

文章编号:1000-4874(2003)06-0742-06

裂隙双重介质地下水运动 参数反演分析^{*}

周志芳

(河海大学,江苏南京 210098)

摘 要: 根据三峡二期工程施工揭露的地质、水文地质情况,建立了施工期裂隙岩体三维双重介质地下水运动数值模型。基于结构面控制反演法原理,以流量为已知量,以水文地质条件为基础,以水位拟合为目标,反演获得了三维双重介质的渗透系数张量、贮水率和迁移系数等。

关 键 词: 双重介质;渗透参数;反演法;三峡工程

中图分类号: O357.3, TV139.1 **文献标识码:** A

Inverse analysis of parameters for groundwater movement in fissured double media

ZHOU Zhi-fang

(Hehai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the geological and hydrogeological conditions exposed by Three Gorge Project's 2nd-stage construction, the mathematical model for the groundwater movement through the 3D double media of rock mass during construction is established in this paper. Based on the discontinuity-control inverse theory, some relative parameters, such as hydraulic conductivity tensor, specific storage and transport coefficient, etc. of 3D double media are inversed with flux being the known quantity, hydrogeological conditions being the base and calibration of water table as the objective function.

Key words: double media; hydraulic conductivity; inverse analytic method; Three Gorge Project

1 概述

三峡工程坝址区的闪云斜长花岗岩构造断裂按其规模和断裂结构面的水文地质特性,明显地可分为两类:一类是分布相对密集、数量多、分布广、规模

小、结构面空隙总体较大,而每个结构面透水性相对较弱的裂隙,泄洪坝段二期工程施工开挖岩体露头共实测到该类裂隙(长度>5m) 5827条;另一类是分布相对稀疏、数量少,结构面空隙总体积较小,但每组结构面规模较大、延伸长、透水性相对较强的大

^{*} 收稿日期: 2001-09-03

基金项目: 国家自然科学基金和自然科学基金重点基金资助项目(50179010和50239070)

作者简介: 周志芳(1962~),男,江苏丹阳人,教授,博士,博导。

裂隙(断层),该大裂隙对岩体整体上地下水运动起控制作用,泄洪坝段二期工程施工开挖岩体露头共发现该类裂隙(断层)67条,按走向主要分为四组。类似于1960年 . . . a 等人提出的“孔隙—裂隙二重性”假定,岩体在整体上构成了裂隙双重介质。关于孔隙—介质裂隙双重介质,1976年 T. D. Sterlitsova 建立了相应的数学模型,1984年张幼宽用有限元方法计算了二维裂隙—岩溶含水层双重介质渗流问题^[4]。对三维双重介质地下水运动问题,尤其是三维裂隙岩体双重介质地下水运动参数反问题国内外研究的较少。

裂隙岩体双重介质地下水运动参数(渗透系数张量、贮水率、迁移系数等)是研究裂隙岩体双重介质地下水运动问题的非常重要的参数。本文以三峡二期工程施工区为例,基于结构面控制反演法原理^[2],从裂隙岩体双重介质地下水运动的基本运动方程出发^[1],以流量为已知量,以水文地质条件为基础,以水位拟合为目标,用三维有限元法与最优化方法相结合,反演双重介质的渗透系数张量、贮水率和迁移系数等。

2 坝区地质环境

2.1 地形地貌

泄洪坝段位于长江枯水河床和右岸漫滩(包括史经滩、中堡岛)两部位。开挖后地形形态与设计轮廓基本一致,仅局部坝段因设计优化或缺陷处理而略有差异。总体趋势是,各坝段建基面底板高程自中堡岛向主河床逐渐降低。泄1[#]~泄4[#]坝段位于大江河床深槽区,建基面高程由上游4~10m以1:6坡比向下游抬升,到下游的高程为15~21m;泄5[#]~泄8[#]坝段由高程21m逐步抬高至31m;泄9[#]~泄17[#]段由高程21m逐步抬高至35m;泄18[#]~泄23[#]坝段由高程38m逐步抬高至50m。

2.2 岩性、构造

建基岩体主要为前震旦系闪云斜长花岗岩,其中侵入有花岗岩脉、伟晶岩脉,还有少量的闪长岩包裹体。

区内共发现断层67条,按走向主要分为以下四组。NNE组:走向5°~30°,倾NE为主,倾角55°~75°,多斜穿泄洪坝段,共见25条,占总数的37.3%。NN-NEE组:走向54°~85°,倾NW为主,倾角65°~85°,共见12条,占总数的17.9%。NNW组:走向270°~295°,倾NE为主,倾角55°~83°,共

