

基于 GIS 与数值模拟的边坡稳定性评价

许冲¹ 李琰庆² 蒋日波³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 淮南矿业集团, 安徽淮南 232001;
3. 宁夏大学物理电气信息学院, 宁夏银川 750021)

【摘要】 基于 GIS 的区域边坡稳定性定性评价和分区与基于极限平衡法或数值模拟的单体边坡稳定性定量评价是当前边坡稳定性研究的两个主要方向。在总结当前这两个研究方向结合点的基础上, 基于 ArcGIS 和 FLAC2D 软件, 结合编程技术将两者集成, 实现了剖面自动生成和 FLAC2D 计算数据前处理功能。将此应用于某工程实例, 进行边坡稳定性定性和定量评价, 结果客观准确。

【关键词】 GIS; 数值模拟; 边坡稳定性评价; 数字高程模型

【中图分类号】 P 208; TU 457

Slope Stability Evaluation Based on GIS and Numerical Simulation

Xu Chong¹ Li Yanqing² Jiang Ribao³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

2. Huainan Mining Group, Huainan Anhui 232001;

3. School of Physics and Electrical Information Science, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021 China)

【Abstract】 There are two main research directions in the field of slope stability evaluation. One is slope stability qualitative evaluation and zoning based on GIS, the other is single slope stability quantitative evaluation based on limit equilibrium method or numerical simulation method. The combination points of the present two research directions are summarized. The functions such as profile automatic generation and preprocessing of FLAC-2D simulation data are realized based on integrating of ArcGIS and FLAC-2D by program developing technique. A case study of certain project is presented to test the reliability of the model, including slope stability qualitative and quantitative evaluations. The result is objective and accurate.

【Key Words】 Geographic Information System; numerical simulation; slope stability evaluation; digital elevation model

0 引言

边坡稳定性定性评价和定量评价是边坡稳定性研究的两个主要方面^[1,2]。定性评价主要应用于区域滑坡危险性分区, 研究方法^[3-5]侧重于基于 GIS 软件, 综合考虑影响边坡稳定性的各个因素, 建立合适的分区模型, 应用聚类分析、人工神经网络或模糊数学等多因子分析方法对研究区域进行危险性等级分区, 得到边坡稳定性的定性评价结果。边坡稳定性定量评价主要应用于单体边坡的稳定性评价中, 评价方法可分为极限平衡法^[6,7]和数值分析法^[1,8]两种, 这两类定量评价方法凭借完善的理论基础和成熟的应用软件, 均在实际中得到了广泛应用。近十年来, 一些研究者利用定性评价和定量评价的结

合点, 将这两种方法结合起来。首先, 以区域边坡定性评价作为单体边坡定量评价的基础, 反过来单体定量评价可以作为分区定性评价的检验标准^[1,2]; 其次, 应用 GIS 的二次开发技术, 建立基于边坡定量评价的极限平衡法的模型, 开发出基于极限平衡法的二维或三维单体边坡稳定性定量评价模块^[6-7,9-11], 或者开发出与极限平衡法软件耦合的接口; 最后, 应用 GIS 软件的二次开发功能进行边坡数据的预处理, 生成剖面图, 通过编程开发与不同边坡数值模拟软件的接口, 完成自动生成数值模拟程序所需要的计算单元网格剖分数据等功能。

本文就 GIS 结合数值模拟方法在边坡稳定性评价方面的研究作详细探讨。在 GIS 软件平台下, 综

合考虑影响边坡稳定性的各因素,进行边坡稳定性的定性分析;开发出 GIS 软件与数值分析软件 FLAC2D 的接口模块,具有基于 DEM(数字高程模型, Digital elevation model)实现剖面线的绘制,有限元计算单元网格的剖分等功能;最后,在定性分析的基础上,选取重点边坡,基于数值分析方法生成的计算数据分别进行边坡二维和三维定量评价,然后和定性分析的结果进行比较分析。整个评价过程综合运用了定性和定量评价方法,使结果更加客观准确。

