

# 地下洞室群三维有限元分析中若干问题探讨

王冰笛, 杨 柯

(温州大学建筑与土木工程学院, 浙江温州 325035)

**摘 要:** 概述了二滩水电站地下厂房洞室群的超大规模的、模拟开挖过程的三维非线性有限元分析, 以及分析中的一些全新的处理方法. 据此, 对地下洞室群三维非线性 FEM 分析中若干具有共性的问题提出了看法、讨论与建议, 包括: 在地应力主方向与洞室轴线不平时, 地下洞室群进行三维非线性分析不可替代性; 地应力场的获得与校核得出合理计算结果的重要意义; 有限元建模中数值误差与理论简化相适应, 以保证计算的合理性与可行性; 开挖步骤的模拟对非线性分析中发现破坏位置和破坏时间必要性等. 此外, 对部分计算结果进行简要的分析.

**关键词:** 地下洞室群; 有限元法; 地应力; 非线性

**中图分类号:** TU94, TV731.6   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1008-309(2005)02-0042-09

地下洞室群是常见并且是特别复杂的地下工程. 对于洞室轴线交错、断面形状不十分规则的地下洞室群, 传统的计算分析方法是无能为力的. 随着计算技术的发展, 尤其是计算机硬件和软件系统的飞速发展, 在最近十年内, 已经有条件进行比较细致全面的计算分析了. 但是进行超大规模三维非线性有限元 (FEM) 分析的过程比较复杂, 很多问题还在探索之中, 能见到的文章不多, 方法也远不能说成熟. 我们在二滩地下厂房洞室群进行的超大规模三维非线性有限元分析的过程中, 曾提出并尝试了某些新方法, 其结果的整体合理性及与实测资料的吻合程度, 均令人满意<sup>[3]</sup>. 鉴于问题的复杂性, 以及目前这种超大规模的有限元计算并不多见, 我们觉得有必要把其中所碰到的问题, 处理方法和经验介绍出来, 对某些具有共性的问题提出我们的看法, 谨供学者和工程师们在进行类似工作时参考.

## 一、工程简介与计算背景

位于四川境内的二滩水电站, 其地下厂房是目前亚洲最大的地下洞室群. 它以平行布置的主厂房、主变室和尾调室三大洞室为主, 还包括了垂直它们的六条母线洞、六条尾水洞等支洞. 其中主厂房: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高=280.29m $\times$ 25.5m $\times$ 65.78m; 主变室: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高=214.9m $\times$ 18.3m $\times$ 25.0m; 尾调室: 203.0m $\times$ 19.8m $\times$ 69.8m.

地下厂房洞室群设置在左岸下游的山体内, 上覆岩体厚度为 250~350m, 水平埋深 300m, 洞轴线方向 NW6°. 洞室群所在区域主要为正长岩和蚀变玄武岩, 有 80% 围岩岩体质量达到 A,B 级.

二滩电站地下洞室群的特点是尺寸大、洞室群交叉复杂, 且地应力水平较高, 局部可达到 40MPa, 在开挖过程中, 由岩爆引发了较大面积的破坏, 导致重大的经济损失. 尽管在洞室设计

收稿日期: 2004-10-25

作者简介: 王冰笛(1954-), 女, 河北人, 副教授, 学士, 研究方向: 工程中的数学建模

和施工过程中，国内多所大专院校和科研单位对该洞室进行了有限元计算，但限于当时的计算水平（特别是硬件水平），难以对整个洞室群及其开挖过程做全面细致的模拟并给出准确的预报或解释。

本文谈及的计算是在洞室竣工之后，国家全面验收之前进行的。在这个时点上进行此类计算，由于有实测数据可以作为参考，给计算结果的校核提供了方便。与此同时，由于二滩电站属于国家重点工程，是已竣工的装机容量最大的水电站，该工程的厂房又是世界上第三大地下洞室，实测的测点布置得比较密，监测数据也比较完整，无形中又对计算提出了很高的要求，计算上的失误或错误会立即在与实测结果的对照中显现出来，计算结果与实测数据的任何背离都要给出合理的解释。

