

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0890-05

隧道危岩块体稳定性的地质-几何简明分析法

杨小永¹, 苏生瑞², 伍法权¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 隧道围岩局部块体稳定性分析是隧道设计和施工过程中必不可少的环节。以地质素描图出发点, 借助投影几何学的地质-几何简明分析法, 通过对块体几何作图分析的简化, 可以迅速地确定隧道危岩块体的位置、几何形态、塌滑类型以及稳定性系数, 从而直接及时地指导围岩支护加固的重点。最后, 运用该方法对曼歇 3 号隧道局部危岩块体的稳定性进行了评价, 得出了该处危岩块体的主要破坏方式是直接塌落的结论, 指出了隧道围岩支护加固的重点, 在地质工程实践中达到了预期的效果。

关 键 词: 隧道; 危岩块体; 稳定性评价; 地质-几何; 简明分析方法

中图分类号: U 451⁺.2

文献标识码: A

Simple geology-geometry analytical procedure on stability of tunnel critical rock-block mass

YANG Xiao-yong¹, SU Sheng-rui², WU Fa-quan¹

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Department of Geology Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Assessment on stability of partial rock-block mass is essential during tunnel's design and construction. On the basis of geological sketching explosion views, combined with projective geometry and the block theory, simple geology-geometry analytical procedure simplifies geometrical analysis of critical rock-block mass so as to define its space location, geometrical forms, different type of collapse or slippage, stability factor of single sided or double sided slippage, thus directly instructing purposive reinforcement of tunnel surrounding rock mass promptly. Finally, on the basis of geological sketching explosion views, this new simple analytical procedure is firstly applied to assess the stability of partial critical rock-block mass of tunnel Manxie 3; and a conclusion that plump collapse is the main destructive manner of critical rock-block mass is drawn. It not only assures the safety and continuity in the course of tunnel's construction, but also has been testified having anticipated good effect in actual geology engineering application.

Key words: tunnel; critical rock-block mass; assessment on stability; geology-geometry; simple analytical procedure

1 前 言

在隧道危岩块体稳定性评价中, 常用的方法有极射赤平投影法、实体比例投影法^[1]和综合分析评价法^[2]。地质-几何简明分析法在保持图解法直观形象性的前提下, 针对隧道危岩块体的具体几何形态, 通过各类结构面的水平投影将空间问题完全简化为平面问题, 借助投影几何知识获取危岩块体的各种几何参数, 在地质工程实践中显得更为简便、有效和实用。

地质-几何简明分析法的基本原理是: 根据结

构面的空间立体几何关系, 用地质素描和几何投影相结合的方法, 求出结构面之间的交线和交点在水平面上的投影, 再根据立体几何关系求出危岩块体的形状、高度、面积和体积, 据此分析计算被切割危岩块体的稳定性^[3]。本文应用这种改进的简便方法对规则四面体状危岩块体稳定性进行了有效分析, 试图探索更为实效、更为简捷的隧道危岩块体稳定性评价方法。

2 隧道危岩块体的几何分析

设面 OAB , OBC 和 OCA 为空间三个相交结构面

收稿日期: 2004-09-27

基金项目: 云南省交通建设科技项目 (TST (2004)538133C)。

作者简介: 杨小永, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事工程地质力学、岩土工程及体数值模拟方面的研究工作。E-mail: JohnEdison2000@163.com

(图1), 则面 ODO' 、 OEO' 和 OFO' 分别垂直于水平面和 3 个结构面的走向线; $O'D$ 、 $O'E$ 和 $O'F$ 分别代表 3 个结构面 OAB 、 OBC 和 OCA 的倾向; $\alpha_1(\angle ODO')$ 、 $\alpha_2(\angle OEO')$ 和 $\alpha_3(\angle OFO')$ 分别代表 3 个结构面 OAB 、 OBC 和 OCA 的倾角。

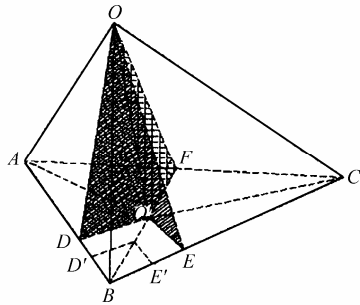


图1 空间相交结构面的水平投影

Fig.1 Planar projection of space joint discontinuity

因为 $O'D/\cot\alpha_1 = O'E/\cot\alpha_2 = O'F/\cot\alpha_3 = OO'$ 所以 $O'D:O'E:O'F = \cot\alpha_1:\cot\alpha_2:\cot\alpha_3$

