

四角田隧道围岩稳定性三维有限元数值分析*

周小平, 徐小敏

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:云南大保高速公路四角田隧道地处峡谷地带, 工程地质条件比较复杂, 且地表水丰富。结合四角田隧道的工程实况, 利用 Drucker - Prager 屈服准则, 运用有限元法对该隧道进行三维非线性有限元模拟分析, 以评价其整体稳定性。根据计算分析结果, 指出了隧道的相对危险区域, 确定了实地重点监测的范围, 同时对同类工程也具有一定的指导意义。

关键词:四角田隧道; 围岩稳定性; 三维非线性有限元

中图分类号:U459.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006 - 7329(2006)01 - 0059 - 04

Numerical Analysis on Stability of Rock in Sijiaotian Tunnel

ZHOU Xiao - ping, XU Xiao - min

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The Sijiaotian Tunnel in Yunnan Dabao Highway lies in the narrow defile landscape, and the engineering geology condition is complex, with plenty of cienega. According to the actual situation of the Sijiaotian Tunnel Project in Yunnan Dabao Highway, the stability of the surrounding rock mass is studied by using a 3 - D non - linear FEM. The Drucker - Prager criterion is chosen as the failure criterion of the rock. The relatively dangerous zone and the monitoring points in the tunnel are determined. The numerical results show that the Sijiaotian Tunnel is relatively stable. The conclusion has some significance for guiding the construction of similar projects.

Keywords: Sijiaotian Tunnel; stability of the surrounding rockmass; 3 - D nonlinear finite element method

隧道位于云南省永平县西南部普棚乡四角田村附近, 地处构造侵蚀深切割高中山峡谷地形, 谷深坡陡, 隧道进出口为山地谷坡, 穿越山脊, 山脊顶部浑圆平缓, 谷坡冲沟发育, 地表水丰富。隧道范围内侏罗系、白垩系底层, 岩性以泥岩、石英砂岩为主, 局部为白云质灰岩。进口段受崇山群变质带的影响, 以板岩为主, 局部夹薄层状石英砂岩, 石英脉透镜体穿插。洞身与出口以石英砂岩为主, 局部为白云质灰岩, 覆盖第四系残坡积碎石土, 零星分布于山地谷坡低洼处。

隧道范围受崇山断裂带的影响, 发育北西向断裂(万宝山~四角田断裂)。在隧道进口附近 K443 + 625(下)、K443 + 670(上)穿过, 断裂两侧岩石普遍挤压破碎, 风化强烈, 节理裂隙很发育, 岩体呈层状碎裂构造, 基岩裂隙水发育。洞身 K444 + 330(下)、K444 + 350(上)附近穿过一条北西向次一级断层, 性质不明, 对洞室的稳定性不利。隧道范围内按 VIII 度区设防。

隧道区域内属半坚硬岩石组成, 基岩裂隙水对围岩的侵蚀能降低围岩的力学强度, 特别是板岩遇水软化, 降低围岩的稳定性。山脊基岩裂隙水难以富集, 水量较贫乏。进出口段谷坡低洼处, 板岩与石英砂岩, 石英砂岩与白云质灰岩接触面, 断层带附近, 基岩裂隙水较富集, 估计涌水量相对较大, 所以应加强防排水设计。

隧道进出了浅埋段, 特别是进口段, 地表水系发育, 坡面有大片农田, 灌溉水会不断渗入, 补给地下水, 所以围岩稳定性较差, 围岩类别较低, 容易产生拱部坍塌和侧壁位移变形。受断层构造的影响, 岩体挤压破碎, 节理裂隙很发育, 所以在隧道设计中应加强地表排水措施, 防止地面冲刷, 隧道口支护应加强。

1 计算参数选择

1.1 岩体弹塑性破坏准则

有限元分析中能较好地模拟岩体的力学特性的岩

* 收稿日期: 2005 - 08 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378096)

作者简介: 周小平(1970 -), 男, 江西瑞金人, 博士后, 副教授, 主要从事岩土工程的研究。

体弹塑性破坏准则是 Drucker - Prager 准则,一方面它克服了库仑准则在角点处导数不连续地问题,另一方面也很容易与库仑准则结合起来确定计算参数。因此,计算中岩体弹塑性破坏准则采用的是 D - P 准则^[1]。

Drucker - Prager 准则,可以表示为:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

其中: $I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 为应力第一不变量;

$$J_2 = \frac{1}{2} s_i s_i = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

为应力偏量第二不变量; α, K 为与岩石内摩擦角 φ 和粘结力 c 有关的参数:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (2)$$

$$K = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (3)$$

Drucker - Prager 准则计入了中间主应力的影响,又考虑了静水压力的作用,克服了 Coulomb - Mohr 准则的主要弱点,已在国内外岩土力学与工程的数值计算分析中获得广泛的应用。

