

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-049-03

复杂边坡稳定性的二维与三维分析

谭文辉, 谢谟文, 蔡美峰

(北京科技大学 土木工程系, 北京 100083)

摘要: 目前, 在边坡稳定性分析中广泛地采用二维极限平衡分析方法进行研究。但是对于地形、地层、地下水、岩体结构等条件复杂的边坡, 仅用二维极限平衡分析方法进行研究是不够的, 二维分析忽略了边坡的三维效应, 而复杂边坡往往受三维效应影响大。但至今三维极限平衡方法还不是很完善。因此, 本文结合一工程实例, 采用二维与三维极限平衡分析相结合的方法对其边坡的稳定性进行了分析。研究结果表明, 对于复杂边坡, 应用二维和三维稳定性分析相结合的方法进行研究是一种较为恰当的选择。

关键词: 边坡稳定性; Janbu 法; SLOPE 2000; 3DSlopeGIS

中图分类号: TD 854.6

文献标识码: A

Two-dimensional and three-dimensional limit equilibrium analyses of complex slope stability

TAN Wen-hui, XIE Mo-wen, CAI Mei-feng

(Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 1000831, China)

Abstract: In current slope engineering, 2D limit equilibrium method is widely used. But it isn't enough for slopes with complex conditions of geology, groundwater, rock structure etc. 3D effect is ignored in 2D analysis, while it has great effect on complex slopes. However, 3D limit equilibrium method is not perfect at present. Therefore, a synthetical method of using both 2D and 3D limit equilibrium methods is proposed to analyze a practical slope stability. The result shows it is a good method for complicated slopes.

Key words: slope stability; Janbu method; SLOPE 2000; 3DSlopeGIS

1 引言

边坡的稳定是矿山安全高效开采的保证, 目前, 我国大多数大型露天矿山已转入深凹露天开采, 其最终形成的边坡垂直高度将达 400~700 m, 成为名符其实的高边坡。高边坡中, 由于地质环境、岩体特性、荷载、施工环境与条件等都较为复杂^[1], 故边坡的稳定性分析更加重要。在工程实践中, 常用的边坡稳定分析方法为极限平衡分析方法, 目前广泛采用的是基于平面应变假设的二维极限平衡分析方法。实际上, 边坡的破坏往往表现为三维的几何形态, 但二维极限平衡分析不能反映这一现象, 而在三维稳定性分析中, 可以考虑边坡复杂的地形、地层分布, 地下水分布及非均匀空间分布的岩土力学参数等, 目前各种三维极限平衡方法均引入了大

量的假定。许多三维分析方法还对滑裂面的形状作出了假定, 如假设滑动面为左右对称、对数螺旋面等, 这样, 就影响了边坡三维极限平衡分析在实际中的应用。

因此, 对于复杂的大型边坡问题, 可考虑采用二维和三维分析模型相结合的方法来分析边坡的稳定性。本研究拟采用二维极限平衡分析软件 SLOPE 2000 与三维极限平衡分析软件 3DSlopeGIS 对我国最大的露天铁矿——水厂铁矿高边坡进行稳定性分析。

2 边坡稳定性的多维分析

2.1 软件简介

SLOPE 2000 是香港理工大学郑榕明主持开发的边坡稳定性极限平衡计算软件, 最大的特点是

收稿日期: 2005-03-30

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目资助 (No.2001BA609A-08)

作者简介: 谭文辉, 女, 1969 年生, 博士, 讲师, 主要从事边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: wenhui.t@163.com。

采用模拟退火方法自动搜索圆弧和非圆弧临界滑面^[2, 3]。传统的边坡临界滑面的确定方法对于圆弧滑坡而言,有作图法、诺谟法、试算法等;对于非圆弧滑坡而言,有单纯形法、负梯度法、DFP 法、动态规划法、基于最优控制理论的滑移场法、随机模拟搜索法等。由这些方法编制的程序往往存在不少问题:如圆弧滑坡中临界滑面的圆心往往由网格交点坐标确定,计算出的最小安全系数往往只是局部最小值而不是全局最小;梯度优化法对于不同的计算次数将给出不同的最大值或最小值,而且计算的是局部最小;程序中没有定义全局最小的收敛准则;参数 f_0 (Janbu 法)没有与程序结合;不能考虑线载荷等。而采用模拟退火方法则不会出现上述问题,该法还具有如下优点:其最后结果不受初始试算的影响;收敛不受函数连续和微分影响;不局限于凸函数、适用于各种目标函数;用户能控制计算精度等。此外, SLOPE 2000 还具有如下特点:土层数无限制;能计算水平和垂直载荷;分析滞水和地震荷载等。因而,他是一个较为理想的边坡二维稳定性计算程序。

