

高拱坝安全评价方法比较

陈在铁^{1 2}

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 沙洲工学院基础科学系, 江苏 张家港 215600)

摘要 : 简述了高拱坝基于强度理论的安全系数评价法与基于稳定理论的整体安全度评价等传统确定性方法的现状、优势与不足, 研究了高拱坝外载荷、坝身与坝基材料强度弱化等的随机性和评价准则的模糊性, 提出并阐述了高拱坝安全评价中基于结构可靠度理论的风险分析法。通过实例对两类方法比较研究表明, 考虑随机性、模糊性并基于结构可靠度理论的风险评价与传统的确定性安全评价在研究高拱坝安全方面相辅相成、缺一不可。

关键词 : 高拱坝 ; 强度破坏 ; 结构失稳 ; 安全系数 ; 随机性 ; 风险评价

中图分类号 : TV642.2 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2007)03-0009-05

Comparison of safety evaluation methods for high arch dams//CHEN Zai-tie^{1 2}(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Basic Sciences Department, Shazhou Institute of Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract : A brief introduction was given to the current situation, predominance, and deficiency of some conventional deterministic approaches, such as the safety factor evaluation method for arch dams based on the theory of strength and the integral safety degree evaluation based on the stability theory. The randomness of external loads of arch dams and weakening of the dam body and dam foundation materials as well as the fuzziness of the evaluation criterion was studied, and a risk analysis approach based on structural reliability theory for high arch dam safety evaluation was put forward. The comparison of the safety evaluation methods by a case study shows that the approach of risk evaluation based on structural reliability theory with randomness and fuzziness taken into account and the conventional deterministic safety evaluation method supplement each other and neither can be omitted in safety research of high arch dams.

Key words : high arch dam; strength failure; structural instability; safety factor; randomness; risk evaluation

由于拱坝具有优良的强超载能力、自调节性能以及工程造价的经济性, 全世界坝高 200 m 以上的大坝有一半以上采用拱坝坝型^[1]。我国建成的李家峡、乌江渡、东风等拱坝, 坝高均在 150 m 以上, 最近建成的二滩拱坝更高达 240 m。随着国民经济的飞速发展和西部大开发的深入, 小湾、溪洛渡、锦屏、白鹤滩等一批 300 m 级的特高拱坝在我国西南和西北正在修建或即将修建, 它们将为我国经济建设发挥巨大的作用^[2]。

高拱坝坝高库大, 环境条件复杂, 又多处于高烈度地震区, 一旦失事, 后果不堪设想, 不但严重影响工农业生产、重创国民经济, 而且使人民生命财产遭受极大损失, 产生恶劣的政治影响。因此, 高坝的安全评价与风险分析越来越受到力学界、坝工界、政府的高度重视和社会各界的广泛关注。

1 高拱坝确定性安全评价方法

高拱坝安全研究的真正重视始于 1959 年法国的 Malpasset 拱坝因坝体连同岩基发生深层滑动而溃坝后的 20 世纪 60 年代^[3]。近半个世纪以来, 基于强度破坏理论的安全系数评价法仍是高拱坝安全评价的习惯做法, 基于结构稳定理论的整体安全度评价方法也逐步得到重视并有了一定程度的发展。

1.1 基于强度破坏理论的安全系数评价法

安全系数法、分项安全系数法是基于强度理论校核拱坝安全性的基本方法。安全系数校核法的原理与步骤是: 在选取最大可能载荷(特大洪水、地震、大面积山体滑坡等)的基础上通过采用拱梁分载法等结构力学方法^[4]、有限元法^[5-6]与边界元法^[7]等数值方法计算结构的最大应力, 根据材料的性质、结构的重要性等因素确定大于 1 的容许安全系数 $[k]$,

利用材料的极限应力除以最大工作应力得到实际工作安全系数,通过比较工作安全系数与容许安全系数来判断高拱坝是否安全以及安全的储备程度;校核一般考虑坝踵等抗拉、坝趾等抗压与坝体或局部抗滑3种情况,抗滑安全系数校核公式^[8]为

$$k = \frac{f\sigma + c}{\tau} \geq [k] \quad (1)$$

式中: k 为抗滑(或抗剪)工作安全系数; f 和 c 分别为滑移面材料的摩擦系数和黏结力系数; σ 、 τ 分别为滑移面上的正应力、切应力,实际校核时需要已知滑动面或靠人工经验选定潜在滑移面。

