

文章编号: 1000-7598-(2003)06-0935-05

基于数据智能可视化分析的滑坡信息化施工研究

张友良, 冯夏庭, 赵洪波, 李邵军

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 采用信息化施工技术进行大型滑坡整治, 既安全又经济。笔者探讨了基于大量监测数据处理为核心的信息化施工技术。采用数据可视化技术对大型滑坡大数据进行分析处理, 确定了滑动面位置、滑动方向和对滑坡进行危险性分区。将支持向量机方法用于预测滑坡变形。将智能和可视化分析结果用于滑坡动态优化设计中, 并用一个实际工程实例论述了方法的思路。

关 键 词: 滑坡监测; 数据可视化; 信息化施工; 智能预测

中图分类号: TP 391 **文献标识码:** A

Study on info-construction of large landslides based on intelligent and visual analysis of monitoring data

ZHANG You-liang, FENG Xia-ting, ZHAO Hong-bo, LI Shao-jun

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Application of info-construction to large landslides ensures the project both safer and more economical. Methods of info-construction focused on tremendous data analysis are studied. The slip plane, slide direction and landslide zonation are determined by method of data visualization of monitoring data. The support vector machine is applied to predicting landslide displacements. The results of intelligent and visual analysis of monitoring data are used in the dynamic optimizing design of landslides. Finally, an engineering example is given to discuss the train of thought of the methods.

Key words: landslide monitoring; data visualization; info-construction; intelligent prediction

1 引 言

由于岩土工程的复杂性、不确定性和离散性, 工作人员在进行设计之前不可能把地质条件勘察得十分清楚。因此, 岩土工程设计经常是基于有限的模糊的数据, 甚至是错误的信息基础上。因此, 建立于这些数据上的滑坡设计有时过于保守, 造成资金的大量浪费; 有时设计又过于冒险, 从而引发工程事故。

随着监测技术和计算机等技术的发展, 为了解决这个问题, 近年来人们提出了一个新的设计施工技术——信息化施工技术。信息化施工就是在施工过程中, 通过各种监测手段, 实时采集施工过程中现场监测数据, 并加以分析和预测, 根据分析结果

对原设计和施工方案进行适当调整, 用以指导下一施工过程, 从而保证施工能安全、经济地进行。我国研究者在这方面做了大量工作。周德培^[1, 2]、王在泉等^[3]提出了通过监测和信息反馈, 在施工过程中逐步使“灰色”系统“白化”, 并在“白化”过程中, 基于监测信息对工程设计、施工进行逐步优化的思路。王在泉^[3]等还结合岩石力学应力释放与转移原理、块体稳定理论等方法, 对信息化施工方法在复杂边坡工程快速安全施工、边坡与硐室合理开挖顺序中的应用进行了研究。朱合华^[4]等对深基坑信息化施工进行了研究, 他采用动态施工反演分析法, 分析了深基坑中隔墙和支撑体系在施工过程中的受力状况及墙体稳定性, 并对墙体位移和内力进行了及时预报, 为基坑信息化施工提供了依据。秦

收稿日期: 2002-10-21

基金项目: 中国科学院岩土所领域前沿基金项目, 国家重点基础研究发展规划项目资助 (编号: 2002CB412708)。

作者简介: 张友良, 男, 1972 年生, 博士, 主要从事岩土工程大规模并行有限元计算, 滑坡工程和基坑工程研究以及岩土工程软件开发工作。

四清^[5]提出在动态设计过程中,要特别重视因素敏感性分析,以便抓住滑坡主要控制因素,有的放矢,重点治理。这些研究成果在实际工程中得到了一些应用,推动了动态设计理论的发展。

应该注意到,大型滑坡监测的数据是大量的,与日俱增的。如果不采取有效的方法进行处理,我们将被这些洪水般的数据淹没。以往,我们所做的仅是对这些表面上毫无规律的数据进行存储,而未能对它进行有效的分析和解释,更不能利用这一堆数字来解决问题,因而,监测的作用没有得到充分发挥。因此,需要新技术来帮助理解这些数据,数据可视化就是在这种背景下得到重视而迅速发展起来的。本文对数据可视化分析技术在大型滑坡信息化施工中的应用进行了研究,以数据智能和可视化分析为核心的滑坡信息化施工思路与技术,数据智能分析主要指采用最新的支持向量机等智能方法预测滑坡变形,并用以指导施工。

