

DOI: 10.11779/CJGE20220305

混凝土防渗墙施工缺陷对其渗透溶蚀演化规律的影响

甘磊^{1,3}, 刘源¹, 张宗亮², 沈振中¹, 郑光和³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 中国电力建设集团有限公司, 北京 100048;

3. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 渗流作用下防渗墙施工缺陷对其渗透溶蚀演化进程影响较显著, 为探究防渗墙相邻槽段搭接不良和墙底分叉对其渗透溶蚀的影响机制, 结合流体和化学动力学相关理论, 建立含施工缺陷的混凝土防渗墙渗透溶蚀耦合分析模型。结合某土工膜防渗砂砾石坝, 研究两种缺陷形式下防渗墙中钙离子浓度、孔隙率及渗流特性变化规律。防渗墙钙离子浓度随服役年份增长不断降低, 且缺陷越严重, 浓度越低; 孔隙率随服役年份呈指数型增长, 服役 100 a 后孔隙率增大 1.83 倍; 防渗性能随服役年份、接缝宽度和分叉高度的增长而减弱, 相比防渗墙完好工况, 当接缝宽度 3.0 cm 或分叉高度为 3 m 时, 服役 100 a 后防渗墙等效渗透系数分别增大了 8.20 倍、40.38 倍, 大坝总渗流量分别增大了 4.49 倍、5.81 倍。研究成果可为土石坝工程长效服役性能评估提供理论支撑。

关键词: 混凝土防渗墙; 施工缺陷; 渗透溶蚀; 孔隙率; 渗流特性

中图分类号: TU528.36

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)06-1269-09

作者简介: 甘磊(1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事水工程长效运行及功能提升等方面的教学和科研工作。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn。

Influences of construction defects of concrete cutoff walls on evolution laws of their leakage dissolution

GAN Lei^{1,3}, LIU Yuan¹, ZHANG Zongliang², SHEN Zhenzhong¹, ZHENG Guanghe³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Power Construction

Corporation of China, Ltd., Beijing 100048, China; 3. Research Center for Embankment Safety and Disaster Prevention Engineering

Technology of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Under the action of seepage, the construction defects of cutoff walls have a significant impact on the evolution process of their leakage dissolution. In order to investigate the influence mechanism of poor overlapping of the adjacent groove sections and the bottom bifurcation of the cutoff walls, based on the relevant theories of fluid dynamics and chemical dynamics, a coupling analysis model for leakage dissolution of concrete cutoff walls with construction defects is proposed. Based on a sand gravel dam project with geomembrane anti-seepage measure, the variation laws of calcium ion concentration, porosity and seepage characteristics of the concrete cutoff walls under two types of defects are revealed. The calcium ion concentration of the cutoff walls decreases with the increase of service year, and the more serious the defects are, the lower the concentration of calcium ion is. The porosity increases exponentially with the service year, and the maximum porosity increases by about 1.83 times after 100 service years. The anti-seepage performance of the cutoff walls decreases with the increase of the service year, joint width and bifurcation height of the construction defects. Compared with the intact condition of the cutoff walls, when the joint width is 3.0 cm or the bifurcation height is 3 m, the equivalent permeability coefficient of the cutoff walls increases by 8.20 times and 40.38 times respectively after 100 service years, and the total seepage flow of the dam body and dam foundation increases by 4.49 times and 5.81 times, respectively. The research results can provide theoretical support for evaluating the long-term service performance of earth-rock dams.

Key words: concrete cutoff wall; construction defect; leakage dissolution; porosity; seepage characteristic

0 引言

混凝土防渗墙是覆盖层坝基渗流控制最常采用的

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179130); 江苏省自然科学基金项目(BK20201312); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心项目(DFZX2020003)
收稿日期: 2022-03-21

防渗形式,然而坝基防渗墙施工工艺复杂,受外界因素影响施工质量难以保证,在实际工程中容易出现防渗墙开叉、槽段间搭接不良、墙体不连续等施工缺陷,为工程安全埋下了隐患^[1-2]。盛金昌等^[3]结合冶勒水电站工程分析了混凝土防渗墙开裂对坝基土体渗透稳定性的影响,结果表明防渗墙裂缝宽度大于2.5 cm时,裂缝附近土体可能发生渗透破坏。也有学者进一步研究防渗墙裂缝出现位置对坝基土体、防渗墙渗透坡降和单宽流量的影响^[4],结果表明防渗墙裂缝宽度、位置对坝基渗透坡降和渗流量均有影响。同时,一些覆盖层坝基浅层的地下水存在氯化物和硫酸盐超标现象,其坝基混凝土防渗墙(帷幕)常年受渗流作用,在环境水作用下,防渗墙(帷幕)的物理、化学性能会发生改变,导致固相钙析出,孔隙率增大,强度降低,即发生渗透溶蚀现象^[5]。

渗透溶蚀是混凝土结构主要病害之一,其中渗漏及其引起的混凝土坝体溶出性侵蚀较为普遍^[6-7]。与常规接触溶蚀不同,坝基混凝土防渗墙钙离子析出的驱动力除溶液间浓度梯度外,还有水力梯度^[8]。水力梯度作用下,孔隙溶液的运移作用加快了固相钙分解和钙离子析出速率,加速了溶蚀进程^[9]。同时,混凝土渗透溶蚀现象将导致材料孔隙率增加,从而引起渗透系数和扩散系数增大,进而改变结构整体的渗流场,渗流场的改变又反作用于溶蚀场,加速溶蚀进程^[10-12]。

现有混凝土渗透溶蚀模型存在一些局限,有的将渗透系数定义为常数,忽略溶蚀作用所导致的渗透系数演变;有的为经验模型,没有考虑孔隙率、孔隙结构改变对渗透系数的影响,也未对材料固相钙含量、渗透系数等参数进行分析。防渗墙缺陷对坝基防渗墙附近区域渗流场和溶蚀场影响显著。目前,防渗墙存在施工缺陷情况下的坝基防渗墙渗透溶蚀演化规律的相关成果鲜见,但是防渗墙缺陷的存在会加速坝基防渗墙的渗透溶蚀进程,缩短坝基防渗墙的运行寿命。