3DSlopeGIS 是日本九州大学开发的基于 GIS(Geographic Information Systems, 地理信息系统)空间数据库的三维边坡稳定性极限平衡分析软件。利用 GIS 空间分析功能,所有的输入数据(如地面标高、倾斜方向、倾斜角、地下水、地层面、滑动面及呈现空间分布的物理力学参数)均可以转化为 GIS 栅格单元的形式。因此如果采用一个基于柱体单元的三维模型,就可以推导出一个基于栅格数据的三维模型来计算边坡的稳定安全系数。这样,通过 GIS 栅格单元与三维极限平衡分析方法中的柱体单元就建立起了 GIS 与边坡三维稳定性分析的联系^[4-5]。该程序假定初始滑动面为椭球形,采用 Monte Carlo 模拟方法来搜寻三维最危险滑动面。由于上述两程序各有优缺点,因此在实际应用中,采用综合应用的方法较好。

2.2 实例简介

首钢矿业公司水厂铁矿是我国最大的冶金露天矿山。该矿位于河北省迁安市境内,是首都钢铁公司主要原料基地之一,历史上达到的最大年生产能力为 1600 万吨,目前年生产能力为 1200 万吨。该矿整个露天采场长 3 600 m,宽 400~1 680 m,矿区处于遭受后期混合岩化和多次构造变动的古老变质岩地区,岩性及构造条件十分复杂。

根据采场工程地质岩组特征、岩体结构特征、岩体不连续面特征、采矿设计及边坡方位特征,将采场

研究区划分为 5 个工程地质区,见图 1。

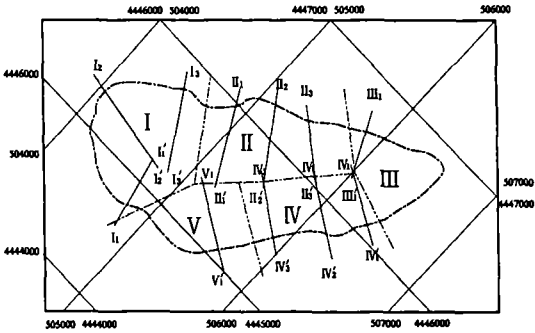


图 1 采场工程地质分区
Fig. 1 Geological subarea of open pit mine

采场北西端的 I 区是矿区边坡比高最大的一个区,同时也是 3 大构造层俱在的唯一区段。该区岩矿界线走向与采场境界线相一致,倾向以南东为主,局部为反倾的倒转产状,平均倾角在 60° 以上。

该区边坡的走向为近东西向转为 SN 向,再转为 NE 向,呈半圆形坡,坡面倾向由北渐变为东再转至南东方向。总体设计边坡角为 41°,边坡最高标高为 310 m,采坑最低标高-350 m,边坡垂直高度 660 m^[6],如何确保后续开挖的安全性和经济性,已成为水厂铁矿安全高效开采的关键,为此,必须进行边坡角的优化设计和边坡的稳定性分析。

2.3 边坡稳定性的多维分析

本研究中,以 I 区 I-1 区域作为研究对象,该区原设计边坡角在+10 m 以上为 51°, +10 m 以下为 47.5°,所采用的岩体力学参数见表 1^[7]。分析中考虑地下水的作用和地震作用,地震根据矿区所处地震带按Ⅶ度地震烈度考虑。用 Slope 2000 中的 Janbu 法初步优化后,得出采用上下均为 50° 的边坡角较为合适,边坡滑面见图 2,原设计边坡和优化后边坡的安全系数见表 2。

表 1 岩体力学参数
Table 1 Strength parameters of rockmasses

岩性	重度 / kN · m ⁻³	内聚力 c / MPa	内摩擦角 φ / (°)
长石石英砂岩、角砾岩 (Z ₁ C)	27.00	0.417~0.50	39
火山熔岩、火山角砾岩 (E ₂ X)	24.77	0.617~0.74	23.5
紫苏黑云斜长片麻岩 (ArS ²⁻³)	26.30	0.617~0.74	41
磁铁石英岩 (Fe)	28.50	0.833~1.00	40
砂线黑云斜长片麻岩 (ArS ²⁻⁵)	26.30	0.617~0.74	41
辉石斜长片麻岩 (Ma)	26.09	0.433~0.520	42
混合花岗岩 (Mr)	26.04	0.587~0.704	49
黑云混合片麻岩 (Mp)	26.29	0.467~0.560	44
F ₃₆ 断层	20.00	0.28	28
F ₁₁ 断层	20.00	0.4	32
F ₈ 断层	20.00	0.4	32

