

文章编号: 1000-7598-(2006)08-1421-04

基于功能的高坝建设方案的风险决策研究

金 峰¹, 贾 超^{1,2}, 王品江¹, 张楚汉¹

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(筹), 北京 100084; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 为了更加安全和经济地进行抗震设计, 不仅要防止结构发生倒塌破坏, 而且要有效地控制结构的其他破坏状态。在此背景下, 基于性能的抗震设计被广泛讨论研究, 并且被认为是未来抗震设计的主要发展方向之一, 在高坝建设工程领域探讨了发电经济功能的高坝建设方案的风险决策问题, 提出了一种在不同震级作用下高坝震害损失的计算方法。通过水位这一变量揭示了高坝动力分析与经济损失量之间的内在联系, 并以一算例说明了计算方法的正确性和可行性。

关 键 词: 高坝; 功能; 方案; 风险决策; 震害

中图分类号: O 211; TV 641

文献标识码: A

Study on performance-based risk decision-making for high dam construction cases

JIN Feng¹, JIA Chao^{1,2}, WANG Pin-jiang¹, ZHANG Chu-han¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of civil engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For the safety and economy in the aseismic design of structures, not only the collapse of structures must be avoided, but also other failure modes should be controlled. In this situation, the performance-based design method, which is regarded as the main design method in the future in aseismic engineering, is studied by many researchers. A method of how to choose the high dam construction scheme is proposed based on the function of electricity-generating of dams. Economy losses caused by different intensities of earthquakes are analyzed. Through water level, the relationship between dynamic mechanics and economy loss is established. An example is presented to illustrate the feasibility of the proposed method.

Key words: high dam; performance; scheme; risk decision-making; seismic damage

1 引 言

在新世纪上半叶, 我国的水电建设将处于重要发展时期, 一批高坝(例如: 长江上游的溪洛渡、百鹤滩、澜沧江上的小湾、雅砻江上的锦屏、乌江上的构皮滩、黄河上游的拉西瓦等)将要开工建设, 上述拱坝坝高均达 300 m 级, 库容达几十亿到几百亿 m³, 装机达 150~1 400 万 kW, 设计地震烈度多在 VIII~IX 度之间(地震加速度为 0.2 g~0.32 g)。高拱坝的抗震设计是当前我国水利水电建设的关键技术之一。由于在高拱坝抗震方面缺乏足够多的实际考验, 为了保证高拱坝的经济与安全, 在坝工建设中, 如何进行高坝建设方案的优化, 如何在经济与安全之间选择一个最佳的平衡点, 如何在考虑高坝主要功

能的基础上进行高坝方案的选择及抗震设防烈度的决策等一系列问题有待于进行深入研究。

基于功能的抗震设计的概念是在 20 世纪 90 年代初由美国学者率先提出的^[1], 其概念在于根据灾害荷载和抗力的不确定性, 针对不同风险度水平的灾害荷载作用(地震等), 将结构设计成能满足不同功能要求, 保障结构在整个运行期充分发挥功能, 并方便维护, 从而达到经济的目的。实质上, 目前的抗震设计还是以保护人民的生命、财产安全为设计目的^[2~4], 这样在地震发生时, 尽管可以有效地防止造成人生命伤害的结构倒塌破坏, 但由于其他破坏没有得到有效地控制, 往往会造成巨大的经济损失。因此, 在抗震设计时, 为了做到既经济又安全, 不仅要防止结构发生倒塌破坏, 而且还要有效

收稿日期: 2004-11-02

修改稿收到日期: 2005-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 90510018)。

作者简介: 金峰, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构方面的研究工作。E-mail: jinfeng@tsinghua.edu.cn

地控制结构的其他破坏状态。在此背景下,基于功能的抗震设计已引起学者广泛讨论,并且认为是未来抗震设计的主要发展方向,目的就是在未来抗震设计中,在不同强度水平地震作用下,能够有效地控制结构的破坏状态,使结构实现明确的不同功能水平。从而使结构在整个运营周期内,在遭受可能发生的地震作用下总体费用达到最小^[5-7]。笔者曾在文献[8]中把基于功能的设计理念引入到高坝抗震设防烈度的决策中,本文则是在基于功能的基础上对高坝建设方案进行风险决策,并以一高坝为例说明本文方法的可行性,期望使基于功能的设计方法在水利水电工程中得到越来越广泛的应用。

