

反映坝基帷幕体防渗时效的多场耦合数值模拟

彭 鹏^{1,2}, 单冶钢¹, 宋汉周³, 董育烦¹

(1. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310000; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 河海大学地球科学与工程系, 江苏 南京 210098)

摘 要: 坝基的渗流动态, 很大程度上受控于坝基帷幕体的完好程度和止水效果, 但是由于地下水长期存在的物理-化学作用, 造成帷幕体防渗性能的衰减。为了能够再现坝基帷幕体防渗性能衰减的过程, 依据渗流水力学以及水文地球化学的基本理论, 建立了反映帷幕体防渗时效的多场耦合作用模型。该模型由渗流模块、溶质迁移模块、地球化学模块及帷幕体侵蚀模块构成, 并采用 FEM 数值法求解。工程实例计算结果表明帷幕体的防渗效果随着时间的推移而弱化, 此主要源自帷幕体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 一类可溶性物质的溶失。在整个模拟时段, 帷幕体中的钙质始终处于溶解状态, 其不同部位发生溶蚀的强度也不相同, 帷幕体底部的溶蚀量要高于其上部的溶蚀量; 靠近坝基上游侧的帷幕的溶蚀量要高于下游侧的溶蚀量。钙离子迁移主要由于水动力条件和弥散作用共同引起的, 且坝基各点的钙离子浓度随时间呈非线性变化。

关键词: 坝基帷幕体; 溶质迁移; 钙离子侵析; 多场耦合

中图分类号: TV223.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1847-07

作者简介: 彭 鹏(1982-), 男, 河南周口人, 博士后, 主要从事水工建筑物地质体安全及地质灾害研究。E-mail: hhu_pengpeng@126.com。

Coupling model for assessing anti-seepage behaviors of curtain of dam foundation

PENG Peng^{1,2}, SHAN Zhi-gang¹, SONG Han-zhou³, DONG Yu-fan¹

(1. Hydro China Hua-dong Engineering Corporation, Hangzhou, 310000, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Department of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The seepage flow in dam foundation is mainly controlled by the intact degree and the sealing effect of its curtain. Its property is weakened by long-term physical and chemical actions of groundwater. In order to describe the process of the damage to the curtain, a multi-field coupling model for water-rock-seepage curtain of the dam foundation is made up of seepage model, solute transport model, geochemistry model and curtain erosion model, and all the models are calculated by FEM. The results show that the curtain efficiency decrease with the time. Calcium has been always in dissolution during the time stress period for simulation. The erosion extent at the bottom of the curtain is much quicker than that at its top part. And it's the same for the upstream and downstream. Calcium dissolution is mainly induced by hydraulic condition and dispersion, and it varies in a non-linear way.

Key words: curtain of dam foundation; solute transport; calcium ion leaching; multi-field coupling model

0 引 言

水库蓄水后, 在高水头作用下, 坝基渗流长期存在, 修建帷幕体正是为了减小坝基渗流量。可见, 坝基的渗流动态, 很大程度上受控于坝基帷幕体的完好程度和止水效果, 但是由于地下水长期存在的渗水压力和水化学作用, 使帷幕遭受不断地侵蚀和损伤, 水泥水化物溶出和分解并不断被渗水带走(主要为钙离子), 导致帷幕体微观结构改变和孔隙率增加, 渗透

性增大, 化学侵蚀逐步加重, 帷幕体因而逐渐损失胶凝性和强度耐久性, 从而造成帷幕体防渗性能的衰减。因此, 帷幕体防渗效果的减弱是渗流场、化学场等多场耦合作用下的结果^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50139030); 人事部留学回国人员科技活动择优项目(501072); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901064)