1 研究现状

GIS 与有限元集成是将 GIS 用于边坡有限元数据的前处理,在此基础上利用 GIS 二次开发技术将 GIS 软件与有限元软件耦合起来。国内这方面的研究主要是从上世纪末开始的。主要任务是基于 GIS 平台开发出具有数据管理、剖面生成、有限元计算数据生成、甚至具有决策支持功能等的系统。

刘展^[12]、王旭春^[13]、吴沛林和盛立芳^[14]研究了 GIS 用于边坡数值模拟数据处理技术,对 GIS 与数值模拟系统的耦合技术进行了初步研究。刘立民和刘汉龙等^[15]、丁继红和周德亮等^[16]对基于 GIS 的岩土工程有限元分析过程中的数据前处理、有限元计算、计算结果后处理及可视化等问题进行了综合研究探讨。侯恩科和吴立新等^[17]以三维地学模拟软件 microLYNX 与数值模拟软件 RFPA 和 FLAC 的耦合为例,提出了耦合的具体模式和方法。徐祖信和尹海龙^[18]、王宝军和施斌等^[19]利用 GIS 生成了研究区域有限元计算网格。王纯祥和白世伟^[20]、夏艳华和白世伟等^[21]进行了 GIS 与 FIAC-3D 的集成研究。徐帮树和徐建华等^[22]研究了基于栅格的六面体有限元网格和基于 TIN 的三棱柱有限元网格生成。张巧凤和张锦^[23]提出了一种适合于在 MapX 二次开发环境下生成 Delaunay 三角网的数据组织方法并给出程序。刘庆元和韦建超等^[24]采用适合边坡三维可视化和三维有限元分析的三棱柱模型对边坡进行建模和基于 GIS 的有限元分析前处理。

近十年的研究发展,使得基于 GIS 与数值模拟方法的边坡稳定性评价研究和应用有了长足的发展,有的侧重于基于 GIS 的有限元网格生成,有的侧重于数值计算,有的侧重于系统的集成。但是这些研究存在着一个普遍的问题就是顾此失彼,原因在于 GIS 平台、边坡的数值模拟分析方法和极限平衡模型方法众多,而且数据格式不统一,要想统一这些数据格式并开发出标准的数据转换接口是很困难

的,此方向还有较大的研究空间。

2 技术路线

本文在对边坡稳定性影响因素进行统计整理的基础上,利用模糊逻辑评判和人工神经网络等隶属于人工智能范畴的统计分析方法,进行区域边坡稳定性评价,基于 GIS 空间分析功能生成滑坡区域分区图。在此基础上,结合重点工程边坡,选出需要进行定量评价的单体边坡进行评价。基于 GIS 的三维分析功能,进行边坡二维剖面和计算网格划分;基于 GIS 的二次开发功能,开发出可应用于边坡数值模拟的二维和三维计算数据自动生成模块。应用在 GIS 下生成的剖面数据和网格剖分数据进行单体边坡的二维和三维数值模拟,得到单体边坡的定量评价结果。将单体边坡评价结果反馈给区域评价结果,同区域边坡计算结果进行比较和分析。研究技术路线流程图见图 1。

