

文章编号:1671-6833(2015)01-0114-05

基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统研究

李小根, 王安明

(华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

摘 要:应用地理信息系统(Geographical Information System, GIS)技术在对某滑坡地质灾害进行现场调查统计的基础上,应用刚体极限平衡分析法(SARMA)及有限元法(FEM)对该滑坡的稳定性进行了分析研究;采用灰色系统理论方法对滑坡的发生趋势进行了预测,开发研制了基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统.系统运行结果表明:该滑坡的稳定性较好,水对该滑坡体稳定性影响较大;开发完成的滑坡地质灾害预警预测系统实现了地质灾害有关数据的统一管理和预测;构建完成的滑坡地质灾害三维模型能够准确地反映灾害发生地的地质地貌情况;该系统为实现地质灾害网络地理信息系统(WebGIS)进行资源共享打下了坚实的基础.

关键词:地理信息系统;滑坡;刚体极限平衡分析法;有限单元法;网络地理信息系统

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.027

0 引言

在我国经济建设过程中,人类活动的一些工程建设经常引发地质灾害的发生,其中滑坡和泥石流造成的危害最大.当前国际滑坡灾害研究正由灾害的灾后评估向灾前的预测方向逐步发展^[1],其中基于 GIS 平台,将遥感数据和地质数据相结合进行灾前预测、灾中和灾后评估,是一种有效的方法^[1-2].许多学者^[3-6]对这种评价模式进行了多种途径的尝试,取得了较好的研究效果.但这些研究并没有建立适应性广的研究模型^[7-8].张桂荣等^[9-10]的研究工作将这种方法向前又推进了一步,研究中将气象资料进行实时更新,将当地的地质条件和人工活动紧密结合在一起,准确反映了地质灾害发生实际情况.

笔者以某滑坡^[11]为研究对象,将滑坡预警预测和实时的地质资料相结合,在对滑坡进行监测的基础上,结合工程地质力学原理和灰色系统理论对滑坡的发展趋势进行了深层次的研究,开发研制了基于 GIS 的地质灾害预警预测系统,基本实现了滑坡地质灾害的预警预测功能.

1 工程地质概况

本课题中所涉及到的滑坡位于河南省洛三(洛阳—三门峡)高速公路 K105 + 75 ~ K106 + 410 段南侧,由 3 个滑坡组成的滑坡群,这些滑坡中以 K105 + 780 ~ K106 + 060 段 I 号滑坡规模最大,如图 1 所示,该滑坡体在平面上呈马蹄形,南北长 230 m,东西宽 280 m,滑动轴方向为 NE5°,滑体最大厚度 32 m,平均厚 17.20 m,滑坡体积达 100 多万 m³,属深层、巨型滑坡.高速公路以深挖(最深达 14 m)路堑形式通过该滑坡体,路基坐落在滑坡体上,古滑坡活动和新近填土变形对已建的洛三高速公路构成严重威胁.

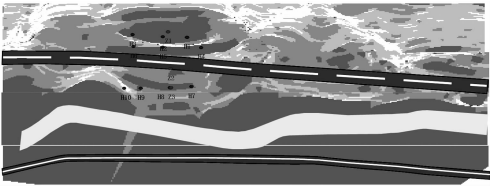


图 1 该滑坡坡度分析图

Fig. 1 Sketch map of the landslide

该段南岸上黄土连续分布,夹 5 ~ 6 层钙核层和古土壤层,厚约 70 m,其下为含漂石的砂卵石

收稿日期:2014-08-02;修订日期:2014-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(514004049);华北水利水电大学高层次人才科研启动基金资助项目(001319)

作者简介:李小根(1973-),男,河南焦作人,华北水利水电大学副教授,博士,主要研究方向为灾害信息技术,水利信息技术, E-mail:lixiaogen@ncwu.edu.cn.

