

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.031

隧洞支护效应的探讨

张虎元¹, 孙 逊¹, 秦 佳²

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院; 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要:基于弹性理论,对隧洞开挖后和进行喷锚支护后的应力和塑性变形进行分析。运用FLAC^{3D}模拟了隧道开挖与支护过程中的力学行为,得到隧道在无支护和喷锚支护作用下围岩的塑性及应力变形情况。结果表明,在喷锚支护中,对锚杆施加预应力,其值为当隧道塑性区消失时所需支护力的大小。这种支护提高了围岩的自承能力,使围岩塑性区的扩展在隧道开挖不久就得到有效抑制,能有制止隧道围岩的进一步破坏。

关键词:隧道工程; 喷锚支护; 塑性变形

中图分类号:U451 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0121-03

Study of Tunnel Supporting Effect

Zhang Fuyuan¹, Sun Xun¹, Qin Jia²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics; Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;

2. College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract:Based on the elastic theory, an analysis can be made on stress and plastic deformation under tunnel excavation and shotcrete support. FLAC^{3D} can be used to simulate the mechanical behavior of excavation and support, getting the deformation of surrounding rock stress and plastic without support and shotcrete. The results show that, the prestress applied on the anchor equals to the supporting force when the tunnel plastic zone disappears. This support improves the self bearing capacity of surrounding rock, effectively suppresses the expansion of the plastic zone after the tunnel excavation, and prevents further damage to the tunnel surrounding rock.

Key words: Tunneling engineering; plastic deformation; support

铁路和公路在中国经济建设中发挥着越来越重要的作用。随着经济的高速发展,对铁路和公路的建设也提出了更高的要求,中国是一个多山的国家,为了提高铁路和公路的质量、缩短其交通里程,国家在山区的铁路和公路建设中大多采用隧道的方案。对隧道支护的研究方法有:工程类比法、解析法、物理模拟法和数值模拟法。工程类比法在精度方面远远达不到工程的要求。文献[1-3]用解析方法对隧道支护的力学作用机理进行了研究,但隧道围岩材料性质和隧道形状都是理想状态。文献[4]用物理模拟法来研究硐室围岩的稳定性。由于隧道围岩材料较其它工程材料更加的复杂,它在开挖过程中受到的了扰动,再加之复杂地质环境的作用和模型在尺度上大比例的缩小,物理模拟结果和实际相差较大。随着计算机技术的快速发展,对隧道支护的研究主要采用数值模拟方法^[5-10]。隧道开挖后洞周围岩发生了应力重分布而引发的洞周变形,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^[11]。

应力在释放过程中会在洞壁产生释放荷载,在这种荷载的作用下,隧道围岩会产生渐进性的破坏,如果在支护过程中不能够有效地制止这种释放荷载,就会最终导致隧道产生较大的变形破坏,从而影响隧道的正常运营。隧道开挖后其洞壁周围会产生一定的塑性区,塑性区的消失要通过支护力来实现。文章通过理论计算出其隧道围岩塑性区消失时支护力的大小。此支护力通过初期喷锚支护过程中锚杆的预应力来实现。再通过FLAC^{3D}来模拟支护前后隧道围岩的力学性质。从而为其它隧道设计和施工提供一定的依据。

1 隧道开挖及支护过程的计算

当存在地应力时,隧道在开挖过程中由于卸荷作用会产生应力重分布,就使得隧道围岩产生塑性区。在分析过程中隧道可视为无限体中横断面不变的长洞,隧道的长度相比于隧道的直径足够大,故可将问题转化为平面应变问题。假定在均质各向同性的岩体中开挖圆形隧洞,岩体内聚力为 c ,内

收稿日期:2013-09-30

作者简介:张虎元(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事与废弃物处置有关的环境岩土工程研究,(E-mail)zhanghuyuan@lzu.edu.cn。

摩擦角为 φ , 初始地应力为 σ_0 , 侧压力系数为 1, 初期支护的力为 p 。隧洞无限长, 其内径为 r_1 , 塑性区半径为 r_p 。

此时对隧洞的弹塑性分析看做一个轴对称问题, 当体力忽略不计时, 应力满足平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

在隧道围岩塑性区内的应力还必须满足屈服条件, 屈服条件采用 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau = c - \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

当式(2)用主应力表示, 且 $\sigma_1 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_\theta$ 时, 屈服条件就成为

$$(1 + \sin \varphi) \sigma_r - (1 - \sin \varphi) \sigma_\theta = 2c \cos \varphi \quad (3)$$

