

隧洞开挖的三维有限元计算

金丰年 钱七虎

(工程兵工程学院 南京 210007)

提要 应用非线性粘弹性模型,对全断面开挖隧洞的开挖过程进行了三维有限元计算,讨论了开挖面和开挖速度的影响。计算结果表明,开挖面的影响范围约为洞室直径的2倍。开挖速度的影响则与应力-应变曲线形状密切相关。开挖速度的影响,在短时间内比较明显,随着时间的增长而逐渐减小,并可通过围岩变形的时间效应计算结果给予解释。另外,还将计算结果与以往的实测结果进行了定性的比较和分析。

关键词 隧洞开挖,非线性粘弹性模型,有限元计算

1 引言

在隧洞的开挖过程中,开挖面附近围岩的稳定性问题,直接影响到施工安全和支护设计。有关这个问题,以往已有较多的研究成果。例如,文[1][2]分别对隧洞开挖问题进行了二维弹性有限元计算。文[3]对隧洞进行了正分析和反分析的计算,文[4]进行了三维弹性边界元计算。文[5]给出了三维弹塑性有限元计算结果,文[6]应用弹粘塑性模型,计算了开挖面的影响。而文[7][8]则利用线性粘弹性模型研究了开挖面和开挖速度的影响。

总的来说,以往三维有限元的解析结果较少,考虑开挖速度影响的较少,考虑时间效应的研究结果则更少。因此,尚有必要对隧洞开挖问题作进一步的计算和讨论。本文利用非线性粘弹性模型,对圆形隧洞的开挖过程进行三维有限元模拟计算,通过计算对开挖面和开挖速度的影响进行具体的分析,并与实测结果相对照进行讨论。

2 岩石力学模型

本文所用模型为近年来在实验基础上提出的非线性粘弹性模型^[9,10,11],通过若干假定扩展成了三维状态下的岩石力学模型。该模型的基本假定有以下四点。

(1) 模量 $\lambda (= \Delta\epsilon/\Delta\sigma)$ 的增加速度与当时应力差 $\Delta\sigma (= \sigma_1 - \sigma_3)$ 的 n 次方成正比,其中 $\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_3$, 并且认为模量的增加速度,随着 λ 的增加与 λ 的 m 次方成比例地加速增大。基本方程式为:

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a(\Delta\sigma^*)^n (\lambda^*)^m \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n_0 + 1} \right)^{m/(n_0 \cdot m + 1)}$$

$$\Delta \epsilon^* = \lambda^* \cdot \Delta \sigma^* \tag{2}$$

式中, λ^* ($= \lambda/\lambda_0$)、 $\Delta \sigma^*$ ($= \Delta \sigma/\Delta \sigma_0$)、 $\Delta \epsilon^*$ ($= \Delta \epsilon/\Delta \epsilon_0$) 分别表示规一化的模量、应力差和应变差。 λ_0 为初始模量, $\Delta \sigma_0$ 为强度(破坏应力差), 且如图 1 所示 $\Delta \epsilon_0 = \lambda_0 \cdot \Delta \sigma_0$, t_0 表示定应变速度试验求强度时应变达到 $\Delta \epsilon_0$ 时所需要的时间, 不失一般性, 本文将 $t_0 = 120s$ 作为标准值。

(2) 围压对强度的影响, 采用 Janach^[12] 提出的表达式

$$\Delta \sigma_0 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right)^{0.5} - \sigma_3 \tag{3}$$

式中, σ_c 为单轴压缩强度, σ_t 为单轴拉伸强度, σ_3 为围压。

(3) 当破坏强度随围压的增加而增大时, n 值按下式增加^[11,13]

$$n = \frac{\Delta \sigma_0}{\sigma_c} \cdot n_0 \tag{4}$$

式中, n_0 为单轴应力下的 n 值。上式是对已发表实验结果整理而得到的实验公式^[10]。

(4) 对于较多的岩石, 观测到泊松比随破坏的进行而增大。这里则近似地用下式表示

$$v = 0.5 - \frac{0.5 - v_0}{\lambda^*} \tag{5}$$

式中, v_0 为弹性区域的泊松比。当 $\lambda^* = \lambda/\lambda_0 = 1$ 时, 则有 $v = v_0$ 。上式与体积变化率相一致。

