

岩土力学反分析的数值反演方法

赵新铭, 刘 宁, 张 剑

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:通过对岩土力学反分析的数学描述法的介绍, 揭示了岩土力学反分析的本质. 介绍位移反分析中各种数值反演方法及其应用, 包括基于矩阵求逆原理的逆解法, 优化反演法, 图谱法以及基于遗传算法和人工神经网络的智能反演方法, 并介绍了反演方法的最新进展. 阐述各类反演方法的原理、特点、适用范围和存在的局限性, 指出数值反演方法进一步研究的方向.

关键词:岩石力学; 土力学; 反分析; 数值反演方法; 位移

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)02-0055-04

20 世纪 70 年代中后期, 由 Kirstan 提出, 后经 Gioda, Sakurai, Maier 和 Cividini 等学者的发展, 基于实测位移反求岩体力学参数和初始地应力的位移反分析是逆向思维在岩石力学研究中的一次成功应用, 开辟了岩体参数和初始地应力研究的新途径, 受到了普遍的关注, 并且由于反分析得到的参数作为在同一模型下正分析的输入参数大大提高了分析结果的可靠性而受到工程界的欢迎^[1].

在岩土力学位移反分析研究中, 反演方法的研究一直是重点和热点问题, 因为反分析结果的可靠性及反演效率与反演方法密切相关. 本文对现有各种数值反演方法进行了总结, 分析了各种方法的原理、特点和存在的局限性, 同时介绍了数值反演方法的新进展.

1 岩土力学反分析的数学描述法

设 D 为 n 维空间的连通开区域, 变量 $x = (x_1, \dots, x_n)$, 其中某个变元可表示时间, D 的边界记为 BD , 则系统模型的一般形式为

$$L(u, Q) = f, x \in D \quad (1)$$

$$M(u, Q) = g, x \in BD \quad (2)$$

式中: Q 为系统状态变量; u, f, g 均为 x 的函数; u 为与介质特性有关的物理参量; L 为作用于 D 上的微分算子; M 为作用于边界上的微分算子; f 为作用条件, 是 $x \in D$ 的函数; g 为边界作用条件, 是 $x \in BD$ 的函数.

u 的分量中含内因(如介质特性参数等)及外因

(如外力作用等). 如 u, f, g 已知, 把 u, f, g 代入式(1)和(2), 均存在某种意义下与物理背景符合的广义解, 此求解过程为正分析; 相反, 如 u, f, g 并非全已知, 而在 D 的某个子集 D_i 上, 可实测出解 Q 的某些信息. 那么, 如何从这些实测信息中求得 u, f, g 中的未知量, 则为一个反分析过程^[2].

2 岩土力学反分析的数值反演方法及其应用

2.1 逆解法

逆解法是依据矩阵求逆原理建立的反演分析算法. 它是直接利用量测位移由正分析方程反推得到的逆方程, 从而得到待定参数(力学特性参数和初始地应力分布参数等). 简单地讲, 逆解法即是正分析的逆过程. 此法基于各点位移与弹性模量成反比, 与荷载成正比的基本假设, 仅适用于线弹性等比较简单的问题. 其优点是计算速度快, 占用计算机内存少, 可一次解出所有的待定参数.

在逆解法的研究和应用方面, 日本学者 Sakurai^[3,4]提出了反算隧洞围岩地应力及岩体弹性模量的逆解法, 该方法基于有限元分析的逆过程, 只进行逆分析一次便可得到参数的最佳估计, 因此在实际工程中得到了广泛应用. 然而, 这种方法对于不确定性系统还有待进一步研究. 随着岩土工程的发展, 其结构设计正有传统的确定性方法转向概率方法, 相应地其分析手段也转变为概率手段. 因此在分析时, 需事先知道岩土介质特性参数的概率分布及其数字特征, 如均值、方差及高阶矩. 对于岩土介质这一本

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59809003); 教育部博士点基金资助项目(1999029402)

作者简介: 赵新铭(1962—), 男, 河南巩义人, 副教授, 博士研究生, 主要从事工程力学研究.

身具有随机不确定特性的系统,进行其特性参数的不确定性反分析研究具有更重要的理论价值.文献[5]采用 Sakurai 的逆反分析思路,推导了随机有限元的逆过程,提出了基于量测位移的随机逆反分析方法,并基于特征函数法得到了函数的方差和高阶矩.然而,目前的随机逆反分析研究还只能就弹性有限元来进行,深入到弹塑性、粘弹塑性等复杂非线性计算模型的随机逆反分析则有待进一步研究.

