

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0756

基于压水试验的地层渗流场反分析

王洪波, 张庆松, 刘人太, 李术才, 张乐文, 郑卓, 张连震

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 地下工程建设过程中, 地下水分布以及岩体渗透参数确定至关重要。基于对解决欠定反分析问题的目标函数分析, 通过利用适应度函数、地质统计原理和变差函数等优化, 得到了解决地层渗透系数一类水文地质问题的罚函数, 为解决欠定的反分析问题提供了一个优化评判准则, 并结合粒子群算法建立优化反分析数学模型; 提出利用压水试验钻孔水头变化反分析得到地层渗透系数的新方法。对南京地铁上元门车站, 进行现场压水试验得到钻孔水头高度, 利用经过罚函数优化的反分析数值计算获得地层渗透系数, 对压水试验区域的电阻率跨孔 CT 探测验证了该方法区域上的正确性, 该区域的钻孔原位渗透系数测试验证了该方法在数值上的准确性。结果表明, 经过罚函数优化的反分析计算的准确率达到 90%, 说明该方法有助于得到全面的地层水文地质信息, 对后续的治理具有指导作用, 希望能对类似工程有一定的借鉴意义。

关键词: 罚函数; 粒子群算法 (PSO); 评判准则; 压水试验; 反分析; 渗流场

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 03-0985-08

Inverse analysis of seepage field from packer permeability test

WANG Hong-bo, ZHANG Qing-song, LIU Ren-tai, LI Shu-cai,
ZHANG Le-wen, ZHENG Zhuo, ZHANG Lian-zheng

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Groundwater distribution and determination of rock mass permeability parameters are very important in the process of underground engineering construction. Based on analysis of the objective function of underdetermined problem, and through the use of fitness function and the principle of geological statistics and variation function optimization, we obtain a class of hydrogeological problems' penalty function for solving formation permeability coefficient, which provides an optimized evaluation criterion to solve the problem of inverse analysis of underdetermined problem. Also, a mathematical model of optimized back analysis combined with particle swarm optimization (PSO) algorithm is established, and a new method to evaluate formation permeability coefficient is proposed using back analysis of the drilling head change from packer permeability test. At Nanjing Shang Yuanmen subway station, we conduct packer permeability test to get drilling head height on-site, and obtain permeability coefficient of the layer by using back analysis numerical calculation to optimize the penalty function. Detection of the resistivity cross-hole CT is conducted to verify the accuracy of the method, and drilling in-situ permeability tests verify the accuracy of the method to obtain numerical results. The results show that calculation accuracy reached 90% after analysis optimization by a penalty function, which proves that the method helps in getting comprehensive formation hydrogeological information. The method is important for the follow-up governance, which is expected to have certain reference significance for similar projects.

Keywords: penalty function; particle swarm optimization (PSO); evaluation criterion; packer permeability test; back analysis; seepage field

1 引 言

地下工程建设过程中, 地下水分布以及岩体渗

透性参数确定是至关重要的^[1-2], 因此, 在工程前期往往需要开展大量的工程地质、水文地质工作, 为地下工程设计与安全施工提供决策依据。通过在工

收稿日期: 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41272385); 博导基金项目 (No.20130131110032); 国家自然科学基金青年基金项目 (No.51309146)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41272385), the Doctoral Supervisor Fund Project (20130131110032) and the Young National Natural Science Foundation of China (51309146).

第一作者简介: 王洪波, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程水灾害治理理论及工程应用方面的研究。E-mail: hongbo_wang@sdu@163.com

通讯作者: 刘人太, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程不良地质预报与治理的研究工作。E-mail: rentailiu @163.com

区关键部位布设水文观测孔,可以获得地下水位随时间的变化情况。通过对钻孔进行压水试验,可以对钻孔附近地层的渗透系数进行估算,进而获得整个工程区域内地层渗透性的分布情况。然而,仅通过有限的钻孔资料,难以获得全面的水文地质信息,且获取的观测值通常含有一定的误差。因此,可借助反分析的方法对渗流场进行计算。

在优化方法方面, Lee 等^[3]采用全局优化算法解决非线性函数最优解问题, 易达等^[4]通过遗传算法对岩体初始应力场进行反演优化, 倪绍虎等^[5]通过改进粒子群算法对地下工程反分析进行优化, 贾善坡等^[6]采用 Nelder-Mead 法和 ABAQUS 软件对地应力场进行优化反演。在渗流场反分析方面, 朱岳明^[7]通过有限元分析, 依据测压孔水位, 反演计算出坝体和坝基的渗透系数。Wang 等^[8]采用反分析的方法, 通过钻孔测得的地下水位, 计算出岩体的渗透系数。刘先珊等^[9]利用交替迭代算法神经网络以及 Gauss-Newton 模拟退火算法的神经网络^[10]对地层渗透系数进行了反演, 前人对于渗流场的计算方法^[11-16]和坝体的工程应用^[17-20]进行了一系列的研究, 但以上优化方法主要解决复杂的非线性多峰函数, 对于欠定的多解问题研究较少。以上反分析的基础都是以静水头、流量等参数, 该类参数受外界环境影响较大, 难以充分体现地层的渗透性。

