

雪峰山隧道原岩应力场和开挖二次应力场特征分析

黄戡^{1,2}, 彭建国², 刘宝琛¹, 丁国华², 王跃飞², 马德青²

1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙, 410008

摘要: 为了解雪峰山隧道原岩应力场和隧道开挖后围岩的二次应力场分布特点, 应用有限元软件建立仿真模型, 模拟河谷下蚀和隧道开挖过程。为了验证数值模型的可靠性, 对比分析相应位置的现场测试应力和数值模拟应力, 并以现场应力测试值对应力边界的应力进行反演分析。研究表明: 应力数值模拟值和现场测试值较接近, 说明所建模型可靠; 隧道轴线剖面主应力可分为应力平稳带和浅表生改造影响带; 在应力平稳带的硬、软相间部位或断层带附近出现应力分异现象; 浅表生改造影响带通常为应力降低区, 地形明显变化处可造成应力局部增高; 隧道周边的最大主应力出现应力集中; 随着与隧道周边的距离增加, 最大主应力很快降低; 隧道周边未出现拉应力, 开挖影响范围为地表至 1 倍洞径之间。

关键词: 隧道工程; 原岩应力; 二次应力场

中图分类号: U459.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2011)05-1454-07

Analysis of initial rock stress field and secondary rock stress field of Xuefengshan tunnel

HUANG Kan^{1,2}, PENG Jian-guo², LIU Bao-chen¹, DING Guo-hua², WANG Yue-fei², MA De-qing²

1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Hunan Provincial Communication Planning Survey and Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: To understand initial rock stress field and secondary rock stress field due to excavation in Xuefengshan tunnel, finite element software was used to establish numerical model to simulate the valley incision and tunneling process. In order to verify the reliability of the numerical model, comparison of stress numerical values and monitoring values in field tests was conducted, and the stress boundary was done. The results show that the model is reliable because numerical simulation stress is close to that of the field test. The spread of stress can be divided into two bands, i.e., the equable stress band and the effected band of epigenetic-surface reformation. Around fracture in the equable stress band, there are stress varied phenomena and local high stress bands in the effected band, especially at the position of apparent landform chance. Stress concentration is serious around the tunnel. With the increase of the distance from the tunnel, the maximum principal stress decreases rapidly. Tensile stress does not appear around the tunnel, and the excavation influence band is from 0 to 1 times of the hole diameter.

Key words: tunnel engineering; initial stress field; secondary stress field

地应力状态对工程稳定性尤其是地下工程稳定性具有重要的影响。在山区公路隧道建设中, 了解隧址

区岩体地应力场的分布特征以及地应力对隧道工程的设计和施工具有非常重要的意义^[1-2]。地应力是造成隧

收稿日期: 2010-06-10; 修回日期: 2010-08-28

基金项目: 西部交通建设科技项目(20033179802); 国家博士后科学基金资助项目(20090461021)

通信作者: 黄戡(1979-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 工程师, 从事隧道和岩土工程勘察设计与科研工作; 电话: 13875801586; E-mail:

hk_616@sina.com

道、矿山巷道及其他地下工程变形和破坏的根本作用力,地应力的大小和方向直接影响到隧道围岩的稳定性。同时,隧道工程建设无疑将不同程度地对围岩产生扰动,围岩初始地应力受到影响,开挖区周围应力要产生重新分布形成二次应力。对隧道原岩地应力及其开挖下的二次应力分布特征进行研究是进行隧道围岩稳定性分析以及实现地下工程开挖设计科学化的必要前提^[3-5]。获取地应力的方法主要有实测地应力法和计算机数值模拟分析法等^[6-7]。地应力现场测试受场地、经费和测试技术等诸多因素的影响而不能进行大量实测,因此,研究者们大多采用数值模拟分析法来获取地应力。如靳晓光等^[8-9]对深埋长大隧道地应力演化及围岩应力位移进行了弹塑性有限元数值模拟研究;马亢等^[10]对低地应力状态下洞室开挖前、后初始应力和围岩二次应力及其相应特征,进行了二维离散元数值模拟研究;方建勤等^[11]结合复杂地质条件下茶林顶隧道隧址区的山体演化过程,进行了地应力场的二维有限元数值模拟,并获得其原始地应力。可见,为了满足地下工程设计和施工的需要,可以在实测结果的基础上结合工程地质条件,通过数值模拟对初始地应力场进行反演分析,以获得地下工程区域内真实的初始地应力场。在此,本文作者通过模拟河谷下切过程来考虑山体成坡的演化过程,并与现场应力测试结果进行对比验证,反演应力边界条件下的应力,进而研究雪峰山隧道原岩应力分布规律和隧道开挖后围岩二次应力的分布形态。

