

文章编号: 1000-7598-(2007)08-1626-05

岩体初始地应力场分析方法研究

侯明勋¹, 葛修润^{1,2}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 初始地应力场是影响岩土工程稳定性的重要因素之一, 如何合理地模拟初始地应力场一直是岩体力学中的重要研究课题。以国内某大型水利水电工程构筑区域实测空间地应力资料为基础, 以边界位移为控制对象, 采用有限元(无界元)方法对工程区大范围内的岩体初始地应力场进行了分析和研究。尝试在实际边界上满足无穷远处位移为0的模型边界上引入了无界单元, 实测点上的应力拟合结果有较明显的改善, 这表明所采用的方法是切实可行和有效的。

关键词: 初始地应力场; 有限元; 无界元; 数值模拟

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study on fitting analysis of initial stress field in rock masses

HOU Ming-xun¹, GE Xiu-run^{1,2}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Initial stress is one of the important factors affecting the stability of geotechnical engineering. How to reasonably simulate the initial stress field is always an urgent problem in rock mass mechanics. Based on the 3-D stress measurements of a certain large-scale hydropower station construction site, the initial stress field of rock masses is analyzed by finite element method. The numerical model is established according to the topographical characters and real geometry of large structures and faults located at the site. The stress field at any point is thought to be composed of gravitational and tectonic stress components, while the gravitational stress component is assumed to be known as the results calculated by finite element method. When fitting the total tectonic stress component at the measurement points, unit normal displacement is applied to the model boundaries and the response is computed at the location of the measurement points in the model. In order to reproduce the measured stress at the measurement point, a linear regression expression is used to calculate the proportions of each unit response tensor. In addition, infinite element is also attempted to be introduced into the model of initial stress field analysis to meet the requirement of zeros displacement values on the boundaries; the preferable results obtained demonstrate that this method is powerful and feasible.

Key words: initial stress field; finite element; infinite element; numerical simulation

1 引言

地应力场是地质力学与岩体力学研究的基本内容之一, 无论是地面工程, 还是地下工程, 工程构筑区域的稳定性以及构筑物本身的稳定性都会直接受到地应力场的影响, 如何合理地模拟岩体初始地应力场在岩体力学中一直占有重要地位。

岩体初始地应力是指天然岩体在工程建设开挖之前所具有的自然应力状态。初始地应力场则是

指开挖前某一特定时间内的地应力空间分布, 它在地质年代上是随着时间和空间而不断变化的非稳定场, 但相对于工程建设而言, 完全可以把它看成是一个相对稳定的应力场。在工程施工前, 根据地质调查结果和施工区域关键部位地应力实测数据反演出正确合理的区域地应力场分布状态, 对于工程设计和施工是十分重要的。概括起来, 目前对工程区域初始地应力场的分析方法主要有: (1) 在现场布置较多的测点进行实测, 据此直接给出洞室周围一

定范围内的初始地应力值^[1]; (2) 以现场部分实测地应力数据为基础, 同时考虑地形地质方面的因素, 结合理论与数值分析进行反演、回算和模拟^[1];

(3) 利用开挖扰动位移反演初始地应力场, 这种方法在计算区域内缺乏地应力实测资料的情况下也是一种比较可行的途径^[2]; (4) 把现场实测地应力值与有限元计算相结合, 运用统计回归分析来反演岩体初始地应力场^[3]。

本文主要以国内某大型水利水电工程构筑区域空间地应力实测资料为依据, 采用有限元方法对工程区岩体初始地应力场进行了拟合研究。视有限元计算的自重应力为已知值, 而把总构造应力看作是基本构造应力作用下在实测点处引起的应力分量的线性组合, 并运用最小二乘法对该区域的初始地应力场进行了拟合计算。同时, 在满足无穷远处位移为 0 的模型边界上尝试引入了无界单元, 并与常规有限元计算结果做了比较。结果表明, 在边界上引入无界单元后, 实测点上应力拟合结果有明显改善, 这也说明本文的分析方法是可行的。

2 初始地应力场有限元分析

在实际应用中, 对于地应力场的有限元分析多是采用粗细两种有限元网格相结合的 2 步算法来进行的, 其中第 1 步是采用粗网格先进行大范围的有限元分析; 第 2 步是对所要关心的工程构筑区域进行小范围的有限元分析, 多采用细网格, 这样就可以在所关心的工程施工区划分较多的单元, 进而提高计算精度。一般说来, 在第 2 步中采用的细网格应包含于在第 1 步中所采用的粗网格之中, 并且细网格的边界条件要由粗网格有限元分析的结果来给定。本文仅限于大范围的有限元分析, 而且岩体材料是被看作线弹性连续介质来处理的, 笔者认为这种假定对于工程应用来说是适宜的。

