

基于有限元响应面法的重力坝抗拉可靠度分析

李同春, 厉丹丹, 王志强

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用有限元方法计算坝体内的应力, 以可能的拉应力范围作为作用效应, 容许的拉应力范围作为抗力, 建立了与重力坝设计规范中有限元分析结果相对应的抗拉极限状态方程. 由于此极限状态方程为隐式, 故采用一阶响应面法求解可靠度, 并运用正交试验设计方法减少有限元分析次数. 本文以龙滩碾压混凝土重力坝为例, 给出了实例计算分析结果.

关 键 词: 重力坝; 有限元; 抗拉可靠度; 响应面法

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0100-05

重力坝的可靠度校准主要集中在建基面及混凝土层面抗滑稳定、坝踵抗拉和坝趾抗压强度等方面的可靠度分析, 近几年国内外学者在此方面进行了大量研究^[1-3], 但主要集中在抗滑稳定可靠度分析上, 对坝体强度方面的可靠度分析则极少. 以前对坝踵抗拉方面的可靠度分析都是采用材料力学的方法来计算^[4]. 现行规范^[5]加入了有限元分析的内容, 对混凝土重力坝上游垂直应力的控制标准为: ①坝基上游面计扬压力时, 拉应力区宽度宜小于坝底宽度的0.07倍(垂直拉应力分布宽度/坝底面宽度)或坝踵至帷幕中心线的距离; ②坝体上游面计扬压力时, 拉应力区宽度宜小于计算截面宽度的0.07倍或计算截面上游面至排水孔(管)中心线的距离. 当作用于重力坝的水压荷载、坝体及地基材料特性为随机变量时, 用有限元分析得到坝基(或坝体)上游面计扬压力时的拉应力分布范围也是随机的. 虽然上述标准不能直接作为判定大坝开裂情况的依据, 但按此标准来设计大坝, 能保证大坝防止抗拉破坏. 事实上国内外大坝的设计仍以经验为主, 我国首次将有限元分析结果引入规范, 是一大进步.

本文以可能的拉应力范围作为作用效应, 容许的拉应力范围作为抗力, 从而建立可靠度分析的极限状态方程, 用一阶响应面法来求解^[6,7], 并采用正交试验设计方法减少有限元分析次数^[8].

1 基于正交试验设计的响应面可靠度分析方法

目前, 工程结构可靠性分析法有一次二阶矩法、JC法、Monte-Carlo模拟法、响应面法及随机有限元法等^[9,10]. 对于大型复杂工程结构的隐式极限状态方程, 采用近年来逐渐发展起来的响应面法比较有效. 响应面法是一项统计学的综合试验技术, 用于处理几个变量对一体系或结构的作用问题, 也就是体系或结构的输入(变量值)与输出(响应)的转换关系问题.

选择响应面表达式的形式时, 一方面要尽可能简单, 另一方面要能够灵活地反映各种不同的真实曲面形状(因为真实曲面的形状并不知道)^[11]. 选取的响应面函数应尽可能贴近实际极限状态函数, 目前一般选用一次多项式函数. 对于 n 个随机变量,

收稿日期: 2009-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90510017)

作者简介: 李同春(1963-), 男, 江苏泰州人, 教授, 主要从事水工结构研究. E-mail: ltchhu@163.com

$$g(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (1)$$

为了确定系数 $a_i (i=0, 1, \dots, n)$, 首先以均值点 μ_x 为中心点, 在 $(\mu_x - f\sigma_x, \mu_x + f\sigma_x)$ 内选取 $n+1$ 个样本点, f 为确定取值界限的选择参数, 一般取 $f=1 \sim 3$. 由 $g(x)$ 在样本点处的 $n+1$ 个函数值, 可以确定系数 a_i . 响应面函数确定后, 即可求出可靠指标和设计验算点 x_D 的值, 再以 x_D 为中心选取一组新的样本点, 用同样的方法确定待定系数.