1 工程概况

湖南省邵阳至怀化高速公路是国家重点建设的“五纵七横”国道主干线中上海至瑞丽高速公路中的一段。雪峰山隧道为邵阳至怀化高速公路上最大的控制性工程,隧道的开通可缩短公路里程约30 km,大大节约了运营费用。

雪峰山隧道位于湖南省邵阳市、怀化市两市交界处,穿过雪峰山主脉。隧道进口位于怀化市洪江镇塘湾乡兰家村,距邵阳市洞口县江口镇约3 km;出口位于洪江镇铁山乡小溪村。隧道为上、下行线分离的双洞隧道,左、右洞长度分别为6 946 m和6 956 m,平均长度为6 951 m,属特长隧道。两洞室净距在洞口段为20 m左右,在洞身深埋段为35 m左右。隧道的最大埋深约840 m,约50%的地段隧道埋深大于450 m。左、右线隧道均设“人”字坡,进口段为+1.14%的上坡,长约400 m,其余段为-0.95%的下坡。在邵阳端

均设置斜井,在怀化端设置竖井。隧道建筑限界净宽9.75 m,建筑限界净高5.0 m。隧道的纵断面见图1。



图1 隧道的纵断面

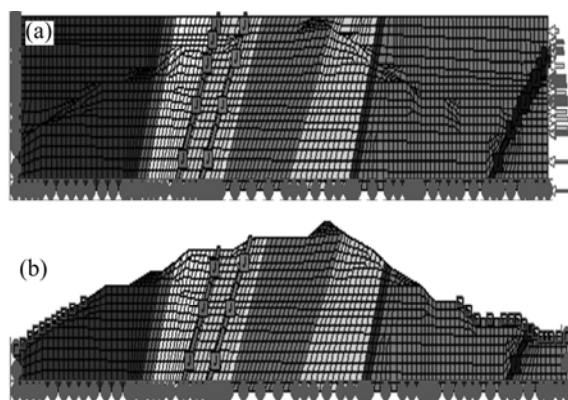
Fig.1 Vertical section of tunnel

2 隧道原岩应力场演化规律分析

2.1 计算模型的建立

选用有限元计算软件来模拟隧道区岩体应力场的形成演化过程。根据隧道区工程地质条件和工程地质剖面图,建立剖面计算模型,见图2(a)。该初始状态模型上表面为自由面,底面垂直方向不发生位移,模型左侧水平方向不发生位移,右侧则施加自重应力衍生的侧向水平应力(自重应力乘以侧压力系数求得)和水平构造应力(为5 MPa)作为荷载边界^[5]。

根据隧道分步分台阶施工法,采用由上至下的四步“开挖”来模拟河谷下切过程。其中初始状态的计算模型上表面相当于海拔高程1 358 m,基本上与雪峰山主峰高程一致,代表了河谷下切前的最后一级区域平面^[5]。计算域为(宽×高)为8 256 m×1 348 m,单元数为2 577个,节点数为7 884个。第1~3次分别下切223,169和242 m;第4次在前面的基础上再下切206 m至现在的地形,即海拔高程518 m。其最终状态的计算模型单元数为1 379个,节点数为5 214个(见图2(b))。根据岩石力学试验成果,并结合工程地质类比,确定表1所示的有限元模型计算中介质的参数。