本文针对以上研究现状存在问题, 利用适应度函数、地质统计原理、变差函数等优化, 得到一个优化性极强的罚函数, 对欠定问题的评判准则进行优化, 并结合粒子群算法建立优化反分析数学模型, 突破性提出利用压水试验反分析地层渗流场的方法, 并依托于南京上元门地铁车站工程开展现场试验, 进行压水试验获得地层内水文地质信息, 通过反分析计算得到了区域内的地层渗透系数分布情况。反分析获得的区域水文地质信息为工程设计与施工提供了重要依据。

2 反分析原理及罚函数建立

对于工程建设中一个特定的渗流场, 需要寻找一个能够对其进行恰当描述的偏微分方程, 以及相应的定解条件, 从而对其建立一个正确、可靠的数学模型。当由于自然因素或人为因素致使边界条件发生改变时, 数学模型计算的渗流场变化应完全一致或非常接近于实际渗流场的变化。而在数学模型建立过程中, 方程中的系数即水文地质参数, 边界

条件、源汇项等, 通常难以准确获得, 故需要借助反分析^[16-19]的方法, 利用一系列带有一定测量误差的实际的观测值, 将其作为输入信息, 来对数学模型中的未知参量进行估算。

由于实际地层的渗透系数是随空间位置连续变化的, 因此, 未知参量的个数是无穷多的, 无法对其直接进行求解。因此, 对于这一类问题需要首先进行离散化处理。通常情况下, 为保证离散化处理不会对计算精度产生太大影响, 离散后参数个数不能太少, 因而离散后参数个数往往多于观测值个数。当模型中的未知参量个数 n 大于观测值个数 m 时, 该反分析问题是欠定的, 仅仅依靠数据拟合并不能唯一确定出最优解, 通常需要借助其他准则以及相应的罚函数^[21]来对所获得解的适定性进行评判。

对于一个欠定的反分析问题而言, 其目标函数可表示为

$$L(\mathbf{y}, \mathbf{s}) = L_f(\mathbf{y}, \mathbf{s}) + L_p(\mathbf{s}) \quad (1)$$

式中: L 为目标函数; L_f 为适应度函数; L_p 为罚函数; \mathbf{y} 为一个由观测值组成的一个 m 维行向量; \mathbf{s} 为由渗透系数参数组成的一个 n 维行向量。

适应度函数反映了模型与观测值之间的适应程度, 可进一步表示为

$$\left. \begin{aligned} L_f(\mathbf{y}, \mathbf{s}) &= [\mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{s})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{s})] \\ L(\mathbf{y}, \mathbf{s}) &= L_f(\mathbf{y}, \mathbf{s}) + L_p(\mathbf{s}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: \mathbf{h} 为渗透系数参数与预期观测值的映射关系, 可表示为

$$\mathbf{h}: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 表示由观测误差组成的一个 m 维方阵。而在本次现场试验中, 对于不同测点所进行的压水试验, 可认为其观测误差为独立分布且具有相同的方差 σ_R^2 , 因此, \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = \sigma_R^2 \mathbf{I} \quad (4)$$

式中: \mathbf{I} 为 m 维单位方阵。

罚函数的作用是通过改变目标函数来消去约束条件, 对于任一个违背约束的试探解生成一系列的非容许点, 其极限则是原问题的一个最优解。对于求解地层渗透系数一类水文地质问题, Kitanidis^[22]通过地质统计原理得到如下罚函数形式:

$$L_p = (\mathbf{s} - \mathbf{X}\beta)^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{s} - \mathbf{X}\beta) \quad (5)$$

$$Q = E_1[(s - X\beta)(s - X\beta)^T] \quad (6)$$

式中： Q 为空间协方差矩阵； X 为 n 维行向量，其所有元素值为 1； β 为全部渗流场范围的平均渗透系数； E_1 表示为预期值。借助平均渗透系数 β ，可以将罚函数项中的未知参数进行消除，从而得到如下的罚函数形式：

$$L_p = s^T G s \quad (7)$$

式中： G 为特征矩阵。

$$G = Q^{-1} - \frac{Q^{-1} X X^T Q^{-1}}{X^T Q^{-1} X} \quad (8)$$

由于待反演的参数众多，若采用直接搜索算法进行计算，则导致计算效率过低且难以找到问题的全局最优解。同时，由于在破碎带地层渗透率变化较大，使得目标泛函对各参数的偏导数值相差几个甚至十几个数量级，从而导致计算量大，优化迭代陷于局部最优解等问题。因此，本文引入适用于多变量、大空间优化问题的粒子群算法对目标函数进行求解。

