

文章编号: 1000-7598-(2003) 05-0795-05

溶蚀岩体的溶渗作用及岩溶坝区的渗透性研究

张贵金, 徐卫亚, 赖 苗

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 溶蚀岩体的溶蚀作用漫长而不均, 处于岩溶坝区其溶渗作用会显著加剧, 机理更为复杂。坝区的渗透特性受高应力场的作用, 其固有的非均质各向异性更趋复杂, 采用确定性的方法不能准确的描述其本质特性。在分析溶蚀岩体溶渗作用的基础上, 对 K.G.Magomedov 预测模型进行了讨论, 提出了岩溶管道渗透特性的处理方法。对岩溶坝区透水性随机场进行分析, 考察岩溶坝区主要的两场作用, 即渗流与应力场的耦合, 基于 Taylor 随机有限元建立了渗流应力耦合的随机微分方程格式, 并对耦合随机模型反演求解渗透参数提出了思路。

关 键 词: 溶渗作用; 渗透特性; 岩溶坝区; 渗流应力耦合场

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Leaching of solution rock and permeability study under karst-engineering geological condition

ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya, LAI Miao

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Inherent heterogeneous and anisotropic properties of the seepage under karst-engineering geological condition expressed more complexity because of the effect suffered leaching and highly stress field. In this article, K.G.Magomedov's forecast model has been discussed based on analyzing leaching around the dam site. A disposal way for the permeability in karst pipeline has been given. The penetrating stochastic field around the dam site has been analyzed. A stochastic differential equation has been established for seepage-stress coupling based upon Taylor random FEM. A way has been given for seepage coefficient solution by using the coupling random modeling.

Key words: karst-engineering geological condition; seepage-stress coupling field; permeability; leaching

1 溶蚀岩体的溶渗作用及其预测模型

1.1 坝区赋存环境下的溶渗作用

溶蚀岩体, 特别是处于岩溶坝区的水文地质工程地质赋存环境下的溶蚀岩体, 受荷载作用、环境作用和结构材料内部因素等几方面的影响: ①荷载作用, 包括任一时点的荷载效应以及高坝坝基的高应力对基质岩体的累积损伤作用。累积损伤又包括持续不变荷载下结构损伤随时间的累积和动载下的累积损伤; ②水文地质环境对坝基岩体及其防渗结构性能的影响; ③内部材料, 即基质材料随时间的增长会逐渐老化, 岩溶岩体中的一些活性材料也会与其他组成材料, 包括地下水发生缓慢的化学反应。

老化和化学反应的结果是使材料的性能下降、强度降低。

在岩溶坝基的防渗体系受应力场-渗流场-化学场等耦合作用影响下, 其对结构的强度弱化和持续溶渗是一个渐变过程, 可导致坝基岩体和防渗结构的累积损伤、基岩材料劣化、溶渗贯通等不良后果^[1], 显著地增大了坝区的渗流量, 最终危及大坝的效益甚至坝体的安全。实际上, 很难确定是哪一个因素起了主导作用, 应是这些不利因素之间互相耦合综合影响的结果。国内胡友彪等^[2]在实验室内模拟动水条件, 进行一定时间的溶蚀作用, 一定程度上反映了自然真实情况: (1) 溶蚀作用包括了化学溶蚀和机械破坏两方面, 溶解作用要占总量的

收稿日期: 2002-09-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50128908) 资助和湖北省“十五”科技攻关项目 (No. 2002507430) 资助。

作者简介: 张贵金, 男, 1964 年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩石力学与工程风险研究。

90 % 以上, 岩溶的发育主要受富含 CO_2 的浸蚀性水流溶解所致, 浅部的岩溶发育强度强于深部, 具有更大的开放性, 易受大气、土壤、生物作用的影响使得地下水富含 CO_2 , 具有更大的的浸蚀性; (2) 溶蚀度随深度增加而减少。(3) 机械破坏作用量占 2 % ~ 14 %。应力破坏有利于岩溶作用的发展, 在水动力条件较好的区段, 岩溶相对发育。(4) 溶蚀作用指标与岩石化学成分分析结果比较, CaO 含量越低, 其比溶解度就越低。但未进行溶解速率的定量研究。张凤娥等^[3]根据样品在实验前后的重量差、岩样表面积大小和试验进行时间, 计算了样品的溶蚀速率。由于岩样结构和化学成分的不同, 导致溶蚀速率的差异, 表明不均匀溶解的速率显著地增强, 如图 1, 这与岩溶坝区的赋存环境是一致的。另外, 渗流速度小, 岩溶作用以化学溶解为主; 当渗流速度相对较大时, 岩溶作用则是化学溶解与物理浸蚀共同存在。