2 决策方法

高坝抗震功能设计首先要进行高坝枢纽的功能分析,明确高坝的主要使用功能以及高坝的破损对这些使用功能的影响,确定高坝的量化功能指标。利用风险分析的方法研究高坝的使用功能、风险与功能指标的关系。在高坝结构方面,忽略高坝发生溃坝这一极限情况,高坝主要具有防洪、挡水、发电、灌溉、航运等功能,每一功能都可以产生经济效益,一旦发生地震危害,则每一功能都有可能受到损害。本文假设所研究的高坝以发电为其主要功能,其他功能的分析方法与此类似。如图1所示,现有3种高坝建设方案供决策者进行选取,图中所示为3种方案在不同地震烈度下发生的震害损失。其中,方案1是原既定的设计方案,方案2和方案3是优化方案。现研究如何从经济功能风险分析的角度对这3种方案进行取舍。

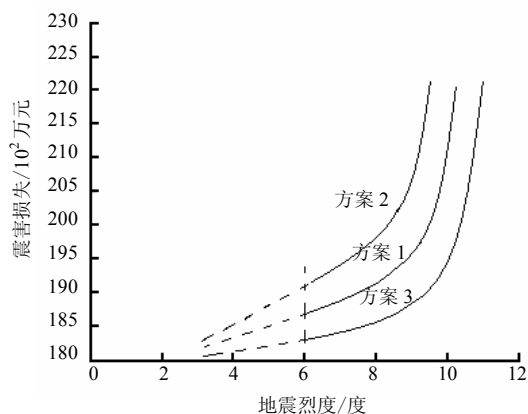


图1 地震烈度与震害损失示意图

Fig.1 Sketch for earthquake intensity vs. earthquake loss

假设高坝方案1~3的建设资金投入分别为 C_{10} , C_{20} , C_{30} , 例如:通过对比分析高坝的设计使用期内方案3对原设计方案1所能降低的震害损失,并与 $(C_{30} - C_{10})$ 相比较,就可以得到方案3的经济效益,方案3在设计使用期内的经济效益,可表示为

$$\Delta_{31} = \iint_{t,I} [C_1(I,t) - C_3(I,t)] PDF(I) dI dt - (C_{30} - C_{10}) \quad (1)$$

式中 Δ_{31} 为方案3对方案1的经济效益; $C_3(I,t)$, $C_1(I,t)$ 分别为方案3和方案1的与时间和地震烈度有关系的震害损失函数; $PDF(I)$ 为地震烈度的概率分布函数; t 为时间,一般取为高坝的设计使用期。同样的方法可以得到方案2对方案1的经济效益,可表示为

$$\Delta_{21} = (C_{10} - C_{20}) - \iint_{t,I} [C_2(I,t) - C_1(I,t)] PDF(I) dI dt \quad (2)$$

通过比较各方案的经济效益情况,就可以对方案进行决策选取,如表1所示。

表1 高坝建设方案决策表

Table 1 Decision table of dam construction cases

方案效	第1种情况	第2种情况	第3种情况	第4种情况	第5种情况
益情况	$\Delta_{31} < 0, \Delta_{21} < 0$	$\Delta_{31} > 0, \Delta_{21} < 0$	$\Delta_{31} < 0, \Delta_{21} > 0$	$\Delta_{31} > \Delta_{21} > 0$	$\Delta_{21} > \Delta_{31} > 0$
方案决策	维持原方案1	选择方案3	选择方案2	选择方案3	选择方案2

3 震害损失计算方法

以发电为主要功能的高坝的经济效益与发电水位的关系密切相关,水位的降低导致发电量的减少,但地震的发生迫使发电水位要降低到使其安全的程度,在这种情况下就导致了震害损失(忽略溃坝的极限情况)。因此,本文通过水位这一变量建立了地震力作用与高坝震害经济损失的关系,其中假设2种状态具有相同的超载系数,并认为2种状态具有相同的安全性能。基本计算过程如图2。