见12条,占总数的17.9%。NNW组:走向NW330°~353°,倾SW为主,倾角58°~80°,共见11条,占总数的16.4%。区内断层长度小于30m共见18条,30~50m共见23条,50~100m共见15条,100~200m共见8条,大于200m共见3条。

泄洪坝段实测裂隙(长度>5m)5827条,其中陡倾角裂隙3773条,占总数的64.8%,中倾角裂隙1386条,占总数的23.8%,缓倾角裂隙668条,占总数的11.4%。

3 双重介质参数反演基本原理

3.1 双重介质模型

三峡工程坝址区的闪云斜长花岗岩构造断裂按其规模和断裂结构面的水文地质特性,分为两类:一类分布相对密集、数量多、分布广、规模小、结构面空隙总体较大,而每个结构面透水性相对较弱的裂隙,该裂隙系统相互交织成不规则网格状,我们将这类裂隙构造的介质称之为分枝(Ramification)裂隙介质。另一类是分布相对稀疏、数量少,结构面空隙总体积较小,但每组结构面规模较大、延伸长、透水性相对较强的大裂隙(断层),该大裂隙对岩体整体上地下水运动起控制作用,将这类裂隙构造的介质称为主干(Artery)裂隙介质。岩体地下水主要贮存在分枝裂隙中,而运动在主干裂隙中。这样岩体在整体上构成了(分)枝-(主)干裂隙双重介质。为了建立核-干裂隙双重介质地下水运动的微分方程,假定枝-干两类裂隙广泛发育于整个研究区,形成两个重叠的连续系统;岩体总的渗透性取决于主干裂隙的渗透性;场内任意一点上都有两个水头,一个分枝裂隙水头 H_r ,另一个是主干裂隙水头 H_a ;枝-干两类裂隙的初始水头相等,两者之间交换的水量与其水头差成正比。由水流连续性原理不难推得双重裂隙三维地下水运动的微分方程

$$\mu_s^a \frac{\partial H_a}{\partial t} + \mu_s^r e^{-r(t-\tau)} \frac{\partial H_a}{\partial \tau} = \text{div}(K^a \text{grad} H_a)$$

其中, K^a 为主干裂隙介质的渗透系数张量; μ_s^a 、 μ_s^r 为主干裂隙介质和分枝裂隙介质的贮水率; $r = \frac{c}{\mu_s^r}$,称为迁移系数, c 为比例常数; t 为时间。

和一般裂隙介质地下水运动微分方程相比较,上式增加了左边第二项,它是一个和时间有关的量,

称为迟后效应项。为了简洁起见,采用张量形式表示上式为

$$\mu_s^a \frac{\partial H_a}{\partial t} + \mu_s^r r e^{-r(t-\tau)} \frac{\partial H_a}{\partial \tau} d = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij}^a \frac{\partial H_a}{\partial x_j} \right)$$

式中 $i, j = 1, 2, 3$, 符合爱因斯坦求和约定 (Einstein summation convention)。

对应双重介质主干裂隙地下水运动的微分方程的定解条件为:

$$H_a(x_i, t) \big|_{t=0} = 0(x_i),$$

$$(x_i), \quad \text{初始条件};$$

$$H_a(x_i, t) \big|_{x_1} = 1(x_i, t), (x_i) \quad 1,$$

$t > 0$, 第一类边界条件 (Dirichlet 条件);

$$K_{ij}^a \frac{\partial H_a}{\partial x_j} \cos(n, x_i) \big|_{x_2} = q_0(x_i, t), (x_i) \quad 2,$$

$t > 0$, 第二类边界条件 (Neumann 条件)

式中 $0(x_i)$, $1(x_i, t)$ 和 q_0 为已知函数; n 为边界 x_2 的外法线方向。

3.2 参数反演优化模型

以某试验钻孔流量为已知量,根据该钻孔不同时刻水头观测值与计算值之误差,用最小二乘法建立目标函数^[3]

$$E(K_j^i, \mu, r) = \sum_{k=1}^M \sqrt{(H_k^c - H_k^o)^2}$$

其中: K_j^i 为待求的系数,上标 i 表示根据岩体透水性划分的第 i 个子区, $i = I, II, \dots, NK$, NK 为分区总数;下标 j 表示第 i 个子区中第 j 个数, $j = 1, 2, \dots, MK$, MK 为某子区参数的总数。 k 为

钻孔水头观测值第 k 时刻的权函数,且有 $\sum_{k=1}^M k =$

1.0。 M 为区域内观测点的总数。 H_k^c 为钻孔第 k 时刻的计算水位值, $[L]$ 。 H_k^o 为钻孔第 k 时刻的观测水位值, $[L]$ 。 μ 为贮水率。 r 为迁移系数。