分项安全系数法则采用结构重要性系数 γ_0 、设计状态系数 ψ 、作用系数 γ_F 、材料性能系数 γ_m 与结构系数 γ_d 等5个分项系数代替单一的安全系数,校核公式统一^[9]为

$$\gamma_0 \psi \gamma_F S \leq R / (\gamma_m \gamma_d) \quad (2)$$

式中: S 、 R 分别为载荷效应与抗力。

高拱坝的安全系数评价法以强度破坏理论为基础,意义简单明确,为广大的工程科技人员所熟悉,且许多国家规范内有与之配套的容许安全系数。但高拱坝是复杂超静定结构,一点或局部的强度破坏可能仅仅导致局部开裂、压溃或滑动等现象,这些现象是高拱坝放松约束来调整内力以适应变化的正常反应,在破坏前,必有一个不断开裂、压溃或滑动,不断静定化的过程,在这个过程中高拱坝的潜力未尽,仍能安全运行,基于强度理论的危险点安全系数评价不能准确反映高拱坝整体的安全程度。

1.2 基于稳定理论的整体安全度评价法

近10多年来国内外学者逐步重视高拱坝破坏机理的研究,积极探索与整体安全度相适应的研究方法。当坝体由于各种原因处于极限平衡状态时,只要有一个小的扰动,它将偏离原平衡状态而产生无法恢复性的破坏。根据运动稳定性定义:任何状态或事物的变化都是一种运动,都存在是否稳定的问题。鉴于高拱坝整体破坏时状态从静止向可动状态转变,一些学者认为高拱坝整体破坏问题就是失稳问题,稳定理论可以解决高拱坝的整体破坏问题,高拱坝稳定性可用整体安全度衡量^[10]。虽然理论上可以利用总势能 Π 反映高拱坝整体的状态、一阶变分 $\delta\Pi$ 的符号判断状态是否平衡、二阶变分 $\delta^2\Pi$ 的符号判断是否处于临界状态,求出高拱坝整体安全度进行安全评价,但高拱坝是一个高度流固耦合、应力场与温度场耦合的系统,总势能实际表示就十分困难,致使高拱坝整体失稳破坏研究进展不够理想,至今仍缺乏一个理论严密又简单实用的方法^[11]。目前基于稳定理论的高拱坝整体安全度评

价的具体方法有:通过增加水位或库水容重使坝失稳破坏求出超载安全度的超载法^[12]、通过降低材料强度使坝失稳破坏求出强度储备安全度的强度储备法^[13]以及先超载一定程度再降低材料强度使坝失稳破坏求出综合安全度的综合法^[14]。超载法难以考虑河水侵蚀、渗流、碱化反应等因素对强度的影响,强度储备法需要多个模型导致实施较困难,因此模型试验都采用超载法。综合法理论上较合理,但实际操作复杂,特别是超载到何种程度再降低材料强度没有统一的标准。

2 高拱坝安全研究中的随机性、模糊性

传统的安全分析习惯于将确定的载荷施加在确定的结构上,评价结论只能是“安全”或“不安全”,高拱坝的安全评价也不例外。事实上,高拱坝安全分析中存在大量的不确定性、随机性、模糊性。

2.1 外载荷的随机性

拱坝等水工结构除自重、温度等载荷易于确定外,其他绝大部分载荷都与运行过程中发生的洪水、地震、山体滑坡、上游垮坝、战争、恐怖袭击等事件有关。洪水何时出现、水位多高,地震何时发生、震级多高、烈度多大等等在事件出现前谁也无法给出确切的答案。人们常说的百年一遇、千年一遇的大洪水只是统计说法,既不能肯定百年、千年必然出现一次,更不能确定100年、1000年内哪一天出现,洪水的出现具有随机性,同样的道理,地震、山体滑坡、上游垮坝、战争、恐怖袭击等事件的发生也具有随机性。对于随机性的事件必须研究它发生的概率。如果概率足够小时可以不予考虑,就像人们不担心雷击雨天照样外出、不担心坠机照样坐飞机一样。如果用人类有史以来只出现过1次的特大洪水载荷或特大地震载荷来校核某一座设计寿命为1000年左右的高拱坝安全性,则就过分考虑了安全性而忽视了同样重要的经济性,同样是不容许的。