4 算例分析

4.1 水位分析

某一重力坝,材料参数如表2。

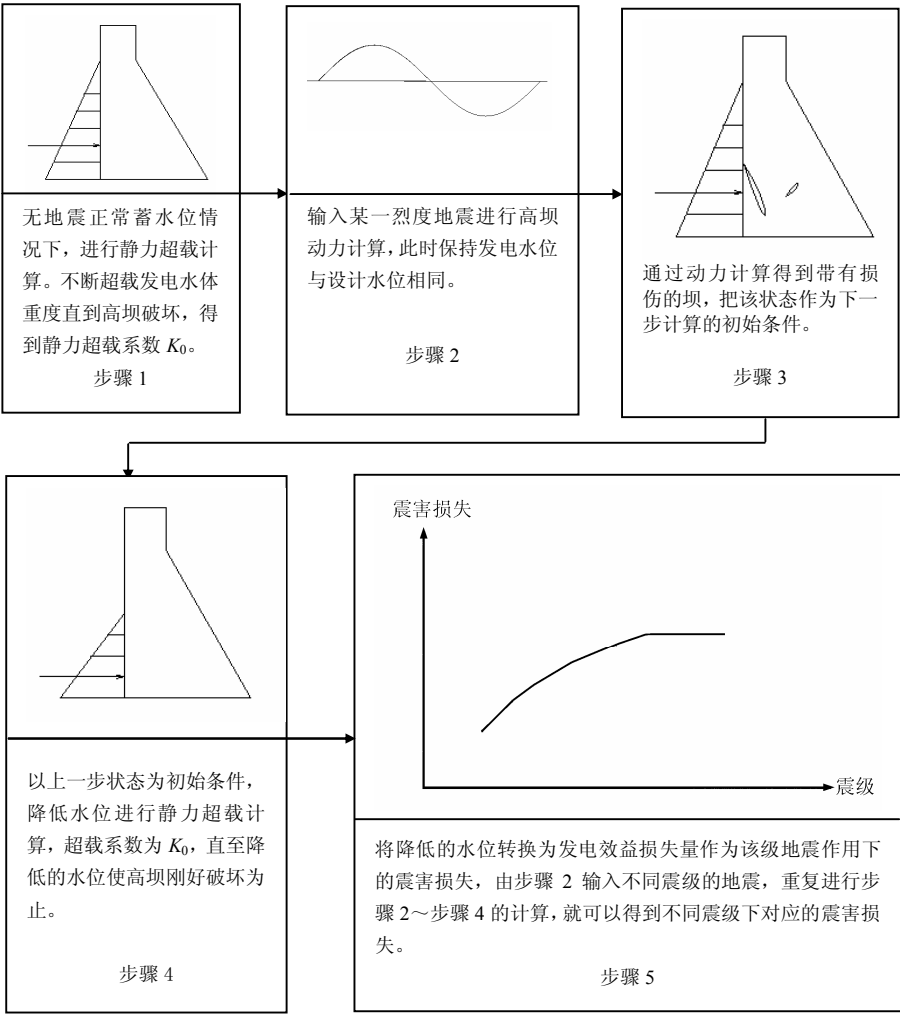


图 2 震害损失计算方法示意图
Fig.2 Calculation method for earthquake loss

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

材料类别	弹性模量/GPa		泊松比	密度/kg·m ⁻³
	动弹性模量	静弹性模量		
地基材料	31.027	24	0.25	1×10 ⁻⁶
坝体混凝土	31.027	24	0.2	2 400

现有如下的 3 种建设方案。

(1) 方案 a: 坝高 102 m, 坝顶宽度为 10 m, 下游面坡度为 1: 0.7, 坝底厚度为 70 m, 正常水位为 100 m。结构如图 3 所示。

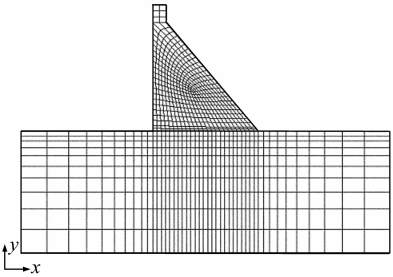


图 3 重力坝结构示意图
Fig.3 Gravity dam sketch

经计算在各烈度地震下发电水位需要降低的值如表 3 所示, 超载系数均与无地震作用时相同。破坏标准以坝体关键部位单元进入塑性, 坝体无法继续进行超载, 处于溃坝临界状态为准。当 $K_0=2.41$ 时, 计算结果如表 3。

表 3 各烈度地震下发电水位的降低值

Table 3 Water level lowerings under different seismic intensities

地震烈度	无地震	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ
降低水位/m	0	5	13	24	30

(2) 方案 b: 坝高、坝顶宽度正常水位与方案 a 相同, 下游面坡度为 1: 0.8, 坝底厚度为 80 m, 超载系数均与无地震作用时相同。当 $K_0=3.06$ 时, 计算结果如表 4。

(3) 方案 c: 坝高、坝顶宽度正常水位与方案 a 相同, 下游面坡度为 1:0.9, 坝底厚度为 90 m, 超载系数均与无地震作用时相同。当 $K_0=3.80$ 时, 计算结果如表 5。

表 4 各烈度地震下发电水位的降低值
Table 4 Water table lowerings under different seismic intensities