2.2 直接法

直接法又称直接逼近法,也可称为优化反演法.这种方法是把参数反演问题转化为一个目标函数的寻优问题,直接利用正分析的过程和格式,通过迭代最小误差函数,逐次修正未知参数的试算值,直至获得“最佳值”.其中优化迭代过程常用的方法有:单纯形法、复合形法、变量替换法、共轭梯度法、罚函数法、Powell 法等. Gioda 等^[6]总结了适用于岩土工程反分析的四种优化法,即单纯形法、Rosenbrok 法(是一种改进的变量替换法)、拟梯度法和 Powell 法.这些方法各有其优点和不足.总的来说,这类方法的特点是可用于线性及各类非线性问题的反分析,具有很宽的适用范围.其缺点是通常需给出待定参数的试探值或分布区间等;计算工作量大,解的稳定性差,特别是待定参数的数目较多时,费时、费工,收敛速度缓慢.

由于优化反演法具有广泛的适用性,因此,自 20 世纪 70 年代以来,国内外学者在这方面做了大量工作,并在工程实践中得到广泛应用.1980 年, Gioda 等^[7]采用单纯形等优化求解岩体的弹性及弹塑性力学参数,并讨论了不同优化方法在岩土工程反分析中的适用性^[6];1883 年 Arai^[8]采用二次剃度法求解弹性模量和泊松比 μ 的方法;文献[9]采用增量反分析与复合形相结合的方法,反演地应力、弹模及粘弹塑性参数,减少了优化中的设计变量,同时也提高了计算精度;为了解决多介质弹性模量反分析中目标函数的多极值性、收敛结果与初值相关等问题,文献[10]利用线弹性问题的尺度特性,通过递归技术将多变量优化问题转变为一系列的单变量优化问题,并使收敛结果与初值无关;文献[11]采用四种最优化方法对地下工程围岩的岩体力学参数和初始地应力进行了优化位移反分析研究,为解决弹性、横观各向同性及弹塑性等多种岩体互层的复杂围岩的优化位移反分析编制了平面问题有限元程序;文献[12]采用单纯形等优化方法讨论了符合马克斯威尔体等三种流变模型的岩体的位移反分析方法,得出了圆形洞室条件下流变岩体变形与时间的关系,为利用所测得的与时间有关的径向开挖位移进行地

应力场和岩体参数的反分析提供了一条可能的途径;文献[13]从边坡实测位移出发,充分利用室内外已量测获得参数和实验资料,使位移反分析参数减少到最低限度既简化了反分析过程,又避免了可能出现的唯一性和收敛性问题;文献[14]以弹粘塑性势理论和有限单元法为基础,利用复合形算法建立了力学参数的联合位移反分析模型,并在此基础上实现了船闸高边坡稳定性及变位的实时预报.

2.3 图谱法

图谱法是杨志法^[15]提出的一种位移图解实用反分析方法.该法以预先通过有限元计算得到的对应于各种不同弹性模量和初始地应力与位移的关系曲线,建立简便的图谱和图表.根据相似原理,由现场量测位移通过图谱和图表的图解反推初始地应力和弹性模量.目前,这一方法已发展为用计算机自动检索^[16],使用时只需输入实际工程的尺寸与荷载相似比,即可得到所需的地层参数,方法简便实用,对于线弹性反分析更方便实用,具有较好的精度.

2.4 智能反演法

逆解法、优化法和图谱法作为反演确定岩土工程介质本构模型及物性参数的主要方法,自 20 世纪 70 年代初至今得到了快速发展,并且在工程中得到广泛应用^[17].但实际工程中发现,传统优化方法存在结果依赖于初值的选取,难以进行多参数优化及优化结果易陷入局部极值等缺点.近年来,一种源于自然进化的全局搜索优化算法——遗传算法和具有模拟人类大脑部分形象思维能力的人工神经网络方法,以其良好的性能引起了人们的重视,并被引入岩土工程研究中^[18].

遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)是美国著名学者 J.H.Holland 于 20 世纪 70 年代中期首先提出来的.它是建立于遗传学及自然选择基础上的一种随机搜索算法.利用基于遗传算法的智能反演方法可以同时反演岩体的模型参数或多个物性参数^[19],其全局收敛性质和很强的鲁棒性可以保证反分析结果的可靠性.虽然实践证明遗传算法是一种高效、可信的反分析方法,但它也存在严重依赖先验知识、计算量较大等问题,这是本方法有待解决的问题.

