

坝基老化的反向水文地球化学模拟

阿里木·吐尔逊¹, 徐卫亚¹, 萨肯·赛麦提²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 英吉沙县水利局, 新疆 英吉沙 844500)

摘要 根据不同化学组分在坝基岩-水系统中的相互转化规律, 建立了坝基老化的反向水文地球化学模型, 利用 Barrodale-Roberts 算法对模型进行求解, 计算给定随机误差极限范围内不同坝基渗漏量条件下的坝基岩土体与地下水溶液间的物质交换量及其变化范围。将该模型应用到新安江大坝右坝段坝基老化分析中, 结果表明所建立的模型可靠实用, 求解速度较快。

关键词 坝基老化; 反向水文地球化学模型; Barrodale-Roberts 算法; 新安江大坝

中图分类号: TV698.2+3; TU470+.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-7647(2006)05-0014-04

Inverse hydrogeochemical simulation of dam foundation ageing// Alim TURSUN¹, XU Wei-ya¹, Sakin SAMAT²
(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Conservancy Bureau of Yingsha, Yingsha 844500, China)

Abstract: Based on the regularity of interconversion of different chemical components in the dam foundation water-rock interaction system, an inverse hydrogeochemical model for simulating dam foundation ageing was established, and the Barrodale-Roberts algorithm was adopted to solve the model. The amount of mass transfer and its range between the rock mass and groundwater of dam foundation within the specified stochastic error limit are obtained under different leakage conditions. The application of the model to dam foundation ageing analysis of the right section of the Xin'anjiang Dam shows that the model is reliable, practical, and fast in calculation.

Key words: dam foundation ageing; inverse hydrogeochemical model; Barrodale-Roberts algorithm; Xin'anjiang Dam

坝基老化是指大坝正常运行条件下, 坝基天然岩土体及注入或放入其内的混凝土防渗帷幕、防渗墙等人工材料的物理化学特性及其功能随着大坝运行年龄增加而产生的对坝基稳定性和安全性有影响的变化。坝基出现的后期不稳定变形、渗漏量和扬压力的趋势性增加、帷幕防渗效果的失效、排水系统的堵塞等一系列病态问题实质上就是坝基老化的工程表现。

据统计, 世界上大约有 40% 的大坝失事是由坝基引起的, 大量工程实践表明, 引起坝基病态问题和事故的主要原因可以归纳为设计、勘测和施工等方面的各种不足因素, 超标准的洪水、地震和管理不当等意外因素以及坝基老化这 3 个方面, 其中老化是坝基逐渐破坏尤其是晚期破坏最重要的原因之一。根据国际大坝委员会高坝注册统计资料^[1-2], 目前全世界运行超过 50 年的老坝占大坝总数的 30%, 运行 30 年左右的占 50%。我国现有大坝中 21% 以上的坝龄超过 30 年, 平均坝龄为 22.87 年。由于坝基材料

本身组成与结构以及所处环境的复杂性, 坝基老化缺少过程及其机理方面的系统研究, 尤其是定量研究相当薄弱, 还不足以满足坝基长期稳定性评价的需要。因此坝基老化及其定量模拟对于充分了解坝基老化过程的实质和机理、分析长期运行条件下坝基所表现出的老化迹象及其原因、正确评价老化过程的发展趋势和强度以及对坝基稳定性和安全性可能产生的后果具有十分重要的意义。进行坝基老化及定量模拟研究可以为制定限制老化发展的各种综合性预防措施和提出相应的检修方法提供科学依据, 确保大坝正常运行和发挥最大效益。

广义地来讲, 坝基的老化是坝基岩土体(包括防渗帷幕)对大坝修建后坝基应力环境、水环境和化学环境变化的一种回应, 而坝基岩-水系统中所发生的水文地球化学作用, 考虑到时间因素, 则是导致坝基老化的主要原因。本文就是从这一点出发, 根据不同化学组分在坝基岩-水系统中的相互转化规律, 建立了坝基老化的反向水文地球化学模型, 并将该模