1.2 衬砌及岩体的参数选择

对于有锚固系统的岩体,一般认为锚固作用的主要机理是提高了围岩的整体性,从而改善了岩体的受力性能。研究表明,锚固作用使岩体材料的 c, φ 值都得到了提高。计算中为了简化起见,通过将锚固区的 c, φ 值提高到与衬砌相同,同时缩小锚固区域来实现^[2]。

表1 岩体、衬砌混凝土力学参数

材料	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/^\circ$
岩体	26.6	20.0	0.25	15.0	30
衬砌混凝土	25.0	20.0	0.25	5.0	55

2 三维非线性有限元模拟分析

2.1 有限元网格划分、边界条件及计算方案

隧道的三维有限元分析采用大型通用有限元程序 ANSYS 8.0, 计算区域范围以隧道为中心向外取 5 倍隧道的半径, 计算长度取为半结构 500 m, 即整个的计算模型为 $105 \times 62 \times 500 \text{ m}^3$ 。采用 8 节点等参元, 共有 154 151 个三维实体单元, 63 482 个节点。

隧道的三维有限元分析计算模型的底面的 X、Y

和 Z 方向位移被完全约束, 半结构 $z = 500$ 处的面上在 Z 方向上受约束, 其余的各面可自由运动。计算中采用简化模型, 忽略其中的紧急停车带和行车横洞的影响。整个计算模型示意图如图 1 所示, 有限元网格划分、约束及荷载图如图 2 所示。计算得出了节点 2(-5.45, 0)、节点 4(0, 5.45)、节点 12(-5.3, -1.5) (其中节点 2 位于隧道侧面, 节点 4 位于隧道最顶部, 节点 12 位于拱脚位置) 在 X、Y、Z 方向的应力(位移)与 Z 方向上的距离之间的关系。

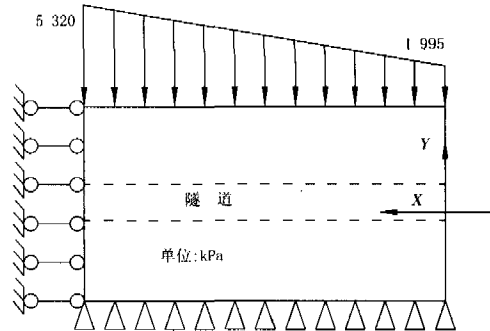


图1 计算模型示意图

隧道的三维有限元分析的边界应力的施加如下: 垂直应力为自重应力, 按实际地形计算, 为梯形分布, 其最大值: $p_1 = \gamma hb = 26.6 \times 75 \times 1 = 1\,995 \text{ kN/m}$, 最小值: $p_2 = \gamma hb = 26.6 \times 200 \times 1 = 5\,320 \text{ kN/m}$ (其中 $\gamma = 26.6 \text{ kN/m}^3$), 如图 1; 水平应力为梯形分布, 其最小值为: $p_3 = N \times \gamma hb + \sigma_0 = 0.5 \times 26.6 \times 105 \times 1 + 5\,000 = 6\,396.5 \text{ kN/m}$, 最大值为: $p_4 = N \times \gamma hb + \sigma_0 = 0.5 \times 26.6 \times 230 \times 1 + 5\,000 = 8\,059 \text{ kN/m}$ (其中 $= 0.5$ 为侧压力系数, $\sigma_0 = 5\,000 \text{ kN/m}$ 为构造应力), 如图 2。

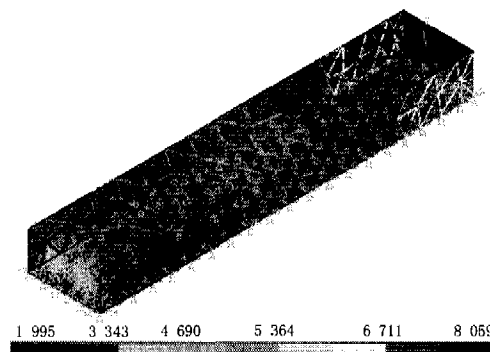


图2 计算模型网格、约束、荷载图

2.2 主要计算结果分析

计算可知, 隧道的最大垂直位移(Y方向) 27.420 mm。主要集中在隧道墙脚位置。据计算结果可知, 无塑性变形。X 方向上的最大压应力 -19.680 MPa, 最大拉应力为 2.508 MPa。应力集中区主要发生在隧道墙脚处。该最大压应力和最大拉应力均可满足岩石和衬砌容许抗压、拉强度。图 3 ~ 图 8 给出了节点 2、4、

