

相对位移反分析的 DFP 优化方法及其工程应用

贾超¹ 郭志川²

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东济南 250061; 2. 广东东莞市建设局, 广东东莞 523000)

【摘要】 洞室围岩的某些参数,如弹性模量、强度参数等,对地下洞室的施工和设计具有极其重要的作用,直接进行这些参数的现场测量势必要耗费大量的物资和精力,在这种背景下,位移反分析的工程应用具有很重要的理论和实用价值。但洞室工程中大量不确定性因素的存在使得监测结果不可避免地存在随机性,有时会使得变形监测结果产生较大的误差,甚至失真。因此以监测结果的绝对值所反演得到的参数可能是错误的。在这种情况下,以监测数据的相对值进行参数反演在一定程度上可以消除测量误差。基于相对位移的随机反分析法并结合 DFP 优化算法开发了基于相对位移的随机反分析法,将其应用于一具体洞室工程中反演其弹性模量取得了较为理想的效果。

【关键词】 相对位移;位移反分析;随机;地下洞室;弹性模量

【中图分类号】 TU 457

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.04.010

DFP Method of Inverse Analysis Based on Relative Displacement and Its Engineering Application

Jia Chao¹ Guo Zhichuan²

(1. School of Civil Engineering of Shandong University, Jinan Shandong 250061

2. construction bureau of Dongguan city, Dongguan Guangdong 523000)

【Abstract】 Some parameters of the rock mass, such as elastic modulus, strength parameters, etc., are very important to underground tunnel design and construction. Lots of cost are needed if situ-test is done. In this situation, application of displacement inverse analysis theory is very important for real engineering. But unfortunately most uncertain factors cause unavoidable random result for field monitoring, sometimes cause mistake. Factors obtained by inverse analysis on absolute displacement value of situ-test may be error. Such error can be avoided by relative displacement inverse analysis method. In the paper stochastic inverse analysis based on relative displacement method is used in a underground tunnel to calculate elastic modulus factor, and obtained a quite good result.

【Key words】 relative displacement; displacement inverse analysis; random; underground tunnel; elastic modulus

0 引言

在地下洞室工程中,由于工程开挖深度大,洞室面积大,地层复杂,设计方案不可能预知施工过程中所有情况和问题,土压力的大小和分布计算精度有局限性,结构受力大小和分布具有不确定性。加强系统的施工期安全监测,反馈分析洞室支护结构的变形,尽早发现可能出现的不安全因素,及时采取补救措施,减少和避免损失,同时现场监测结果可用于指导施工,优化设计,达到优质安全、经济合理、快捷施工的目的。此外,现场监测结果还可与理论分析计算进行比较,用以反分析相应的计算参数,用于指导下一步施工和其它类似工程建设。因此,现场位移监测对整个洞室开挖施工过程结构的稳定性具

有十分重要的意义,对分析预报洞室围护结构的受力、稳定也是十分宝贵的资料^[1-3]。

洞室工程中存在大量的不确定性因素,具有很大的随机性。洞室支护结构的变形监测结果会受到量测人为因素、仪器精度、施工条件以及其它各种外界因素的制约或干扰,有时会使得变形监测结果产生较大的误差,甚至失真,难以真实地反映支护结构的实际变形、受力状态。因此,在洞室施工中测量位移存在一定的误差,如果实际位移大于量测位移,采用没有处理的量测位移会对施工产生误导作用,对支护结构的内力估计不足,偏于危险,对整个洞室工程的安全稳定有着重大的影响,严重的会带来不可估量的损失^[4-6]。同时,若采用该位移反分析相应

的计算参数,用于指导下一步施工,其结果也是不合理的。若采用相对位移进行反分析,则可在很大程度上消除量测误差,根据相对位移反分析相应的计算参数,用于指导下一步施工可以取得比较合理的效果。

1 相对位移法消除测量误差的理论分析

设洞室内某一测点的测量位移为 U_i ,量测误差为 ΔU_i ,真实位移为 W_i ;另一测点的测量位移为 U_j ,量测误差为 ΔU_j ,真实位移为 W_j ,则有

$$W_i = U_i + \Delta U_i \quad (1)$$

$$W_j = U_j + \Delta U_j \quad (2)$$

式(1)、(2)中,由于量测误差项 ΔU_i 和 ΔU_j 无法确定,使得真实位移 W_i 和 W_j 不确定。两测点的相对位移 $\Delta\omega_{i,j}$ 为

$$\Delta\omega_{i,j} = W_i - W_j = U_i - U_j + \Delta U_i - \Delta U_j \quad (3)$$