2 监测数据信息化的方法和步骤

图 1 是以数据处理为核心的滑坡信息化施工思路和方法框图。从图中可以看出,该方法主要包括 5 个步骤。(1) 根据滑坡的工程地质等条件进行滑坡监测设计,确定监测项目、监测内容和监测点布置、监测仪器、监测频率等。监测设计的优劣关系到监测数据的代表性和整个信息化施工的顺利实施。由于篇幅限制,本文只列了一部分主要的监测项目。在滑坡施工前进行初次读数,并在滑坡施工过程中不断采集数据。(2) 利用数据库技术,对这些大量的原始数据进行存储和管理,并进行预处理和数据可视化,绘制各种二维和三维曲线和图形。

(3) 进行数据分析并计算滑坡设计参数,如滑体强度参数、滑动面位置、滑动方向、滑坡危险性分区等。(4) 进行滑坡变形预测和预警,这里主要采用神经网络和支持向量机等智能方法。(5) 在以上各步骤,特别是第 2 步基础上进行滑坡动态优化设计。动态优化设计采用的设计参数是滑坡施工中采用可视化和各种分析手段得到的,它比勘测和室内实验数据更准确、可靠。根据动态优化设计调整原设计,并应用到下一施工步骤中。以上各步骤中,第 2 步是数据可视化,第 3 步是数据的分析利用,第 4 步是监测数据的预测,它们主要是为滑坡动态优化设计服务的,而且,它们之间是相互关联、相互利用的,因此,称之为以数据处理为核心的信息化施工技术。

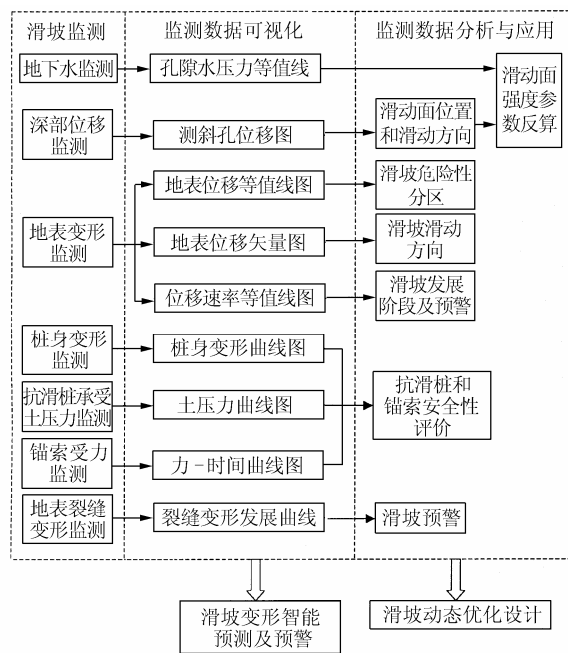


图 1 基于监测数据智能及可视化分析的
滑坡信息化施工技术路线

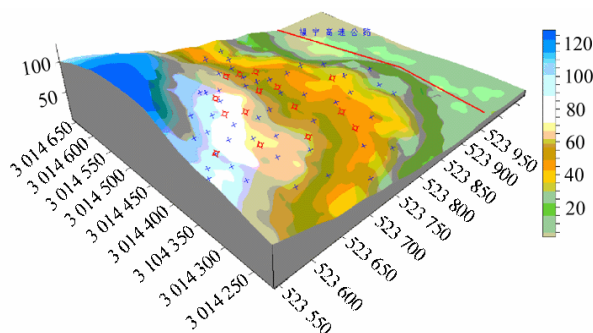
Fig.1 Scheme of info-construction of landslide protection
based on the intelligent and visual analysis of monitoring data

3 监测数据可视化和滑坡设计参数的确定

数据可视化技术运用计算机图形学和图像处理技术以及可视化算法,把巨大数量的数据转换为静态或动态图像或图形呈现在人们的面前,并允许通过交互手段控制数据的抽取和画面的显示,使隐含于数据之中不可见的现象成为可见,为人们分析、理解数据、形成概念和找出规律提供了强有力的手段^[2, 6]。为了对大量监测数据进行管理,可采用数据库技术进行管理、存储、查询等。

