

非线性准则下隧道围岩响应的理论和数值分析

钟正强^{1,2}, 彭振斌¹, 彭文祥¹

1. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083
2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙 410114

摘要 采用 Hoek-Brown 非线性准则描述岩土破坏特征更能反映岩体固有特点和非线性破坏特征, 以及岩石强度、结构面组数、所处应力状态对岩体强度的影响。首先, 通过理论分析, 得到了围岩开挖后应力和变形情况; 然后, 利用数值计算软件, 建立了 Hoek-Brown 准则下隧道的数值计算方法和计算模型, 分析了隧道在开挖情况下的应力变形情况, 得到围岩的径向应力、切向应力、剪应变分布、塑性区分布和位移情况, 并将数值计算结果与理论计算结果进行对比, 结果表明: ① 隧道开挖引起岩体的扰动, 使其从平衡状态转为不平衡状态。随着时间的推移, 不平衡力逐渐在岩体中消散均化, 岩体的扰动逐渐减小, 最终趋于平衡。② 数值解均略大于理论解, 但二者差别十分微小, 从而验证了数值方法的正确性。

关键词 非线性准则; 隧道; 围岩; 理论分析; 数值分析

中图分类号 U451

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)20-0050-05

Theoretical and Numerical Analysis of the Response of Rock Mass Surrounding Tunnel Based on the Nonlinear Failure Criterion

ZHONG Zhengqiang^{1,2}, PENG Zhenbin¹,
PENG Wenxiang¹

1. School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Department of Architecture and Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Abstract The Hoek-Brown nonlinear criterion is used to describe the nonlinear failure characteristics of rock mass. The effect of rock strength, structure plane characteristics and stress state on the rock mass strength is studied. In the theoretical analysis, the stress and the deformation of the rock mass are obtained. The numerical calculation method and the calculation model of tunnel based on the Hoek-Brown criterion are established and used to numerically study

the stress and deformation in the rock mass surrounding the tunnel after excavation. A comparison is made between the theoretical results and the numerical results, for the radial stress, tangential stress, shear strain distribution, plastic zone distribution and the displacement, with the following conclusions. (1) The excavation of tunnel will cause the disturbance of the surrounding rock mass, turning the equilibrium state into a non-equilibrium state. With time, the unbalanced force will be dissipated to the rock mass and the disturbance in the rock mass will become smaller and finally the state of equilibrium is returned. (2) The results from the numerical analysis is larger than those of theoretical analysis, but the differences is small.

Keywords nonlinear criterion; tunnel; surrounding rock mass; theoretical analysis; numerical analysis

0 引言

隧道开挖引起围岩发生应力重新分布而导致的洞周变形, 实际上是一个长期的过程。围岩变形过程中, 不仅岩体的形状和内部结构不断发生变化, 其应力状态也随之不断调整, 并引起能量的积存和释放等效应^[1], 期间涉及的时空效应较为复杂。许多学者对隧道开挖后的应力和变形响应进行了分析^[2-5], 这些研究主要基于 Mohr-Coulomb 等线性破坏准则, 较少考虑非线性破坏准则, 如 Hoek-Brown 准则。采用非线性

收稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介: 钟正强, 副教授, 研究方向为隧道稳定性分析与评价, 电子信箱: zqcslg@126.com

破坏准则描述岩体更能反映岩体固有特点和非线性破坏特征,以及岩石强度、结构面组数、所处应力状态对岩体强度的影响^[6-7]。因此,一些学者也采用 Hoek-Brown 准则描述岩土特征^[8-13],如文献[11]基于非线性 Hoek-Brown 破坏准则,对均质各向同性的岩石介质建立岩石极限分析非线性理论;文献[12]推导了 Hoek-Brown 准则与 Mohr-Coulomb 准则的关系,得到边坡强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用。这些研究主要从理论方面对 Hoek-Brown 准则进行探讨,但目前对于该准则下数值计算方法的讨论还较少,因此,本文首先分析了 Hoek-Brown 准则下隧道的数值计算方法和计算模型,分析了隧道在开挖情况下的应力变形情况,并将得到的结果与理论分析结果进行对比,验证数值计算方法的可靠性。