本文考虑混凝土防渗墙渗流-溶蚀耦合效应,提出基于孔隙率变化的渗透溶蚀微分控制方程,选取某土工膜防渗砂砾石坝段防渗墙相邻两个槽段范围,建立该土工膜砂砾石坝多物理场渗透溶蚀数值分析模型,研究渗流作用下各施工缺陷对混凝土防渗墙渗透溶蚀演化规律的影响,研究成果可为覆盖层上土石坝坝基防渗墙的设计和施工提供理论依据。

1 混凝土渗透溶蚀耦合分析模型

1.1 钙离子质量守恒定律

浓度差作用下,水泥水化物孔隙溶液中的离子通

过扩散作用保持浓度平衡。通常,多孔介质中的扩散现象通过表观扩散系数计算,通常假定骨料不发生扩散,仅考虑孔隙率对离子传输路径的影响。离子传输过程发生在连通孔隙内溶液中,本文计算假定混凝土处于饱和状态,涉及的孔隙率为连通孔孔隙率^[13]。

钙离子在水泥基体孔隙溶液中的质量守恒定律公式如下式所示,涉及孔隙溶液中钙离子总质量和浆体中固相钙的总质量^[13-15]。

$$\frac{\partial(\theta C_{\text{ion}})}{\partial t} + \frac{\partial C_{\text{solid}}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_{\text{ion}} = 0 \quad (1)$$

式中: θ 为孔隙率; t 为溶蚀时间; C_{ion} 为液相中钙离子的摩尔浓度; C_{solid} 为固相钙的含量; $\frac{\partial C_{\text{solid}}}{\partial t}$ 为固相钙的溶解速率; ∇ 为哈密顿算子, $\nabla^T = [\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}]$; \mathbf{J}_{ion} 为钙离子的传输通量。

液体中的扩散非常缓慢,液体中离子传递几乎都以对流为主,考虑扩散-对流情况下钙离子在多孔介质中的传输通量为^[16]

$$\mathbf{J}_{\text{ion}} = -D_{\text{eff}} \cdot \nabla C_{\text{ion}} + \theta \cdot \mathbf{u} \cdot C_{\text{ion}} \quad (2)$$

式中: D_{eff} 为基体内考虑对流及孔隙曲折度的钙离子有效扩散系数; \mathbf{u} 为达西流速, $\mathbf{u}^T = [u_x, u_y]$ 。

1.2 孔隙率变化模型

硬化的水泥基体中的孔隙可大致分为滞留空气、夹带空气、毛细孔和凝胶孔,溶蚀过程中的孔隙率可表示为^[17-18]

$$\theta = P_{\text{vol}}(\theta_{\text{gel}} + \theta_{\text{cap}}) + \theta_{\text{leach}} \quad (3)$$

式中:

$$\theta_{\text{gel}} = \frac{0.19h_a}{w/c + 0.32} \quad (4)$$

$$\theta_{\text{cap}} = \frac{w/c - 0.36h_a}{w/c + 0.32} \quad (5)$$

$$\theta_{\text{leach}} = \frac{M_{\text{CH}}}{\rho_{\text{CH}}}(C_{s0} - C_s) \quad (6)$$

式中: P_{vol} 为混凝土中水泥基体的体积分数,本文取0.26^[11]; θ_{gel} 为凝胶孔隙率; θ_{cap} 为毛细孔隙率; θ_{leach} 为溶蚀过程产生的孔隙率增量; h_a 为水泥水化程度; w/c 为水灰比,取0.6^[11]; M_{CH} 为氢氧化钙的摩尔质量; ρ_{CH} 为氢氧化钙的密度; C_{s0} 为基体中初始固相钙含量; C_s 为溶蚀过程中基体中固相钙含量。

混凝土防渗墙内可溶解固相钙主要由氢氧化钙和水化硅酸钙组成。在环境水侵蚀作用下,混凝土内的氢氧化钙和水化硅酸钙依次溶解,首先氢氧化钙开始溶解,当氢氧化钙全部溶解后,水化硅酸钙开始溶解。本文仅考虑氢氧化钙的溶解^[19-20],随着氢氧化钙的不断溶解,防渗墙的孔隙率不断增大,其增长速率为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = R_{CH} \cdot \frac{M_{CH}}{\rho_{CH}} \cdot \theta \quad (7)$$

式中: R_{CH} 为氢氧化钙的溶解速率。氢氧化钙的溶解速率与溶液中钙离子浓度有如下关系^[17-18]:

$$R_{CH} = A \left(1 - \frac{C(Ca^{2+}) \cdot [C(OH^-)]^2}{K_{sp}} \right)^n \quad (8)$$

式中: A 为化学反应动力学系数; n 为动力学指数; $C(Ca^{2+})$ 为溶液中钙离子浓度; $C(OH^-)$ 为溶液中氢氧根离子浓度; K_{sp} 为氢氧化钙的溶度积常数。

1.3 扩散系数变化

取钙离子在水溶液中的基本扩散系数为 D_0 , 根据文献^[14]孔隙率和基质曲折度的变化, 孔隙溶液的有效扩散系数表示为

$$D_s = \frac{1 - \xi G_{vol}}{1 - \zeta S_{vol}} P_{vol} f(\theta - \theta_{gel}) D_0 \quad (9)$$

式中: G_{vol} 为混凝土中粗骨料的体积分, 取 0.414^[14]; S_{vol} 为混凝土中细骨料的体积分, 取 0.326^[14]; ξ , ζ 为骨料修正系数, 分别取 1.5, 0.86^[21]; P_{vol} 为混凝土中水泥基体的体积分; $f(\theta - \theta_{gel})$ 为反映微孔曲折度的换算系数^[14],

$$f(\theta - \theta_{gel}) = 0.001 + 0.07(\theta - \theta_{gel})^2 + 1.8H(\theta - \theta_{gel} - 0.18)(\theta - \theta_{gel} - 0.18)^2 \quad (10)$$

