

长大引水隧洞岩爆的数值模拟及其应用

王 青¹ 朱珍德¹ 朱江棚² 刘金辉³

(1.河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098 ;2.启东市第二建筑设计院 ,江苏 南通 226200 ;
3.枣庄矿业集团新安煤矿 ,山东 微山 277600)

摘要 通过开挖卸荷的计算原理 ,运用有限单元法对长大引水隧洞进行数值模拟 ,并结合工程实际情况分析围岩应力状态 ,分别计算不考虑开挖卸荷影响和考虑开挖卸荷影响的长大引水隧洞围岩断面切向应力 .数值模拟结果表明 ,应力集中部位在洞腰附近区域 ,且考虑开挖卸荷的计算方法能更好地反映实际工程情况 .
关键词 岩爆 ;引水隧洞 ;卸荷 ;有限单元法 ;数值模拟
中图分类号 :TU457 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2008)03-0363-04

深埋大型地下洞室 ,开挖深度大、尺度大 ,应力释放量级高 ,在地下洞室的局部极易产生岩爆现象^[1] .岩体卸荷破坏是指岩体由于卸除一向或二向荷载而引起的其承载能力丧失的现象和过程^[2] .卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径 ,两者所引起的岩体的变形和破坏特性 ,无论在力学机理还是在力学响应上都有很大差异^[3-6] .近年来的研究表明 ,采用加载的思路来研究地下工程和边坡工程中的岩爆问题是不合适的 ,其研究的结果和实际情况有较大的差距^[7] .本文运用有限单元法进行数值模拟 ,分别计算考虑和不考虑开挖卸荷影响的围岩应力来分析岩爆问题 .

1 分级开挖卸荷有限元法模拟计算

1.1 开挖卸荷的计算原理

开挖是将开挖面上的应力完全解除 ,使其成为应力自由面 .对有限元刚度法而言 ,对图 1 所示的平面问题 ,*i* 点的平衡方程^[8]为

$$R_i - F_i = 0 \tag{1}$$

式中 :*R_i*——环绕 *i* 点各单元移置到 *i* 点的等效荷载列阵 ,其分量为 *x_i*、*y_i* ,沿坐标轴正向为正 ;*F_i*——环绕 *i* 点的各单元节点力列阵总和 ,其分量对 *i* 点的作用是沿坐标轴反向的 .

当挖去与 *i* 点相连的一个单元时 ,*i* 点相当于受到一个开挖释放荷载 *P_i* ,其计算包含单元对 *i* 点产生的结点力 ,还包含单元对 *i* 点产生的等效结点荷载 ,将 *P_i* 反作用于 *i* 点(相当于挖去单元)得

$$P_i = F_{i1} - R_{i1} \tag{2}$$

如果挖去的是 *M* 个单元 ,则可将式(2)改写为

$$P = \sum_{i=1}^M \int_{v_i} B^T \sigma_0 dv - \sum_{i=1}^M \left(\int_{v_i} N^T f dv + \int_{S_i^p} N^T \bar{p} ds \right) \tag{3}$$

式中 :*σ₀*——开挖区域初始应力场 ;*f*、*p*——引起初始应力场单元内受到的体力和已知应力边界上的面力 ;*B*——应变矩阵 ;*N*——插值函数矩阵 ;*S*——开挖边界 .

在开挖区域内部结点、开挖区域与未开挖区域交界面以外边界上的结点 ,由平衡关系必有 *P* = 0 ,在开挖区域与未开挖区域构成的界面 ,即可按式(3)计算开挖释放荷载 .

