

某水电站地下厂房区初始地应力场回归分析

董志高¹, 吴继敏¹, 施志群², 韦传恩²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001)

摘要 结合某水电站地下厂房区工程地质与水文地质条件以及实测地应力资料, 分析影响区域初始地应力的因素, 以 ANSYS 作为有限元计算工具, 计算各影响因素下厂区地应力值, 在实测点勘察获得的地应力值与计算得到的地应力值之间建立多元回归模型, 求出回归系数, 从而获取厂区初始地应力场分布规律, 为地下厂房设计与开挖施工提供了合理的三维初始地应力场。

关键词 水电站; 地下工程; 初始地应力场; 有限元; 多元回归模型

中图分类号 TU452 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2003)05-0543-04

为合理进行地下工程的开挖设计和施工, 必须详细了解影响工程稳定性的各种因素。在众多的影响岩体开挖工程稳定性的因素中, 初始地应力状态是最重要的因素之一。目前国内外模拟地应力场的方法可分为 2 类: 一是数值拟合法; 二是回归分析方法。由于地质条件和实测资料的限制, 数值拟合法很难保证模拟精度。因此, 本文从工程已知条件出发, 采用应力场回归分析法进行地下厂房区所在区域的地应力场的回归分析。计算结果表明, 该方法能够得到合理的应力场分布, 获得的应力值能满足工程设计和施工实际需要。

1 回归分析数学模型的建立

区域初始地应力场回归分析的基本思想为 (a) 根据已知地质地形勘测试验资料, 建立有限元(平面、三维)计算模型 (b) 把可能形成初始地应力场的因素(自重、构造运动、温度等)作为待定因素, 对每一种待定因素用有限元方法算得已知点位置的地应力值, 然后在每一种待定因素计算的地应力值与已知点由勘测方法得到的地应力值之间建立回归方程式 (c) 用统计分析方法(最小二乘法), 根据残差平方和最小原则求得回归方程中各自变量(待定因素)系数的优化解, 从而获得区域初始地应力场分布规律。

1.1 初始地应力影响因素与边界条件的确定

计算域的确定应遵循以下 2 个原则 (a) 几何范围易适当增大, 以减少计算域边界条件对感兴趣区域的影响 (b) 边界处几何约束条件须易于确定。通常宜将山脊与河谷线选作边界, 因其两侧地形大致对称, 可假定此类边界条件不会在与边界线垂直的方向上发生位移。

在综合考虑各种因素的条件下, 受计算条件的限制, 采用以下 6 种因素作为模拟岩层自重和地质构造力作用的基本因素, 并把其作为回归分析的基本可能因素^[1]。(a) 自重应力, 由于自重应力是必然存在的, 需精确计算由其引起的各测点处应力状态(也可把自重应力作为已知条件) (b) 东西向水平均匀挤压 (c) 南北向水平均匀挤压 (d) 水平面内均匀剪切变形 (e) 东西向垂直平面内的竖向均匀剪切变形 (f) 南北向垂直平面内的竖向均匀剪切变形。此外可以增加其他类型运动状态, 或将以上状态组合后进行计算。

实际所在面沿不同方向分布荷载的具体值是未知的, 但可通过 2 种方法加以实现 (a) 直接对计算域边界加相应单位分布荷载 (b) 通过对计算域边界加相应单位分布位移^[1], 利用有限单元法对各种因素单独作用下的区域进行计算。根据地应力实测点应力值建立初始地应力场与各影响因素之间的回归方程。由测得的地应力资料, 根据残差平方和最小原则, 用统计分析方法可求得各影响因素的优化解。

1.2 回归分析的基本理论^[2,3]

