

# 某水电站坝址区三维渗流参数反演

祁涛, 张均锋

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 用有限元法对某水电站坝址区的渗流场参数进行了反演, 结合工程地质和水文地质资料以及坝区的钻孔抽水试验, 反演得到了各覆盖层的渗透系数, 并计算了整个坝址区的渗流场, 为大坝建成后运营期的渗流场计算提供了基础。

**关键词:** 渗流力学; 水电站; 渗流场; 参数反演

**中图分类号:** TV 139.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)20 - 3766 - 05

## INVERSE ANALYSIS OF SEEPAGE PARAMETERS FOR DAM FOUNDATION OF A HYDROPOWER STATION

QI Tao, ZHANG Jun-feng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** According to the engineering geology and the hydrogeology of a certain hydropower station, a finite element model with 8 geological layers and complicated boundary condition is built. The experimental results of drilling test, the pumping well test and the injection test are collected and selected as the reference points in the process of inverse analysis. The inverse analysis result shows that it is in good agreement with the experimental result at the reference points. The permeability coefficients for each geological layer and region are obtained; and the seepage field of the whole foundation of the dam has also been calculated. All of these provide the fundamental parameters for the design of dam or further analysis to check the rationality of the engineering design.

**Key words:** seepage mechanics; hydropower station; seepage field; inverse analysis

### 1 引言

多数水电站坝址区的地形条件、水文地质条件较为复杂, 主要表现为覆盖层深厚, 且分层较多。在厂区设计和大坝建设之前, 首先要对整个坝区的地下水渗流情况有较全面的了解<sup>[1]</sup>。根据坝区的工程地质和水文资料(钻孔勘探和抽水水试验), 将各地层的渗透特性进行有效的反演, 并用于进一步计

算大坝建成后的整体渗流情况, 以确保水电站的正常运行<sup>[2~5]</sup>。

文[1]介绍了渗流参数反演的基本方法, 包括正算法和反算法; 文[6]采用二次规划的方法, 对复杂渗流问题进行了优化; 文[7, 8]对裂隙渗流问题做了研究; 文[9]为了提高计算效率, 提出了把水头函数用级数展开的新方法; 文[10]考虑了温度场的耦合效应。

本文基于某水电站坝区已有的地质和水文资

**收稿日期:** 2005 - 06 - 14; **修回日期:** 2005 - 08 - 01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10372104); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706)

**作者简介:** 祁涛(1982 - ), 男, 2004年毕业于清华大学工程力学专业, 现为硕士研究生, 主要从事滑坡机理及渗流方面的研究工作。E-mail: seas1982@163.com。

料, 利用有限元方法对坝区的渗流场参数进行了反演, 并与钻孔勘察和试验的结果进行了对比。反演结果表明: 计算坝区的渗流场分布与工程实际基本一致, 所得到的各地层渗透特性为进一步分析大坝建成后的渗流场分布和校验工程设计方案提供了基础。

## 2 坝区的工程地质和计算模型

### 2.1 坝区工程地质描述

坝址区位于长约 800 m 的河段内, 坝区内谷坡地形较完整、河道顺直, 河流由西向东流经坝区。坝区河床覆盖层深厚, 河谷横断面为较对称的“V”型峡谷, 岩层与岸坡近于正交, 为横向谷。两岸谷坡陡峻, 高程在 2 480 m 以下, 平均坡度为  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ , 高程在 2 480 m 以上, 平均坡度则为  $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ , 临河坡高 300 m 以上。坝基处枯水期河水位高程为 2 412 m, 正常蓄水位高程为 2 540 m。

坝基河床覆盖层深厚, 近 100 m, 渗透性强, 抗渗性很低, 且分层较多, 各分层 10~40 m 不等。两岸分层包括微新岩体(微透水岩体, Lu 值 $<1$ )、弱透水岩体(Lu 值= 1~3)、中等透水岩体(Lu 值= 3~10)、强透水岩体(Lu 值 $>10$ )、极强透水岩体(Lu 值 $>100$ )。河岸部分表面一层为极强透水岩体(Lu 值 $>100$ ), 河床部分表面层为河床覆盖层, 第二层为中强透水层(Lu 值 = 1~100), 下层为微新岩体。河床覆盖层主要有 5 层, 沿河谷纵横方向厚度变化都比较大, 水文地质条件复杂。坝基下地质分层共为 5 层覆盖层, 各层厚度不同:

- (1) 覆盖层①: 含砂漂(块)卵砾石层( $Q_3^{gl+gl}$ );
- (2) 覆盖层②: 粉质壤土与粉细砂互层( $Q_3^1$ );
- (3) 覆盖层③: 含砂漂(块)卵砾石层( $Q_4^d$ )及块碎砾石土层( $Q_4^{col+dl+al}$ );
- (4) 覆盖层④: 含碎砾石砂层、粉质壤土层( $Q_4^d$ );
- (5) 覆盖层⑤: 含漂卵砾石层( $Q_4^d$ )。

第②层为粉质壤土与粉细砂互层, 结构较紧密, 是微弱透水层( $10^{-5}$  cm/s), 第④层为含碎砾石砂层、粉质壤土层, 其他覆盖层渗透性较大。各覆盖层的抗渗能力均较低, 其中①, ③, ⑤层的允许渗透梯度为 0.10~0.18 左右; ②, ④层的允许渗透梯度稍大, 为 0.30~0.40 左右。两岸坝肩岩体强卸荷带渗

透性强, 绕坝渗漏问题也突出。考虑到地震、不均匀沉降等各种不利因素的作用, 坝基混凝土防渗墙可能在某些部位发生局部开裂, 裂缝的开度、分布密度和形式都将对坝基渗流场的分布、坝基渗透稳定性产生影响, 因此工程防渗系统的设计尤为重要。

### 2.2 计算范围与模型建立

水电站坝址区的渗流计算范围为: 沿坝轴线方向(横向)长约 490 m, 纵向垂直于坝轴方向长 760 m, 其中上游为 400 m, 下游为 360 m。在铅直方向, 由于微新岩体的渗透性较差, 因此取高程 2 250 m(微新岩体)向上一直到地表。

坝址区的几何模型是通过 CAD 将地质勘察得到的地质剖面直接建立三维空间几何模型, 利用地质分层结果建立相应的几何实体, 得到坝址区的天然地形结果, 如图 1 所示。

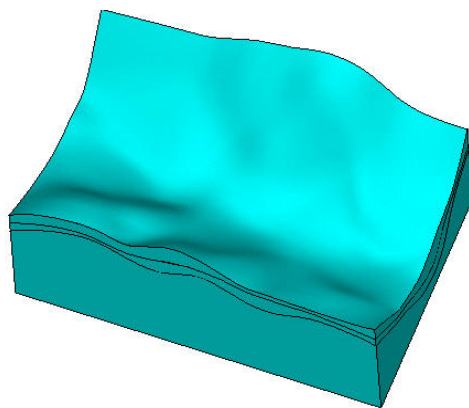


图 1 天然坝址区的地形几何模型

Fig.1 Geometric model of the natural landform of the dam

通过对两岸地质分层和河谷下的复杂地质分层进行对比, 将微新岩体以上的强透水岩体和极强透水岩体进行网格细分, 对河床下的分层分别赋予相应的材料, 有限元模型(共 8 种材料)如图 2 所示。

## 3 参数反演

### 3.1 反演方法

参数反演采用直接法, 边界条件为拟定(依据水文调查与钻孔资料)。根据水文地质勘察推荐的地层渗流参数, 计算出所选参考点的水头值, 与钻孔勘探和试验结果对比, 调整地层渗流参数, 重新计算, 直到计算出的水位与钻孔水位比较接近为止。

