

基于 ANSYS 优化设计的岩体参数反演分析

班宏泰^{1 2} 覃文文^{1 2} 赵 昕^{1 2} 柏洪雪^{1 2} 费文平^{1 2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065 ;

2. 四川大学水利水电学院 四川 成都 610065)

摘要 :优化设计可以获得全局的最优解。基于大型商业软件 ANSYS 的优化设计进行二次开发 ,采用子问题近似法 ,对瀑布沟地下厂房围岩参数进行了反演分析。结果表明 ,基于优化设计的岩体参数的反演分析结果与实测结果吻合良好。

关键词 岩体参数 ;优化设计 ;反演分析

中图分类号 :TV45 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)S1-0058-04

岩体参数(如弹性模量、泊松比等)的反演分析是根据少数已知测点的位移值或应力值等反演分析岩体材料参数的过程,是水电工程设计与数值计算的基础。岩体力学参数的确定是岩土工程数值计算中的关键问题,由于岩体的参数往往难以确定,对数值计算的结果会造成很大的影响,而实验室对岩体参数的测定均存在尺度效应问题,考虑到经济成本,现场取样的数量往往不多,因而无法得到整个工程区岩体的真实参数。采用反演分析的方法可以综合考虑诸多地质因素的影响,更加经济、准确地得到岩体的参数^[1]。

有不少学者开展了岩体参数反演分析研究。目前,岩体参数反演分析的计算方法主要有^[2] :①正反分析法 ;②逆反分析法 ;③局部最优化方法 ;④人工神经网络法 ;⑤遗传算法 ;⑥粒子群算法 ;⑦梯度类方法 ;⑧混合算法 ;⑨新型仿生算法。反分析法^[3]编程简单,但在反演弹塑性参数等非线性问题时,解的唯一性以及不收敛问题还未得到很好的解决,只能在地质条件比较简单的情况下采用,局部最优化方法对初值的依赖性较强,不易获得全局最优解,其他方法具有适应性强、非线性强、能获得全局最优解的优点,但往往效率较低^[4]。

优化反演分析法致力于寻找使计算结果与观测结果之间的误差为最小的解答,可通过建立目标函数来实现,即在各参数可能的变化范围内找到一组使误差为最小的最佳参数。大型商用软件 ANSYS 提供了良好的二次开发环境,通过对 ANSYS 优化设

计模块的二次开发可以实现对岩体参数的反演分析^[5-7]。

1 ANSYS 的优化设计方法

ANSYS 有多种优化设计方法^[8],包括单步法、随机搜索法、乘子评估法、最优梯度法、扫描法、子问题近似法、一阶方法。其中最常用的方法是子问题近似法。

子问题近似法^[8]是一种先进的零阶命令方法,即不用计算目标函数和状态变量的梯度。具体来说就是不用每次通过有限元分析来得到状态变量和目标函数的值,而是在一定分析的基础上,采用插值的方法,用二次方程式得到的近似值来替换目标函数和状态变量,得到两者与设计变量的拟合关系曲线,从而求出最优解。由于不需要计算目标函数的导数,因而计算速度快。

在该方法中,程序把优化循环产生的目标函数、状态变量与设计变量的关系拟合成曲线(或曲面),然后在新一步迭代中,用新生成的数据更新拟合好后的曲线(或曲面)。可以采用的拟合方式有线性拟合、平方拟合和平方差加交叉项拟合。

平方拟合的公式为

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n \sum_j^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

默认情况下,用平方差加交叉项拟合目标函数,用平方函数拟合状态变量。运用加权平方最小技术确定二次方程的系数。

估计值与真值的差为：

$$\hat{f}(X) = f(X) + \omega \tag{2}$$

可以理解的是,要拟合一条曲线,必须要有足够多的点。在 ANSYS 中,在形成拟合近似以前,它用随机方法产生设计序列。它能够近似拟合的条件是: $n_d \geq n + 2(n_d)$ 为侧点数, n 为设计变量个数。

对于设计变量和状态变量的约束,ANSYS 用罚函数的方法将其转化为无约束问题,然后采用序贯无约束极小化方法(SUMT)搜索无约束目标函数。无约束方程为

$$F(X, r^{(k)}) = \hat{f}(X) + r^{(k)} \left(\sum_{i=1}^n Y(x_i) + S(S_{max}) + U(U_{max}) \right) \tag{3}$$