式(3)中,由于两测点在量测时认为外界影响因素差别不大,故可认为量测误差项 ΔU_i 和 ΔU_j 基本是由于同一原因所引起,二者值相同。故有

$$\Delta\omega_{i,j} = W_i - W_j = U_i - U_j \quad (4)$$

式(4)中:在认为量测误差项 ΔU_i 和 ΔU_j 二者值相同的条件下,两测点的相对位移 $\Delta\omega_{i,j}$ 与量测误差无关,因此可采用相对位移进行反分析可消除量测误差带来的影响。

2 相对位移随机反分析的目标函数及其计算

2.1 目标函数

设 $\Delta\omega$ 为结构两测点的计算相对位移, $\Delta\omega^*$ 为结构两测点的实测相对位移,常规最小二乘法目标函数可以写为:

$$J = (\Delta\omega - \Delta\omega^*)^T (\Delta\omega - \Delta\omega^*) = \sum_{k=1}^m (\Delta\omega_k - \Delta\omega_k^*)^2 \quad (5)$$

式中: m 为实测相对位移的数目,目标函数对待估参数 X 的偏导函数表达式为:

$$\frac{\partial J}{\partial X} = 2 \sum_{k=1}^m (\Delta\omega_k - \Delta\omega_k^*) \frac{\partial \Delta\omega_k}{\partial X} \quad (6)$$

设两测点的相对位移 $\Delta\omega_k$ 为任意 i, j 两测点的相对位移, i, j 两测点的计算绝对位移分别为 S_i, S_j , 则有

$$\frac{\partial \Delta\omega_k}{\partial X} = \frac{\partial S_i}{\partial X} - \frac{\partial S_j}{\partial X} \quad (7)$$

将上式代入式(6),有

$$\frac{\partial J}{\partial X} = 2 \sum_{k=1}^m (\Delta\omega_k - \Delta\omega_k^*) \left(\frac{\partial S_i}{\partial X} - \frac{\partial S_j}{\partial X} \right) \quad (8)$$

式(8)即为基于相对位移的常规最小二乘法目标函数。对于加权最小二乘目标函数也可按上述进

行推导,限于篇幅,本文不再赘述。

2.2 基于相对位移的 Bayes 随机反分析

同样按前述进行推导,得到基于相对位移的 Bayes 参数估计的目标函数为

$$J = (\Delta\omega - \Delta\omega^*)^T C_{\Delta\omega}^{-1} (\Delta\omega - \Delta\omega^*) + (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})^T C_X^{-1} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) \quad (9)$$

目标函数对变量的偏导数为

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{X}} = 2 \left(\frac{\partial \Delta\omega}{\partial \mathbf{X}} \right)^T C_{\Delta\omega}^{-1} (\Delta\omega - \Delta\omega^*) + 2 (C_X)^{-1} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) \quad (10)$$

值得注意的是,在式(4)中 $C_{\Delta\omega}$ 应为实测相对位移的方差矩阵。参数的估计 $\hat{\mathbf{X}}$ 的方差为:

$$C_{\hat{\mathbf{X}}} = [(C_X)^{-1} + \mathbf{D}^T C_S^{-1} \mathbf{D}]^{-1} \quad (11)$$

式中:

$$\mathbf{D}(\bar{\mathbf{X}}) = \left. \frac{\partial \Delta\omega}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\bar{\mathbf{X}}} \quad (12)$$

在推导了基于相对位移的 Bayes 随机反分析的目标函数、目标函数对变量的偏导数以及参数的估计 $\hat{\mathbf{X}}$ 的方差公式后,与常规的 Bayes 随机反分析类似,可按共轭梯度法、DFP 法、遗传算法等优化方法进行随机反分析,得到系统参数的均值和方差,本文采用 DFP 法进行优化计算。

2.3 变尺度法(DFP 法)优化方法

变尺度法是一种在优化的过程中不断地改变空间尺度(矩阵)从而产生新的搜索方向,进而使得初始点向最优收敛的优化方法。同时,变尺度法也是一种拟牛顿法,这是因为可将其视为针对牛顿法需要计算 Hessian 矩阵的逆矩阵这一点进行改进而产生的一种方法。另一方面,变尺度法也是一种共轭方向法,这是由于变尺度法产生的搜索方向实际上也是一种共轭方向。其迭代过程如下:

① 从一个初始点 \mathbf{X}_1 和一个 $n \times n$ 阶的正定对称矩阵 \mathbf{H}_1 开始(通常 \mathbf{H}_1 取为单位矩阵 \mathbf{I}),置迭代次数 $i=1$ 。

② 计算目标函数 J 在点 \mathbf{X}_i 处的梯度 ∇J_i ,并令搜索方向 \mathbf{S}_i 为

$$\mathbf{S}_i = -\mathbf{H}_i \nabla J_i \quad (13)$$

③ 求 \mathbf{S}_i 方向上的最优步长 λ_i^* ,并使

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{X}_i + \lambda_i^* \mathbf{S}_i \quad (14)$$

