

初始地应力场反演及回归分析方法研究^{*}

金艳丽 刘汉东

(华北水利水电学院岩土工程系 郑州 450008)

摘 要 运用岩体工程地质力学方法和数理统计原理,建立了初始地应力场的三维有限元反演及回归分析模型。该模型克服了边界调整法等一般反分析法的不足,具有很好的实用价值和易操作性,能够方便较为准确地反演区域初始地应力场。

关键词 初始地应力 反演及回归分析 FEM

BACK – ANALYSIS AND STATISTICS REGRESSION MODEL FOR IN – SITU STRESS FIELD

JIN Yanli LIU Handong

(Department of Geotechnical Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008)

Abstract Based on rock mass engineering geomechanical theory and probability and statistics for engineering, establish a 3 – D FEM back – analysis and statistics regression analysis model for in – situ crustal stress field. The model overcomes the shortcomings of the boundary loading adjustment method etc . It is practicable and easily manipulated, which can back – analyze the region situ crustal stress field quickly and accurately.

Key words Situ crustal stress, Back – analysis and statistics regression analysis, FEM

1 引 言

初始地应力场是工程边坡,地下洞室或地基岩体稳定性的影响因素之一,也是工程设计需要的基本指标,尤其在大型水电工程建设中更为重要。利用的初始地应力场是否可靠,岩体参数选取是否合理将直接影响到工程设计与施工的可靠性与安全性。现场实测地应力是提供地应力场最直接的途径。但在工程现场,由于场地和经费等原因,不可能进行大量的全面量测,而且地应力成因复杂,影响因素很多,多测点的测量成果在很大程度上反映的当地的局部应力场,且测量成果受到测量误差的影响,使得地应力测量值有一定程度的离散性。因此,根据现场量测信息(如应力,位移和应变等)来反演初始地应力和岩体性态参数的反分析方法,以其实用

性,开辟了解决岩土工程计算参数选取最棘手问题的独特途径。

20 世纪 70 年代以来,随着新奥法施工技术的出现和数值计算方法的迅速发展,现场量测的位移或应力增量信息成为反演确定初始地应力和地层材料特性参数的主要依据。然而,由于初始地应力场的研究一般都需在洞室开挖前进行,使现场位移量测信息不可能作为这类研究的先验信息。在初始地应力场研究中目前可供工程实践采用的方法仅是以某些位置的现场实测地应力资料来反演初始地应力场的应力反分析方法(又叫“选点法”)。目前有关此类课题研究取得的成果尚少。

岩体初始地应力场的研究早已受到人们的关注。初始地应力的计算方法大致有以下几种:(1)岩体自重应力场是初始地应力场;(2)海姆法则;(3)测压系数法(即金尼可的弹性理论算法);

^{*} 河南省创新人才基金资助。

(4)边界荷载调整法;(5)应力函数法;(6)有限元数学模型回归分析法;(7)地应力场的趋势分析法;(8)三维有限元反演法等。前3种方法比较简单,适用于一些小型工程。而后几种方法较复杂,都需借助有限元进行分析模拟,在大中型工程中有广泛应用。其中,边界荷载调整法按照假定的计算域调整边界荷载,用有限元求解域内的构造应力场和重力场。经过试算使所求应力值在测点的计算值与实测值达到较好的拟合。该法认为地应力由岩体自重和构造应力等复杂因素作用形成,计算中考虑了构造应力场和重力场,但边界荷载的调整无规律可循,且对有多个测点或三维地应力场的求解调整难度加大,对解的唯一性没有理论依据,解的收敛性也难于判断的缺点;应力函数法的基本思想是根据弹性理论和地应力场的分布,设定一个应力函数,它满足调和方程,所以也满足平衡方程和变形协调条件。在计算域内给定点上,使借助函数计算的应力值与已知实测值相吻合。但是该法用于有限元计算时用它求出的应力分量并不能唯一求出其所对应的位移。

2 初始地应力场反演及回归分析模型

2.1 计算模型

岩体初始地应力场分布规律研究是岩土工程问题计算模型研究的重要方面。一般说来,初始地应力场的成因和影响因素很多,它与场内的地质因素和区域构造运动密切相关,其分布规律往往非常复杂。从地质年代看,它是随时间空间而变化的非稳定场。对一般工程而言,可将其视为不考虑时代因素的相对稳定应力场,且认为地应力场由自重场和构造场组成。