收稿日期: 2010-09-27

近年来,对坝基帷幕体防渗性能的研究越来越引起关注。WU等^[2]、GU等^[3]通过研究坝基地下水的宏观动态,分析大坝及基础帷幕体的工作性态;FU等^[4]以非稳定流为研究对象,采用有限元分析方法,刻画不同条件下渗流场的变化,以反映帷幕体的防渗性能及其潜在的变化;杨光中等^[5]、宋汉周等^[6]、童海涛等^[7]指出通过分析坝基幕体后地下水的微观动态,可揭示水-岩(包括帷幕体)系列间的相互作用,从一个侧面反映坝基帷幕体的防渗效果及其时效。在坝址多场耦合模型研究方面,国内不少专家已成功将这些场进行耦合。沈振中等^[8]建立了渗流-应力的无单元耦合分析计算模型,认为耦合计算后的结果较符合实际规律;陈晓平等^[9]通过建立裂隙岩体的渗流-应力耦合模型,分析了非均质土坝的渗流-应力场相互作用及对土坝稳定性的影响;丁秀丽等^[10]通过对三峡大坝某坝段坝基渗流场与应力场的耦合分析,并采用FLAC建模、求解,探讨了基岩孔隙压力对大坝和基础应力的影响;盛金昌等^[11]建立了统一的渗流-弹性应力全耦合控制方程,研究了坝基地下水的宏观动态;柴军瑞等^[12]建立了基于多重裂隙网络的渗流-应力耦合模型,探讨了坝址水文地质参数的确定方法以及坝踵处的应力分布。但是用于坝基帷幕体的防渗效果评价还很少见,尤其是考虑化学反应的多场耦合研究。

本文基于多物理场耦合原理,建立了反映帷幕体防渗效果及其时效的多场耦合模型,将渗流场、化学反应和溶质迁移模型进行单向耦合,并采用有限元方法求解。通过对FEMLAB软件的二次开发,实现人机交互、结果的可视化,以研究帷幕体遭受侵蚀的情况及其耐久性。工程实例计算表明,该耦合模型有较好的精度。

2 多场耦合模型

2.1 基本假设

区内地质体为等效连续介质,水流为饱和流,其运动服从Darcy定律;渗透系数等参数只是空间位置的函数,不随时间而变化;基含水层中物质含量沿流向的变化是在无其它物质补充的地层内进行的;

地下水离子绝对含量具有随径流路径和埋深增加而溶解或沉淀的性能,是按确定的化学反应规律而变化,这种变化可根据化学热力学和化学动力学方程来定量确定。

2.2 多场作用耦合模型

根据上述假定,认为运行工况下坝址区水-岩-

帷幕体间相互作用的多场作用耦合模型由多个子模块构成。包括渗流模块,见式(1);化学反应模块^[13],见式(2);溶质迁移模块,见式(3);帷幕体侵蚀模块^[14],见式(4)。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, t) = f_0(x, y) \\ H|_{\Gamma_1} = f_1(x, y, t); (x, y) \in \Gamma_1 \\ K \frac{\partial H}{\partial n_T} |_{\Gamma_2} = f_2(x, y, t); (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = -(X_{Eq} + \mathfrak{R}_{Kin}) \\ \mathfrak{R}_{Kin} = -k_{Kin} S_{Kin} \left[1 - \frac{\prod_{j=1}^{N_c} (a_j)^{v_{Kin-j}}}{K_{Kin}} \right] \prod_{j=1}^{N_c} (a_j)^{\delta_{Kin-j}} \\ \lg a_i = \lg K_i + \sum_{j=1}^{N_c} v_{ij} \lg a_j \\ a_i = \gamma_i \cdot C_i \\ \lg r_i = \begin{cases} -Az_i^2 \sqrt{I} & (I < 0.005 \text{ mol/L}) \\ -\frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} & (I < 0.1 \text{ mol/L}) \\ -0.5z_i^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + 1.4\sqrt{I}} & (I < 0.2 \text{ mol/L}) \\ -Az_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right) & (I < 0.5 \text{ mol/L}) \\ -\frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} + b_i I & (I < 1 \text{ mol/L}) \end{cases} \quad (2) \\ I = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 C_i \\ T_j = \sum_i v_{ij} C_i - \sum_{Eq=1}^{N_c} v_{Eqj} X_{Eq} dt \\ \sum_{i=1}^{N_c} Z_i C_i = 0 \end{cases}$$

在渗流模块式(1)中: μ_s 为储水率; H 为水头; K 为渗透系数张量; t 为时间; f_0, f_1, f_2 均为已知初始函数和边界的函数; Γ_1, Γ_2 分别为已知水头和已知流量边界; n_T 为 Γ_2 边界外法线方向。

在化学反应模块式(2)中: C 为地下水含有目标离子的总浓度; C_i 为可溶矿物溶解目标离子的浓度; X_{Eq} 是由化学热力学引起的目标浓度随时间的变化量; N_c 为水溶液中组分总数; a_i 为第*i*个离子或络