2.2 坝身与坝基材料强度弱化的随机性

由于河水侵蚀、渗流、碱化反应、裂隙扩展、混凝土老化等原因,坝身材料、坝基岩层软弱带的强度随着时间的推移不断降低。而河水侵蚀、碱化反应、裂隙扩展、混凝土老化的快慢和渗流的强弱具有不确定性,因此坝身与坝基材料强度弱化进程具有随机性。将高拱坝系统看成一个确定性结构具有一定的片面性。

2.3 安全评价准则的模糊性

模糊性是指人们不可能给某些事物以明确的定义和评价标准而形成的不确定性^[15]。高拱坝安全研究存在许多模糊性问题。例如,高拱坝地基中的

岩体怎样才算是Ⅰ类岩体,没有也不可能准确的定义,对高拱坝沿建基面进行稳定分析时,若抗滑稳定安全系数的容许值为1.05,是否安全系数等于1.04一定不安全,等于1.06就一定安全;规范中关于分项系数的确定也有同样的问题。过去人们习惯于用确定性的方法来分析它们,使本来明确的问题变得“模糊”了。模糊数学理论是研究和解决客观事物中那些含有模糊性因素的不确定现象的一种新的数学方法,以模糊理论为基础的模糊综合评判方法将在高拱坝安全评价中发挥重要作用。

3 基于结构可靠度理论的风险分析法在高拱坝安全评价中的应用

高拱坝传统的确定性安全评价方法没有考虑外荷载发生的概率因素,概率等于1的必然荷载与概率趋近于0的罕见荷载在传统的安全评价中没有区别,传统的确定性评价结论“是”与“非”有确定性的边界,而事实并非如此。笔者尝试应用源于模糊数学的结构可靠度理论来解决这些问题。

3.1 高拱坝整体失效概率研究

系统在运行过程中存在着“正常工作”与“结构失效”一对对立随机事件,系统的可靠度为系统在规定的使用期限、预期的工作条件下,能正常工作的概率,可记为

$$P_r = P(\Omega) \quad (3)$$

式中: Ω 代表“正常工作”这一随机事件;由于 $\bar{\Omega}$ 代表与“正常工作”对立的“结构失效”随机事件,结构失效的概率可表示为

$$P_f = P(\bar{\Omega}) = 1 - P(\Omega) = 1 - P_r \quad (4)$$

设结构抗力 R 与荷载效应 S 的概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$,其中 r 和 s 分别为 R 和 S 的基本变量,理论推导可以得到^[16]

$$P_r = P(S < R) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^R f_S(s) ds \right] dr = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_s^{\infty} f_R(r) dr \right] ds \quad (5)$$

由于结构抗力 R 与荷载效应 S 的概率密度函数难以得到,实际做法是:根据历史数据统计、专家调查与稀有事件类比分析综合确定荷载(特大洪水、地震等)随机量和材料抗力随机量的分布特征,在此基础上研究得到高拱坝的主要失效模式并计算各种失效模式的发生概率,利用故障树或事件树^[17]分析方法建立高拱坝失效的故障树或事件树模型,进而求得高拱坝系统的失效概率 P_f 和可靠度 P_r 。

高拱坝主要有构造缝超量开裂、失稳溃坝、剪滑垮坝、毁坝等4种失效模式。设失效模式的状态函

数 $g(X)$, $g(X) > 0$ 表示安全状态, $g(X) < 0$ 表示失效状态, $g(X) = 0$ 表示临界状态。可运用蒙特卡罗法、JC法计算高拱坝失效模式的发生概率。

