

响应面法及其在混凝土面板堆石坝可靠度分析中的应用

武清玺¹, 俞晓正², 赵魁芝³

(1. 河海大学 工程力学系, 江苏 南京 210098; 2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083;
3. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 坝体材料的物理参数和作用于坝体的荷载是随机变量, 坝体的应力和变形呈现出不确定性。因此, 对混凝土面板堆石坝进行可靠度分析是正确、合理的。由于面板堆石坝构造复杂, 堆石材料具有非线性特性, 使得这类结构的可靠度分析十分困难。将可靠度计算的响应面法与面板堆石坝应力分析的有限元法相结合分析混凝土面板的可靠度, 并导出了有关公式。可靠度计算采用二次响应面法, 面板堆石坝应力与变形的计算采用三维非线性有限元法。对一混凝土面板堆石坝, 分析了面板的抗裂和抗压可靠度, 得出了可靠指标的变化规律。与其他可靠度分析方法相比, 该方法在提高计算精度和工作效率方面具有一定的优越性。

关键词: 水工结构; 混凝土面板堆石坝; 响应面法; 可靠度分析

中图分类号: TV 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)09-1506-06

RESPONSE SURFACE METHOD AND ITS APPLICATION IN RELIABILITY ANALYSIS OF CONCRETE-FACED ROCKFILL DAM

WU Qing-xi¹, YU Xiao-zheng², ZHAO Kui-zhi³

(1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The physical parameters of rockfill materials and the loads on concrete-faced rockfill dam (CFRD) are all random variables. They give rise to the uncertainties of stress and deformation of CFRD. Therefore analyzing the structural reliability of CFRD is necessary and reasonable. Because of the complexities of the structure of CFRD and the nonlinear property of rockfill, it is very difficult to carry out the reliability analysis to this kind of structures. In this paper, the response surface method (RSM) for reliability analyses is adopted to calculate the reliability of CFRD and the corresponding calculation formula are derived. 3D nonlinear finite element method is applied to calculate stress and deformation of CFRD. The two-order RSM is applied to the reliability analyses of CFRD. According to a practical example, the calculation of anti-crack and anti-crash reliability of the face slab are conducted and better results are obtained. Compared with other reliability analysis methods, the proposed method is more precise, efficient and convenient.

Key words: hydraulic structure; concrete-faced rockfill dam; response surface method; reliability analysis

收稿日期: 2003-09-15; **修回日期:** 2004-03-10

作者简介: 武清玺(1951-), 男, 博士, 1976年毕业于河海大学工程力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事结构可靠性方面的教学与研究工作。
E-mail: wu806@yahoo.com.

1 引言

现代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明显优点^[1,2], 已成为坝型选择的主要类型之一, 在我国已有大规模推广的趋势。我国现已建成和在建的面板堆石坝就有近 80 座, 其中坝高超过 100 m 的有 10 余座, 广泛分布全国各地。20 世纪 50 年代以前设计的堆石坝一般是不计算坝体应力和应变的, 但随着计算技术的发展和坝体的日益增高, 以及在一些坝体中出现裂缝的现实, 坝体应力和应变计算才逐步为人们所重视。

面板堆石坝中的堆石材料是一种非常复杂的工程材料, 具有多样的物理、力学特性, 且随机性强、变异性大; 而且作用在面板堆石坝上的荷载也常常具有不确定性, 再加上计算模型的不确定性, 从而导致计算结果是不确定的。对面板堆石坝而言, 面板的安全状况直接关系到大坝的工作状态, 在数值计算中面板的应力通常是分析的重点。本文将影响面板应力的主要因素作为随机变量, 利用二次响应面法对面板的抗裂可靠度和抗压可靠度进行了计算和分析。

2 结构可靠度计算的响应面法

在可靠度计算中, 设极限状态方程为

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

该方程将 n 维随机空间分为失效区和安全区两部分。结构的失效概率 P_f 为

$$P_f = \int_{Z < 0} \dots \int f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (2)$$