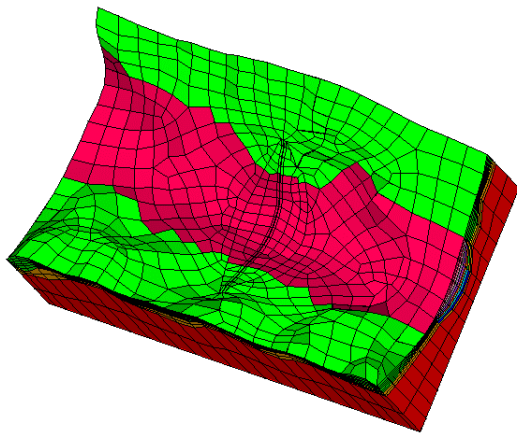


图2 计算天然坝址的有限元网格

Fig.2 Finite element mesh for the foundation of dam

计算过程中孔隙饱和度默认的初始值为 0，进行迭代计算时，每步都要使饱和度和水头达到收敛为止。

### 3.2 边界条件与反演点

根据钻孔水头高度以及已有的地质水文资料，可知底边界为微新岩体，渗透性差，因此取为不透水边界；左右边界为给定水头边界，上下游边界自然水位以上为定水头边界，上下游河谷和整条河谷内为枯水位区域。上述左右边界的水位分布如图 3 所示。

参数反演依据的是钻孔水位。在计算区域内选取 31 个钻孔，位置分布如图 4 所示，这些钻孔位于坝区上下游和左右位置，覆盖大部分计算区域，将这些钻孔得到的水位线作为反演点水位参考值。

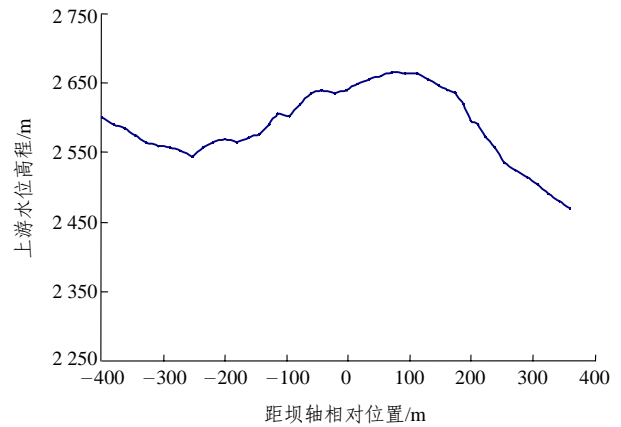
### 3.3 反演结果

各地质分层的渗透系数是通过整体自然地形下三维渗流场的反演得到，以钻孔点水位作为反演点参考值。反演所需的初始渗透性由先期水文地质勘察和原位试验确定，各层渗透系数的反演结果如表 1 所示。

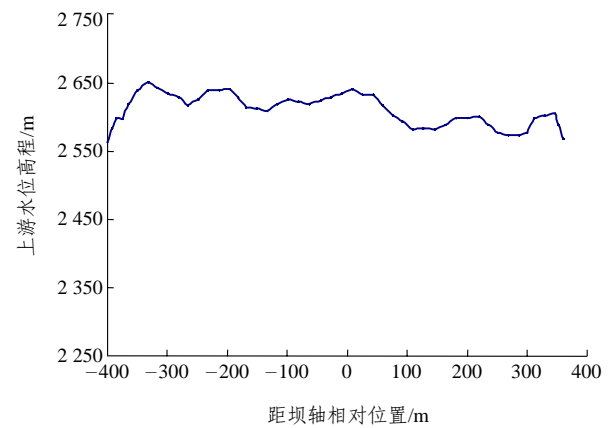
表 2 为计算得出的参考点水头与钻孔水位的对比，虽然个别结点的钻孔水位与计算值差别超过 10 m，但整体参考点的钻孔水位与计算水位两者差值的均值为 3.3 m，绝对值平均为 9 m(低于 10 m)。考虑到天然三维渗流场的复杂性，边界情况也是通过钻孔勘探的离散点得到，因此可认为反演结果所给出的各地质层渗透参数是合理的。