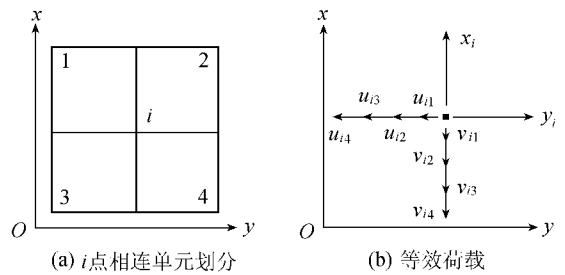


图 1 结点 *i* 的平衡
Fig.1 The balance at node *i*

1.2 有限元中开挖卸荷的计算方法

1.2.1 初始应力场为自重场

对于大多数地下隧洞开挖问题,初始应力场可按自重场考虑,式(3)可简化为

$$\boldsymbol{P} = \sum_{i=1}^M \int_{v_i} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \mathrm{d}v - \sum_{i=1}^M \int_{v_i} \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{\rho} g \mathrm{d}v \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{\rho}$ ——介质沿坐标轴方向的密度分量所构成的列阵; g ——重力加速度.

1.2.2 初始应力场为非自重场

如果初始应力场不是自重场,而是由自重场和构造应力场共同构成的,则初始应力场为

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = A_1 \boldsymbol{\sigma}_1 + A_2 \boldsymbol{\sigma}_2 \tag{5}$$

式中: A_1 ——自重场回归系数; A_2 ——构造场回归系数; $\boldsymbol{\sigma}_1$ ——自重应力场; $\boldsymbol{\sigma}_2$ ——构造应力场.

通常,为反映地质运动的影响,初始应力场反演回归分析中所取的计算区域(大区域)远大于实际计算对象所取的区域(小区域),而构造应力的反演回归是在大区域边界上施加各种力,模拟地质构造运动.因此,对于实际计算的小区域而言,单元受到的外荷载仍是自重荷载,开挖释放荷载为

$$\boldsymbol{P} = \sum_{i=1}^M \int_{v_i} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 \mathrm{d}v - A_1 \sum_{i=1}^M \int_{v_i} \boldsymbol{N}^T \boldsymbol{\rho} g \mathrm{d}v \tag{6}$$

A_1 由初始应力反演回归得到,虽然在大多数情况下, A_1 接近于1甚至直接取1,但从概念的严谨性来看,应该在计算开挖卸荷时考虑其影响.

1.3 开挖卸荷的模拟

在有限元中,模拟开挖过程一般有2种方法.一种称为空气单元法或虚拟单元法,该法首先计算整体力学参数,然后将开挖掉的单元材料参数予以降低,以略去这部分单元的刚度,模拟其被开挖效应.该法的最大好处是可以采用一个统一的计算网格反映多级开挖效应,每次开挖计算时,只需指示开挖单元号便可由程序自动实施,但如果参数选用不当会造成方程病态和计算误差.另一种称为排除单元法,该法也是首先计算整体力学参数,但在单元编号时,将要开挖的单元按开挖的级数排列在开始或最后,在模拟开挖过程时,依次丢掉这部分单元,并修改方程组的编号,随着逐步开挖,求解的自由度将逐渐减少,该法可以避免求解方程组的病态,但在单元编号和修改上有一定难度,而且还会涉及多个计算网格之间对应数据的传递问题^[9].

2 计算实例

2.1 工程概况

锦屏二级水电站4条引水隧洞平均长约16.6 km,洞径约11 m,一般埋深1 500~2 000 m,最大埋深2 525 m,属洞线长、洞径大、埋深极大的引水隧洞.隧洞围岩岩性组合复杂,断裂构造发育,特别是该区为高地应力区,现已测得最大应力达42.11 MPa,经回归分析沿洞线最大应力可达54 MPa^[10].

2.2 围岩应力状态分析

工程区地质资料显示,引水隧洞所处地区为大理岩洞段,其水平地应力 p_h 与垂直地应力 p_v 的比值约为0.836,代入回归分析得 $p_v = 39.85$ MPa,故取计算参数: $p_h = 33.44$ MPa, $p_v = 40$ MPa.计算模型如图2所示.