2.1 模型的建立

初始地应力场有限元分析模型是以国内某大型水利水电工程的勘测、试验和设计资料为依据而建立的^[4]。在模型中除了考虑地形、地貌等要素之外, 还考虑了工程构筑区一些规模较大的断层和主要岩性分区。图 1 为几何模型示意图, 整体坐标系 $oxyz$ 的定义如下: oxz 位于水平面内, x 轴指向东, z 轴指向南, y 轴竖直向上。计算范围如下: $x \in [-200, 850]$, $y \in [700, \text{地表}]$, $z \in [0, 1236]$, 单位为 m, 竖向 y 坐标以工程地质图上的高程为准。

2.2 初始地应力场拟合分析

由于地应力的成因极其复杂, 影响地应力场分

布的因素很多, 如岩体自重、地质构造运动、地形地貌、温度等, 为方便模拟分析工程区域初始地应力场的分布特征, 一般只考虑自重应力场和构造应力场^[3,5]。由于用有限元法计算的自重应力已相当精确, 因此, 可以把自重应力视为已知值^[6], 而把除自重之外的其他所有因素引起的应力全部归于所谓的“构造应力”来进行分析。

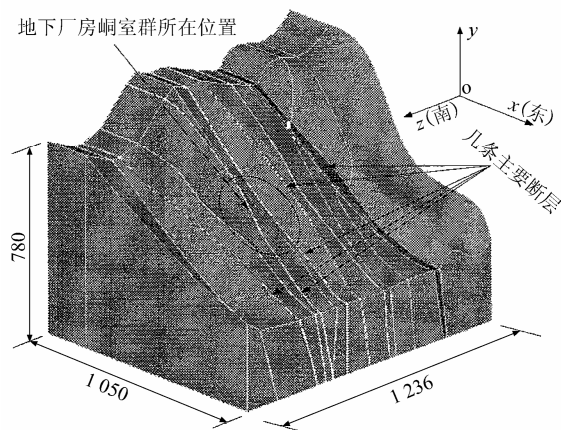


图 1 几何模型 (单位: mm)

Fig.1 Geometric model(unit: m)

2.2.1 实测点实测构造应力的计算

实测应力作为测点的总应力, 可以写为如下的形式:

$$\sigma_{ij}^{\text{meas}} = \sigma_{ij}^{\text{grav}} + \sigma_{ij}^{\text{tect}} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{ij}^{\text{meas}}$ 、 $\sigma_{ij}^{\text{grav}}$ 、 $\sigma_{ij}^{\text{tect}}$ 分别为实测点的总应力张量、自重应力张量和构造应力张量。由于自重应力可以采用有限元法精确获得, 而实测点总应力又是已知的, 所以有

$$\sigma_{ij}^{\text{tect}} = \sigma_{ij}^{\text{meas}} - \sigma_{ij}^{\text{grav}} \quad (2)$$

根据实测点处的实测总应力张量和有限元计算出的自重应力张量, 利用式 (2) 即可求得实测点处的实测构造应力张量。

2.2.2 基本构造运动状态下实测点构造应力计算

根据工程区的基本地质资料, 对影响初始地应力分布的可能构造因素进行了必要的分析, 这里考虑了几种基本的构造运动状态, 并假定每种构造因素之间保持线性独立, 把通过有限元计算出的基本构造运动状态下的实测点构造应力与实测构造应力进行最小二乘拟合, 再对计算结果进行必要的分析和处理, 从而求得到比较合理的工程构筑区域初始地应力场的分布。

对实测点构造应力的有限元拟合计算时,均以边界面上单元节点的位移为控制对象^[7],共考虑了以下几种基本构造运动状态:(1)东西向和南北向水平均匀挤压构造运动,计算时边界面上节点的单位控制位移取 0.01 m,如图 2(a)所示;(2)水平面内的均匀剪切变形构造运动,计算时边界面上节点的单位控制位移取 0.01 m,如图 2(b)所示;(3)东西向和南北向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动,计算时边界面上节点的最大单位控制位移取 0.1 m,边界面上各节点的竖向位移随高程线性增加,其中底边线各节点位移为 0,至地表增加至 0.1 m,如图 2(c)、2(d)所示。在具体计算过程中,可考虑在每个侧面边界上轮换施加上述 3 类基本构造运动状态,同时在其他 3 个侧面和底面上施加满足弹性力学求解条件的边界位移约束,这样总共有 3 类 12 种基本构造运动状态依次施加在计算模型上。把地应力场任意点的总构造应力看作是各种基本构造运动状态作用下所产生的构造应力的线性组合,若记 ${}^c\sigma_{ij}^{\text{tect}}$ 为基本构造运动状态下有限元计算出的实测点处的总构造应力张量,则有