## 4 坝址区的渗流场

图 5 为计算区域内的三维渗流场孔压分布等



(a) 左边界水头



(b) 右边界水头

图3 计算区域左右边界水位

Fig.3 Left and right boundary water levels of the calculating area

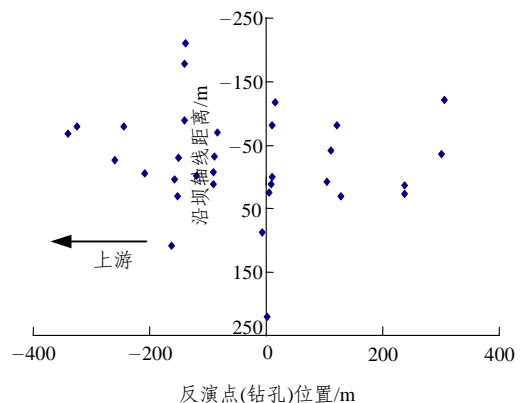


图4 反演点位置分布

Fig.4 Position distribution of the reference points

水头线云图，图 6 为坝轴线剖面(y = 0)上计算得出的枯水期天然渗流场的等水头线。图 7 为高程 2430 m 水平面上的等水头线。图 8 为高程 2450 m 水平面上的等水头线。

表 1 天然坝区渗流场参数反演表

Table 1 Inverse analysis of seepage parameters of the natural foundation of the dam

编号	材料名称	水平渗透系数计算值 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂直渗透系数计算值 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	强透水带(Lu 值 > 100)	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$
2	中等透水带( $3 < \text{Lu 值} < 100$ )、弱透水带( $1 < \text{Lu 值} < 3$ )	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$
3	微新岩体(Lu 值 < 1)	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$
4	覆盖层①: 含砂漂(块)卵石层( $Q_3^{sl+bl}$ )	$3.0 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$
5	覆盖层②: 粉质壤土与粉细砂互层( $Q_3^s$ )	$5.0 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$
6	覆盖层③: 含砂漂(块)卵石层( $Q_4^{sl}$ )及块碎砾石土层( $Q_4^{cl+dl+sl}$ )	$3.0 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$
7	覆盖层④: 含碎砾石砂层、粉质壤土层( $Q_4^{sl}$ )	$3.0 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$
8	覆盖层⑤: 含漂卵石层( $Q_4^{sl}$ )	$4.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$

表 2 坐标水头测量值与计算值对比

Table 2 Comparison between calculated values and measured values of the water head at calculating points

反演点 编号	坐标/m			测量 水头 /m	计算 水头 /m	差值 /m
	x	y	z			
1	-206.6	-143.8	2 525.8	2 526.7	2 535.7	9.0
2	-168.5	-141.5	2 479.0	2 478.0	2 490.2	12.2
3	-132.4	22.3	2 535.1	2 537.8	2 535.6	-2.2
4	-119.2	297.1	2 451.1	2 453.9	2 437.7	-16.2
5	-94.7	-130.6	2 448.5	2 449.7	2 448.8	-0.9
6	-91.4	114.1	2 461.1	2 460.1	2 448.6	-11.5
7	-89.3	11.1	2 420.5	2 421.4	2 421.3	-0.1
8	-80.6	-331.2	2 418.9	2 416.2	2 414.6	-1.6
9	-76.8	-77.7	2 437.3	2 437.8	2 429.8	-8.0
10	-73.1	-247.8	2 430.0	2 428.7	2 430.0	1.2
11	-69.4	-339.4	2 409.6	2 415.7	2 414.7	-1.1
12	-51.3	110.1	2 432.9	2 438.2	2 424.7	-13.5
13	-45.4	296.0	2 419.3	2 424.5	2 412.0	-12.5
14	-31.2	-143.2	2 420.0	2 420.3	2 415.4	-4.9
15	-31.0	-256.8	2 412.6	2 413.4	2 414.2	0.9
16	-28.3	-91.1	2 418.9	2 417.1	2 413.6	-3.5
17	-13.6	5.0	2 413.6	2 416.7	2 412.8	-3.9
18	-8.5	-214.6	2 414.9	2 414.8	2 414.1	-0.7
19	-4.1	-90.9	2 413.3	2 411.1	2 413.4	2.3
20	-0.2	-152.7	2 411.4	2 413.3	2 413.7	0.4
21	0.5	8.7	2 410.9	2 410.8	2 412.8	2.0
22	0.5	-117.8	2 412.3	2 412.4	2 413.5	1.1
23	4.5	111.0	2 410.9	2 410.8	2 412.3	1.6
24	8.6	-88.8	2 416.8	2 417.5	2 414.0	-3.5
25	10.0	8.7	2 410.9	2 410.7	2 412.8	2.2
26	12.0	236.6	2 408.8	2 409.2	2 411.8	2.7
27	21.7	242.6	2 414.5	2 413.4	2 411.9	-1.5
28	24.4	5.0	2 414.1	2 414.0	2 412.8	-1.2
29	28.1	-153.2	2 420.1	2 419.4	2 415.6	-3.8
30	31.9	127.0	2 413.6	2 415.4	2 413.2	-2.1
31	88.4	-8.2	2 428.4	2 431.2	2 437.1	5.9