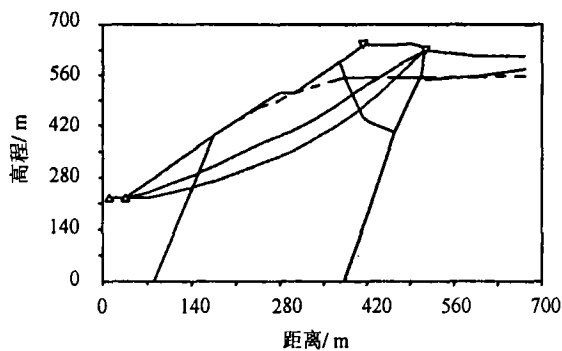


图2 优化后边坡的临界滑面与安全系数
Fig.2 Critical slip surface and factor of safe in optimized slope

为全面了解边坡的破坏特性和稳定程度，又采用了基于 GIS 的边坡三维极限平衡分析软件 3DSlopeGIS 进行研究，稳定性分析中采用扩展的 Janbu 三维模型，得出的边坡三维滑动面见图 3。计算出的安全系数见表 2。

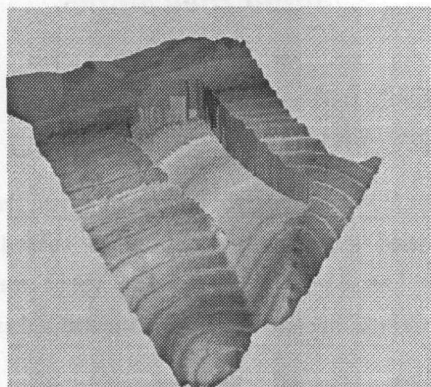


图3 I-1 区域边坡滑动的三维图
Fig.3 3D slope slip figure of area I-1

表2 二维与三维极限平衡分析安全系数值		analyses			
Table 2 Safety factors of 2D and 3D limit equilibrium analyses		自重	自重+地震	自重+水	自重+地震+水
边坡角度/(°)	维数				
上 51 下 47.5	二维	1.677	1.585	1.273	1.205
	三维	2.080	1.900	1.910	1.780
上 50 下 50	二维	1.563	1.481	1.221	1.151
	三维	1.880	1.680	1.660	1.500

由表 2 可见，边坡二维分析得出的安全系数较三维分析得出的安全系数小 11 %~33 %，方案优化后，二维分析得出的安全系数较原设计方案降低 4.5 %~6.8 %，三维分析得出的安全系数较原设计方案降低 9.6 %~15.7 %，地震作用使二维的安全系数降低 5 %左右，使三维的安全系数降低 8.6 %~10.6 %左右；地下水的作用使二维的安全系数降低 20 %左右，使三维的安全系数降低 8.1 %~11.7 %；地震和水共同作用下使二维的安全系数降低 27 %左右，使三维的安全系数降低 14 %~20 %左右。数

据表明，考虑三维效应的边坡受地震和地下水作用时，边坡的安全系数降低程度小，而二维的安全系数降低程度较大，在边坡稳定性分析时，如果仅进行二维分析将偏于保守，会增大工程的造价。由于经二维优化后的边坡，用三维方法进行分析得出的安全系数仍有 1.5，因此可以考虑进行适当调整，稍微加陡边坡角。

3 结 语

- (1) 由于目前 2D 和 3D 边坡稳定性极限平衡分析方法各有优缺点，因此对边坡进行综合研究是一种较为合适的方法，二维分析中临界滑动面的全局搜索和三维稳定性分析中对复杂的空间信息的处理有助于对边坡稳定性的分析。
- (2) GIS 技术的应用对边坡稳定性的研究将是一种极大的推进。GIS 集数据捕获、输入、操作、转换、可视化、合并、检索、分析、模型化及输出为一体，提供多功能的工具进行空间数据分析和表现，大大缩短了数据准备和处理的时间，并且 GIS 能处理来自不同数据源的信息，如果三维极限平衡方法能得到进一步的完善，基于 GIS 的三维边坡稳定性模型将更为科学、合理、方便，GIS 数据源的公用性、广泛性及实时性以及 GIS 技术本身的高速发展必将促进边坡稳定性分析新方法及新模型的研究。

参 考 文 献

[1] 谭文辉, 乔兰, 王鹏. 高陡边坡岩体力学环境的模糊综合评判研究[J]. 金属矿山 2002, (318): 9—12.

[2] Cheng Y M. Slope 2000 Ver. 1.6 User Guide[M]. Hong Kong Polytechnic University, 2001.

[3] Cheng Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics. 2003, (30): 255—267.

[4] 谢谟文, 江崎哲郎, 周国云, 等. 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.

[5] 谢谟文, 江崎哲郎, 周国云. 基于边坡单元的三维滑坡灾害评价的GIS方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 969—976.

[6] 秦皇岛冶金设计研究院, 北京首钢设计院. 首钢矿业公司水厂铁矿扩建工程采矿修改设计(调整规模)说明书(第一卷)[R]. 1999.

[7] 北京科技大学, 首钢矿业公司. 首钢水厂铁矿边坡稳定性分析与优化设计数值计算报告[R]. 2003.