为使回归分析得出合理的结果,通过对基本受力状态测点应力的计算和比较,逐步排除对所论区域不起主导作用的因素,即借助试计算对可能起作用的,与现存构造形迹相应的构造应力逐个筛选和检验,求得与工程地质勘察获得资料相一致的优化解(此过程可称为“逐步回归分析法”)。通常情况下,将下列六种因素作为模拟岩层自重和地质构造力作用的基本因素,即可作为逐步回归分析的基本可能因素。

- (1)自重应力状态(σ_1)
- (2)东西向水平均匀挤压构造运动 σ_2 (图1)。
- (3)南北向水平均匀挤压构造运动 σ_3 (图2)。
- (4)水平面内的均匀剪切变形构造运动 σ_4 (图

3)。

(5)东西向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动 σ_5 (图3)。

(6)南北向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动 σ_6 (图3)。



图1 东西向挤压构造运动

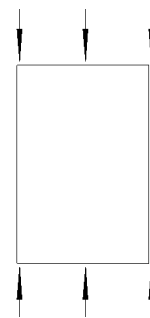


图2 南北向挤压构造运动

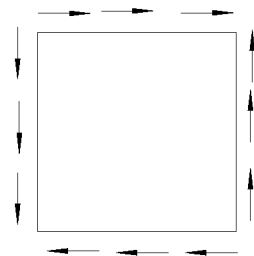


图3 剪切变形构造运动

对于地应力实际所在不同的面沿不同方向分布荷载的具体量值是未知的,可通过对计算域边界加相应的单位分布荷载,利用常规有限元正演法对各种因素单独作用下进行计算,即先求得各点的测点应力,再按照现实的可能性,根据地应力实测值,建立初始地应力场与各基本影响因素之间的回归方程。由测得的地应力资料,可分层筛选和回归出对枢纽区域的初始地应力场确有影响的构造因素并获得各种影响因素的唯一解,进而得到可供工程使用的三维地应力场。

很明显,上述地应力场的基本影响因素的确定是人为的。在实际应用中,应充分利用地质勘察资

料,运用岩体工程地质力学分析法,或利用震源机制解对整个区域的构造应力场进行研究,为初始地应力场的定量分析建立合理的力学模型提供帮助。如文献[5]中,自重应力模拟用一般应力模式,而构造应力模拟主要是用地质力学方法建立合理的力学模拟,反演了天荒坪抽水储能电站的区域初始地应力场。

2.2 回归分析模型

通过上述分析确定了初始地应力场计为 Y 的 6 种基本影响因素 σ_i , 分别将其计为 $X_i, i = 1, 2 \cdots, 6$ 。 Y 与 X 之间的线性回归表达式可写为:

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{1}$$

式中, Y 为地应力观测值相量。

$$Y = (y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_p)^T$$

β 为参数列向量

$$\beta = (\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \beta_4 \ \beta_5 \ \beta_6)^T$$

X 为有限元正算求得的 PG7 测点应力矩阵

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{16} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{p1} & \cdots & x_{p6} \end{bmatrix}$$

ε 为 P 维误差随机变量

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \cdots \ \varepsilon_p)^T$$

对于有 N 个观测点, 三维问题就有 $6N$ 个观测地应力分量 $y_i, k = 1, 2 \cdots, P$, 则 $P = 6N$ 。对任意 ε_k 满足 (1) $E(\varepsilon_k) = 0$; (2) $\varepsilon_k \sim N(0, \sigma)$; (3) ε_k 之间的协方差 $\text{COV}(\varepsilon_k, \varepsilon_h) = 0, k \neq h$ 或 $= 0, k = h$ 。

回归分析的主要依据是 $6N$ 个实测值 y_i 和有限元正演计算的 ε_h 在数学模型中的“观测”值 x_k , 给出各回归系数 β_i 的估计值 $b_i, i = 0, 1 \cdots 6$, 则回归方程可写为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \cdots + b_6x_6 \tag{2}$$