1 理论分析

在求解围岩开挖后的位移场时,为了不使所建立的模型和求解过程过于复杂,本文采用以下基本假设。

- 1) 隧道围岩为均质各向同性的连续介质。
- 2) 隧道断面为圆形,隧道具有足够长度,问题可简化为平面应变问题处理;同时,不考虑重力梯度的影响。
- 3) 在弹性变形阶段,弹性变形服从胡克定理;在塑性变形阶段,隧道围岩服从塑性小应变理论,流动法则为非关联流动法则。

隧道的开挖施工过程可模拟为径向应力 σ_r 逐步释放减小、切向应力 σ_θ 不断增大的过程^[14],直到围岩发生剪切破坏。设隧道的开挖半径为 b ,塑性区半径为 b_{pl} ,如图 1 所示。当外荷载较小时只存在弹性区,随着外荷载的增加, σ_r 与 σ_θ 不断发生变化,达到塑性状态。在塑性区之外是弹性区,根据应力连续性,在塑性区与弹性区接触面上,位于塑性区一侧的径向、切向应力分别与弹性区一侧的径向、切向应力相等。

Carranza-Torres 和 Fairhurst 理论分析了 Hoek-Brown 准则情况下,隧道围压的应力和变形分布^[15-16],其引入表观远场应力 σ_0 和表观隧道内压力 P_i :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_0}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (1)$$

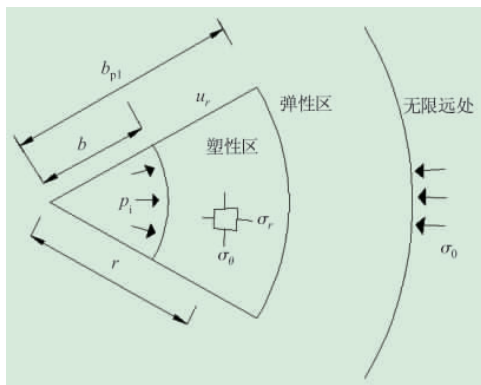


图 1 隧道围岩受力图

Fig. 1 Stress in the rock mass surrounding the tunnel

$$P_i = \frac{P_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (2)$$

式中, σ_{ci} 为完整岩石单轴抗压强度; m_b 为岩体常数,与完整岩石的岩体常数 m_i 有关; s 为取决于岩体特性的系数;这些参数均可表述为地质强度指标 GSI 的函数,具体形式如下^[6]:

$$m_b = m_i \exp[(GSI-100)/(28-14D)] \quad (3)$$

$$s = \exp[(GSI-100)/(9-3D)] \quad (4)$$

式中, D 为岩体弱化因子,与岩体的开挖方式和扰动程度有关,取值为 0~1,0 代表未扰动状态。

当隧道围岩达到极限状态时,其模型对应的表观极限内压力 P_i^α 为

$$P_i^\alpha = \frac{1}{16} (1 - \sqrt{1+16S_0})^2 \quad (5)$$

而实际内压力 P_i^w 为

$$P_i^w = \left(P_i^\alpha - \frac{s}{m_b^2} \right) m_b \sigma_{ci} \quad (6)$$

当 $P_i < P_i^w$ 时,隧道围岩处于弹性阶段,可得到其塑性区半径为

$$b_{pl} = b \exp[2(\sqrt{P_i^\alpha} - \sqrt{P_i})] \quad (7)$$

在塑性区范围 $r \leq b_{pl}$ 内,隧道围岩的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 可表示为

$$\sigma_r(r) = \left(S(r) - \frac{s}{m_b^2} \right) m_b \sigma_{ci} \quad (8)$$

$$\sigma_\theta(r) = \left(S_\theta(r) - \frac{s}{m_b^2} \right) m_b \sigma_{ci} \quad (9)$$