合物的活度; K_i 为第 i 个离子或络合物组分的化学计量数; ν_{ij} 为第 i 个反应中第 j 个组分的计量数; a_j 为地下水溶液中第 j 个组分的活度; T_j 为第 j 个组分的总摩尔浓度; R_{kin} 为由动力学引起的目标浓度随时间的变化量; k_p 为第 p 个反应的速率常数; S_p 为第 p 个矿物物种反应表面积; K_p 为第 p 个反应的平衡常数; 下标 Eq 和 Kin 分别对应于热力学反应和动力学反应。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_T \frac{\partial C}{\partial y} \right] - \\ \quad \frac{\partial(u_x C)}{\partial x} - \frac{\partial(u_y C)}{\partial y} + W \\ C(x, y, 0) = f_0(x, y, t) \\ C|_{B_1} = f_1(x, y, t); (x, y) \in B_1 \\ D_L \frac{\partial C}{\partial x} n_1 + D_T \frac{\partial C}{\partial y} n_2 - \frac{\partial(u_x C)}{\partial x} - \\ \quad \frac{\partial(u_y C)}{\partial y} |_{B_2} = f_2(x, y, t); (x, y) \in B_2 \end{array} \right. \quad (3)$$

在溶质迁移模块式 (3) 中: u_x 为地下水沿水平方向的实际流速; u_y 为地下水沿垂直方向的实际流速; D_L 为垂直方向水动力弥散系数; D_T 为水平方向水动力弥散系数; W 为源汇项, 是由于化学反应引起的目标组分浓度变化; B_1, B_2 分别为已知边界条件; (n_1, n_2) 为 B_2 边界外法线方向。

$$\frac{\partial \theta \cdot C}{\partial t} + \frac{\partial C_{\text{solid}}}{\partial t} = \text{div} [D(C) \cdot \text{grad}(C)] \quad (4)$$

在帷幕体侵蚀模块式 (4) 中: θ 为帷幕体的孔隙率; C_{solid} 为帷幕体固体目标离子的含量; $D(C)$ 为目标离子扩散系数。

式 (1) ~ (4) 便构成了反映帷幕体防渗效果及其时效的多场耦合模型。

2.3 模型的求解

多场间的耦合有强弱之分, 强耦合又称为直接耦合, 常常适用于多场之间存在高度非线性相互作用的情况, 使用包含多个自由度的耦合单元进行直接计算, 同时求解多场的多个位置变量; 弱耦合又称顺序耦合或者间接耦合, 它是多场按照一定的顺序排列后, 再逐个进行计算分析, 即将前一个场计算分析的结果作为已知条件或者边界条件, 带入到第二个场分析中进行耦合, 依次类推, 这样可以简化计算步骤, 减小计算量。在水-岩-帷幕体相互作用的多场耦合中, 就是依靠多场的弱耦合进行分步计算, 其主要步骤如下:

(1) 首先在给定水头的情况下, 模拟得到 Δt 时刻渗流场各点水头值 (渗流量) 的分布。

(2) 根据渗流场各点水头值 (渗流量) 的分布计

算化学反应的溶解 (或沉淀) 量, 可以得到 Δt 时刻分别由化学热力学和化学动力学贡献目标离子的反应量。

(3) 将化学反应计算得到的目标离子反应量与水中原有的目标离子含量相叠加, 并代入溶质迁移模型, 利用有限元的求解方法得到 Δt 时刻目标离子含量在坝基渗流场中的分布。

(4) 根据目标离子的迁移量, 计算 Δt 时刻帷幕体中目标离子的含量, 利用帷幕体侵蚀模型, 模拟帷幕体本身的状态。

(5) 根据模拟时间要求, 反复进行步骤 (2) ~ (4) 直到满足一定的精度。

FEMLAB 是一个在人机交互式环境下求解偏微分方程组的有限元分析工具, 不需要编制复杂的偏微分方程组的求解器^[15], 而且其二次开发功能也很完善。对于耦合模型中的化学反应模块, 笔者对其进行了二次开发, 即输入所用化学反应式和热力学参数, 形成新的子模块, 并直接在耦合计算中进行调用, 一旦给出初始条件和计算时间, 便可实现计算结果的输出。

3 实例应用

3.1 工程概况

某水电站正常蓄水位 135 m, 下游水位 15 m, 坝底宽度约为 60 m, 共分 13 个坝段。基础岩性以灰岩和白云岩为主。为增加坝基岩体的完整性和均一性, 对坝基上游侧作全断面帷幕灌浆, 形成深约 100 m, 厚约 5 m 的帷幕体起着防渗作用。大坝蓄水后, 上下游约 120 m 的水头差, 对坝基地下水的宏观动态和微观动态具有重要的影响, 从而导致坝基不同部位岩体 (包括帷幕体) 与地下水溶液化学组分之间的重新分配, 使帷幕体的防渗性能发生衰减。