型应用到新安江大坝右坝段坝基老化分析中,得到了满意的结果。

1 坝基老化的反向水文地球化学模型

大坝上游渗入坝基的水溶液与坝基岩土体发生一系列地球化学作用,通过改变岩土体成分、结构和形状使坝基逐渐发生老化,同时改变自身的化学成分并随地下水流从大坝下游渗出。在坝基中不断运动的地下水不仅是坝基老化的推动力,也是坝基老化的信息载体,隐含着坝基老化的许多有价值的信息,显然也是推断坝基老化状况的重要依据。反向水文地球化学模拟就是依据大坝上游以及坝基幕后监测得到的水化学资料,通过从结果到原因的反向思维,来确定坝基岩-水系统中所发生的各类地球化学反应的反应量,从而达到模拟坝基老化过程的目的,其处理问题的基本思路为

坝基性状 1 - 坝基性状 2 = 坝基老化 ← 幕后渗出液 - 上游渗入液

坝基老化的反向水文地球化学模型就是根据上述原理,利用质量守恒方程、电中性方程和其他一些相应的条件所建立,即

$$\left\{ \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^{N_i} \frac{S |\delta_{mi}|}{u_{mi}} \quad (\text{用于计算岩-水间物质交换量均值}) \\ & (\delta_{m1} - \delta_{m2}) + \sum_{p=1}^{N_p} \nu_{mp} \frac{X_p}{Q} = T_{m2} - T_{m1} \\ & \sum_{m=1}^{N_i} z_m (T_{mi} + \delta_{mi}) = 0 \quad (i = 1, 2) \\ & |\delta_{m1}| \leq u_{m1}; |\delta_{m2}| \leq u_{m2}; X_p \geq 0 \text{ 或 } X_p < 0 \\ & \min \sum_{p=1}^{N_p} |W + X_p| \quad (\text{用于计算岩-水间物质交换量最大值}) \\ & (\delta_{m1} - \delta_{m2}) + \sum_{p=1}^{N_p} \nu_{mp} \frac{X_p}{Q} = T_{m2} - T_{m1} \\ & \sum_{m=1}^{N_i} z_m (T_{mi} + \delta_{mi}) = 0 \quad (i = 1, 2) \\ & |\delta_{m1}| \leq u_{m1}; |\delta_{m2}| \leq u_{m2}; X_p \geq 0 \text{ 或 } X_p < 0 \\ & \min \sum_{p=1}^{N_p} |W - X_p| \quad (\text{用于计算岩-水间物质交换量最小值}) \\ & (\delta_{m1} - \delta_{m2}) + \sum_{p=1}^{N_p} \nu_{mp} \frac{X_p}{Q} = T_{m2} - T_{m1} \\ & \sum_{m=1}^{N_i} z_m (T_{mi} + \delta_{mi}) = 0 \quad (i = 1, 2) \\ & |\delta_{m1}| \leq u_{m1}; |\delta_{m2}| \leq u_{m2}; X_p \geq 0 \text{ 或 } X_p < 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: T_{m1} , T_{m2} 分别为大坝上、下游渗入和渗出液中组分 m 的总物质的量浓度, mol/L; δ_{m1} , δ_{m2} 分别为大坝上、下游渗入和渗出液中组分 m 的随机误差修正项(可正可负); X_p 为单位时间内坝基固体矿物相 p

与水溶液之间发生的物质交换量, mol/d (为了方便, 岩-水间发生的所有反应均写为溶解反应的形式, $X_p \geq 0$ 表示溶解, $X_p < 0$ 表示沉淀); u_{m1} , u_{m2} 分别为大坝上、下游渗入和渗出液中组分 m 的随机误差极限; ν_{mp} 为反应的化学计量数; Q 为坝基渗漏量, L/d; z_m 为水溶液中组分 m 的电荷数; N_p 为参加反应的矿物物种总数; N_c 为水溶液中化学组分总数; S 为缩放因子, 是为了防止求解过程中所构成的矩阵元素数值过大, $S = 0.001 \sim 0.01$; W 为一个足够大的正数, 主要是为了模型数学形式上的统一所需, $W = 1000$ 。

式(1)实际上是由不同目标函数、相同约束条件的 3 个优化模型共同组成的, 其分别用于计算坝基岩土体与地下水溶液之间的物质转移量平均值、最大值和最小值。当大坝上下游渗入和渗出坝基的水化学监测以及坝基渗漏量资料充足时, 利用式(1)便可获得给定随机误差极限范围内不同坝基渗漏量条件下的坝基岩土体与地下水溶液之间的物质转移量及其变化范围, 从而可以达到再现坝基老化过程的目的。