式中,

$$S(r) = \left[\sqrt{P_i^\alpha} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r}{b_{pl}} \right) \right]^2 \quad (10)$$

$$S_\theta(r) = S(r) + \sqrt{S(r)} \quad (11)$$

当 $r > b_{pl}$ 时,隧道围岩处于弹性区,此时有

$$\sigma_r(r) = \sigma_0 - (\sigma_0 - P_i^\alpha) \left(\frac{b_{pl}}{r} \right)^2 \quad (12)$$

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_0 + (\sigma_0 - P_i^\alpha) \left(\frac{b_{pl}}{r} \right)^2 \quad (13)$$

对于非关联流动法则,即膨胀角 $\psi=0$,此时围岩的径向位移 u_r 为

$$\begin{aligned} \frac{u_r}{b} \frac{2G}{\sigma_0} = & \left(1 - \frac{P_i^\alpha}{\sigma_{ci}} \right) \left[\frac{b_{pl}}{b} \frac{A_1+1}{A_1-1} \frac{r}{b_{pl}} + \frac{D}{2(S_0-P_i^\alpha)(1-A_1)^3} \left(\frac{r}{b_{pl}} \right)^{A_1} - \right. \\ & \frac{2}{A_2-1} \left(\frac{r}{b_{pl}} \right)^{A_1} + \frac{C}{4(S_0-P_i^\alpha)(1-A_1)} \frac{r}{b_{pl}} \left(\ln \frac{r}{b_{pl}} \right)^2 + \\ & \left. \frac{D}{2(S_0-P_i^\alpha)(1-A_1)^3} \frac{r}{b_{pl}} \left(\ln \frac{r}{b_{pl}} - A_1 \ln \frac{r}{b_{pl}} - 1 \right) \right] \quad (14) \end{aligned}$$

式中, $A_1 = -K_\psi$, $A_2 = 1 - \mu - \mu K_\psi$, $A_3 = \mu - (1 - \mu) K_\psi$, $C = A_2 - A_3$

$D = A_2 [2(1-A_2)\sqrt{P_i^\alpha} - 1] - A_3 [2(1-A_1)\sqrt{P_i^\alpha} - A_1]$, $K_\psi = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$, ψ 为膨胀角, G 为剪切模量, μ 为泊松比, b 为隧道半径。

2 数值计算方法

2.1 数值计算模型

某圆形隧道半径 $b=5$ m, 远场应力 $\sigma_0=30$ MPa, 支护应力为 $P_i=5$ MPa。采用 Hoek-Brown 准则描述岩体破坏特征, 围岩参数为: 剪切模量 $G=2.20$ GPa, 体积模量 $K=3.667$ GPa, 密度 $2\ 000$ kg/m³, $m_b=1.7$, $s=0.0039$, 完整岩石的单轴压缩强度为 30 MPa。利用 FLAC3D^[17] 建立平面应变计算模型, 如图 2 所示, 模型尺寸为 $40\text{ m}\times 40\text{ m}\times 1\text{ m}$, 单元数为 $6\ 400$, 节点数为 $7\ 442$ 。模拟过程中, 首先建立隧道模型, 施加边界条件和物理力学参数, 然后添加初始地应力, 模拟岩体在初始地应力情况下的平衡, 最后进行隧道开挖。隧道开挖采用全断面开挖法, 当毛洞形成时, 开挖荷载释放 50% ; 当喷混凝土和锚杆施工时, 30% 的开挖荷载作用在支护和围岩上; 当二次衬砌施工时, 再将剩余的 20% 开挖荷载释放完毕。

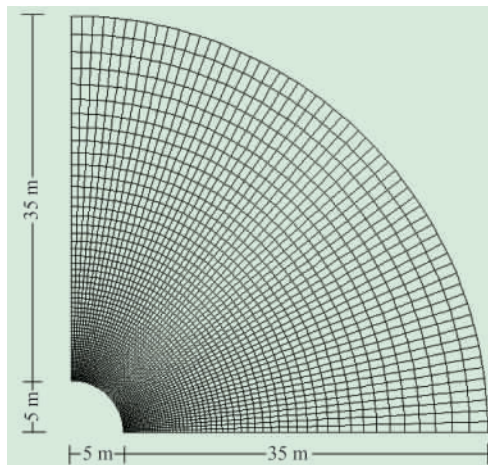


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

2.2 Hoek-Brown 准则的数值实现

Hoek-Brown 破坏经验判据的表达式为^[6-7]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b \sigma_3 \sigma_3 + s \sigma_3^2)^{0.5} \quad (15)$$