粒子群算法^[5]本质上是一个基于个体学习和信息传递的决策过程。初始状态下，每个个体随机的分布于一个多度的搜索空间，其位置代表了一个可能的解答，将其位置坐标代入目标函数就可以计算出它的适应值大小，并判定其优劣程度。在搜索过程中，每个粒子可以记录之前在搜索过程中的最佳位置向量，称为局部最优解，记为 p_i^d ，所有的粒子可以共享信息，从而得到当前的全局最优解记为 p_c^d 。粒子群算法采用以下公式计算粒子的移动速度，从而不断更新其位置：

$$v_i^d = \omega v_i^d + c_1 r_1 (p_i^d - x_i^d) + c_2 r_2 (p_c^d - x_i^d) \quad (9)$$

$$x_{i+1}^d = x_i^d + \alpha v_i^d \quad (10)$$

式中： v_i^d 为粒子速度； ω 为惯性因子； c_1 和 c_2 均为加速常数； r_1 和 r_2 是 0~1 之间的随机数； α 为控制速度权重的约束因子。同时，粒子速度由下式进行约束：

$$-v_{\max}^d \leq v_i^d \leq v_{\max}^d \quad (11)$$

式中： v_{\max}^d 为人为限制的最大速度，为常数。若在某一步迭代更新后的速度超过最大速度，则此时的速度取为 v_{\max}^d 。通过限定最大速度，可以防止在搜索过程中粒子冲出搜索区域边界，同时防止搜索过

于粗糙而错失全局最优解。当搜索达到预设的最大迭代次数或粒子群搜索到的最优位置满足目标函数的容许误差时，即可停止迭代计算。

基于所获得的罚函数形式，结合粒子群算法建立相应的反分析数学模型，通过开展现场试验，获得的渗流场中某些物理量的观测值，从而求解出待定的水文地质参数。

3 现场试验

3.1 工程概况

南京地铁 3 号线上元门站车站位于南京市北，距长江 400 m 左右，属于长江一级阶地岗地区和长江漫滩平原区过渡区，区段土层结构复杂，存在较厚的淤泥质粉质黏土，粉土、粉砂及细砂，地下水丰富且地下水水力与江水联系密切。车站基坑处于临江破碎带影响范围内，且基坑主体两侧存在较多建筑物以及地下管线，水文地质条件与工程地质条件十分复杂。基坑断面为地下 3 层侧式的断面形式，埋深为 22.0 m，底板标高为 -12.0 m，开挖尺寸为 121.4 m×24.4 m×24.0 m。

3.2 现场压水试验

为查明破碎带及影响区域的岩体及地下水情况，查找导致基坑发生涌水灾害的主要通道及渗透系数分布情况，开展了现场压水试验。根据基坑地质资料圈定压水试验范围 ZHK11+887.239~ZHK11+1 008.268，沿基坑布设两排钻孔，在地质资料显示破碎的区域加密布设 6 个钻孔，因该区域地下水位位于地表下 5 m，基坑深度为 18 m，为保证基坑安全，钻孔深度定为地面下 23 m，钻孔布置如图 1 所示。

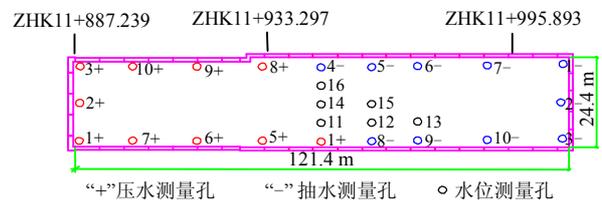


图 1 压水试验钻孔布置图

Fig.1 Borehole layout diagram of pressure water test

其中，由正号标示的作为压水井，由负号标示的作为抽水井。共进行 10 组试验，每组试验选取一对抽水井与压水井，以相同的速率（100 L/h）分别对其进行抽水和压水，其余孔作为观测孔，用钻孔水位测量仪并记录水头变化，抽水、压水孔试验设计以及观测孔水位变化结果见表 1。

表1 压水试验钻孔水头变化(单位: m)
Table 1 Drilling head change of packer permeability test (unit: m)