$${}^c\sigma_{ij}^{\text{tect}} = \sum_{k=1}^n C_k {}^m\sigma_{ij}^k \quad (3)$$

式中: n 为基本构造运动状态,这里 $n=12$; C_k 为待定系数; ${}^m\sigma_{ij}^k$ 为第 k 种基本构造运动状态下在测点处引起的构造应力张量。

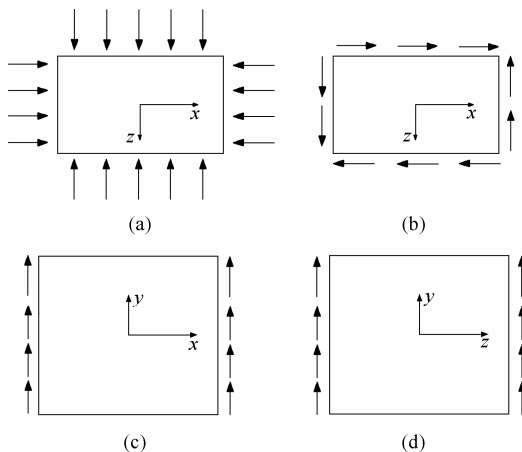


图 2 基本构造运动模式
Fig.2 Tectonic patterns

在构造应力和自重应力的有限元计算中,在每个侧面边界上施加单位法向构造位移时,对于其他位移约束边界条件的施加,分别采用两种方法进行。第 1 种是在位移为 0 (实际上是无穷远处位移为 0) 的边界上直接施加法向约束;第 2 种是在位

移为 0 的边界上设置一层无界单元以满足无穷远处位移为 0 的位移边界条件,图 3 是在边界上布置无界单元时的计算网格,岩体和断层均采用 8 节点六面体等参数单元,而边界上布置的无界单元则是与 8 节点六面体单元相对应的空间 8 节点无界元^[8]。

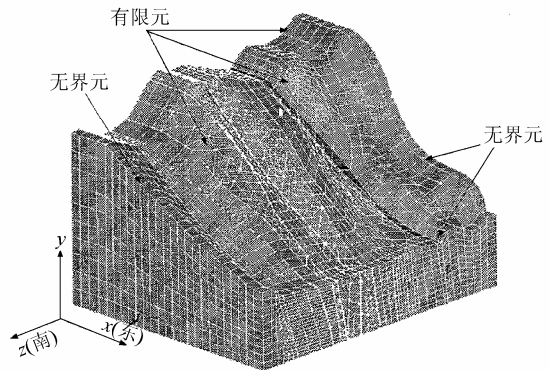


图 3 计算网格
Fig.3 Calculation mesh

2.2.3 地应力场最小二乘拟合计算

由式(2)和式(3)可以得到实测点的实测构造应力与有限元计算的总构造应力之间的误差为

$$\sigma_{ij}^{\text{error}} = \sigma_{ij}^{\text{tect}} - {}^c\sigma_{ij}^{\text{tect}} \quad (4)$$

要求得式(3)中的待定系数 C_k ,就需使得所有测点上的实测构造应力与有限元计算的总构造应力之间的误差平方和达到最小,即使得下式:

$$\min(\psi) = \min\left(\sum (\sigma_{ij}^{\text{error}})^2\right) \quad (5)$$

成立。对于空间地应力测量来说,针对于每一个实测点,对应于式(4)就可以得到 6 个方程,当由实测地应力数据得到的总方程数大于基本构造运动状态的个数时,根据最小二乘法可唯一确定系数 C_k 的值,从而进一步计算出实测点构造应力拟合值。当测点数目(样本数)比较多时,还可运用逐步统计回归分析的方法对各种构造因素进行必要的取舍,以便得到更加合理的拟合应力场。

需要指出的是,在进行有限元计算时,得到的是单元节点上的物理量值(如应力),由于实测点并不总是正好位于单元的节点上,这时要获得实测点上的物理量(如应力)还必须借助于等参元逆变换才能实现,本文采用的是基于解析性质的等参有限元逆变换算法^[9],并编制有相应的计算机程序^[10],可参考相关文献,这里不再赘述。