式中: $H(x)$ 为 Heaviside 函数。当 $x > 0$ 时, $H(x) = 1$; 当 $x \leq 0$ 时, $H(x) = 0$ 。

考虑对流及孔隙曲折度的钙离子有效扩散系数可表示为^[11]

$$D_{eff} = \alpha \cdot u + D_s \quad (11)$$

1.4 渗流-溶蚀耦合分析方程

孔隙溶液中溶质迁移的对流速率在无流动水中为零, 当环境水存在水力梯度时, 根据渗流微分方程计算对流速率。根据达西定律建立的渗流微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\theta \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) &= Q_m \\ u &= -\frac{k}{\rho g} (\nabla p + \rho g) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: ρ 为水的密度; Q_m 为源汇项; p 为孔隙水压力; g 为重力加速度; k 为渗透系数。水泥基材料的渗透系数通常为孔隙率的函数, 根据 Kozeny-Carman (K-C) 方程可得渗透系数的演化方程为^[22]

$$k = k_0 (\theta / \theta_0)^3 \left(\frac{1 - \theta_0}{1 - \theta} \right)^2 \quad (13)$$

式中: k_0 为初始渗透系数; θ_0 为初始孔隙率, 本文取混凝土水化完全时 ($h_a = 1$) 的孔隙率作为初始孔隙

率。

2 模型验证

选取某重力坝工程为例, 该坝坝顶高程 112.50 m, 最大坝高 40.5 m, 坝宽 31.74 m, 坝顶长度 645 m, 检测发现廊道迎水面和背水面有大量 $CaCO_3$ 溶出物。选取该坝非溢流坝段典型剖面, 模拟混凝土面板、坝体、坝体排水管、齿墙、坝基排水管、防渗帷幕和基岩等主要结构, 大坝整体计算模型示意图如图 1 所示。

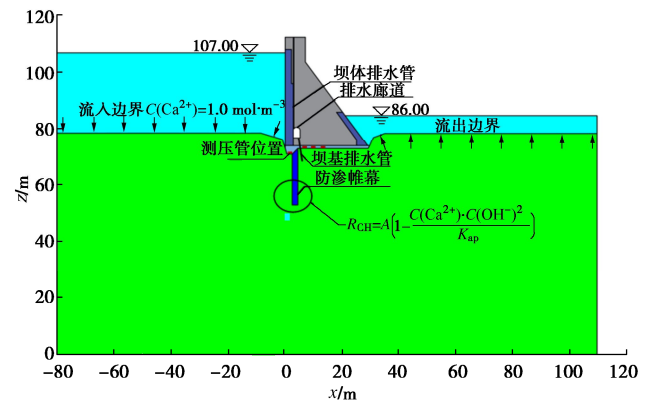


图1 某重力坝整体计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational model for a gravity dam

初始条件包含初始水头条件和初始钙离子浓度, 上游水位取 107.0 m, 下游水位为 86.0 m。混凝土面板、坝体、帷幕和齿墙初始钙离子浓度取 22.0 mol/m^3 , 基岩初始钙离子浓度为 0, 上游库水初始钙离子浓度取 1.0 mol/m^3 。坝体及坝基各材料分区计算参数选取参考了相关文献^[12, 19], 具体计算参数见表 1。

典型服役年份下重力坝基底扬压力计算值和监测值如图 2 所示。在基础排水廊道内打孔埋设测压管, 布置于防渗帷幕前和幕后, 其在基岩面处距离帷幕中心约为 2 m。图 2 中的两组监测数据分别是 2003 年 9 月 11 日 (上、下游水位分别为 107.2, 86.2 m) 和 2007 年 2 月 5 日 (上、下游水位分别为 107.1, 85.9 m) 的观测数据, 分别对应大坝溶蚀历时 4, 8 a。由图 2 可知, 防渗帷幕前侧的测压管监测值与计算值误差很小, 服役 8 a 的防渗帷幕后侧的测压管监测值与计算值最大相差 1.95 m, 服役 4 a 的测压管监测值与计算值最大相差 0.77 m, 但监测值与计算值的变化规律较为一致。

典型服役年份下重力坝坝基集水井的渗流量监测值和计算值如图 3 所示。由图 3 可知, 该重力坝服役 4~11 a 期间 (2003 年—2010 年), 其坝基渗流量计算值缓慢增大, 8 a 增长了 5.28%, 不同服役年份下坝基监测渗流量在计算值上、下波动, 计算值与监测值

表 1 各材料分区计算参数
Table 1 Parameters for different material zones

材料	θ_0	$k_0/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$D_0/$ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	化学反应动力学参数		
				$A/(\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{s}))$	n	K_{sp}
常规混凝土	0.08	5.20×10^{-9}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-8}	4.50	5.50×10^{-6}
二级配混凝土	0.08	2.00×10^{-8}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-8}	4.50	5.50×10^{-6}
三级配混凝土	0.08	5.00×10^{-10}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-8}	4.50	5.50×10^{-6}
防渗帷幕	0.08	1.50×10^{-8}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-8}	4.50	5.50×10^{-6}
基岩	0.10	8.00×10^{-5}	1.00×10^{-9}	—	—	—
坝体排水孔	0.50	2.50×10^{-3}	1.00×10^{-9}	—	—	—
坝基排水孔	0.50	2.50×10^{-3}	1.00×10^{-9}	—	—	—

的平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE、平方根 R^2 分别为 8.89%，0.140 L/s 和 0.971。上述数值模拟结果与工程监测数据较为吻合，说明该混凝土渗透溶蚀分析模型合理。

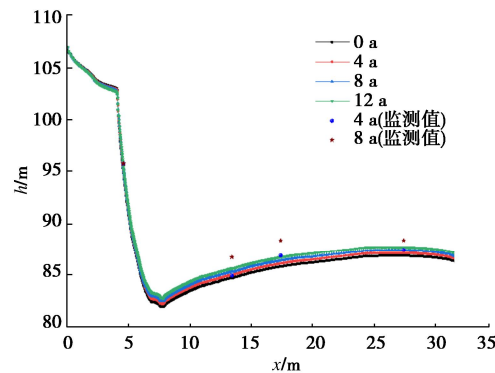


图 2 典型服役年份下重力坝基底扬压力演化曲线

Fig. 2 Evolution curves of base uplift pressure of gravity dam for typical service years