2 模型的求解方法

一般来说, 对于以下问题

$$\begin{cases} AX = B \\ CX = D \\ EX \leq F \end{cases} \quad (2)$$

第一个矩阵方程组对第二个等式方程组约束和第三个不等式方程组约束以 $\sum_i |b_i - \sum_j a_{ij}x_j|$ 为最小意义下进行优化, 称该问题的 L1 优化, 目前在数值计算领域内对其有多种不同算法, 其中 Barrodale 和 Roberts 在 1980 年提出的 L1 优化问题的 Barrodale-Roberts 算法是最为成熟、最为常用的算法之一^[3]。本文直接套用 L1 优化问题的 Barrodale-Roberts 算法来实现坝基老化反向水文地球化学模型的数值求解, 其求解过程见图 1。

3 模型应用实例

3.1 基本概况

新安江大坝为宽缝混凝土重力坝, 坝顶高程 115 m, 坝高 105 m, 正常高水位 108 m。大坝坐落于紫金滩倒转背斜反常翼上, 岩层陡立, 右岸坝基(0 ~ 7 坝段)为西湖组石英砂岩, 岩性为石英砂岩夹页岩, 总厚度达 240 m。页岩夹层占坝基面积约 2% ~ 6%, 不规则不连续透镜体状分布, 性质松软, 页理发育, 主要由灰黑色、黑色炭质页岩和紫红色、杂色页岩组

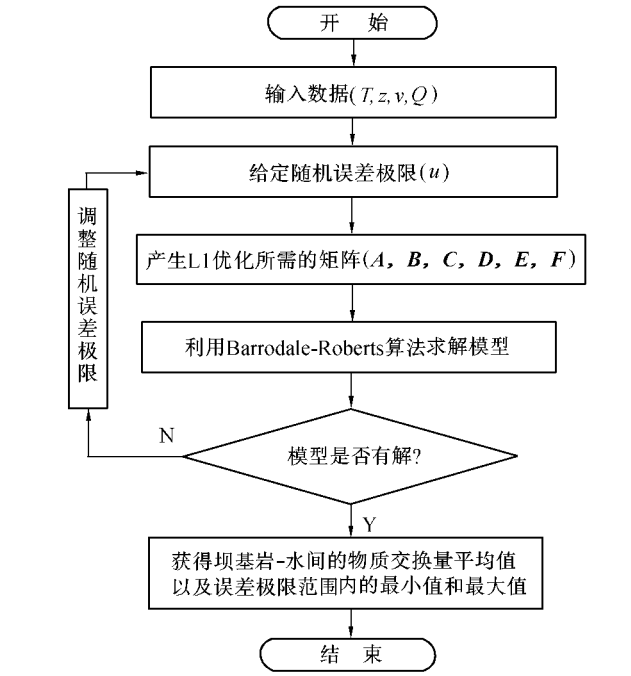


图1 反向水文地球化学模型求解流程

成^[4]。炭质页岩中有机质含量达5%~7%，而紫色页岩含铁较多，含量6.5%~6.9%。通过X射线衍射及差热分析鉴定，页岩矿物成分主要为石英、云母，其次为高岭石、叶蜡石和蒙脱石等。

据现有资料，大坝发育于右坝段坝基的断裂构造相对强烈些，有沿岩层面发育的层状裂隙、横张裂隙、剪切裂隙等，这为库水通过裂隙渗入坝基并运移提供了有利条件，使得右坝段坝基老化速率相对于其他坝段较大。

3.2 2号坝段坝基老化的反向模拟计算

新安江大坝分为26个坝段，坝基防渗帷幕后设4排排水孔，共417孔。水质在坝前库水不同高处及20个坝段的灌浆廊道中各选1排排水孔作定期检测，排水廊道作不定期检测。本文以2号坝段坝前靠近大坝的深层库水作为渗入液，以灌浆廊道排水孔水质作为渗出液（水化学资料见表1^[5]），根据右坝段坝基与地下水溶液之间可能发生的一系列地球化学反应及其状态（见表2），利用坝基老化的反向水文地球化学模型对右岸2号坝段坝基进行单位