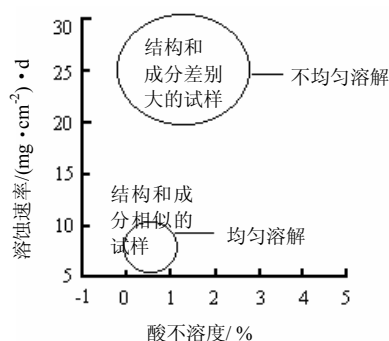


图 1 溶蚀速率与岩样化学成分之间的关系^[3]

Fig.1 Relationship between corrosion rates and chemical composition

1.2 溶渗预测模型研究

对溶蚀岩体的溶渗作用预测, 国内外研究甚少。K.G.Magomedov^[4] 等基于文献[5, 6]的研究, 对 Irganai Hes 坝的节理充填石膏的基岩的溶渗作用进行了预测研究。大坝开始运行后的任何时期溶渗区的规模, 可通过计算渗透方向的溶渗区的比率得到。基础沿各方向和长度的流线出现的渗透, 随压力梯度而改变。为确定溶渗区的大小, 应计算沿这些线基于压力梯度的溶渗率和持续时间。据此, 建立水动力模型, 并使用下列假定和参数: ①溶渗作用开始之前的渗透系数为 K_g ; 溶渗作用终止时变为 K_e ; ②石膏的可溶解性为 C_s ; ③进入地层的石膏在水中的含量为 C_0 ; ④ H 为该坝的总水头; ⑤ ρ 为石膏的密度; ⑥ ξ 为砂岩中裂隙石膏含量。

依据各种物质溶解率的标准微分方程式 (1) 修

正原模型:

$$\partial g / \partial t = AS(C_s - C) \quad (1)$$

式中 g 为时间从 0 ~ t 对材料溶解的量 (mg); S 为溶解体的表面积; C_s 为溶解能力; C 为时间 t 时的溶解溶度; A 为比例常数。推导得到溶蚀过程中裂隙宽度为

$$\delta_x = \delta_0 + (2AC_s t e^{-2K\xi/\delta_0}) / \rho\xi \quad (2)$$

初始条件: $t_0 = 0$; $\delta = \delta_0$ 。如果知道 δ_0 , 可以确定速度 v (确定节理中水流速度最方便的还是压力梯度) 和溶解常数 A , 进而根据饱和长度 X 和溶解时间 t 确定期望宽度 δ_x 。如图 2, 由式 (2) 可得到长度 X 的完全溶渗的时间为:

$$t = [\rho\xi(\delta_x - \delta_0)e^{-2K\xi\delta}] / AC_s \quad (3)$$

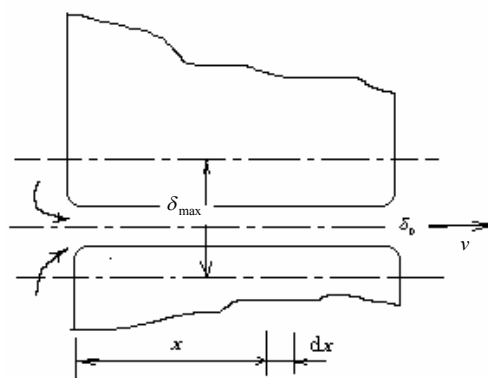


图 2 节理岩体的溶渗作用

Fig.2 Leaching from a jointed rock

通过计算, 得出常数并与 Oradovskaya, Laptev, Davion 的研究比较, A 基本符合下列曲线:

$$A = 0.66 \times 10^{-3} \sqrt{v} \quad (4)$$

该工程溶渗作用开始之前的渗透系数 $K_g = 0.04$ m/d, 溶渗作用终止时变为 $K_e = 10$ m/d, 石膏的可溶解性为 $C_s = 2.170$ b/liter, 输入到地层石膏在水中的浓度 $C_0 = 0.14$ g/liter, 该坝的总水头 $H = 111$ m; 石膏的密度 $\rho = 2.3$ g/cm³; 砂岩中裂隙石膏含量 $\xi = 0.3$ 。据此模型推测 20 m 长完全溶渗需 614 年。

