

基于 GIS 和最小势能原理的斜坡稳定性 三维分析

王明华¹, 李小强², 白世伟³

(1. 武汉工程大学 环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430073; 2. 深圳市工勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518026;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 借助 GIS 的数据管理和空间分析功能, 提出了一个基于最小势能原理的斜坡稳定性三维计算方法。最小势能原理针对滑面和滑体进行系统分析, 从而避免了采用常规方法计算所需要的各种假设条件。从三维地质模型中提取滑体几何参数和物理力学参数, 可以很方便地计算任意形态滑面的滑坡稳定性系数, 三维与二维计算的结果比较证明了该方法的合理性和适用性。

关键词: 数值分析; 最小势能原理; 斜坡稳定性三维分析; 三维地质模型

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)13-2376-04

3D STABILITY ANALYSIS OF SLOPE BASED ON GIS AND PRINCIPLE OF MINIMUM POTENTIAL ENERGY

WANG Ming-hua¹, LI Xiao-qiang², BAI Shi-wei³

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;
2. Shenzhen Gongkan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518026, China;
3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Making the best of data management and spatial analysis of GIS, this paper puts forward a method for 3D stability calculation of slope based on the principle of minimum potential energy; of which the adaptation to systematic analysis of sliding surface and mass, assumptions in traditional methods are avoided in this one. Geometric and mechanical parameters, which can be easily acquired from 3D geoscience model, are absolutely necessary for stability index calculation of slope with various shapes. Its rationality and fitness are proved by comparison of 2D and 3D calculation results.

Key words: numerical analysis; principle of minimum potential energy; 3D stability analysis of slope; 3D geoscience model

1 引言

天然斜坡或人工边坡形成过程中, 受坡形、地质结构、地下水、地震及人类工程活动的影响, 内部应力状态不断变化, 斜坡岩土体为适应新的应力状态将发生不同形式、不同规模的变形破坏。斜坡

稳定性三维计算是一个至今未能很好解决的理论问题, 目前常用的计算方法包括二维和三维极限平衡方法、有限元、离散元与 FLAC 等数值方法。

GIS 具有强大的数据管理、空间分析和可视化功能, 因此, 在地学领域关于三维空间信息的研究中, 三维地质建模作为三维 GIS 应用于岩土工程的重要内容, 已成为当前数学地质、工程地质等研究

收稿日期: 2004-03-08; **修回日期:** 2004-05-12

作者简介: 王明华(1976-), 男, 博士, 1998年毕业于成都理工学院水文地质工程地质系水工专业, 现任讲师, 主要从事地质灾害防治和边坡工程方面的教学与研究工作。E-mail: wmh1976@163.com.

的前沿和热点。由于斜坡工程所包含的数据为典型的
空间多源数据，因此，利用 GIS 技术手段对斜坡
稳定性进行研究具有其独特的优越性。

目前，各国学者采用 GIS 分析斜坡稳定性问题
主要采用的是根据各种影响因素建立评价指标体
系，是一种定性分析方法^[1-4]。在根据力学原理进
行斜坡稳定性定量分析的探索中，无限斜面模型采
用得较多^[5,6]。众所周知，无限斜面模型假定边坡
为无限长，且其潜在滑动面平行于地表面，其实质
是一个一维模型，适用性不强。在此基础上，文[7]
假定初始滑动面为椭球形，利用 GIS 的空间数据处
理功能结合改进的 Hovland 三维分析模型，不考虑
每个柱体之间的作用力，将每个柱体的滑动力和抗
滑力相加从而得到整个滑体的稳定性系数。文[8]则
由简化 Bishop 法导出了三维稳定性计算的层分析
公式，并以单个岩柱的抗滑力矩与下滑力矩之比绘
制了岩体抗滑系数图谱，以此来判定岩质边坡的不
稳定部位。基于三维地质模型的斜坡稳定性分析的
优点，可以很方便地实现模型的“块分”。但是，由
于三维计算的复杂性，加之 GIS 空间数据形式和模
型计算中所需数据形式之间的匹配困难^[9]，因此，
这一课题具有继续探索研究的必要。