3.2 模型求解

研究区的模拟计算主要分为 4 个步骤, 即模型离散化, 随后分别依次进行渗流模块、化学反应模块和迁移模块及帷幕体侵蚀模块计算, 计算所需部分资料见表 1~3。

表 1 库水水质分析结果

水样	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH
库水	7.73	16.19	1.89	8.24
水样	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻
库水	48.46	14.23	0.00	4.20

注: 以上单位除 pH 值外, 其余均为 mg/L。

表 2 计算区水文地质参数

Table 2 Hydrogeological parameters of modeling area

$K/10^{-5}$	$D_T/(10^{-7} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/\%$	μ_s	$D_T/(10^{-7} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	A	$C_{\text{solid}} (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	$D_{(C)}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	B
3.557	4.56	8	0.2	0.439	0.51	1.553	0.196	0.33

表 3 计算区水-岩-帷幕体间地球化学反应及其热力学参数

Table 3 Geochemical reactions among water, rock and curtain and their thermodynamic parameters

反应物	化学反应式	lg K
方解石	$\text{CaCO}_3 = \text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+}$	-8.48
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = 2\text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	-17.09
氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	22.80
CaOH ⁺	$\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} = \text{CaOH}^+ + \text{H}^+$	12.78
CaHCO ₃ ⁺	$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ = \text{CaHCO}_3^+$	11.43
CaCO ₃	$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3$	3.33
HCO ₃ ⁻	$\text{Ca}_3^{2-} + \text{H}^+ = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	10.33
CO ₂	$\text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	16.68
H ₂ O	$\text{H}_2\text{O} = \text{OH}^- + \text{H}^+$	-14.00

首先对研究区进行离散化，即根据典型坝段的几何尺寸，将计算区进行剖分。选取坝基帷幕体及其距其上游 200 m 和下游 400 m 的区域作为研究对象，整个计算区域为一个 600 m × 300 m 的矩形区域。采用有限剖分法，进行剖化，对于边界条件较为复杂的区域，剖分成较小网格；而其余部分剖分成较大网格，以利于计算速度，有效网格共 16258 个。模型计算区有限元剖分如图 1 所示。

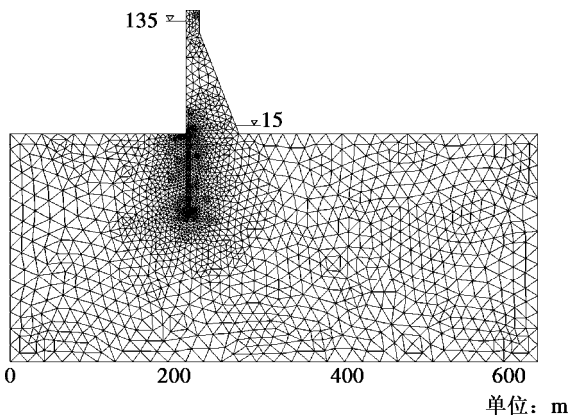


图 1 模型计算区有限元剖分图

Fig. 1 Finite element mesh

然后进行渗流计算，获得整个计算区的水头分布和渗流速度，以上游的正常蓄水位和下游的尾水水位为定水头边界，进行稳定流分析计算。随后以上游库水入渗为初始条件，进行含有化学反应的溶质迁移计算，以 10 d 为时间计算步长，以 7200 d 作为模拟总时间，模拟在水-岩-帷幕体相互作用下，坝基帷幕体防渗性能衰减的迹象及其规律性，部分计算结果