式中, σ_1 为岩体破坏时的最大主应力, σ_3 为作用在岩体上的最小主应力。

数值计算过程中, 首先采用弹性增量理论, 应力增量和变形增量为

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta \varepsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_2^e + \Delta \varepsilon_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta \varepsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1^e + \Delta \varepsilon_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta \varepsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1^e + \Delta \varepsilon_2^e) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\alpha_1 = K + 4G/3$; $\alpha_2 = K - 2G/3$; K 为体积模量; G 为剪切模量; $\Delta \varepsilon_i^e$ 为 i 方向的弹性应变增量; $i=1, 2, 3$, 表示 3 个主应力方向。

由弹性增量理论可得估算应力分量为

$$\sigma_i^1 = \sigma_i^0 + \Delta \sigma_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (17)$$

式中, σ_i^0 为初始应力。

然后, 根据塑性状态下的应变增量为弹性应变增量与塑性应变增量之和, 推导新的应力分量 $\sigma_1^N, \sigma_2^N, \sigma_3^N$:

$$\begin{aligned} \sigma_1^N - \sigma_1^0 &= \alpha_1 (\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_1^p) + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_3^p) \\ \sigma_2^N - \sigma_2^0 &= \alpha_1 \Delta \varepsilon_2 + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_1^p + \Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_3^p) \\ \sigma_3^N - \sigma_3^0 &= \alpha_1 (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_3^p) + \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_1^p) \end{aligned} \quad (18)$$

联立式(16)~式(18)得

$$\begin{aligned} \sigma_1^N &= \sigma_1^1 - \alpha_1 \Delta \varepsilon_1^p - \alpha_2 \Delta \varepsilon_3^p \\ \sigma_2^N &= \sigma_2^1 - \alpha_2 (\Delta \varepsilon_1^p + \Delta \varepsilon_3^p) \\ \sigma_3^N &= \sigma_3^1 - \alpha_1 \Delta \varepsilon_3^p - \alpha_2 \Delta \varepsilon_1^p \end{aligned} \quad (19)$$

对位于屈服面上的应力点, 满足屈服函数

$$f = \sigma_1^N - \sigma_3^N - \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3^N}{\sigma_{ci}} + s \right)^a = 0 \quad (20)$$

3 计算结果与讨论

3.1 不平衡力规律

计算过程中不平衡力指标能够反映岩体受扰动程度, 从最大不平衡力的监测图(图 3)中可以看出, 只存在 1 个峰值, 对应的不平衡力为 291.6 kN, 然后最大不平衡力从峰值回落, 逐渐减小, 最终趋近于零。说明隧道开挖引起岩体的扰动, 使其从平衡状态转为不平衡状态, 随着时间的推移, 不平衡力逐渐在岩体中消散均化, 使岩体的扰动逐渐减小, 最终趋于平衡。

