第20卷 第4期
2001年7月

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

20(4)：477～480
July，2001

丰满混凝土重力坝渗流特性分析*

李守巨[1] 刘迎曦[1] 李政国[2] 陈昌林[2]
([1]大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024) ([2]丰满发电厂 吉林 132100)

摘要 根据丰满混凝土重力坝现场渗流观测资料数据，采用非线性最小二乘法识别坝体混凝土和坝基岩石的渗透系数。基于大坝渗透系数的识别结果，采用三维有限元法分析了大坝坝体和坝基的渗流场。渗流场自由面位置的确定采用压缩网格法，经迭代求得。大坝渗透系数识别采用迭代方法进行，其中搜索方向由 Levenberg-Marquardt 法确定。工程实际应用表明，所提出的三维非承压水渗流场分析和大坝渗透系数识别方法是非常有效的。

关键词 混凝土重力坝，渗流，参数识别，自由面，渗透系数

分类号 TV139.1，O224 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2001)04-0477-04

1 引 言

混凝土重力坝渗漏可带来两个问题：其一是在渗漏水的冲刷作用下将混凝土中的钙离子析出，降低大坝的坚固程度，加速大坝的老化过程；其二是使得大坝的扬压力系数增大，浮托力增加，影响大坝的安全性和稳定性。在进行混凝土重力坝的渗流场的计算时，需要首先确定坝体混凝土和坝基岩石的渗透系数。由于大坝已运行 50 多年，并且经过几十年的灌浆加固，坝体混凝土和坝基岩石的渗透系数与设计时相比已经面目全非。因此，如何准确选取渗透系数参数是大坝渗流场分析中十分棘手的问题。传统的方法是采用注水试验，通过测得的单位吸水率计算渗透系数。其缺点是数据离散，工艺复杂，费用高。随着反演方法的日臻完善[1~3]，利用大坝渗流观测数据通过数值方法识别坝体混凝土和坝基岩石的渗透系数已具备条件，根据大坝渗透系数的识别结果，利用有限元方法计算大坝的渗流场，进一步分析大坝的渗流状态和影响大坝渗流场的主要因素，为大坝的进一步防渗加固设计和坝体抗滑稳定性分析提供可参考的数据资料。

2 工程概况

丰满大坝位于吉林市东南 24 km 的第二松花江上，是一座混凝土重力坝。坝顶全长 1080 m，最大坝高 90 m。坝体从左岸到右岸共分成 60 个坝段，每个坝段长 18 m；其中 9～19 坝段为溢流坝段，21～31 坝段为取水坝段，其余为挡水坝段。坝体基本剖面近似为三角形，上游坡度为 5%，下游坡度为 78%，最大坝基宽度为 65 m。坝顶高程加固前为 266.5 m，加固后为 267.7 m，正常蓄水位 263.5 m，死水位 242.0 m，尾水位 192.0 m。坝段之间的横缝设有键槽；各坝段又被 3 条纵缝分成 4 块，各坝块之间的纵缝只在 220 m 高程以下设有键槽。丰满大坝于 1937 年开始施工，1942 年 11 月下闸蓄水，1943 年第一台机组发电，1953 年大坝全面完工。坝基岩性比较单一，在坝基范围内均为变质砾岩，岩石极其坚硬，抗风化能力强。新鲜岩石湿抗压强度为 260 MPa，弱风化岩石湿抗压强度为 230 MPa，强风化岩石湿抗压强度为 150 MPa。根据以往日本人的施工实录以及运行检修施工记载得知：1942 年浇筑的混凝土达 5.09×10^5 m^3，为混凝土浇筑量最多的一年；1939～1940 年浇筑的混凝土中的水泥用量较高，混凝土的平均抗压强度也较高，28 d 平均抗压强度均在 10 MPa 以上，91 d 平均抗压强度高于 18 MPa；1943～1944 年浇注的混凝土水泥用量减少，混凝土的强度也相应降低；1943 年混凝土的 91 d 平均抗压强度只有 8.4 MPa；到 1944 年混凝土的抗

1999 年 11 月 11 日收到初稿，2000 年 1 月 25 日收到修改稿。
* 国家自然科学基金(10072014)和工业装备结构分析国家重点实验室开放基金(GZ9908)资助项目。
作者 李守巨 简介：男，40 岁，硕士，1982 年毕业于阜新矿业学院采矿系矿井建设专业，现为副教授，主要从事岩石力学及其反问题的研究工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压强度降低到 7.0 MPa。

3　含水层参数识别的数值方法

按照 Neuman 的分类方法，含水层参数识别方法可分为两类，即直接法和间接法。无论是直接法还是间接法，最终都归结为数学规划中的求极小化平方和函数问题或求极小残差问题。