见图 2 ~ 6。

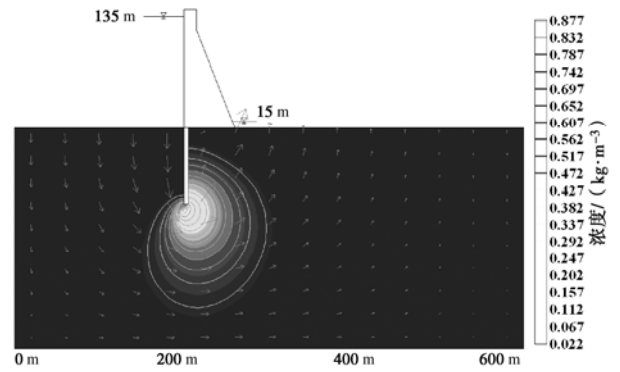


图 2 360 d 后计算区钙离子浓度分布图

Fig. 2 Distribution of calcium ion concentration after 360 days

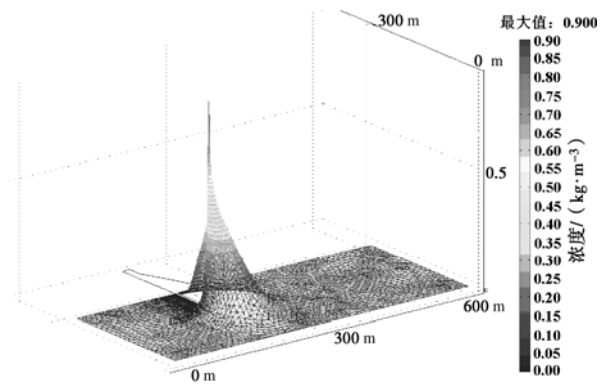


图 3 360 d 后模型计算区钙离子浓度高度分布图

Fig. 3 Distribution of calcium ion concentration after 360 days

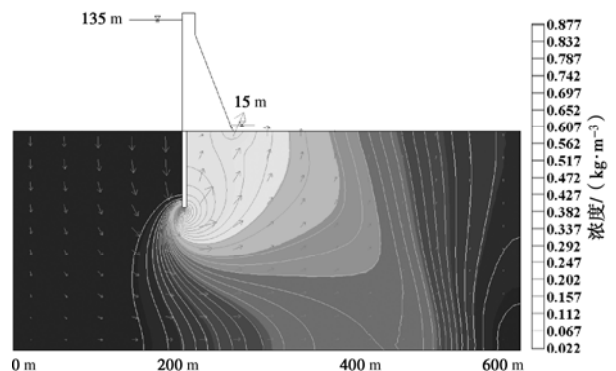


图 4 7200 d 后模型计算区钙离子浓度分布图

Fig. 4 Distribution of calcium ion concentration after 7200 days

3.3 模拟结果及讨论

由以上模拟结果可作如下讨论：

(1) 形成坝基及帷幕体的基本矿物成分是

CaCO₃, CaMg(CO₃)₂, CaSO₄ 和 Ca(OH)₂ 等含钙类矿物, 这种特点决定研究帷幕幕体防渗效果及其时效时, 需用基于多场耦合的多矿物同时溶解和分别沉淀的理论。钙类水化物在具有软水特征的渗入液的作用下最易被溶解, 导致帷幕幕体强度和耐久性能降低, 可见, 帷幕幕体强度及耐久性能的劣化, 主要取决于钙类水化产物的溶解过程。立足于 Ca²⁺ 浓度变化, 模型能从事时间和空间上定量研究坝基帷幕幕体化学侵蚀的程度。

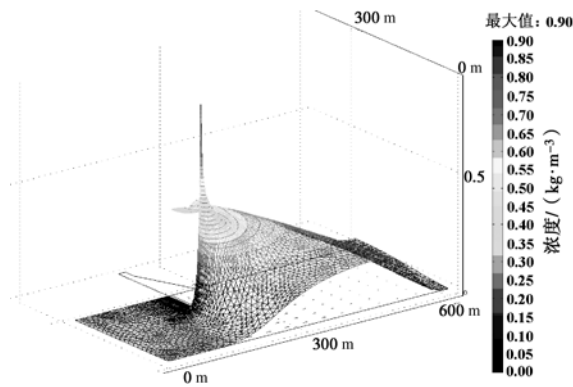


图 5 7200 d 后模型计算区钙离子浓度高度分布图

Fig. 5 Distribution of calcium ion concentration after 7200 days

g/m³。

(4) 就帷幕幕体本身而言, 其不同部位发生溶蚀的强度也不相同, 帷幕幕体底部的溶蚀量要高于其上部的溶蚀量; 靠近坝基上游侧的帷幕幕的溶蚀量要高于下游侧的溶蚀量。这可能与水头压力和渗流速度的大小有关, 帷幕幕体底部的水头压力要高于上部的水头压力; 靠近坝基上游侧的帷幕幕体的动水压力要高于下游侧的动水压力。

(5) 由溶质的迁移规律不难看出, 钙离子溶解主要发生在帷幕幕的底端, 而钙离子迁移主要发生在幕幕 3 个地带: 浓度相对高的是幕幕向下游指向尾水大约 45° 的范围内, 在 600 ~ 700 g/m³ 之间; 其次是帷幕幕以下向上游侧大约 45° 的区域, 浓度在 400 ~ 600 g/m³ 之间; 最后是幕幕向下游 135° 的范围, 浓度在 200 ~ 400 g/m³ 之间, 前后两者是由于水动力条件和弥散作用共同引起的, 靠近上游侧地下水中钙离子浓度变化则是由弥散作用引起的。