即任意两个相交结构面交线的水平面投影线上的任意点到水平面上这两个结构面的距离之比等于这两个结构面倾角的余切值之比。

在以上投影几何知识理论的基础上, 根据隧道走向方位和幅员尺寸、同一高程结构面的产状和出露位置 (不在同一高程测的出露位置应换算成同一高程的位置), 按下述方法和步骤作图^[3]:

(1) 根据隧道走向方位和幅员尺寸, 以圆拱和直墙相交处高程为水平基准面, 依照比例作出隧道平面图 (图 2(a))。

(2) 根据结构面在水平基准面的出露位置和产状, 用地质作图法作出各结构面 (标出倾向和倾角)

与水平面的交线和交点 (图 2(b)), 其中 L_1 、 L_2 和 L_3 代表 3 个结构面。

(3) 根据结构面倾角余切值的比例关系, 分别在各结构面的任意垂线上截取各自的比例长度, 即截取长度比值为 $\cot\alpha_1:\cot\alpha_2:\cot\alpha_3$ (比例长度在结构面顺倾向一侧时各结构面均在顺倾向一侧; 反之, 各结构面均在背倾向一侧), 经过各比例长度线的端点用几何作图法分别做各对应结构面的平行线 (图 2(c)), 分别交于 A' 、 B' 和 C' , 连接 AA' 、 BB' 和 CC' 并延长交于 O' , O' 点即为隧道危岩块体的顶点 O 在水平面上的投影点。

(4) 过 O' 向 L_1 、 L_2 和 L_3 分别作垂线交于 D 、 E 和 F 点, 按作图比例量出 $O'D$ 长度, 则危岩块体的高度 $h_1 = O'D \tan\alpha_1$ ($\alpha_1=55^\circ$), 同理可知, $h_2 = O'E \tan\alpha_2$, $h_3 = O'F \tan\alpha_3$ 。

(5) 如果 $h_1 \approx h_2 \approx h_3$, 则作图基本准确, 否则应重新作图, 反复校核直至 $h_1 \approx h_2 \approx h_3$ 。

(6) 根据几何图解结果, 确定危岩块体的空间几何形态和几何参数 (面积、体积和重量)。

3 隧道危岩块体的失稳方式

隧道规则四面体状危岩块体的失稳方式一般有 3 种^[4]: 直接塌落、沿单面滑动和沿双面滑动, 即脱离母岩直接掉落、沿某 i 结构面滑动和沿 i 、 j 结构面的交线滑动。

一般地, 危岩块体在塌滑时必须满足以下条件^[5]:

①边界条件: 一般必须有 3 组以上结构面交汇才能塌落; ②相容条件: 存在塌滑方向, 块体中每一点沿下平行移动时只穿过临空多边形; ③平衡

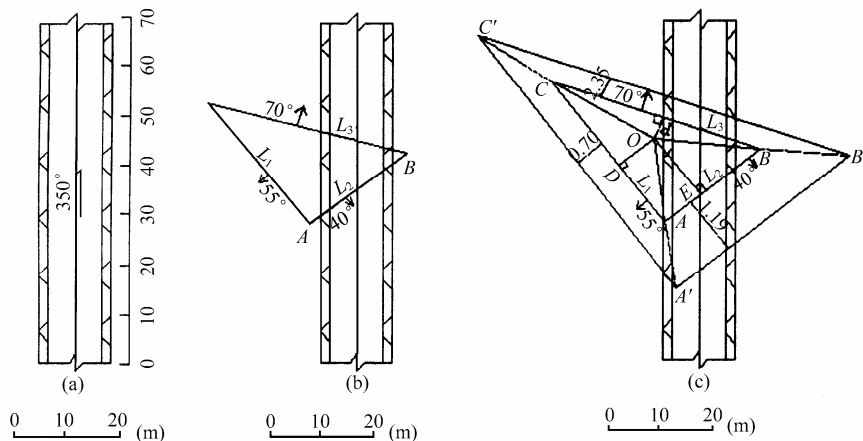


图2 规则四面体状块体的地质-几何作图

Fig.2 Geometric graph of regular tetrahedral rock-block mass

条件: 沿重力方向的向量可以分解为滑动面的垂直压力和沿滑面的非 0 力。

在满足以上塌滑条件的前提下, 判别规则四面体状危岩块体的塌滑类型和方向:

(1) 直接塌落: 如果规则四面体状危岩块体的顶点 O 在水平面上的投影 O' 落在 $\triangle ABC$ 内部, 则危岩块体直接塌落, 否则为单面或双面滑动 (图 3)。