蒙特卡罗法又称随机抽样技巧法或统计试验法,当样本数量足够大时是一种相对精确的方法。它首先对影响失效概率、统计独立的随机变量进行大量的随机抽样(至少大于10万次),获取各变量的随机数,然后将这些抽样值一组组代入状态函数式,确定系统失效与否,统计失效次数 L ,算出失效次数 L 与总抽样次数 N 的比值即失效概率 P_f :

$$P_f = L/N \quad (6)$$

JC法则需要将随机变量等量正态化,但必须保证在临界失事点 x_i^* 处正态化后的概率函数值和概率密度函数值与原分布函数的概率函数值和概率密度函数值相同。等量正态化的公式为

$$\sigma_i' = \Phi^{-1}(F(x_i^*)) / f(x_i^*) \quad (7)$$

$$\mu_i' = x_i^* - \sigma_i' \Phi^{-1}(F(x_i^*)) \quad (8)$$

式中: $F(\cdot)$ 、 $f(\cdot)$ 分别代表变量 x_i 的原来概率函数和概率密度函数; $\Phi(\cdot)$ 和 $\phi(\cdot)$ 分别代表标准正态分布下的累积概率分布函数和概率密度函数,而 μ_i' 和 σ_i' 则为当量正态化后变量的均值和标准差,临界失事点 x_i^* 通过迭代法求得。在状态函数为线性函数

$g = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i$ (a_0, a_i 为常数)的情况下,可靠指标 β 、失效概率 P_f 分别为

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i'}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i' \sigma_j'}} \quad (9)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (10)$$

式中 ρ_{ij} 为变量间的相关系数。

利用上述方法求得高拱坝的主要失效模式的发生概率后,利用“双模”窄界公式计算高拱坝系统失效概率 P_{f0} 。高拱坝失效概率的上下限由式(11)和式(12)确定。

$$P_f \leq \sum_{i=1}^k P_{fi} - \sum_{i=2}^k \max_{j < i} (P_i, P_j) \quad (11)$$

$$P_{f0} + \max \left\{ \sum_{i=2}^k \left[P_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} (P_i + P_j) \right] \rho \right\} \leq P_f \quad (12)$$

式中: P_{fi} 为第 i 个失效模式的概率; P_i 和 P_j 由式(13)和式(14)确定。

$$P_i = \Phi(-\beta_i) \Phi \left(-\frac{\beta_j - \rho_{ij} \beta_i}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (13)$$

$$P_j = \Phi(-\beta_j) \Phi \left(-\frac{\beta_i - \rho_{ij} \beta_j}{\sqrt{1 - \rho_{ij}^2}} \right) \quad (14)$$

式中 β_i 和 β_j 分别为第 i, j 个失效模式的可靠指标 ; ρ_{ij} 为这两个失效模式的相关系数。

3.2 高拱坝风险计算方法与公式

风险是客观存在的 ,人类在改造客观世界获得利益与好处的同时 ,必须面对由此伴随的风险。高拱坝的建设不但产生巨大的发电效益 ,也为工农业生产 and 人民生活带来了极大的便利 ;与此同时坝下游的人民消除了以前较高频率小洪水的威胁 ,但又面临着有更大洪水威胁的可能。对溃坝大洪水造成的风险分析是高拱坝安全评价的一个重要组成部分。一般而言 ,风险定义为损失与事件发生概率的乘积^[18-19]。对大型的高拱坝常常有监测和预报、预防系统 ,高拱坝的风险 R 可用式 (15) 表示 :

$$R = P_f C (1 - P_e) \tag{15}$$

式中 : P_f 为高拱坝溃坝的概率 ; C 为高拱坝溃坝造成的损失 ; P_e 为安全系统监测、预报并采取有效措施防止溃坝事件出现的有效概率 ; $1 - P_e$ 为安全系统预防溃坝发生的失效概率。