(6) 水 - 岩 - 帷幕幕体之间的化学反应是缓慢的、潜移默化的, 但是在帷幕幕体的局部, 其化学侵蚀作用相对较强, 且这种侵蚀作用是长期存在的, 对帷幕幕体的防渗性能的弱化影响具有不可逆性。就总体而言, 帷幕幕体的防渗效果随着时间的推移越来越差。

(7) 在未经任何自然灾害或人工补强手段, 许多运行超过 20 a 的大坝, 其廊道坝基排水孔某些钙离子含量一般在 700 ~ 1045 g/m³ 左右 (如东北的丰满、白山、红石水电站; 西部的安康、龙羊峡水电站; 南部的大广坝等), 而本文计算出的结果在 870 g/m³ 以下, 具有很高的可信性。由此可见, 模拟结果具有较高的精度。

为了能更详细地分析坝基帷幕幕体附近不同位置钙离子的浓度分布、迁移速度以及随时间的变化规律, 分别作顺河方向距帷幕幕底端 5, 45 m 处的钙离子浓度分布图, 见图 7, 8。

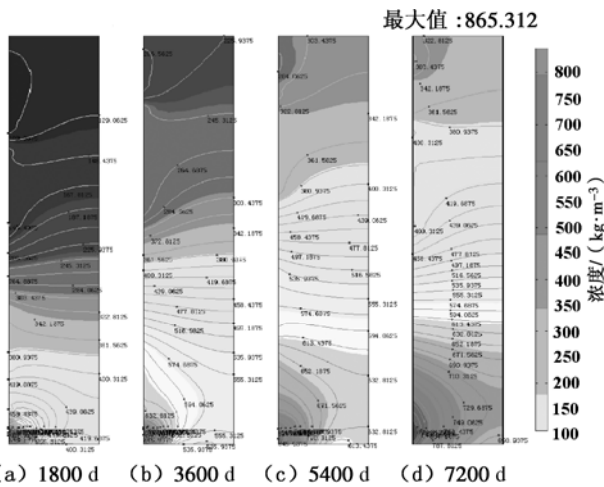


图 6 不同模拟时段帷幕幕体中钙离子浓度分布图

Fig. 6 Distribution of calcium ion concentration in seepage-curtain after 1800/3600/5400/7200 days

(2) 坝基可溶性物质含量在不同部位表现出不同的分布特征。在帷幕幕体附近, 主要来自帷幕幕体及其水泥结石中氢氧化钙的溶解, 其单位体积溶解量可达 877.884 g/m³; 而其余部位则明显小于该值, 说明主要的溶蚀区是在帷幕幕体附近, 而此类物质的流失, 将导致帷幕幕体孔隙率增加, 渗透性增大, 进而影响帷幕幕体的防渗性能和耐久性能。

(3) 坝基帷幕幕体中的可溶类钙质在整个模拟期间始终处于溶解状态, 结果导致地下水溶液中钙离子含量的增加, 最大钙离子含量可达 846.35 ~ 865.312

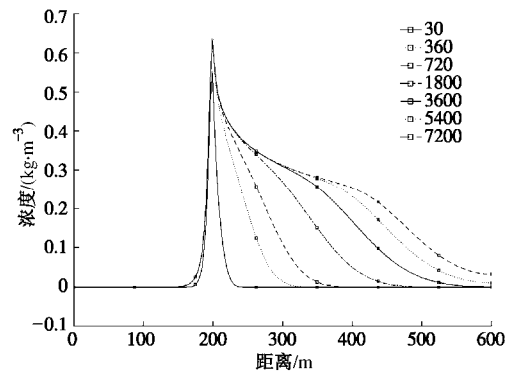


图 7 不同时段区内顺河方向距帷幕幕底端 5 m 处钙离子浓度分布图

Fig. 7 Distribution of calcium ion concentration with a distance of 5 m from curtain after 30, 360, 720, 1800, 3600, 5400 and 7200 days

