

文章编号: 1005-0523(2009)02-0029-05

地下工程数值模拟若干问题的处理方法

刁心宏

(华东交通大学 道路与铁道工程江西省重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:首先探讨了用数值模拟方法解决地下工程的岩石力学问题时,如何根据岩体工程结构的岩石力学性质和数值模拟的目的来选择数值计算方法;然后,详尽、深入地阐述了建立计算分析模型所涉及的几个重要问题及其处理办法,包括模型几何形状、计算范围的确定、边界条件和工程初始状态的处理、模型离散化、支护结构作用的处理,以及如何确定计算所必须的岩石力学参数;最后,提出了对计算结果的分析方法和思路。

关键词:地下工程;数值模拟;模拟方法选择;计算模型;岩石力学性质指标

中图分类号: TU45

文献标识码: A

自 20 世纪 70 年代以来,数值模拟方法作为一种科学有效而又快速简便的分析方法,被逐步引入到交通、水工、采矿、建筑等地下工程的力学分析、稳定性评价、方案比较等工作中。目前,这种方法已作为一种常用的手段在实际工程中大量采用,但同时也暴露出了一些应用中的具体问题,如果不科学地、合理地使用这种分析方法,则会使数值模拟的工作流于形式或纯粹成为数字游戏,失去方法本身的科学性和有效性。结合多年来的实际工作经验,本人对数值模拟工作中的常见问题提出一些见解,以供同行参考。

1 数值模拟方法选择

现今可用于对岩体工程结构进行力学分析的数值方法多种多样,每一种方法有其针对性和特点,对一个具体的问题用数值模拟方法进行分析时,应选择一种最适合该方法的问题进行研究。

数值模拟方法的选择,取决于研究对象即岩体工程结构的岩石力学性质和数值模拟的目的。

严格地讲,岩石除具有弹性性质外,还具有塑性性质和粘性性质,只不过在特定情况下,某种性质占主导地位而已。在岩体工程实践中,硬岩及应力水平不甚高的中硬岩,其力学性质主要呈现为弹性或弹塑性;高应力环境下的软岩,其力学性质主要呈现为塑性或粘塑性;对于服务时间较长的地下工程,岩石极软或软且应力水平很高,则在计算分析中不能忽视岩石的流变性质。

为了达到了解整个岩体工程系统的应力及变形规律的目的,各种数值方法均可采用,但以弹、塑性有限单元法或拉格朗日单元法最为适宜。这两种方法的单元划分灵活,计算所需参数较少且易获得,软件也易于得到,成本较低。

局部工程结构的应力及变形分析,若岩石中硬以上,则各种方法均可采用;若岩石软弱,则宜采用能进

收稿日期: 2008-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50504004)

作者简介: 刁心宏 (1961-), 男, 河南邓州人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、道路与铁道工程教学与科研工作。

行大变形分析的拉格朗日元法;若岩体可能发生非连续破坏,则宜采用离散单元法、非连续变形法或流形元法。

要实现了解岩体结构的破坏特征及动态破坏过程的目的,则只能采用离散单元法、非连续变形法或流形元法,因为这些方法就是针对岩体介质的非连续性而提出的。

此外,对于一个具体问题,是进行平面分析或是进行三维分析,也需做出恰当选择。严格地讲,所有的问题都是三维的,但如果采用平面分析既能达到目的,计算结果误差也不大,为了降低费用和快速方便起见,则以采用平面分析为宜。反之,则应采用三维程序代码进行计算分析。

表 1 给出了几种数值模拟方法所依据的基本原理、求解方式、离散化方法及其适用条件,可供选择模拟方法时参考。

表 1 几种数值模拟方法的对比^[1~6]

数值模拟方法	基本原理	求解方式	离散方式	适用条件
有限单元法	最小势能原理	解方程组	全区域划分单元	岩石中硬以上,小变形,岩体不会发生非连续性破坏如滑动、转动、分离等
边界单元法	Betti互等定理	解方程组	边界上划分单元	同上
离散单元法	牛顿运动定律	显式差分	按结构弱面分布特征划分单元	岩石中硬以上,低应力水平,大变形,岩体沿弱面发生非连续性破坏
非连续变形法	最小势能原理	解方程组	按主要结构弱面实际情况分割单元	大变形,岩体发生非连续性破坏
数值流形法	最小势能原理	解方程组	全区域划分单元	中硬以上岩体的连续或不连续变形
拉格朗日元法	牛顿运动定律	显式差分	全区域划分单元	岩石软弱,大变形,岩体的破坏以变形为主

