

文章编号:1672-3961(2011)04-0133-04

# 大型地下洞室群施工期快速反馈分析实用方法

王刚<sup>1,2</sup>, 蒋宇静<sup>2</sup>, 李术才<sup>3</sup>

(山东科技大学 1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 2. 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510;  
3. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:**工程岩体是一个高度复杂的灰色系统,按理论方法或实测途径均难以完全确定岩石的基本参数。地下工程快速反馈分析方法是工程现场完善设计、优化施工的可靠方法。通过深入分析施工期围岩参数正反演过程,发现影响反演效果的关键因素为输入数据的真实性,计算模型的适应性和计算结果的可靠性。结合工程地质和监控量测特征,提出了用正交试验设计优化反演方案设计的方法;采用区间分析和分层优化的思想建立了不确定性力学参数的区间反分析优化方法,并给出了目标函数和技术路线。研究地下工程施工过程中多点位移计的布置原则和监测数据变化规律,指出了快速反馈分析方法在大型地下洞室群施工参数反演实践中的特点。通过针对性的反演分析可得到最优围岩参数值,用以优化工程设计和施工。

**关键词:**地下工程;信息化施工;区间分析;正交试验设计;回归分析

**中图分类号:** O241 **文献标志码:** A

## Rapid feedback analysis method for underground caverns during construction

WANG Gang<sup>1,2</sup>, JIANG Yu-jing<sup>2</sup>, LI Shu-cai<sup>3</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

2. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

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

**Abstract:** It is impossible to obtain complete field data in underground engineering; for example, information on stresses and properties. can only be partially known. The back-analysis is oriented toward using relatively little site-specific data to give the most help to geotechnical engineering. Key factors affecting back-analysis results were investigated in detail, especially the authenticity of input data, the adaptability of computation model and the reliability of the computation result. The orthogonal experimental method was used to performing a successful devise for numerical experiments. The layered range optimizing method was established to assemble uncertain problem-specific parameters. Considering the geological characteristics of underground engineering, the measurement data and the interval analysis method, the rapid feedback method for huge underground houses was established during construction. The spectrum of back-analysis was also presented. Analyzing the deformation law of underground engineering structures in process of construction, sufficient feedback experiments can produce relevant rock parameters, which help to optimized the subsequent engineering construction process. If enough data of a high quality are available, the feedback can give good predictions.

**Key words:** underground engineering; informative construction; interval analysis; orthogonal experimental design; regression analysis

收稿日期:2011-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51009086);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2010HZ015);山东省教育厅高等学校科技计划资助项目(J10LE08)

作者简介:王刚(1976-),男,山东聊城人,副教授,博士,主要研究方向为裂隙岩体力学耦合机理及计算方法研究. E-mail:wanggang1110@gmail.com

## 0 引言

工程岩体作为一种复杂的天然地质体,其物性参数、应力环境和本构模型都是一个高度复杂的不确定和不确定系统,“参数和本构模型的给不准”成为岩土力学理论分析和数值仿真模拟的“瓶颈”问题<sup>[1-2]</sup>。随着监控量测技术和控制理论的发展,信息化施工技术在地下工程理论和工程实践中得到了迅速的发展<sup>[3]</sup>。由于岩体工程的复杂性,有时按理论方法或实测途径均难以确定岩石的基本参数,特别是能反映较大范围工程结构平均效应的岩体变形参数<sup>[4]</sup>。因此,围岩参数反分析方法一经问世即引起了众多学者的研究兴趣。应用反馈分析方法评价地下隧洞围岩的稳定性,实质就是分析洞室围岩在工程过程中的应力和变形<sup>[5]</sup>。现有的各种反分析方法大致分两类:一类是用于求解确定性逆问题的逆解法<sup>[6-8]</sup>;二是用于求解不确定性逆问题的直接求解法<sup>[9-12]</sup>。直接求解法的第一部分正分析与一般力学计算中所采用的方法没有什么不同,不需推导反演方程,可以方便地进行各种复杂问题的力学参数反演,如材料非线性、节理断层岩体等;第二部分进行正分析计算值与实测值的反演拟合分析,是直接法反分析的技术关键。由于围岩位移是工程易测物理量,在直接法反分析中常将围岩位移作为反分析拟合的基准量。

在地下工程施工过程中,围岩位移反分析的实践实现还存在一系列问题需要进一步的探讨<sup>[13-14]</sup>,如:解的唯一性、稳定性和收敛性,计算工作量大等问题。本研究基于大型地下洞室群的开挖过程特色,在充分分析工程结构地质特征和围岩监控量测设计特点的基础上,提出了一套实用可行的地下工程施工过程快速反馈分析方法。