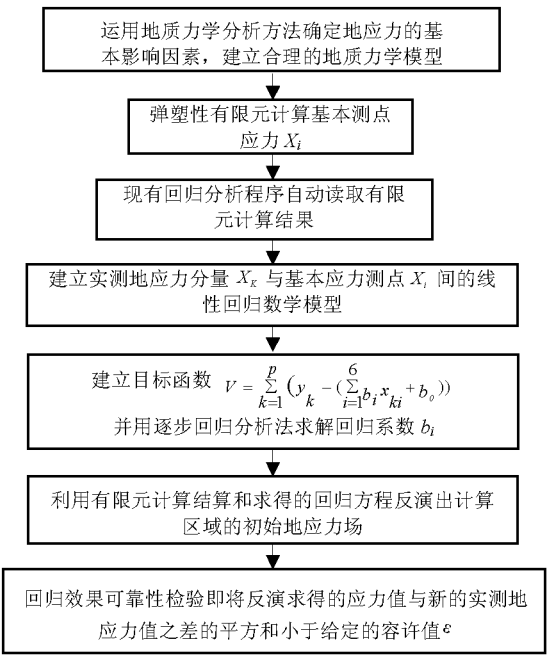
关于回归系数 b_i 的求解方法有多种。常用的有最小二乘法。在最小二乘法中, 需逐个剔除对 Y 影响不显著的因子, 由于每引入一个因子或剔除一个因子, 都得重新计算回归系数, 使得由不同途径进行回归分析将有差别甚大的工作量。为使计算过程优化, 这里采用逐步回归分析方法。此法是常用的变量筛选法。它是向前选择变量和先后删除变量的结合。它采用边进边退法, 对模型外部的变量, 只要它还可以提供显著的解释信息, 就可以再次引入模型。

而对于已在模型内部的变量, 只要它的偏 F 检验不能通过还可能从模型中被删除。其思想是通过计算将偏回归平方和最大的并经检验证明是显著的因子逐个引入方程, 每次引入新因子后, 都对先前已经引入的因子再次逐个检验, 并将已使偏回归平方和变得不显著的因子一律剔除, 直到回归方程已包含所有具有影响的因子为止。这样就可根据回归方程和有限元计算结果求得计算域内的离散初始地应力场。

2.3 三维有限元反演回归初始地应力场程序的实现

区域初始地应力场计算选取的计算范围往往比较大, 使在计算机上实现有限元计算常常容量不足, 故借助粗细网格相结合的两步算法作处理。第一步就全范围进行有限元分析用粗网格, 求得区域离散初始地应力场; 第二步就所关心的工程区域采用细网格, 即给定任意一点坐标值, 总可在大区域网格下找到对应的单元, 将该单元再细分成若干小单元, 就可由给定的任一点坐标值找到此点在大区域网格下单元位置, 即找到此点在大区域网格下的局部坐标。有了局部坐标, 在利用在大区域单元下 8 个角结点的地应力回归值通过形函数来插值求得任一点的地应力值。最后便可得到整个计算区域的初始地应力场。

程序流程如下:



3 反演及回归分析中应注意的几个问题

(1)反分析求的计算参数是提供用于计算的“等效参数”或叫“综合参数”。所以其未必有清晰的物理概念,也不必去苛求能够考虑多种因素的逼近真实的复杂的力学模型;而采用能解决实际问题的最简单模型(如弹塑性本构模型或线弹性本构模型),否则又会重新陷入正分析的困难之中。

(2)至于单元类型,对断层的有限元模拟采用16 结点等参数曲线形薄膜单元,对其余岩体则采用20 结点等参单元离散。

(3)计算范围的确定遵循以下原则:①几何范围必须包含全部感兴趣的有关区域;②边界处的几何约束条件必须易于确定,将山脊线与河谷线选作边界。由于粗网格的边界常为山脊线与河谷线。

(4)采用两步算法将先后形成两张有限元网格。且其中一张必然包含在另一张网格中。这两类区域边界的一致性由位移边界条件控制,工程区细网格边界结点处的位移量可借助形函数由粗网格在公共结点处的位移值插入而得,而公共结点处的位移值则由粗网格的有限元分析获得

4 结 论

本文建立的地应力反分析模型,运用岩体工程

地质力学分析方法综合考虑了地应力场的基本影响因素,用三维有限元计算了基本受力状态测点应力,并用数理统计原理建立了地应力实测值和基本测点应力间的回归方程,最后运用逐步回归分析法逐步排除了对所论区域不起主导作用的因素,求出回归系数,反演出整个区域的初始地应力场。它克服了一般反分析如边界调整法等算法的不足之处,为初始地应力场的计算提供了一种实用而有效的方法。

参 考 文 献

[1] 杨林德. 岩土工程问题反演理论与工程实践. 北京:科学出版社,1996.

[2] 柴贺军. 大型电站坝区应立场三维弹塑性有限元模拟与拟合. 岩石力学与工程学报. 2002.

[3] 孔广亚. 应力函数在某金矿地应力场反分析中的应用. 沈阳黄金学院学报,1996.

[4] 邵国建. 岩体初始地应力场的反演回归分析. 水利水电科技进展,2000.

[5] 刘素琴. 空间地应力场反演技术及其在天荒坪工程中的应用. 华东水电技术,1990.