## 二、地应力场的获得

### （一）获得地应力场的方法与问题的难点

洞室所在区域的原岩应力场相当于地下洞室的荷载，是分析的基础。目前获得地应力的基本步骤是，以勘探过程中有限个点的实测地应力为基础，用一定方法进行数学处理，进而得到计算范围内各点的连续应力场。而由于费用的限制，往往实测地应力的测点极为有限。对于二滩工程，考虑到实测的误差等原因，可以实际使用的测点数仅有5个（每个测点都可以通过计算得到三个主应力）。本文的地应力场计算就是依据这5个测点。

实施地下洞室群三维有限元分析时，不可能把计算区域取得很大。为了从个别点的实测结果获得整个建模区域内的完整连续的地应力场，有两大类可行的方法——力法和位移法（我们姑且借用结构力学的常用名词）。力法是在有限的计算区域的边界上，施加合理的分布力，这个力的也就是与计算得到的应力场相适应的在边界处的正应力和剪应力。而位移法则是在边界上施加已知位移，使得在该位移之下，计算区域内部的应力场与实测的应力场是相适应的，进而得到一个应力场<sup>[1][2]</sup>。

在使用力法时，有限元计算程序要求在计算模型上施加约束，以便全部消除模型的刚体位移，否则有限元的总刚度阵将是奇异的而不能求解。而困难的是，这些必须另外施加的约束（指定位移）至少在三个不共线的点上出现，并且不能对任何两个点之间的相对变形有任何限制，否则支座上将出现约束反力，而这种反力迭加到边界荷载上将导致内部应力场的失真。

位移法所面临的问题实质上是如何在边界上每一点处施加给定的位移，要求这些位移满足变形协调条件和用位移表达的平衡方程。此外，还同时要求在计算模型内全部的实测点处，得到与实测应力相适应的应力（总体误差最小）。据我们所知，以往在使用位移法时，基本上是在边界上分区域等值施加位移，更简单的做法是在区域的边界上只施加垂直边界的位移，不考虑平行边界的位移。但这样做的合理性是有条件的。具体地说，就是要求所取的边界是主平面（其法线与主应力方向一致），且边界上应力均匀等值分布。否则，不能保证平行于边界面的位移分量为零。然而，应力场在模型内部和边界上各点的主方向本身是需要通过计算得到的，并且根据我们的研究，应力场与洞室轴线的夹角对于洞室的破坏位置有直接关系。事先就假设了边界上应力场的方向，也就等于附加了限制内部的各点的主方向，这不能说是合理的。同时假设应力分布的均匀性的依据也不充足（见图1）。

### （二）一种新的回归地应力场的位移法

我们在文献[3]中提出了一种位移函数法。它在得到合理的地应力场的同时，还程式化地得到

了施加于计算模型边界上连续的位移场. 利用这个位移场作为 FEM 计算的边界条件, 可以避免附加约束对计算结果的影响, 同时对地应力的方向和大小均可以合理描述. 现将该方法简要描述如下.

设在模型内部位移表示为:

$$u = \sum_{i=0}^N u_i, \quad v = \sum_{i=0}^N v_i, \quad w = \sum_{i=0}^N w_i \quad (1)$$

其中 N 表示空间坐标  $x, y, z$  多项式的最高次数. 例如 (以  $x$  方向位移  $u$  为例,  $v$  和  $w$  仿此):

$$\begin{aligned} u_0 &= a_0 \\ u_1 &= a_1 x + a_2 y + a_3 z \\ u_2 &= a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 z^2 + a_7 xy + a_8 yz + a_9 xz \\ \Lambda \quad \Lambda \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $a_i$  为待定常系数 (以下称为回归系数), 它们将由最小二乘法根据实测应力决定.