(a) 初始状态; (b) 最终状态

图2 原岩应力场计算模型

Fig.2 Simulation models of initial rock stress field

2.2 计算模型的效果验证

为验证计算模型能否符合实际情况,表 2 给出了现场 3 个钻孔采用水压致裂法实测点位置的实测应力与本模型计算值的对比情况。从表 2 可以看出:应力计算值与实测值的最大相对误差为 25.04%,最小相对误差为 1.44%;应力计算值与实测值比较接近,说明可以用建立的模型反演雪峰山隧道原岩应力场的分布规律。

2.3 地应力场发育分布的基本规律

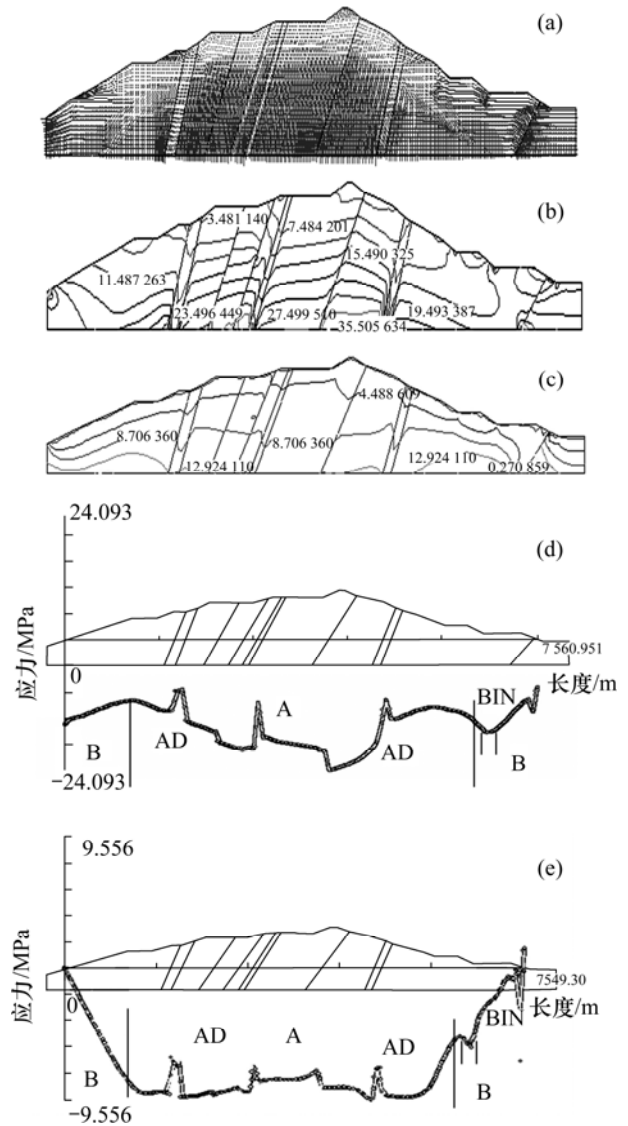
通过山体成坡历史演化过程的有限元模拟,得到隧道区现今应力场的分布规律,如图 3 所示。从图 3 可见:

(1) 在坡面附近,最大主应力 σ_1 的方向与坡面近于平行,且量级总体较低;而在远离坡面的山体内部, σ_1 的方向为水平方向;随着埋深的加大, σ_1 和 σ_2 逐渐增大,应力场逐渐由自重应力场和构造应力场联合作用而成。

(2) 隧道轴线剖面最大主应力的分布具有明显的分带性,大致可分为应力平稳带(A)和浅表生改造影响带(B)。在应力平稳带内,最大主应力的量级一般介于 15~30 MPa;浅表生改造带影响带内最大主应力的量级一般为 10~15 MPa。