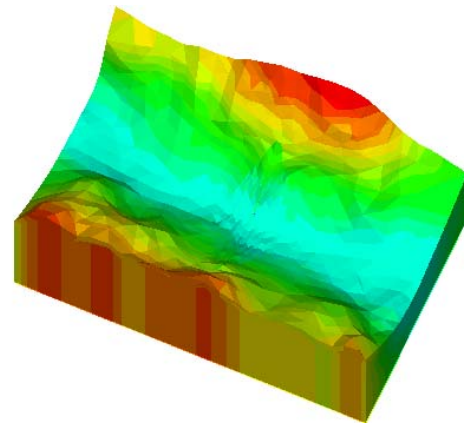


图 5 天然坝区渗流场孔压等水头线图

Fig.5 Contours of water head of the seepage field

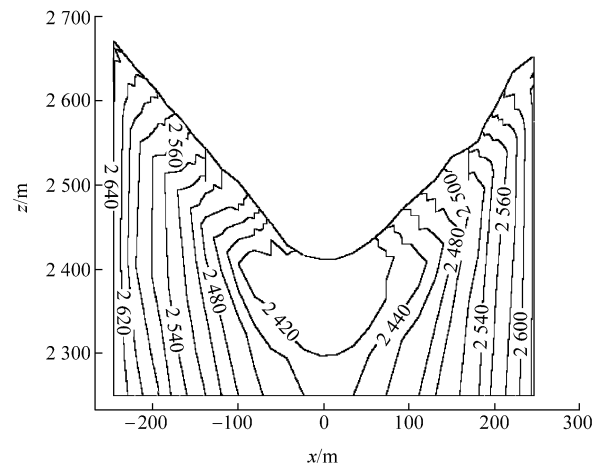


图 6 坝轴线剖面(y = 0)上的等水头线(单位: m)

Fig.6 Contours of water head at the y = 0 section(unit: m)

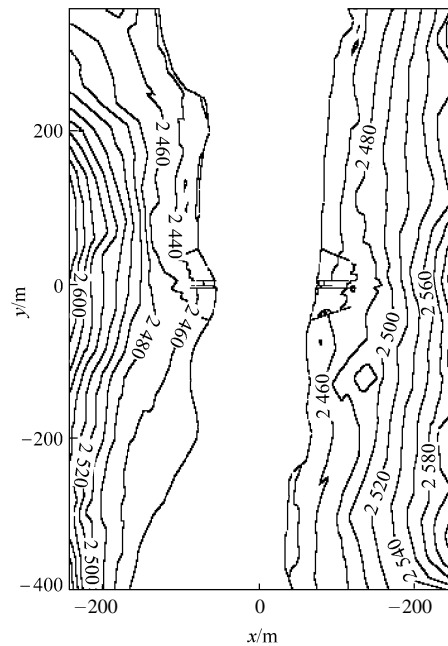


图 7 高程 2 430 m 水平剖面上的等水头线(单位: m)