④ 检验点 \mathbf{X}_{i+1} 的最优性,如果 \mathbf{X}_{i+1} 是最优点,终止迭代过程。否则进行下一步。

⑤ 修正矩阵 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H}_{i+1} = \mathbf{H}_i + \mathbf{M}_i + \mathbf{N}_i \quad (15)$$

$$\text{式中: } M_i = \lambda_i \frac{S_i S_i^T}{S_i^T Q_i} \quad (16)$$

$$N_i = -\frac{(H_i Q_i)(H_i Q_i)^T}{Q_i^T H_i Q_i} \quad (17)$$

$$Q_i = \nabla J(X_{i+1}) - \nabla J(X_i) = \nabla J_{i+1} - \nabla J_i \quad (18)$$

令 $i=i+1$, 转步骤②。

变尺度法与共轭梯度法相比,一方面具有更快的收敛特性,另一方面也更稳定,即使对函数等值线高度畸变或严重偏心的目标函数进行优化,也有较好的收敛性。这种稳定性是由于该法在迭代过程中,矩阵 H_i 始终为正定矩阵这一特性所决定的。而且,文献[4]证明,随着迭代的进行,矩阵 H_i 将收敛于目标函数 J 的 Hessian 矩阵的逆矩阵。但该法在迭代过程中,需要保存一个 $n \times n$ (n 为待反演参数的数目) 阶矩阵,所以对于多自变量优化问题,如果考虑到存储量问题,可采用共轭梯度法,否则建议采用收敛效率和稳定性都较好的变尺度法。

根据前述基于相对位移反分析以及 DFP 法优化理论,编制开发了基于有限元的最小二乘 DFP 优化反分析程序用以进行相应计算。

3 算例分析

某一引水隧洞在山体中开挖形成,开挖过程中在隧洞四周布置了位移观测点。为了准确把握岩体材料参数,为以后的开挖提供参考,现选取某一断面进行分析,该断面共 4 种岩体材料(见图 1),从上至下依次为覆盖层、全风化泥质砂岩、强风化泥质砂岩和弱风化泥质砂岩,各岩石材料参数见表 1。隧洞四周位移观测点见图 2,但只有现场相对位移观测资料。由于隧洞位于弱风化泥质砂岩层中,经过敏感性分析可知,弱风化泥质砂岩的弹模对隧洞位移影响较大,故仅对弱风化泥质砂岩的弹模进行反演,按平面应变问题处理。计算区域剖分成 562 个单元,结点总数 1216 个,有限元网格见图 3。岩石选用 Drucker-Prager 本构模型。

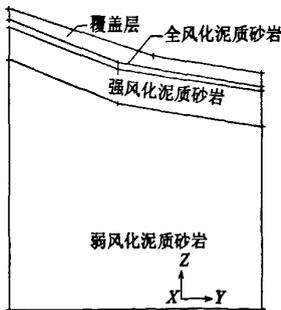


图 1 岩层分布图

表 1 岩层材料参数

岩层	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	变形模量 E / MPa	泊松比 μ
覆盖层	19.0	0.022	20	10	0.45
全风化 泥质砂岩	20.0	0.025	30	25	0.45
强风化 泥质砂岩	21.0	0.04	35	1000	0.40
弱风化 泥质砂岩	23.5	0.2	27	3650 (初始值,待反演)	0.325

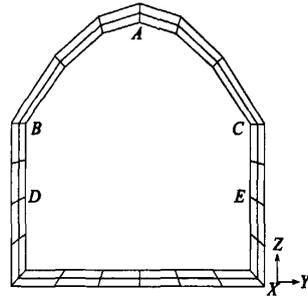


图 2 位移观测点布置

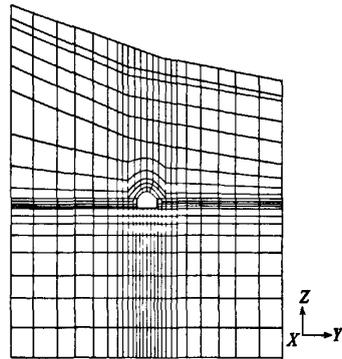


图 3 计算网格

采用 A、B 和 A、C 的相对位移进行反分析, A、B 的相对位移为 3.03 mm, A、C 的相对位移为 2.87 mm。经过 3 次迭代,本文仅对弹性模量进行反演,得到弱风化泥质砂岩的弹模为 1.45×10^3 MPa。迭代过程见图 4。