研究发现, 该模型推导中还存在一些问题, 有些参数还难以确定, 且预测的溶渗时间还是没有办法进行验证。国内黄思静等^[7]的试验表明, 在近地表条件下和埋藏成岩作用的早期阶段, 由溶解作用造成的含膏白云岩地层的次生孔隙将比不含膏的白云岩地层更为发育, 而在非蒸发沉积环境中形成的白云岩体更易因深埋藏溶蚀作用而形成良好的储层。

2 岩溶蚀管道的渗透性模型

溶蚀岩体完全溶渗后就形成岩溶管道。由于存在复杂的溶渗作用, 必然增加渗透性的随机性程度和变异性程度。要反映岩溶含水系统三重含水介质特征, 并刻画其相应的运动规律, 利用折算系数法, 可以将含水介质中达西-非达西运动规律用一致的形式表达。岩溶管道中的折算渗透系数可由达西-魏斯巴赫公式推导得出:

$$K_L = 2gd / \lambda V \quad (5)$$

式中 λ 为沿程水头损失系数; d 为管道直径; V 为管道内平均流速; g 为重力加速度。岩溶管道水头损失系数 λ 可由水力学公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 64 / Re, \quad \text{层流} \quad (Re < 2320); \\ \lambda &= [1.14 - 211g(\frac{\Delta}{d} + \frac{21.25}{Re^{0.9}})]^2, \quad \text{紊流} \quad (Re \geq 2320) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 Re 为管道雷诺数; Δ 为管道粗糙度; d 为管道直径。岩溶管道折算渗透系数 K_L 是一随雷诺数变化的量, 不是常量。

3 岩溶坝区的渗透性

3.1 岩溶坝区透水性随机场概述

在岩溶含水介质中包含可溶岩组成的骨架(碳酸盐及其组成的矿物和颗粒)和被骨架所包围的孔隙空间(孔、缝、洞)。岩溶含水介质渗透性一般与岩体溶隙(裂)的宽度、密度(或隙间距)、充填程度、发育方向以及延伸性和穿层性等特征因素有关^[8], 岩溶水在含水介质中的渗透能力主要取决于连接孔隙空间的通道。岩溶含水介质中各种孔隙空间及其连接通道的分布、规模和组合型式在空间上的不均匀性和差异性, 具有随机性、结构性、非平稳性以及相对稳定性等特征, 这是导致渗透性空间分布随机性的根源。实际上, 由于岩溶发育的不均匀性, 以及人们的认识水平和信息的掌握程度等人为因素, 很难根据钻孔资料对岩溶含水介质渗透性空间分布参数做出准确的估计^[9]。

显然, 用一个固定大小的渗透系数(尽管取大值)来描述涉及岩溶通道的整个坝基地下水的流动, 是不真实的。将具有明显各向异性的渗透特性假定为各向同性的多孔介质而求得的渗透系数, 必然会给工程建筑物的稳定分析和渗透流量的计算带来很大误差^[10]。

经前人的统计分析, 一般情形下的渗透特性是

渗透系数 K 呈对数正态分布^[11]。 $Z = \ln(K)$, Z 满足正态分布, 即: $Z \sim N(\mu, \sigma)$ 。不同位置的随机变量 Z 具有不同的统计均值与方差, 均值和方差是坐标向量 X 的函数, 即 $\mu = \mu(X)$; $\sigma = \sigma(X)$ 。岩溶坝区的渗透性在空间上存在显著的变异性 and 不确定性, 应采用与坐标有关的随机函数对它进行描述。

3.2 渗流应力耦合作用研究概况

在内外荷载下, 对固体(应力)变形、流体压力(流动)交互作用的研究, 已成为许多土木和环境工程, 如大坝坝基、边坡、核废料存储等设计、运行、和安全研究的重要内容。在水电工程、石油开采、采矿等领域的大型工程中, 往往需要考虑渗流场和应力场之间的作用^[12]。如图3。耦合理论从20世纪50年代美国水库诱发地震分析的萌芽, 到70年代 Withr spoon 正式提出, 直至80年代以来 Noorishad 的完善发展, 这期间主要是研究工程岩体地下水渗流场与应力场之间的耦合作用。