2 计算模型的建立

数值模拟方法确定以后,建立一个能充分符合原型几何特征和物理性质的计算模型至关重要。建立的模型与实际原型越接近,则计算结果越能代表原型的实际情况。但是,实际工程的几何形状及岩体的物理力学性质是极其复杂的,要使建立的计算模型与工程原型在几何和物理性质上完全相同几乎是不可能的,因此,应根据工程的实际情况和研究目的对原型进行适当的工程处理,以便进行计算分析。

2.1 几何形状

若需对较大范围内的地下工程进行力学分析,可按照工程施工设计建立数值模拟分析所需的几何模型。如要对具体部位岩体的应力及变形进行分析,则应按照开挖形成的实际几何形状或统计平均情况建立模型。

2.2 计算范围

计算范围原则上按照开挖(采)活动所引起的围岩应力重新分布的显著影响范围确定。

对于隧道型或洞室型开挖工程,理论分析表明,开挖活动的显著影响范围为最小开挖尺寸的 3~5 倍。

对较大范围的地下工程进行力学分析时,其显著影响范围取决于工程的赋存深度、开挖规模与赋存深度之比等。一般情况下,计算范围向上取至地表,向下取开挖空间较小尺寸的 0.5~1.0 倍即可,水平方向的影响范围自开挖边界向外推最大开挖深度的距离。

2.3 边界条件^[7~9]

在地下工程岩石力学数值模拟计算分析中,计算范围通常取至开挖影响范围之外,除地表为应力边界(一般为零应力边界)外,下边界可为全约束或铅垂方向约束边界。前后左右边界视情况不同而进行相应处理;若仅考虑岩体的自重作用,则前后左右边界可为垂直于边界平面上约束或全约束;若有水平构

造应力存在,且计算分析所用代码不能对地应力初始化,则前后左右边界应为应力边界。

2.4 初始状态

初始状态包括原始地应力状态、大型地质构造面(岩层层面、岩性界面、断层破碎带、软弱夹层、裂隙等)、地下水赋存及其径流状态等。

对一个具体的地下工程而言,其所处区域的原始地应力可以认为其大小和方向是恒定不变的,三个主应力的性质为压应力。大量的实测结果表明,铅垂应力分量为原始地应力场的主应力之一,且其量值取决于岩体自重,即 $\sigma_v = \gamma H$ 。原始地应力的水平主应力方向可以通过分析该地区长期以来的地质构造运动过程、地质构造特征以及该地区地形地貌特征来确定。

原始地应力的大小可用实测方法获得,如钻孔应变法、孔径变形法和水压致裂法等,也可用采用反分析方法。前者应用较为成熟,但测量过程复杂,成本较高,不宜大量采用。后者方法简单,成本低廉,便于大范围长期进行。值得指出的是,测量得到的原始地应力主方向,尚需与地质分析方法得到的主应力方向进行比较和综合分析,才能得出正确结论。

大型地质构造面中的岩层层面和岩性界面如两侧岩石结合良好,即岩层层面和岩性界面具有与两侧岩石相同数量级的 C (粘聚力)、 Φ (内摩擦角)值,则在计算分析中可不考虑这些构造面的影响,但对于影响岩体应力分布和岩体稳定性的断层破碎带、软弱夹层和大型裂隙则必须予以考虑。断层破碎带和厚度较大的软弱夹层可按具有相应物理力学性质的岩层处理,厚度较小的软弱夹层和大型裂隙用节理单元进行处理。

在水体下(如江、河、湖等)的地下工程,若水对采矿有显著影响,则需在探明岩体渗透性的条件下,用偶合力学分析和渗流分析的程序代码进行计算分析,以便考虑地下水的静、动压对岩体应力及位移的影响。