二次应力状态近似如下:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p_v}{2}[(1 - \alpha^2)(1 + \lambda) + (1 - 4\alpha^2 + 3\alpha^4)(1 - \lambda)\cos 2\theta] \\ \sigma_\theta = \frac{p_v}{2}[(1 + \alpha^2)(1 + \lambda) - (1 + 3\alpha^4)(1 - \lambda)\cos 2\theta] \\ \tau_{r\theta} = \frac{p_v}{2}(1 + 2\alpha^2 - 3\alpha^4)(1 - \lambda)\sin 2\theta \end{cases} \tag{7}$$

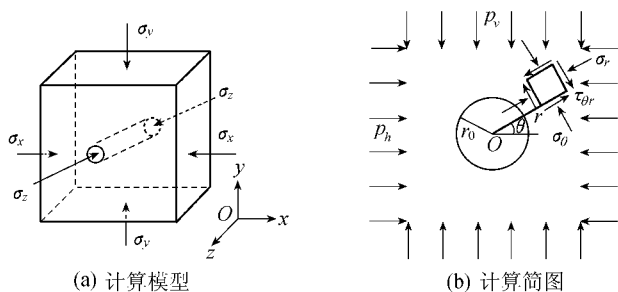


图2 围岩应力计算模型及计算简图

Fig.2 Model and diagram for calculating stress on a surrounding rock

式中： σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ ——径向应力、切向应力和剪切应力； λ ——初始应力状态， $\lambda = p_h/p_v$ ； θ ——自水平轴算起的极坐标角； $\alpha = r_0/r$ ，其中 r_0 为开挖半径， r 为计算半径。

在 p_h 、 p_v 的基础上再加上洞轴向应力 p_s ，围岩中应力应该在式 (7) 的基础上加上洞轴向应力 σ_s ，为简化计算，假定 σ_s 由 σ_r 和 σ_θ 的泊松效应引起。将 $\lambda = 0.836$ 代入式 (7) 可得围岩中各向应力为

$$\left\{\begin{aligned}\sigma_r &= p_v\left[0.918\left(1-\frac{r_0^2}{r^2}\right)-0.082\left(1-4\frac{r_0^2}{r^2}+3\frac{r_0^4}{r^4}\right)\cos2\theta\right] \\ \sigma_\theta &= p_v\left[0.918\left(1+\frac{r_0^2}{r^2}\right)+0.082\left(1+3\frac{r_0^4}{r^4}\right)\cos2\theta\right] \\ \tau_{r\theta} &= 0.082p_v\left(1+2\frac{r_0^2}{r^2}-3\frac{r_0^4}{r^4}\right)\sin2\theta \\ \sigma_s &= \mu(\sigma_r+\sigma_\theta)=\mu p_v\left(1.836+0.328\frac{r_0^2}{r^2}\cos2\theta\right)=p_s\end{aligned}\right.\tag{8}$$

式中 μ 为泊松比。

不考虑开挖卸荷的围岩断面切向应力 σ_θ 的理论计算结果见表 1。

表 1 开挖长大引水隧洞围岩断面切向应力 σ_θ 计算结果

Table 1 The calculated tangential stress, σ_θ , at the cross section of a surrounding rock when excavating a long and wide diversion tunnel