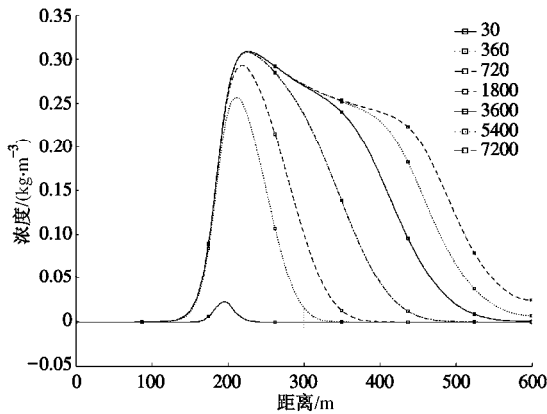


图8 不同时段区内顺河方向距帷幕底端45 m处钙离子浓度分布图

Fig. 8 Distribution of calcium ion concentration with a distance of 45 m from curtain after 30, 360, 720, 1800, 3600, 5400 and 7200 days

图7 是不同模拟时段区内顺河方向距帷幕底端5 m处钙离子浓度分布图。由图7可知,水平方向越靠近帷幕体底端,其钙离子浓度越大,且该部位从 $t=30\sim 7200$ d其浓度变化范围不大,浓度最小值为 0.558 kg/m^3 ,最大值为 0.637 kg/m^3 ,变化幅度为 0.097 kg/m^3 ;而随着时间的推移,越远离帷幕底端,其钙离子浓度变化速度相对于帷幕体附近变化较慢,这与上述几点结论的分析是一致的,且靠近帷幕上游侧的钙离子变化速度小于靠近下游侧的钙离子变化速度,这主要是受水力条件的影响。

图8 是不同时段区内顺河方向距帷幕底端45 m处钙离子浓度分布图。由图8可知,其呈现的浓度分布规律大致与图6的规律一致,水平方向越靠近帷幕体底端,其钙离子浓度越大,但该部位从 $t=30\sim 7200$ d其浓度变化影响范围较距帷幕底端5 m处钙离子浓度变化范围要大得多,最大值为 0.318 kg/m^3 ,而最小值为 0.025 kg/m^3 ,变化幅度为 0.293 kg/m^3 。与图6不同的是,在模拟时间内,其靠近帷幕底端下游侧的溶质随时间变化速度较为缓慢,而远离帷幕处变化相对于帷幕体附近较快。由此可见,坝基各点的钙离子浓度随时间呈非线性变化。

4 结 论

(1) 本文建立的坝基水-岩-帷幕体相互作用多场耦合模型,就是对帷幕体物理-化学损伤过程的一种数学描述,它反映了大坝运行过程中坝基水-岩-帷幕体系统不同化学组分在坝基帷幕体与其中的地下水溶液之间的相互转化规律,从而在空间和时间上比较真实地刻画了坝基帷幕体物理化学特性的变化过程。

(2) 帷幕体的防渗效果随着时间的推移而逐渐减弱,此主要源自帷幕体中诸如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 一类可溶性物质的溶失。其不同部位发生溶蚀的强度也不相同,帷幕体底部的溶蚀量要高于其上部的溶蚀量;靠近坝基上游侧的帷幕的溶蚀量要高于下游侧的溶蚀量。钙离子溶解主要发生在帷幕的底端,浓度相对高的是幕后向下游指向尾水大约 45° 的范围内;其次是帷幕以下向上游侧大约 45° 的区域;最后是幕后向下游 135° 的范围,前后两者是由于水动力条件和弥散作用共同引起的,靠近上游侧地下水中钙离子浓度变化则是由弥散作用引起的。在模拟时间内,靠近帷幕底端下游侧的溶质随时间变化速度较为缓慢,而远离帷幕处变化相对于帷幕体附近较快。由此可见,坝基各点的钙离子浓度随时间呈非线性变化。

(3) 通过与其它几个水电站的横向对比,模拟计算符合一般的自然规律,结果具有很高的可信性和科学性。

(4) 模拟结果反映了坝基帷幕体不同部位、不同时刻液-固相间地球化学反应引起的质量交换量,但是所建模型并未考虑渗透系数、水体物理性质随时间的改变,另外,其计算方法采用弱耦合的顺序算法,如何采用强耦合方法进行模拟是值得探讨的,这也是笔者以后工作的重点。

参考文献:

- [1] 宋汉周. 大坝环境水文地质研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (SONG Han-zhou. Environmental hydrogeology around dam-site[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] WU Zhong-ru, WANG Zhan-ru. Dynamic monitoring model of space displacement field of concrete dam[C]// International Symposium on Monitoring Technology of Dam Safety. Hangzhou, 1992: 215-224.
- [3] GU Chong-shi, ZHANG Qian-fei. Research on seepage monitoring model of earth-rock dam[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 16(1): 62-74.
- [4] FU Jun-feng, JIN Sheng. A study on unsteady seepage flow through dam[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(5): 434-442.
- [5] 杨光中, 彭汉兴, 马晓辉, 等. 丹江口大坝坝基水质特征及帷幕性状评价[J]. 水力发电学报, 2000(4): 33-39. (YANG Guang-zhong, PENG Han-xing, MA Xiao-hui et al. Evaluation of seepage field of grouting curtain in Danjiangkou dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000 (4): 33-39. (in Chinese))