假定实测初始地应力及其所反映的初始地应力场 σ 为变量 $x, y, z, E, \mu, \rho, \Delta, U, V, W, T, \dots$ 的函数, 则

$$\sigma = f(x, y, z, E, \mu, \rho, \Delta, U, V, W, T, \dots) \tag{1}$$

式中： σ ——初始地应力值； x, y, z ——空间坐标系； E, μ, ρ ——岩体弹性模量、泊松比和密度； Δ ——自重因素； U, V, W ——地质构造作用因素； T ——温度因素。在各待定因素作用下，使计算域内产生 $\sigma_{\Delta}, \sigma_U, \sigma_V, \sigma_W, \sigma_T, \dots$ 并称其为基本初始应力。将基本初始应力乘以系数后即为实际初始应力。据弹性工作状态下线性叠加原理，可写出各点初始地应力场的表达式

$$\sigma = b'_1\sigma_{\Delta} + b'_2\sigma_U + b'_3\sigma_V + b'_4\sigma_W + b'_5\sigma_T + \dots + \varepsilon_k \tag{2}$$

式中： $b'_1, b'_2, b'_3, \dots$ ——回归系数； ε_k ——观测误差。

回归分析主要根据 n 组实测值(σ_k)和数学模型观测值($\sigma_{k1}, \sigma_{k2}, \sigma_{k3}, \dots (k = 1, 2, 3, \dots, n)$)，给出各回归系数的估计值 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 。

据估计值得

$$\sigma_k = b_1\sigma_{k1} + b_2\sigma_{k2} + b_3\sigma_{k3} + \dots + b_n\sigma_{kn} + e_k \tag{3}$$

式中 e_k 为 ε_k 的估计值。

取 σ'_k 为 σ_k 的估计值，

$$\sigma'_k = b_1\sigma_{k1} + b_2\sigma_{k2} + b_3\sigma_{k3} + \dots + b_n\sigma_{kn} \tag{4}$$

则
$$\sigma_k = \sigma'_k + e_k \text{ 或 } e_k = \sigma_k - \sigma'_k \tag{5}$$

根据最小二乘法原理，可以求出估计值 b_i ，即选择 b_i 使残差平方和最小，它的解是惟一的。为使残差平方和

$$Q = \sum_k e_k^2 = \sum_k (\sigma_k - \sigma'_k)^2 \tag{6}$$

达到最小，令对 b_i 的偏导数皆为零，即同时满足下列方程：

$$\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{7}$$

整理后可得法方程组，求解方程组可得回归系数，从而可由回归公式确定地应力场的整体分布。回归效果的检验，可通过计算偏差平方和、平均标准偏差、复相关系数、偏相关系数以及回归平方和来进行。具体计算方法可参考文献[3]。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某水电站以发电为主，控制流域面积约 511 km²，水库总库容 0.47 亿 m³，装机容量为 250 MW，平均水头 422 m，属二级工程。电站地质条件良好，地下洞室的岩层覆盖层基本不透水，围岩由碎斑熔岩、次花岗岩、钾长花岗岩组成，强度高且风化浅。洞身在微风化至新鲜岩石地区，围岩稳定性好。节理裂隙不发育，岩石质量指标 RQD 大都为 98%，属一类岩石。厂址岩性单一，岩体较完整，具备建造地下厂房良好的地质条件。为对该水电站地下厂房、洞群应力场及其灾害进行研究，首先查明电站所在区域地应力场分布规律，然后对地下厂房所在区域初始地应力场进行三维回归分析计算。

2.2 厂房区初始地应力回归分析

2.2.1 厂房区有限元模型的建立与计算

由于地下厂房区位于山体较深部位，并且山体表面覆盖层较浅，因此建模时按一整体来考虑，即不考虑上部覆盖层对厂房处的应力影响。使用 ANSYS 进行三维有限元计算，计算域坐标的选取及有限元模型如图 1 所示。

据前述边界条件的确定原则，对下述 6 种情况进行分析：(a)自重影响；(b)自重和 y 方向挤压力影响；(c)自重和 x 方向挤压力影响；(d)自重和水平面内剪应力影响；(e)自重和 xOz 平面剪应力影响；(f)自重和 yOz 平面剪应力影响。(b)(c)(d)情况下加 1 cm 的位移。(e)(f)