当前对响应面法应用较多的仍是 Bucher 的响应面法及其局部改进^[12], 这类响应面法需要对响应面进行若干次迭代, 而每个响应面的形成均需要对 $2n+1$ 个取样点进行有限元计算, 当随机变量数较多时, 工作量偏大. 在试验设计时, 如何使试验次数尽可能少而又不影响分析精度, 且达到试验目的很关键. 将基于正交设计的响应面法引入复杂系统的优化设计中, 避免了复杂系统常规设计方法计算量大、计算操作复杂的缺点, 提高了计算效率. 同时使试验数据均匀地分布于设计空间中, 能全面反映设计对象的内在性质, 为后续的回归分析提供精度保证^[8].

用正交表安排试验时, 每个因素的各个不同水平在试验中出现了相同的次数, 任何两个因素的各种不同水平的搭配在试验中都出现了, 且出现的次数相同. 因此, 参照正交试验表来安排相应于响应面法的计算组数, 能全面反映各随机变量对可靠指标的影响, 有效减少计算分析次数. 计算中要考察的对可靠指标可能有影响的对象称为因素, 如结构的几何尺寸、材质等; 每个因素要比较的具体条件称为水平, 这里指随机变量的具体取值. 在确定因素的水平时, 根据统计的 f_σ (本文取 f 为 1) 原则, 即按 $\mu \pm f\sigma$ 取值 ('+' 对应于正交试验表中的 1, '-' 对应于正交试验表中的 2), 然后根据因素、水平、响应面方程未知数个数选择正交表安排计算分析组数.

得到每组的有限元分析结果后, 通过回归分析可得到类似于方程 (1) 的表达式. 然后, 用广义随机空间内的可靠度分析方法计算对应的可靠指标和设计验算点, 其计算公式为:

$$\beta = \frac{m_g}{\sigma_g} = \frac{\sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{p^*} (m_{x'_i} - x_i^*)}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{p^*} \sigma_{x'_i} \sigma_{x'_j} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

式中: $\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{p^*}$ 为导数在验算点 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 处的取值; m_x 为均值; σ_x 为标准差; ρ_{ij} 为变量 x_i 与 x_j 的相关系数.

由于开始计算时真实的验算点值是未知的, 因此上述过程需要迭代计算完成.

2 基于有限元响应面法的重力坝抗拉可靠度分析

采用有限元法计算坝体应力、应变时, 为了模拟薄弱层面, 采用薄层单元模拟层间和坝体与地基的接触面, 使所求应力能较准确反映这些部位的应力分布. 采用这种单元是为了保证层面上的单元只沿着层面屈服, 需先将单元中高斯点的应力转换成层面上的正、剪应力, 然后建立相应的屈服方程求解.

计算坝体应力时, 通常考虑扬压力的方法是在坝基面上直接加面荷载, 这样就会在地基内部的单元中产生拉应力, 而对坝基面以上的单元几乎没有影响. 本文在有限元计算应力的时候不考虑扬压力作用, 计算得到结果后, 再在相应位置减去材料力学法得出的扬压力, 从而避免了直接加扬压力对地基内部的影响.

将有限元算法与上面的可靠度分析方法相结合, 即可进行基于有限元响应面法的重力坝抗拉可靠度分析. 其具体过程为:

(1) 根据随机变量个数, 参照正交试验表确定有限元分析计算组数及每组中各随机变量对应的具体取值, 即验算点值加或减 1 倍的方差值 (第一次迭代时取均值);

(2) 对每个计算组分别进行有限元法计算分析, 确定建基面或坝体内水平截面正应力叠加扬压力后的

- 受拉区长度;
- (3) 回归拟合得到极限状态方程并对该极限状态方程进行可靠指标计算,得到可靠指标及各随机变量的验算点值;
- (4) 重复上述过程,直至前后两次可靠指标的相对误差在容许范围之内,本文相对误差取为 1%.