式中: $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 维随机向量的联合概率密度函数。

在大多数工程实际问题中, 不但极限状态方程是非线性的, 而且 n 维随机向量的联合概率密度函数也难以得到, 所以, 精确求解式(2)非常困难。对于大型、复杂的工程结构, 可靠度计算常采用数值分析方法, 如随机有限元法等。由于混凝土面板堆石坝中堆石料的本构关系是非线性的, 利用随机有限元求解其可靠指标要经过多次迭代, 不但计算繁琐, 而且计算结果的误差也较大, 难以满足精度要

求。近年来提出并得到迅速发展的结构可靠度计算的响应面法, 可以直接应用确定性有限元计算程序对结构进行可靠度分析, 使这一方法展现出良好的应用前景。

Box 和 Wilson 于 1951 年首先提出响应面法, 当时对于响应面法的研究仅限于如何用统计的方法得到一个显式函数, 用来逼近一个复杂的隐式函数。直到 1985 年, 文[2]首先用一次响应面法分析研究了土坡稳定的可靠度问题, 而后文[3~5]的研究才逐步拓展了这一领域。

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系数和极限状态方程的非线性程度影响较大。虽然有学者提出了二次可靠度分析法, 使计算精度有所提高, 但由于计算工作量成倍增加, 使其应用受到限制。结构可靠度计算的二次响应面法与一次二阶矩法相比有两个优点: 一是用一个待定的显式响应面函数逼近实际的隐式极限状态函数, 使可靠度计算得到简化; 二是计算结构可靠指标时以二次响应面取代一次近似式, 使计算精度有所提高。

设二次响应面函数为

$$g'(X) = a + \sum b_i x_i + \sum c_i x_i^2 \quad (3)$$

式中: a, b_i, c_i 为待定系数, 需由 $2n + 1$ 个样本点确定。

这一方法的计算过程为: 第 1 步, 以均值点 μ_X 为中心, 样本点在区间 $(\mu_X - f\sigma_X, \mu_X + f\sigma_X)$ 中选取, 建议 f 的取值为 1~3; 用 $g(X)$ 在 $2n + 1$ 个样本点处的函数值, 可以确定响应面函数中的待定系数; 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 2 步, 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 $g(X) = 0$, 即

$$X_M = \mu_X + (X_D - \mu_X) \frac{g(\mu_X)}{g(\mu_X) - g(X_D)} \quad (4)$$

这样选取新中心点的目的是为了所选择样本点包含原极限状态面更多的信息。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, 即可得到新的响应面函数, 并近似求出相应的可靠指标。整个过程需求出 $4n + 3$ 个 $g(X)$ 值, 这一方法的逼近过程如图 1 所示。

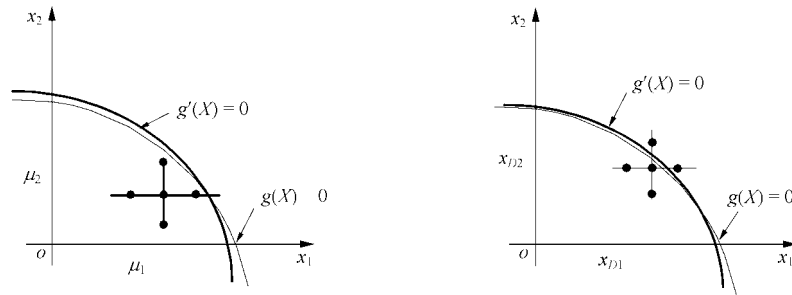


图1 二次响应面法的逼近过程

Fig.1 Approaching process of two-order response surface method

3 非线性有限元

3.1 堆石体材料的本构关系

堆石体体积占整个面板堆石坝体积的 99% 以上，因此堆石体的承载变形不仅决定了大坝的沉降和变形，还会影响混凝土面板的应力和变形。无疑堆石体的本构关系对应力和应变的计算结果起决定性作用。目前，建立堆石体本构关系往往基于已有模型，再针对堆石的力学特性确定甚至调整本构关系中各种材料参数。本文在对混凝土面板堆石坝进行有限元计算时采用的是工程实际中常用的非线性弹性模型——邓肯 $E-B$ 模型^[4-8]。