国外的研究重点集中在核废料地下埋藏的安全问题。文献[13]建立了地下水流方程的随机公式, 但未考虑耦合作用。对裂隙岩体渗流应力耦合机理的研究及渗流应力耦合模型的建立等^[12], 国内陶振宇, 陈平、张有天, 杨延毅、周维垣, 段小宁等做了大量工作, 并将研究成果应用于多个大型水电工程。以重力坝坝基为算例进行了裂隙岩体渗流应力二维耦合分析, 并提出坝基上的水工建筑物设计, 应进行耦合分析以确保工程安全。

对于地处岩溶地区的水电高坝, 坝址区地质条件复杂, 力学性质和渗透特性均呈显著的非均质各向异性特征。随着在水库蓄水, 基岩的渗透性也将随之改变, 从而, 产生复杂的地下水渗流问题, 其影响范围和程度必须在防渗排水设计中予以充分考虑。分析岩溶坝区的渗透性规律时, 采用渗流应力耦合分析模型才是合理的。

本文对岩溶坝区的渗透特性进行研究, 忽略相对次要的水化学场、温度场的作用, 而考察主要的两场作用, 即坝区渗流与应力场的耦合作用, 基于随机理论研究渗透性的空间变异, 建立随机模型来描述这种耦合作用, 进而可反求具有随机特性的渗透参数。

3.3 渗流应力耦合随机模型

鉴于渗流应力耦合场存在的不确定性, 引入随机有限元进行分析, 并建立随机渗流偏微分控制方程。这里采用常用的 Taylor 展开法随机有限元^[14]。其基本思想是将有限元格式中的控制量在随机变量的均值处进行 Taylor 展开, 经适当数学处理得到所

需的计算公式,利用这些公式可求得相应的统计量。

假定各单元的渗透系数 K (对岩溶管道, K 是一折算了的渗透系数), 水头 H (或渗透压力 P ; 渗流量 Q), 应力 σ 都是随机变量。一次 Taylor 展开随机有限元忽略了二阶以上高阶项, 使其对随机变量的变异性有所限制, 一般要求变异系数小于 0.2 或 0.3。对二阶的情况该限制可以放宽^[15]。对于岩溶坝区, 由于可能存在未遇见的岩溶贯通通道, 使得这些随机变量的变异可能达到 0.5 甚至更大。故应用二次 Taylor 展开随机有限元^[14]。

(1) 对应力场: 在流体渗透压力场作用下岩体连续介质的应力场数学模型控制方程为^[16]

$$\{\sigma\} = [D][B]\{U\} + \{P\} \quad (7)$$

式中 $\{\sigma\}$ 为岩体的应力列阵; $[D]$ 为弹性矩阵; $\{U\}$ 为岩体的位移列阵; $[B]$ 为岩体的几何矩阵; $\{P\}$ 为流体渗透压力列阵。记随机列向量 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}^T$, 将应力在随机变量的均值处进行 Taylor 展开, 略去三阶以上的高阶项得

$$\sigma_i = \sigma_i(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_n) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \sigma_i}{\partial p_j} \bigg|_E (p_j - \bar{p}_j) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^n \frac{\partial^2 \sigma_i}{\partial p_j \partial p_m} \bigg|_E (p_j - \bar{p}_j)(p_m - \bar{p}_m) \quad (8)$$

式中 σ_i 为第 i 个节点的应力; $(\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_n)$ 为随机变量的均值; $\frac{\partial \sigma_i}{\partial p_j} \bigg|_E$ 为第 i 个节点应力对第 j 个随机变量的偏导数在均值处的取值。对上式取均值和方差运算, 可得第 i 个节点应力的统计均值和方差:

$$\left. \begin{aligned} E[\sigma_i] &\approx \bar{\sigma}_i; \\ \text{Var}(\sigma_i) &\approx \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial \sigma_i}{\partial p_j} \bigg|_{p=\bar{p}} \frac{\partial \sigma_i}{\partial p_k} \bigg|_{p=\bar{p}} \text{Cov}(p_j, p_k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

场内渗透压力之间显然存在必然联系。对有限元支配方程两边同时求导, 得

$$\frac{\partial \sigma}{\partial p_i} = DB \frac{\partial U}{\partial p_i} + \frac{\partial P}{\partial p_i} \quad (10)$$