显然,我们的目的是欲求一组反映客观裂隙岩体双重介质地下水运动规律的参数 K_j^i ($i = I, II, \dots, NK; j = 1, 2, \dots, MK$)、贮水率 μ 、迁移系数 r , 使目标函数 E 趋于零。

3.3 双重介质渗流有限元基本原理

选择直角坐标系 $oxyz$, 略去数模中 H_a 、 K_{ij}^a 的下标和上标 a , 用 Galerkin 法定义研究区域上的试探解,选择基函数 $N_L(x_i)$ 作为权函数。据定积分的有关性质,有

$$\int_V \left(K_{ij} \frac{\partial H^e}{\partial x_j} \right) \frac{\partial N_L}{\partial x_i} + \mu_s^a \frac{\partial H^e}{\partial t} N_L(x_i) +$$

$$\left(\mu_s^r r e^{-r(t-\tau)} \frac{\partial H^e}{\partial \tau} \right) N_L(x_i) d =$$

$$\int_D \left(K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \cos(n, x_i) N_L(x_i) ds$$

对于上式中枝裂隙引起的迟后效应项积分,在某个单元上为

$$\int_e \left(\mu_s^r r e^{-r(t-\tau)} \frac{\partial H^e}{\partial \tau} \right) N_L(x_i) d$$

对于上式三重积分的被积函数的积分,用求和近似代替。在时间区间 $[0, t]$ 内假定共划分为 n_i 个时间段,每个时间段的步长为 τ 。这样有

$$r_e = \sum_{k=1}^8 N_k N_L d \frac{d H_k}{d t}$$

$$r_e = \mu_s^r r \left(e^{-r(t-i\tau)} - e^{-r(t-(i-1)\tau)} \right),$$

$$L = 1, 2, \dots, 8; i = 1, 2, \dots, 8)$$

因此,某一单元 e 有

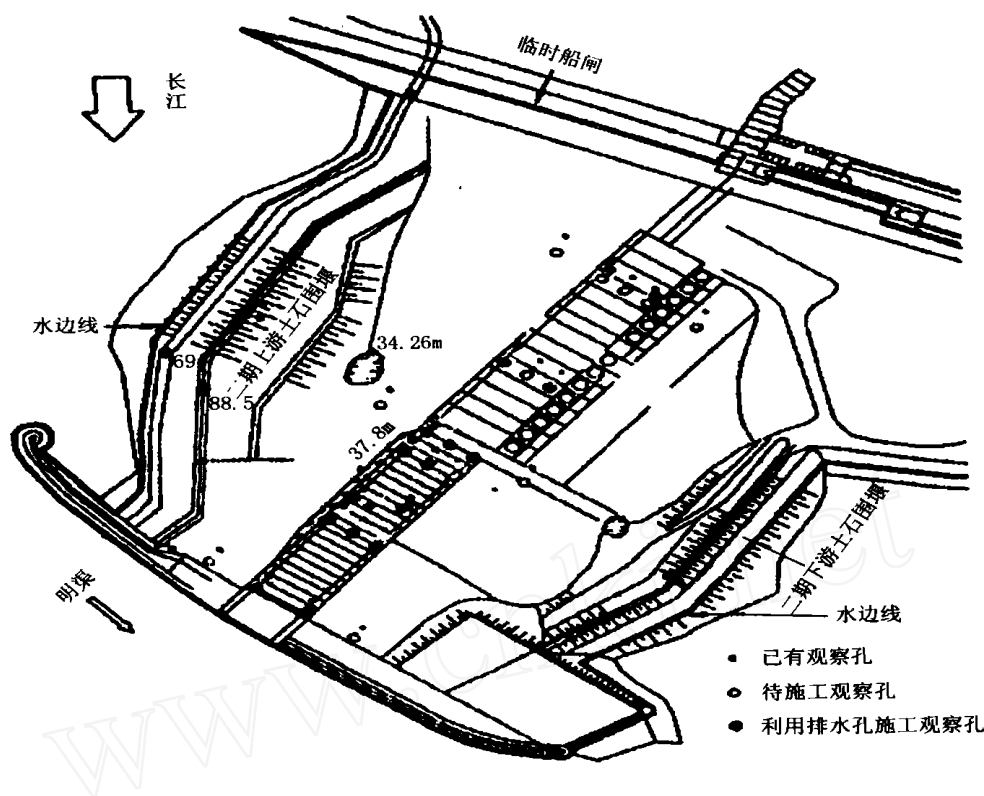


图1 双重介质计算模拟范围

$$(G_{L,1}^e, \dots, G_{L,8}^e) \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ M \\ H_8 \end{Bmatrix} + (P_{L,1}^e, \dots, P_{L,8}^e) \begin{Bmatrix} \frac{dH_1}{dt} \\ \frac{dH_2}{dt} \\ M \\ \frac{dH_8}{dt} \end{Bmatrix} +$$