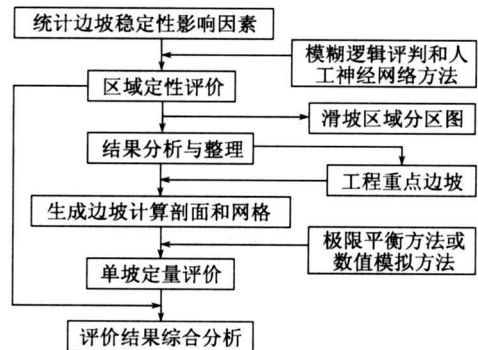


图 1 技术路线流程图

3 应用研究

文章选用 ArcGIS 作为基础 GIS 实验平台,以有限差分模拟软件 FLAC2D 为数值模拟软件,进行一高速公路沿线边坡稳定性的工程实例的研究。

3.1 研究区资料入库及可视化

本文将 GIS 技术和数值计算应用到某高速公路沿线边坡的稳定分析中,数据源为 79 幅 AutoCAD 格式的图件,在经过一系列的前处理后,导入 ArcSDE 数据库进行统一管理,建立研究区的 DEM。统计并量化边坡稳定性影响因素,根据实际野外考察和资料分析,从众多影响因子中提取坡高、坡角、岩性、岩层倾角、岩石风化程度、断裂发育、水的影响、地震烈度、植被覆盖度等 9 个指标来评价边坡稳定性,利用 ArcGIS 自带的数据库 GeoDatabase 来存储量化后的边坡稳定性影响因素。此时,完成了区域定性评价的准备工作。

3.2 边坡稳定性区域评价

利用 GIS 的栅格叠加分析功能去进行边坡稳

定性区域评价是目前区域定性评价的主流方法,该方法有几个关键问题:①评价单元的划分,目前评价单元划分方法包括基于栅格的和基于边坡单元的方法,基于栅格单元的方法计算方便,但存在边缘误差。基于边坡单元的评价结果更加客观,但存在边坡单元划分的问题,增加了工作量。②评价因子的选取,研究区域的边坡稳定性影响因素包括地质条件、植被、地形条件及水文地质条件等。③叠加方法的选择,叠加方法有很多,叠加方法是将各个影响因素合成一个结果的关键一步。应用各个影响因素决定的属性,基于某种叠加方法,叠加生成新的属性,即为评价结果。④基于 GIS 的栅格叠加分析技术,基于 GIS 空间叠加理论,应用 GIS 平台二次开发技术,实现该功能。

本文选取公路沿线单体边坡为评价单元。评价因子的选取采用专家打分方法。该研究区的边坡稳定性区域评价方法采用多因子分析法中的模糊综合评判法。评价指标的权重采取“定性分析、定量取值”的方法,定性与定量相结合,以定性分析结果来约束权重量化取值的范围。评语集和隶属度的确定是将研究区内边坡划分为稳定、基本稳定、不稳定三个类型。完成了以上工作之后,利用模糊集理论方法计算边坡各评价指标对每一评语等级的隶属度值,得到边坡稳定性定性评价结果。

根据区域评价结果,结合重点工程边坡,选取重点边坡,进行单体边坡稳定性评价。本文就位于公路沿线附近的一个约 100 m 长,170 m 宽,50 m 高的边坡进行定量评价,边坡所在位置地形图及边坡范围见图 2。

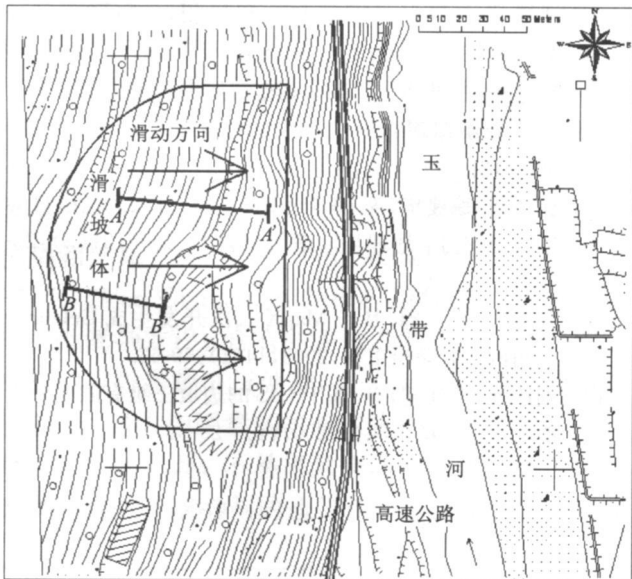


图 2 某边坡所在位置的地质平面图

3.3 ArcGIS 和 FLAC2D 的接口开发

ArcGIS 与 FLAC2D 的集成方法借鉴了侯恩科和吴立新等^[17]的 microLYNX 与数值模拟软件 RF-PA 和 FLAC2D 耦合的具体模式和方法。FLAC2D 的前处理数据文件为 .dat 文本文件,包括网格定义、模型剖分、边界条件定义、边界条件和本构关系定义等前处理内容。