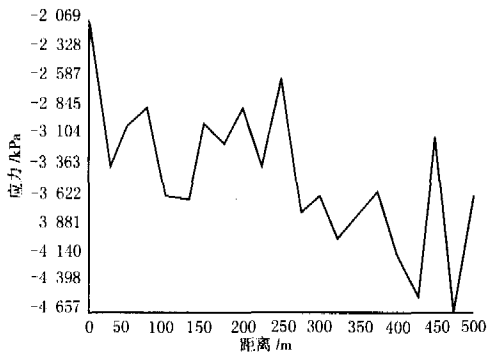


图3 节点2中X方向应力与Z方向距离图

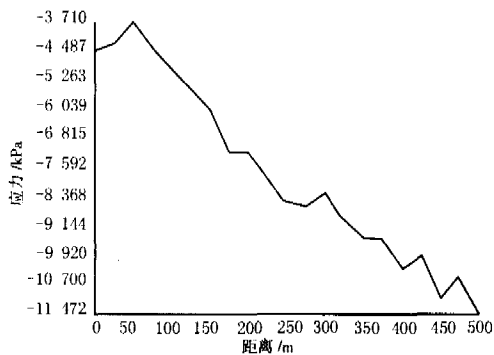


图4 节点2中Y方向应力与Z方向距离图

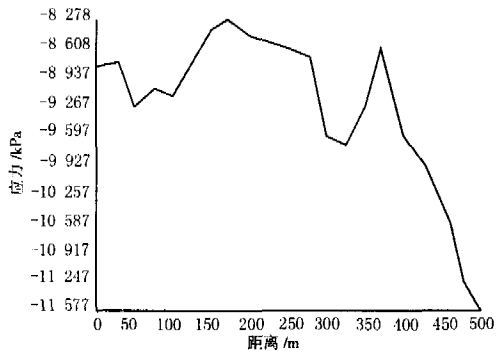


图5 节点4中X方向应力与Z方向距离图

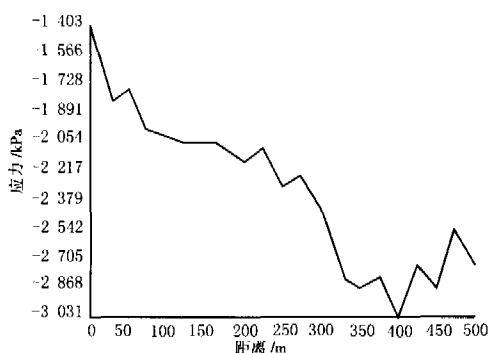


图6 节点4中Y方向应力与Z方向距离图

12的X和Y方向的应力沿Z方向距离的关系图。节点2的X方向应力最大值-4.658 MPa,Y方向应力最大值-11.47 MPa,其值都在岩体容许范围内;节点4的X方向应力最大值-11.576 MPa,Y方向应力最大值出现在靠近隧道中部的一条断裂带中为-30.307

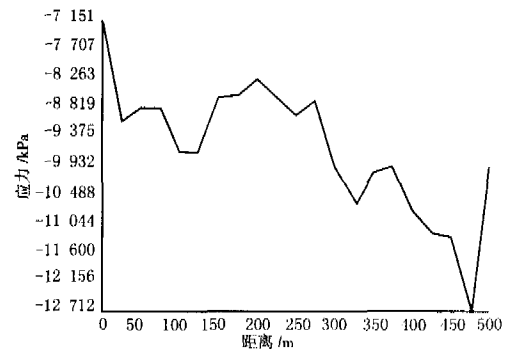


图7 节点12中X方向应力与Z方向距离图

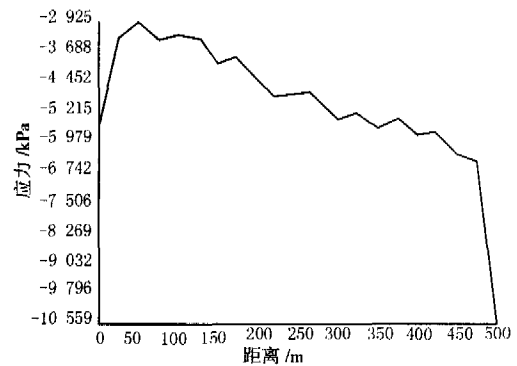


图8 节点12中Y方向应力与Z方向距离图

MPa,显然在此处应加强支护与实地监测;节点12的X方向应力最大值-12.712 MPa,Y方向应力最大值-10.559 MPa。根据计算分析结果可知,隧道基本处于稳定状态,但在靠近隧道中部的一条断裂带附近出现了较大的压应力集中,该处的支护设计应重新设计,并加强监测,以确保隧道的稳定与安全。另外,图9给出了节点4Y方向位移与Z方向距离的关系,节点4(即隧道的拱顶位置)在隧道中部出现最大的竖向(Y方向)位移为-8.045 mm,符合该工程的要求。