计算位置		$\sigma_{\theta}/\text{MPa}$			计算位置		$\sigma_{\theta}/\text{MPa}$		
$\theta(^{\circ})$	r/m	不考虑开挖 卸荷理论计算	不考虑开挖 卸荷有限元计算	考虑开挖卸荷 有限元计算	$\theta(^{\circ})$	r/m	不考虑开挖 卸荷理论计算	不考虑开挖 卸荷有限元计算	考虑开挖卸荷 有限元计算
0	5.500	86.56	88.87	109.20	45	10.395	47.00	48.18	58.48
0	6.600	70.25	70.10	92.08	45	13.658	42.67	43.85	52.51
0	8.800	55.85	56.27	74.59	72	5.500	62.83	65.26	79.20
0	11.000	49.80	50.37	66.24	72	6.666	55.37	55.41	69.12
36	5.500	77.49	79.28	94.27	72	8.998	46.67	46.95	57.32
36	6.903	62.27	61.47	75.82	72	11.330	42.28	42.73	51.06
36	9.709	49.83	49.87	61.61	90	5.500	60.32	62.58	77.38
36	12.515	44.94	45.19	55.17	90	6.600	54.19	54.41	68.25
45	5.500	73.44	74.86	87.16	90	8.800	46.28	46.57	56.89
45	7.132	58.56	58.94	71.65	90	11.000	42.01	42.37	50.55

2.3 计算结果分析

运用有限单元法，分别计算不考虑开挖卸荷影响和考虑开挖卸荷影响的长大引水隧洞围岩断面切向应力 σ_θ （以压应力为正，拉应力为负）。在考虑开挖卸荷影响的计算中，采用分级开挖，在某级开挖后加上等效结点荷载，再计算断面切向应力。因隧洞的长度远大于其截面尺寸，可视为平面应变问题，建立的弹性计算模型如图 3 所示。（a）模型计算区域。隧洞直径为 11 m，以圆心为坐标轴原点，上下左右各取 38.5 m。（b）计算单元剖分。采用 4 结点等参单元，不考虑开挖卸荷分 1 200 个单元，1 240 个结点（图 3（a）），考虑开挖卸荷分 1 416 个单元，1 437 个结点，其中开挖部分剖分 216 个单元，237 个结点（图 3（b））。（c）边界条件。底面边界竖向固定，水平向自由，上部施加均布荷载，侧边界水平向固定，竖向自由，侧边施加均布荷载。（d）计算参数。水平地应力 $p_h = 33.44\text{ MPa}$ ，垂直地应力 $p_v = 40\text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.2$ ，大理岩密度 $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E = 40\text{ GPa}$ ，单轴抗压强度 $R_c = 150\text{ MPa}$ ，单轴抗拉强度 10.3 MPa [6]。

计算结果见表 1，由于对称，表 1 只列出了计算结果的 1/4。表 1 中，不考虑开挖的有限元计算结果与理论结果相差很小，说明有限元计算结果是可信的。表 1 各种计算结果显示，同一角度下 σ_θ 随 r 的增大而减小，同一半径下 σ_θ 随 θ 的增大而减小，围岩应力集中部位在洞壁两侧中间（洞腰）位置。比较考虑开挖卸荷影响和不考虑开挖卸荷影响的计算结果，发现前者应力值都要比后者大，尤其是半径为 5.500 m 的洞周围岩，前者应力值较后者增加约 20 MPa，变化幅度较大，

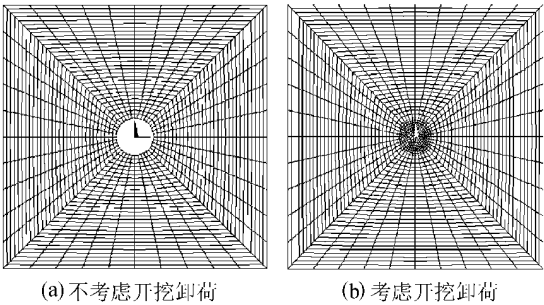


图 3 计算模型
Fig.3 Calculation model

从洞腰至洞顶,开挖影响的效应逐渐降低,这说明岩体开挖卸荷的影响范围主要集中在洞腰附近区域。

很多因素都会影响岩爆的发生,如地应力、地下水、岩性、埋深、人为开挖等。根据文献[7]对岩爆烈度的划分,分别求出不同方法下的岩爆烈度(表2),从而对该段引水隧洞发生岩爆进行预测。表2不考虑开挖卸荷有限元计算的洞周岩爆烈度要比考虑开挖卸荷影响的小一个级别,后者与实际发生岩爆的地质探洞烈度相符,而且考虑开挖卸荷影响得到的洞周应力状态应该更接近工程实际情况。据此,可以认为在岩爆预测中使用考虑开挖卸荷影响的计算方法更准确。这也验证了“开挖引起应力重分布,导致应力集中的部位容易发生岩爆”的论断。