3.1　目标函数的建立

经典的最小二乘法所建立的目标函数并没有考虑流量条件，只是将水头残差平方和最小作为目标函数[4, 5]：

$$\min E = \| H_c - H_m \|^2 \tag{1}$$

由于反问题的不唯一性，按上式所得到的反演结果是不唯一的，因此本文提出如下形式的目标函数，它既考虑了水头残差平方和最小，又考虑流量残差平方和最小：

$$\min E = \| H_c - H_m \|^2 + \beta \| Q_c - Q_m \|^2 \tag{2}$$

式中：H_c 为计算水头矢量；H_m 为观测水头矢量；Q_c 为计算漏水量矢量；Q_m 为观测漏水量矢量；β 为权因子，$\beta>0$，β 的选取根据具体问题而定。在本文计算过程中，取水头的单位为 m，漏水量的单位为 L/min，取 $\beta=10$。

3.2　迭代格式的建立

在进行迭代计算过程中，有时会遇到搜索方向矩阵 $[G]^T[G]$ 病态或奇异问题[4, 6]，因此本文采用 Levenberg-Marquardt 法搜索迭代方向，具体迭代过程如下所述：

$$K^{i+1} = K^i - \alpha^i D^i \tag{3}$$

$$D^i = \{[G^i]^T[G^i] + \gamma[I]\}^{-1}[G^i]^T[H_c - H_m] \tag{4}$$

式中：α^i 为步长；γ 为阻尼因子；$[I]$ 为单位矩阵；$[G^i]$ 为梯度矩阵(又称雅可比矩阵)；D^i 为搜索方向；α，γ，$[G]$ 具体选取和计算方法见文[6]。

具体迭代过程如下：(1) 选取渗透系数的初始值；(2) 计算梯度矩阵和水头矢量；(3) 计算搜索方向、阻尼因子和步长；(4) 按照式(3)进行迭代；(5) 执行收敛准则，若满足则迭代过程结束，否则，返回第二步。收敛准则选取以下形式：

$$\left.\begin{aligned} &\| K^{i+1} - K^i \| / \| K^{i+1} \| < \varepsilon_1 \\ &\| E^{i+1} - E^i \| / \| E^{i+1} \| < \varepsilon_2 \\ &\| D^{i+1} - D^i \| / \| D^{i+1} \| < \varepsilon_3 \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：ε_1，ε_2，ε_3 为给定的常数。

3.3　大坝渗透系数识别结果

表 1 列出丰满混凝土重力坝 47 坝段防渗帷幕和排水幕基本数据。根据 1972～1985 年的渗流观测数据，经分析整理后得到 47 坝段的水头观测和漏水量观测原始数据见表 2，3。坝体混凝土和坝基岩石各分区渗透系数识别结果见表 4。图 1 为丰满大坝坝体混凝土和坝基岩石各子区域的划分图。图 2，3 分别为坝体和坝基排水孔布置图。

表 1　大坝防渗帷幕和排水孔基本数据表(BL47)

Table 1　Basic data of anti-seepage curtain and drainage hole in the dam mass

工程名称	孔位/m	孔距/m	孔深/m	角度/(°)
坝体防渗帷幕	1.85	2.0	至 200 m 高程	90
坝体排水幕	3.90	4.5	至检查廊道	90
坝基防渗帷幕	3.50	2.0	10～35 m	90
坝基排水幕	4.30	4.5	入基岩 5 m	向下游 30

注：孔位是指距坝轴线并向下游的距离。

表 2　坝体和坝基水头观测数据(BL47)

Table 2　Data of measured water head in the dam mass and rock foundation　　m

孔号	坝体水头	坝基水头
1	248.20	254.13
2	239.80	241.69
3	231.52	207.85
4		208.83

表 3　坝体和坝基漏水量观测数据(BL47)

Table 3　Data of measured flow on the dam mass and rock foundation　　$L \cdot min^{-1}$

孔号	坝体漏水量	坝基漏水量
1	0.156	0.18
2	0.060	0.31
3	0.080	0.41
4		0.90
5		0.26
6		0.56
7		0.10
8		0.26

表 4　大坝渗透系数识别结果(BL47)

Table 6　Identified values of hydraulic conductivity of dam　　$10^{-9} m \cdot s^{-1}$