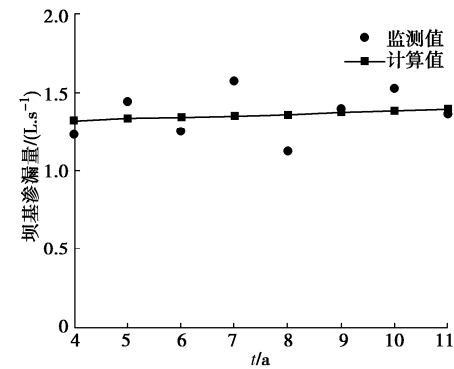


图 3 典型服役年份下坝基渗流量演化曲线

Fig. 3 Evolution curves of seepage flow of dam foundation for typical service years

3 应用实例

3.1 计算模型和参数

某土工膜防渗砂砾石坝位于黄河干流上，坝顶高程 1883.50 m，最大坝高 23.50 m，水库正常蓄水位 1 880.50 m，上游坝坡布置 1 道复合土工膜，并与上游

围堰中的混凝土防渗墙相接，防渗墙厚 60 cm，设计顶高程为 1870.00 m。

选取该坝防渗墙相邻两个槽段范围，每个槽段取 4.0 m，建立三维有限元计算模型，考虑坝体主要结构和地层，计算模型如图 4 所示。防渗墙施工缺陷模拟示意图如图 5 所示，防渗墙相邻槽段搭接不良采用裂缝模拟，裂缝按照实际尺寸放大 10 倍，渗透系数按照流量等效原则缩小 10 倍处理；防渗墙相邻槽段底部分叉实际是由于相邻槽段墙体上下游倾斜或扭曲引起的。本文假设底部分叉发生在 Y 剖面，此时水流通过此分叉部位的渗径变短，假定情况计算成果偏危险。

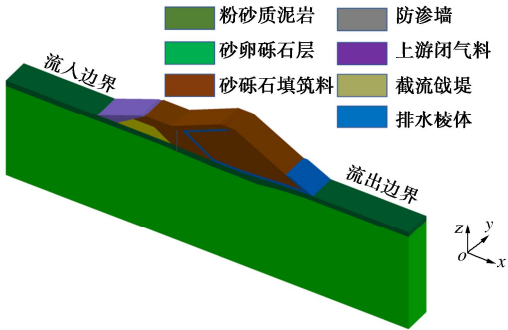


图 4 计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculation model

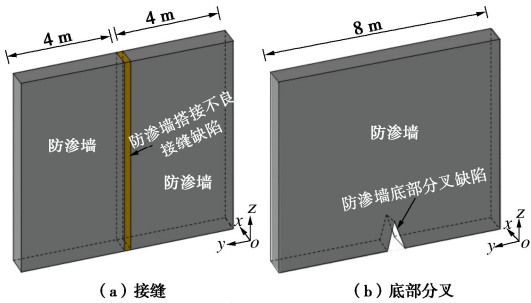


图 5 防渗墙施工缺陷模拟示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulating construction defects of cutoff wall

上游库水中钙离子浓度取 $1.0\text{ mol}/\text{m}^3$ [12]，上游已知水头边界取正常蓄水位 1 880.50 m 以下坝体上游面与河床覆盖层顶部，下游已知水头边界取正常尾水位

表 2 计算模型渗透溶蚀参数
Table 2 Leakage dissolution parameters of model

材料	$k_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	θ_0	$D_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	化学反应动力学参数		
				$A/((\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{s})))$	n	K_{sp}
防渗墙	1.00×10^{-9}	0.12	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-8}	4.50	5.50×10^{-6}
砂砾石填筑料	2.40×10^{-5}	0.30	1.00×10^{-9}	—	—	—
截流戗堤	1.00×10^{-6}	0.25	1.00×10^{-9}	—	—	—
上游闭气料	3.00×10^{-7}	0.20	1.00×10^{-9}	—	—	—
复合土工膜	3.50×10^{-13}	—	—	—	—	—
排水棱体	2.00×10^{-3}	0.50	1.00×10^{-9}	—	—	—
砂卵砾石层	4.60×10^{-4}	0.40	1.00×10^{-9}	—	—	—
粉砂质泥岩	1.10×10^{-6}	0.20	1.50×10^{-9}	—	—	—

1862.31 m 以下坝体下游面与河床覆盖层顶部, 出渗边界为水位线以上的边界, 即与大气相接触的所有边坐标原点: 取 X 轴为顺河流方向, 垂直于坝轴线, 上游指向下游为正; Y 轴为坝轴线方向, 右岸指向左岸为正; Z 轴为垂直方向, 向上为正, 与高程一致。防渗墙、坝体及坝基的渗透溶蚀计算参数如表 2 所示。

3.2 计算工况

本文主要考虑防渗墙相邻槽段搭接不良和相邻槽段底部分叉两类施工缺陷, D-1 为防渗墙完好工况, D-2~D-4 模拟的是防渗墙搭接存在接缝的第一类缺陷工况; D-5~D-7 模拟的是防渗墙底部存在分叉的第二类缺陷工况, 分叉角度固定, 高宽比为 10:1, 具体计算工况见表 3。

表 3 计算工况表

Table 3 Design of calculation conditions

工况	服役年份/ a	接缝宽度/ cm	分叉高度/ m	水位/ m
D-1	0~100	—	—	—
D-2	0~100	1.0	—	—
D-3	0~100	2.0	—	上游: 1880.50
D-4	0~100	3.0	—	下游: 1862.31
D-5	0~100	—	1.0	—
D-6	0~100	—	2.0	—
D-7	0~100	—	3.0	—