## 1 影响因素分析

地下工程快速反馈分析方法是涉及多种技术组合的系统工程,其工程应用受到自然和人文等众多因素的影响,实际应用中可控的几个关键因素做如下分析。

### (1) 输入数据的真实性

地下工程围岩参数反演的实用基础是现场工程围岩监测,因此,真实可靠的现场监控量测在很大程度上成为反演分析成功的一个前提。但由于在地下工程开挖过程中,当测量系统尚未安装或尚未发挥

作用之前,工程围岩已经有一部分变形产生,这部分变形未被测到而被“丢失”。虽然有的研究者提出“空间效应系数”<sup>[15]</sup>来对这一部分位移进行补偿,但其结果带有一定的人为因素。

### (2) 计算模型的适应性

有了围岩监控量测,即可采用适当的计算模型对围岩参数进行反演。而对大型地下工程的分阶段开挖与支护问题,目前的反分析逆算法尚无法完全实现,直接法是唯一的可行方法,但其计算工作量较大。因此,基于直接法结合区间正交试验设计的反馈分析方法具有良好的适用性。

### (3) 计算结果的可靠性

实际工程岩体是一个复杂的地质体,它具有非均匀性、不连续性、材料非线性等性质。利用弹性反分析原理得到的力学参数包含了这些因素的影响,因此这些参数只是一组在宏观上将岩体概化了的力学模型的参数。在分析计算结果时,应掌握这些差别的规律,从中找出对工程建设有指导意义的信息。

## 2 反馈分析技术路线

### 2.1 反分析技术路线

根据地质信息及现场围岩监控资料,建立围岩本构关系和数学模型,通过数值仿真计算及反演分析,确定岩体的物理力学参数、地层初始地应力等参数。在地下工程中,将反馈分析动态反馈于地下工程开挖支护的设计与施工中,进行工程预测和安全评价,为工程决策和工程措施的选择提供支持依据。基于直接法的快速反馈分析方法技术路线如图1所示。

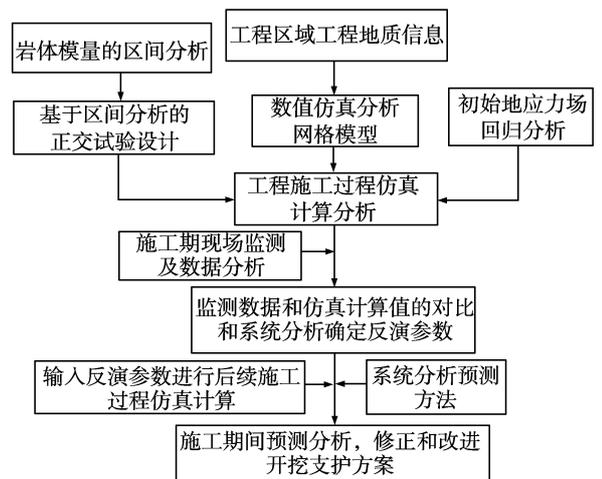


图1 地下工程反馈分析技术路线图  
Fig. 1 Technology roadmap for the feedback analysis of underground engineering

## 2.2 目标函数

基于区间正交试验设计的反分析直接法区别于逆算法,其分析过程分为两大部分:第一根据工程地质条件确定力学模型,进行正交试验参数设计,根据设计参数 $\{p\}$ ,进行正算;第二部分将实测位移值与正算成果中对应监测值进行比较,比较时选择目标函数作为两者贴近程度的标准,并进行各个影响参数的效应计算,根据各参数效应值,回归分析主要影响因素最优值。在地下工程围岩特性的直接法反分析中,采用的误差平方和、作为目标函数,分别表示如下:

$$\varphi(p) = \sum_{i=1}^N (u_i - u_i^*)^2, \quad (1)$$

式中 $N$ 为实测位移值总数; $u_i^*$ 为第 $i$ 个实测位移; $u_i$ 为与之对应的由计算得到的位移。一般说来, $u_i$ 为待定参数 $\{p\}$ 的非常复杂的非线性函数,因此一般采用数值方法来求出。基于目标函数,采用正交试验效应计算及优化回归方法寻求 $\varphi(p)$ 的最小值,及其对应参数 $\{p\}$ 的最优值。

