

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.010

基础变形模量不确定条件下 拱坝最大有限元等效应力分析

孙林松¹,孔德志²

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院,贵州 贵阳 550081)

摘要:为研究基础变形模量的不确定性对拱坝应力的影响,建立以基础变形模量为设计变量、以坝体应力为目标函数的计算拱坝最大应力的最优化模型,利用均匀试验设计法构造拱坝最大有限元等效应力与基础变形模量之间的二阶多项式响应面。工程实例分析表明,所建立的响应面模型具有较高的精度,当已知基础变形模量变化范围时可以较好地确定拱坝的最大有限元等效应力。

关键词:基础变形模量 变形模量不确定性 有限元等效应力 响应面方法 拱坝

中图分类号:TV642.4;TV22 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)05-0530-04

Analysis of arch dam's maximal finite element equivalent stress with consideration of uncertainty of deformation modulus of foundation rock mass

SUN Linsong¹, KONG Dezhi²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. HydroChina Guiyang Engineering Corporation, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to study the influence of uncertainty of the deformation modulus of a foundation rock mass on the stress of arch dams, an optimization model for calculation of the maximal stress of arch dams is proposed with the design variables being the deformation modulus of the foundation rock mass and the objective function being the maximal stress of the arch dams. The relationship of an arch dam's maximal finite element equivalent stress and the deformation modulus of foundation rock mass is described with a second order polynomial response surface, which was established using the uniform experimental design method. An engineering example shows that the response surface has high precision, and when the upper and lower limit of the deformation modulus of the foundation rock mass are known, the method presented in this paper can be used to accurately calculate the maximal finite element equivalent stress.

Key words: foundation deformation modulus; uncertainty of deformation modulus; finite element equivalent stress; response surface method; arch dam

拱坝设计一般是针对特定设计条件进行的,然而,拱坝工程在实施过程中所涉及的实际地质条件、施工因素、封拱条件等往往会和设计条件有一些差别,拱坝建成后的运行情况和设计条件也可能存在一些差异,也就是说,拱坝的设计条件存在一定的不确定性。工程设计中考虑不确定性因素的常用方法是基于数理统计与概率论的可靠度设计方法,然而朱伯芳^[1-2]多次强调,由于样本太少,难以给出不确定性因素的概率分布与统计参数,在混凝土坝设计中采用可靠度理论是不合适的。目前,在拱坝体形设计中为了考虑设计参数的不确定性,一般是将设计参数做适当的调整来进行敏感性分析。计家荣等^[3]对二滩拱坝的基础变形模量计算值给予了调整,进行了多方案组合计算,要求坝体应力都能满足规定要求,陈丽萍等^[4]在进行溪洛渡混凝土

收稿日期:2011-10-26

基金项目:国家自然科学基金(51279174) 扬州大学科技创新培育基金(2009CXJ015)

作者简介:孙林松(1968—),男,江苏姜堰人,教授,博士,主要从事结构现代设计理论与分析方法研究。E-mail: linsong_sun@126.com

土拱坝的体形设计时,进行了岩体变形模量和结构面抗剪强度的敏感性分析。这些方法可以在一定程度上反映设计参数的不确定性,但由于方案组合的有限性,有可能漏掉最危险的组合。本文以考虑基础变形模量的不确定性为例,提出利用优化方法计算拱坝最大有限元等效应力的方法。

1 计算拱坝最大有限元等效应力的最优化模型

拱坝是高次超静定结构,基础变形模量是影响坝体应力状态的重要因素^[5]。目前,在拱坝体形设计中为了考虑基础变形模量的不确定性,通常将基础变形模量做适当的调整来进行多方案比较分析。由于基础地质条件的复杂性与不确定性,要准确确定基础变形模量的数值比较困难,但是要确定其变化范围则相对容易一些。笔者以基础变形模量为设计变量,以坝体特征应力为目标函数,采用最优化方法计算在基础变形模量可能变化范围内坝体的应力极值。该最优化问题的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \text{Find} & E = [E_1 \ E_2 \ \cdots \ E_n]^T \\ \text{max} & \sigma(E) \\ \text{s.t.} & E_{Li} \leq E_i \leq E_{Ui} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \\ & g_j(E) = 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \end{cases} \tag{1}$$