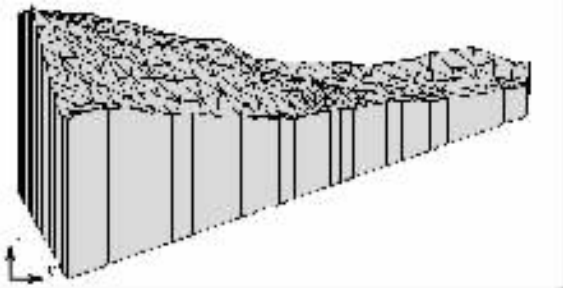


图 1 某水电站地下厂房区应力计算几何模型
Fig.1 Stress calculation geometric model for an underground power house

情况下加 10 cm 的位移.测点不同边界条件下有限元计算应力值列于表 1.

表 1 实测点有限元计算值、实测值及回归结果

Table 1 FEM calculated measured and regression results for measurement points

MPa

边界条件 及结果	测点 1			测点 2			测点 3			测点 4		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
条件 σ_1	1.75	1.98	7.76	2.90	3.17	10.67	1.90	2.43	7.58	1.32	1.65	5.70
条件 σ_2	0.59	0.08	-0.12	0.61	0.08	-0.30	0.18	0.06	-0.05	0.25	0.07	-0.05
条件 σ_3	0.34	1.53	-0.09	0.36	1.62	-0.12	0.25	1.92	-0.05	0.20	1.76	-0.11
条件 σ_4	0.37	0.85	-0.03	0.42	0.74	0.02	0.14	0.06	-0.05	0.20	0.07	-0.06
条件 σ_5	-0.13	0.08	1.46	-0.29	3.48	0.64	0.96	2.93	0.20	0.44	1.36	1.23
条件 σ_6	0.77	-0.13	0.08	1.46	-0.29	3.48	0.64	0.96	2.93	0.20	0.44	1.36
回归值	7.42	10.54	8.26	10.75	13.20	11.34	9.12	14.60	7.61	8.99	7.08	4.64
实测值	10.49	11.16	8.11	13.39	13.22	11.91	5.58	9.96	7.99	5.64	8.56	5.75
绝对误差	3.07	0.62	-0.15	2.64	0.02	0.57	-3.54	-4.64	0.38	-3.35	1.48	1.11

边界条件 及结果	测点 5			测点 6			测点 7			测点 8		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
条件 σ_1	2.47	3.08	9.57	1.04	1.09	3.81	1.25	1.43	4.79	1.06	1.21	4.03
条件 σ_2	0.19	0.04	-0.15	0.29	0.06	-0.03	0.20	0.08	0.05	0.22	0.08	0.03
条件 σ_3	0.28	1.91	-0.12	0.14	1.48	-0.05	0.18	1.95	-0.17	0.16	1.84	-0.11
条件 σ_4	0.18	0.13	-0.07	0.21	0.17	-0.05	0.13	0.03	0.01	0.15	0.03	0.00
条件 σ_5	1.22	5.92	0.67	1.40	-0.76	0.29	0.24	2.64	0.33	0.95	1.21	0.77
条件 σ_6	1.23	1.22	5.92	0.67	1.40	-0.76	0.29	0.24	2.64	0.33	0.95	1.21
回归值	10.65	10.65	9.81	5.58	7.61	4.02	7.40	6.50	5.08	7.47	6.89	4.01
实测值	6.89	11.00	9.68	5.45	7.34	3.96	4.72	8.75	5.39	4.66	8.25	4.44
绝对误差	-3.76	0.35	-0.13	-0.13	-0.27	-0.06	-2.68	2.25	0.31	-2.81	1.36	0.43

2.2.2 多元回归分析

以各个测点实测值作为因变量(σ) ,用自重应力(σ_1)和其他 5 个条件下扣除自重应力得到的构造应力值(σ_2 σ_3 σ_4 σ_5 σ_6)进行测点多元回归分析 ,得到回归系数 $b_1=1.056$, $b_2=11.188$, $b_3=3.175$, $b_4=3.896$, $b_5=1.313$, $b_6=0.073$, $\varepsilon_k=-0.082$,则该水电站厂房区初始地应力场回归方程式为

$$\sigma=1.056\sigma_1+11.188\sigma_2+3.175\sigma_3+3.896\sigma_4+1.313\sigma_5+0.073\sigma_6-0.082$$