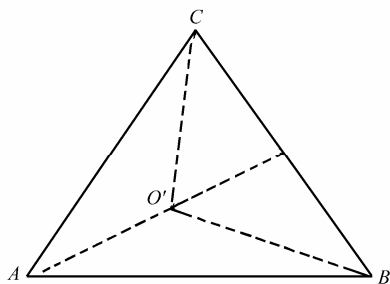


图 3 塌落型四面体水平投影
Fig.3 Planar projection of falling tetrahedron

(2) 单面滑动和双面滑动: ①判别单面或双面滑动的危岩块体时必须先检验相容条件, 其判别步骤如下(图 4): 四面体的实体比例投影为 $O'ABC$, 过 O' 作 AB, BC, AC 的垂线, 垂足分别为 E, D 和 F 。如果 D 在线段 BC 上(即 $BD + DC = BC$), 则危岩块体 $OABC$ 沿 OBC 面滑动时满足相容条件, 否则不满足相容条件。同理可判别危岩块体 $OABC$ 沿 OAB 、 OAC 面滑动时是否满足相容条件。②在 $O'A$ 、 $O'B$ 、 $O'C$ 、 $O'E$ 、 $O'D$ 和 $O'F$ 中取最短者, 其所对应的方向即为 $OABC$ 的滑动方向。若滑动方向是 $O'D$ ($O'E$ 或 $O'F$), 则危岩块体 $OABC$ 沿 OBC (OAB 或 OAC) 单面滑动; 若滑动方向是 $O'A$ ($O'B$ 或 $O'C$), 则危岩块体 $OABC$ 沿 OAC 、 OAB (OAB 、 OBC 或 OAC 、 OBC) 双面滑动。

4 危岩块体的稳定性系数

在确定了危岩块体的几何形态、失稳方式的基础上, 分别就沿单面滑动和沿双面滑动的危岩块体稳定性系数计算方法进行讨论:

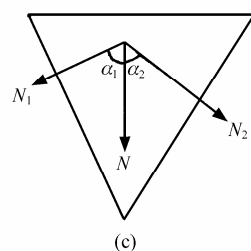
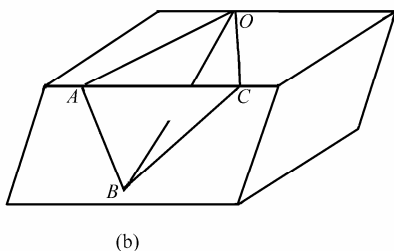
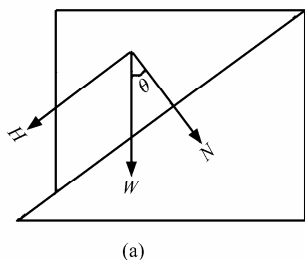


图 6 沿双面滑动受力图
Fig.6 Dynamic graph representation of double-sided slippage

(1) 沿单面滑动稳定性系数^[6]

危岩块体沿单面滑动时 (图 5), 块体的下滑力为主动力合力 W 的切向作用力, 抗滑力为主合力的摩擦力, 根据摩尔-库仑准则, 沿单面滑动时的稳定性系数 K_t 为:

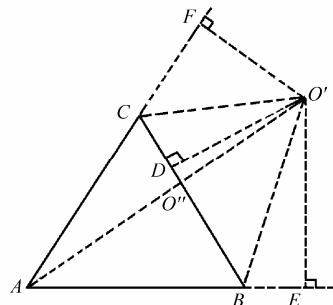


图 4 滑移型四面体水平投影
Fig.4 Planar projection of slip tetrahedron

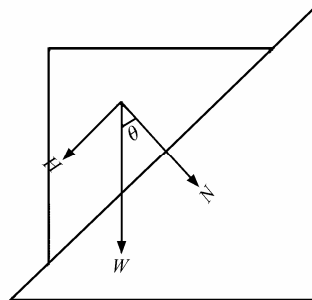


图 5 沿单面滑动受力图
Fig.5 Dynamic graph representation of single-sided slippage

$$K_t = \frac{W \cos \theta \tan \varphi + cS}{W \sin \theta} \quad (1)$$

式中 c 、 φ 、 S 分别为主滑面的凝聚力、内摩擦角和滑面面积, θ 为主滑面的倾角。

(2) 沿双面滑动稳定性系数^[7]

危岩块体沿 OAB 和 OBC 双面滑动时, 交线 OB 的倾向为块体真正的滑移方向 (图 6(b))。同理, 块体所受主合力 W 可以分解为平行和垂直滑移线的作用力 H 和 N (图 6(a)), 再将 N 沿两滑面的矢量方向分解为 N_1 和 N_2 , 则:

$$H = W \sin \theta, \quad N = W \cos \theta \quad (2)$$

$$N_1 = \frac{N \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad N_2 = \frac{N \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3)$$