3.3 结果与讨论

(1) 钙离子浓度

图 6 为部分工况下混凝土防渗墙中轴面 ($x = -2.0$ m) 钙离子浓度分布图。由图 6 可知, 初始时刻防渗墙未发生水化反应, 钙离子分布均匀。溶蚀 20 a 后, 防渗墙受水化反应影响, 钙离子浓度较初始时刻明显增大, D-2 工况下防渗墙中钙离子浓度最大增至 2.75 mol/m³, 且分布规律与初始时刻相反, 表现为接缝部位附近低, 防渗墙外侧中偏下部浓度高的分布规律。离接缝缺陷位置越远, 相同高程处钙离子浓度越高, 在防渗墙中部尤为明显。防渗墙服役 60, 100 a 后, 防渗墙中钙离子分布规律与服役 20 a 基本一致, 数值逐渐减小, 服役 100 a 后, 防渗墙存在接缝缺陷时, 其钙离子最大浓度降至 1.84 mol/m³, 降低了 24.9%。

界; 不透水边界包括模型上、下游截取边界及模型底边界。以两个槽段中间接缝断面与坝轴线交点为模型 D-3 和 D-4 工况下防渗墙中钙离子浓度变化规律和工况 D-2 一致, 但是同一溶蚀时间下, 防渗墙接缝缺陷宽度越大, 防渗墙相同位置处的钙离子浓度越小。

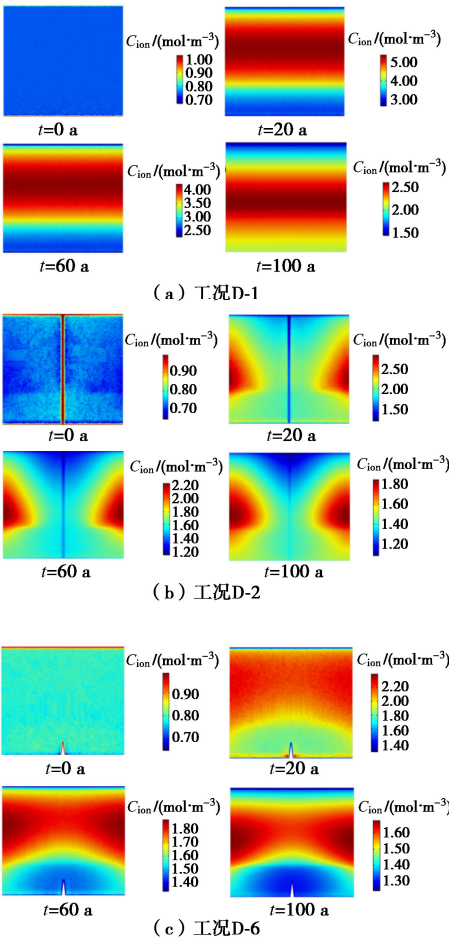


图 6 防渗墙中轴面钙离子浓度分布

Fig. 6 Distribution of calcium ion concentration of cutoff wall

D-6 工况下防渗墙中钙离子最大浓度为 2.33 mol/m³, 中部钙离子浓度高于上部和下部, 且呈 X 型分布, 左右侧浓度高于其它部位。总体表现为分叉缺口附近环状分布, 靠近分叉缺口浓度低, 远离分叉缺口的防渗墙两侧浓度高的分布规律。主要原因是防渗墙上部渗透坡降大, 通过防渗墙上部的水流流速快,

墙体溶蚀程度高, 钙离子浓度较小; 防渗墙下部受底部绕渗作用, 外表受冲刷作用溶蚀程度高, 一定范围内有较大影响, 表现为防渗墙下部钙离子浓度低的特征。D-6 工况中, 由于分叉缺口较大, 渗流通过缺口时流速增加, 加速墙体下层溶蚀过程, 影响以缺口为中心向四周辐射, 最大浓度较 D-5 工况减小 51.15%, 分叉缺口的存在明显加快了防渗墙的溶蚀进程。

图 7 为各工况下防渗墙中钙离子平均浓度变化曲线。由图 7 可知, 防渗墙存在缺陷时, 防渗墙中钙离子平均浓度变化规律与防渗墙完好规律一致, 随服役历时增长不断降低。但是防渗墙存在缺陷后, 除了分叉高度最小的 D-5 工况外, 其它缺陷工况下防渗墙中钙离子浓度较防渗墙完好时明显要小, 且缺陷越严重, 钙离子浓度越低。分叉缺陷 D-5 工况的防渗墙缺陷部分位于坝基泥岩, 被泥岩填充, 防渗性能较好, 对渗透水流的侵蚀有一定阻缓作用。D-2~D-4、D-6~D-7 工况下防渗墙中钙离子平均浓度相比防渗墙完好工况来说相差不大, 最大相对误差为 19.22%。

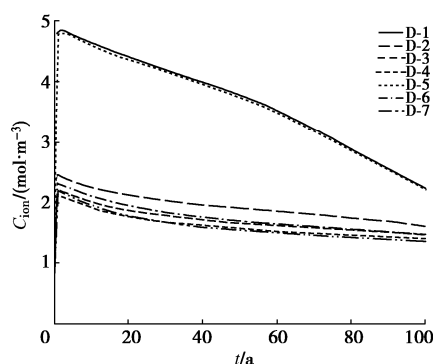


图 7 防渗墙中平均钙离子浓度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of average calcium ion concentration of cutoff wall

(2) 孔隙率

接缝缺陷 D-4 工况与分叉缺陷 D-7 工况下防渗墙中轴面孔隙率分布如图 8 所示。由图 8 可知, 防渗墙初始孔隙率为 0.12, 服役 20 a 后, D-4 和 D-7 工况下防渗墙孔隙率最大值增至 0.1481。随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在混凝土防渗墙中不断溶解和地下水迁移, 防渗墙孔隙率不断增大, 服役 100 a 后 D-4 和 D-7 工况下防渗墙孔隙率最大值较初始孔隙率大了 1.83 倍。两缺陷工况下防渗墙孔隙率空间分布规律较为明确。D-4 工况表现为: 沿接缝中轴线对称分布, 数值差异较小, 墙顶和墙底溶蚀较中部严重。D-7 工况表现为: 底部溶蚀最严重, 顶部次之, 中部受溶蚀影响最小, 底部与中部存在较明显的分界线, 以中轴线为中心呈环状分布, 同一高程上, 距中轴线越近孔隙率值越大。