基于 ArcGIS 二次开发平台,应用 VBA 编程语言,开发调用 FLAC2D 的模块。以 ArcGIS 生成的二维剖面图和三维格网图二进制文件为基础,添加网格定义、模型剖分、边界条件定义、边界条件和本构关系定义等前处理内容,创建可被 FLAC2D 接受的 .dat 文件。

3.4 单体边坡稳定性定量评价

在完成数值计算数据的生成和预处理之后,在 FLAC2D 环境中进行边坡的二维定量评价。以 DEM 为基础,基于 ArcGIS 的三维分析功能,生成 AA' 和 BB' 剖面线(图 2)的剖面图。根据建立的 ArcGIS 和 FLAC2D 的接口程序,将剖面数据导入到 FLAC2D,赋给参数值。应用 FLAC2D 对 AA' 和 BB' 剖面的稳定性进行分析。

物理力学参数通过室内土工试验获得。在应用 FLAC2D 程序计算安全系数时,在给定折减系数条件下,模型中不平衡力比值,即最大不平衡力与典型内力的比值小于 0.001 时终止计算,此时进行折减运算系数就是安全系数。两个剖面的安全系数计算结果分别为 0.98 和 0.94(见图 3),该边坡处于临界滑动状态。从图 3 可以看出,在滑动面处一定范围

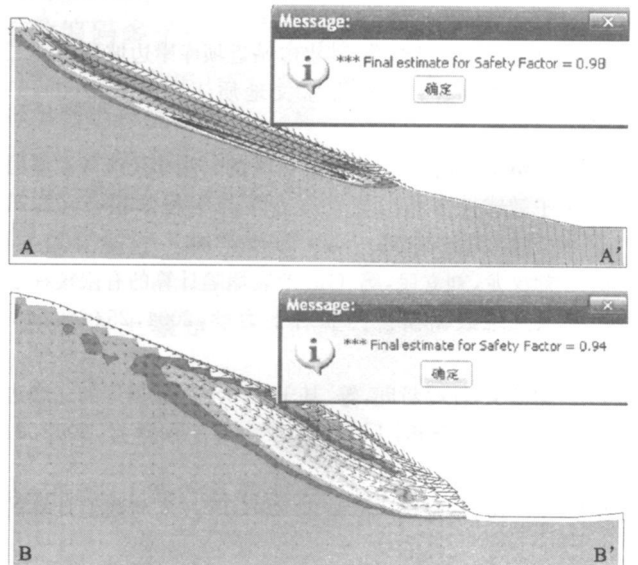


图 3 FLAC2D 模拟结果图

内的剪切力值较大,在坡脚处的交界面附近剪切应变率较其他交界面部位小,说明此处属于该坡的“阻滑段”,要使边坡保持稳定,该处应避免较大开挖。

4 结论

本文基于 GIS 和数值模拟技术对边坡稳定性评价进行了研究,取得了以下主要成果:

1)分析了当前边坡稳定性定性和定量评价这两个方面的研究方法,定性评价是主要基于 GIS 的区域滑坡分区,定量评价主要是应用极限平衡方法或数值模拟方法的单体边坡评价。