## 2.3 反演参数优化方法

为了减少人为因素对反馈分析结果的影响,运用区间分析理论<sup>[16]</sup>求解不确定性问题,提高分析结果的可靠性;应用正交试验设计方法来提高分析效率,为工程实践提供了快捷可行的分析方法。区间分析方法只需要较少的不确定信息(如量测信息误差的上下界,材料参数所具有的一定界限等),可综合考虑系统所具有的非线性和不确定性,得到的计算结果是包含可行解集的一个最小区间集合,在小区间内设计岩体力学参数区间正交试验进行正演分析,结合各个影响参数效应值的计算回归分析来确定最优参数。在正交设计中,若以 $\mu_t$ 表示第 $t$ 号试验各因素水平搭配对指标值 $x_t$ 影响的总和,也叫 $x_t$ 的理论值,以 $\varepsilon_t$ 表示第 $t$ 号试验的随机误差,则有:

$$x_t = \mu_t + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$\varepsilon_t$ 是随机误差,我们要对 $\mu_t$ 做出估计,即求出 $\mu_t$ 的估计值 $\hat{\mu}_t$ ,使其满足:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_i)^2, \quad (3)$$

对3因素3水平的 $L_9(3^3)$ 的正交试验表,则有:

$$S = \sum_{i=1}^9 (x_i - \mu_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (x_i - \mu - a_i - b_i - c_i)^2. \quad (4)$$

为使 $S$ 达到最小,采用最小二乘法,求 $\mu_i$ 的估计值 $\hat{\mu}_i$ ,就是求 $\mu, a_i, b_i, c_i$ 的估计值 $\hat{\mu}, \hat{a}_i, \hat{b}_i, \hat{c}_i$ 。结合目标函数,根据试验数据分析可以得出最优方案和主导影响因素,继续对主导因素进行优化。最

终根据效应值计算,可得出力学参数反演值。

## 3 位移型快速反馈分析实用方法

在位移反分析中,根据地下工程结构特点,为实现快速准确的反馈分析,需要适当布置多点位移计数量及其安装位置,选择合适的计算模型及对应的监测数据。

### 3.1 多点位移计布置原则

监测点时空布置决定着监测数据的准确性和全面性,测点数目、布置位置及布置时间都对反分析结果有着重要影响。而且现场量测数据带有随机误差,误差大小受主观客观因素的影响。在利用这些监测数据进行反分析运算时,必须对量测数据作必要的数学处理以减小误差的影响,改善其规律性,剔除监测数据中的伪信息。考虑反分析和工程预测的需求,以及量测和计算经验,对测点的设置有如下几点原则和要求:① 测点数目应该多于9个,并且至少有9个测点处在开挖边界上的不同部位,以满足反演计算支护结构受力状态的需要;② 量测方向力求避免单纯的竖向式水平,以使每个测点包含有2个不为0的沿坐标轴的分量(二维问题),对于三维反演要保证有沿洞室轴线方向的监测值;③ 应该把移计量测和收敛量测结合使用,以利于相互校验。

### 3.2 监测数据分析方法

分析多点位移计测试数据的变化规律,确定适当的理论模型及描述方法,对反分析结果质量有重要的影响。典型多点位移计监测点位移发展变化可以分为2个阶段:第1阶段围岩变形显著,监测位移增长速率大,第2阶段围岩变形趋于稳定,监测位移增长缓慢。第I阶段是洞室围岩位移增加较快时期,主要是指多点位移计埋设初期,这期间的围岩变形一部分来自于洞室继续开挖卸荷产生的围岩扰动瞬时变形;另一部分来自于开挖支护完毕后短时间的蠕变。蠕变是一个长期的过程,这一阶段历时长,随着时间推移围岩变形逐渐进入第II阶段,洞室结构进入稳定缓慢蠕变状态。

地下洞室开挖卸荷围岩应力调整,开挖边界附近围岩进入塑性状态,产生弹塑性变形;远离开挖边界围岩仅产生弹性变形,弹性位移小于弹塑性位移,其分布形式仍然与弹性介质岩体位移相似。因此,开挖边界附件围岩的位移监测值反应了岩体材料的弹塑性性质。在用弹塑性方法进行位移反分析时,结合工程地质调查以及施工实施情况分析,要尽可能准确反映围岩的弹塑性变形和地质构造的作用,

