

大丽线铁路隧道工程地应力三维有限元数值模拟分析

李金锁¹, 彭 华¹, 马秀敏¹, 石振荣², 黎建文³, 杨邵喜³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 北京经济干部管理学院, 北京 102602;

3. 四川省西南大地工程物探有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要: 在深埋隧道的勘察钻孔中(DZ-松-1)采用水压致裂方法进行原地应力测量, 确定出隧道围岩的现今地壳应力状态。结合隧道围岩的力学参数、工程地质特性等, 运用三维有限元数值模拟技术对大丽线松树圆铁路隧道工程区进行了应力场模拟综合分析。给出了工程区地应力的赋存规律和基本特征。

关键词: 三维有限元; 地应力; 数值模拟; 水压致裂

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)06-0800-04

作者简介: 李金锁(1963-), 男, 在读博士生, 地质工程专业, 主要从事岩土工程、地应力测量及地质灾害方面的研究工作。

Three-dimensional finite element numerical simulation of geo-stress in Da-Li Railway tunnel of Yunnan

LI Jin-suo¹, PENG Hua¹, MA Xiu-min¹, SHI Zhen-rong², LI Jian-wen³, YANG Shao-xi³

(1. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 2. Beijing Institute of Economic Management, Beijing 102602, China;

3. South-west Dadi Engineering Exploration Co. Ltd, Chengdu 610072, China)

Abstract: Through the measurements of geo-stress in-situ, the crustal stress state in the region of the tunnel was determined (including the value and direction of in-situ stress). According to the measured in-situ stress state, the mechanical parameters of rock mass around the tunnel and the regional engineering geological conditions, the in-situ stress distribution in the engineering region was determined by the three-dimensional finite element method.

Key words: three-dimensional finite element, geo-stress, numerical simulation, hydraulic fracturing

0 工程区工程地质概况

拟建的大丽线松树圆铁路隧道位于云南大理白族自治州洱海东侧的挖色乡。工程区内的断裂构造以NW及NE向最为发育, 区内新构造运动强烈, 地质构造十分复杂, 现代地震活动亦很活跃, 构成了工程区的主要地质构造特征。

沿线地层岩性复杂多变, 沉积岩、变质岩和岩浆岩均有出露, 其分布主要受区域断裂构造控制。根据钻孔地质资料, 区内主要地层有第四系、二叠系、石炭系等。其中, 第四系主要为坡残积层, 红褐色或黄色粘土组成。二叠系主要为二叠系下统(P_1)、石炭系岩性为灰黄色泥质灰岩、灰白、深灰色灰岩、浅黄、灰白色泥质角砾状白云质灰岩、灰绿色玄武岩夹凝灰岩。上述二叠系、石炭系为大丽线铁路隧道主要通过地层。

工程区位于青藏高原的东南边缘地带, 所经地区位于我国西南部的扬子准地台丽江台缘褶皱带的鹤庆

—洱海台褶皱束地带, 褶皱及断裂构造发育。该地区的构造变形, 以断块中的南北向褶皱发育为特点。褶皱两翼对称, 平缓开阔。区内褶皱为印支末期, 又有喜马拉雅期褶皱作用迭加, 并形成局部逆掩—推覆构造。

区内断裂构造较为发育, 主要为区域性大断裂, 走向为北西向及北东向。与线路有关的断层主要有 F_1 - F_2 断层。地形及钻孔测量位置见图1所示。

此次进行原地应力测量的钻探孔为DZ-松-1孔、设计孔深227 m。隧道经过钻孔部位深度为222.3 m。采用水压致裂地应力测试方法, 结果见表1。

松树圆钻孔在灰岩地层中, 局部地段岩石破碎, 裂隙发育, 进行了8段测试, 2段印模和定向。由于工程需要, 钻孔的测段大多都安排在孔的下部, 深度较大。

表 1 大丽线松树圆铁路隧道 DZ-松-1 号孔水压致裂原地应力测量结果
Table 1 The in-situ stress measured by hydraulic fracturing technique in Da-Li Railway tunnel