康纳(Kondner)等人根据常规三轴试验结果发现， $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系可用双曲线拟合。随后詹布(Janbu)由试验研究指出初始切线模量 E_t 与固结压力之间关系为

$$E_t = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \tag{5}$$

式中： P_a 为大气压力； K, n 分别为弹性模量系数和弹性模量指数，由试验确定。在加载情况下，邓肯(Duncan)等人根据 Kondner, Janbu 等人的试验研究得到任一应力情况下切线模量的表达式为

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \tag{6}$$

式中： c 为粘聚力； R_f 为破坏比，是破坏时主应力差与应力-应变双曲线渐近线的纵坐标的比值，即 $R_f = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ ； φ 为内摩擦角，对于粗粒土假定 φ 是 σ_3 的函数，即 $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3 / P_a)$ ， $\varphi_0, \Delta\varphi$ 为试验参数。

在卸载再加载情况下，弹性模量的表达式为

$$E_{ur} = K_{ur} P_a (\sigma_3 / P_a)^n \tag{7}$$

式中： K_{ur} 为卸载再加载时的弹性模量系数。

1980 年邓肯等人提出从三轴试验结果整理出切线体积变形模量 B_t ，从而由 B_t 作为参数求得 μ_t 。切线体积变形模量 B_t 可表示为

$$B_t = K_b P_a (\sigma_3 / P_a)^m \tag{8}$$

式中： K_b, m 分别为体积模量系数和体积模量指数，是待定试验常数。

引入切线体积模量 B_t 后，假定土的泊松比 μ_t 为

$$\mu_t = \frac{1}{2} [1 - E_t / (3B_t)] \tag{9}$$

3.2 非线性有限元求解方法

一般来说，求解方法有迭代法和增量法两种。在面板堆石坝的静力分析中，增量法既可以模拟施工加荷过程，又可以解得施工各阶段的变形和应力情况，因而本文采用增量法对面板堆石坝进行有限元分析。用增量法计算时，荷载逐级递增，可以模拟施工过程，计算结果也符合观测结果。以邓肯 $E-B$ 模型为例，假设现以第 i 级荷载增量 $\{\Delta R\}_i$ 为例，按中点增量法其计算步骤如下：

- (1) 根据前一级应力全量 $\{\sigma\}_{i-1}$ 确定弹性常数 E_{i-1} 和 ν_{i-1} ，并以此形成刚度矩阵 $[K]_{i-1}$ ；
- (2) 加本级荷载增量 $\{\Delta R\}_i$ 的一半于结构，用下式解位移增量：

$$[K]_{i-1} \{\Delta \delta\}_{i-1/2} = \frac{\{\Delta R\}_i}{2} \tag{10}$$

相应地可求出应力和应变增量，进而累计可得应力全量 $\{\sigma\}_{i-1}$ ；

- (3) 施加全荷载增量，用下式求解位移增量：

$$[K]_{i-1/2} \{\Delta \delta\}_i = \{\Delta R\}_i \tag{11}$$

相应地可求出应力和应变增量，累计则可得位移、应力和应变全量；

- (4) 重复上述步骤，可得各级荷载增量下的解答。

4 工程算例分析

4.1 面板堆石坝的三维非线性有限元计算

(1) 工程概况

通过简化混凝土堆石坝边界条件, 可得到理想混凝土面板堆石坝构造型式(如图 2 所示): 坝体横截面呈对称分布, 坝基建筑在刚性岩体上, 坝基处设置为固定约束; 设计坝轴线长 240 m, 最大坝高 60 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, 坝址河谷呈对称 U 形, 坝顶宽 10 m; 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。

(2) 计算区域与计算模型

根据面板堆石坝的特点和计算精度的要求, 计算区域包括了整个三维坝体和面板, 由于基岩的变形模量与坝体堆石变形模量相比量级相差较大, 因此在计算分析中, 未将基岩包括在计算区域中。

采用三维非线性有限元法对坝体应力、变形进行计算。计算中的坝体堆石料的应力 - 应变关系采

用邓肯 $E - B$ 非线性弹性模型, 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^[9, 10]。Goodman 接触单元法向劲度为 k_n , 当接触面受压时, 取 $k_n = 10^8$ MPa, 避免材料嵌入; 当接触面受拉时, 取 $k_n = 10$ MPa。取切向劲度 $k_s = 4\ 800$ MPa。