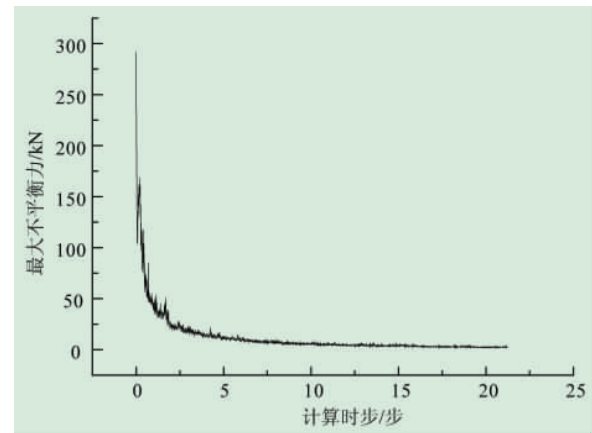


图 3 最大不平衡力

Fig. 3 The maximum unbalanced force

3.2 应力对比

利用式(12)、式(13)计算隧道围岩的径向应力和切向应力, 在数值模型中设置监测线, 以隧道中心为原点, 其与水平线的夹角为 45° , 对比监测线上应力和位移的数值解与理论解的结果, 如图 4 所示。从中可以看出, 当 $r/b < 1.60$ 时, 隧道围岩的径向和切向应力与理论得到的结果符合较好; $r/b > 1.60$ 后, 隧道围岩的径向和切向应力比理论得到的结果略大, 即塑性区范围内二者得到的结果比较相符, 而弹性区范围内数值解显得略大。

3.3 位移对比

利用式(14)计算隧道围压的径向位移, 图 5 显示围岩径

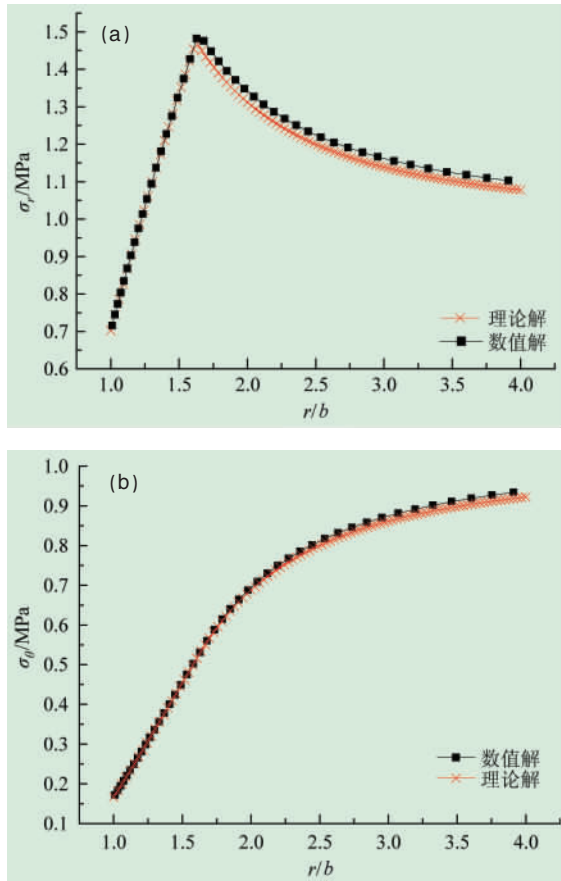


图4 围岩径向应力(a)和切向应力(b)与 r/b 的关系
Fig. 4 Radial stress (a), tangential stress (b) in the rock mass surrounding the tunnel against r/b

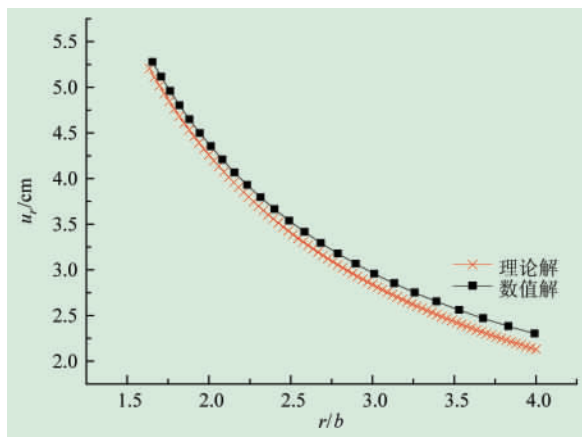


图5 围岩径向位移与 r/b 的关系
Fig. 5 Radial displacement of the rock mass surrounding the tunnel against r/b