在式 (15) 中 , P_e 实际上就是整个安全系统的可靠度 ,可以通过与计算 P_f 类似的方法求得。高拱坝溃坝造成的损失 C 计算则要综合考虑以下因素 :洪水波的特性如高度、速度和温度等 ,下游大坝的破坏 ,洪水波引起的冲蚀和滑坡 ,报警设施和系统的可靠性 ,在溃坝前作出是否疏散的决定 ,报警时间即人们疏散的可用时间 ,疏散计划和疏散效率如在溃坝时人们如何采取疏散行动的知识、是否进行过演习等 ,疏散过程可得到的外援程度等等^[20]。

3.3 基于风险理论的高拱坝安全评价准则

风险准则是风险评价过程中用于确定定量风险分析结果是否可以接受的一种准则^[21]。任何结构物包括高拱坝总是有风险的 ,增加投入可以一定程度上减少风险 ,但不能不顾投入和效益过分强调降低和消除风险 ,也就是说必须面对、接受某种风险。这种风险一般称容许风险 ,用 R 表示 ,也称可接受风险或合理低风险。由此建立高拱坝的评价准则 :

$$R \leq [R] \tag{16}$$

即 ,一座不会因它的存在而造成不能被接受风险的高拱坝是安全的。

确定容许风险必须综合考虑安全性、经济性以及当时的技术水平等因素 ,因此只有当进一步降低风险是不可行的或需要采取措施 ,但在及时性、难度和付出的努力与风险的减少是非常不相称的时候 ,剩余风险才是可接受的。理论上高拱坝的可靠度 P_r 越高 ,其造价 $C(P_r)$ 越大 ,但其风险 $R(P_r)$ 越小 ;反之 ,可靠度 P_r 越低、其造价越小 ,但其风险越大。令目标函数 $u(P_r) = C(P_r) + R(P_r)$ 取得极小值 ,求得最优可靠

度 ,对应最优可靠度的风险为可接受风险。在高拱坝容许风险的实际确定时 ,还必须考虑当地政治、经济和社会的需要以及公众的期望 ,是个十分复杂、敏感的社会问题而不是单纯的技术问题。

如果可以通过其他的途径以差不多的投资、更低的风险获得同样的利益 ,那么原风险是不可接受的^[22] ;另外花钱可使高拱坝更安全、风险与生命损失更小 ,但可以通过与花同样的钱改善医疗保健或道路状况来挽救生命损失的效果相比较确定是否需要提高生命损失容许风险的标准^[23]。

4 确定性安全评价与风险评价比较

在确定性的安全评价中 ,所有载荷不管是必然载荷还是罕见载荷都当确定性载荷处理 ,不考虑载荷、抗力等随机性、未确知性、模糊性等不确定因素 ,评价结论也是确定性的 ,这种方法纯粹从力学的角度研究问题 ,没有或很少考虑经济性。基于概率统计理论、结构可靠度原理和风险理论的高拱坝风险评价方法充分考虑了外载荷的随机性和评价准则的模糊性 ,在研究高拱坝整体失效概率的基础上对其进行风险分析 ,建立评价准则并进行安全评价 ,这种方法兼顾了经济性、安全性以及技术水平等平衡 ,评价结论既明确高拱坝的安全可靠度 ,也揭示存在的风险 ,易于被社会各界接受 ,该方法对高拱坝破坏机理的研究不够深入 ,需要借鉴和利用确定性方法的研究成果。

某拱坝为抛物线双曲拱坝 ,高 292 m、坝顶厚 12 m、拱冠底部厚 72.912 m、坝顶中心线弧长 929.074 m。为提高建基面处位移场与应力场的精度 ,在建基面上设置了薄层单元。系统整体网络采用 9835 个单元 ,11 897 个结点 ,基本模拟了大坝的结构特征、地形地貌和地基内不同的岩体及 F_5, F_7, F_{10}, F_{11} 等 4 条断层。

对于坝体混凝土采用四参数破坏准则 ,地基岩体采用 Drucker-Prager 屈服准则 ,建基面与断层单元材料采用修正的 Mohr-Coulomb 屈服准则。计算载荷组合为 :正常上游水位(1 240 m)+ 坝体自重 + 淤沙(1 097 m)+ 温降 + 下游水位(1 004 m)+ 渗流。表 1 给出了三维有限元计算得到的坝体最大位移与最大应力。以下分别利用确定性方法与风险分析方法对