将位移表达式(1)代入到弹性力学中以位移表达的平衡方程中, 可得到诸回归系数所满足的三个关系, 因此可以消掉 3 个回归系数. 再利用几何方程和物理方程得到用假设位移表达的应力:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{i=1}^N \left( (\lambda + 2G) \frac{\partial u_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w_i}{\partial z} \right), & \tau_{xy} &= \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^N \left( \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x} + (\lambda + 2G) \frac{\partial v_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w_i}{\partial z} \right), & \tau_{yz} &= \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) \\ \sigma_z &= \sum_{i=1}^N \left( \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_i}{\partial y} + (\lambda + 2G) \frac{\partial w_i}{\partial z} \right), & \tau_{xz} &= \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{其中: } \lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

以上方程在岩体中任何位置均成立, 现将其应用于具有实测应力的点上得到:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N \left( (\lambda + 2G) \frac{\partial u_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) &= (\bar{\sigma}_x)_j, & \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) &= (\bar{\tau}_{xy})_j \\ \sum_{i=1}^N \left( \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x} + (\lambda + 2G) \frac{\partial v_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) &= (\bar{\sigma}_y)_j, & \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) &= (\bar{\tau}_{yz})_j \\ \sum_{i=1}^N \left( \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_i}{\partial y} + (\lambda + 2G) \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) &= (\bar{\sigma}_z)_j, & \sum_{i=1}^N G \left( \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) &= (\bar{\tau}_{xz})_j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$(j = 1, 2, \Lambda, M)$

其中, 设有 M 为地应力测点个数, 等号右端为第 j 个测点的地应力分量 (它们通过实测为已知), 再用 (2) 式中的假设代入上式左端, 则可以得到该测点以回归系数为未知数的代数方程. 此后通过最小二乘法可以确定其中的回归参数.

以上过程的详细讨论可参考文献[3]. 但有两个具体问题有必要在这里进一步指出. 其一是, 为保证在理论上合理, 事先就不能假设某些多项式系数为零, 或系数间具有任何关系. 因此我们在 (2) 式中给出了完整的多项式. 需要指出的是, 并非所有的回归参数在后面的求解过程中都

可以被唯一确定，不过由于还要进行求导数等操作，这些没有被确定的回归参数并不会影响(4)式和最终结果。在上述回归过程中，一般只会得到某些回归系数之间的一个关系式。这时，可以假设其中任意一个或几个系数为零，条件是只要此后它们仍然可以满足这个关系并且不与其他关系相冲突。这也同样不会影响最后的结果。由于这里没有实质性的数学困难，本文不再赘述。

其二，在文献[3]中我们指出：“为了在整个建模区域内获得比较均匀的结果，在回归时，有时有必要在边界上根据实测值和工程经验人为地假设若干个点的位移值。这些假设的边界位移值与实测值一道参加回归。这样假设以后，在实测点上的回归结果与实测结果吻合程度将略有下降，但在整个建模区域内应力的分布较直接回归更加合理”。这是我们在实际计算中所采用的试探性方法，没有严格的数学依据。这是有待进一步研究的问题。

### (三) 地应力回归结果及讨论

图1和图2是采用上述方法所得到的结果。其中图1在文献[3]中已经给出，而图2则是与文献中的图4垂直方向的图(横断面)。两者都表明，在我们所取的计算边界上，洞室开挖所引起的二次位移均小于0.5mm。这说明，我们的模型所取的尺度是合理的，同时也表明我们采用的方法，在边界上是没有附加的应力和位移的。