向位移和 r/b 的关系。从中可以看出,随着监测点位置远离隧道,即 r 越来越大,围岩的径向位移越来越小,并且二者之间的关系呈现显著的非线性特征。数值解得到的结果略大于理论解的结果,这是由于数值解的精确度受到计算网格大小的影响,以及其自身计算过程中产生的误差造成的。

在开挖面附近,由于开挖面的空间约束效应,围岩位移逐步释放,其水平和竖直位移云图如图6所示。从中可以看出,由于受到水平应力的影响,隧道最大水平位移位于边墙的中下部,数值为 5.17 cm;最大竖直位移出现在隧道顶部,其数值为 5.19 cm;隧道开挖对水平位移和竖直位移均存在一定的影响,大约在 3 倍隧道半径范围内。

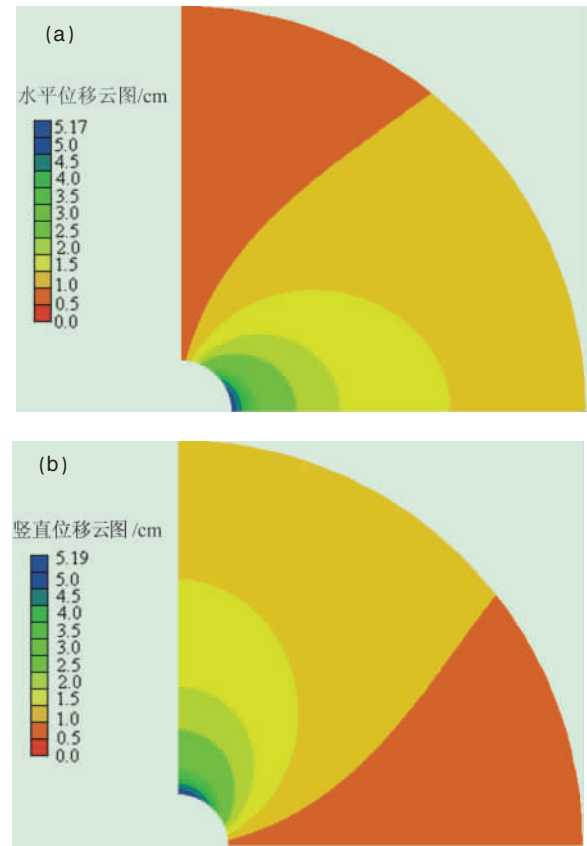


图6 围岩水平位移(a)和竖直位移(b)分布
Fig. 6 Distribution of horizontal (a) and vertical (b) displacement in the rock mass surrounding the tunnel

3.4 塑性区分布

对于隧道工程,不管是哪种洞室形状,等效塑性应变贯通全断面时,围岩并没有达到破坏状态,而是在围岩塑性区中塑性应变发展到一定程度时,才在围岩中形成潜在的破坏面,围岩达到破坏状态。根据文献[18]的研究,围岩破坏时会产生无限发展的塑性变形和位移,其位移和塑性应变的大小没有限制,岩体沿破坏面发生无限流动,破坏面上的塑性变形和位移会产生突变。图7为围岩剪应变增量,图8为隧道围岩塑性区分布。可以看出,隧道开挖面上的剪应变最大,其值为 1.30×10^{-2} 。隧道围岩周围存在一圈显著的塑性破坏区域,形状为圆弧形,可得到塑性区半径为 8.27 m,而理论分析得到的结果显示塑性区半径为 8.2 m,二者基本相等。

4 结论

1) 采用 Hoek-Brown 准则描述隧道围岩的破坏特征,并

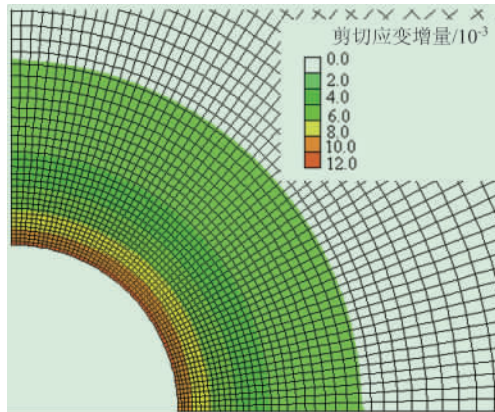


图 7 围岩剪应变增量

Fig. 7 Distribution of shear strain increment in the rock mass surrounding the tunnel