将式(3)代入平衡方程式(1)时有:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2\sigma_r \sin \varphi}{r(1 - \sin \varphi)} = -\frac{2c \cos \varphi}{r(1 - \sin \varphi)} \quad (4)$$

求解微分方程(4)得

$$\sigma_r = c \cot \varphi + ar^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (5)$$

代入边界条件 $(\sigma_r)_{r=r_1} = -p$ 解出常数 a 得到

$$\sigma_r = c \cot \varphi - (p + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = c \cot \varphi - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (p + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (7)$$

式(6)和(7)为塑性区内的应力, 对于弹性区 ($r > r_p$) 的应力据弹性力学中的拉密解答给出, 其边界条件为 $(\sigma_r)_{r=r_p} = \sigma_{rp}, (\sigma_r)_{r=\infty} = \sigma_0$ 则:

$$\sigma_r = -\frac{r_p^2}{r^2} \sigma_{rp} - \left(1 - \frac{r_p^2}{r^2}\right) \sigma_0 \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_p^2}{r^2} \sigma_{rp} - \left(1 + \frac{r_p^2}{r^2}\right) \sigma_0 \quad (9)$$

可见 $\sigma_r + \sigma_\theta = -2\sigma_0$, 该式在 $r = r_p$ 处同样成立, 将其代入塑性区的屈服条件式(3)得:

$$\sigma_r = \sigma_0 (1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \quad (10)$$

式(10)与式(6)中 $(\sigma_r)_{r=r_p} = \sigma_{rp}$ 相等, 由此得到

$$r_p = r_1 \left[\frac{(\sigma_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi + p} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (11)$$

由式(11)可得

$$p = [(1 - \sin \varphi)(\sigma_0 + c \cot \varphi)] \left(\frac{r_1}{r_p} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (12)$$

由式(12)可见, 衬砌支护力 p 和塑性半径 r_p 成反比关系, 当 r_p 最大时, p 为最小, 当 p 增大时, r_p 则减小。在设计支护力的过程中不允许出现塑性区时, 即 $r_p = r_1$ 时, 塑性区的消失需要依靠衬砌的强大支护力来实现, 此时 p 最大。当 $r_p = r_1$ 时

$$p = (1 - \sin \varphi) \sigma_0 - c \cot \varphi \quad (13)$$

可见当塑性区消失时衬砌的支护力 p 和 $r = r_p$ 处的 σ_{rp} 相等。

2 隧道数值模拟过程

FLAC^{3D}是岩土工程中的数值分析方法之一。其差分分析将计算划分为若干单元, 单元网格可以随着材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形。尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析及模拟过程等领域有独到的优点^[12]。

2.1 模拟范围

数值模拟中对隧道的上覆岩层厚度(模型中的 z 方向)取 35 m, 横向(x 方向)取 80 m, 轴向(y 方向)取 60 m, 下部取 15 m。模型共划分 53 400 个单元, 59 805 个节点。计算模型如图 1。

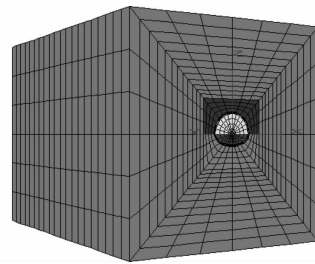


图 1 隧道计算模型

2.2 计算模型和计算参数

在计算中, 隧道围岩选取 Mohr-Coulomb 强度准则, 用 null 模型进行隧道开挖, 初期支护采用 shell 单元和 cable 单元。分析过程中考虑了岩体自重应力、构造应力和由于隧道开挖引起的释放荷载。在数值计算过程中, 岩体、混凝土和锚杆的物理力学参数取自文献^[13]。分别如表 1~3。

2.3 模拟过程

本文在模拟过程中严格按照实际情况, 首先对模型施加了自重应力和构造应力, 使其在两者的作用下达平衡状态, 然后对模型进行开挖来分析隧道的受力情况。模型的四周和底部采用法向位移约束, 地表处于自由状态。隧道沿着 y 方向进行开挖, 按照每次 3 m 的一个步长进行, 整个隧道分为 20 步开挖。每步开挖之后, 对模型进行受力分析。当一个步长开挖之后, 对隧道进行初期支护, 首先喷射混凝土, 然后安装锚杆。喷锚支护如图 2 所示。

表 1 岩体物理力学参数

容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	内聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
25	8.0	0.30	28	0.7	2.5

表 2 锚杆物理力学参数

锚杆类型	长度/m	直径/mm	弹性模量/GPa	抗拔力/kN	砂浆刚度/($\text{MN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)	砂浆黏结强度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)
砂浆锚杆	3	22	210	250	80.0	1 000