表 1 坝体最大位移与最大应力

计算方法	最大位移 δ /mm				最大等效应力 σ /MPa		
	拱冠顺河向	左坝肩顺河向	右坝肩顺河向	坝体竖向	主拉应力	主压应力	建基面切应力
弹性分析	182.1	30.2	30.4	14.8	1.6	-10.7	2.3
弹塑性分析	192.2	33.8	35.0	21.9	0.9	-9.4	1.8

高拱坝进行安全评价。

4.1 确定性方法评价拱坝的安全性

以强度理论、稳定性理论为代表的高拱坝确定性安全评价方法侧重研究坝身与坝基材料的本构关系、计算结构在载荷作用下的应力、变形以及破坏机理,建立评价准则并进行安全评价。强度理论主要校核坝体结构危险点的应力,必要时也校核关键点的位移。在已知坝体各关键点的容许位移 δ 、极限位移 δ^0 除以安全系数 k 的情况下,通过逐个比较各关键点的计算位移与容许位移即可得出校核结论。利用弹塑性分析求得的力 $\sigma^+ = 0.9 \text{ MPa}$ 、最大压应力 $\sigma^- = 9.4 \text{ MPa}$ 、最大切应力 $\tau = 1.8 \text{ MPa}$ 。根据朱伯芳院士在对拱坝安全系数的研究成果并在小湾拱坝中得到采用的数据^[24-25]抗拉极限应力 $\sigma^{0+} = 3 \text{ MPa}$ 、抗压极限应力 $\sigma^{0-} = 40 \text{ MPa}$ 、抗剪极限应力 $\tau^0 = 10 \text{ MPa}$,有限元计算应力的容许安全系数 $[k] = 4.0$ 。对应计算得到拉、压、剪工作应力安全系数为 $k^+ = 3.33$, $k^- = 4.25$, $k^r = 5.55$,比较可知,高拱坝满足抗压、抗剪强度条件,但会在受拉处出现裂缝。

稳定性理论主要校核坝体的整体安全度,一般可采用计算机模拟试验或室内模型试验得到超载安全系数和强度储备安全系数。本文通过计算机模拟与仿真、利用迭代过程不收敛以及位移、破坏区连通的突变性作为失稳判据得到超载安全系数 $k_p = 5.8$ 、强度储备安全系数 $k_f = 4.6$,均高于对小湾拱坝进行整体稳定地质力学试验评价安全的 $k_{cr} = 4.5$ ^[26],因此可认为该拱坝整体安全度满足要求。

4.2 风险分析方法评价拱坝的安全性

风险评价方法则是在研究高拱坝破坏机理的基础上分析得出高拱坝具有拉裂、压溃、漫坝、超量渗漏、坝体失稳、沿建基面或软弱层滑移等失效模式,逐个研究与失效模式相关的载荷、抗力随机变量的变化规律及特征量的计算方法,通过改进的一次二阶矩法、JC法以及蒙特卡罗法计算单个失效模式的失效概率,通过建立高拱坝系统失效的故障树模型、分析各失效模式之间的相关系数、利用单模上下界公式、“双模”窄界公式或概率网络估算(PNET)法求得高拱坝的失效概率;利用破坏损失系数法估算高拱坝的失效后果;通过比较高拱坝的风险与容许风险确定高拱坝安全性是否可以被接受。

根据拱坝附近洪水、地震的历史资料结合专家讨论得到洪水水位服从皮尔逊Ⅲ型即三参数 Γ 分布,地震加速度的值服从极值Ⅰ型分布,综合求得水位与地震加速度的特征值;研究拱坝混凝土强度的随机性与坝基、坝肩岩层材料强度的随机性、未确知性,得到抗力随机变量的分布规律,求得特征量,建