(3) 对于应力平稳带(A),地应力状态形成于山体剥蚀之前,在山体下蚀过程中基本保持原有状态;但带内也有应力分异,受控于岩体的力学性能与结构特征,在硬、软相间部位或断层带附近,出现应力分异现象(AD),在断层两侧出现明显的应力集中现象,最大主应力量级为 15~20 MPa,说明断层对应力的传递有明显的阻隔作用。在施工过程中,应特别注意该区域可能发生的塌方和掉块等灾害^[12-14]。

(4) 对于浅表生改造影响带(B),地应力状态受山体形成过程的影响,通常造成应力降低。而在应力降低带内侧尤其是地形明显变化处,可产生应力局部增高带(BIN),最大主应力的量级约为 15 MPa。



(a) 隧道轴线剖面主应力矢量图; (b) 隧道轴线剖面最大主应力 σ_1 等值线图; (c) 隧道轴线剖面最小主应力 σ_2 等值线图; (d) 隧道轴线剖面最大主应力 σ_1 变化曲线; (e) 隧道轴线剖面最小主应力 σ_2 变化曲线
图中数据单位: MPa

图 3 隧道主应力场分布规律

Fig.3 Distribution regular of mail stress of tunnel

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

地层	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	c/MPa	ϕ (°)
断层 F ₂	6	0.28	24.0	0.4	30
断层 F ₅	8	0.28	24.0	0.4	30
断层 F ₆	6	0.28	24.0	0.4	30
前震旦系芙蓉溪群岩门寨组 Ptfy	15	0.23	26.8	1.0	42
震旦系江口群长滩第 1 段 Zc ₁	21	0.23	26.5	1.5	42
震旦系江口群长滩第 2 段 Zc ₂	18	0.25	26.7	1.8	41
震旦系江口群长滩第 3 段 Zc ₃	21	0.23	26.5	1.5	42

注: c 为黏聚力; ϕ 为内摩擦角。

表 2 计算值与实测值对比

Table 2 Comparison of calculation stress and measured stress

编号	位置	σ_1/MPa			σ_2/MPa		
		实测值	计算值	相对误差/%	实测值	计算值	相对误差/%
1	ZK2 的 424.11 m 深度处	15.06	13.19	12.42	9.74	9.6	1.44
2	ZK3 的 778.41 m 深度处	21.02	23.90	13.70	11.78	8.83	25.04
3	ZK4 的 473.04 m 深度处	21.03	16.82	20.02	12.77	9.93	22.24

注: σ_1 为最大主应力; σ_2 为最小主应力。

3 隧道开挖引起的二次应力场特征分析

3.1 模型的建立

为了准确地获得隧道围岩二次应力场的分布特征, 选取 K98+040 断面作为计算剖面, 其隧道断面净宽为 9.75 m, 净高为 5.0 m, 建立计算模型, 见图 4。边界条件为: 在左边界和下边界施加法向位移约束, 在上边界施加与覆岩体重力相等的均布面力 σ_y , 在右边界施加水平面力 σ_x (包括岩体由自重应力 σ_y 产生的水平侧压力 $\sigma_y\mu/(1-\mu)$ 和水平构造应力 σ_x 2 部分), 为一沿高度梯度变化的面力。