钻孔编号	试验编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1+	注	2.46	1.05	0.08	0.97	1.50	2.70	0.03	0.30	0.47
1-	抽	-3.05	-1.45	-0.18	-0.55	-1.10	-2.32	-0.08	-0.52	-0.93
2+	2.76	注	2.65	-0.03	0.65	1.06	1.95	0.23	0.68	1.24
2-	-2.75	抽	-1.85	-0.10	-0.45	-1.05	-2.30	-0.19	-0.72	-1.21
3+	1.37	2.69	注	-0.25	0.18	0.46	0.92	0.65	1.53	3.12
3-	-1.13	-1.81	抽	0.48	0.04	-0.38	-0.86	-0.92	-1.98	-3.16
4+	0.24	-0.33	-0.89	注	0.85	0.35	0.22	-1.95	-1.11	-1.12
4-	-0.02	-0.41	-0.16	抽	-0.58	-0.28	-0.18	0.86	0.47	0.10
5+	0.92	0.26	-0.16	0.31	注	1.20	0.97	-0.21	-0.05	-0.22
5-	-0.60	-0.83	-0.29	-1.12	抽	-1.46	-0.86	0.64	0.32	0.02
6+	1.60	0.79	0.16	0.12	1.40	注	1.80	-0.03	0.12	0.02
6-	-1.00	-1.33	-0.68	-0.51	-1.26	抽	-1.50	0.22	-0.13	-0.42
7+	2.80	1.70	0.63	0.11	1.15	1.80	注	0.00	0.22	0.26
7-	-2.20	-2.55	-1.15	-0.29	-0.69	-1.49	抽	0.02	-0.40	-0.76
8+	0.16	-0.10	0.31	-0.95	-0.20	-0.08	0.01	注	1.62	0.86
8-	-0.04	-0.53	-1.25	1.87	0.65	0.18	0.03	抽	-1.76	-1.60
9+	0.40	0.39	1.26	-0.63	-0.08	0.07	0.22	1.70	注	2.83
9-	-0.42	-1.00	-2.23	0.95	0.30	-0.18	-0.40	-1.69	抽	-3.10
10+	0.72	1.15	3.05	-0.47	-0.04	0.19	0.45	1.14	3.02	注
10-	-0.68	-1.30	-3.25	0.75	0.20	-0.25	-0.57	-1.35	-2.90	抽
11	0.30	-0.26	-0.67	1.54	0.85	0.38	0.27	-1.24	-0.69	-0.79
12	0.00	-0.56	-1.22	1.66	0.57	0.09	-0.03	-2.56	-1.68	-1.55
13	-0.42	-1.00	-2.05	0.90	0.26	-0.23	-0.42	-1.65	-3.25	-2.78
14	0.19	-0.33	-0.37	-0.11	0.44	0.10	0.08	0.02	0.00	-0.27
15	-0.20	-0.72	-0.77	0.13	0.05	-0.41	-0.37	-0.53	-0.63	-0.77
16	0.06	-0.43	-0.32	-0.65	0.14	-0.14	-0.10	0.40	0.19	-0.14

4 数值计算

4.1 模型建立与计算设定

对所划定的基坑区域,首先在计算平台中构建出其几何模型并将其进行离散为 20×5 的小正方形单元,并假设每个单元内渗透系数不随空间变化。对于划定的含水层以外的区域,计算中近似认为其渗透系数为单一值^[23-24]。整个流场范围内均服从达西定律:

$$\nabla \cdot (-K_s \nabla \cdot H) = Q_s \quad (12)$$

式中: H 为水头高度 (m); K_s 为渗透系数 (m/s); Q_s 为源汇项。计算中,认为渗透系数是各向同性的。同时设定初始水头高度为 0,因此,模型中计算得到的水头高度表示由压水试验所引起的水头变化值。

如第 3 节所述,在所开展的现场试验中,水头变化的测量精度 ΔH 可认为是 1 cm。因此,适应度函数可改写为

$$L_f = \frac{\|y - h(s)\|^2}{\Delta H^2} \quad (13)$$

在地质学中,通常可认为沿空间分布的地质参

数服从于由某一变差函数^[25]确定的统计分布。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (14)$$

因此,目标函数中的罚函数项可表示为

$$Q_{ij} = 2\gamma(|x_i - x_j|), \quad i, j = 1, \dots, n \quad (15)$$

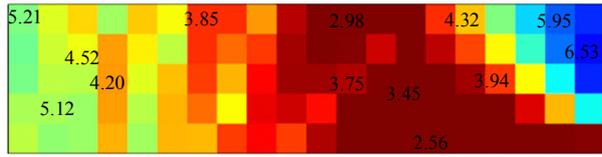
$$\gamma(t) = \sigma^2(1 - e^{-t/l}) \quad (16)$$

式中: x_i 为对应于参数 s_i 的正方形质心; $\gamma(t)$ 为指数型变差函数; σ^2 为其方差; l 为相关距离。在本计算中,根据类似工程经验和软件计算最优化计算, σ^2 取为 1, l 取为 50 m。通过以上设定,即可利用压水试验的测量值对渗透系数进行反分析求解。