- [6] 宋汉周, 周 剑, 王凤波. 大坝坝址地下水质的演变及其示踪意义——以新安江大坝为例[J]. 水力发电学报, 2004, 23(3): 74 – 78. (SONG Han-zhou, ZHOU Jian, WANG Feng-bo. Study of groundwater quality evolution around dam-site and its significance[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(3): 74 – 78. (in Chinese))
- [7] 童海涛, 宋汉周. 水-岩作用状态随机模拟的可信度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2010 – 2014. (TONG Hai-tao, SONG Han-zhou. Reliability analysis of stochastic modeling for water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2010 – 2014. (in Chinese))
- [8] 沈振中, 陈小虎, 徐力群. 重力坝应力-渗流相互作用的无单元耦合分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 74 – 78. (SHEN Zhen-zhong, CHEN Xiao-hu, XU Li-qun. Coupled analysis of stress-seepage interaction for gravity dam by element-free method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 74 – 78. (in Chinese))
- [9] 陈晓平, 茜平一, 梁志松, 等. 非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 860 – 864. (CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, LIANG Zhi-song, et al. Coupled analysis of stress-seepage interaction for gravity dam by element-free method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 860 – 864. (in Chinese))
- [10] 丁秀丽, 盛 谦. 三峡大坝左厂房 3#坝段坝基渗流与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊), 1001 - 1005. (DING Xiu-li, SHENG Qian. Seepage-stress coupled analysis on the dam foundation of 3# section in left bank power station of the three gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S0): 1001 – 1005. (in Chinese))
- [11] 盛金昌, 速宝玉, 赵 坚, 等. 渗流应力耦合分析在溪洛渡电站坝址区的应用[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 410 – 415. (SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, ZHAO Jian, et al. Coupled stress and fluid analysis and concerned application in Xiluodu hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 410 – 415. (in Chinese))
- [12] 柴军瑞, 李守义. 大柳树水利枢纽区渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 1): 2322 – 2325. (CHAI Jun-rui, LI Shou-yi. Analysis of coupled seepage and stress fields in rock mass around the Daliushu dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S1): 2322 – 2325. (in Chinese))
- [13] 阿里木·吐尔逊. 坝基老化岩-水-化学作用数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (ALIM Tursun. Numeric Hydro-Geo-Chemical modeling of dam foundation ageing[D]. Nanjing: HoHai University, 2005. (in Chinese))
- [14] GERARD B, PIJAUDIER-CABOT G, LABORDERIE C. Coupled Diffusion-Damage Modeling and the Implications on Failure due to Strain Localization[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(30):4107 – 4120.
- [15] 盛金昌. 多孔介质流-固-热三场全耦合多孔介质数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3028 – 3033. (SHENG Jin-chang. Fully Coupled Thermo-Hydro-Mechanical model of saturated porous media and numerical modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3028 – 3033. (in Chinese))

热烈祝贺龚晓南教授当选中国工程院院士

《岩土工程学报》编委会委员、《岩土工程学报》黄文熙讲座第 10 讲主讲人、浙江大学教授龚晓南先生在中国工程院 2011 年院士增选中当选为中国工程院院士。对龚晓南教授当选中国工程院院士，我们表示热烈的祝贺！

龚晓南，1944 年 10 月生。1967 年清华大学工业与民用建筑专业毕业。毕业后在国防科委 8601 工程处从事道路、桥梁、土建等工程的施工、设计和管理的工作。1981 年获浙江大学岩土

工程硕士学位，1984 年 9 月获博士学位，成为浙江省和我国岩土工程界自己培养的第一位博士。1986 年底获洪堡奖学金赴德国在 Karlsruhe 大学从事研究工作。1988 年春回国，同年晋升为教授，1992 年被聘为博士生导师。主要研究领域为软黏土工程、土塑性力学、地基处理技术与复合地基理论、深基坑工程和土工计算机分析等。龚晓南教授第 10 讲黄文熙讲座的题目为“广义复合地基理论及工程应用”。

(本刊编辑部)