(8)

式中 : σ ——要求的区域初始地应力值 ; σ_1 ——岩体自重引起的应力场 ; σ_2 ——在垂直于 x 轴的边界面上加 1 cm 位移产生的应力场 ; σ_3 ——在垂直于 y 轴的边界面上加 1 cm 位移产生的应力场 ; σ_4 ——垂直于 z 轴沿 x 方向或 y 方向上加 1 cm 位移产生的应力场 ; σ_5 ——垂直于 x 轴沿 z 方向加 - 10 cm 位移产生的应力场 ; σ_6 ——垂直于 y 轴沿 z 方向加 - 10 cm 位移产生的应力场.

回归残差平方和 $Q=73.56$, σ 估计值的标准误差 $S=2.39$,复相关系数 $R=0.94$,回归平方和 $U=102.69$, F 检验观测值为 2.15. 各个自变量的标准误差值为 : $V(1)=0.31$, $V(2)=3.19$, $V(3)=0.59$, $V(4)=2.75$, $V(5)=1.35$, $V(6)=0.52$.

回归分析中的复相关系数为 0.94 ,表明回归公式的相关性好. 实测点处地应力值、回归应力值及绝对误差见表 1. 由表 1 可知 ,最大相对误差为 0.41 ,绝大部分回归值与实测值之间的相对误差在 0.15 左右. 这表明 ,回归应力值是合理的 ,且较接近于实测点的地应力值.

3 结 论

a. 回归结果的好坏与实测点应力值密切相关 ,因此实测点数据要尽可能准确 ,否则会影响回归效果. 本例所使用的实测值均由工程单位提供 ,由于受不同时期、不同实测系统、不同测试方法、不同勘测设备等因素的影响 ,对其准确性无法进行判断. 另外 ,有限元计算所用岩体力学参数对计算结果也有一定影响.

b. 回归过程中 ,由于剪应力对于工程分析影响作用不大 ,故可忽略其影响. 实际结果证明 ,这一假设是正确的.

c. 从回归结果来看 ,区域初始地应力场主要是在自重和历次地质构造作用下产生的 ,同时随着岩石物

理特性以及风化、剥蚀等作用的不同而发生变化,其应力不断地释放并重新分布,从而形成当前的残留状态。岩体自重是产生初始地应力场的基本因素之一,它对岩体初始地应力场的影响是相对确定的,只需精确测出岩体密度即可,而构造场的影响,地区差别非常大,但通过对前述边界条件的假设可对构造应力场有一个比较合理的计算结果。

d. 上述三维离散点初始地应力场是由大区域网格下反演回归得到的,对于具体的地下工程小区域精细网格下的有限元非线性分析计算,需要通过大区域网格下离散点应力值的拟合才能求得小区域精细网格下任意一点的地应力值。

e. 回归分析的理论基础尚不十分成熟,每个回归系数的具体工程意义并不十分明确,如何正确地确定弹性模量是值得进一步研究的课题。

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. 314—349.
- [2] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64—75.
- [3] 卢崇飞, 高惠璇, 叶文虎. 环境数理统计应用及程序[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 8—41.

Regression analysis of initial geostress for an underground power plant region

DONG Zhi-gao¹, WU Ji-min¹, SHI Zhi-qun², WEI Zhuan-en²

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Fujian Investigation & Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Fuzhou 350001, China)

Abstract Based on the measured data of initial geostress and engineering and hydrological-geological conditions in the region of an underground power plant, factors affecting the initial geostress are discussed. With ANSYS taken as a tool for finite element calculation, the initial stress of the underground power plant region under each affecting factor is calculated. Then, a multivariate regression model is developed for measured and calculated results of geostress at measurement points, and the regression coefficient of the model is derived. With the model, the regularities of initial geostress distribution are obtained, providing a rational 3D initial geostress field for design and construction of the underground power plant.

Key words hydropower station; underground project; initial geostress field; FEM; multivariate regression model