本文在建立的斜坡三维地质模型基础上，通过
引入基于系统分析的最小势能方法，结合具体工程
实现了 GIS 支持下的任意形状滑面的斜坡稳定性三
维快速、实时分析评价。

2 斜坡稳定性三维计算的最小势能方 法

从 20 世纪 70 年代开始，各国学者先后提出了
很多三维稳定性分析方法，文[10]曾经通过对 20 篇
文献资料的总结分析，列举了这些方法的特点和局
限性。纵观以往提出的这些三维计算方法，可以看
出这些方法都是在二维“条分法”的基础上发展而
来的三维“块分法”。二维条分已经是超静定问题，
需要引入假设来求解，将其推广到三维，就需要引
入更多的假设条件。文[11]计算了以物理和力学要
求为基础的可建立的方程个数以及这些方程中的未
知数数目，并发现对于离散为 n 行和 m 列条柱的破
坏体，总共需要引入 $8mn$ 个假定。而采用最小势能
原理对斜坡稳定性进行系统分析，可以避免这一问
题。下面对这一方法作简单介绍^[12]。

假设滑体为刚体，自身不可变形，但在滑体和

基岩接触的各个面上均发生弹性变形，这种变形可
用一系列弹簧来模拟，弹簧的刚度系数设为 k_i 。假
设滑体受到的合外力 $\vec{R} = \{R_1, R_2, R_3\}$ ，在 \vec{R} 的作
用下，滑体将要滑动的瞬间，为了达到平衡状态，发
生一个微小位移 $\vec{d} = \{d_1, d_2, d_3\}$ 。设面的外法线矢
量为 \vec{n}_i ，微小位移 \vec{d} 使得各个接触面发生相应的法
向位移分量 \vec{d}_i ， \vec{d}_i 的方向为接触面的外法线方向，
大小为

$$d_i = \vec{d}\vec{n}_i = d_1n_{i1} + d_2n_{i2} + d_3n_{i3} \quad (1)$$

假设系统的总势能为 V ，每个面的势能为 V_i ，
外力所作的功为 W ，可以得出以下公式：

$$V = V(d_1, d_2, d_3) = \sum_{i=1}^n V_i - W = \sum_{i=1}^n 1/2k_i(\vec{d}\vec{n}_i)^2 - \vec{R}\vec{d} \quad (2)$$

欲使稳定系统的势能最小，应满足：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial d_1} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial d_2} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial d_3} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)，化简得

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_3 & b_2 \\ b_3 & a_2 & b_1 \\ b_2 & b_1 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中，

$$\begin{aligned} a_1 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i1}^2 & b_1 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i2} n_{i3} \\ a_2 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i2}^2 & b_2 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i1} n_{i3} \\ a_3 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i3}^2 & b_3 &= \sum_{i=1}^n k_i n_{i1} n_{i2} \end{aligned}$$

由此可以解得

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{q} \begin{bmatrix} m_1 & p_3 & p_2 \\ p_3 & m_2 & p_1 \\ p_2 & p_1 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中，

$$\begin{aligned} m_1 &= a_2 a_3 - b_1^2 & p_1 &= b_3 b_2 - a_1 b_1 \\ m_2 &= a_1 a_3 - b_2^2 & p_2 &= b_3 b_1 - a_2 b_2 \\ m_3 &= a_1 a_2 - b_3^2 & p_3 &= b_1 b_2 - a_3 b_3 \\ q &= m_1 a_1 + p_3 b_3 + p_2 b_2 \end{aligned}$$

设每个面的相应的法向应力大小为 N_i ，其作用

点通过各接触面的中心，则有

$$N_i = k_i d_i = k_i (d_1 n_{i1} + d_2 n_{i2} + d_3 n_{i3}) \quad (6)$$

求得了各个面上的法向力以后，通过静力平衡公式可以很容易地求得稳定性系数。

3 GIS 支持下的斜坡三维地质模型和稳定性求解步骤

3.1 三维地质模型的建立

三维地质模型是稳定性计算的基础，对斜坡而言，滑动面的确定是其中的关键，因此，斜坡三维模型必须以地质结构为基本依据，力求通过已有资料选用恰当的空间插值方法，尽可能准确地描述滑面的形态。