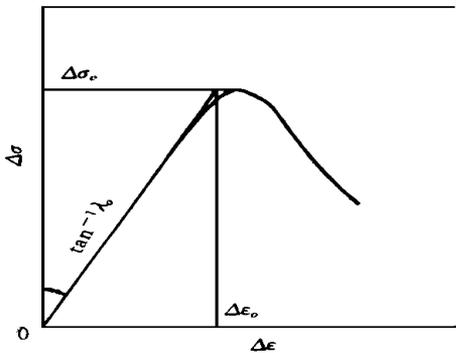


图 1 符号说明示意图

Fig. 1 Symbols for normalization

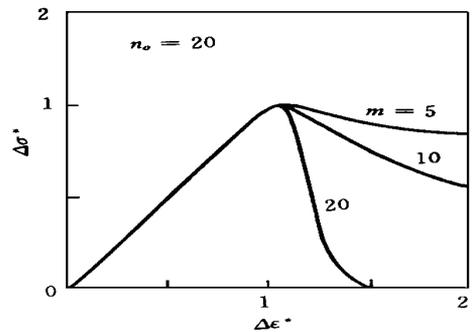


图 2 计算所得的单轴压缩的应力-应变曲线

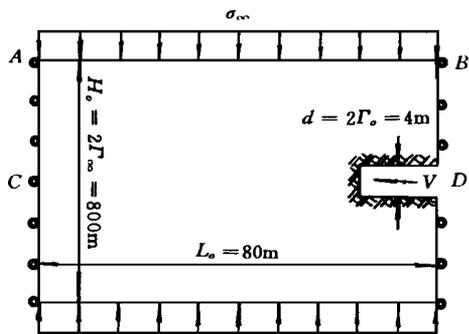
Fig. 2 Calculated stress-strain curves in uniaxial compression

$$m/n_0 = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, (n_0, \dot{\epsilon} \text{ 为一定})$$

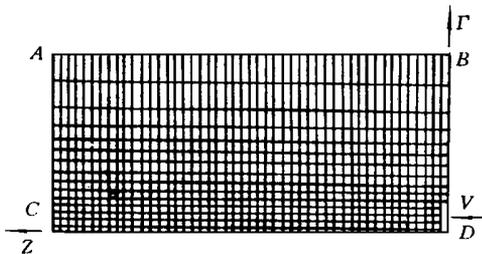
这里所述的岩石力学模型, 对岩石试验的模拟情况以及解析与讨论可见文[13], 相关要点可简单归纳为: 定应变速度试验的单轴压缩强度与应变速度 $\dot{\epsilon}$ 的 $1/(n_0 + 1)$ 次方成正比。如图 2 所示, m/n_0 的值越大, 破坏强度点以后应力的降低越迅速。蠕变试验寿命则与蠕变应力的 n 次方成反比。三轴压缩试验的强度随围压的增加而增加, 破坏强度点以后应力的下降也比较缓慢。

3 隧洞模型与计算方法

隧洞开挖模型如图 3 所示, 假定隧洞为全断面开挖圆形隧洞, 围岩为均质各向同性材料, 模型外边界承受轴对称围岩压力作用。图 3(a) 中的上半部分 $ABCD$ 作为计算对象, 可如图 3(b) 所示划分成 1600 个四边形单元, 作为空间轴对称问题进行有限元计算。隧洞直径 $d = 4\text{m}$, 模型外径 $H_o = 800\text{m}$, 长度 $L_o = 80\text{m}$ 。计算所需初值分别为: 单轴压缩强度 $\sigma_c = 20\text{MPa}$, 单轴拉伸强度 $\sigma_t = 2\text{MPa}$, 初期模量 $\lambda_0 = 0.5\text{GPa}^{-1}$, 泊松比 $\nu_0 = 0.2$, 围岩压力 $\sigma_r = 10\text{MPa}$ 。