对不利因素可以及时采取工程措施予以纠正。如果实测位移值在某部位突然偏离变化趋势,则该部位有可能存在潜在的地质构造或由于洞室开挖施工引起的卸荷裂隙,致使实测位移增大。因此反演分析中应该剔除异常数据,反映围岩整体性质。另外,除了预埋多点位移计外,开挖后期埋设的多点位移计在第一次读数前已经损失了部分开挖后的瞬时位移。位移反分析中不能直接应用多点位移计绝对监测值作为反演标准,取多点位移计各个监测点相对基准点的相对值为基准值更为合理。将正交试验设计数值计算值与实测结果进行比较,就不难得出围岩的弹塑性参数等。反分析时应注意对弹性区和塑性区的位移测值进行优化处理,则可获得较好的效果。

## 4 结论

地下工程快速反馈分析基于工程地质和实际监控量测,依赖于岩土体力学理论,是理论与实际相联系的桥梁。由于当前工程监测手段和方法的限制,地下工程施工中工程围岩状态变化还不能精确监控。根据工程结构特点、工程施工过程和工程围岩变形特点,分析监测数据变化特征,采用区间分析思想和正交试验设计方法,建立了不确定性力学参数的区间反分析方法,提出了地下工程快速反馈分析方法及切实可行的技术路线。

在地下工程施工建设过程中,通过针对性的反馈分析,可取得最大拟合程度的模型参数值,进行信息化施工。一方面以此来指导工程的后续施工,采取合理的支护措施,以最小的代价获得最合适的安全程度;另一方面可以为类似地质条件的工程提供第一手可靠的经验资料。

### 参考文献:

[1] SWOBODA G, ICHIKAWA Y, DONG Q. Back analysis of large geotechnical models[J]. *International Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics*, 1999, 23(12): 1455-1472.

[2] CALVELLO M, FINNO R J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(5): 411-425.

[3] SAKURAI S, AKUTAGAWA S, TAKEUCHI, et al. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method[J]. *Tunnell Underground Space Technology*, 2003, 18(2-3): 185-196.

[4] 齐俊修,王连捷,刘凤成,等. 某电站模型洞围岩位移

反分析及预测研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(8): 1205-1210.

QI Junxiu, WANG Lianjie, LIU Fengcheng, et al. Back analysis and prediction for displacement of surrounding rock around model tunnel of a powerstation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1205-1210.

[5] 蒋斌松,张强,贺永年,等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 982-986.

JIANG Binsong, ZHANG Qiang, HE Yongnian, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 982-986.

[6] 陈胜宏,陈尚法,杨启贵. 三峡工程船闸边坡的反馈分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(5): 619-626.

CHEN Shenghong, CHEN Shangfa, YANG Qigui. Feedback analysis of the three gorges project shiplock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 619-626.

[7] 高玮,郑颖人. 基于遗传算法的岩土本构模型辨识[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 9-12.

GAO Wei, ZHENG Yingren. Identification of the geomaterial constitutive model based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 9-12.

[8] KARKKAINEN T, NEITTAANMAKI P. Numerical method for nonlinear inverse problem [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1996, 74(1): 231-234.

[9] 林育梁,樱田春辅. 应用模糊有限元法的一种反分析形式[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 48-56.

LIN Yuliang, SAKURAI Shunsuke. A formulation of back analysis using the fuzzy finite element method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 48-56.

[10] 徐卫亚,刘世君. 岩石力学参数的非线性随机反分析[J]. *岩土力学*, 2001, 22(4): 432-435.

XU Weiya, LIU Shijun. Nonlinear or stochastic back analysis of rock mechanical parameter [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 432-435.

[11] 胡小荣,唐春安. 岩石力学参数随机场的空间变异性分析及单元体力学参数赋值研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 59-63.

HU Xiaorong, TANG Chun'an. Spatial variation analysis on the random field of mechanical parameters for rock and soil and the parameter estimation of elements [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 59-63.

[12] 何满潮,薛廷河,彭延飞. 工程岩体力学参数确定方

- 法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 225-229.
- HE Manchao, XUE Tinghe, PENG Yanfei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 225-229.
- [13] CAI M, MORIOKAB H, KAISERA P K, et al. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44: 538-549.
- [14] GIODA G, SAKURAI S. Back-analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics [J]. International Journal of Numerical Analysis Methods in Geomechanics, 1987, 11:555-583.
- [15] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 长大深基坑施工空间效应研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1579-1596.
- LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua, et al. Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1579-1596.
- [16] 刘世君, 徐卫亚, 王红春. 不确定性岩石力学参数的区间反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 885-888.
- LIU Shijun, XU Weiya, WANG Hongchun. Interval back analysis on uncertain parameters in rock mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 885-888.

(编辑:陈燕)