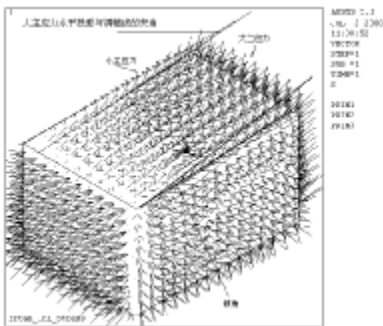


图1 地应力的主应力矢量

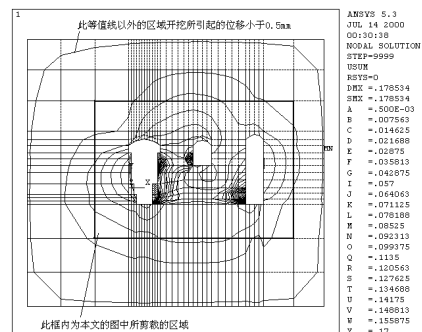


图2 建模区域受开挖影响的校核

值得特别指出的是，图2与文献[3]中的图4是模型与回归结果合理性验证中所必需的。我们尚未在其他文献中见到过类似的图。在研究过程中我们注意到，如果采用前述其它方法进行地应力回归，就无法得到类似这两个图中所看到的漂亮结果。因用其他方法回归时，尽管建模区域尺度可以取得足够大，但总是难以避免边界上附加位移或应力对洞室围岩附近的二次应力和位移的影响，而这种影响是无论如何不能接受的。但在图2中，模型区域边界附近，包括因开挖所引起的二次位移在内的所有位移的和接近为零。

## 三、三维非线性有限元计算与部分结果分析

### (一) FEM 计算模型

对二滩地下厂房的非线性有限元分析是采用 ANSYS 程序在  $\alpha$  工作站上进行的。整个计算区域中均用 6 面体 8 结点等参元建模。图 1 所示为整个建模区域，而图 3 为被开挖部分。单元总数为 34224 个，节点数为 37632 个（达 12 万个节点未知数），可见计算规模仍然十分巨大。就我们所掌握的资料来看，在当前地下洞室群三维非线性有限元计算方面，本计算模型在网格划分和变量总数上已经是属于超大规模的了。在我们划分网格之初，单元总数和节点位置数要比当前使用的多 1/3。但后来注意到，这种单元划分在当前计算精度的要求下显得过多。计算结果的精度与

所使用理论本身的精度以及数值离散程度有关,两者应该相互协调.当然如果格外关注某个局部,可以在整体分析的基础上,局部加密网格以进一步细致分析.

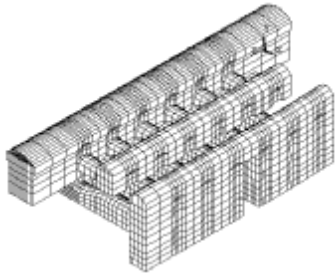


图3 地下洞室群被开挖部分

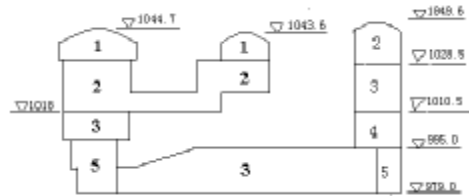


图4 分步开挖示意图

## (二) 破坏准则与破坏区的表示

在分析中我们采用了 Drucker 准则来判断复杂应力状态下岩体的破坏.这个准则属于一个双参数强度准则,是对 Mohr-Coulomb 准则的改进,同时又是对 Mises 准则的推广,所以又称为广义 Mises 准则<sup>[5]</sup>.诚然,它并非是唯一好的判别准则,其中存在很多的缺点也是不争的事实(在各种文献中多有讨论).我们决定采用它主要是出于这样一种考虑:它是最经常被使用的准则,人们对它比较熟悉.这样在将本计算结果与其它工程或本工程其他单位的计算结果相对照时,就具有了可比性.本计算结果与实际吻合得较好也从一个侧面说明采用这个准则在很大程度上是合理的.

我们建议,在今后的计算分析中应尽量采用这种考虑问题的方法.原因是,实际工程计算与纯粹的科学研究不同,这里不但要考虑采用通用的、其可靠性具有国际性认证的计算机软件,所用的计算模型也应该是(或者至少主要是)常用模型.在这种举足轻重的大工程中,完全采用新方法进行分析,不能被认为是值得推荐的.