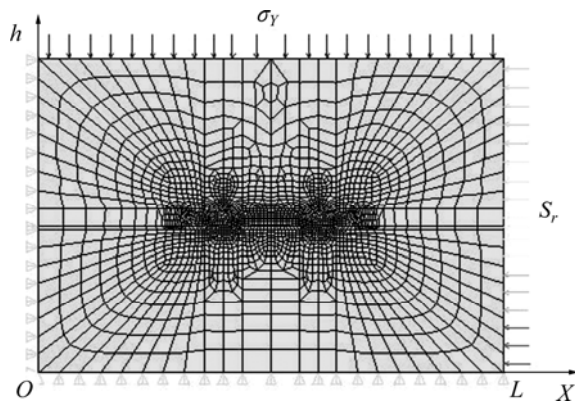


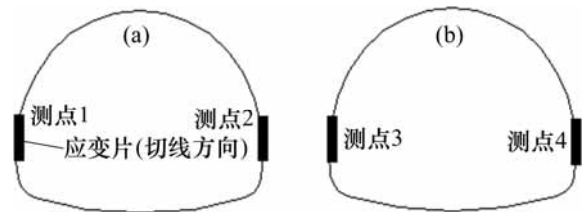
图 4 隧道计算模型

Fig.4 Simulation model of tunnel

3.2 应力边界条件反演分析

为使开挖后剖面的测点部位应力状态与实测结果相吻合, 应结合实测值对模型中的应力边界进行反演。在实际监测中, 在 K98+040 断面左、右两洞的左、右壁上均布置测点(见图 5)以测量洞壁应力, 采用应变片实测, 结果如表 3 所示。

按前述边界条件进行应力边界条件反演分析, 得到的应力边界条件为: X 方向的应力 $\sigma_x = 12.90 \text{ MPa}$,



(a) 测点 1 和测点 2 布置示意图;

(b) 测点 3 和测点 4 布置示意图

图 5 洞壁应力测点布置示意图

Fig.5 Collocation of stress measuring points of tunnel wall

表 3 K98+040 断面洞壁应力实测点测量结果

Table 3 Tunnel wall stress measurement results of

K98 +040 section

测点序号	测点部位	特征点应变片应变差值/ $\mu\epsilon$	应力/MPa
1	左洞左壁 1.5 m 高处	384	20.23
2	左洞右壁 1.5 m 高处	411	21.66
3	右洞左壁 1.5 m 高处	467	24.61
4	右洞右壁 1.5 m 高处	448	23.45*

Y 方向的应力 $\sigma_y = 12.54 \text{ MPa}$ 。

在该应力边界条件下, 洞壁应力特征拟合点的实测值和计算值对比结果如表 4 所示。从表 4 可以看出: 4 个测点的应力相对误差均较小, 说明此边界条件能够反映隧道岩体的实际状况。

表 4 各测点应力实测值与计算值的比较

Table 4 Comparison of calculation stress and measured stress

测点序号	实测值/MPa	计算值/MPa	相对误差/%
1	20.23	20.76	2.50
2	21.66	24.66	13.40
3	24.61	24.63	0.08
4	23.45	20.68	11.31