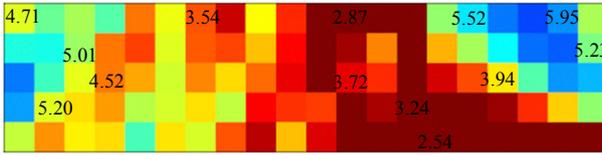
4.2 计算结果及分析

根据压水试验的测量值,分别考虑不同数量、不同位置的钻孔水头,进行渗透系数的反演模拟结果如图 2 所示。

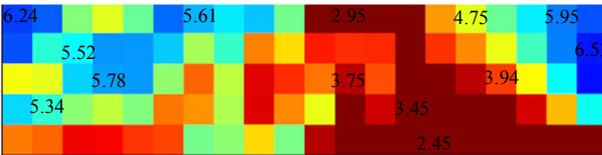
根据不同数量、不同位置的钻孔水头测量值进行的基坑渗透系数反演结果可知,随着压水试验钻孔水头数量的增加,基坑的渗透系数计算结果更加准确;对比基坑地质破碎区域增加试验钻孔与其他



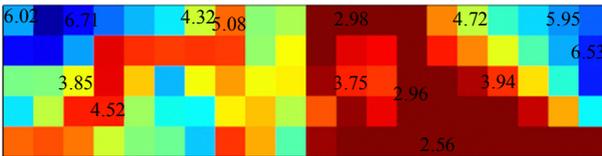
(a) 考虑第 1、5 组压水试验水头渗透系数反演结果



(b) 考虑第 1、2、5、6 组压水试验水头渗透系数反演结果



(c) 考虑第 1、2、3、5、6、7、9 组压水试验水头渗透系数反演结果



(d) 考虑全部压水试验水头渗透系数反演结果

图 2 渗透系数的反演模拟结果 (单位: cm/s)
Fig.2 Results of permeability coefficient inversion simulation (unit: cm/s)

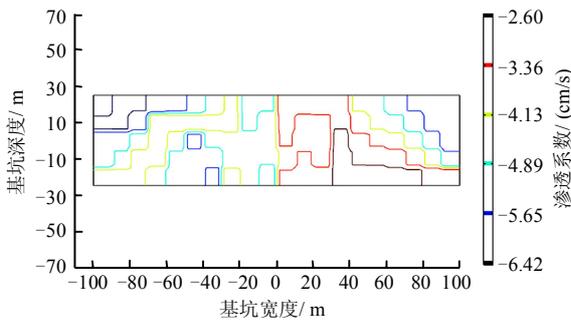


图 3 渗透系数等势线

Fig.3 Equipotential lines of permeability coefficient

无增加钻孔可知, 增加钻孔区在图 2(a)、2(b)、2(c)、2(d)反演结果差别相对较小, 说明增加钻孔能有效提高计算结果准确性; 对比图 2(a)和图 2(d)可以发现, 单纯考虑第 1、5 组试验数据与考虑全部组的试验数据结果在钻孔 1+和钻孔 5+附近也差别巨大, 在远离压水测量孔 1、5 的压水测量孔 8~10 等附近与最后结果差别更大, 说明试验数据较少时, 不仅对于远离试验点的位置产生的误差巨大, 对于试验点周围的误差也很大。

5 地球物理探测与计算结果对比

5.1 地球物理探测验证渗流场依据

南京地铁上元门车站地质勘探资料及开挖资料显示基坑及地铁底板以下主要地层为含淤泥质粉细砂、软塑-流塑状粉质黏土, 地基均匀性很差, 属于典型软流塑地层, 地层岩性及物理力学指标如表 2 所示, 其中 c 为黏聚力, E 为压缩模量, φ 为内摩擦角, e 为孔隙比, w 为含水率, μ 为泊松比, γ 为重度。

表 2 软流塑地层物理力学指标
Table 2 Physical and mechanical index of soft-flow ground

状态	c / kPa	E / MPa	φ / ($^{\circ}$)	w / %	层厚 / m	e	μ	γ / (kN/m ³)
流塑-软塑	7	3.86	2.9	34.8	18.03	0.993	0.32	18.4

软塑-流塑状粉质黏土地层因其独有的地层特征, 随着地层含水率的增加, 地球物理探测所得到的结果显示出明显的低阻区。故根据地层的地球物理探测可以近似的反应区域的透水性。因此, 对基坑区域进行地球物理探测, 通过基坑地层的地球物理探测结果, 区域性验证所述地层渗流场反分析的正确性。

5.2 地球物理探测范围

本项目在施工过程中, 采用了跨孔电阻率 CT 对工程影响区域水文地质信息进行探查。跨孔电阻率 CT 仪采用的是国产西安 FlashRES64 型超高密度直流电法仪, 具有多通道、多电极、全波形电法数据采集特点。

跨孔电阻率 CT 布设方式为: 设置极距为 1 m, 根据现场压水试验钻孔, 连接每个钻孔对面及其相邻钻孔成线进行探测, 共形成 25 个剖面, 测线布置如图 4 所示。