3 地应力拟合计算结果分析

根据某水电站地下厂房洞室群岩体力学性质测试结果见表 1。笔者已采用本文的方法对某水电站工程构筑区内 16 个测点进行了拟合分析^[10]，限于篇幅，这里选取其中的 5 个测点重新进行了拟合计算。表 2 为拟合系数和相关系数的计算结果，表 3 给了 5 个实测点第一主应力的拟合计算结果，其中主应力的倾角以水平面向上为正，向下为负；方位角以正北为起点，顺时针旋转；主应力量值以压为正，拉为负。从表 3 中的数据不难看出，采用无界元作为 0 位移边界时的拟合结果从总体上要优于常规有限元分析结果，而且前者的相关系数也比较高，回归效果较好。

从计算结果可见，在初始地应力场有限元模型中，满足无穷远处位移为 0 的边界上引入无界元这类特殊单元，对于改善计算效果是有益的。尽管无界元是在 20 世纪 80 年代中后期，在大型岩土工程课题研究中为了解决当时计算硬件环境差而影响计算效率的情况下才引入的，对于严格按照节理、断层的真实产状所建立的复杂的岩土工程有限元分析模型来说，采用这类特殊单元有时仍然是经济实用的。另外，除了自重应力是构成初始应力场的主导因素之外，笔者还对 3 类基本构造运动对地应力场影响的重要程度进行了分析，结果表明，水平挤压构造运动是影响该水电站构筑区域地应力场分布的主要因素，而水平剪切和竖向剪切构造运动则处于次要地位，尽管如此，后两种构造运动仍然是做好该区域地应力场模拟分析工作不可缺少的因素。

另外，从表 3 的计算结果来看，个别测点的主应力量值、方位角及倾角的拟合结果与实测结果相差较大，这可能源于地应力及其测量本身的复杂性以及所采用的计算方法引起的，比如：（1）实测地应力数据资料本身可能存在一定的误差；（2）计算中所采用的材料参数是岩体的综合弹性参数，而在对实测地应力数据处理时所采用的参数是测点部位的局部弹性参数，这两者之间可能存在较大的差别；（3）某些测点可能处于一些特殊的地质构造影响范围内，而这些地质构造可能会对应力的方位（甚至量值）产生较大影响；（4）在有限元分析中所采用的数据本身具有一定的分散性；（5）拟合时所采用的数学模型也会影响计算结果的吻合程度。总之，地应力场的拟合分析是一项十分复杂的工作，只有综合考虑多方面的因素，并根据实际工程问题的具体要求进行必要的取舍，才可能给出比较科学合理

的结果，从而为工程建设提供可靠的计算分析依据。

表 1 岩体力学性质参数
Table 1 Parameters for rock mass property

层面	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比
地层	2.70	28	0.25
断层	2.45	4	0.35

表 2 拟合系数及相关系数
Table 2 Fitted coefficients and correlation coefficient

无界元		有限元	
拟合系数 C_i	相关系数	拟合系数 C_i	相关系数
C_1 144.56	0.97	C_1 -2 650 653.58	0.91
C_2 445.17		C_2 -49 501.27	
C_3 145.52		C_3 2 650 895.03	
C_4 -435.49		C_4 48 004.59	
C_5 -1 012.02		C_5 607.65	
C_6 -1 196.78		C_6 -2 909.91	
C_7 -1 488.26		C_7 -53.67	
C_8 -1 444.70		C_8 1 128.08	
C_9 111.01		C_9 15.79	
C_{10} 36.50		C_{10} -2 420.74	
C_{11} -378.22		C_{11} -2.46	
C_{12} -96.60		C_{12} 223.82	

表 3 地应力测量值与拟合值的比较
Table 3 Comparison between stress measurements and stress fitted values in the FEA

点号	坐标/m			第一主应力		
	x	y	z	参数	实测值	拟合值
						无界元 有限元
1	479.0	1 127.5	590.0	大小/MPa	11.1	10.5 13.0
				方位/(°)	21	8 -70
				倾角/(°)	27	68 67
2	628.5	1 005.0	583.2	大小/MPa	16.3	15.6 13.6
				方位/(°)	186	185 342
				倾角/(°)	23	11 26
3	593.8	1 039.8	530.9	大小/MPa	10.9	12.4 13.1
				方位/(°)	80	262 46
				倾角/(°)	51	73 20
4	306	1 018.5	549	大小/MPa	16.4	13.4 12.9
				方位/(°)	311	5 267
				倾角/(°)	53	57 77
5	281	1 018.5	623	大小/MPa	21.2	16.2 13.0
				方位/(°)	309	317 17
				倾角/(°)	49	29 15