$$R_{L,k}^e = r_e \quad N_k N_L d \quad ,$$

$$F_L^e = q N_L ds$$

$$(R_{L,1}^e, \dots, R_{L,8}^e) \begin{Bmatrix} \frac{dH_1}{dt} \\ \frac{dH_2}{dt} \\ M \\ \frac{dH_8}{dt} \end{Bmatrix} = F_L^e$$

其中

$$G_{L,k}^e = \sum_e (K_{ij} \frac{\partial N_k}{\partial x_j}) \frac{\partial N_L}{\partial x_i} d \quad ,$$

$$P_{L,k}^e = \mu_s^a N_k N_L d \quad ,$$

各单元渗透矩阵求和后,对于 $\frac{dH}{dt}$ 取采用“隐式差分格式”代替,因此不难得到求解整个渗流问题的代数方程。

4 双重介质参数反演计算

4.1 水位拟合

三峡工程二期施工开挖的坝基基岩露头明显地反映出,坝基岩体具有枝-干裂隙双重介质的特征。在泄洪坝段(深槽部位)廊道内,孔号为 1x-F6 的钻孔中详细记录了孔口涌水量、孔口水头随时间的变化过程(如图 3),涌水量试验自 2000 年 11 月 22 日 16 时 42 分开始至 11 月 25 日 13 时 27 分结束。已知该孔的地理座标为 (20012.8, 48723.3) 孔口高程为 15.0m,孔深为 104.8m,对应坝段建基面高程为 10.0m。为了获得双重介质地下水运动参数,我们基

于结构面控制反演法原理,将四组主干裂隙作为控水结构面,以流量为已知量,以水文地质条件为基础,以水位拟合为目标,反演双重介质地下水运动参数。反演计算范围包括整个大坝二期工程上、下游围堰之间,北东至临时性船闸,南西到导流明渠(如图1)。研究区采用六面体单元剖分,共剖分为11256个单元,13242个结点(如图2)。研究区对应时段周边江水位(67.0m)、泄1至泄16坝前积水水位(38.0m)、坝前排水基坑水位(34.26m)、坝后排水基坑水位(10.80m)作为第一类边界条件处理。

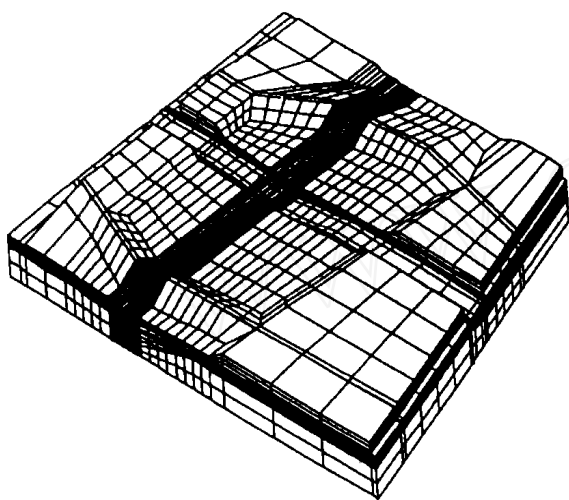


图2 研究区剖分图

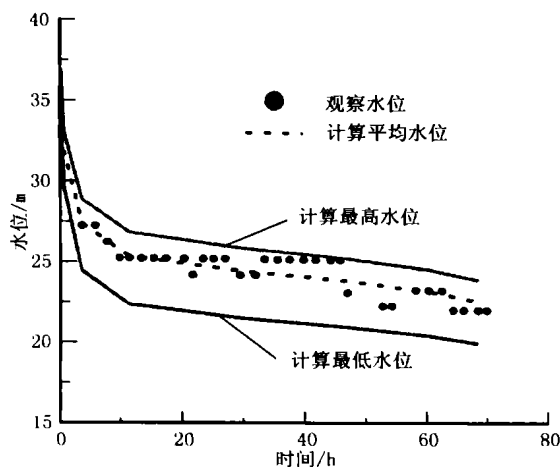


图3 水位随时间的拟合变化过程

在总共34个观测时段中,间隔选择六个时刻的水头作为拟合水头,经参数反复调整,得计算水头与观测水头对比如表1。试验钻孔在垂直方向上划分

了6个剖分节点,各时刻6个节点水位的最大值、最小值和加权平均值随时间变化过程如图3。同时,将所有观测水位值(共34个)作到拟合计算的时间-水位曲线坐标上(如图3)。从图中看出计算水位很好地反映了观测水位随时间的变化过程。