为叙述方便,本文结合一个工程实例来进行讨论。同三国道主干线—福—宁高速公路八尺门互通区滑坡位于白岩村及古井头一带,高速公路在滑坡前缘通过,滑坡由 4 个大小不一的滑坡组成滑坡群。这里讨论的 3[#] 滑坡面积约 6 000 m²,地处丘陵、滨海滩涂地貌,地层主要分布为坡积成因碎石土、残积成因的残积土,下伏为石帽山群下组下段英安质晶质凝灰岩。2000 年 6 月,由于连续暴雨和人为开挖等因素,导致滑坡体出现多处开裂。为了对该滑坡群进行安全、经济的整治,业主采用了信息化施工技术。监测项目主要包括地表变形监测、深部位移监测、地下水位监测、裂缝变形监测、抗滑桩后土压力监测、桩身变形监测、预应力锚索受力监测

等。为了合理布置监测点,对滑坡体进行可视化处理。图2是3[#]滑坡三维地形和地表测点及测斜孔布置的可视化图形。通过可视化,可以优化监测点的布置,做到点、线、面相结合,系统规划,同时突出重点区域。



注: 图中+字标识代表地表监测点, 圆点代表测斜孔

图2 滑坡三维地形和测点布置可视化 (单位: m)

Fig. 2 3D visualization of landslide topography and monitoring points (unit: m)

3.1 深部位移数据可视化和滑动面的确定

目前,最常用的是采用钻孔倾斜仪来监测深部位移^[8]。安装时,把测斜管深入到稳定地层一定位置,滑体的移动使得滑动面以上测斜管一同移动,通过仪器就可测得钻孔不同深度处的位移和位移速率。对深部位移数据的可视化处理包括绘制测斜孔A向和B向累积位移-孔深-时间曲线以及合成位移曲线和位移速率曲线等。图3是该滑坡测斜孔A向(滑坡运动方向)累积位移-孔深曲线,其B向相对于A向位移较小。从该图可以看到在孔深9.5 m处有明显的突变区段,因此,可以确定,在该深度存在一个正在滑移的滑面。除了确定是否存在滑动面和滑动面具体位置外,还可以通过测斜孔的扭转角监测滑动运动规律。

3.2 地表位移可视化和滑坡危险性分区

滑坡是一个三维地质体,无论是地质条件还是变形状况等方面,在空间的分布是不相同的。但是,目前,有些滑坡是通过主轴剖面等少数几个剖面来设计整个滑坡加固,这显然不太合理。而且,对于大型滑坡,滑坡地质条件相差很大,有些区域是不稳定的,有些区域则比较稳定,如果对不同区域采用同样的处理方法,则要么不经济,要么不安全。为此,可采用可视化方法对大型滑坡进行危险性分区。图4是该滑坡2001年8月9日地表变形大小等值线图,该滑坡初次读数为2001年7月21日。通过该图,可以明显看到图中的西北角有一变形剧烈

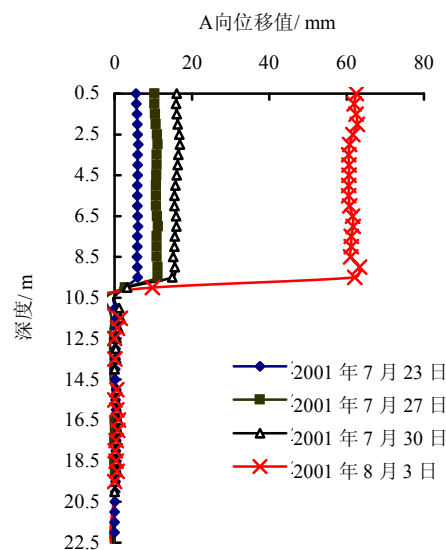


图3 3[#]滑坡测斜孔A向(滑坡运动方向)累积位移-孔深曲线

Fig. 3 Curve of accumulated displacement vs depth of inclinometer in #3 landslide