(a) 隧洞纵剖面



(b) 单元划分图

图 3 隧洞模型与单元划分

fig 3 Calculating model and division of elements

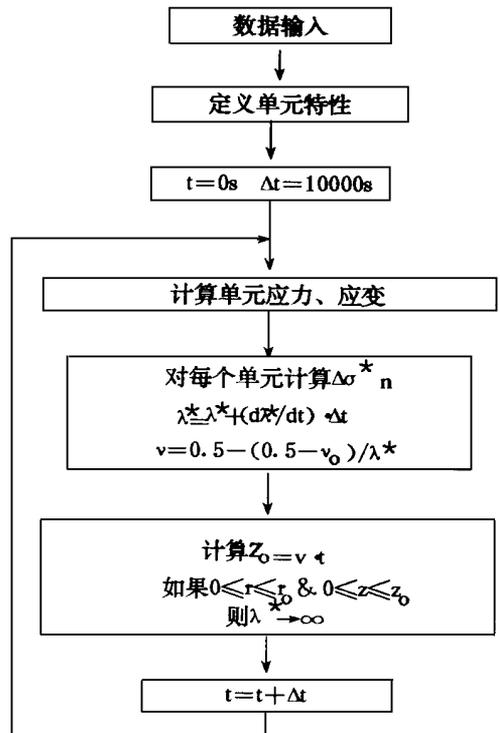


图 4 计算机流程图

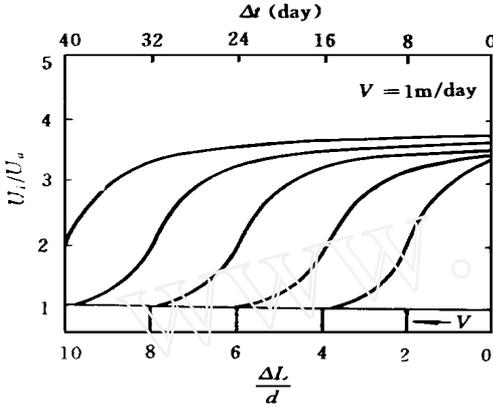
Fig 4 Flow chart for calculation

图 4 为计算程序框图。隧洞开挖开始时刻记为时间零点 $t = 0$ 。其中开挖速度为 v , 开挖长度的计算由 $z_0 = v \cdot t$ 给出。围岩内, 开挖掉的部分则用 λ^* (即 λ^* 取大值, 相当于杨氏模量赋 0 值) 来模拟。时间步长 Δt 可以根据单元的划分和开挖速度的快慢作相应的调节。具体计算步骤可分为: 第一步输入必要的参数, 对各单元赋予初始值。第二步通过有限单元法求解各单元的应力、应变。第 3 步则按下列顺序计算下次循环中第 2 步所需的各参数值。

将 $\Delta\sigma^*$ 代入式(1), 计算时间步长 Δt 内 λ^* 的增量 $\Delta\lambda^*$, 并将各单元赋予新的 λ^* 值; 按

式(4)计算 n ，由式(5)计算泊松比 ν ，然后同样赋值于各单元，供下次循环中的第二步所用。

第三步完成后，输出必要的数数据，并回到第二步。



$$(n_o = 20, m = 10, \Delta L = v \cdot \Delta t)$$

图5 洞周位移随开挖面推进的变化

Fig 5 Convergence variation with face advancing

2.0 m/d, 4.0 m/d, $m/n_o = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1$ 和 $n_o = 20, 30, 40$ 时的计算结果。横坐标表示离开开挖面的距离，纵坐标表示洞周位移。图中虚线为弹性计算结果。

由图6可以看出，开挖速度较快时，离开开挖面距离相同位置的洞周位移较小，即非线性变形较小。图中的弹性计算结果不受 m/n_o 和 n_o 值的影响，但非线性粘弹性计算结果则与 m/n_o 和 n_o 相关。 m/n_o 的值越大，洞周位移越大；而 n_o 的值越大，位移则越小。该结果与洞周位移随时间变化的计算结果^[11]相一致。另外，开挖速度的影响程度也同样与 m/n_o 和 n_o 有关。当 m/n_o 增大时，开挖速度的影响增加，而当 n_o 增大时，则开挖速度的影响减小。