序号	测段深度/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方位/ /(°)
		P_b	P_r	P_s	P_o	T	S_H	S_h	S_v	
1	103.40~104.40	12.28	7.54	7.53	1.03	4.74	14.02	7.53	2.79	N75.1°E
2	117.30~118.30	15.17	9.30	7.10	1.17	5.87	10.83	7.10	3.17	
3	142.30~143.30	13.63	8.20	8.10	1.42	5.43	14.68	8.10	3.84	
4	158.50~159.50	6.550	6.40	4.10	1.59	0.15	4.32	4.10	4.28	
5	163.63~164.63	13.10	10.76	8.75	1.64	2.34	13.85	8.75	4.42	
6	176.62~177.62	13.40	10.92	6.76	1.77	2.48	7.59	6.76	4.77	N65.5°E
7	201.97~202.97	17.53	14.50	9.20	2.02	3.03	11.08	9.20	5.45	
8	223.00~224.00	16.76	12.70	8.10	2.24	4.06	9.36	8.10	6.05	

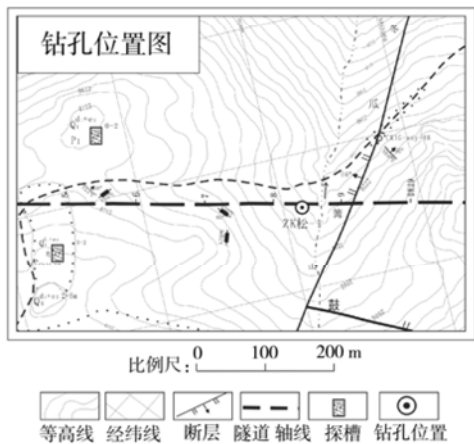


图 1 松树圆隧道地应力测量测孔位置图
Fig. 1 Location of borehole for geo-stress measurement in Songshuyuan tunnel

1 三维地应力综合回归分析基本原理

在地应力场的分析研究中,采用有限元应力回归分析法,该方法的突出优点是借助数值分析理论和计算机技术,把实测地应力资料、工程地质资料和数理统计理论结合一体,充分利用各方面资料,综合考虑影响地应力的各种因素,从而保证回归再现的应力场最大限度地接近真实情况。

为能更好地了解大丽线铁路隧道工程区现今地应力场状态,为设计和生产提供依据,在大丽线铁路隧道工程区现今地应力场分析研究中采用了三维计算分析模型。结果表明,上述分析理论、计算方法和所用模型与实际相符合,效果良好。

2 建立模型

2.1 建立模型的原则

首先,根据所研究问题的目的,选取适当的区域,并充分考虑地形、地质构造、介质不均匀性等自然因

素,特别是对工程区现今地应力场有较大影响的断层,以客观地反演出现今地应力场分布规律。其次,在建立地质模型时,要综合考虑研究的方法、途径以及资料的来源和可靠性等诸多方面的条件和因素,恰当地选取研究范围和结构。计算区范围为松树圆隧道工程区,以隧道轴线为中心线,两端分别以 DK28+200 和 DK29+550 里程桩为端点,左右各宽 250 m,深度取到地表以下 350 m 水平。

2.2 有限单元网格化

在进行有限单元网格划分时,在遵循细分网格以满足计算精度、粗分网格以减少计算工作量的总原则的基础上,根据所用计算机的条件,考虑单元形状的规则性以及迁就地质构造的延伸等诸多因素,从而给出最为恰当的、既满足精度要求又不至于付出过多时间。

在遵循上述有限元网格划分的基础上,根据地质构造模型和工程区各地层物理性质参数的分布变化,建立以关键点为基础的材料模型,分别通过各自体元自动划分有限单元网格如图 2 所示,整个网格划分出单元 113111 个,节点 163460 个。

2.3 物理模型

隧道工程区地应力场计算中考虑了工程区中的冬瓜箐山断层 F1,并考虑了角砾状白云质灰岩,力学参数如表 2 所示。

表 2 工程区介质力学参数表

材料介质	弹性模量/ (10 ⁴ MPa)	泊松比	容重/ (kN·m ⁻³)
玄武岩	6.5	0.16	29
角砾状白云质灰岩	3.2	0.24	25
断层	2.1	0.33	21