某高速公路沿线发育一目前相对稳定的老滑坡，滑坡后壁为变质辉绿岩与变粒岩夹片岩的分界面，滑坡体主要发育在变质辉绿岩中，滑动带基本与变质辉绿岩内分布的破碎理平行，破碎带内可见明显的滑动擦痕，滑动面尚未完全贯通，滑体前缘变粒岩夹片岩受挤压作用强烈弯曲，岩层十分破碎。滑坡前后缘相对高差 168 m，自然坡角 20°~35°。图 1 是研究区的三维地质模型；图 2 则表示老滑坡滑面形态；图 3 为滑面埋深等值线。

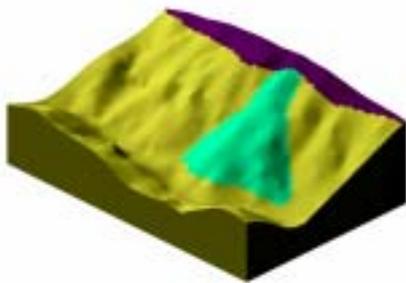


图 1 三维地质模型
Fig.1 3D geological model

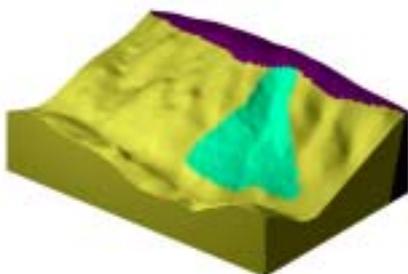


图 2 老滑坡滑面形态
Fig.2 Sliding surface shape of ancient landslide



图 3 滑面埋深等值线
Fig.3 Contours of buried depths of sliding surfaces

3.2 稳定性计算步骤

在三维地质模型的基础上，从 GIS 空间数据库中提取滑坡周界内各栅格的属性信息，导入式(5)，(6)，即可求得每个面上的法向应力，进而求得稳定性系数。采用此方法进行计算的主要步骤包括：

(1) 建立坐标系，求解滑面。

首先建立坐标系， x 和 y 轴的正方向分别与滑动方向和重力方向反向(其中滑动方向的确定根据滑坡变形特征结合经验综合确定)， z 轴的正方向按右手法则确定。沿滑动方向尺寸最大的纵断面称之为中性面，如果滑裂面对称，中性面就是对称轴所在的平面。

将滑面 $surf$ 离散为 N 个曲面： $surf_1, surf_2, \dots, surf_N$ 。每个曲面近似为平面处理。从三维地质模型中经分析转换可以获得表征滑坡几何形态与力学参数的数据包括：

面积 s_i ，与水平面(xoz 面)的夹角为 α_i ，外法线 $\vec{n}_i = \{n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}\}$ ；

上覆地层在面上的平均自重应力为 σ_{bi} ；

刚度系数 $k_i = s_i \gamma_i$ ，其中， γ_i 为其上覆地层的平均容重；

粘聚力 c_i ，内摩擦角 φ_i 。

(2) 通过式(5)求解滑体最小位移 \vec{d} 。

(3) 通过式(6)求解滑面法向应力。

(4) 通过力的平衡求解安全系数。

面 $surf_i$ 上的抗滑力 T_i 满足：

$$T_i = \frac{N'_i \tan \varphi_i + c_i s_i}{F s_i} \quad (7)$$

将式(7)带入 x 方向上的静力平衡方程，即

$$\sum_{i=1}^N T_{i1} + \sum_{i=1}^N N'_{i1} + R_1 = 0 \quad (8)$$

据式(8)即可求得滑体的稳定性系数。

3.3 计算结果分析

计算过程中, 采用了文[13]中提供的物理力学参数, 以便将计算结果同该模型的二维计算结果进行比较。结果表明: 天然状态下, 二维计算所得的稳定性系数为 0.825, 而三维计算所得的稳定性系数为 1.021, 后者比前者大 23.76%, 与根据野外地质现象所得的定性结果基本吻合, 说明运用此种方法进行斜坡稳定性三维分析是合理的。