以上是开挖面附近洞周围岩的变形计算结果。图7给出了开挖面附近洞周围岩内破坏区域的计算结果。本文把从洞壁至切向应力 σ_θ 取得最大值位置的区域称作破坏区域。

定性地说，开挖速度 v 对破坏区域的影响，以及 m/n_o 和 n_o 值对破坏区域的影响，与洞周位移的计算结果相一致。开挖速度越快，破坏区域半径 r_f 越小。 m/n_o 的值越大，破坏区域半径 r_f 越大，开挖速度的影响程度也越大；而 n_o 的值越大，则破坏区域半径越小，开挖速度的影响程度也越小。该结果与二维有限元的计算结果^[11]相吻合。

另外，由隧洞开挖面附近围岩的应力分布的计算还可以知道，靠近开挖面，围岩应力分布随时间的变化很小，与弹性的计算结果十分相近。其原因在于，开挖面近旁的围岩，其主应力差 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ 相对比较小，由式(1)可知，模量 λ^* 随时间的变化就很小。远离开挖面的围岩 ($L > 2d$)，其应力分布的计算结果与二维有限元的计算结果基本相同。

4 计算结果

图5为隧洞开挖过程中，开挖面附近洞周围岩变形的计算结果，横座标为对隧洞直径 d 无量纲化的开挖长度 ΔL ，纵座标为对初始位移 u_0 (开挖前围压作用下的洞周位移) 无量纲化的洞周位移 u_i 。图中还标出了不同时刻开挖面所到达的位置，其中，开挖速度 $v = 1.0 \text{ m/d}$, $n_o = 20, m = 10$ 。从该图可以看出，开挖面推进到不同位置时，沿开挖方向洞周位移变化曲线的形状基本相同。从开挖掉的部分来看，靠近开挖面洞周位移较小，远离开挖面的部分位移较大。开挖面的影响比较明显，其影响范围约为 $\pm 2d$ 。

图6表示开挖速度分别为 $v = 1.0 \text{ m/d}$,

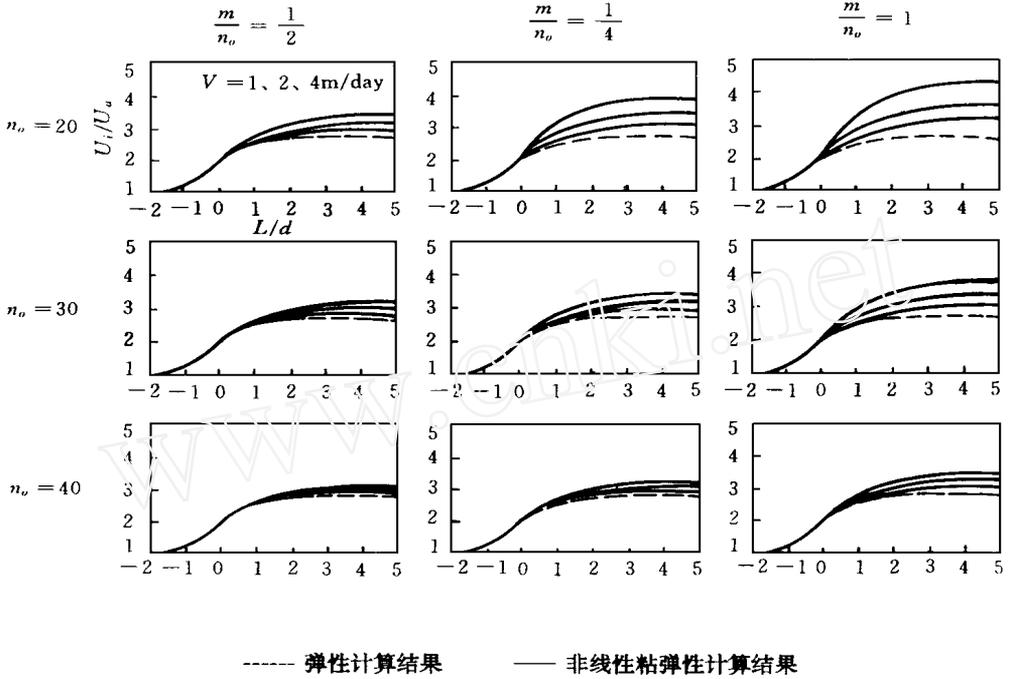


图 6 开挖面、开挖速度和参数 m/n_0 、 n_0 对洞周位移的影响

Fig. 6 Convergence variation with distance from face and the effects of advancement rates, m/n_0 and n_0 .