## (三) 分步开挖的模拟

考虑到二滩地下厂房中发生岩爆的时间,我们把开挖过程模拟成 5 个主要步骤(见图 4).求解过程可以简单描述如下:首先将每一个开挖步骤设置为一个荷载步.在每个荷载步求解过程中,采用 Newton-Raphson 迭代法求解非线性方程.在每一次迭代过程中,均判断单元是否处于塑性状态,据此重新形成刚度矩阵并求解,重复此过程直至达到收敛,则获得该荷载步的解.以该解的结果为起点,继续求解下一个荷载步直到最后.这样所得到的围岩应力是地应力与开挖所引起的二次应力的迭加.而把计算所得到的位移场减去与初始地应力场相应的位移,就得到我们所关心的开挖所引起的位移.

在以上的各步开挖中,最引人关注的是第 3 步(1995 年 4~9 月之间).在这一步开挖过程中,由 2 号尾调室南端台阶开挖一次性贯穿引发了严重岩爆.此次岩爆导致 2 号尾调室上游边墙上部实测位移增加 30~60mm,诱发主变室桩号 0+40~0+110m(1~3 号母线洞区域)上游边墙上部实测位移增加 60~90mm,岩爆也波及了主厂房的下游边墙,实测位移量增加了 10~50mm.并导致尾调室上游起拱肩部位裂缝和母线洞内的裂缝进一步发展.有限元计算中,这一步开挖所引起主厂房和主变室之间岩体的破损区见图 6.该图显示了 1~2 号机组断面破损区的分布与深度与实际发生的破坏吻合得很好,这再次说明该处的破坏并非偶然.

如果仅仅从开挖方量上来看,3-1 步尾水管全部开挖的方量要明显大于 3-2 步尾调室开挖的方量,并且尾水管距离主变室总体上也比尾调室 3-2 步那部分岩体距离尾调室要近,直观上看 3-1 步对主变室的影响应该更大.但是情况恰恰相反.计算结果表明,在第 3-1 步开挖尾水管后,主

变室上游边墙 1-2 号母线洞之间等效塑性应变增量为 0.12‰，而第 3-2 步开挖以后塑性应变相对第 3-1 步增量为 0.27‰。可见第 3-2 步塑性应变的增量是 3-1 步塑性应变增量的 2 倍以上，仅仅 3-2 步的塑性应变增量就已经超过了主变室和尾调室上游拱肩位置的等效塑性应变的总量。

表 1 第 3 步开挖主变室上游边墙各相邻机组之间岩体的塑性应变增量

开挖步	塑性应变增量(单位: 微应变 $10^{-6}$ )				
	1-2 机组	2-3 机组	3-4 机组	4-5 机组	5-6 机组
3-1	120	110	100	90	134
3-2	270	250	220	200	160

在主变室上游边墙表筒处，指向洞室内部的 X 方向塑性应变最大值比 3-1 步量增加了 2000 微应变，这个增量已经超过主厂房上游拱肩处最终塑性应变总量的最大值，所以围岩表面处的问题显然更加严重。从这点可以理解 3-2 步开挖相对 3-1 步挖掉全部尾水管来说，对洞室群所在区域的影响要大得多，从而也就不难解释在这里引起岩爆的原因。图 5 则给出了 2 号机组断面大主应力等值线。