3 龙滩大坝抗拉可靠度分析

龙滩大坝为高碾压混凝土坝,按正常蓄水位▽400 m 设计,建基面高程▽190.0 m,坝高 196.5 m. 坝体断面的材料分区见图 1. 图中,RCC 表示常态混凝土,R I ,R II ,R III ,R IV 表示 4 种不同的碾压混凝土. 计算荷载包括:自重,混凝土重度取 24 kN/m³;静水压力,水的重度取 9.81 kN/m³;风浪压力,水域平均库底高程▽280 m,计算风速对基本组合取 24 m/s,偶然组合取 14 m/s,风区长度取 2 km,盛行风向 SW;淤沙压力,百年淤沙高程▽287.6 m,淤沙浮重度 12 kN/m³,内摩擦角 24°;扬压力,上游排水孔位置 0+12 m,折减系数为 0.185,下游排水孔位置 0+132 m,折减系数为 0.5.

3.1 材料参数

随机变量统计参数见表 1.

表 1 随机变量统计参数
Tab. 1 Properties of variables

随机变量	分布类型	均 值	标 准 差
混凝土重度/(kN·m ⁻³)	正态分布	24	0.36
上游水深/m	正态分布	190	11.4
上游扬压力折减系数	正态分布	0.185	0.056
下游扬压力折减系数	正态分布	0.5	0.15
下游水深/m	正态分布	15.5	0.93
弹性模量 I/MPa	正态分布	1.96	0.196
弹性模量 II/MPa	正态分布	1.79	0.179
弹性模量 III/MPa	正态分布	1.54	0.154

3.2 可靠度计算

因坝体中基本不存在拉应力,故不对坝体进行抗拉可靠度校核.而建基面上由于应力集中的问题,坝踵处会出现拉应力,要进行抗拉可靠度计算.同时,为了消除网格因素的影响,采用了两种不同的网格,得到的拉应力范围基本一致.

根据规范^[5]规定拉应力区宽度宜小于坝底宽度的 0.07 倍(垂直拉应力分布宽度/坝底面宽度)或坝踵至帷幕中心线的距离.本文以坝踵至帷幕中心线的距离为抗力项,可建立极限状态方程: $Z=27-x=0$,其中: x 为拉应力区宽度.

选用 12 处理 2 水平 11 因素正交试验表(见表 2),来安排每次计算分析中随机变量的取值.用本文的方法只需进行 12 次确定性分析,迭代 3 次,即可算得可靠指标 $\beta=4.81$.各变量验算点值见表 3.

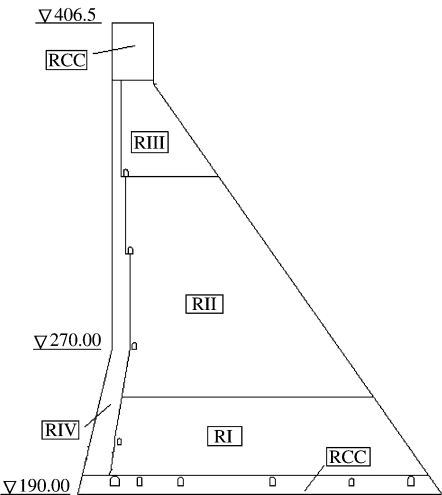


图 1 坝体断面材料分区(单位: m)
Fig. 1 Section and material partition of the dam (unit: m)

表2 12处理2水平11因素正交试验表
Tab.2 Scheme of 2¹¹ factorial orthogonal test

试 验 号	序 号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

表3 各随机变量的验算点值
Tab.3 Design points of variables

随机变量	验算点值	随机变量	验算点值
混凝土重度/(kN·m ⁻³)	23.875	下游水深/ m	15.601
上游水深/ m	244.330	弹性模量Ⅰ/ MPa	18 745.687
上游扬压力折减系数	0.192	弹性模量Ⅱ/ MPa	17 607.298
下游扬压力折减系数	0.500	弹性模量Ⅲ/ MPa	15 154.491