分区	1	2	3	4	5	6	7
渗透系数	0.8	4.0	10.4	6.1	2.1	165.5	26.3

4　混凝土重力坝渗流场有限元数值分析

4.1　渗流基本方程

对于各向同性稳定渗流无源汇的连续性方程，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

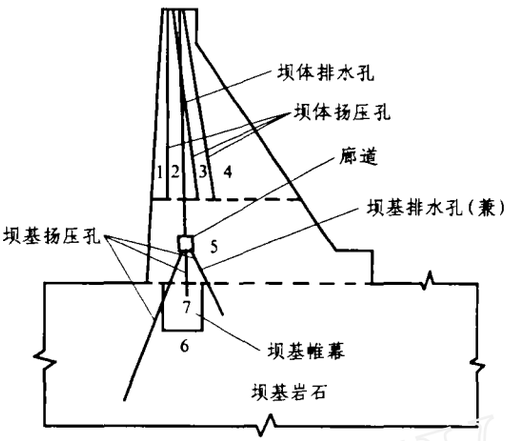

图 1　子区域划分图

Fig.1　Division of sub-region

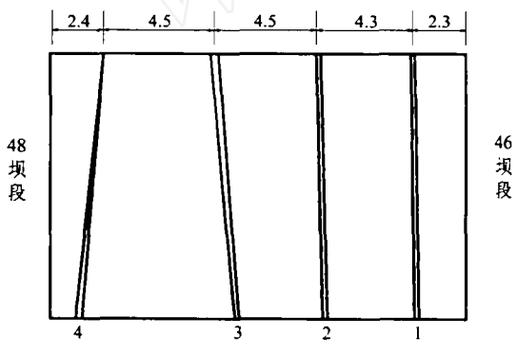

图 2　坝体排水孔布置图(单位：m)

Fig.2　Position of drainage holes in dam mass(unit：m)

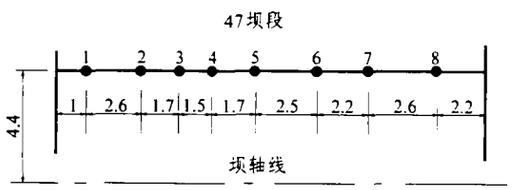

图 3 坝基排水孔布置图(单位：m)

Fig.3　Position of drainage holes in rock basement(unit：m)

即达西定律为

$$\partial^2(kH)/\partial x^2+\partial^2(kH)/\partial y^2+\partial^2(kH)/\partial z^2=0$$
$$x,\ y,\ z\in\Omega \tag{6}$$

边界条件包括两类：第一类为所研究渗流区域边界上的水头为已知；第二类为边界单位面积上流入的流量为已知。具体为

$$\left.\begin{aligned}&H(x,\ y,\ z)=\phi(x,\ y,\ z) \quad x,\ y,\ z\in\Gamma_1\\&k\partial H/\partial n=q(x,\ y,\ z) \quad x,\ y,\ z\in\Gamma_2\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned}&H=z,\ k\partial H/\partial n=0 \quad x,\ y,\ z\in\Gamma_3\\&H=z,\ k\partial H/\partial n\neq 0 \quad x,\ y,\ z\in\Gamma_4\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中：H 为水头；Ω 为渗流场区域；k 为渗透系数；Γ_1 为已知水头边界；$\phi(x,\ y,\ z)$ 为已知水头函数；Γ_2 为已知流量边界；$q(x,\ y,\ z)$ 为已知流量函数；n 为 Γ_2 的外法线方向；Γ_3 为自由面边界；Γ_4 为溢出面边界。

4.2 渗流场自由面位置的确定

对于三维均质各向同性无源汇稳定渗流问题的泛函表达式为

$$J[H(x,y,z)]=\frac{1}{2}\iiint_V k[(\partial H/\partial x)^2+(\partial H/\partial y)^2+(\partial H/\partial z)^2]\mathrm{d}V \tag{9}$$

采用 8 节点三维等参元，式(9)经离散和引入边界条件后得有限元控制方程为

$$[S]\{H\}=\{Q\} \tag{10}$$

式中：$[S]$ 为计算区域的渗透矩阵，$\{H\}$ 为未知节点水头列阵，$\{Q\}$ 为节点等效流量列阵。由于 Γ_3 和 Γ_4 未知，因此式(10)需要迭代求解。

自由面是渗流场特有的待定边界。自由面是一隔水面，应满足 $\mathrm{d}H/\mathrm{d}n=0$ 的条件，同时在该面上的静水压力等于零，则使得自由面上各点应满足 $H=Z$ 的条件。自由面位置的迭代公式如下：

$$Z_J^{i+1}=Z_J^i+\zeta(H_J^i-Z_J^i) \tag{11}$$

式中：ζ 为修正系数；Z_J^{i+1} 和 Z_J^i 分别为自由面上第 J 点第 i+1 和第 i 次计算自由面的 Z 坐标；H_J^i 为第 i 次计算出的自由面 J 点的水头值。具体迭代步骤如下：(1) 给定渗透系数，假定自由面的初始位置。(2) 计算渗流场。(3) 执行收敛准则，若满足，结束；否则，执行第 4 步进行修正。(4) 迭代，修正自由面的位置。(5) 将修正的自由面作为新的初始位置，返回第(2)步。溢出点位置的确定方法与自由面位置确定方法基本相同，在此不详述。