(3) 单元剖分

在三维计算分析中, 沿坝轴线将整个坝体分成 16 个横断面, 各横断面的位置与面板的垂直缝一致, 坝体沿高度分为 9 层, 每层平均填土厚度为 7 m 左右, 沿混凝土面板方向剖一层单元, 整个坝体共分 824 个单元, 1 116 个节点, 其中面板和接触面单元均为 103 个。

(4) 计算参数及计算结果

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, 采用了分级加载的方式, 计算中荷载分 13 级。其中, 堆石体分 9 级填筑; 面板第 1 级浇筑; 第 11 级开始蓄水, 至第 13 级蓄水深达 55 m。另外, 为了使计算结果更精确, 计算时每级增量都划分为 2 级微增量。各材料计算参数如表 1 所示。

考虑到本文主要分析混凝土面板的可靠度, 故

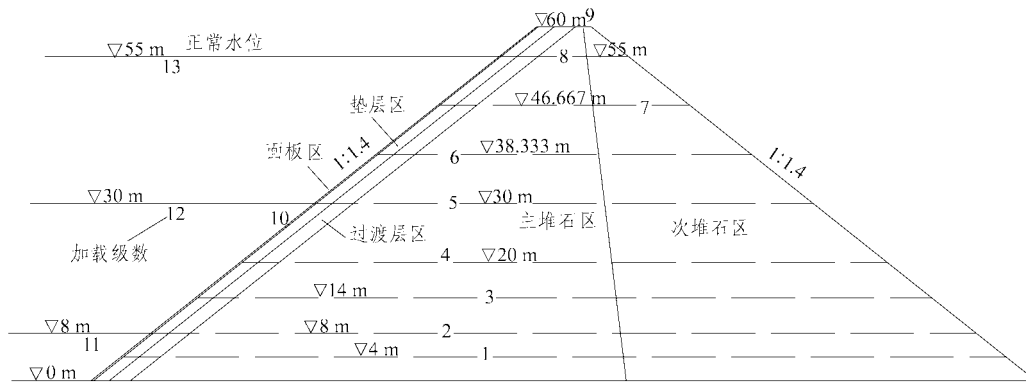


图 2 混凝土面板堆石坝设计剖面与加荷级数示意图

Fig.2 Sketch map of load grade and the structure of CFRD

表 1 材料计算参数表

Table 1 Calculation parameters of materials

材料	γ	c	φ	K	n	R_f	K_b	m	$\Delta\varphi$	K_{ur}
次堆石	21.5	0.0	0.873	850	0.250	0.80	400	0.05	0.147	1 700
主堆石	21.5	0.0	0.908	1 110	0.350	0.82	600	0.10	0.148	2 200
过渡层	21.8	0.0	0.942	1 000	0.400	0.85	450	0.15	0.150	2 000
垫层	22.0	0.0	0.977	1 200	0.450	0.78	750	0.20	0.183	2 400
面板	24.8	0.0	0.419	26 000	0.167	0.00	10 000	0.00	0.000	0
接触面	0.0	0.0	0.639	4 800	0.560	0.74	0	0.00	0.000	0

注: 表中 γ 的单位为 kN/m^3 , φ 和 $\Delta\varphi$ 的单位为弧度, K 的单位为 MPa。

仅给出蓄水期混凝土面板的应力计算结果，如图 3 所示。

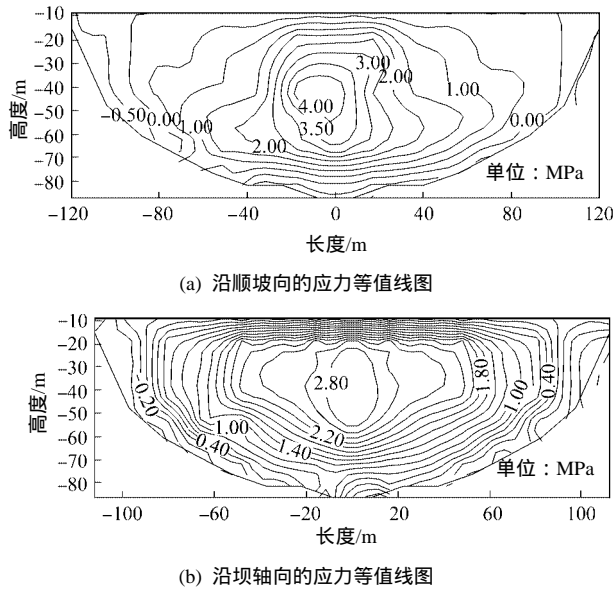


图 3 混凝土面板蓄水期应力等值线图

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

从图 3(a)可以看出，面板中部区域为压应力，最大值为 4.9 MPa，发生在面板中部约 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。从图 3(b)可以看出，面板沿坝轴向的最大压应力为 2.8 MPa，发生在面板中部约 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。