最终求得沿双面滑动时的稳定性系数 K_{ij} 为:

$$K_{ij} = \frac{\sum_i (N_i \tan \varphi_i + c_i S_i)}{W \sin \theta} \quad (4)$$

其中 i, j 代表主(次)滑面的编号, α_1, α_2 为垂直方向力 $\bar{N}$ 与滑面 i, j 法向矢量的夹角, c_i, φ_i, S_i 分别为主(次)滑面的凝聚力、内摩擦角和滑面面积。

5 隧道局部地段危岩块体稳定性评价

根据曼歇3号隧道局部地段(k3+915~k3+925)施工期绘制的地质素描展开图(图7)^[8], 以拱架和直墙相交处高程为水平基准进行空间结构面的水平投影, 在此基础上采用地质-几何简明分析方法对隧道危岩块体进行几何分析, 获取危岩块体的几何参数, 进而确定其失稳方式和滑移稳定性系数, 最终对隧道局部危岩块体稳定性进行评价, 为围岩的喷锚支护设计提供理论依据, 确保高速公路隧道的顺利施工和安全运营。

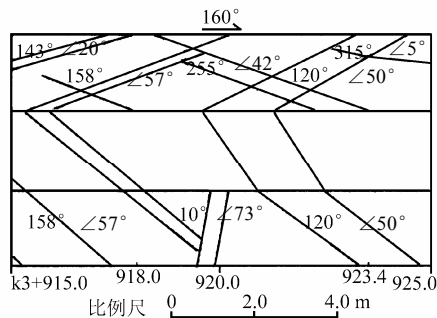


图7 曼歇3号隧道局部地质素描图
Fig.7 Partial geological sketching views of tunnel Manxie 3

(1) 依据地质素描展开图, 约 k3+920 里程处围岩发育3组结构面, 产状分别为 $158^\circ \angle 57^\circ$ 、 $10^\circ \angle 73^\circ$ 和 $255^\circ \angle 42^\circ$ (图7), 根据隧道设计尺寸和走向方位, 运用地质和几何相结合的方法做出空间结构面的水平投影图(图8)。

(2) 经反复作图校核, 根据3个结构面倾角求得危岩块体的高度分别为 $h_1=2.464$ m, $h_2=2.452$ m, $h_3=2.457$ m, 由于 $h_1 \approx h_2 \approx h_3$, 故此时作图基本准确。

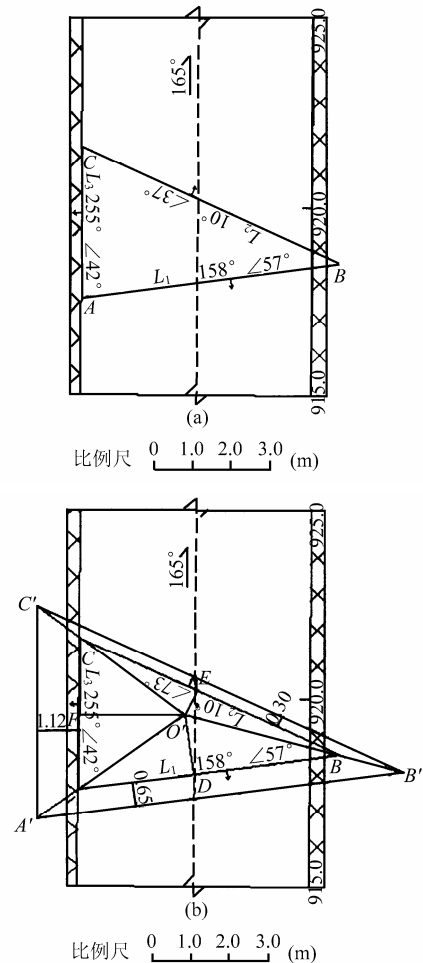


图8 隧道 k3+920 处规则四面体状危岩块体空间结构面水平投影图

Fig.8 Planar projection of space joint discontinuity in regular tetrahedral critical rock-block mass at k3+920