3.3 隧道围岩二次应力场主要特征

按照上述施加边界条件后模拟隧道开挖，得到隧道开挖下的围岩二次应力场的分布规律，见图 6 和图

7。从图 6 和图 7 可见：

(1) 隧道周边的最大主应力出现应力集中现象，拱顶和拱脚处的最大主应力达到 40 MPa 左右(应力集

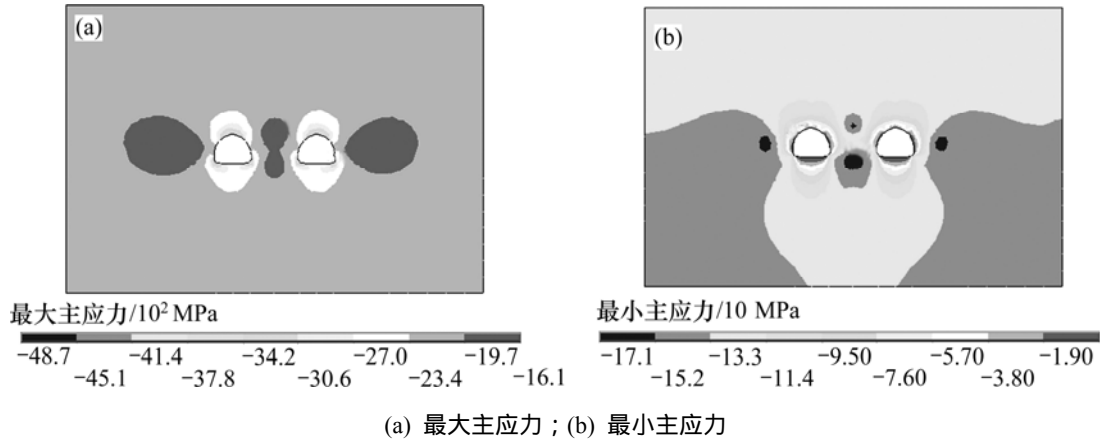
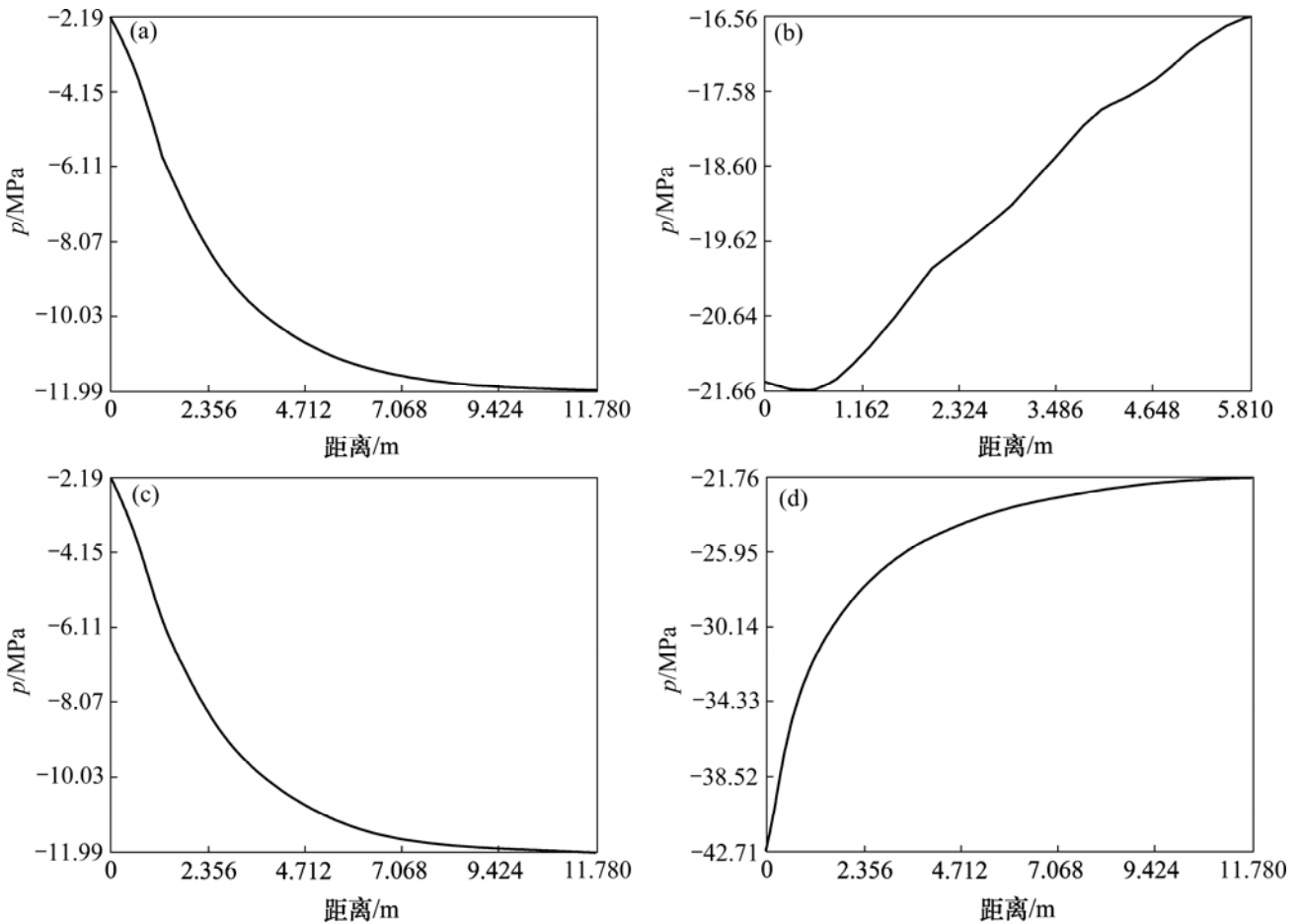