立拱坝各个失效模式的状态函数,计算单个失效模式与系统的失效概率。通过以上分析初步求得某拱坝系统的失效概率 $P_f = 2.23 \times 10^{-7}$,损失 C_f 一般根据受害面积、平均受害程度以及受害区域的经济及人文状况等进行估算,也有一些国家采用 $C_f = kC_m$ (其中 C_m 为工程造价, k 根据可能损害的严重程度取值为 $1 \sim 100$)计算^[27],粗略估算得到 $C_f = 2200$ 亿元(取 $k = 10$),由式(15)可计算得风险值 $R = 49000$ 元左右,约6125美元。西方一些国家对一般大坝可接受的失效概率为 10^{-6} ,重要的大坝低于 5×10^{-7} ,容许风险 $[R] = 7000$ 美元^[27]。可以判断该拱坝的失效概率、风险值低于可以接受的标准,从风险评价角度是安全的。

5 结 语

传统的以强度理论、稳定性理论为代表的确定性评价方法和以概率论、结构可靠度原理为基础的风险评价方法分别侧重不同的方面对高拱坝的安全性进行研究,前者更重视结构破坏机理的揭示,后者更重视破坏发生的可能性和存在的风险,前者重在材料与结构安全,后者重在安全性与经济性的平衡。在高拱坝的安全性研究中,两种方法相辅相成,缺一不可。

参考文献:

- [1] 刘国华,汪树玉.拱坝非线性全调整分载法研究[J].浙江大学学报,1999,33(1):40-46.
- [2] 中国大坝委员会.世界大坝统计情况及资料[EB/OL]. [2005-10-06]. <http://www.icold-cigb.org.cn/zt/dams/wqk.asp>.
- [3] 田彬,夏颂佑.高拱坝坝踵开裂机理研究进展[J].水电站设计,1997,13(4):1-6.
- [4] REN Qing-wen. Development of theory and methods on high dam structural analysis[C]//WIELAND M,REN Qing-wen. New Developments in Dam Engineering. London: A. A. Balkema Publishers, 2004: 63-74.
- [5] 袁凡凡,栾茂田,闫澍旺.非均质介质破坏机制及承载力的有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):929-933.
- [6] 杨庆生,杨卫.断裂过程的有限元模拟[J].计算力学学报,1997,14(4):407-412.
- [7] 吴清高,张明,姚振汉.混凝土重力坝边界元可靠度计算[J].重庆建筑大学学报,2000,22(6):70-73.
- [8] 潘家铮.建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M].北京:水利出版社,1980:41-43.
- [9] 张明,刘金勇,麦家煊.土石坝边坡稳定可靠度分析与设计[J].水力发电学报,2005,22(2):103-107.

(下转第52页)

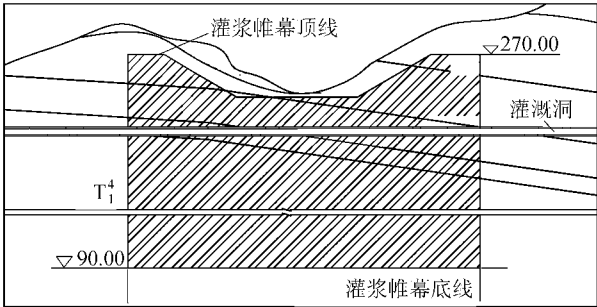


图3 灌溉洞内灌浆情况

5.3 加强幕后排水

在4号和28号排水洞内补打、加密、加深排水孔,并在孔内安装组合过滤体。

6 防渗效果分析

各排水洞灌浆前后同水位下渗水量对比见表2。

表2 各排水洞灌浆前后同水位下渗水量对比

部 位	库水位/ m	灌浆前渗水情况		灌浆后渗水情况		灌浆前后 渗水量/ 变幅/%
		日期	渗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	日期	渗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
4号 排水洞	241	2003-09-03	176	2004-10-21	201	4.20
	245	2003-09-06	496	2004-11-24	178	-64.11
	250	2003-09-20	772	2004-12-27	187	-75.78
	260	2003-10-06	1120	2005-04-14	209	-81.34
28号 排水洞	241	2003-09-03	194	2004-10-21	186	-4.12
	245	2003-09-06	377	2004-11-24	209	-44.56
	250	2003-09-20	544	2004-12-27	239	-56.07
	260	2003-10-06	786	2005-04-14	316	-59.79
30号 排水洞	240	2003-09-02	4607	2004-10-12	5474	18.82
	245	2003-09-05	6131	2004-11-23	5986	-2.37
	250	2003-09-12	8419	2004-12-27	6624	-21.32
	260	2003-10-06	10295	2005-04-14	6378	-38.05
厂房顶拱	241	2003-09-03	44	2004-10-15	21	-52.27
	247	2003-09-07	58	2004-12-03	31	-46.55
	250	2003-09-20	128	2004-12-27	34	-73.44
	260	2003-10-06	181	2005-04-14	30	-83.42