2.5 模型离散化

模型离散化主要有单元划分多少和如何划分单元两个问题。

对于将岩体看作连续介质的计算分析方法如有限单元法和拉格朗日元法,划分多少个单元,取决于计算范围大小、计算精度要求、计算时间(与计算成本成正比)。计算范围越大,计算精度要求越高,则需划分的单元也应越多,反之亦反。试验表明,计算范围一定时,单元越多,计算精度越高,但单元数达到某一数量后,随着单元数的增加,计算精度的提高越来越小,即对特定的问题,存在一个适宜的划分单元数范围。作者经过大量计算试验认为,单元数增加 10%,前后相邻两次计算结果的相对误差小于 2%时,即可认为达到了适宜的单元数。相对误差可按下式计算。

$$R_e = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i^{k+1} - P_i^k|}{P_i^{k+1} + P_i^k} \quad (1)$$

式中: P ——用于检验的参量,如应力 σ 或位移 δ

n ——检验点数,不少于 6 个。

对于将岩体看作非连续介质的计算分析方法,如离散单元法,划分多少单元取决于计算范围大小、计算精度要求、岩体结构特征、工程结构单元尺寸和计算时间。与有限单元法不同的是:靠近开挖空间的岩体划分的单元大小,与工程结构尺寸相比,应不会从根本上改变实际岩体的工程特征,并尽量与实际岩体的岩块大小一致。

划分单元的疏密变化的原则是:应力分布变化剧烈的部位,单元划分应相对密一些;应力分布均匀的部位,单元划分相对疏一些。

2.6 支护结构的作用

这里所谓的支护特指锚杆、锚索和喷射混凝土支护。因目前所用的大多数软件只能解弹性或弹塑性问题,即认为岩体为弹性材料或弹塑性材料,每一步开挖或开采后,岩体的变形及破坏是瞬时完成的。所

以,若按照施工顺序施加支护结构,因该步开挖引起的岩体变形已完成,施加的支护对本次开挖无效,这显然低估了支护的作用;若在开挖或开采前施加支护,则对于开挖或开采后再施加支护的实际情况而言,无疑又夸大了支护的作用。实际情况是:由于岩体具有滞后和流变性质,开挖引起的变形不是瞬时完成,而是持续相当一段时间,达到稳定的时间取决于岩体性质和载荷大小等。一般情况下,施加支护时,变形仍未完成,支护结构对本次开挖或开采仍起一定作用,而作用大小取决于达到稳定的时间和施加支护的时刻。施加支护时已释放的载荷或变形,通常是根据经验取一适当的系数,因各人的认识和经验不同,这一系数的取值主观性较大,不便于在实际工程中采用。为此,作者提出以下处理方法。

(1) 通过观测开挖工程岩体变形,得到岩体变形随时间的变化规律;

(2) 按照支护的施工时间,由变形-时间曲线确定支护时岩体变形已完成的比例;

(3) 假设支护时开挖等效荷载释放比例与岩体变形完成比例相等(因为岩体变形与载荷成正比),计算支护时已释放的载荷;

(4) 将本次开挖支护分为两步施工(第二步计算时撤除第一步的残余载荷)进行计算分析即可。

2.7 岩体性质及力学指标^[10~14]

用有限单元法或拉格朗日元进行计算分析时,对于硬度很大、弹性性质十分明显的岩体,可以进行弹性计算分析。但在一般情况下,岩体既有弹性性质,同时也有塑性性质和粘性性质,对于埋深不大的中硬以上岩体,将岩体视为弹塑性体进行计算分析已能满足工程需要。

岩体力学性质参数指标的选取,关系到计算结果是否可信,必须慎重对待。实验室试验获得的岩石力学性质指标一般不能直接用于计算分析,必须进行工程处理。岩体的强度参数可用格吉方法和费申科方法等进行弱化,变形参数(弹性模量)可用霍克-布朗方法进行处理,反分析方法获得的岩体力学参数一般具有较高的可信度。

3 计算结果分析

用数值模拟方法对地下工程进行岩石力学分析的目的主要有:

(1) 研究开挖过程中岩体应力及变形变化规律,开挖对其他重要工程、地表重要构筑物的影响及影响程度,开挖引起地表沉降的规律,岩体加固的作用和作用机理等;

(2) 根据计算获得的岩体应力大小及分布状态,判断围岩及重要工程构元的稳定状态或破坏情况;

(3) 依据岩体应力分布状态和破坏情况,进行开挖方案比较,优化开挖工艺和工程结构参数及支护参数等。

支护对岩体的加固作用和作用机理可以通过分析加固前后围岩的应力状态变化、关键部位应力及变形大小的变化来表示。例如用锚杆加固后,原来岩体中的拉应力区或塑性破坏区减小或完全消失,或者拉应力转变为压应力,顶板沉降显著减小,则说明锚杆加固发挥了应有作用。