表1 坝基渗入液和渗出液水化学资料

代表部位	pH值	离子浓度/(mmol·L ⁻¹)					
		Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
坝前库底	6.70	0.148	0.207	0.073 2	0.072 5	0.695	0.057 4
灌2-3	6.87	0.209	0.336	0.155 0	0.072 0	0.976	0.070 9

注：①灌2-3表示2号坝段灌浆廊道3号水质点；②所有水化学数据均取1990~2001年的多年平均值。

表2 坝基岩-水间可能发生的地球化学反应及其状态

反应物	化学反应式	状态
云母	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 10\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{K}^+ + 3\text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$	溶解
高岭石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ \rightleftharpoons 2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	沉淀
二氧化硅	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_4\text{SiO}_4$	沉淀
有机质	$\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	溶解
氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	溶解
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	沉淀

注：云母来自坝基页岩，有机质来自炭质页岩，氢氧化钙来自坝基帷幕，高岭石和二氧化硅来自云母的不全等溶解，白云石是由坝基中水溶组分达到饱和并沉淀的结果。

坝基渗漏量条件下不同随机误差极限范围内的坝基老化计算，结果见表3。

3.3 结果分析

从模拟计算结果可以看出，坝基岩体与水溶液之间的物质交换量均值均随上游渗入液和下游渗出液随机误差的增大而趋于稳定，但物质交换量变化范围随着随机误差的增大而相应增大。坝基页岩中的云母发生不全等溶解产生次生高岭石引起页岩的泥化，这对坝基岩体强度有较大的负面影响，坝基炭质页岩中的有机质发生氧化产生侵蚀性水溶二氧化碳引起水溶液pH值的降低，这对防渗帷幕极为不利，坝基中存在白云石的沉淀，这可能会引起坝基排水孔的堵塞而降低排水效果，帷幕主要组成成分氢氧化钙的溶蚀会引起帷幕防渗功能的逐渐衰退，应引起重视，坝基渗入液和下游渗出液化学组分浓度在整个模拟期间（1990~2001年）没有明显的趋势性变化，因此坝基岩-水间物质交换基本维持相同的速度，但交换量在总体上比较小，对当前坝体安全不会产生显著影响。

4 结 论

a. 在模型建立过程中充分考虑水质实测资料

表3 坝基岩-水间物质交换量计算

随机误差/%	云母		高岭石		二氧化硅		有机质		氢氧化钙		白云石	
	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围
10	4.18	2.5~5.7	-2.09	-2.8~-1.2	-8.36	-11.3~-5.1	57.56	33.2~73.7	16.12	7.6~22.7	-5.91	-11.1~-1.4
15	6.10	1.6~11.5	-3.05	-5.7~-0.8	-12.20	-22.9~-3.2	67.99	23.2~119.4	18.65	4.8~43.0	-10.12	-29.6~0.0
20	6.10	1.2~13.2	-3.05	-6.6~-0.6	-12.20	-26.5~-2.4	63.92	11.8~141.2	16.97	2.0~53.2	-10.12	-36.1~0.0
30	6.10	0.4~16.8	-3.05	-8.4~-0.2	-12.20	-33.6~-0.9	55.78	0.0~184.6	13.61	0.0~73.6	-10.12	-49.1~0.0
40	6.10	0.0~20.4	-3.05	-10.2~0.0	-12.20	-40.8~0.0	54.16	0.0~228.1	12.94	0.0~94.1	-10.12	-62.1~0.0
50	6.10	0.0~24.0	-3.05	-12.0~0.0	-12.20	-47.9~0.0	54.16	0.0~271.6	12.94	0.0~114.5	-10.12	-75.1~0.0

注：计算结果均为单位坝基渗漏量条件下所得；岩-水间物质交换量大于零表示矿物相溶解并进入水溶液，小于零表示矿物相沉淀并析出水溶液。

的动态不确定性,将大坝上下游渗入和渗出坝基的水溶液组分浓度的随机不确定性利用修正项直接代入模型之中,打破了以往常用的通过确定性模拟和随机模拟联合使用来分析输入不确定性对输出不确定性影响的做法,实现了同一模型范围内分析上下游渗入、渗出液随机不确定性对坝基岩-水间物质交换量随机变化的影响,这同以往的方法相比,无疑前进了一步。

b. 在模型求解方法上,统一使用较为完善的Barrodale-Roberts 算法,使得模型数值求解速度更快,计算结果更加稳定和可靠。

c. 用所建立的模型来定量分析新安江大坝右岸2号坝段坝基岩体(包括帷幕)与水溶液之间的水文地球化学作用,为正确评价新安江大坝右坝段坝基长期稳定性和耐久性提供了有益的依据,同时也验证了该模型的可靠性和实用性。

d. 坝基老化的反向水文地球化学模型是建立

在大坝上下游监测获得的实际水化学资料基础之上的,因此模拟结果比较可靠。正因为如此,它只适用于水文地球化学监测资料较充足的已建工程坝基老化模拟分析,而对于拟建工程的坝基老化分析则无能为力。