防渗墙平均孔隙率变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 各接缝缺陷及分叉缺陷工况下的防渗墙孔隙率

差别较小, 最大差值分别为 1.80%, 1.68%。防渗墙孔隙率受混凝土溶蚀进程影响显著, 孔隙率随溶蚀时间呈指数型的增长趋势, 拟合公式为 $\theta = 0.120e^{0.0103t}$, 相关系数 R^2 为 0.9999。

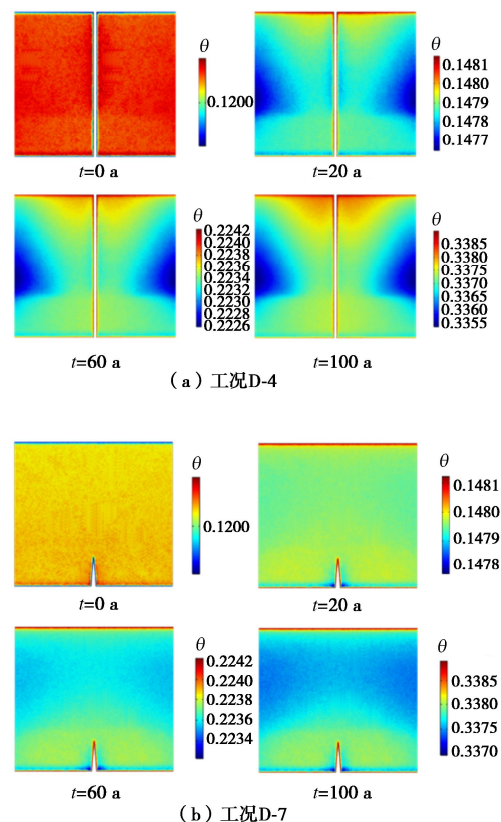


图 8 典型工况下防渗墙孔隙率分布

Fig. 8 Distribution of porosity of cutoff wall under typical working conditions

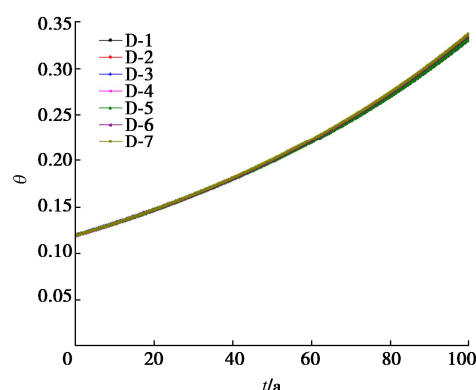


图 9 各工况下防渗墙平均孔隙率变化曲线

Fig. 9 Variation curves of average porosity of cutoff wall under various conditions

(3) 渗流特性

随着防渗墙服役年份增长, 墙体孔隙率不断增大, 孔隙率增加会导致其渗透系数增大, 进而影响坝体及坝基渗流场分布, 不同缺陷工况下考虑缺陷影响的防渗墙等效平均渗透系数变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 防渗墙等效平均渗透系数随服役年份增长而增大; 相比防渗墙完好的 D-1 工况, 接缝缺陷工况下防渗墙等效平均渗透系数随接缝宽度增加而增大, 分叉缺陷工况下防渗墙等效平均渗透系数随分叉高度增加而增大。总体而言, 接缝宽度(1.0~3.0 cm)对防渗墙等效渗透系数变化的影响小于分叉缺陷, 服役运行 100 a 后接缝宽度为 3.0 cm 的 D-4 工况下防渗墙等效渗透系数较 D-1 工况增大了 8.20 倍。但对分叉缺陷而言, 分叉缺陷区域不同高程处的地层渗透性能可能差别较大, 其对坝基总体渗流场影响较大。本文 D-5 工况分叉高度较小, 分叉缺陷区域由泥岩填充, 渗透系数较小, 服役 100 a 后的防渗墙渗透系数较 D-1 工况仅大 3.97%, D-6 和 D-7 工况下分叉缺陷开始被渗透系数大的砂砾石层填充, 服役 100 a 后其防渗墙等效平均渗透系数较 D-1 工况分别增大了 26.94 倍和 40.38 倍。

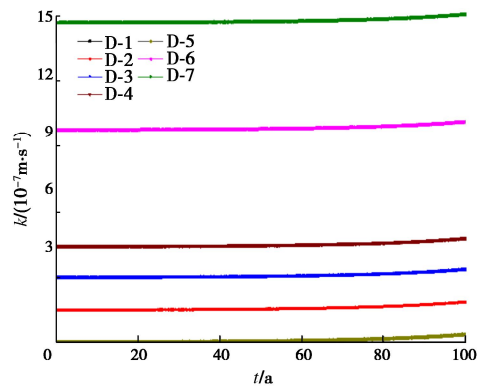


图 10 防渗墙等效平均渗透系数变化曲线

Fig. 10 Variation curves of average permeability coefficient of cutoff wall

初始时刻, 库水通过坝体及防渗体渗向下游, 浸润面在土工膜及防渗墙处产生突变, 防渗体削减水头百分比约为 97.8%, 削减水头作用明显, 初始时刻坝体及坝基水位等值线分布如图 11 所示。随防渗墙缺陷接缝宽度和分叉高度的增大, 防渗体消减水头的的作用逐渐减弱; 相比防渗墙完好的 D-1 工况, 其中 D-4 工况下防渗体阻水效果下降最为显著, 降低约 14.61%。