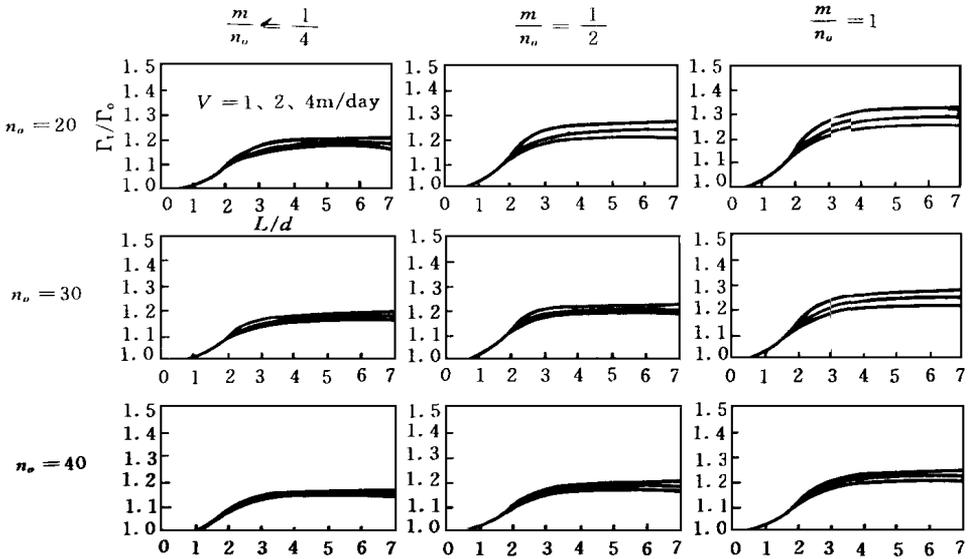


图 7 开挖面、开挖速度和参数 m/n_0 、 n_0 对破坏区域的影响

Fig. 7 Variation of failed region with distance from face and the effects of advancement rates, m/n_0 and n_0 .

5 讨论与结语

5.1 开挖面的影响

考虑开挖面的影响,是本文三维有限元计算与二维有限元计算^[11]的主要区别之一。由上述计算结果的分析可知,开挖面的影响范围约为 $\pm 2d$ 。该结果与以往的计算结果^[1,2,5]相一致,与实测结果相比较,定性地相吻合。例如, Sulem 等^[14]的实测结果,如图 8 所示,洞周位移随开挖面的推进而逐渐增加,当开挖面推进到 $2G_{in}$ 左右(约为隧洞幅宽的 2 倍)时,洞周位移的增加就显得比较缓慢,其中平均开挖速度约为 $3.2m/d$ 。图 9 为绪方等^[15]的实测结果,该结果也表明,开挖面的影响范围为 $\pm 2d$ 左右。