4 结 语

本文提出了根据有限元分析结果,以规范规定的标准作为依据的重力坝抗拉可靠度分析方法.该法以拉应力范围作为作用效应,容许的拉应力范围作为抗力,从而建立可靠度分析的极限状态方程,由于该极限状态方程是隐式的,提出采用响应面法即用一简单的显式函数逐步逼近复杂的隐式函数来求解其对应的可靠度,并参照正交试验表确定计算分析组数,从而减少有限元分析次数.文中以龙滩大坝为例进行了实际计算分析,得到了基于规范的抗拉可靠指标.同时分析表明,用本文方法进行基于有限元拉应力控制范围的可靠度分析是切实可行的.

参 考 文 献:

[1] 兰仁烈. 重力坝深层抗滑稳定的可靠度分析探讨[J]. 四川水力发电, 1994, 13(2): 56-59. (LAN Ren-lie. Reliability analysis for gravity dam against deep sliding[J]. Sichuan Water Power, 1994, 13(2): 56-59. (in Chinese))

[2] 杨晓贞, 苏 燕. 重力坝深层抗滑稳定的可靠度分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(2): 80-83. (YANG Xiao-zhen, SU Yan. Reliability analysis for gravity dam against deep sliding[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2001, 29(2): 80-83. (in Chinese))

[3] 瞿尔仁, 徐 金, 束 兵, 等. 重力坝抗滑稳定可靠度模型[J]. 合肥工业大学(自然科学版), 2004, 27(4): 376-379. (QU Er-ren, XU Jin, SHU Bing, et al. The model of structural reliability for the analysis of antiskidding stability of gravity dam [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2004, 27(4): 376-379. (in Chinese))

[4] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. (WU Shi-wei. Structural reliability analysis[M]. Beijing:

- China Communications Press, 1990. (in Chinese))
- [5] DL5108-1999, 混凝土重力坝设计规范[S]. (DL5108-1999, Power industry standard design specification for concrete gravity dams[S]. (in Chinese))
- [6] 熊铁华, 常晓林. 响应面法在结构体系可靠度分析中的应用[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 58-61. (XIONG Tie-hua, CHANG Xiao-lin. Application of response surface method in system reliability analysis[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 58-61. (in Chinese))
- [7] FARAVELLI L. Response-surface approach for reliability analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1989, 115: 2763-2781.
- [8] 任新见, 时党勇, 汪剑辉. 响应面试验设计的正交方法研究[J]. 山西建筑, 2005, 31(2): 17-18. (REN Xin-jian, SHI Dang-yong, WANG Jian-hui. Positive cross method of responsive section experiment design[J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(2): 17-18. (in Chinese))
- [9] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (ZHAO Guo-fan, JIN Wei-liang, GONG Jin-xin. Structural reliability theory[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 韦柳梅, 陆 勇, 于 森, 等. 结构可靠度计算方法综述[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2006, 31(B06): 280-282. (WEI Liu-mei, LU Yong, YU Miao, et al. Summary of reliability analysis methods for engineering structure[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2006, 31(B06): 280-282. (in Chinese))
- [11] SANG-HYO KIM, SEONG-WON Na. Response surface method using vector projected sampling points[J]. Structural Safety, 1997, 19: 3-19.
- [12] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7: 57-66.

Tensile reliability analysis of gravity dams by FEM response surface method

LI Tong-chun, LI Dan-dan, WANG Zhi-qiang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the paper, the FEM is used to obtain the dam stress, and the limit state equation of tensile reliability for gravity dams is established with the possible tensile stress distribution width being set as action effect and the allowable tensile stress distribution width being set as resistance. This limit state is implicit. The linear response surface method is applied and the orthogonal test design method is used to reduce the number of finite element analysis. The Longtan RCC gravity dam is taken as an example and the analysis results are also given.

Key words: gravity dam; finite element; tensile reliability; response surface method