Fig.7 Contours of water head at the elevation of 2 430 m(unit: m)

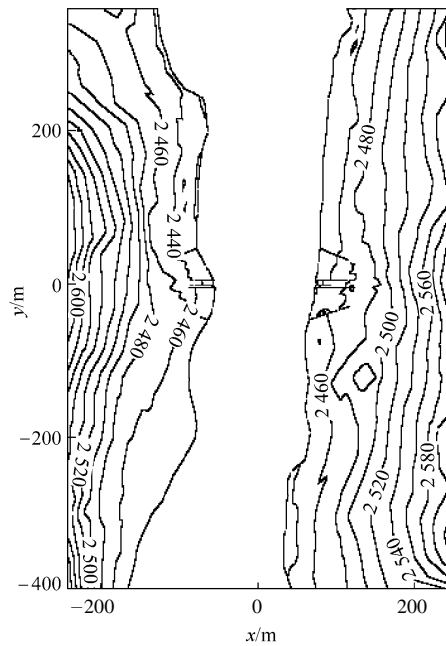


图8 高程2450 m水平剖面上的等水头线(单位: m)

Fig.8 Contours of water head at the elevation of 2450 m(unit: m)

## 5 结 语

根据工程计算的实际需要,建立了天然渗流场的反演计算模型,用有限元方法对渗流场参数进行了反演,并与钻孔勘察和试验结果进行了对比可以看出,天然渗流场的反演结果是合理的,精度满足工程需要。本次的反演结果为以后整个大坝渗流场的数值计算提供了基础。

### 参考文献(References):

[1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (Mao Changxi. Seepage Computation Analysis and Control[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))

[2] 耿克勤, 吴永平. 拱坝和坝肩岩体的力学和渗流的耦合分析实例[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 125 - 131.(Geng Keqin, Wu Yongping. Analysis of the mechanic-hydraulic interaction concerning arch dam and its abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 125 - 131.(in Chinese))

[3] 田竹春. 磨盘山水库坝区渗流分析[J]. 黑龙江水专学报, 2004, 31(2): 11 - 13.(Tian Zhuchun. Analysis of seepage in the dam in

Mopanshan Reservoir[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2004, 31(2): 11 - 13.(in Chinese))

[4] 葛义荣. 黄壁庄水库主坝坝基渗流分析[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(3): 44 - 46.(Ge Yirong. Analysis of primary dam foundation seepage stability for Huangbizhuang reservoir[J]. South-to-north Water Transfers and Water Science and Technology, 2004, 2(3): 44 - 46.(in Chinese))

[5] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1194 - 1198.(Liu Caihua, Chen Congxin, Fu Shaolan. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1194 - 1198.(in Chinese))

[6] 盛金昌, 速宝玉, 詹美礼. 三维天然渗流场反演分析及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 203 - 207.(Sheng Jinchang, Su Baoyu, Zhan Meili. Back analysis of 3D seepage problem and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 203 - 207.(in Chinese))

[7] 王媛, 徐志英, 速宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 177 - 181.(Wang Yuan, Xu Zhiying, Su Baoyu. Complete coupled analysis of fluid flow and elastoplastic stress in complicated fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 19(2): 177 - 181.(in Chinese))

[8] 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299 - 308.(Chen Ping, Zhang Youtian. Coupling analysis of seepage/stress for jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 299 - 308.(in Chinese))

[9] 朱伯芳. 渗流场反分析的一种新的数学解法[J]. 水利学报, 1994, (9): 42 - 46.(Zhu Bofang. A new method for back analysis of seepage problem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (9): 42 - 46.(in Chinese))

[10] 陈波, 李宁, 褚瑞花. 多孔介质的变形场-渗流场-温度场耦合有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 467 - 472.(Chen Bo, Li Ning, Zhuo Ruihua. Finite element analysis of fully coupled thermo-hydro-mechanic behavior of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 467 - 472.(in Chinese))