式中： E_i ——第 i 种基岩的变形模量； E_{Li} 和 E_{Ui} ——第 i 种基岩变形模量的下限和上限； σ ——特定变形模量组合下坝体的特征应力,本文考虑最大有限元等效应力。 $g_j(E) = 0$ 为不同基岩变形模量之间应满足的条件。

2 坝体最大有限元等效应力的响应面

有限元等效应力法是为了解决由于应力集中引起坝踵部位有限元应力结果难以评价问题,由我国学者提出的一种实用方法。它基于有限元应力结果,通过数值积分计算拱坝截面内力,再利用材料力学方法计算坝体应力,即有限元等效应力,具体的计算方法见文献[6]。从有限元等效应力的计算过程可以看出其与基础变形模量之间难以给出一个明确的解析关系。本文采用响应面方法构造坝体最大有限元等效应力与基础变形模量之间的关系。

响应面方法的基本思想是构造一个简单的函数关系近似替代实际的复杂仿真模型,以方便地进行分析计算和优化设计。这个函数关系即称为响应面函数。根据响应面函数形式的不同,响应面主要分为多项式响应面^[7]、神经网络响应面^[8]、Kriging 响应面^[9]和径向基函数响应面^[10]等。本文采用不包含交叉项的二阶多项式响应面,其数学模型可以表达为

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 \tag{2}$$

式中： x_i ——与基础变形模量相关的设计因子； $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{ii}$ ——待定系数,一般通过试验设计方法选取若干样本进行数值仿真分析后,利用最小二乘法确定。

试验设计方法是一种为了使样本点较均匀地分布在设计空间而合理安排试验的数学方法,它是一种样本取样策略,决定了样本点的个数及其空间分布情况。常用的试验设计方法有正交试验设计、均匀试验设计^[11]、中心复合试验设计^[12]和拉丁超立方试验设计^[13]等。本文采用均匀试验设计方法来确定试验样本。均匀试验设计的基本思想是将试验点均匀分布在设计空间中,用较少的试验次数获得较多的信息量。在均匀设计中,每个因子的试验水平在试验空间内都是均匀分布的,每个水平仅做 1 次试验,也就是说,均匀设计的次数与设计因子的水平数一致,大幅度减少了试验次数。

3 工程算例

3.1 基本资料

某拟建拱坝,坝底高程为 545.00 m,坝顶高程为 834.00 m,最大坝高为 289.0 m。坝基范围以微晶~隐晶玄武岩、杏仁状玄武岩及变玄武质角砾熔岩为主,岩体坚硬,坝基中下部柱状节理发育,岩体变形模量较低。地基岩体大致可概化为 3 类,各类基岩分布情况及变形模量上下限如表 1 所示。

考虑基岩性质的不同,3 类基岩的变形模量 E_1, E_2, E_3 之间应满足下列关系：

表1 不同高程内基岩的变形模量

Table 1 Deformation moduli of foundation rock mass at different elevations

类型	岩体分区	变形模量下限/GPa	变形模量上限/GPa
1	左岸 585.00 m 高程以下,右岸 545.00 m 高程以下及河床	13.0	19.0
2	左岸 585.00 m ~ 696.00 m 高程、右岸 545.00 m ~ 600.00 m 高程	8.0	12.0
3	左岸 696.00 m ~ 834.00 m 高程、右岸 600.00 m ~ 834.00 m 高程	10.0	16.0

$$1.0 \leq E_3 - E_2 \leq 4.0 \tag{3}$$

$$1.0 \leq E_1 - E_3 \leq 4.0 \tag{4}$$

3.2 最大有限元等效应力响应面设计

采用均匀试验设计方法选取样本点。由于变形模量 E_1, E_2, E_3 之间应满足式(3)和式(4)的约束,不宜直接采用其为设计因子,因此取设计因子为 $x_1 = E_2, x_2 = E_3 - E_2, x_3 = E_1 - E_3$ 。则每个设计因子只有界限约束,取值范围分别为 $8.0 \leq x_1 \leq 12.0, 1.0 \leq x_2 \leq 4.0, 1.0 \leq x_3 \leq 4.0$ 。在进行均匀试验抽样时对每个设计因子考虑 15 个设计水平,取值见表 2。