人工神经网络(artificial neural network,简称 ANN)是一个高度复杂、非线性的动态分析系统,具有良好的模式辨识能力,几乎可模拟任何复杂的非线性系统,因而用神经网络模型模拟复杂的岩土工程问题无疑可收到好的效果.它特别适用于参数变量和目标函数之间无数学表达式的复杂工程问题,在岩土工程中也得到了广泛的应用^[20-22].一个简单的神经网络模型可以反映一个非常复杂的映射关系.因此,用神经

网络模型来表达岩土工程中岩体特性参数与岩体位移值之间的映射关系是非常适宜的。

利用基于神经网络的智能反演方法,文献[20]基于多层前馈神经网络模型(back-propagation,简称BP网络),反演得到岩体粘弹性力学参数;文献[21]则基于BP网络模型反求岩土工程计算中的邓肯参数,得到了满意的结果;文献[22]基于BP网络建立了边坡位移反分析方法,得到了三峡永久船闸边坡多介质岩体的宏观等效弹性模量,并利用该弹性模量进行了有限元正分析计算,预测了三峡永久船闸开挖边坡下一开挖阶段的应力及变形发展趋势。

此外,为解决传统的各种优化方法易于陷入局部最优值和映射关系难以确定的问题,文献[18]根据GA和ANN的特点,将两者有机地结合起来,提出一种用于位移反分析的进化神经网络方法。

3 反演方法拓展

随着系统论、信息论及模型识别技术研究的深入,近年来,对岩土介质系统物理本构关系的反演建模、模型可信度分析、模型识别、检验理论和逆问题统一理论的建立等也有不少研究。文献[23]以系统辨识理论和连续介质力学原则为根据,综合运用信息论、最优化方法、决策论以及模式识别技术,较系统地阐述了岩土介质系统逆问题的建模、参数优化辨识及目标函数构造的原则和方法。文献[5]基于Bayesian原理,通过考虑荷载和变形的不确定性及参数的先验信息,提出了广义参数反分析,如Bayesian反分析、最大似然反分析等。文献[24]基于信息论观点,同时考虑观测过程、理论分析、经验判断三者的不确定性,从信息论的角度来研究反分析过程,并在数学上建立了逆问题的一般信息论框架,明确提出了用数据信息研究反分析的观点,在数学上实现了用信息描述反分析过程的基本设想,并从信息熵的概念及统计优化理论对上述问题进行研究,提出了反分析的全信息优化法。该法揭示了反分析的信息本质,使反分析过程的信息综合有了一个完备的表达,并把反分析中的算子逆演同数据处理联系起来,为反分析研究提供了理论依据。此外,非确定性反分析还有模糊反分析、扩张卡尔曼有限元反分析^[5]等。

4 结 语

岩土力学反分析是力学反问题应用的一个主要领域,因为岩土力学反分析中正问题的研究,无论是理论还是算法都比较成熟,这是反分析的基础。从另一个角度看,反分析也是岩土力学中的一个重要分

支,因为在工程实践中,正问题中材料参数的取值往往依赖于反分析。

岩土力学反分析的研究是直接针对解决工程实际问题提出的,它为了解决岩土本构模型及物性参数的确定这两大学科发展的“瓶颈”问题打开了思路。由于其具有的独特性,反分析研究发展迅速。但由于岩土介质的复杂性和不确知性,传统的反分析方法存在一些本质上的问题,为了解决这些问题,使反分析研究更具活力及实用性,岩土力学智能反分析的研究是必要并且可行的。

由于岩土介质的复杂性,位移观测量往往具有很强的离散性,它们是一些在确定性意义上不可预测的随机信号。待求参数并非某一确定量,而是处于某种随机过程的状态估计量,所以,基于不确定性理论的反分析方法值得进一步研究。此外,在实际工程中,介质往往不是弹性的,因此,针对粘弹性、粘塑性介质的反演方法研究也应受到关注。

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 黄光远, 刘维倩, 刘小军. 反问题与计算力学[J]. 计算结构力学及其应用, 1993, 10(3): 302 ~ 306.
- [3] Sakurai S, Abe S. A design approach to dimensioning underground openings[A]. In: Proc 3rd Int Conf Numerical Methods in Geomechanics[C]. Aachen, 1979. 649 ~ 661.
- [4] Sakurai S, Takeuchi K. Back analysis of measured displacement of tunnel[J]. Rock Mech and Rock Eng, 1983, 16(3): 173 ~ 180.
- [5] 孙钧, 蒋树屏, 袁勇, 等. 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.
- [6] Gioda G, Pandolfi A, Cividini A. A comparative evaluation of some back analysis algorithms and their application to in-situ load tests[A]. In: Proc 2nd Int Symp on Field Measurement in Geom[C]. Kobe, 1987. 1131 ~ 1144.
- [7] Gioda G, Maier G. Direct search solution of an inverse problem in elasto-plasticity, identification of cohesion, friction angle and in-situ stress by pressure tunnel tests[J]. Int J Num Methods in Eng, 1980(15): 1823 ~ 1834.
- [8] Arai R. An inverse problem approach to the predication of multi-dimensional consolidation behavior[J]. Soil and foundation, 1984, 24(1): 95 ~ 108.
- [9] 王芝银, 李云鹏. 地下工程围岩粘弹塑性参数反分析[J]. 水利学报, 1990(9): 11 ~ 16.
- [10] 邓建辉, 丰定祥, 葛修润, 等. 多介质边坡弹性模量位移反分析模型与优化算法[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 22 ~ 27.
- [11] 李素华, 朱维申. 优化方法在弹性、横观各向同性以及弹塑性围岩变形观测反分析中的应用[J]. 岩石力学与

工程学报, 1993, 12(2): 105 ~ 114.