4.3 渗流场计算结果

将含水层参数识别结果和已知的边界条件代入到有限元模型中，得到丰满混凝土重力坝的渗流场分布，其中上游水位 255.90 m，下游水位 208.83 m。图 4 给出了 47 坝段坝体渗流场的分布。

数值计算结果表明，一旦坝体排水孔失效，坝体渗流自由面会明显上升，最大处上升 10 m 左右，下游面渗出点的位置沿斜面上升 25 m 左右。渗流使坝体浮托力增加，大坝的抗滑稳定性降低，同时，下游面渗水位置的上升，将会加速大坝的冬季冻融破坏，加快大坝的老化过程。因此，经常清洗排水孔是十分必要的。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

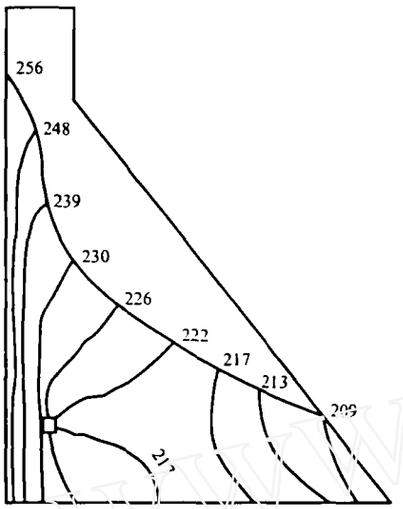

图 4 坝体渗流场的分布

Fig.4　Water head distribution of dam

5 结　论

(1) 根据大坝现场渗流观测数据识别坝体混凝土和坝基岩石的渗透系数是非常有效的，克服了现场注水试验所存在的缺点，同时费用低，效率高，得到的数据可靠性强。

(2) 采用压缩网格迭代法计算有自由面的非承压水渗流问题，有较高的收敛速度和精度，对于三维渗流问题仍然有较高的计算效率。

(3) 在建立含水层参数识别的目标函数时，既考虑了水头残差平方和最小，又考虑了流量残差平方和最小，解决了含水层参数识别唯一性问题，因为只有水头的观测数据进行识别所得到的结果是不唯一的。

(4) 在进行迭代计算过程中，有时会遇到搜索方向矩阵$[G]^T[G]$病态或奇异问题，使得迭代无法继续进行，本文采用 Levenberg-Marquardt 法搜索迭代方向克服了这一问题，并且通过步长优化搜索，进一步提高了收敛速度。

(5) 计算结果表明，一旦坝体排水孔失效，坝体渗流自由面会明显上升，浮托力增加，大坝的抗滑稳定性降低。因此，经常清洗排水孔是十分必要的。

参 考 文 献

1　李守巨，刘迎曦，周承芳等. 渗流问题反分析的最优化方法[J]. 辽宁工程技术大学学报，1998，17(5)：497～510

2　Miko Shoji. Two-dimensional consolidation back-analysis[J]. Soils and Foundations，1990，30(2)：60～78

3　William W，Yeh G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology[J]. Water Resources Research，1986，20(2)：95～108

4　李守巨，刘迎曦，李正国等. 含水层参数识别的正则化方法[J]. 力学与实践，1999，21(3)：32～34

5　William W，Yeh G. Aquifer parameter identification with optimum dimension in parameterization[J]. Water Resources Research，1981，17(3)：664～672

6　李守巨，刘迎曦，王登刚等. 岩石和混凝土材料参数识别的修正高斯牛顿法[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(1)：93～96

ANALYSIS ON SEEPAGE CHARACTERISTICS OF CONCRETE GRAVITY DAM OF FENGMAN PROJECT

Li Shouju[1]，　Liu Yingxi[1]，　Li Zhengguo[2]，　Chen Changlin[2]

([1] *Dalian University of Technology*，　*Dalian*　116024　*China*) ([2] *Fengman Hydraulic Power Plant*，　*Jilin*　132106　*China*)

Abstract　Based upon in-situ measured data of seepage of Fengman concrete gravity dam and making use of the least square method，the permeable coefficients of the concrete dam and rock basement are identified. The seepage fields are studied with finite element method based on the identification results of aquifer parameters. The free surface positions are determined with compressing mesh method and iteration procedure. Aquifer parameter identification is made by means of iteration procedure. The search directions are determined with Levenberg-Marquardt procedure. The practical application shows that the presented study of three dimensional seepage field with free surface and the identification procedure of aquifer parameters are available.

Key words　concrete gravity dam，seepage，parameter identification，free surface，permeable coefficient

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net