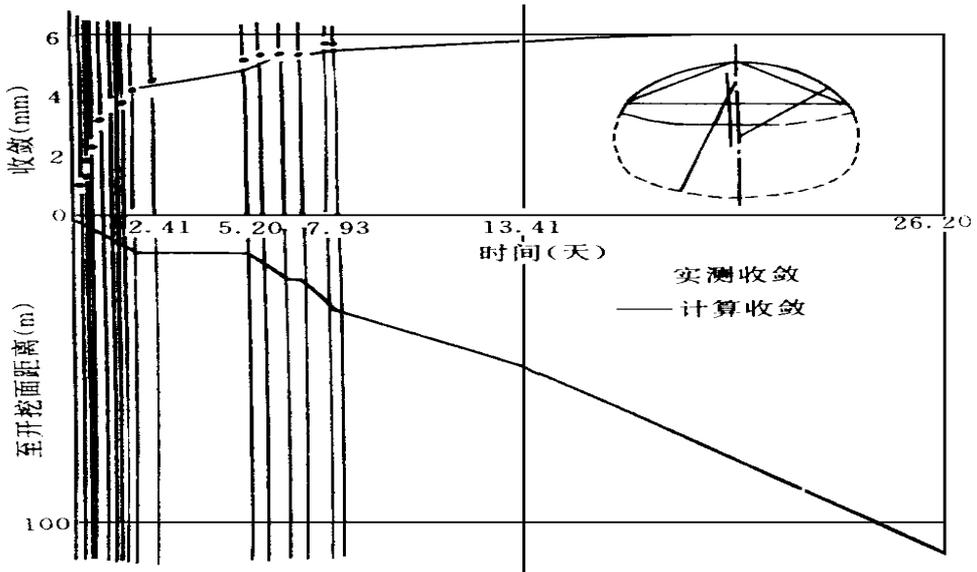


图 8 Las Planas 隧洞的实测位移结果

Fig 8 Measured convergences of Las Planas tunnel

5.2 开挖速度的影响

考虑开挖速度的影响,是本文与以往研究的另一个不同点。本文应用非线性粘弹性力学模型,对开挖速度的影响进行了计算分析。计算结果表明,开挖速度越快,开挖面附近洞周围岩的非弹性变形越小。该结果可以从围岩变形的时间效应角度来进行解释。例如,开挖速度分别为 $v_1 = 1.0m/d$, $v_2 = 4.0m/d$ 两种情况,当开挖面推进距离 $L = 2d = 8m$ 时,原先开挖面所在位置洞周围岩变形经历的时间则分别为 $L/v_1 = 8d$ 和 $L/v_2 = 2d$,其差为 $6d$ 。由洞周围岩变形随时间增长而增加的计算结果^[11]可知,在短期间内(譬如一周至二周), $6d$ 之差所引起的变形之差将是比较明显的,尤其是当 m/n_0 的值较大时,则更为显著。然而,随着时间的增长,开挖速度对洞周变形的影响将逐渐减小,一个月或二个月以后,

6d 导致的差异就相对变小了。也就是说, 开挖速度的影响在短期内是明显的, 但在经历一定长时间后, 其影响会逐渐减小, 以致可以不予考虑。该结果与 Pan 等^[7,8]的计算结果相一致。

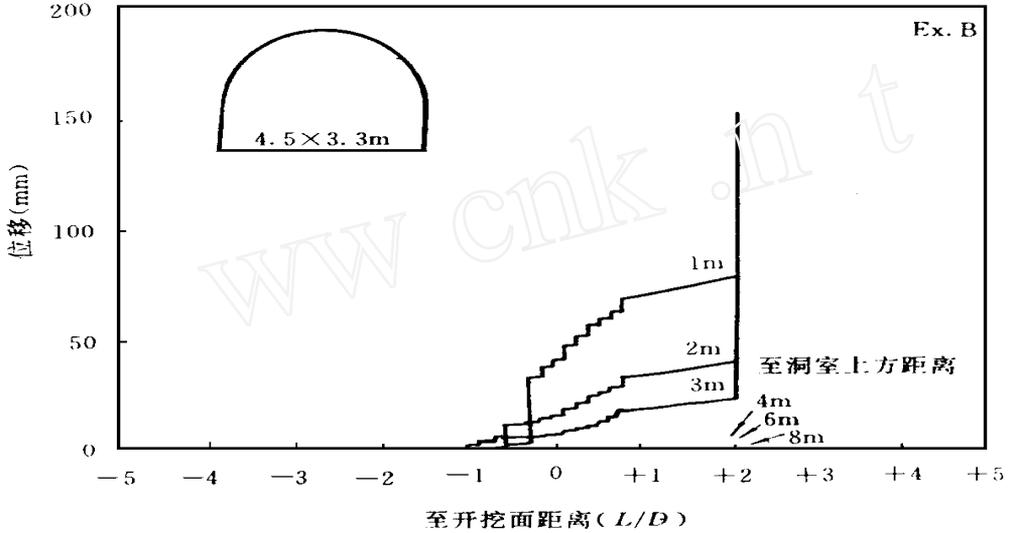


图 9 日本松峰矿山试验隧洞测得的顶部围岩垂直位移结果

Fig 9 Vertical displacement in roof rock measured by experimental tunnel in Matsumine mine (Japan)