层,多成陡崖,厚度 8 ~ 10 m,接着为红色黏土卵石层,多形成陡坡,厚度 10 ~ 30 m.河谷切割深度达 140 m,原地形坡度很陡,局部直立,平均地形坡度 35° ~ 40°,陡坡下为较为宽阔的河谷,这些都为滑坡提供了有利条件和场所.

2 滑坡监测

长期以来,对滑坡进行预警是一大难题,而监测又是预警的重要物理前提^[12],本课题组从 2002 年 7 月开始在山体滑动危险区内布设监测标志,对滑坡体内部变形进行监测,用以掌握山体滑动的变形动态,具体监测方案及数据成果分析请参见文献[11].从监测成果来看该滑坡总体处于稳定状态,地表监测点最大累计位移近 50 mm,位于滑坡的上部,其总体位移方向为东南向,具左旋性质,滑坡下部的岩土体基本没有变形,滑坡深部未发生较大的变形.

3 该滑坡稳定数值模拟分析

当前滑坡稳定性分析的数学模型方法可分为两类^[13-15],一类是基于极限平衡理论的刚体极限平衡法,另一类是数值分析方法.在本课题研究中采用刚体极限平衡的 SARMA 法和有限元法.在滑坡的典型位置选取 4 个计算剖面分别进行滑坡体饱水状态和无水状态两种工况下的稳定计算,下文以位于滑坡体后部的 K106 + 025 剖面为例进行说明.

3.1 刚体极限平衡 SARMA 法分析

SARMA 法可比较全面客观反映各种控制滑坡稳定性因素的作用.为提高计算精度,当滑坡形状非平滑部分剖分块体分的比较小而平滑部分剖分的块体比较大. K106 + 025 剖面高 44 m,长约 150 m,路面距滑面后缘的高度约为 16 m,计算中显示在坡体无水时整体安全系数为 1.97,饱水时为 1.19.从 4 个剖面的分析来看,在无水的情况下,滑坡的安全系数介于 1.74 ~ 2.14 之间,在饱

水状态时,滑坡的安全系数介于 1.10 ~ 1.20 之间,可见在无水时滑坡处于基本稳定的状态,水的作用对滑坡的稳定影响很大.

3.2 滑坡稳定的有限元(FEM)分析

本次计算采用 ANSYS6.0 版本,采用结构静力中的非线性分析,选用平面四节点单元和 Drucker - Prager 本构模型. K106 + 025 剖面计算时选取计算剖面为滑坡面积 3 倍多,共划分 1 311 个单元和 1 344 个节点,在滑面、坡顶和坡脚处网格进行了加密,在计算剖面的底部和后部边界施加水平方向和竖直方向约束,岩土体物理力学指标参数见表 1,表中括号内为坡体无水时的参数.

对 K106 + 025 剖面和其它三个剖面应力分析计算结果表明:滑坡体在无水和饱水两种工况下的应力大都表现为压应力,方向沿着滑坡向下,压应力的值并不大,拉应力出现的部位很少,一般出现在计算剖面的后缘顶部,有时在滑坡面上也出现拉应力,但拉应力的值很小.

一般来说,在滑坡面、计算坡面的后缘顶部、路基滑坡的上部、填土和原状土结合部位容易造成拉应力,在滑坡稳定性分析中,这些是应该重点考虑的部位;而从位移计算来看,两种工况下滑坡位移主要发生在滑坡体内,该部位的位移明显大于别的部位,方向竖直向下或者沿着滑坡方向向下,位移值并不是很大,大部分在 5 ~ 12 cm 之间变化.

4 滑坡变形灰色系统预报

灰色系统理论是邓聚龙教授在 80 年代提出的.目前,该理论已在经济、工农业、地质、军事等各个领域内得到应用,在工程地质中,多用于预测地质体的变形(如滑坡变形预测、洞室围岩变形预测等).笔者采用灰色系统理论对该滑坡现场变形趋势进行了预测.

常用的灰色系统模型为 GM(1,1)模型.首先将原始观测数据 $x^{(0)}$ 作一次累加生成得到 $x^{(1)}$.