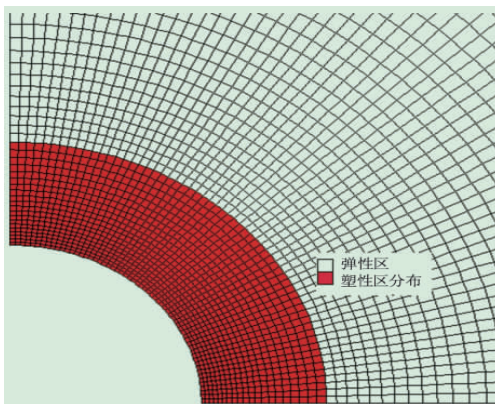


图 8 隧道围岩塑性区分布

Fig. 8 Distribution of plastic zone in rock mass surrounding the tunnel

理论分析了围岩开挖后应力和变形情况。

2) 通过 FLAC3D 建立了隧道开挖的数值计算模型,分析 Hoek-Brown 准则下,隧道围岩的径向位移、切向位移、剪应变分布、塑性区分布和位移情况,并与理论结果进行对比,结果表明:数值解均略大于理论解,但二者差别非常微小。

参考文献 (References)

- [1] 李晓红, 李登新, 靳晓光, 等. 初期支护对软岩隧道围岩稳定性和位移影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1207-1210.
Li Xiaohong, Li Dengxin, Jin Xiaoguang, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1207-1210.
- [2] Liu H Y, Small J C, Carter J P, et al. Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(5): 880-894.
- [3] Amorosi A, Boldini D. Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(6): 1059-1072.
- [4] Fahimifar A, Ranjbaria M. Analytical approach for the design of active grouted rockbolts in tunnel stability based on convergence-confinement

method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 363-375.

- [5] Arjoui P, Jeong J H, Kim C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(4): 376-389.
- [6] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 34 (8): 1165-1186.
- [7] Yang Xiaoli, Yin Jianhua. Slope stability analysis with nonlinear failure criterion[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(3): 267-273.
- [8] Yang Xiaoli, Li Liang, Yin Jianhua. Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28 (2): 181-190.
- [9] Yang Xiaoli, Yin Jianhua. Linear Mohr-Coulomb strength parameters from the nonlinear Hoek-Brown rock masses [J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2006, 41(8): 1000-1005.
- [10] Yang Xiaoli, Yin Jianhua. Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42 (4): 550-560.
- [11] 杨小礼. 岩石极限分析非线性理论及其应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(1): 225-229.
Yang Xiaoli. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2009, 40(1): 225-229.
- [12] 林杭, 曹平, 赵延林, 等. 强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1219-1224.
Lin Hang, Cao Ping, Zhao Yanlin, et al. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2007, 38(6): 1219-1224.
- [13] 钟正强, 彭振斌, 彭文祥. 基于非线性破坏准则的岩体剪切强度参数确定方法[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 64-66.
Zhong Zhengqiang, Peng Zhenbin, Peng Wenxiang. *Science & Technology Review*, 2009, 27(15): 64-66.
- [14] 罗清明, 李亮, 杨小礼. 软岩隧道的围岩变形计算 [J]. 长沙铁道学院学报, 2003, 21(2): 15-19.
Luo Qingming, Li Liang, Yang Xiaoli. *Journal of Changsha Railway University*, 2003, 21(2): 15-19.
- [15] Carranza-Torres C, Fairhurst C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(6): 777-809.
- [16] Carranza-Torres C, Fairhurst C. Application of the Convergence-Confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(2): 187-213.
- [17] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-dimensions), version 2.1[R]/User's Manual. 2002.
- [18] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97-102.
Zhang Liming, Zheng Yingren, Wang Zaiquan, et al. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 97-102.

(责任编辑 代丽)