4 结 语

本文以国内某大型水利水电工程构筑区域空间地应力实测资料为基础，根据工程地质资料建立

了三维有限元模型,采用最小二乘法对岩体初始应力场进行了拟合分析。尝试在满足无穷远处位移为 0 的边界上引入了无界单元,并与常规有限元计算的结果做了比较,表明本文的分析方法是切实可行的。

岩体初始地应力场的分析是一项复杂的工作,由于地应力测量方法本身的局限性,以及工程构筑物所处地质环境的复杂性,要获得可靠的初始地应力场拟合结果,还必须具体问题具体分析,除了采用多种测试手段进行现场应力测试、对比分析以便获得比较准确的应力测量资料外,利用多种计算手段对应力场进行拟合分析也是十分必要的。

参考文献

- [1] 丰定祥,谷先荣,杨家岭,等.关于地下工程有限元分析中初始地应力场的假定[J].地下工程,1982,(2): 20—27.
FENG Ding-xiang, GU Xian-rong, YANG Jia-ling, et al. Supposition of initial geostress field in underground engineering finite element analyses[J]. **Underground Engineering**, 1982, (2): 20—27.
- [2] 邓建辉,廖勇龙.边坡初始地应力场位移反分析初步研究[J].贵州工业大学学报,1997,26(增刊): 102—106.
DENG Jian-hui, LIAO Yong-long. A preliminary study on the back analysis of initial geostresses in cut slopes from displacement measurement[J]. **Journal of Guizhou University of Technology**, 1997, 26(Supp.): 106—102.
- [3] 郭怀志,马启超,薛玺成,等.岩体初始地应力场的分析方法[J].岩土工程学报,1983,5(3): 64—75.
GUO Huai-zhi, MA Qi-chao, XU Xi-cheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 5(3): 64—75.
- [4] 葛修润.小湾水电站地下厂房洞室群三维有限元分析[R].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004.
- [5] 易达,陈胜宏.地表剥蚀作用对地应力反演的影响[J].岩土力学,2003,24(2): 254—256, 261.
YI Da, CHEN Sheng-hong. Effect of the earth's surface denudation on the initial stress back analysis of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 254—256.
- [6] 朱伯芳.岩体初始地应力反分析[J].水利学报,1994,(10): 30—34.
ZHU Bo-fang. Back analysis of initial stresses in rock masses[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1994, (10): 30—34.
- [7] 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,1999: 314—349.
- [8] 葛修润,谷先荣,丰定祥.三维无界元和节理无界元[J].岩土工程学报,1986,8(5): 9—19.
GE Xiu-run, GU Xian-rong, FENG Ding-xiang. Three-dimensional infinite domain elements and joint infinite domain elements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 8(5): 9—19.
- [9] 朱以文,李伟,蔡元奇.基于解析性质的等参有限元逆变换高效算法[J].武汉大学学报(工学版),2002,35(2): 62—65.
ZHU Yi-wen, LI Wei, CAI Yuan-qi. An efficient inverse isoparametric mapping in FEM based on analytical character[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2002, 35(2): 62—65.
- [10] 侯明勋.深部地应力测量新方法新原理及其相关问题研究[博士学位论文 D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004.

上接第 1625 页

参考文献

- [1] 国家技术监督局.中华人民共和国建设部.GB 50218—94,工程岩体分级标准[S].北京:中国计划出版社,1995.
- [2] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1992: 550—553.
- [3] Azam G, Wang M C. Performance of strip footing above voids in clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1990, 110(3): 37—58.
- [4] Baus R L, Wang M C. Bearing capacity of strip footing above void[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1983, 117(5): 753—765.
- [5] 阳军生,张军,张起森.溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2): 296—301.
YANG Jun-sheng, ZHANG Jun, ZHANG Qi-seng. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of circle foundation existed upper karst cave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 296—301.
- [6] 胡庆国,张可能,阳军生.溶洞上方条形基础地基极限承载力有限元分析[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(4): 694—697.
HU Qing-guo, ZHANG Ke-neng, YANG Jun-sheng. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of strip footing above karst cave[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2005, 36(4): 694—697.
- [7] 黎斌,范秋雁,秦凤荣.岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4): 532—536.
LI Bin, FAN Qiu-yan, QIN Feng-rong. Stability analysis of upper plate of Karst cave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 532—536.
- [8] 林宗元.岩土工程试验监测手册[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1994: 305—318.