式中: Y 为结构参变量的罚函数; S, U 为约束状态变量的罚函数; $r^{(k)}$ 为惩罚因子,其中 k 为迭代次数。无约束方程 F 随变量 X 及 $r^{(k)}$ 变化,这就形成了一个子问题。在优化过程中,每一次迭代,运用连续非约束最小化技术进行求解,随着迭代进行, $r^{(k)}$ 依次变大,即 $r^{(1)} < r^{(2)} < r^{(3)} \dots$,直至收敛。当满足以下其中任一条件时,即认为问题收敛:

$$|F^{(k)} - F^{(k-1)}| \leq \tau \tag{4}$$

$$|F^{(k)} - F^{(b)}| \leq \tau \tag{5}$$

$$|x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}| \leq p_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{6}$$

$$|x_i^{(k)} - x_i^{(b)}| \leq p_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{7}$$

式中: τ 为目标函数; p_i 为设计变量的容差。

2 工程应用

2.1 工程概况

瀑布沟水电站地下厂房上覆山体雄厚,埋深为 220~360 m,地应力水平较高,岩性为坚硬的花岗岩,岩体完整,以 II、III 类围岩为主,岩体力学参数建议值见表 1。瀑布沟地下厂房的尺寸为 290.65 m × 27.3 m × 66.68 m(长 × 宽 × 高),厂房纵轴线与主要结构面交角一般大于 50°,与主应力夹角较小,一般为 26.7°~36.7°。厂房部位最大主应力 27.3 MPa。

表 1 瀑布沟水电站岩体物理力学性指标建议值

岩体类别	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
II	2.61	18~25	0.21
III	2.61	8~17	0.25
IV	2.5	1~6	0.30
V	2.3	0.1~1.0	0.35

2.2 有限元模型

取 2 号机组断面进行参数反演分析。根据地质资料,从上到下岩性依次为强风化碎石、IV + V、III、II + III 类岩石。有限元模型的横坐标原点为厂房中

心点位置,纵坐标原点为海拔零高程,取 3~5 倍洞径作为计算范围: $-164 \leq x \leq 164, 545 \leq y \leq$ 坡面。在模型的左侧和下侧施加法向约束,在右侧施加梯形荷载模拟水平构造应力^[9]。图 1 和图 2 分别为有限元计算模型及模拟后的最大主应力分布图。从构造应力的模拟结果看,厂房部位最大主应力与实测值大小及方位接近。

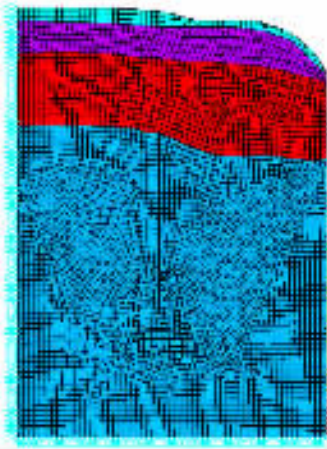


图 1 有限元计算模型

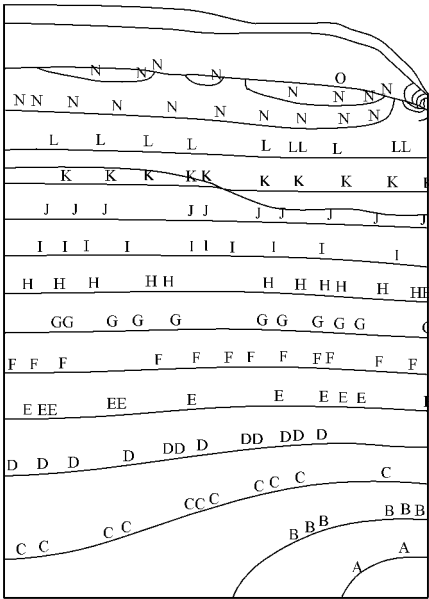


图 2 第三主应力(单位:Pa)

图 3 为 2 号机组断面的监测仪器布置及开挖步骤图,其中每套多点位移计有 4 个测点,测点深度分别为 5 m, 11.5 m, 17.5 m 和 24 m。地下厂房的开挖共分 9 层,由于监测仪器埋设的时间相对滞后,后期监测数据较为完整,故取第⑥层(高程为 663.80 m)与第⑦层(高程为 657.10 m)开挖后产生的位移差计算值与监测数据较为完整的 2 套多点位移计 M_{20}^4 和 M_{22}^4 的实测值进行岩体参数反演分析。