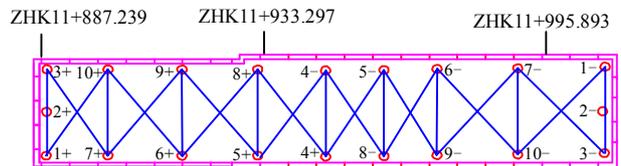


图 4 跨孔电阻率 CT 测线布置图

Fig.4 Cross-hole resistivity CT line layout

跨孔电阻率 CT 反演水平范围均向孔外扩展 2 m, 由于压水试验钻孔孔深为 23 m, 反演成果图主要截取 18~30 m 深度范围。部分跨孔 CT 探测成果图如图 5 所示, 其中所标注的范围推断为岩体破碎区, 渗透系数相对较大。

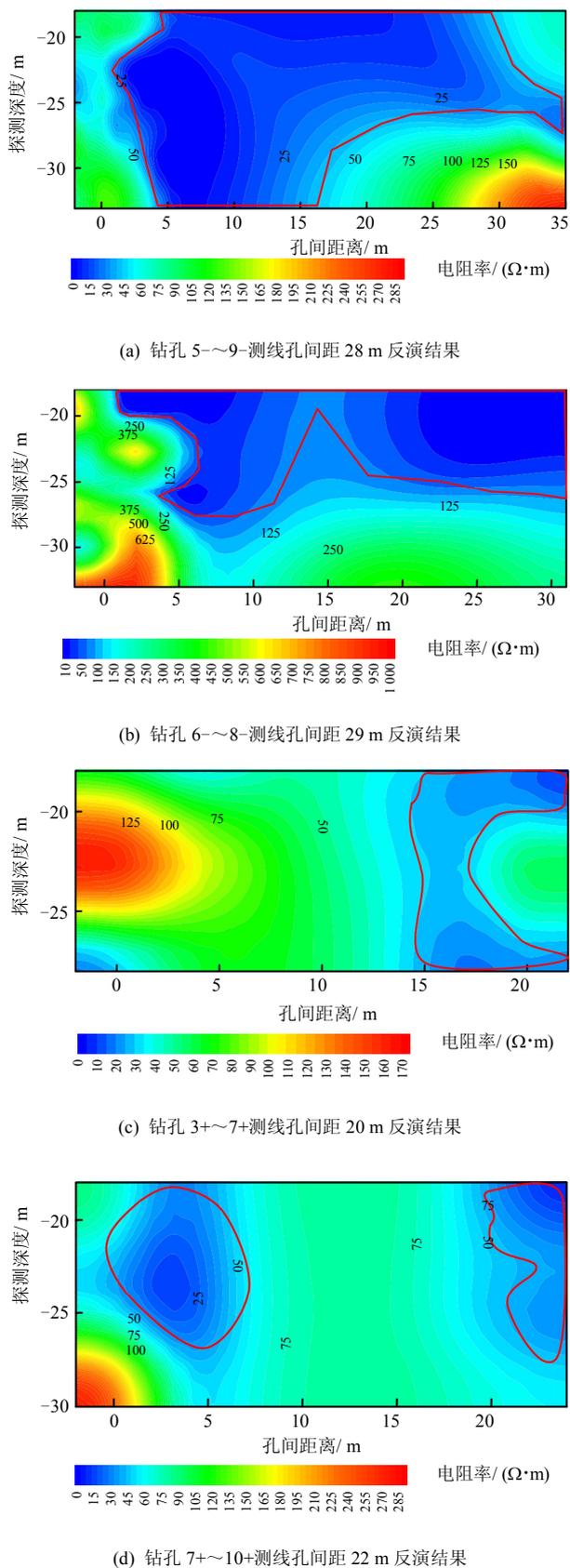


图5 跨孔电阻率 CT 成果图
Fig.5 Results of cross-hole resistivity CT

5.3 地球物理探测结果与计算结果对比分析

根据跨孔电阻率 CT 探测分析可知, 基坑地面

以下 23 m 的平面主要异常的分布情况见图 6。由图可知: 区域 A 为跨孔电阻率 CT 解释的主要异常带, 推断该异常带的岩体破碎, 软弱岩土体发育, 区域地质岩土体渗透系数较大; 区域 B、C 为跨孔电阻率 CT 解释的次要异常带。推断该异常带的岩体较破碎, 软弱岩土体较发育, 区域地质岩土体渗透系数相对较大; 区域 D 为跨孔电阻率 CT 解释的正常区域, 地质条件良好。

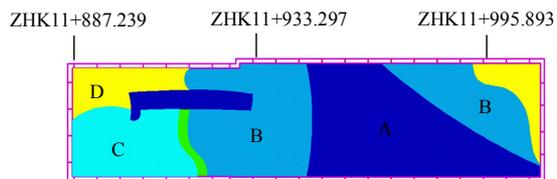


图6 地球物理探测结果平面图
Fig.6 Plane diagram of geophysical exploration results

通过由压水试验水头反分析得到的基坑渗透系数与跨孔电阻率 CT 探测结果对比分析可知, 反分析得到的基坑渗透系数与物探结果大致相似, 验证了基于压水试验的基坑反分析得渗透系数在区域性的正确性。