如将岩体看作弹性材料进行分析,则有限元或拉格朗日元法计算结果并不能直接给出岩体的稳定状态和破坏情况,在此情况下,一方面要看围岩体中是否存在拉应力,拉应力大小是否达到或超过岩体的抗拉强度,如是则表明岩体发生破坏;另一方面,对关键部位或工程结构构元的压应力区用恰当的破坏准则(如 Hoek-Brown破坏准则、Griffith破坏准则等)判断其是否发生破坏。作弹塑性分析时,有的应用软件还能给出岩体的塑性破坏区域,但值得注意的是,岩体发生塑性破坏,并不一定意味着工程结构构元完全失去效用。

用离散单元法进行分析时,除作上述分析外,还可依据岩体沿节理裂隙滑动、开裂和冒落情况进行分析。

用数值模拟的计算结果进行方案比较,是数值模拟方法最擅长的方面。通常是比较方案之间的若干参考量来选择最优或较优方案,这些参考量包括:① 岩体中重要部位的拉应力区及拉应力大小;② 岩体

破坏区大小;③ 关键部位的变形量;④ 关键部位的应力分布状态。在工程量和施工成本基本相同的条件下,岩体中拉应力区及拉应力越小,岩体破坏区越小,岩体变形量越小,应力分布状态越有利于岩体稳定,则方案越优。方案之间参考量矛盾时,需进行综合分析确定最优方案。

参考文献:

- [1] 王泳嘉. 拉格朗日元法及其在锚固工程中的应用 [C]. 锚固与灌浆技术国际学术讨论会论文集, 广州: 1994. 177—183.
- [2] E 霍克, M W 格拉宾斯基, M S 迪德里克斯. 数值模拟在地下采掘设计中的应用 [J]. 国外金属矿山, 1992(11): 61—66.
- [3] 王泳嘉, 冯夏庭. 关于计算岩石力学发展的几点思考 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 103—104.
- [4] 周维垣. 岩石力学数值方法的现状与展望 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 84—88.
- [5] 朱爱军, 邓安福, 曾祥勇. 数值流形方法对岩土工程开挖卸荷问题的模拟 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 179—183.
- [6] 段文峰, 王蕾笑, 廖雄华. 岩土工程施工力学问题数值模拟方法探讨 [J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, 20(2): 16—22.
- [7] 杨家岭, 朱维申, 邱祥波. 三维粘弹塑性有限元分析在隧道工程中的应用 [J]. 岩土力学, 1997, 18(A08): 147—151.
- [8] 尚岳全. 岩体稳定和区域稳定数值模拟边界条件确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 201—204.
- [9] 程东幸, 潘 炜, 刘大安, 等. 锚固节理岩体等效力学参数三维离散元模拟 [J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2 127—2 132.
- [10] 肖专文. 岩体开挖与充填的三维数值模拟及优化研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 1997.
- [11] 陈胜宏. 三峡工程船闸边坡弹粘塑性自适应有限元分析 [J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 13—19.
- [12] 王吉亮, 陈剑平, 苏生瑞, 等. 节理岩体隧道塌方机理离散元研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 316—319.
- [13] 张冲, 侯艳丽, 金 峰, 等. 拱坝一坝肩三维可变形离散元整体稳定分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 226—1 232.
- [14] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性 [J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 693—1 698.

Treatm ent of Several P roblem s in Num erical S im ulation of Underground Engineering

D IAO X in hong

(Jiangxi Key Laboratory of Road and Railway Engineering East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Firstly, the paper discusses how to choose numerical simulation method based on rock mechanical property and numerical simulating purpose of rock engineering when we resolve rock mechanical problems of underground engineering by means of numerical simulation. Secondly, a number of topics and treatments are expounded, including definition of model geometrical shape and analyzing range, treatment of boundary condition and initial state, model discreteness, effect of support construction and means of determining rock mechanical parameters. Finally, method and idea of analyzing calculating result are put forward.

Key words: underground engineering; numerical simulation; choice of numerical simulation method; calculating model parameters of rock mechanics

(责任编辑:王全金)