表 3 混凝土物理力学参数

类别	标号	弹性模量/GPa	泊松比	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	厚度/cm
喷浆	C20	21.0	0.25	14.0	8.4	20

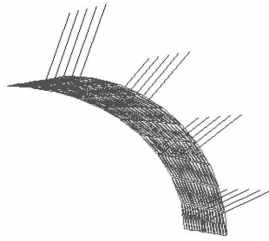


图 2 隧道的支护模型

3 计算结果分析

隧道在开挖过程中,由于破坏了初始平衡条件而发生应力的重分布,这种作用就会使围岩产生塑性破坏,在数值模拟过程中,通过对隧道在无支护、初期喷锚支护条件下围岩塑性变形情况进行模拟,通过对两种情况模拟结果的分析,分析了隧道支护的力学作用状况。

3.1 塑性区的分布

式(11)给出了当衬砌支护力为 p 时隧道的塑性半径,本文模型中隧道半径 $r_1 = 5$ m,围岩物理力学参数参数如表 1,当 $p=0$ 时,其值就是隧道在无支护情况下的塑性半径。据式(11)求得隧道在开挖初期无支护条件下的塑性半径 $r_p = 8.4$ m,塑性破坏范围为 3.4 m。在无支护条件下隧道开挖后塑性区的范围如图 3。除隧道的拱脚外取平均值,其塑性破坏范围约为 3 m。根据式(12),当塑性区消失时($r_p = r_1$),需要施加的衬砌支护力如式(13)所示,若对初期喷锚支护过程中对锚杆施加式(13)所示大小的预应力后(其值 $p = 53$ kN),隧道在开挖后塑性区的范围如图 4。由此可见,在初期喷锚支护中对锚杆施加 53 kN 的预应力后,隧道塑性区就基本消失,此时初期喷锚支护就能很好地抑制隧道在开挖过程中的破坏。故塑性半径计算公式推导和模拟模型的选取相吻合。



图 3 无支护隧道塑性区分布图



图 4 喷锚支护隧道塑性区分布图

3.2 变形分析

图 5 为无支护条件下隧道开挖后 z 方向的位移云图,图 6 为隧道开挖后在喷锚支护作用下 z 方向的位移云图。

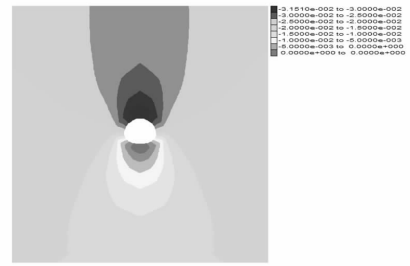


图 5 无支护隧道垂直位移云图

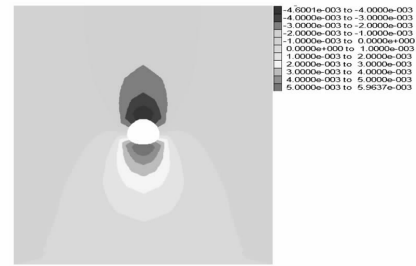


图 6 喷锚支护隧道垂直位移云图

由图 5 和图 6 可见,当无支护时,隧道开挖后的垂直位移为 30 mm,局部部位达到了 31.5 mm。当隧道开挖后进行及时的喷锚支护,并且计算当隧道塑性区消失时所需要的衬砌支护力来对隧道进行锚杆预应力支护时,隧道开挖后的垂直位移为 4.6 mm。因此,初期锚杆预应力支护对隧道破坏的抑制起到了很大的作用。

4 结论

采用 FLAC^{3D}对隧道分步开挖的过程进行模拟,通过对隧道在无支护、初期喷锚支护条件下围岩塑性变形情况进行对比,得出如下结论:

- 1)隧道在开挖过程中由于破坏了岩体初始平衡条件而发生应力重分布,这种作用会使围岩中产生释放荷载,从而导致了围岩的塑性破坏。
- 2)隧道开挖后,围岩的变形均朝向洞内,且隧道拱顶的变形量最大。
- 3)在初期喷锚支护中,对锚杆施加预应力,其值为当隧道塑性区消失时所需支护力的大小。这种支护提高了围岩的自承能力,使围岩塑性区的扩展在隧道开挖不久就得到有效抑制,其效果明显高于传统的喷锚支护。

参考文献:

- [1] 王明斌,李术才. 含衬砌圆形压力隧洞弹塑性新解[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(supp. 2):3370-3375.
- [2] 刘保国,杜学东. 圆形隧洞围岩与结构相互作用的粘弹性解析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):561-564.
- [3] 任青文,邱颖. 具有衬砌圆形隧洞的弹塑性解[J]. 工程力学,2005,22(2):212-217.
- [4] 曾亚武,赵震英. 地下洞室模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1745-1749.
- [5] 董淑乾,魏云杰,朱剑. 公路偏压隧道开挖及支护的数值模拟研究[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2010,37(2):201-205.