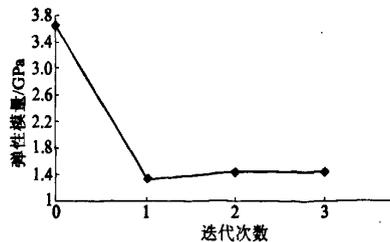


图 4 参数迭代

然后采用反演的参数值进行正分析,得到 D、E 两点的计算相对位移为 1.71 mm,现场实测的 D、E

两点的相对位移为 1.58 mm,二者相差不大,因此采用本文方法反演效果较为满意。

4 结论

洞室工程中大量不确定性因素的存在使得监测结果不可避免地存在随机性,有时会使得变形监测结果产生较大的误差,甚至失真,以监测结果的绝对值所反演得到的参数可能是错误的,在这种情况下,以监测数据的相对值进行参数反演在一定程度上可以消除测量误差,并从理论上对此进行了论证。并结合 DFP 优化算法开发了基于相对位移的随机反分析法,将其应用于一具体洞室工程中反演其弹性模量取得了较为理想的效果。

参考文献

- [1] 杨林德,冯紫良. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [2] 孙钧,蒋树屏. 岩土力学反演问题的随机理论与方法[M]. 汕头:汕头大学出版社,1996.
- [3] 贾超,刘宁,肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学,2003,24(3):450-454.

- [4] Ledesma A., Gens A. & Alonso E. Probabilistic back analysis using a Maximum likelihood approach [C]. Proc. 12th Int. Conf. On Soil Mech. & Foundation Eng., Brazil, 1989; 849-852.
- [5] 孙均,黄伟. 岩土力学参数弹性反演问题的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报,1992,11(3):221-229.
- [6] 刘福胜,文克舟,王成. 用隧道周边位移反分析围岩压力的解析研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(7):1203-1207.
- [7] 蒋中信. 基于反算原理的滑坡推力简易估算[J]. 岩土工程技术,2005,19(6):319-322.
- [8] 魏云杰,陶连金,许模. 基于 TBA 法的地下厂房围岩力学参数位移反分析[J]. 北京工业大学学报,2008,34(10):1072-1075.
- [9] 郭凌云,肖明. 地下工程岩体参数场反演分析应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3822-3826.
- [10] 班宏泰,覃文文,赵昕,等. 岩体参数的反演分析方法[J]. 科技创新导报,2008(8):7-8.

收稿日期:2009-04-30

(上接第 200 页)

平均分配的原则进行。通过计算发现第一排抗滑桩上所承担的推力明显大于第二排抗滑桩(证明设计中采用的第一排抗滑桩截面尺寸大于第二排的做法是科学合理的)。

2) 两排抗滑桩所承担的滑坡推力分担比并非一成不变。如两排桩间的土部分缺失(如隧道、路堑开挖)后,这种分担比的差异更为明显。就其原因在于隧道、路堑的开挖破坏了原有的滑坡推力传递路径,如开挖面积过大将导致第二排完全无法发挥自身的作用,转由第一排抗滑桩承担所有的滑坡推力,这样也就违背了采用多排抗滑桩联合治理滑坡的目地。

在曹家山隧道开挖过程前,应采用诸如注浆的工程措施提高隧道洞顶附近的岩土体参数指标,一方面确保隧道开挖过程中不发生坍塌现象;另一方面确保多排抗滑桩在滑坡治理过程中发挥共同作用。

利用有限元数值计算方法,对大型滑坡的多排抗滑桩开展分担比的研究工作,可为抗滑桩结构计算提供更为科学、合理的依据,从而避免了原方法存在的种种局限性,为多排抗滑桩的设计提供了一种新的、行之有效的解决办法。

参考文献

- [1] 宋从军,周德培,肖世国. 岩石高边坡埋入式抗滑桩

- 的内力计算[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):105-109.
- [2] 高大水,徐年丰,高银水,等. 用混凝土阻滑键技术治理灰岩顺层滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增2):5433-5437.
- [3] 吴顺川,高永涛,金爱兵. 失稳高陡路堑边坡桩锚固加固方案分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(21):3954-3958.
- [4] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律[J]. 中国铁道科学,2005,21(1):48-56.
- [5] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [6] 赵尚毅,时卫民,郑颖人. 边坡稳定性分析的有限元法[J]. 地下空间,2001,21(5):450-454.
- [7] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定性安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):344-346.
- [8] 吕美军,宴鄂川. 埋入式双排抗滑桩滑坡推力分配研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增1):4866-4871.
- [9] 郑颖人,雷文杰,赵尚毅,等. 抗滑桩设计中的两个问题[J]. 公路交通科技,2005,22(6):47-51.
- [10] 王珣,李云华,云峰. 退火遗传算法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术,2008,12(5):47-51.

收稿日期:2009-06-12