4 结论与讨论

(1) 斜坡工程数据是一种典型的时空多源数据, 借助 GIS 强大的数据管理、空间分析与可视化功能, 充分利用各种地质勘探资料, 可以对任意形状滑面的形态特征作准确、细致的描述, 并能提供三维块分法计算所需要的几何参数和物理力学参数的数值模型。

(2) 利用最小势能原理进行斜坡稳定性计算是一种基于对滑体和滑面进行系统分析所得到的三维分析方法, 可以避免常规方法计算所需的各种假设条件。计算结果表明该方法是行之有效的。

(3) 采用 GIS 进行斜坡稳定性三维分析方法具有传统方法无法比拟的优越性, 该方法提供了一种全新的求解途径。但是, 由于影响斜坡稳定性的因素繁多, 目前三维计算在理论上仍存在诸多问题, 要想获得更符合工程实际的解答需要作进一步的深入研究。

参考文献(References):

- [1] Gupta R P, Joshi B C. Landslide hazard zoning using the GIS approach[J]. *Engineering Geology*, 1990, (2): 119–133.
- [2] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping[A]. In: Moore D, Hungr O, ed. *Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. 1 157–1 165.
- [3] 向喜琼, 黄润秋, 许强. 地质灾害危险性评价系统的实现[J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(3): 76–78.(Xiang Xiqiong, Huang Runqiu, Xu Qiang. Realization of geohazards regional risk evaluation system based on MAPGIS[J]. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(3): 76–78.(in Chinese))
- [4] 兰恒星, 伍法权, 周成虎. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. *科学通报*, 2003, 48(5): 507–512.(Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Chenghu. Spatial evaluation and forecast landslide risk based on GIS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(5): 507–512.(in Chinese))
- [5] 李先华, 管群, 杨武年, 等. 数字地形图上滑坡动态方向稳定性系数的确定与滑坡滑动方向的确定[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 308–311.(Li Xianhua, Guan Qun, Yang Wunian, et al. Calculation of dynamic directional stability coefficient and determination of sliding direction for landslide in digital landform map[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(3): 308–311.(in Chinese))
- [6] 王旭春, 何满潮, 蒋宇静, 等. 在 GIS 中实现基于力学原理的滑坡稳定性计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(6): 977–980.(Wang Xuchun, He Manchao, Jiang Yujing, et al. Stability analysis of landslide based on mechanics principle in GIS[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(6): 977–980.(in Chinese))
- [7] 谢谟文, 江崎哲郎, 周国云, 等. 基于 GIS 空间数据库的三维边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(10): 1 494–1 499.(Xie Mowen, Esaki Tetsuro, Zhou Guoyun, et al. 3D slope stability analysis based on GIS spatial database[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1 494–1 499.(in Chinese))
- [8] 李冬田, 余运华. 岩坡稳定的层分析方法与抗滑系数图谱[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(1): 18–22.(Li Dongtian, Yu Yunhua. Layer analysis method for rock slope stability and the image and spectrum of slide resistance factor[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(1): 18–22.(in Chinese))
- [9] 赵晓东, 宋振骥, 兰柏超. GIS 与工程模型耦合应用模式研究[J]. *计算机应用*, 2001, 21(10): 4–5, (Zhao Xiaodong, Song Zhenqi, Lan Baichao. Study on the mode of coupling application between GIS and engineering model[J]. *Journal of Computer Applications*, 2001, 21(10): 4–5.(in Chinese))
- [10] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slope[J]. *J. Geotech. Eng., ASCE*, 1996, 122(7): 577–596.
- [11] Lam L, Fredlund D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30: 905–919.
- [12] 李小强. 最小势能原理在边坡稳定性分析中的应用研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.(Li Xiaoqiang. Research on slope stability analysis using the principle of minimum potential energy[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003.(in Chinese))
- [13] 白世伟, 王明华. 汉十高速公路韩家垭边坡工程地质信息管理和可视化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1 597–1 600.(Bai Shiwei, Wang Minghua. Study on engineering geology information management and visualization of Hanjiaya slope in Wuhan—Shiyan highway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1 597–1 600.(in Chinese))