地震烈度	无地震	VI	VII	VIII	IX
降低水位/m	0	3	5	14	28

表 5 各烈度地震下发电水位的降低值
Table 5 Water table loweings under different seismic intensities

地震烈度	无地震	VI	VII	VIII	IX
降低水位/m	0	2	4	11	26

4.2 经济分析及方案决策

根据文献[9]的研究,地震烈度的概率分布符合极值 III 型分布,表达为

$$F(I) = \exp \left[- \left(\frac{\omega - I}{\omega - \varepsilon} \right)^K \right] \quad (3)$$

式中 ω 为地震烈度上限值,可取为 12; I 为地震烈度; ε 为众值。在一定时期内超越概率为 0.632,本例取为 VII 度; K 为形状参数,本算例取为 5;对式 (3) I 求导数,即可得到烈度的 PDF(I):

$$PDF(I) = (2.4 - 0.2I)^4 \exp[-(2.4 - 0.2I)^5] \quad (4)$$

用多项式拟合各方案的震级与降低水位之间的关系得到:

$$H_a(I) = -1.33I^3 + 29.5I^2 - 206.17I + 468 \quad (5)$$

$$H_b(I) = -0.33I^3 + 10.5I^2 - 92.17I + 250 \quad (6)$$

$$H_c(I) = 0.83I^3 - 15I^2 + 91.17I - 185 \quad (7)$$

式中 $H_a(I)$, $H_b(I)$, $H_c(I)$ 分别表示烈度为 I 时方案 a~c 降低的发电水位。

假设该坝设计使用年限为 50 年,初期建设费用与坝的断面积成正比,每平方米面积造价为 A ,发电水位降低一个单位在单位时间内造成的经济损失为 B 。将式(4)~(7)代入式 (1) 和 (2) 计算,可得

$$A_{31} = 485B - 1\,000A \quad (8)$$

$$A_{21} = 290B - 500A \quad (9)$$

由此可见,方案选择与参数 A , B 有关,具体视式(8)、式(9),参照表 1 进行选择。例如当 $A=2$, $B=1$ 时,由于 $A_{31} < 0$, $A_{21} < 0$, 则应选择方案 1。

5 结 论

本文在高坝建设领域引进了功能设计的概念,探讨了基于发电经济功能的高坝建设方案的风险决策问题,并研究了在不同震级作用下高坝震害损失的计算方法,通过水位这一变量建立起高坝动力分

析与经济损失量之间的内在联系。并以一算例来说明该方法的可行性,其结果是对在水电工程中引进功能设计理念的有益尝试和探索。

参 考 文 献

- [1] 黄群贤, 林建华. 基于功能的结构抗震设计概念[J]. 低温建筑技术, 2002, (3): 39—40.
HUANG Qun-xian, LIN Jian-hua. Concept of anti-seismic design based on performance[J]. **Cryogenic Construction**, 2002, (3): 39—40.
- [2] Ghobarah A. Performance-based design in earthquake engineering: State of development[J]. **Engineering Structure**, 2001, 23(3): 878—884.
- [3] 程耿东, 李刚. 基于功能的结构抗震设计中一些问题的探讨[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 5—11.
CHENG Geng-dong, LI Gang. Some key problems on performance-based seismic design[J]. **Journal of Building Structures**, 2000, 21(1): 5—11.
- [4] 王亚勇. 我国 2000 年抗震设计模式规范展望[J]. 建筑结构, 1999, 29(6): 32—36.
WANG Ya-yong. The anti-seismic model code of year 2000 for buildings in China[J]. **Building Structure**, 1999, 29(6): 32—36.
- [5] Faifar P, Krawinkler H. Seismic design methodologies for the next generation of codes[A]. **Seismic Design Practice into the Next Century**[C]. Balkma: Booth, 1998. 459—466.
- [6] Ganzerli S, Pantelides C P, Reaveley L D. Performance-based design using structural optimization[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 2000, 39: 1 609—1 627.
- [7] Wen Y K, Kang Y J. Minimum building life-cycle cost design criteria[J]. **Journal of Structural Engineering**, 2000, 33(3): 325—346.
- [8] 贾超, 金峰, 王品江, 等. 高坝抗震设防问题的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2005, (1): 155—158.
JIA Chao, JIN Feng, WANG Pin-jiang, et al. Design earthquake level analysis for high dams[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, (1): 155—158.
- [9] 高小旺, 鲍蔼斌. 地震作用的概率模型及其统计参数[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 13—22.
GAO Xiao-wang, BAO Ai-bing. Probability model and statistical parameters under earthquake[J]. **Earthquake and Vibration Engineering**, 1985, 5(1): 13—22.