2.3 基于 ANSYS 优化设计的参数反演

采用 ANSYS 中的生死单元技术来模拟地下厂

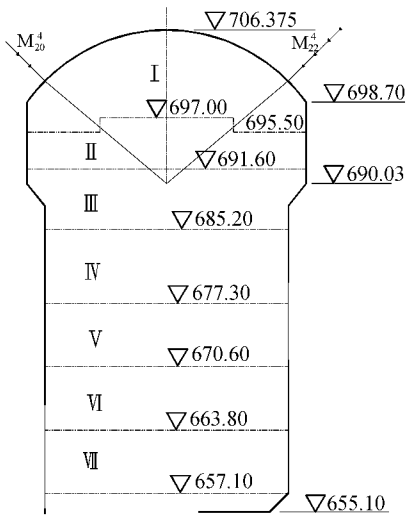


图3 2号机组断面多点位移计布置及开挖步骤(单位:m)
房的开挖过程。将初始地应力场作为工况1,开挖至第⑥层和第⑦层的计算结果分别作为工况2和工况3。以工况3和工况2的位移差与实测值之间的误差作为目标函数来进行参数反演分析。

基于ANSYS优化设计的参数反演分析步骤如下:

a. 定义设计变量。由于泊松比的变幅较小,且对计算结果的影响相对较小,因此取4类岩层的弹性模量作为优化设计变量: E_1, E_2, E_3, E_4 。根据地质资料其取值范围分别为 $0.1 \text{ GPa} \leq E_1 \leq 1 \text{ GPa}$, $1 \text{ GPa} \leq E_2 \leq 6 \text{ GPa}$, $8 \text{ GPa} \leq E_3 \leq 17 \text{ GPa}$, $18 \text{ GPa} \leq E_4 \leq 25 \text{ GPa}$ 。

b. 定义状态变量。取每套多点位移计4个测点的位移差计算值与实测值的标准差为状态变量,即

$$S(k) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (d_i(k) - \hat{d}_i(k))^2} \quad (8)$$

式中: $d_i(k)$ 、 $\hat{d}_i(k)$ 分别为第k套多点位移计第i个测点和测孔孔口的位移计算值; $\hat{d}_i(k)$ 为第k套多点位移计第i个测点的位移实测值。

c. 定义目标函数。取所有多点位移计各测点的位移计算值与实测值标准差为目标函数^[10],即

$$f = \sqrt{\sum_{k=1}^n S^2(k)} \quad 0.1 \leq S(k) \leq 1.0 \quad (9)$$

d. 优化分析。采用ANSYS提供子问题近似法进行优化分析。优化时在给定的弹性模量范围内对弹性模量进行调整,寻求最佳值来拟合测点位移的实测值,即求目标函数的最小值。优化分析结果表明,子问题近似优化分析方法对该工程开挖位移场的拟合效果较好。

反演分析简化命令流如下:

```
* creat ,pbg
```

```
/prep7
ex1 = 0.25e9
prxy1 = 0.350
dens1 = 2500.....定义参数
.....
建模
.....
* get ,disp1x ,node , 1367 ,u ,x
* get ,disp1y ,node ,1367 ,u ,y
.....
disp1 = -( disp1x * cos( 41/180 * 3.1415926 )+ disp1y
* sin( 41/180 * 3.1415926 ))...反演参数定义( 节点
位移 )
.....
delt1 = sqrt(( disp2 - disp1 + 0.135 ) * * 2 +( disp3 -
disp1 + 0.256 ) * * 2 +( disp4 - disp1 + 0.297 ) * * 2
+( disp5 - disp1 + 0.344 ) * * 2 ) .....反演参数定义( 一条测线上的误差 )
.....
objfun = sqrt( del1 * * 2 + del2 * * 2 )...反演参数定义( 总误差 )
/opt.....( 优化过程 )
.....
OPANL ,pbg
.....
! define design variables
OPVAR ,ex1 ,DV ,0.1e9 ,1.0e9 .....( 变量范围 )
.....
OPVAR ,delt1 ,SV ,0 ,1.0 ,0.1 ,
OPVAR ,OBJFUN ,OBJ , , ,1 .....( 误差范围 )
opkeep ,on
optype ,subp
opsave ,anfile ,opt
opexe.....( 优化 )
```

子问题近似法的优化结果为:

$$\{E_1, E_2, E_3, E_4\}_1 = \{0.313, 5.18, 8.9, 24.4\} \text{ GPa}$$

优化后的位移差计算值与实测值的比较见表2和图4。

表2 测点位移实测值与计算值的误差分析

测点位置	M ₂₂			M ₂₀		
	实测 值/mm	计算 值/mm	误差/%	实测 值/mm	计算 值/mm	误差/%
5 m	0.235	0.281	19.6	0.290	0.250	13.8
11 m	0.256	0.300	17.2	0.391	0.334	14.6
17.5 m	0.297	0.309	4.0	0.469	0.400	14.7
24.5 m	0.344	0.339	1.5	0.490	0.468	4.5