4.2 参数反演成果及分析

对应计算水头与观测水头拟合表1,选取y轴与坝轴线平行,x轴自上游指向下游,z轴铅直向上符合右手螺旋法则的坐标系,反演计算的双重介质地下水运动参数值如表2和表3。

表2反分析求得的主干(Artery)裂隙介质渗透系数张量,在泄洪坝段深槽区较其它坝段区大近一个量级,验证了泄洪坝段深槽区花岗岩体风化作用相对较强、岩体完整性较差、透水性相对较好的特征,同时也与该区压水试验的 Lu 值偏大相一致。

由于试验钻孔位于泄洪坝段深槽区,因此表3反分析求得的贮水率主要反应泄洪坝段深槽区介质的特性。从表3中看出,干裂隙介质贮水率 μ_s^a 较枝裂隙介质贮水率 μ_s^r 小近一个量级,符合双重介质模型假定中枝裂隙介质以贮水为主的假设。据表3反分析求得的迁移系数 r 和枝裂隙介质贮水率 μ_s^r 可以计算出干裂隙与枝裂隙的水量交换系数

$$c = r\mu_s^r = 0.417 \times 0.00048 = 2.0 \times 10^{-4} (1/\text{md})$$

迁移系数 r 值的大小反映了枝裂隙和干裂隙发育情况及其连通程度, r 值越大,从枝裂隙向干裂隙迁移的水量就越多。

5 结语

本文基于结构面控制反演法原理,依据钻孔地下水的长观资料,考虑到岩体透水性的不均一性和结构面控水的特点,反演分析计算双重介质地下水运动参数值,方法可行、原理简单、操作方便。该方法反演计算获得的干裂隙渗透系数张量、迁移系数 r 、枝裂隙介质贮水率 μ_s^r 和干裂隙介质贮水率 μ_s^a 较好地反映了研究区裂隙双重介质地下水运动特征。表明文章建立的裂隙岩体三维双重介质地下水运动数值模型,较系统、完整地描述了三峡二期工程施工揭露的地质、水文地质情况。

表 1 反演计算中的水头拟合

时段	时间 (h)	计算水头 (m)	观测水头 (m)	绝对误差 (m)	备注
1	0.0833333	36.43			
2	0.5833333	31.71			
3	3.4633333	27.15	27.00	0.15	试验孔的平
4	11.428924	25.11	25.00	0.11	均涌水量为
5	29.460520	24.27	24.00	0.27	48.36(m ³ /d)
6	49.18920	23.72	23.00	0.72	
7	62.512920	23.14	23.20	0.06	
8	69.628920	22.58	22.00	0.58	

表 2 反演计算的坝基各向异性岩体渗透主值及主方向

位置		泄洪坝段深槽区			其它坝段区		
渗透主值		K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
(m/d)		0.00726	0.02250	0.02976	0.00104	0.00321	0.00425
主	$\cos \alpha_1$	0.8688	0.4066	0.2820	0.8688	0.4066	0.2820
方	$\cos \alpha_2$	- 0.3867	0.9130	- 0.1260	- 0.3867	0.9130	- 0.1260
向	$\cos \alpha_3$	- 0.2924	0.0351	0.9511	- 0.2924	0.0351	0.9511

表 3 反演计算的其它相关参数值

参数名称	干裂隙介质 贮水率 μ_s^d (l/m)	枝裂隙介质 贮水率 μ_s^r (l/m)	迁移系数 r (l/d)	围堰堤坝 渗透系数 [*] (m/d)	堤坝帷幕 渗透系数 [*] (m/d)
大小值	0.000069	0.00048	0.417	0.20	0.0864

注: * 给定参数值

参 考 文 献:

[1] 朱学愚,谢春红.地下水运移模型[M].北京:中国建筑工业出版社.1990.

[2] 周志芳,朱学愚.确定岩体渗透参数的结构面控制反演法[J].南京大学学报,1999,(3):316-322.

[3] 金忠青,周志芳.工程水力学反问题[M].南京:河海大学出版社.1997.

[4] 张幼宽.裂隙-岩溶含水层双重介质渗流模型及其里兹有限元解[J].工程勘察,1985,(4):57-62.