- [12] 薛琳, 鄧玉亭, 杨志法. 确定流变岩体的参数及地应力的位移反分析法[J]. 地质科学, 1986(4): 371 ~ 379.
- [13] 杨志法, 王芝银. 五强溪水电站船闸边坡的粘弹性位移反分析及变形预测[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 66 ~ 71.
- [14] 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.
- [15] 杨志法. 有限元法图谱[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 15 ~ 42.
- [16] Feng Jing, Yang Zhifa. Tupa ~ Displacement back analysis method and its application[A]. In: Proc Int Cong on Progress and Innovation in Tunneling[C]. Toronto Ontario, Canada, 1989. 2123 ~ 2126.
- [17] 杨林德. 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.
- [18] 冯夏庭, 张治强, 杨成祥. 位移反分析的进化神经网络

方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529 ~ 533.

- [19] 高玮, 郑颖人. 岩体参数的进化反演[J]. 水利学报, 2000(8): 1 ~ 5.
- [20] 李立新, 王建党, 李造鼎. 神经网络模型在非线性位移反分析中的应用[J]. 岩土力学, 1997, 1(2): 62 ~ 66.
- [21] 樊琨, 刘宇敏, 张艳华. 基于人工神经网络的岩土工程力学参数反分析[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 98 ~ 102.
- [22] 李瑞有, 李迪, 马水山. 三峡永久船闸开挖边坡岩体力学参数反分析[J]. 长江科学院院报, 1998, 18(2): 10 ~ 13.
- [23] 袁勇, 孙钧. 岩体本构模型反演识别理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 232 ~ 239.
- [24] 刘维宁. 岩土工程反分析方法的信息论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 193 ~ 205.

(收稿日期: 2002-03-22 编辑: 张志琴)

(上接第 43 页)

滑动法所假定的破坏圆弧是接近的, 从而从另一个角度说明有限元计算方法可信, 其计算结果是可靠的.

2 大沙河工程出海口堤段边坡稳定评价

对大沙河工程出海口堤段边坡的分析计算结果表明:

a. 选取的 6 个典型断面在施工期和地震期的强度储备系数均大于 1.25, 说明河堤边坡是稳定的, 其稳定安全还有一定的裕度. 这个结果也与大沙河堤从建成至今 1 年多的时间未出现边坡失稳现象相吻合.

b. 大沙河河堤边坡 y 方向最大压应力一般出现在施工期堤顶部和滨海段下部地基的淤泥层下部砾质层中, 最大压应力发生在施工期间 37 号断面, 其值为 190.617 kPa. 除淤泥层外, 大多数断面的最大压应力值小于该地的承载力标准值, 说明除淤泥层以外的地层是安全的.

c. 由于本次计算没有模拟分层加载, 荷载是一次性加上去的, 因此位移的计算结果是 y 方向的位移在堤的顶部最大(如果采用分层加载的方式, 则 y 方向的最大位移出现在断面的中间部位). y 方向位移最大值在 7 ~ 11 cm 之间, 这个值一般来说较实测位移要偏大一些.

d. 河堤段的渐进破坏过程及破坏模式符合土堤失稳破坏的一般规律, 并且其塑性区破坏形态也与圆弧滑动法所假定的破坏圆弧比较接近, 从而从另一个角度说明有限元计算方法可信, 其计算结果

是可靠的.

e. 由于河堤淤泥层是该工程主要的软弱层, 在施工过程中采用抛石挤淤措施, 经过非线性有限元计算分析证明是稳定的. 今后随着时间的增长, 基础淤泥的固结程度会越来越高, 河堤断面的安全程度也会变好.

3 结论及展望

将强度储备系数法、有限元法及破坏概率方法结合在一起, 进行边坡稳定性评价, 实用效果较好, 有如下几点认识:

a. 边坡稳定评价的强度储备系数法能够比较好地反映边坡变形失稳的演变过程, 其可行性程度较高, 具有很好的推广应用价值.

b. 将有限单元法同强度储备系数结合在一起, 进行边坡稳定性评价, 拓宽了边坡稳定评价的理论和方法.

c. 本文仅对同比例降强度(c, ϕ)特例作分析, 事实上作不同比例降强度分析, 用分项强度储备系数进行边坡稳定性评价更符合边坡失稳的实际情况. 对边坡分项强度储备系数的安全取值区间, 需在今后作进一步研究.

参考文献:

- [1] 加拿大矿物和能源技术中心. 边坡工程手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.

(收稿日期: 2002-09-28 编辑: 傅伟群)