从子问题近似优化方法的计算值可以看出,目

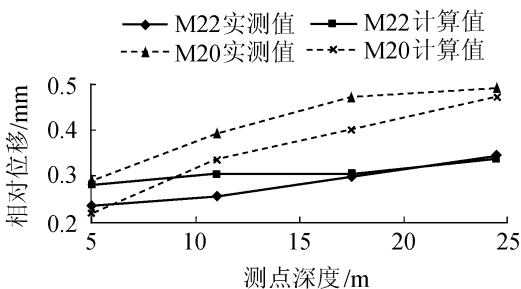


图4 测点位移实测值与计算值的比较

标函数值随弹性模量变化而变化,目标函数最小时为最优解。从优化分析结果可以看出,优化计算的位移值与实测位移值比较吻合,表明该方法用于岩体参数的反演分析是可行的。

对于大部分测点来说,子问题近似法的误差较小,说明对于瀑布沟地下厂房的岩体参数反演问题来说子问题近似法是适用的。该算例中设计变量的变化范围相对较大,采用子问题近似法可以通过不断的迭代,使计算值更逼近实测值。从表2和图4可以看出,离孔口距离越远,相对位移的计算值也越大,与实测的变形规律吻合。

从优化结果看2套多点位移计各测点的误差较小,均在25%以内,可见优化计算值与实测值拟合较好。造成误差的原因是由于在建模过程中作了一定的假设,采用施加侧向梯形荷载的方式来拟合构造应力,忽略了岩体断层、节理裂隙等的影响,将岩体简化为理想弹性材料等。若要进一步提高优化计算的精度,就要深入考虑上述复杂的岩体结构问题。

3 结 论

a. 本文提出的优化方法避免了繁琐的人工调整过程,大幅度提高了工作效率。测点位移的优化计算结果与实测值基本一致,表明该方法是可行的。

b. 该方法的计算结果与实测值之间仍然有一定的误差,主要有以下几方面的原因:①监测数据本身存在一定的误差;②模拟开挖的时间与实际时间存在一定的出入;③未考虑施工爆破等外界干扰对监测数据的影响;④未考虑岩层材料的非线性;⑤未考虑三维空间效应。

c. 基于优化设计的岩体参数反演分析为地质条件复杂的工程提供了测定岩体参数的可能。

d. 在下一步的研究中,应当建立三维非线性有限元模型,充分考虑施工因素和地质条件,同时结合不同时间段的监测数据来进行参数反演分析,以提高岩体参数反演的精度。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.
 [3] 张吾渝. 参数反分析方法及工程应用[J]. 青海大学学报, 1999, 17(6): 6-9.
 [4] 高玮, 冯夏庭, 郑颖人. 地下工程围岩参数反演的仿生算法及其工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊2): 2521-2526.
 [5] 独知行, 欧吉坤, 韩保民. 优化反演方法及数值反演试验初步研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(4): 39-43.
 [6] 武小晖, 宋宏伟. 地下工程围岩力学参数反分析的ANSYS方法[J]. 山西建筑, 2005, 31(2): 52-53.
 [7] 赵冰, 盛国刚, 李宁. 位移反分析的有限元线法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1146-1149.
 [8] 谭建国. 使用ANSYS6.0进行有限元分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
 [9] 朱付广, 费文平, 胡伟, 等. 基于ANSYS优化设计的初始地应力场反演分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(增刊): 158-162.
 [10] 强天驰. 多参数优化反演分析法及其应用[J]. 岩土工程界, 2004, 7(9): 40-44.

(收稿日期: 2008-09-05 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

“2009 水资源与可持续发展高层论坛” 将在武汉举行

“2009 水资源与可持续发展高层论坛”将于2009年9月在武汉大学举行。本次论坛将由中国工程院、国家水利部主办, 中国工程院土木、水利与建筑工程学部、武汉大学、中国水利学会、长江水利委员会承办。本次论坛旨在通过这一高层平台, 汇集世界各国顶级专家、学者和广大水利科技工作者, 交流各国在水资源开发利用和保护方面的经验, 深化对水资源与社会经济可持续发展之间关系的理解, 探讨水资源与可持续发展方面的学术、工程技术、管理以及政策等问题。

本次论坛的主题是: “水资源与可持续发展”。论坛将设置4个议题: ①水资源时空变异及其配置, 包括分布式水文模型, 气候变化及人类活动影响下的水资源变化, 水资源配置与可持续发展; ②农业水资源高效可持续利用, 包括农业用水效率, 控制排水、湿地及其环境效应, 参与式灌溉管理体制; ③流域管理与河流健康, 包括水土保持与泥沙治理, 水体营养负荷与富营养化, 经济发展与河流健康; ④水能资源开发与环境保护, 包括大坝的环境及生态效应, 水能资源的可持续开发, 多目标水库的平衡利用。

(编辑部供稿)