参考文献：

- [1] International Commission on Large Dams. World register of dams[R]. Paris ICOLD,1998.
- [2] International Commission on Large Dams. World register of dams short version China only[R]. Paris ICOLD,2000.
- [3] BARRODALE I, ROBERTS F D K. LI solution to linear equations subject to linear equality and inequality constraints [J]. Transactions on Mathematical Software,1980(6) 231-235.
- [4] 马晓辉,彭汉兴,杨光中.坝址环境与三峡坝基帷幕耐腐蚀性探讨[J].中国三峡建设,2001(3) 22-23.
- [5] 童海涛.新安江坝址区水-岩作用水文地球化学随机模拟[D].南京:河海大学,2003.

(收稿日期 2005-11-04 编辑 骆超)

(上接第9页)

水温高于考虑支流影响的入库水温。由于入库水温的升高,水库库底水温也随之升高。

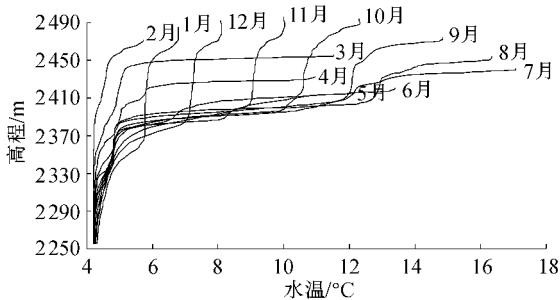


图4 考虑支流影响的坝前水温分布

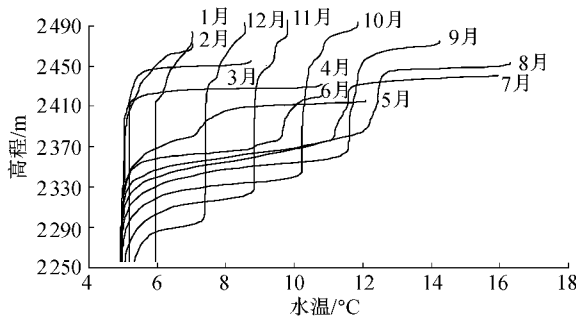


图5 未考虑支流影响的坝前水温分布

造成两种情况下水库水温分布、水库下泄水温和坝前水温分布有区别的原因是由于支流的汇入使主库水温分布发生变化。因此,在实际工程中对于有支流存在的水库不能轻易忽略支流对主库的影响。对于农业灌溉和水库下游水生生物的生存环境,如果对水库中的水温分布计算不准确会导致水

库水温分布和下泄水温不准确,因此在利用水库中的水进行农田灌溉时可能会影响农产品的产量,破坏下游水生生物的生存环境。因此,在存在支流的水库水温计算过程中,采用支流与主库耦合的立面二维水温预测模型来预测水库的水温分布比较合理。

4 结 论

本文建立的支流与主库耦合的立面二维水温模型能够较好地反映存在支流影响的水库水温分布。采用简化的耦合模型具有计算稳定、收敛性好等特点。此预测模型的研究结果对制定水库生态用水调度方案和流域开发的环境影响评价提供了科学依据。

参考文献：

- [1] ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations. Turbulent modeling of surface water flow and transport part 1 [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988, 114(9) 971-991.
- [2] VAN R, LEO C. Field verification of 2-D suspended sediment models [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1990,116(10) : 1270-1288.
- [3] 雒文生,周志军.水库垂直二维湍流与水温水质耦合模型[J].水电能源科学,1997,15(3) 1-7.
- [4] 芮孝芳,冯平.多支流河道洪水演算方法的探讨[J].水利学报,1990,2(2) 26-32.

(收稿日期 2005-11-02 编辑 骆超)