根据均匀设计表及其使用表^[14],可确定 15 个样本点试验方案如表 3 所示,表中同时给出了在基本荷载组合“正常蓄水位+相应尾水位+自重+泥沙压力+设计温升”下,对应于每个试验方案的拱坝最大有限元等效应力数值计算结果。

根据数值试验结果,经最小二乘回归分析可得拱坝最大有限元等效拉应力影响面方程为

$$y = -1.18 + 0.251x_1 + 0.182x_2 + 0.139x_3 - 0.926 \times 10^{-2}x_1^2 - 0.117 \times 10^{-1}x_2^2 + 0.453 \times 10^{-2}x_3^2 \tag{5}$$

最大有限元等效压应力影响面方程为

$$y = 8.45 + 0.165x_1 + 0.296x_2 + 0.168x_3 - 0.927 \times 10^{-2}x_1^2 - 0.232 \times 10^{-1}x_2^2 + 0.891 \times 10^{-2}x_3^2 \tag{6}$$

3.3 基础变形模量变化范围内坝体最大有限元等效应力

将设计因子与基础变形模量之间的关系带入式(5)、式(6)可得坝体最大有限元等效拉应力与基础变形模量之间的关系为

$$\begin{aligned} y(E_1, E_2, E_3) = & -1.176 + 0.138E_1 + 0.069E_2 + 0.043E_3 + 0.00453E_1^2 - \\ & 0.02096E_2^2 - 0.00717E_3^2 + 0.0234E_2E_3 - 0.00906E_1E_3 \end{aligned} \tag{7}$$

最大有限元等效压应力与基础变形模量之间的关系为

$$\begin{aligned} y(E_1, E_2, E_3) = & 8.45 + 0.168E_1 - 0.131E_2 + 0.12E_3 + 0.00591E_1^2 - \\ & 0.03247E_2^2 - 0.01429E_3^2 + 0.0464E_2E_3 - 0.01782E_1E_3 \end{aligned} \tag{8}$$

表2 各设计因子的设计水平

水平数	x_1	x_2	x_3
1	8.0	1.0	1.0
2	8.3	1.2	1.2
3	8.6	1.4	1.4
4	8.9	1.6	1.6
5	9.1	1.9	1.9
6	9.4	2.1	2.1
7	9.7	2.3	2.3
8	10.0	2.5	2.5
9	10.3	2.7	2.7
10	10.6	2.9	2.9
11	10.9	3.1	3.1
12	11.1	3.4	3.4
13	11.4	3.6	3.6
14	11.7	3.8	3.8
15	12.0	4.0	4.0

表3 试验方案及结果

试验方案	设计因子	最大等效拉应力	最大等效压应力
	x_1	x_2	x_3
1	8.0	1.6	2.3
2	8.3	2.5	3.8
3	8.6	3.4	2.1
4	8.9	1.0	3.6
5	9.1	1.9	1.9
6	9.4	2.7	3.4
7	9.7	3.6	1.6
8	10.0	1.2	3.1
9	10.3	2.1	1.4
10	10.6	2.9	2.9
11	10.9	3.8	1.2
12	11.1	1.4	2.7
13	11.4	2.3	1.0
14	11.7	3.1	2.5
15	12.0	4.0	4.0

基础变形模量变化范围内拱坝最大有限元等效应力的计算可转化为下列优化问题

find

E_1, E_2, E_3

max

$y(E_1, E_2, E_3)$

s. t.