(2) 对渗流场: 控制方程为^[15]

$$[K(\sigma, P)]\{P\} + \{Q\} = [S, (\sigma, P)] \left\{ \frac{dP}{dt} \right\} \quad (11)$$

式中 $[K(\sigma, P)]$ 为考虑应力作用的渗透矩阵; $\{H\}$ 为水头列阵 $H = z + p/g$, z 为位置标高; r 为地下水重度; $\{Q\}$ 为源汇项列阵; $[S]$ 为考虑应力作用的储水

矩阵。记随机列向量 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}^T$, 则 K, P, Q 是 k 的函数, 渗透压力 P 表示为

$$P_i = P_i(\bar{k}_1, \bar{k}_2, \dots, \bar{k}_n) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial p_i}{\partial k_j} \bigg|_E (k_j - \bar{k}_j) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^n \frac{\partial^2 p_i}{\partial k_j \partial k_m} \bigg|_E (k_j - \bar{k}_j)(k_m - \bar{k}_m) \quad (12)$$

同上可求得第 i 个节点渗透压力的统计均值和方差。

$$\left. \begin{aligned} E[p_i] &\approx \bar{P}_i; \\ \text{Var}(p_i) &\approx \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial p_i}{\partial k_j} \bigg|_{k=\bar{k}} \frac{\partial p_i}{\partial k_k} \bigg|_{k=\bar{k}} \text{Cov}(k_j, k_k) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 $\text{Cov}(k_j, k_k)$ 为随机变量 k_j, k_k 之间的协方差。场内不同点处的渗透性存在一定的联系, 是相关的, $\text{Cov}(k_j, k_k) \neq 0$, 由地质统计学方法求得。再对有限元支配方程两边同时求导, 由于

$$\frac{\partial H}{\partial k} = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial k} \quad (14)$$

$$\text{得} \quad \frac{\partial K}{\partial k_i} H + \frac{k}{r} \frac{\partial P}{\partial k_i} + \frac{\partial Q}{\partial k_i} = \frac{S}{r} \frac{\partial P}{\partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial t} \quad (15)$$

若 S 随机性较小, 实际上, 从耦合模型中也可看出, 储水系数 S 不是两场的状态方程共同的变量, 即表示其参与耦合的作用不强或不直接, 故可近似将其视为确定量。对于稳定流, 有限元离散后的整体渗透矩阵由各单元的渗透矩阵叠加而成:

$$K = \sum_e K^e \quad \text{故} \quad \frac{\partial K}{\partial k_i} = \sum_e \frac{\partial K^e}{\partial k_i}$$

对二维渗流, 渗透矩阵为

$$K^e = \iint B^T \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} B d\Omega \quad (16)$$

可得单元渗透矩阵对渗透系数的偏导数

$$\frac{\partial K^e}{\partial k_x} = \iint B^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} B d\Omega \quad (17)$$

$$\frac{\partial K^e}{\partial k_y} = \iint B^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} B d\Omega \quad (18)$$

计算出渗透压力对渗透系数的偏导数后, 进而求出渗流场随机有限元分析中的方差。

值得注意的是, 以上各式的微分并非一般的微分, 而是均方微分。

(3) 对渗流应力的耦合关系: 其模型建立由实验和地质统计得到。为减少随机变量数, 不再考虑其它变量的随机性, 在取值时设为确定值。

3.4 随机模型的求解

理论上, 随机偏微分方程的求解只能应用随机的方法。由于其解析解通过随机变量的概率密度函数来推求, 数学上还不能解复杂的问题^[17], 因此, 从工程实用出发, 应用数值方法求其近似解。目前, 成熟的是随机有限元法, 其中, 最常用的是 Taylor 和 Monte-Carlo 随机有限元等, 另外, 还有谱分解与有限元结合的谱分析法。如 Monte-Carlo 随机有限元, 能分析解过程, 包括三部分内容: 先是对随机渗流模型中的随机量进行数值模拟; 再以这些模拟值代入控制微分方程, 进而求解确定性微分方程; 最后, 对若干次模型计算结果进行统计分析, 即获得各种概率条件下的渗流场的分布特征。由于失效概率 P_f 计算的精度与抽样数有关, 一般要求: $N \geq 100/P_f$, 实际工程中 P_f 一般较小, 模拟次数 N 就很大, 极大地影响了效率。而 Taylor 展开法则是一种效率较高的实用方法。