由表2可以看出:当库水位超过240m后,同水位条件下各排水洞渗水量较2003年明显减少;当库水位达到260m时,厂房顶拱渗水量最大减幅达83.42%。左岸山体总渗水量(4号、28号、30号排水洞排水量之和)减幅44%,渗水量减幅相当可观,而且渗水量变幅有逐渐趋于稳定的态势。

7 结 语

左岸山体防渗处理由于渗漏通道探测准确,采取了合适的处理措施,随着补强灌浆施工结束,帷幕阻水效果越来越明显,防渗补强处理效果显著。由此可以看出,对左岸山体水文地质条件的详细分析,尤其是瞬变电磁法和同位素法探测技术对集中渗漏通道的准确探测,是此次防渗处理工作取得满意效果的重要保证。

参考文献:

[1] CASAGRANDE A. Control of seepage through foundation and abutment of dam[J]. Geotechnique, 1961, 11(3): 20-21.

[2] 林秀山, 高广淳, 李明俊, 等. 黄河小浪底水利枢纽左岸山体渗漏通道分析[R]. 郑州: 黄河勘测规划设计有限公司, 2003.

[3] 董海洲, 陈建生. 小浪底水库左坝肩渗漏天然示踪方法研究[J]. 人民黄河, 2004, 26(04): 32-35.

(收稿日期: 2006-03-22 编辑: 高建群)

+++++

(上接第13页)

[10] 任青文, 傅树红. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报, 2000, 31(2): 1-7.

[11] 周伟, 常晓林. 溪洛渡高拱坝渐进破坏过程仿真分析和稳定安全度研究[J]. 四川大学学报, 2002, 34(4): 46-50.

[12] 姜小兰, 赖跃强. 构皮滩双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 27-30.

[13] 陆述远. 岩基重力坝抗滑稳定分析[C]//李瓚. 水工结构专题. 北京: 水利电力出版社, 1995: 16-78.

[14] 陈进, 黄薇. 混凝土重力坝抗滑稳定安全系数与安全度探讨[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(3): 1-7.

[15] NOWAK A, COLLINS S. Reliability of structures[M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2002: 245-275.

[16] 刘玉斌, 王光远. 工程结构广义可靠度理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 2-30.

[17] 孙新利, 陆长捷. 工程可靠性教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 61-75.

[18] LAFITE R. 大坝风险分类[J]. 周竹林, 译. 水利水电快报, 1997, 18(11): 28-33.

[19] 戴维斯 C. 大坝风险分析[J]. 马小俊, 译. 水利水电快报, 2003, 24(8): 23-24.

[20] 王正旭. 挪威的大坝安全管理[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6): 67-73.

[21] 匡少涛, 李雷. 澳大利亚大坝风险评价的法规与实践[J]. 水利发展研究, 2002, 2(10): 55-59.

[22] 曲静原, 刘原中. 风险研究中的若干问题[J]. 辐射防护, 1998, 18(1): 61-68.

[23] 约翰, 麦克拉. 泰国的大坝风险管理方法[J]. 王建萍, 译. 水利水电快报, 2001, 22(17): 18-23.

[24] 朱伯芳. 论混凝土坝的几个重要问题[J]. 中国工程科学, 2006, 8(7): 21-29.

[25] 朱伯芳. 论特高混凝土拱坝的抗压安全系数[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 25-28.

[26] 张林, 费文平, 李桂林. 高拱坝坝肩坝基整体稳定地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3465-3469.

[27] 麻荣永. 土石坝风险分析方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 38-39.

(收稿日期: 2006-10-31 编辑: 熊水斌)