实际工程中确定集中应力后,可以根据公式

$$d = 0.25e^{2.54\sigma_{\theta\max}/R_c} \qquad b = 0.46e^{2.54\sigma_{\theta\max}/R_c} \tag{9}$$

预测岩爆发生区域的深度 d 和宽度 b [11],计算结果见表2。从表2可见,考虑开挖卸荷计算所得的岩爆深度和宽度较大,与不考虑开挖卸荷计算结果相差比较大,在实际应用时,应取较大值,以提高安全系数。

3 结 语

本文利用有限单元法对长大引水隧洞岩爆问题进行模拟计算,结果表明:考虑岩体开挖可以充分反映应力集中情况,而这是以往岩爆分析中较少考虑的因素。模拟考虑开挖卸荷情况下的有限元计算更能反映实际隧洞围岩的应力分布,更能揭示岩爆的深度,同时也验证了文献[7]提出的岩爆烈度判别数值依据的可靠性。由于岩爆发生处往往是应力集中区域,而在该区域数值计算得到的应力值敏感性很大,仅仅考虑洞边某个方向上应力值评判岩爆的程度是不够全面的,可以考虑以洞周一定范围内的应力场建立岩爆深度、宽度以及烈度的计算公式。

参考文献:

[1] 关成立,侯克鹏.岩爆研究现状[J].云南冶金,2006,35(1):12-15.
[2] 王飞,杨学堂.工程岩体卸荷力学特性的研究与发展[J].岩土工程技术,2005,19(1):32-35.
[3] 吴刚.岩体在加、卸荷条件下破坏效应的对比分析[J].岩土力学,1997,18(2):13-16.
[4] 缪晓军,吴继敏,李景波.圆形洞室岩爆成因分析及其地质灾害研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):37-39.
[5] 徐林生,王兰生.岩爆形成机理研究[J].重庆大学学报,2001,24(2):115-121.
[6] 徐林生,王兰生,李天斌.卸荷状态下岩爆岩石变形破裂机制的实验岩石力学研究[J].山地学报,2000,18(增刊):102-107.
[7] 徐林生,王兰生,李天斌.国内外岩爆研究现状综述[J].长江科学院院报,1999,16(4):24-28.
[8] 章青.工程结构不连续介质力学问题的理论模型、分析方法及应用[D].南京:河海大学,2000.
[9] DOWDING C H. A potential for rock bursting and slabbing in deep caverns[J]. Engineering Geology, 1986, 22(2):265-279.
[10] 王士天,黄润秋,李渝生,等.雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M].成都:成都科技大学出版社,1998:367-371.
[11] 严可煊.岩爆防治与对策研究[J].福建建筑,2005,28(2):60-63.

Numerical simulation of a rock burst in long and wide diversion tunnel

WANG Qing¹, ZHU Zhen-de¹, ZHU Jiang-peng², LIU Jin-hui³

- (1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. The Second Architecture Design Institute in Qidong City, Nantong 226200, China;
3. Xin'an Coal Mine of Zaozhuang Mining Group, Weishan 277600, China)

Abstract: According to the principle of excavation unloading, a case involving a long and wide diversion tunnel was numerically simulated using FEM. The stress on the surrounding rocks was analyzed by calculating the tangential stress at the cross sections, including or excluding the influence of excavation unloading. The results show that the stress is distributed mainly at the waist of the tunnel and the calculation method considering excavation unloading is better for actual situations.

Key words: rock burst; diversion tunnel; unloading; FEM; numerical simulation