571, 1.598)$; 可靠度指标为 $\beta^{(2)} = 3.316496$ 。检验 $|\beta^{(2)} - \beta^{(1)}| = 0.000773 < 0.001$, 满足精度要求, 停止迭代。相应的失效概率 $P_f = \Phi(-\beta) = 5.58 \times 10^{-4}$ 。

上述计算过程表明, 采用响应面法仅用两次迭代就获得了较好的计算精度。值得一提的是: 该计算是针对拉应力最大单元得到的面板抗裂可靠指标, 它是面板抗裂可靠指标的最小值; 由第一次近似得到的设计验算点值是中间结果, 不具有实际意义, 第二次近似得到的设计验算点值才是实际的结果。根据《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》, III 级水工建筑物构件脆性破坏的可靠指标为 3.2, 可见, 本例中混凝土面板的抗裂可靠指标 $\beta (= 3.316496) > 3.2$, 达到了 III 级水工建筑物的安全要求。

4 结 语

混凝土面板堆石坝结构形式复杂, 坝体填筑材料的物理性质表现为非线性、弹塑性。作用于面板及坝体上荷载以及坝体材料的物理、力学参数均呈现出明显的随机性, 有些变量的变异性还很大。由于混凝土面板堆石坝结构计算的复杂性, 难以得到结构极限状

态方程的显式函数, 而且, 各随机变量的联合概率密度函数也难以得到。所以, 目前常用的可靠度分析方法难以用于面板堆石坝的可靠度计算。本文将二次响应面法与非线性有限元法相结合, 提出了混凝土面板堆石坝可靠度分析的新方法, 工程算例验证了该方法的正确性和可行性, 为进行类似工程问题的可靠性分析提供了一条新途径。

参考文献:

- [1] 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.
- [2] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [3] Duncan J M, et al. Strength, Stress-strain & Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses & Movements in Soil Masses[R]. Berkely: University of California, 1980.
- [4] Wong F S. Slope reliability and response surface method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(1): 32-53.
- [5] Liu Ying Wei, Fred Moses. A sequential response surface method and its application in the reliability analysis of aircraft structural systems[J]. Structural Safety, 1994, 16: 39-46.
- [6] 武清玺, 卓家寿. 结构可靠度分析的变 f 序列响应面法及其应用[J]. 河海大学学报, 2001, 29(3): 75-78.