表 1 K106 + 025 剖面两种工况下岩土体物理力学指标
Tab.1 physical and mechanical parameter under two conditions in the K106 + 025 section

| 岩土层 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 内聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 密度/(kg · m ⁻³) |
|------|----------|------------|---------|----------|----------------------------|
| 填土 | 6.0(8.0) | 0.3(0.3) | 28(30) | 16(18) | 1.98(1.86) |
| 粉质粘土 | 5.0(6.0) | 0.35(0.32) | 25(28) | 14(16) | 1.96(1.88) |
| 泥质卵石 | 6.0(8.0) | 0.45(0.40) | 30(32) | 6(10) | 2.02(1.80) |
| 黏土岩 | 8.0(8.2) | 0.3(0.3) | 50(50) | 19(19) | 2.04(2.04) |

注:括号内为坡体无水时的参数.

$$\begin{cases} x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}; \\ x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}; \\ x^{(1)}(i) = \sum_k^i x^{(0)}(k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为数据个数.

相应的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b. \quad (2)$$

式中: a, b 为待定常数,可由最小二乘法求得.在求得 $x^{(1)}$ 后,经累减还原后而得到预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k). \quad (3)$$

采用后验差检验:设原始数据列为 $\{\hat{x}^{(0)}(i)\}$, 预测数据列为 $\{\hat{x}^{(1)}(i)\}$, 其残差为

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

令 S_1 为原始数据的均方差, S_2 为残差的均方差, 则

$$\begin{cases} S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}(k)]^2; \\ S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2. \end{cases} \quad (5)$$

后验差比值:

$$C = S_2 / S_1. \quad (6)$$

小误差概率:

$$P = \{|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745S_1\}. \quad (7)$$

根据经验,一般要对精度划分等级^[12],若 P, C 都在允许范围之内,则可计算预测值,否则,需进行残差修正,以保证预测的可靠性,这时需要建立残差序列模型.

5 滑坡预警预测系统开发

5.1 开发运行环境

CPU: Pentium 500 MHz 以上、内存: 512 MB 以上、显卡: 标准 VGA, 24 位真彩色、ArcGIS Engine 9.3 Runtime、NET Framework 3.5 环境等平台.

5.2 技术路线

技术路线如图 2 所示.

采用理论分析、实验区研究与突出重点相结合的研究方案. 重点有: ①面向实际的滑坡预演过程; ②面向实际的灾害指挥; ③在建立地质灾害虚拟现实仿真平台时,着重于地质灾害模型与虚拟现实模型的耦合,实现传统方法与遥感(RS)、数字高程模型(DEM)、地理信息系统(GIS)的有机结合.

滑坡地质灾害三维模型的构建采用分层次的模式. 对研究区域的山体,采用 CAD 数据和校正测

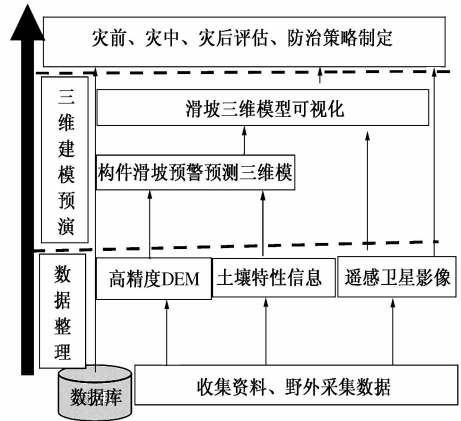


图 2 滑坡预警预测系统技术路线

Fig. 2 The early warning technology route of the landslide

量点数据构建精度为 0.5 m 的几何模型,并附加土壤类型等基本特征,纹理采用遥感卫星图像,并在 0.5 m 精度模型基础上构建精度分别为 1, 10, 100 m 共计 4 种层次精度的模型;对于非核心研究区域,基于高精度 DEM 构建精度分别为 100 m 和 1 000 m 2 种精度的几何模型,模型附加土壤特征和用地类型信息,纹理采用卫星遥测图像.