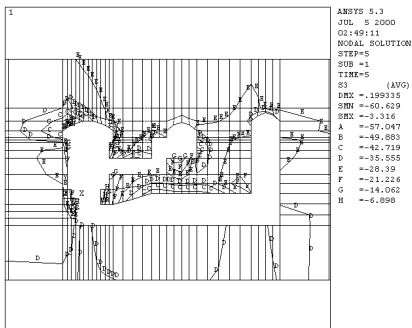


图 5 2 号机组断面大主应力等值线

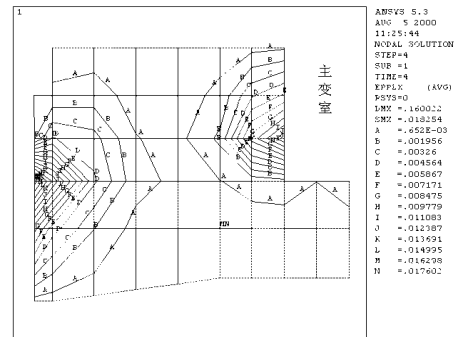


图 6 第 3 步开挖后主厂房和主变室边墙破损

#### 四、结论

本文根据我们对二滩地下厂房洞室群的三维非线性有限元分析，讨论了在类似的地下工程进行超大规模有限元计算时的几个具有普遍意义的问题。鉴于问题的重要性，以及所见的相关文献中对计算的具体处理往往甚少提及，我们通过本文把经验与探索整理出来，其中主要结论和建议如下：

1. 力场在整个分析中起着至关重要的作用，除了应力的方向而外，对地应力场的大小而外，对地应力场的方向的正确模拟也同样是非常重要的。否则计算结果将与实际情况相去甚远。

2. 建议采用我们在文献[3]中所详细描述的方法来模拟三维地应力场。同时我们认为，无论用什么方法模拟，都应给出如本文图 2 以及文献[3]中的图 4 这样的校核模拟精度的图。因为在我们的计算中发现目前普遍采用的其它方法，可能因计算者的经验等因素导致存比较严重的误差。

3. 平面 FEM 难以模拟地应力场与洞室轴线的非垂直夹角及仰角，最好采用平面与三维分析相结合的方法，在三维分析的基础上用平面分析进行局部的，更深入细致的计算。

4. 注意理论模型的精度与数值精度的协调。在进行实际工程的三维计算时，单元可以不必划分得过分多。所采用的理论模型也没有必要特别复杂。

5. 在非线性分析中模拟开挖步骤是十分重要的, 应力路径不同, 所得到的结果差异甚大。

鉴于目前的计算机存储能力和软件的处理能力, 对计算结果不能再仅仅限于少量的数据和图表。应力求全面地反映整个开挖过程中的应力、应变、位移、破坏区等。

#### 参考文献

- [1] 朱维申, 王可均, 朱家桥. 二滩电站坝肩厂房三维有限元分析及围岩变形观测反分析[J]. 岩土力学, 1988, 9(3): 11-21
- [2] 张有天. 地应力场的趋势分析[J]. 水利学报, 1984, (4): 31-38
- [3] 杨柯, 张立翔, 李仲奎. 地下洞室群 FEM 分析的地应力场计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1639-1644
- [4] 杨柯, 张立翔. 二滩水电站地下厂房洞室群模拟开挖过程的三维非线性有限元分析研究报告[M]. 昆明: 昆明理工大学, 2000. 10
- [5] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京, 水利水电出版社, 1990. 14-20

## Discussions on Some General Problems in 3-D Non-Linear FEM Analysis of Grouped Cavern

WANG Bingdi, YANG Ke

(School of Architectural and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, China 325035)

**Abstract:** In this paper, with the help of new methods, we have described the analysis with 3D nonlinear FEM on the grouped cavern of Ertan project. Based on the analysis, we have proposed and discussed some general occurred problems in similar analysis. Some suggestions and conclusions are as follows: Using 3D FEM analysis advantages over 2D calculation, when we take into account the angles between the main direction of geostress and the axial of the cavern. The correct simulation of initial geostress field plays an important part in obtaining reasonable results. Following the excavating of the cavern step by step is necessary especially for the nonlinear analysis, which will be helpful for us to find where and when the cavern would be damaged.

**Key words:** Grouped Cavern; FEM; Initial geostress; Non-linear