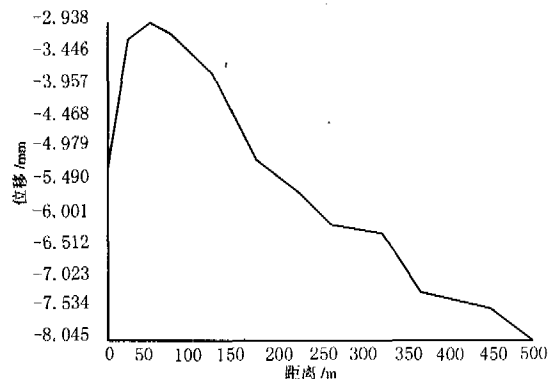


图9 节点4中Y方向位移与Z方向距离图

3 结论

1) 三维有限元分析结果表明,该隧道是稳定的。隧道在拱圈墙脚处发生应力集中,特别在行车道与人行道之间的部位出现局部的拉应力,在隧道监测中应

引起重视。

2) 另外由于隧道范围受崇山断裂带的影响,发育北西向断裂(万宝山~四角田断裂)。在隧道进口附近 K443+625(下)、K443+670(上)穿过,断裂两侧岩石普遍挤压破碎,风化强烈,节理裂隙很发育,岩体呈层状碎裂构造,基岩裂隙水发育。洞身 K444+330(下)、K444+350(上)附近穿过一条北西向次一级断层,性质不明,对洞室的稳定性不利。计算分析的结果也表明,该处的稳定性状况较差,应加强该处的支护与监测,隧道的进口段,地表水系发育,坡面有大片农田,灌溉水会不断渗入,补给地下水,所以围岩稳定性较差,围岩类别较低,容易产生拱部坍塌,侧壁位移变形。受断层构造的影响,岩体挤压破碎,节理裂隙很发育,所以在隧道的监测中应引起足够的重视。

3) 经过计算分析,可以得出隧道墙脚和断裂带附近应为本隧道的重点监测范围。隧道的有限元三维非线性模拟分析,确定了重点监测的范围,避免了盲目监测的发生,节约了监测成本,也给其他类似的工程起到了借鉴的作用。

参考文献:

[1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科

学出版社,2002.

- [2] 王桂林,郭超,张永兴,等. 复杂洞室地基稳定性数值模拟分析[A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 2004.
- [3] 吴满路,廖椿庭. 大茅隧道地应力测量及围岩体稳定性研究[J]. 地质力学学报,2000,6(2):71-76.
- [4] 唐建新,蔡世明,刘洪洲,等. 缙云公路隧道围岩位移分析[J]. 重庆大学学报,2002,25(12):137-140.
- [5] 李斯海. 厦门市仙岳山隧道围岩稳定性三维有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):211-214.
- [6] 张玉军,刘谊平. 上下行隧道立交处围岩稳定性的有限元计算[J]. 岩石力学,2002,23(4):511-515.
- [7] 朱维申,张玉军,邱祥波. 小湾水电站坝前堆积体预应力锚索加固方案的三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):459-463.
- [8] 阴可,张永兴,丁志诚. 高层建筑岩石洞室地基稳定性分析[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(1):17-20.
- [9] 于学馥,郑颖人,刘怀恒. 地下工程围岩稳定性分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.
- [10] 张应龙,刘增荣. 隧道围岩稳定性的有限元分析[J]. 探矿工程(岩石钻掘工程),2004,11:56-58.
- [11] 李杰,郭海燕,刘凌云,等. 丈八口隧道围岩稳定性分析[J]. 岩土力学,2004,25(S0):536-540.

(上接第 50 页)

于采用弥散的裂缝模型,裂缝模态上分析误差导致了在剪弯段内的应变分析上出现明显误差。

3) 从荷载-位移曲线的分析发现,对于剪切破坏构件,有限元分析的刚度和强度值偏大,挠度值偏小。

参考文献:

- [1] F. J. Vecchio, M. P. Collins. The Modified Compression - Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear[J]. ACI Structural Journal, 1986, 83(2):219-231.
- [2] Vecchio, F. J. Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation[J]. ASCE Journal of Structural Engi-

neering, 2000, 126(8):1 070-1 077.

- [3] 王伟. 纵筋率对剪跨比为 1.5 的有腹筋筒支梁受剪性能的影响[D]. 重庆:重庆大学,2003.
- [4] 蒋宁. 剪跨比为 1.5 的无腹筋筒支梁受剪性能试验研究及有限元分析[D]. 重庆:重庆大学,2005.
- [5] P. S. Wong, F. J. Vecchio, VT2&Formworks User's Manual [Z]. August 2000.
- [6] Vecchio, F. J. Analysis of Shear - critical Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Journal, 2000, 97(1):102-110.
- [7] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI-318-02)[S]. American Concrete Institute. Farmington Hills. Mich. . 2002.