6 地层原位渗透系数

根据上述跨孔电阻率 CT 的探测结果, 在基坑电阻率反应不同的区域布设 J-1 到 J-5 这 5 个钻孔, 采用林政等^[26]研究的地层原位渗透系数测试方法, 对 5 个钻孔地下 23 m, 即基坑下 5 m 的位置进行原位渗透系数测试 (见图 7), 测试结果见表 3。

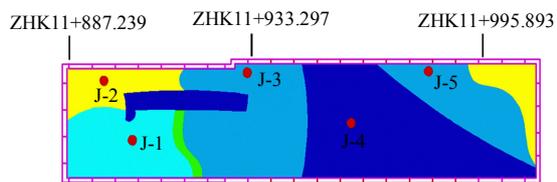


图7 原位渗透系数测试钻孔平面图
Fig.7 Plane diagram of drilling in-situ permeability test

根据现场 J-1 到 J-5 的原位渗透系数测试结果分析可知, 压水试验之后的原位测试地层的渗透系数均比基于压水试验的反分析计算的渗透系数高出 10% 左右, 主要原因是压水试验过程对地层渗流场产生扰动, 增加了原地层的渗透系数, 间接说明了压水试验对该类地层的扰动在合理的范围内, 说明压水试验在此类地层的适用性, 验证了基于压水试验的基坑反分析所得渗透系数在数值上的的正确性。

表3 原位渗透系数测试结果
Table 3 Results of in-situ permeability test

钻孔编号	反分析渗透系数 /(cm/s)	原位渗透系数 /(cm/s)	倍率
J-1	3.85	4.25	1.103 9
J-2	6.71	7.55	1.125 2
J-3	4.32	4.68	1.083 3
J-4	2.96	3.09	1.043 9
J-5	4.72	5.24	1.110 2

7 结 论

(1) 对解决欠定反分析问题的目标函数, 利用适应度函数、地质统计原理、变差函数等优化, 得到解决地层渗流场这一类水文地质问题的罚函数, 为解决欠定的反分析优化问题提供了一个可靠评判准则, 并结合粒子群算法建立优化反分析数学模型。

(2) 基于上述反分析模型, 提出利用压水试验获得的钻孔水头变化反分析得到地层渗透系数的新方法, 并进行现场试验获得地层渗流场。

(3) 对压水试验区域进行电阻率跨孔 CT 探测验证结果表明, 经过罚函数优化的反分析计算的地层渗流场在区域上与地球物理探测结果基本吻合, 验证了反分析计算在区域上的正确性; 对压水试验区域进行钻孔原位渗透系数测试验证结果表明, 经过罚函数优化的反分析计算的地层渗流场在数值准确度上与原位渗透系数误差在 10% 左右, 验证了反分析计算在数值上的准确性。经过罚函数优化的基于压水试验反分析计算地层渗流场的新方法, 有助于得到全面的地层水文地质信息, 希望对类似工程的治理具有指导作用。

参 考 文 献

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945—1956.
QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945—1956.
- [2] 景来红, 段世超, 杨顺群. 渗流反演分析在工程设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊 2): 4503—4509.
JING Lai-hong, DUAN Shi-chao, YANG Shun-qun. Application of seepage back analysis to engineering design[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007(Supp.2): 4503—4509.
- [3] LEE J S, CHOI I Y, LEE H U, et al. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20: 73—80.
- [4] 易达, 陈胜宏, 葛修润. 岩体初始应力场的遗传算法与有限元联合反演法[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1077—1080.
YI Da, CHEN Sheng-hong, GE Xiu-run. A methodology combining genetic algorithm and finite element method for back analysis of initial stress field of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1077—1080.
- [5] 倪绍虎, 肖明, 王继伟. 改进粒子群算法在地下工程反分析中的运用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(3): 326—330.
NI Shao-hu, XIAO Ming, WANG Ji-wei. Application of modified particle swarm optimization to back analysis of underground engineering[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2009, 42(3): 326—330.
- [6] 贾善坡, 陈卫忠, 谭贤君. 大岗水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2341—2348.
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Nelder-Mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2341—2348.
- [7] 朱岳明. 测压管水位的反分析确定性混合模型[C]//大坝安全监测技术国际学术讨论会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1992: 92—97.
ZHU Yue-ming. Piezometric level of analysis of hybrid model uncertainty[C]//International Academic Conference on the Dam Safety Monitoring Technology. [S. l.]: [s. n.], 1992: 92—97.
- [8] WANG Shi-jun, LIN Jia-xin. Determination of hydraulic conductivity model for concrete foundation by optimum inversion[C]//International Symposium on Monitoring Technology of Dam Safety. [S. l.]: [s. n.], 1992: 187—192.
- [9] 刘先珊, 余成学, 张立君. 渗流反分析中交替迭代算法神经网络研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 1470—1475.
LIU Xian-shan, SHE Cheng-xue, ZHANG Li-jun. back analysis of seepage with ANN based on alternative and interactive algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 1470—1475.
- [10] 刘先珊, 周创兵, 张立君. 基于模拟退火的 Gauss—Newton 算法的神经网络在渗流反分析中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 404—408.
LIU Xian-shan, ZHOU Chuang-bin, ZHANG Li-jun. Application of neural network based on simulated annealing Gauss-Newton algorithm to seepage back

- analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 404—408.
- [11] 朱岳明, 刘望亭. 土石坝的复杂渗流反分析研究[J]. 河海大学学报, 1991(6): 49—56.
ZHU Yue-ming, LIU Wang-ting. Back analysis of complicated seepage flow in an earth-rock dam[J]. **Journal of Hohai University**, 1991(6): 49—56.
- [12] 闫滨, 强丽峰, 郭超. 渗流反分析在柴河土坝防渗加固设计中的应用[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 25—29.
YAN Bin, QIANG Li-feng, GUO Chao. Application of seepage inversion analysis to seepage control reinforcement in Chaihe earth dam[J]. **Yangtze River**, 2011, 42(10): 25—29.
- [13] 张乾飞, 王建, 吴中如. 基于人工神经网络的大坝渗透系数分区反演分析[J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 4—7.
ZHANG Qian-fei, WANG Jian, WU Zhong-ru. Divisional back analysis of dam percolation parameter based on artificial neural network mode[J]. **Water Resources and Power**, 2001, 19(4): 4—7.
- [14] 郭海庆, 吴中如, 张乾飞. 渗透系数反演的CHNN模型方法[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(3): 25—28.
GUO Hai-qiang, WU Zhong-ru, ZHANG Qian-fei. Inverse analysis of percolation coefficients by CHNN model[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2001, 18(3): 25—28.
- [15] 李守巨, 刘迎曦, 王登刚. 基于神经网络的岩体渗透系数反演方法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 479—483.
LI Shou-ju, LIU Ying-xi, WANG Deng-gang. Inversion algorithm of permeability coefficients of rock mass and its application based on artificial neural network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 479—483.
- [16] 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, 2004, 22(2): 203—207.
SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, ZHAN Mei-li. Back analysis of 3D seepage problem and its engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 203—207.
- [17] 王媛, 刘杰. 重力坝坝基渗透参数进化反演分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 552—556.
WANG Yuan, LIU Jie. Back analysis of the permeability coefficients of gravity dam foundation by evolution method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 552—556.
- [18] 李康宏, 邓祥辉, 何萌, 等. 基于钻孔资料的某尾矿坝渗透系数反演分析有限元模型建立[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4329—4332.
LI Kang-hong, DENG Xiang-hui, HE Meng, et al. Finite element modeling of back analysis of permeability coefficient of a tailing dam based on boring data[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.1): 4329—4332.
- [19] 祁涛, 张均锋. 某水电站坝址区三维渗流参数反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3766—3770.
QI Tao, ZHANG Jun-feng. Inverse analysis of seepage parameters for dam foundation of a hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 168—172.
- [20] 崔皓东, 朱岳明. 二滩高拱坝坝基渗流场的反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3194—3199.
CUI Hao-dong, ZHU Yue-ming. Back analysis of seepage field of Ertan high arch dam foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3194—3199.
- [21] 李海燕, 并元伟, 马明旭. 基于动态罚函数法的协同优化算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 911—915.
LI Hai-yan, BING Yuan-wei, MA Ming-xu. Collaborative optimization algorithm based on dynamic penalty function method[J]. **Control and Decision**, 2009, 24(6): 911—915.
- [22] KITANIDIS P K. Quasi-linear geostatistical theory for inversing[J]. **Water Resources Research**, 1995, 31(10): 2411—2419.
- [23] CARDIFF M, KITANIDIS P K. Efficient solution of nonlinear, underdetermined inverse problems with a generalized PDE model[J]. **Computers & Geosciences**, 2008, 34: 1480—1491.
- [24] KITANIDIS P K. Quasi-linear geostatistical theory for inversing[J]. **Water Resources Research**, 1995, 10(31): 2411—2419.
- [25] 方明礼, 肖明. 三维初始地应力场反分析的变差函数法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1594—1601.
FANG Ming-li, XIAO Ming. Back analysis of 3D initial geostress field based on variogram function[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 1594—1601.
- [26] 林政, 陈仁朋, 陈云敏. 一种现场测定地基固结系数与渗透系数的方法[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 505—510.
LIN Zheng, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. A method for in-situ testing of coefficients of consolidation and permeability of soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 505—510.