4.2 面板的抗裂可靠度计算与分析

从过去的几十米到现在的 100 多米高的混凝土面板堆石坝的设计中，面板的抗裂计算非常重要。设计人员总是力求使混凝土设计参数取值合理、可行，尽最大可能使滑模浇筑的混凝土面板具有优良的物理、力学性能，足够抵抗不利因素引起的裂缝，把裂缝的大小控制在设计允许的宽度之内。混凝土面板的受力，施工期主要是大坝坝体的填筑料的压缩变形产生向上游的推力，表现在面板的 1/3 处压力较大。水库蓄水后，因为水库中的水是直接作用在面板上的，这时面板的应力将会增大，对面板产生不利的影响。如果拉应力超过了面板的抗裂强度，面板就会产生裂缝。

引起面板产生裂缝的原因很多，如温度应力、混凝土干缩、堆石体的压缩变形和面板上作用的水压力都会使面板产生裂缝。但堆石体的压缩变形以及面板上作用的水压力是面板产生裂缝的基本原

因，是不可避免的因素；而别的原因可以通过精心施工、精心维护来减少或避免。因此，本文主要考虑水压力的作用和堆石体的压缩变形对面板的影响。

鉴于可靠度理论在面板堆石坝结构设计中的应用几乎是个空白，作为一种尝试，本节仍选择上面利用有限元分析的混凝土面板为研究对象，对它同时进行了抗裂和抗压可靠度的分析与计算。严格地说，影响混凝土面板的所有量都是随机变量，但不是所有随机变量都具有相同程度的影响，因此可以分清主次，把那些影响不大的量作为定值，以简化计算。计算中所采用的随机变量统计特征值见表 2。而其余的变量，目前由于缺乏统计资料且不是影响面板拉应力的主要因素，在分析时作为定值考虑。

表 2 计算中所采用的随机变量统计特征值

Table 2 Statistic eigenvalue of random variable of calculation

变量	分布类型	均值	变异系数
次堆石的摩擦系数($\tan\phi_1$)	正态分布	1.191 74	0.10
主堆石的摩擦系数($\tan\phi_2$)	正态分布	1.279 94	0.10
垫层的摩擦系数($\tan\phi_3$)	正态分布	1.376 39	0.10
过渡层的摩擦系数($\tan\phi_4$)	正态分布	1.482 55	0.10
混凝土弹性模量 E/GPa	正态分布	26	0.10
混凝土抗拉强度 R_c/MPa	正态分布	1.88	0.10
混凝土抗压强度 R_t/MPa	正态分布	25	0.10
上游水位 H/m	正态分布	50	0.06

混凝土面板的抗裂或抗压可靠度极限状态方程可表示为

$$G = R - S_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, E, H) = 0 \quad (12)$$

式中： R 为混凝土面板的抗裂强度或抗压强度，分别对应通过非线性有限元计算出的混凝土面板的某点沿面板的轴线方向的正应力为拉应力或压应力的情况； S_1 为荷载效应，是关于随机变量 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, E, H$ 的隐式函数。

4.3 计算成果

通过三维非线性有限元计算和在此计算结果的基础上利用响应面法进行的可靠度计算，得出的混凝土面板沿坝轴向的抗压和抗裂可靠度指标等值线图见图 4。图中负值表示抗裂可靠度指标值，其绝对值的最小值为 3.32；正值表示抗压可靠度指标值，其最小值为 6.70。