2)根据研究文献,总结了当前研究中边坡稳定性定性评价和定量评价的多个结合点,并选择了 GIS 与数值模拟这一结合点,分析当前的研究存在的问题——由于 GIS 平台、边坡的数值模拟分析方法和极限平衡模型方法众多,而且数据格式不统一,因此当前这方面的研究还有较大的发展空间。

3)在拟订基于 GIS 与数值模拟方法进行边坡稳定性评价的基础上,以某公路沿线边坡为例,统计各边坡稳定性影响因素,基于 GIS 平台进行边坡稳定性定性评价。结合 ArcGIS 和 FLAC^{2D} 的接口开发,对该公路段某重点边坡进行定量评价。

参 考 文 献

- [1] 张永兴,文海家,欧敏.滑坡灾害智能预测理论及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 胡新丽,唐辉明.斜坡工程 GIS 系统研究与应用[M].北京:中国地质大学出版社,2005.
- [3] 谭儒蛟,胡瑞林,等.FCJ-GIS 动力区划模型及其在斜坡灾害危险性评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2552-2558.
- [4] 赵建军,黄润秋,等.某水电站近坝库岸边坡稳定性二次模糊综合评判[J].水文地质工程地质,2004,31(2):45-49.
- [5] 兰恒星,伍法权,等.基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [6] 刘汉龙,刘立民,等.GIS 地表塌陷计算的有限棱柱法及三维数据模型[J].岩土力学,2004,25(6):913-916.
- [7] 谢谟文,江崎哲郎,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):1494-1499.
- [8] 王涛,蔡晓斌,等.基于 RS/GIS 技术与数值计算的

库岸边坡稳定性研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2005,30(10):917-920.

- [9] 唐亦川,许冲,等.基于 GIS 的公路边坡稳定性评价系统[J].公路交通科技,2005,22(9):56-58.
- [10] 陶丽娜,唐胜传,等.基于组件式 GIS 技术的边坡支护方案优化设计系统[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2824-2829.
- [11] 邵莉,施斌,等.基于 GIS 确定性模型的土体边坡稳定性评估研究[J].工程勘察,2004(2):4-7.
- [12] 刘展.土体人工边坡稳定性评价及辅助设计系统研究[D].西安:西安工程学院,1999.
- [13] 王旭春.三峡库区滑坡预测预报 3S 系统关键问题研究[D].北京:中国矿业大学,1999.
- [14] 吴沛林,盛立芳.基于 GIS 的计算网格和地面信息数据自动生成技术[J].华东师范大学学报(自然科学版),2000(4):98-100.
- [15] 刘立民,刘汉龙,等.基于 GIS 的岩土工程有限元分析系统集成方法[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增):1995-1998.
- [16] 丁继红,周德亮,等.基于 GIS 的有限元前处理技术[J].东北师大学报(自然科学版)2002,34(4):97-101.
- [17] 侯恩科,吴立新,等.三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J].煤炭学报,2002,27(4):388-392.
- [18] 徐祖信,尹海龙,黄浦江二维有限元计算网格生成技术[J].水动力学研究与进展(A 辑)2003,18(3):326-331.
- [19] 王宝军,施斌,等.GIS 在边坡有限元数值分析前处理中的应用[J].高校地质学报,2004,10(1):128-133.
- [20] 王纯祥,白世伟.三维地层信息系统与有限元方法集成研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3695-3699.
- [21] 夏艳华,白世伟,等.某水利枢纽厂房开挖三维可视化与数值模拟耦合研究[J].岩土力学,2005,26(6):968-972.
- [22] 徐帮树,徐建华,等.基于 GIS 的边坡有限元网格自动生成研究[J].地理与地理信息科学,2005,21(3):23-26.
- [23] 张巧凤,张锦.基于 MapX 二次开发生成 Delaunay 三角网[J].测绘工程,2005,14(1):59-62.
- [24] 刘庆元,韦建超,等.基于 GIS 的边坡三维有限元分析前处理[J].矿山测量,2007(1):29-32.

收稿日期:2008-01-11