基于遥感影像提取土壤特征和用地类型信息,以多个时期的 Landsat-7 ETM+ 图像为基本资料,综合人机交互式非监督分类法、最大似然法和谱间关系阈值法,挖掘谱间结构,利用各地物相分离和时间演变的规律来提取所需信息.

利用 GIS 技术,集成 DEM, 三维立体动态显示滑坡预演,为实际的灾害指挥提供依据.

基于地质灾害虚拟现实仿真平台,对灾前、灾中、灾后进行有效的评估,进而对滑坡给高速公路的安全造成的危害进行预警、预测,通过比较后,决策者可以做出正确的选择,制定最好的防治策略,从而避免重大灾害的发生或最大程度上减轻灾害所造成的损害.

以 ArcGIS 为开发平台,基于 Microsoft SQL Server 2003 关系数据库系统,采用 C#开发语言,研制地质灾害虚拟现实仿真系统,通过实验区的验证,检验系统的可行性,并与传统方法比较,检验其精度.

5.3 系统功能模块

5.3.1 主控模块

主要完成系统的功能转化任务,可从主控模块切换至各种监测仪器的数据录入、查询、绘图及预测子模块,也可从各子模块返回.

5.3.2 工程管理模块

主要完成新监测项目的创建与维护,可将该软件用于其它滑坡监测项目。

5.3.3 数据录入模块

此模块提供了快捷的数据输入和计算功能,只需将原始监测数据输入计算机,软件会自动将监测数据转换为可用于工程实践的位移数据。

5.3.4 数据查询模块

查询模块完成各种监测仪器数据的查询,可按照钻孔编号、钻孔深度、测量时间、方向等控制因素完成对数据库的快速及综合查询。

5.3.5 绘图模块

绘图模块完成对查询数据的绘图操作,可完成各种监测统计曲线,例如对钻孔测斜仪可生成深度—累计位移曲线、深度—时间曲线,对地表监测数据可完成时间—累计位移曲线等,并可根据需要生成年统计曲线、月统计曲线、日统计曲线;另外生成的图形可存为矢量图或点阵图格式,插入文档进行编辑。

5.3.6 预警预测模块

预警预测模块完成对各种监测数据的预测功能,并对预测结果进行误差校验。

5.3.7 地质灾害模拟模块

三维预演滑坡地质灾害发生的过程及发生的趋势。

5.3.8 系统维护模块

系统维护模块完成对数据库的压缩和修复,以及录入地质巡视信息。

6 构建山体三维模型

在 ArcScene 环境下导入山体数字高程模型(DEM);应用 DEM 本身的高程完成山体高度的拉伸并进行不同山体高度的色彩编辑;完成构建山体发生滑坡时的三维模型如图3所示。

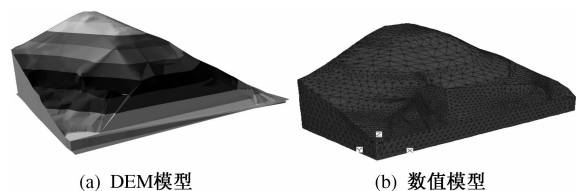


图3 该滑坡三维模型

Fig.3 the 3D model of the landslide

7 结论

①该滑坡总体上处于稳定状态,水对该滑坡

体的稳定影响很大;②开发完成的滑坡预警预测系统,可实现对监测数据的录入、计算、查询、分析、管理等功能,可实现滑坡预警的可视化,对于实现地质灾害网络地理信息系统(WebGIS)的资源共享打下了坚实的基础;③该系统可以三维可视化预演多种预防地质灾害调度预案执行的效果,并智能对比评价各个预案在灾后评估中的应用,对防灾策略的制定提供决策支持。

参考文献:

- [1] 殷坤龙,韩再生,李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质与工程地质,2000(5):1-3.
- [2] 许强,黄润秋,李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展[J]. 地球科学进展,2004,19(3):478-483.
- [3] 吴宜平,殷坤龙. 滑坡数据库管理信息系统[J]. 水文地质工程地质,1997,1:14-16.
- [4] 刘大安,刘小佳. 地质工程监测信息系统开发[J]. 工程地质学报,1997,5(4):351-356.
- [5] 胡新丽,唐辉明. GIS支持的斜坡地质灾害空间预测系统框架设计[J]. 地质科技情报,2002,3(21):99-103.
- [6] 吴振君,邓建辉,闵弘. 基于GIS的滑坡监测信息管理与分析系统[J]. 岩土力学,2004,25(11):1739-1743.
- [7] 罗章,龚福华,宋明健,等. 岩土工程灾害研究进展[J]. 湖南工程学院学报,2005,15(1):87-91.
- [8] 张梁,张业成,罗元华,等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [9] 张桂荣,殷坤龙. 基于WebGIS的地质灾害信息系统网络数据库建设[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(3):114-118.
- [10] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于WebGIS和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学,2005,26(8):1312-1317.
- [11] 黄志全,刘汉东,姜彤. 吉家河滑坡稳定性及监测预报信息系统研究报告[R]. 郑州:华北水利水电学院资源与环境学院,2003.
- [12] 赵其华. 边坡灾害及其防治研究新进展——“香港边坡灾害及其防治讨论会”简介[J]. 地质灾害与环境保护,2000,11(3):276-278.
- [13] 黄志全,刘汉东,姜彤. 边坡系统演化的开放度研究[J]. 工程地质学报,2000,18(6):475-477.
- [14] 张咸恭,王思敬,张倬元. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [15] 林立相,徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报,1999,17(3):235-239.

The Research of the Early Warning System About the Geological Disasters Based on GIS

LI Xiao-gen, WANG An-ming

(School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The GIS technique is used to investigate the statistics of landslide geological disasters, and the grid limit equilibrium method and finite element method (FEM) are used to analyze stability of the landslide, and the gray system theory method is used to forecast deformation trend of the landslide, and the early warning system about landslide geological disasters is completed. System operation results show that: the stability of the landslide is good, the influence of water on the stability of the landslide is bigger; the early warning system about landslide geological disasters which is developed realizes unified management and forecast of the related data of geological disasters; the constructed 3D model of landslide geological disasters can accurately reflect the geological and topographical feature situation of where the disaster happened; the system has laid a solid foundation to realize sharing of the WebGIS of geological disasters resources.

Key words: geographical information system; landslide; rigid body limit equilibrium method; finite element method (FEM); WebGIS

(上接第 113 页)

Research on Chaotic Vibration Characteristics of Nonlinear Half Vehicle Model under Quasi-Periodic Excitation

YANG Zhi-yong^{1,2}, LIANG Shan¹, ZHOU Tong¹

(1. College of Information Engineering, Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 402260, China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To overcome the problem that the vehicle suspension model of the single periodic excitation road does not truly reflect the nonlinear dynamics characteristics of the actual vehicle, the paper establishes a quasi-periodic dynamic road excitation function, and builds a four-degree of freedom nonlinear half vehicle suspension model. Using the Poincaré map, phase diagram, power spectral density to analyse the nonlinear dynamics characteristics of the four degrees of freedom semi-active vehicle suspension model on uneven road surface, we obtain the amplitude of chaotic vibration and its vibration characteristics which is quasi-periodic → transition state → chaotic state as the vehicle through uneven road surface. At the same time, the occurrence of chaotic vibration can be inhibited effectively by adjusting the spring stiffness coefficient. The results show that the simulations of the four degrees of freedom nonlinear semi-active suspension model under dual-frequency quasi-periodic excitation is more closer to the real situation, which helps the design of vehicle suspension and pavement.

Key words: quasi-periodic; nonlinear vehicle; semi-active suspension; chaotic vibration