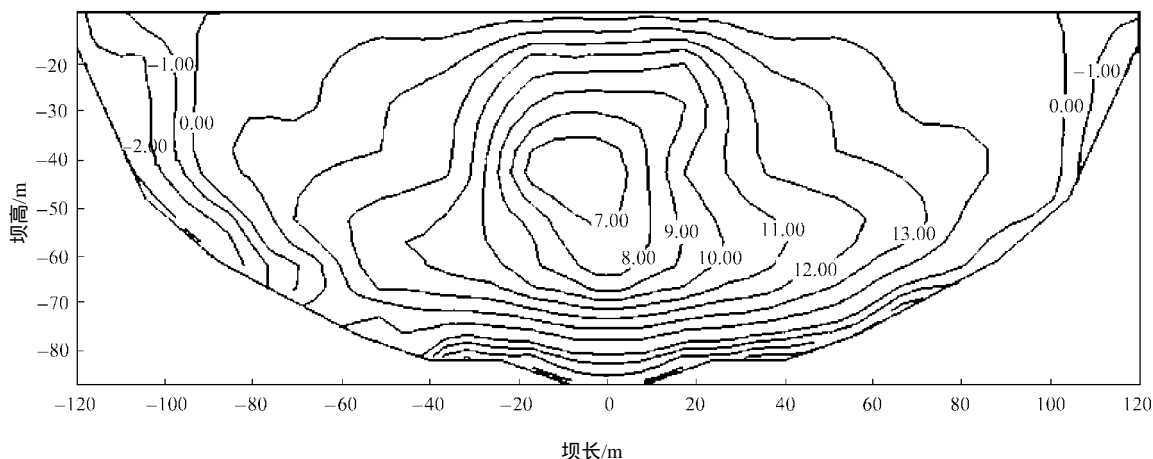


图 4 混凝土面板沿坝轴向的抗压和抗裂可靠度指标等值线图

Fig.4 The isoline map of the reliability of crack resistance and compression resistance along the axis of the CFRD on the concrete face slab

5 结 语

(1) 混凝土面板堆石坝的堆石材料是一种非常复杂的工程材料, 具有多样的物理、力学特性, 其离散性强、变异性较大, 本构关系是高度非线性的。在对其作可靠度分析时, 直接得到系统极限状态方程的解析表达式往往是非常困难的, 并且联合概率密度函数也难以得到。响应面法结合有限元分析方法, 为解决类似工程的可靠性分析提供了可供选用的一条新途径。

(2) 由混凝土面板沿地轴向的抗压和抗裂可靠度指标等值线图和《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》可以看出, 该堆石坝的混凝土面板符合水工钢筋混凝土结构 II 级建筑物的要求。

参考文献(References):

- [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.(Fu Zhian, Feng Jiaji. Concrete Faced Rockfill Dam[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1993.(in Chinese))
- [2] Wong F S. Slope reliability and response surface method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(1): 32-53.
- [3] Liu Y W, Moses F. A sequential response surface method and its application in the reliability analysis of aircraft structural systems[J]. Structural Safety, 1994, 16: 39-46.
- [4] 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(2): 75-78.(Wu Qingxi, Zhuo Jiashou. A sequential response surface method with various f and its application to structural reliability analysis[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(2): 75-78.(in Chinese))
- [5] 武清玺, 俞晓正. 混凝土面板堆石坝可靠度计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 468-472.(Wu Qingxi, Yu Xiaozheng. Research on the method of reliability analysis of concrete faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 468-472.(in Chinese))
- [6] Duncan J M. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses[R]. California: University of California Berkeley, 1980.
- [7] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.(Zhu Baili, Shen Zhujiang. Computation for Soil Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [8] 顾淦臣, 黄金明. 混凝土面板堆石坝的堆石本构模型和应力-应变分析[J]. 水力发电学报, 1991, (1): 12-24.(Gu Ganchen, Huang Jinming. Constitutive model and stress-strain analysis of rockfall in concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1991, (1): 12-24.(in Chinese))
- [9] Goodman R E. A model for the mechanics of jointed rock[J]. J. Soil Mech. & Found. Div., ASCE, 1968, 94(3): 637-659.
- [10] 陈慧远. 摩擦接触单元及其分析[J]. 水利学报, 1985, (4): 44-49.(Chen Huiyuan. Analysis of contact element with friction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (4): 44-49.(in Chinese))