本耦合问题的最佳求解策略是将固体变形与地下水渗流分别看成两个系统进行迭代求解。进而利用耦合关系即可反求得到渗透系数。

4 结 语

由于岩溶区的水电工程处于复杂的水文地质环境, 加上溶蚀岩体的溶渗作用, 受实验条件的限制, 国内外对溶蚀岩体的溶渗作用研究成果很少, 溶渗的预测还缺乏合适的定量描述。坝区的渗透特性异常复杂, 要准确掌握其渗透规律几乎是不可能的。

由于岩溶坝区渗控工程的工作量巨大, 且影响该项工程设计的不确定性因素显著, 须对其渗透规律进行更深入地研究, 在此基础上, 进行工程风险分析与优化设计十分必要。目前, 对工程岩体赋存地质环境各因素之间相互作用的研究, 国内外的全面完整研究还不够, 研究主要集中在随机渗流方面, 对渗流应力耦合场的随机性研究甚少, 仅对平面的情况做了初步探讨。

对于岩溶坝区的情形, 随机耦合模型考虑渗流应力耦合场的随机性, 能更客观准确地描述岩体的渗流状态。理论上, 本文的随机耦合模型综合考虑多种随机因素, 适用于任何区域性随机场, 尤其在岩溶坝区防渗帷幕风险分析中会更准确地反映客观实际。但将其应用于工程实际, 还有许多问题需研究: 如模型的进一步优化改进, 随机模型的求解方法, 更多随机变量的考虑, 其它场如水化学场的影响即岩体的溶蚀作用的考虑, 等等。

参 考 文 献

- [1] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 120—125.
- [2] 胡友彪, 白海波, 赵海峰. 徐州新河矿太原组灰岩溶蚀试验研究[J]. 江苏煤炭, 1997, (3): 7—10.
- [3] 张凤娥, 卢耀如. 硫酸盐岩溶蚀机理试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2001, (5): 12—16.
- [4] Magomedov K G. Forecasting leaching in jointed Gypsum-impregnated rocks at the base of the Irganai Hens dam[J]. *Hydrotechnical construction*, 2000, 34 (7). Translated from *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, 2000, July (7): 21—25.
- [5] Technical report at Vedenev Geological Research Institute on Research and Development: Researches on the infiltration at the base of the Irganai Dam and Adjacent Rock Structure [R]. Russian: [s.n.], 1980.
- [6] Nedriga V P, Dem'yanova E A. Calculating gypsum leaching from rocks and foundations of dam structures[R]. Russian: [s.n.], 1981.
- [7] 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 石膏对白云岩溶解影响的试验模拟研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 103—108.
- [8] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994, 123.
- [9] 张征, 刘淑春, 鞠硕华. 岩溶含水介质渗透性参数空间最优估计的原理与方法[J]. 水文地质工程地质, 1995, (6): 27—30.
- [10] 张征, 刘淑春, 邹正盛, 等. 岩溶含水介质渗透性参数的空间最优估计模型[J]. 工程勘察, 1996, (5): 28—31.
- [11] Feinerman E, Dagen G, Bersler E. Statistical inference of spatial random function[J]. *Water Resource Research*, 1986, 22 (6): 14—35.
- [12] Lanru Jing, Yue Ma, Zulie Fang. Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38: 343—355.
- [13] Gomez-Hernandez J J, Hedricks Franssen H J, Cassiraga E F. Stochastic analysis of flow response in a three-dimensional fractured rock mass block[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2001, 38: 31—44.
- [14] 刘宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001, 51—54.
- [15] 盛金昌, 速宝玉, 赵坚, 等. 渗流应力耦合分析研究及在溪洛渡水电站坝址区的应用[J]. 岩石力学, 2000, (3): 303—309.
- [16] 仵彦卿. 岩体水力学基础(三)——岩体渗流场与应力场耦合的集中参数模型及连续介质模型[J]. 水文地质工程地质, 1997, (2): 54—57.
- [17] 张炳根, 赵玉芝. 科学与工程中的随机微分方程[M]. 北京: 海洋出版社, 1980, 190—210.