本文应用非线性粘弹性模型, 对隧洞的开挖过程进行了模拟计算, 计算结果与实测结果相比较, 定性上相一致。定量上来说, 因本文没有考虑围岩中实际存在的非均质性、各向异性和非连续性等现象, 故难免存在差异之处, 有待今后进一步的研究和探讨。

参 考 文 献

- 1 大西有三, 岸本英明: トンネル切羽进行の影響を近似的に考慮した二次元有限要素解析. トンネルと地下, 1980; 11: 859- 864
- 2 足立纪尚, 矢野隆夫: トンネル掘削を伴う地山変位計測結果の簡易解析法. 日本土木学会论文集, 1987; 388: 207 - 216
- 3 平岛健一, 川上哲太郎, 藤原纪夫, 力间俊行: 弾性严密解に基づく段階掘削を考慮した素掘任意形状トンネル問題の順解析および逆解析. 日本土木学会论文集, 1991; 439: 17- 26
- 4 门田俊一: 三次元境界要素法による地盘掘削解析手法を关する研究. 日本土木学会论文集, 1990; 418: 133- 142
- 5 山富二郎, 茂木源人, 山下秀, 山口梅太郎: 切羽の持つ3次元的な支保効果について. 日本资源素材学会, 研究・业绩发表讲演要旨集, 1990; 81- 82
- 6 Pan X. D. & Hudson J. A. : Technical note, plane strain analysis in modelling three-dimensional tunnel excavations. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1988; 25: 331- 337
- 7 Pan Y. W. & Dong J. J. : Time-dependent tunnel convergence I, formulation of the model. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1991; 28: 469- 475
- 8 Pan Y. W. & Dong J. J. : Time-dependent tunnel convergence II, advance rate and tunnel-support interaction. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1991; 28: 477- 488

- 9 大久保诚介, 何昌荣, 西松裕一: 一轴压缩应力下における时间依存性挙動 日本矿业会志, 1987; 103: 177- 181
- 10 大久保诚介, 西松裕一, 绪方羲弘: 非线性粘弹性たずける坑道変形のシミュレーション. 日本矿业会志, 1987; 103: 293- 296
- 11 大久保诚介, 金丰年: 非线性粘弹性モデルたよみ丹形坑道周边盘挙動のシミュレーション. 日本资源素材学会志, 1993; 109: 209- 214
- 12 Janach W: Failure of granite under compression. Int J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 1977; 14: 209- 215
- 13 金丰年: 岩石的时间效应 同济大学博士学位论文, 1993
- 14 Sulem J., Panet M. & Guenot A.: An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel. Int J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 1987; 24: 155- 164
- 15 绪方羲弘, 富岛康夫, 大久保诚介, 西松裕一: 软弱岩盘内の坑道天盤の掘进た伴 j 変形の计測 日本资源·素材学会志, 1993; 109: 171- 178

SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL TUNNEL EXCAVATIONS

Jin Fengnian Qian Qihu

(Nanjing Engineering Institute, Nanjing 210007)

Abstract A nonlinear visco-elastic model has been applied to simulate the three-dimensional tunnel excavations. By modelling the excavations of tunnel, the effects of advancing face and advancing rate are investigated. It is found that the distance of influence of tunnel face is about 2 times of the diameter of tunnel, which is as same as the results of field measurement. The influence of advancing rate can be well explained by the time-dependent behaviour of rock.

Key words tunnel excavation, nonlinear visco-elastic model, finite element calculation

第四次全国岩石力学与工程学术大会在金昌举行

题为“面向 21 世纪的岩石力学与工程”的第四次全国岩石力学与工程学术大会于今年 7 月 22 日—26 日在甘肃省金昌市召开。这次会议由中国岩石力学与工程学会主办, 金川有色金属公司承办。来自全国各地的 300 名代表出席了会议, 会议就岩石力学性质试验研究、地表与地下岩石工程、岩石力学数值分析及理论探索等专题进行了交流。会议安排现场参观与考察, 并就若干热点问题组织了讨论, 许多代表根据自己的经验与体会发表了不尽相同的意见。会议论文集由中国科学技术出版社出版。

中国岩石力学与工程学会第三届第三次理事会在会议期间召开, 就学会工作中的若干重要问题进行了研究。

(王可钧供稿)