优化的方案体现在既防止重力式混凝土挡渣墙因施工扰动发生倾覆对管道和施工人员造成的毁灭性灾难的重大安全隐患,又使管道的沉降深度得到提升(由原设计最大沉降量 $\Delta = -1\text{ m}$, 提升至 $\Delta = -1.5\text{ m}$)。

在役管道不停输沉管工程均可考虑采用此法施工即可保证管道的完整性,又可缩短工期降低工程成本。

参考文献:

- [1] 《忠县-武汉输气管道长阳县段线路工程地质勘察报告》[R].
 [2] 范晓明,雷毅,刘景洪. 输气管道的漂管沉降施工技术[J]. 油气储运, 2005(5): 45-47, 62-67.
 [3] 郑永强. 输气管道的漂管沉降施工技术[J]. 黑龙江科技信息, 2011(33): 303.
 [4] 黎明,胡兆东. 压力管道开挖支护施工技术[J]. 中国科技信息,

- 2010(24): 67-68.
 [5] 赵超祥. 过江管道沉管施工技术的应用[J]. 水利电力机械, 2007(10): 129-131.
 [6] 康宝. 输气管道水网地带漂管沉降施工[J]. 内蒙古石油化工, 2012(9): 74-75.
 [7] 贺亚霖. 大口径长输管道在沼泽地的漂管施工技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012(13): 42-43.
 [8] 黄金清. 漂管施工技术在穿越卤水管排施工中的应用[J]. 青海石油, 2009(2): 90-93.
 [9] 谢可凯,李诗赞,宋华. 在役管道沉管技术研究[J]. 科技创新导报, 2011(1): 91, 93.
 [10] 朱晓峰,沈红光,赵海俊. 管道沉管技术及应用的探讨[J]. 油气田地面工程, 2008(8): 12-13.

(编辑 梁远华)

(上接第 113 页)

- [2] 百度百科. 改性沥青[EB/OL]. [2013-10-13] <http://baike.baidu.com/view/1096629.htm>.
 [3] 百度百科. 沥青[EB/OL]. [2013-10-13] <http://baike.baidu.com/view/123295.htm>.
 [4] Zhang Y H, Tong A J, Li L D. Synthesis of molecularly imprinted polymer with 7-chloroethyl-theophylline-immobilized silica gel as template and its molecular recognition function[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60: 241-244.
 [5] Prasad B B, Banerjee S. Preparation, characterization and performance of a silica gel bonded molecularly imprinted polymer for selective recognition and enrichment of β -lactam antibiotics

- [J]. Reactive and Functional Polymers, 2003, 55(2): 159-169.
 [6] 李峰,黄颂昌,徐建,等. 沥青路面灌缝胶性能评价及技术要求[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 7-12.
 [7] 黄文元,张隐西. 路面工程用橡胶沥青的反应机理与进程控制[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 5-9.
 [8] 陈立贵,王忠,付蕾,等. PEG/活性炭颗粒相变材料的制备及其性能[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(2): 31-33.
 [9] 王忠,陈立贵,付蕾,等. HDPE/活性炭颗粒相变材料的制备及其性能研究[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 34-36.

(编辑 郑洁)

(上接第 123 页)

- [6] 刘豆豆,陈伟忠,杨建平,等. 二道堰隧道开挖与支护的数值模拟分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2007, 37(1): 80-85.
 [7] 王俊峰,高广运,张蕾. 浅埋圆形隧道开挖面稳定的可靠度分析[J]. 岩土工程技术, 2011, 25(1): 44-48.
 [8] 段亚刚,刘保国. 大型地下洞室施工顺序的数值方法优化[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(8): 1459-1463.
 [9] 周玲芳,刘保国. 大断面地下洞室开挖数值模拟[J]. 岩土工程界, 2005, 9(1): 71-76.
 [10] 黄正荣,朱伟,梁精华,等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支

- 护压力及稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2005-2009.
 [11] 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.
 [12] 卢小明,王钜,胡光云. 白石河 2 号隧道开挖与支护力学行为仿真分析[J]. 2008, 12(5): 73-76.
 [13] 张延新,蔡美峰,乔兰,等. 高速公路隧道开挖与支护力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1284-1289.

(编辑 梁远华)