$13 \leq E_1 \leq 19$

$8 \leq E_2 \leq 12$

$10 \leq E_3 \leq 16$

$1 \leq E_3 - E_2 \leq 4$

$1 \leq E_1 - E_3 \leq 4$

(9)

式中目标函数 $y(E_1, E_2, E_3)$ 采用式(7)和式(8)分别对应着求最大等效拉应力和最大等效压应力。

式(9)是一个二次规划问题,将式(7)和式(8)分别代入式(9)后可解得拱坝最大有限元等效拉应力为 1.63 MPa,对应的基础变形模量组合为 $E_1 = 19.0 \text{ GPa}, E_2 = 11.0 \text{ GPa}, E_3 = 15.0 \text{ GPa}$ 最大有限元等效压应力为 10.81 MPa,对应的基础变形模量组合为 $E_1 = 16.89 \text{ GPa}, E_2 = 8.89 \text{ GPa}, E_3 = 12.89 \text{ GPa}$

利用上述基础变形模量组合进行有限元数值分析,得到的最大有限元等效拉应力与等效压应力分别为 1.59 MPa 和 10.96 MPa,响应面误差分别为 2.45% 和 1.37%。

4 结 论

- a. 当已知基岩变形模量的变化范围时,采用最优化方法可以较好地解决基础变形模量不确定条件下拱坝最大应力的计算问题。
- b. 均匀试验设计法样本点分布均匀、试验次数少,利用其建立的拱坝最大有限元等效应力与基础变形模量之间的二阶多项式响应面模型具有较高的精度。

参考文献：

[1] 朱伯芳. 关于可靠度理论应用于混凝土坝设计的问题[J]. 土木工程,1999,32(4) :10-15. (ZHU Bofang. On the application of reliability theory to design of concrete dams [J]. China Civil Engineering Journal,1999,32(4) :10-15. (in Chinese))

[2] 朱伯芳. 当前混凝土坝设计的几个问题[J]. 水利学报,2009,40(1) :1-9. (ZHU Bofang. On some problems in construction of concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(1) :1-9. (in Chinese))

[3] 计家荣,丁予通. 二滩拱坝设计与优化[J]. 水力发电,1998(7) :25-28. (Ji Jiarong, Ding Yutong. Design and optimization of the Ertan arch dam[J]. Water Power,1998(7) :25-28. (in Chinese))

[4] 陈丽萍,尤林. 溪洛渡混凝土双曲拱坝的体形设计[J]. 水电站设计,2006,22(2) :18-21. (CHEN Liping, YOU Lin. Xiluodu concrete double curvature arch dam configuration design[J]. Design of Hydroelectric Power Station,2006,22(2) :18-21. (in Chinese))

[5] 王志强,李同春,沈德才. 基于弹性有限元的高拱坝安全度敏感性分析[J]. 水电能源科学,2011,29(7) :50-52. (WANG Zhiqiang, LI Tongchun, SHEN Decai. Sensitivity analysis of high arch dam safety based on elastic finite element[J]. Water Resources and Power, 2011,29(7) :50-52. (in Chinese))

[6] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M]. 北京 中国水利水电出版社,2002.

[7] GUPTA S,MANOHAR C S. An improved response surface method for the determination of failure probability and importance measures [J]. Structural Safety, 2004,26(2) :123-139.

[8] 蒙文巩,马东立,楚亮. 基于神经网络响应面的机翼气动稳健性优化设计[J]. 航空学报,2010,31(6) :1134-1140. (MENG Wengong, MA Dongli, CHU Liang. Wing aerodynamic robustness optimization based on neural network response surface [J]. Acta Aeronautica and Astronautica Sinica,2010,31(6) :1134-1140. (in Chinese))

[9] 张崎,李兴斯. 基于 Kriging 模型的结构可靠性分析[J]. 计算力学学报,2006,23(2) :175-180. (ZHANG Qi, LI Xingsi. Analysis of structural reliability based on Kriging model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2006,23(2) :175-180. (in Chinese))

[10] 安治国,周杰,赵军,等. 基于径向基函数响应面法的板料成形仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(6) :1557-1561. (AN Zhiguo, ZHOU Jie, ZHAO Jun, et al. Simulation research for sheet metal forming process based on response surface methodology of radius basis function[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6) :1557-1561. (in Chinese))

[11] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京 科学出版社,2001.

[12] REN Weixin, CHEN Huabing. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method [J]. Engineering Structures,2010,32(8) :2455-2465.

[13] HELTON J C, DAVIS F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems[J]. Reliability Engineering & System Safety,2003,81(1) :23-69.

[14] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京 科学出版社,1994.