(3) 根据空间结构面的水平投影图, 计算危岩块体的几何参数: ①按比例长度量得水平面上 AB , BC 和 CA 的长度分别为 $l_1=6.80$ m, $l_2=7.50$ m, $l_3=4.00$ m, 则 $s = l_1 + l_2 + l_3 / 2 = 9.15$ m, 危岩块体的高度 $h = (h_1 + h_2 + h_3) / 3 = 2.457$ m, 据此获取危岩块体几何分析的几何参数:

$$\text{侧面积: } S_{\Delta OAB} = \frac{1}{2} \times l_1 \times \sqrt{h^2 + O'D^2} = 9.96 \text{ m}^2$$

$$\text{同理可得: } S_{\Delta OAB} = 3.53 \text{ m}^2, \quad S_{\Delta OCA} = 7.34 \text{ m}^2$$

$$\text{底面积: } S_{\Delta ABC} = \sqrt{s \times (s - l_1) \times (s - l_2) \times (s - l_3)} = 13.51 \text{ m}^2$$

$$\text{块体体积: } V_{\Delta OABC} = \frac{1}{3} \times S_{\Delta ABC} \times h = 11.06 \text{ m}^3$$

$$\text{块体重量: } W = \rho_{\text{III}} V_{\Delta OABC} = 2.5 \times 10^4 \times 11.06 = 2.76 \times 10^2 \text{ kN}$$

(4) 在危岩块体几何分析的基础上, 判别此处规则四面体状危岩块体的失稳方式: ①首先根据判断得知危岩块体满足塌滑的边界条件、相容条件和

平衡条件。②根据空间结构面的水平投影图图解分析知,由3组结构面和临空面组成的规则四面体状危岩块体顶点 O 在水平面上的投影 O' 位于结构面水平投影所围的 ΔABC 范围内,故此处危岩块体的失稳方式为直接塌落。

6 结 论

本文着重介绍了地质-几何简明分析法的基本原理、几何作图分析、块体失稳方式判别和滑移稳定性系数计算,对曼歇3号隧道局部地段危岩块体稳定性进行了分析评价,得出以下结论:

(1) 以地质素描图出发点,借助几何投影知识的地质-几何简明分析法,可以形象直观地判别危岩块体的几何形态和失稳方式,对于隧道围岩的喷锚支护具有重大的指导意义。

(2) 地质-几何简明分析法在对原有地质-几何作图法进行必要改进和完善的基础上,得出的危岩块体稳定性评价结论更为准确和可靠,丰富和发展了危岩块体稳定性评价的理论方法。

(3) 地质-几何简明分析法在各类地下工程潜在危岩块体稳定性分析中将有着广阔的应用前景,是一种便于工程人员现场掌握的行之有效的简单、实效的方法。

参 考 文 献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [2] 谢全敏,夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学,2002,23(6): 775—777, 781.

XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Comprehensive assessment method of stability of critical rock-block mass and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23 (6): 775—777, 781.

- [3] 刑念信. 地下开挖中的围岩稳定性评价[A]. 见:中国地质学会工程地质专业委员会. 全国第三次工程地质大会论文集[C]. 成都:成都科技大学出版社,1988. 1 249—1 252.
- XING Nian-xin. Assessment on stability of surrounding rock mass in underground excavation[A]. In: **Committee of Engineering Geology, Geological Society of China. Collected Works of National 3rd Engineering Geology Convention**[C]. Chengdu: Chengdu Science & Technology University Press, 1988. 1 249—1 252.
- [4] 王士天,黄润秋,尚岳全,等. 澜沧江小湾水电站大跨度地下洞室群围岩稳定性研究[R]. 成都:成都理工学院,1995.
- [5] Unwedge User's Guide, 3D Visualization of potentially unstable wedges in the rock surrounding underground excavation and calculation of factors of safety and support requirements for these wedges[R]. Toronto: Rocscience, 1 992—1 999.
- [6] 王思敬,杨志法,刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [7] 刘军. 地下工程围岩块体稳定性研究[博士学位论文 D]. 成都:成都理工学院,2001.
- [8] 杨小永. 高速公路隧道围岩稳定性研究[硕士学位论文 D]. 西安:长安大学,2004.

上接第 889 页

参 考 文 献

- [1] Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London: George Allen & Unwin, 1985.
- [2] 任伟中,白世伟,葛修润. 厚覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(10): 1 715—1 719.
- REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, GE Xiu-run. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1 715—1 719.

- [3] 舒继森, Fleurisson J A. 采矿工程与地表位移的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 30—33.
- SHU Ji-shen, Fleurisson J A. Relation between movements of earth's surface and mining engineering[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 1997, 26(4): 30—33.
- [4] 高明中. 急倾斜煤层开采岩移基本规律的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 441—445.
- GAO Ming-zhong. Similarity model test of strata movement with steep seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 441—445.
- [5] 白世伟,杨春和,李一帆,等. 江西铜业集团东乡铜矿开采可视化及围岩稳定性研究[R]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2005.