注:弹性模量取泥质灰岩 50%。

据现代地应力成因理论^[1-2],结合大丽线铁路隧道工程区的实际情况,以岩体自重和地质构造作用力为

待回归因素。采用一般的自重应力场模式，重力作用沿着铅直方向作用于所有单元。如图 2 所示。岩体容重采用表中的数据。

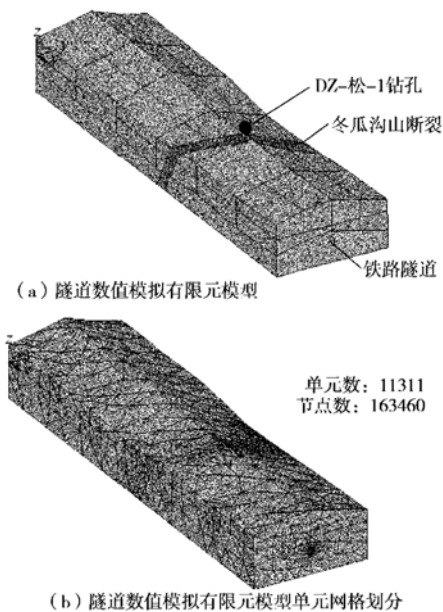


图 2 松树圆有限元计算三维模型及网格图

Fig. 3 Mesh of three-dimensional finite element analysis

2.4 地质构造作用力模拟

据地质构造分析^[3-4]和原地应力测量资料的综合分析结果，最大主压应力方向近南北向，如图3所示。因此在计算域的边界上施加东西向和南北向两种沿侧边界法向水平构造作用、沿侧面边界的水平构造作用、沿侧面边界的水平切向力作用作为待定因素来模拟构造作用，构造模式如图4所示。三个待定回归因素所形成的域内应力用 σ_{KP1} 、 σ_{KP2} 、 σ_{KP3} 表示。