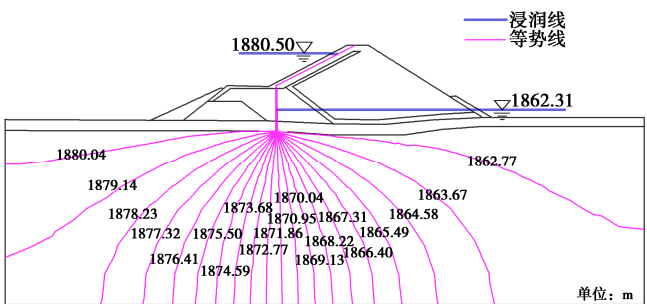


图 11 初始时刻坝体和坝基水位等值线分布

Fig. 11 Distribution of water level contour of dam body and foundation at initial time

图 12 为各工况下大坝渗流量变化曲线。从图 12 (a) 可知, 相比工况 D-1, 初始时刻防渗墙接缝宽度从 1.0 cm 增大至 3.0 cm 时, 防渗墙渗流量增大了 1.34 倍至 2.94 倍, 增幅较明显; 服役 100 a 后 D-4 工况下防渗墙渗流量最大, 为 8.71 m²/d。防渗墙底部分叉高度 1 m (D-5 工况) 的防渗墙渗流量变化曲线与 D-1 工况较为接近, 当分叉高度增大至 3 m 时, 防渗墙渗流量显著增大, 相比 D-1 工况增大了 4.49 倍; 服役 100 a 后 D-7 工况下防渗墙渗流量最大, 为 12.76 m²/d。各工况下防渗墙渗流量从大到小排序为: D-7、D-6、D-4、D-3、D-2、D-5 和 D-1 工况。由图 12 (b) 可知, D-1 和 D-5 工况的坝体及坝基总渗流量变化曲线较为接近, 而 D-4 和 D-7 工况较为接近; D-7 工况的大坝总渗流量最大, 初始时刻为 13.96 m²/d, 服役 100 a 后增大至 14.80 m²/d, 约为初始时刻 D-1 工况的 5.81 倍。说明随着防渗墙接缝缺陷宽度和分叉高度的增大, 防渗墙及大坝总渗流量均增大; 同一工况下, 随防渗墙渗透溶蚀过程的进行, 防渗墙防渗性能不断衰减, 防渗墙渗流量显著增大, 大坝总渗流量随之增大。

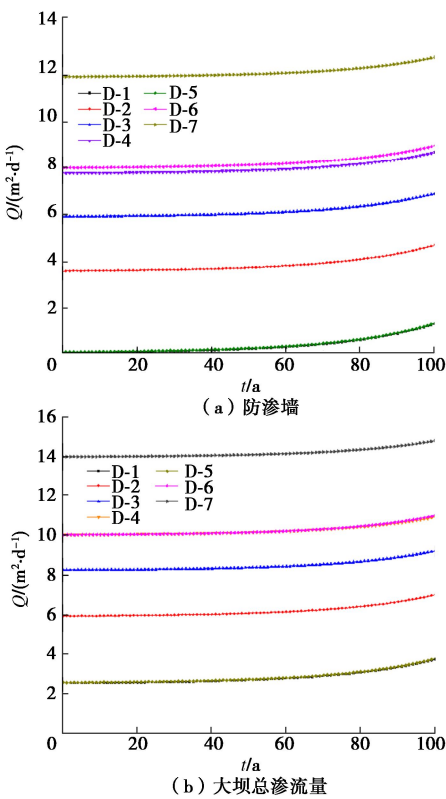


图 12 各工况下大坝渗流量变化曲线

Fig. 12 Variation curves of seepage flow through dam under various conditions

本文防渗墙缺陷是将缺陷部位的渗透系数按照其所处的相应地层材料渗透系数来模拟, 缺陷部位地层的渗透系数对研究成果会有一些的影响, 限于篇幅暂

未对地层渗透系数开展敏感性分析,将在以后的研究中进一步考虑地层渗透系数变异对坝基防渗墙渗透溶蚀演化规律的影响。

4 结 论

本文开发了考虑扩散-渗流-化学作用的渗流-溶蚀耦合分析模型,研究了两类典型防渗墙施工缺陷对坝基混凝土防渗墙钙离子浓度、孔隙率和渗流特性的影响,得到4点结论。

(1)通过对某重力坝实例分析,其基底测压管监测值与计算值较吻合,坝基渗漏量计算值与监测值的MAE, RMSE, R^2 分别为8.89%, 0.140 L/s, 0.971,说明提出的混凝土渗透溶蚀分析模型合理。

(2)接缝缺陷工况下防渗墙中钙离子浓度表现为接缝部位附近低,防渗墙外侧中偏下部浓度高;分叉缺陷工况下防渗墙中钙离子浓度表现为分叉缺口附近环状分布,靠近分叉缺口处浓度低,远离分叉缺口的两侧浓度高;防渗墙存在缺陷时,防渗墙中钙离子平均浓度随服役历时增长不断降低,且缺陷越严重,钙离子浓度越低。

(3)随服役年份增长,防渗墙孔隙率不断增大。服役100 a后,D-4和D-7工况下防渗墙孔隙率最大值较初始值增大1.83倍,接缝缺陷工况下孔隙率沿接缝中轴线对称分布,防渗墙顶部和底部孔隙率较大;分叉缺陷工况下防渗墙底部孔隙率最大,顶部次之,中部最小,底部与中部存在较明显的分界线。防渗墙孔隙率受混凝土溶蚀进程影响较为显著,随服役年限呈指数型增长趋势。

(4)防渗墙等效平均渗透系数、防渗墙渗流量、坝体及坝基总渗流量均随服役年份、缺陷接缝宽度和分叉高度的增长而增大,防渗体消减水头的作用逐渐减弱。服役100 a后,相比D-1工况而言,D-4和D-7工况下防渗墙等效渗透系数分别增大了8.20倍和40.38倍,防渗墙渗流量分别增大了159.65倍和234.06倍,大坝总渗流量分别增大了4.49倍和5.81倍。

参考文献:

[1] 沈振中,田振宇,徐力群,等.深覆盖层上土石坝心墙与防渗墙连接型式研究[J].岩土工程学报,2017,39(5): 939-945. (SHEN Zhenzhong, TIAN Zhenyu, XU Liqun, et al. Reasonable connection type for cutoff wall and core wall of earth-rock dams on deep overburden layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 939-945. (in Chinese))

[2] 王刚,张建民,濮家骝.坝基混凝土防渗墙应力位移影

响因素分析[J].土木工程学报,2006,39(4): 73-77. (WANG Gang, ZHANG Jianmin, PU Jialiu. An evaluation of the factors influencing the stress and deformation of concrete diaphragm wall in dams[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 73-77. (in Chinese))

[3] 盛金昌,赵坚,速宝玉.混凝土防渗墙开裂对坝基渗透稳定性的影响[J].水利水电科技进展,2006,26(1): 23-26. (SHENG Jinchang, ZHAO Jian, SU Baoyu. Effects of cracking of anti-seepage concrete wall on seepage stability of dam foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 23-26. (in Chinese))

[4] 李少明.防渗墙质量缺陷对土石坝渗流控制的影响[J].南水北调与水利科技,2012,10(5): 174-177, 169. (LI Shaoming. Effects of quality defects in anti-seepage wall on seepage control of the earth-rock dam[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 174-177, 169. (in Chinese))

[5] 彭鹏,单冶钢,宋汉周,等.反映坝基帷幕体防渗时效的多场耦合数值模拟[J].岩土工程学报,2011,33(12): 1847-1853. (PENG Peng, SHAN Zhigang, SONG Hanzhou, et al. Coupling model for assessing anti-seepage behaviors of curtain of dam foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1847-1853. (in Chinese))

[6] 王少伟,包腾飞.渗透溶蚀对高混凝土坝长期变形影响的数值分析[J].长江科学院院报,2020,37(6): 62-69. (WANG Shaowei, BAO Tengfei. Numerical analysis on influence of leakage dissolution on long-term deformation of high concrete dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(6): 62-69. (in Chinese))

[7] 张开来,沈振中,甘磊.水泥基材料溶蚀试验研究进展[J].水利水电科技进展,2018,38(6): 86-94. (ZHANG Kailai, SHEN Zhenzhong, GAN Lei. Advances in cement-based materials leaching test[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 86-94. (in Chinese))

[8] KAMALI S, MORANVILLE M, LECLERCQ S. Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 575-585.

[9] 盛金昌,贾春兰,张羽,等.水工混凝土渗流侵蚀渗透试验研究[J].水力发电学报,2013,32(6): 216-221. (SHENG Jinchang, JIA Chunlan, ZHANG Yu, et al. Experimental study of seepage inflow erosion processes in concrete[J].

- Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, **32**(6): 216-221. (in Chinese))
- [10] 李新宇, 方坤河. 混凝土渗透溶蚀过程中钙离子迁移过程数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2008, **25**(6): 96-100. (LI Xinyu, FANG Kunhe. Numerical simulation of Ca-ion transportation during concrete leaching dissolution[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, **25**(6): 96-100. (in Chinese))
- [11] 霍吉祥, 苏社教, 马福恒, 等. 坝基帷幕防渗性能衰减的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, **51**(1): 21-26. (HUO Jixiang, SU Shejiao, MA Fuheng, et al. Numerical simulation of anti-seepage performance attenuation of dam curtain[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, **51**(1): 21-26. (in Chinese))
- [12] 张开来, 沈振中, 徐力群, 等. 考虑渗透溶蚀作用的防渗帷幕耐久性控制指标[J]. 水利学报, 2020, **51**(2): 169-179. (ZHANG Kailai, SHEN Zhenzhong, XU Liquan, et al. Durability control index of anti-seepage curtain considering the effect of advection-diffusion-driven leaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(2): 169-179. (in Chinese))
- [13] GÉRARD B, LE BELLEGO C, BERNARD O. Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments[J]. Materials and Structures, 2002, **35**(10): 632-640.
- [14] YOKOZEKI K, WATANABE K, SAKATA N, et al. Modeling of leaching from cementitious materials used in underground environment[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**(1/2/3/4): 293-308.
- [15] NAKARAI K, ISHIDA T, MAEKAWA K. Modeling of calcium leaching from cement hydrates coupled with micro-pore formation[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, **4**(3): 395-407.
- [16] 庞晓赞, 李乐, 桂强, 等. 沉管隧道壁中热-水-离子传输过程[J]. 硅酸盐学报, 2015, **43**(2): 144-151. (PANG Xiaoyun, LI Le, GUI Qiang, et al. Thermo-hydro-ionic transport in walls of sea immersed tube tunnel[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, **43**(2): 144-151. (in Chinese))
- [17] 贾攀, 余成学. 水泥基材料渗透溶蚀有限元模拟方法[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(5): 108-115. (JIA Pan, SHE Chengxue. Finite element modeling of leakage dissolution of cement-based materials[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(5): 108-115. (in Chinese))
- [18] PHUNG Q T, MAES N, JACQUES D, et al. Modelling the evolution of microstructure and transport properties of cement pastes under conditions of accelerated leaching[J]. Construction and Building Materials, 2016, **115**: 179-192.
- [19] HUO J X, MA F H, JI X L. Porosity and permeability variations of a dam curtain during dissolution[J]. Water Science and Engineering, 2019, **12**(2): 155-161.
- [20] 王晓梅, 李克非. 水泥基材料裂隙表面溶蚀过程[J]. 硅酸盐学报, 2011, **39**(3): 525-530. (WANG Xiaomei, LI Kefei. Leaching behavior of fracture surfaces of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, **39**(3): 525-530. (in Chinese))
- [21] YOKOZEKI K, WATANABE K, HAYASHI D, et al. Modeling of ion diffusion coefficients in concrete considering with hydration and temperature effects[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2003, **2003**(725): 131-142.
- [22] COCHEPIN B, TROTIGNON L, BILDSTEIN O, et al. Approaches to modelling coupled flow and reaction in a 2D cementation experiment[J]. Advances in Water Resources, 2008, **31**(12): 1540-1551.