图 6 围岩最大和最小应力分布云图

Fig.6 Contour of maximum and minimum principle rock stress distribution



(a) 左洞左边墙径向应力随围岩深度的变化; (b) 左洞左边墙切向应力随围岩深度的变化; (c) 左洞左拱顶径向应力随围岩深度的变化; (d) 左洞左拱顶切向应力随围岩深度的变化

图 7 隧道拱顶和边墙的径向应力和切向应力随围岩深度变化图

Fig.7 Relationship among radial stress and tangential stress and depth of rock in crown and side wall

中系数约为 2), 边墙的最大主应力约为 30 MPa(应力集中系数约为 1.5); 随着距离隧道周边的距离增加, 最大主应力很快降低; 在距离隧道周边 $1D$ 处(D 为洞径), 减小为原岩应力状态, 达到 20 MPa 左右, 说明隧道开挖影响范围为从地表至 $1D$ 之间。

(2) 隧道周边最小主应力为 0 MPa。随着距离隧道周边距离的增加, 最小主应力也增大, 围岩没有出现拉应力。

(3) 拱顶处切向应力最高, 达到 42 MPa, 其次为拱脚和墙角位置, 达到 38 MPa, 左、右两边墙上为 22 MPa。随距离隧道周边距离的增加, 切向应力逐渐降低, 深度达到 $1D$ 以后, 切向应力达到原岩应力。

(4) 隧道周边的径向应力为 0 MPa, 向围岩深部迅速增大, 在深度 1 m 处边墙和拱顶均为 5~6 MPa; 再向深部, 径向应力的增高梯度又迅速降低, 大致到 1 倍洞径深处趋于稳定, 亦可视为进入原岩应力区。

(5) 洞壁附近的最大主应力方向平行于洞壁即切向应力方向; 而最小主应力就是切向应力, 所以, 最大、最小主应力分布与隧道周边拱顶及拱腰的切向应力、径向应力分布规律相对应。

4 结论

(1) 通过数值模型获得的原岩应力和二次应力与现场应力测试结果相近, 表明所建的模型合理, 能够反映雪峰山隧道地应力的变化; 同时, 可以用“开挖”来模拟河谷下蚀和形成雪峰山的过程。

(2) 隧道轴线剖面最大主应力的分布具有明显的分带性, 大致可分为应力平稳带和浅表生改造影响带; 应力平稳带的地应力基本状况形成于山体剥蚀之前, 在断层两侧出现了明显的应力集中现象, 说明断层对应力的传递有明显的阻隔作用, 导致出现应力分异现象; 浅表生改造影响带的地应力状态受山体形成过程的影响, 通常造成应力降低, 在地形明显变化处可形成应力局部增高带。

(3) 隧道周边的最大主应力出现应力集中现象, 应力集中系数约为 2, 且随着与隧道周边的距离增加, 最大主应力很快降低, 在距离隧道周边 1 倍洞径处, 减小为原岩应力状态; 隧道周边最小主应力为 0 MPa, 且随着与隧道周边距离的增加, 最小主应力很快增加; 在距离隧道周边 1 倍洞径处, 达到原岩应力状态; 隧道周边未出现拉应力, 开挖影响的范围为从地表至 1

倍洞径之间。

参考文献:

- [1] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 28-62.
GUAN Bao-shu. Tunnel construction main points[M]. Beijing: People Transportation Press, 2003: 28-62.
- [2] 彭立敏, 刘小兵. 隧道工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 15-52.
PENG Li-min, LIU Xiao-bin. Tunnel engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2009: 15-52.
- [3] 彭建国, 蒋成海, 吴湘滨, 等. 雪峰山隧道区域地下水影响调查研究[R]. 长沙: 中南大学地学与环境工程学院, 2007: 8-56.
PENG Jian-guo, JIANG Cheng-hai, WU Xiang-bin, et al. Study and investigation of groundwater inflection on Xuefeng mountain tunnel excavation[R]. Changsha: Central South University. School of Geoscience and Environmental Engineering, 2007: 8-56.
- [4] 杨小礼, 眭志荣. 应力剪胀对浅埋隧道稳定性系数的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(1): 190-195.
YANG Xiao-li, SUI Zhi-rong. Influences of stress dilatancy on stability factors of shallow tunnels[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(1): 190-195.
- [5] 彭建国, 王兰生, 徐进, 等. 雪峰山隧道施工地质勘察技术研究[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院, 2007: 12-66.
PENG Jian-guo, WANG Lan-sheng, XU Jin, et al. Study and construction geology survey on Xuefeng mountain tunnel excavation[R]. Changsha: Hunan Provincial Communication Planning Survey and Design Institute, 2007: 12-66.
- [6] 赵跃堂, 范斌, 梁晖, 等. 大型深埋隧道初始地应力状态的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 147-151.
ZHAO Yue-tang, FAN Bin, LIANG Hu, et al. Determination of initial earth Stress of large deeply-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 147-151.
- [7] 尹健民, 刘元坤, 艾凯, 等. 香港排污隧道工程水压致裂法地应力测量研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 891-894.
YIN Jian-min, LIU Yuan-kun, AI Kai, et al. Hydrofracturing in-situ stress measurement and analysis for drainage tunnel project in Hong Kong Island[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 891-894.
- [8] 靳晓光, 李晓红, 艾吉人, 等. 某深埋长隧道地应力演化及围岩应力位移模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2004(1): 40-43.
JIN Xiao-guang, LI Xiao-hong, AI Ji-ren, et al. Numerical modeling of in-situ stress and surrounding rock displacement of deep-long tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(1): 40-43.

- [9] 白世伟, 韩昌瑞, 顾义磊, 等. 隧道应力扰动区地应力测试及反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2887-2892.
BAI Shi-wei, HAN Chang-rui, GU Yi-lei, et al. Research on crustal stress measurement and inversion of stress disturbed area of a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2887-2892.
- [10] 马亢, 徐进, 张志龙, 等. 基于二次应力实测值的初始应力场反分析法及其工程应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(6): 51-56.
MA Kang, XU Jin, ZHANG Zhi-long, et al. The back analysis method based on practical secondary-stress value and its application to engineering[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(6): 51-56.
- [11] 方建勤, 胡居义, 林才奎, 等. 茶林顶隧道地应力演化及断层带施工力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 536-540.
FANG Jian-qing, HU Ju-yi, LIN Cai-kui, et al. Analysis on geo-stress evolution and construction mechanics of fault zone for Chalinding Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 536-540.
- [12] 苏生瑞. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 296.
SU Sheng-rui. Effect of fractures on rock stresses and its significance in geological engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 296.
- [13] 朱光仪, 郭小红, 陈卫忠, 等. 雪峰山公路隧道地应力场反演及工程应用[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 71-75.
ZHU Guang-yi, GUO Xiao-hong, CHEN Wei-zhong, et al. Inversion of in situ stress and its application in Xuefengshan roadway tunnel[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 71-75.
- [14] 王薇, 王连捷, 乔子江, 等. 三维地应力场的有限元模拟及其在隧道设计中的应用[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 587-591.
WANG Wei, WANG Lian-jie, QIAO Zi-jiang, et al. Modeling of three dimensional crustal stress field and its application in tunnel design[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(5): 587-59.

(编辑 陈灿华)