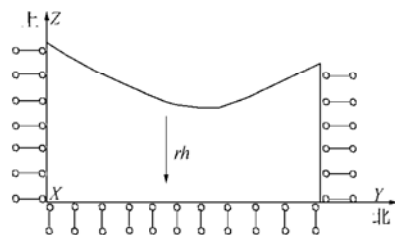


图 3 重力作用模式

Fig.3 Mode of gravity action

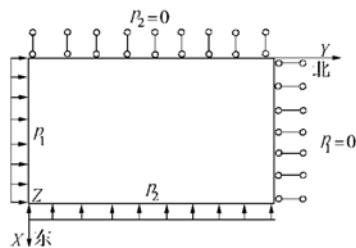


图 4 构造作用模式

Fig. 4 Mode of structure action

2.5 地应力场分布规律

将各选定因素拟定的初始载荷乘以所求得的对系数，再同时施加所有选定因素进行有限元计算得出的隧道工程区地应力场的分布规律，如图 5 所示。

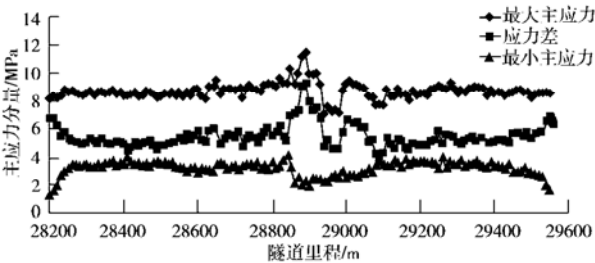


图 5 沿松树圆隧道轴线主应力值变化状态曲线

Fig. 5 The variation of principal stress along axis of Songshuyuan tunnel's axis

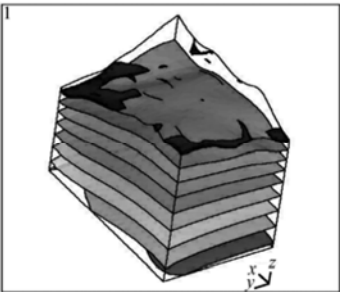


图 6 沿隧道轴线 σ_1 应力分布云图

Fig. 6 Stress (σ_1) distribution along axes of tunnel

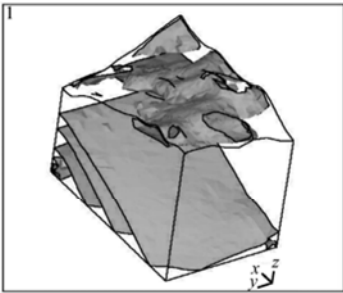


图 7 沿隧道轴线 σ_2 应力分布云图

Fig. 7 Stress (σ_2) distribution along axes of tunnel

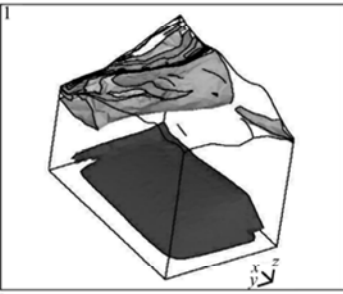


图 8 沿隧道轴线 σ_3 应力分布云图

Fig. 8 Distribution of stress σ_3 along axes of tunnel

同样,将各选定因素拟定的初始载荷乘以所求得的对数系数,再同时施加所有选定因素进行有限元计算得出工程区地应力场沿隧道轴线各节点主应力的分布规律,并做出沿隧道轴线各节点主应力状态云图,如图6~8所示。

3 结 论

(1) 从松树圆隧道地应力有限元计算结果及沿隧道轴线应力分布云图可以看出:受自重和构造力的作用,工程区地应力场明显受岩性、地形和断层形态的影响;在断层部位主应力值均有所降低;在地表层凸起部位应力降低,凹陷部位应力升高,产生应力集中。在软弱岩层部位主应力值均有所降低,而在地下深部上覆岩层较厚的部位及在坚固的岩层中有明显的应力集中区。从图中可见,沿隧道轴线上覆岩层较厚的部位有明显的应力集中,此区域易于发生岩爆。

(2) 冬瓜箐断层的下盘应力集中现象较明显,钻孔DZ-松-1穿过断层。

(3) 地应力隧道轴线变化规律为:①水平应力 σ_h 总体表现为隧道中部量值较高,约为9~11.56 MPa,向两端量值逐渐减小,通过断层时应力降低。②垂直应力 σ_v 的变化趋势与水平应力 σ_h 相近,中部量值较大,最大处为4.2 MPa,向两端量值逐渐减小,在两端

量值小于2 MPa,通过断层时应力有较大起伏。③最大主应力 σ_2 总体表现为中部高两端低,通过断层时应力有较大起伏,在冬瓜箐断层上下盘起伏幅值达5 MPa,方位总体表现为NEE向。④ σ_3 总体表现为中部量值较大,约为3~4.2 MPa,向两端量值逐渐减小,在两端量值小于2 MPa,通过断层时应力有一定起伏,在冬瓜箐断层上下盘起伏幅值2.2 MPa。

参考文献:

- [1] 蔡美峰.地应力测量原理和技术[M].北京:科技出版社,2000: 1-3. (CAI Mei-feng. Principle and technique of geo-stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000:1-3.)
- [2] 杨树新.区域构造应力场回归分析方法研究报告[R].1995:12-13. (YANG Shu-xin. Research report of tectonic stress field regression analysis method[R]. 1995:12-13.)
- [3] 中国地震局地壳应力研究所.中国地壳应力图[M].1994: 5-6. (China Seismological Bureau Institute of Crust Stress. Crust stress map of China[M]. 1994: 5-6.)
- [4] 阚荣举.我国西南地区现代构造应力场与现代构造特征的探讨[J].地球物理学报,1977,(2):21-23. (KAN Rong-ju. Discuss of present tectonic stress field and present tectonic feature in southwest area of China[J]. Journal of Geophysical Research[J]. 1997(2):21-23.)