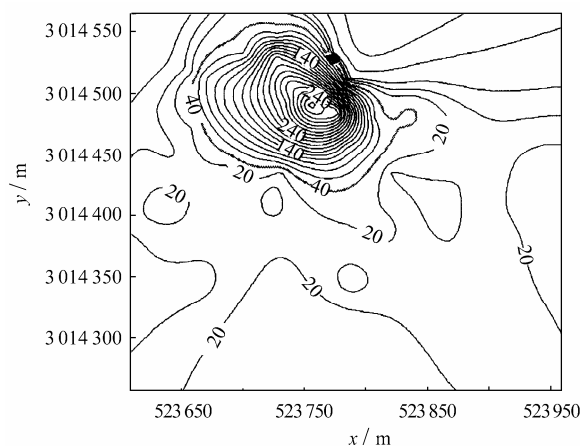


图4 地表位移大小等值线图(2001年8月9日监测值)

Fig. 4 Contour map of surface deformation (2001-8-9)

区域,在滑坡体后缘可以发现变形有明显的骤降,根据该滑坡的地形地质条件,把当时变形大小为40 mm 定为一个界限值,则图中40 mm 等值线范围内是该滑坡需要重点加固的范围。此外,通过这种方法还可以确定滑坡边界、滑坡体后缘等重要要素。

3.3 地表位移矢量图可视化和滑坡方向确定

可视化地表位移矢量图见图5。

滑坡方向是滑坡加固设计的一个重要参数。如在抗滑桩设计中,矩形截面桩的长边必须与滑坡的滑动方向一致,圆形截面桩的配筋与滑动方向有重要联系;为了防止预应力锚索锚固体纵向不承受剪应力(锚索锚固体抗剪能力差),必须考虑滑坡滑动方向。滑坡的滑动方向可以根据测斜孔孔口位移来

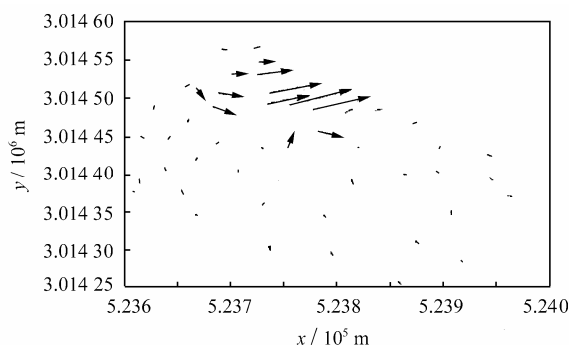


图5 地表位移矢量图(2001年8月9日监测值)

Fig. 5 Vectors of surface deformation (2001-8-9)

确定,也可以根据地表位移来确定,或其它等综合方法。这里采用地表位移来确定滑坡滑移方向。首先,在滑坡危险性分区基础上,对同一危险区的监测点位移矢量计算求得该区的滑移方向。采用加权平均方法:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

式中 D 为该区滑移方向; d_i 为第 i 个测点的位移方向; m_i 为第 i 个测点的位移大小; n 为该区测点个数。

通过计算,确定图4最危险区域滑体滑移方向为 100° (即 SE 方向)。

3.4 滑动面强度参数的反算

在滑坡滑动面、滑移方向等参数确定后,可以根据相关方法反算或反演滑体参数。常用的方法有数值方法、神经网络等智能方法和极限平衡法等^[7]。极限平衡法由于其简便、工程经验丰富而得到广泛应用。它根据滑坡处于极限平衡状态时的平衡条件来求,反算法主要有综合 c 法、综合法 φ 法、选定 c 求 φ 法、选定 φ 求 c 法和联立方程法等。对于该滑坡图4中最危险区域,采用滑体破坏前地形,令安全系数 $K = 0.96$,反求出滑带土的综合内摩擦角 $\varphi = 11.3^\circ$ 。

4 滑坡变形的智能预测

滑坡的变形是复杂内部地质条件和外界条件作用的结果,受到很多因素的影响,同时,还受到测量本身误差的影响。滑坡变形预测在大型滑坡施工中有重要的作用,它预测滑坡的变形直接用来指导施工,达到警戒值还能及时报警,避免人员和财产的重大损失。

滑坡预测方法主要有灰色系统预测法、神经网络等智能方法、非线性动力学方法等。本文采用的支持向量机方法是基于统计学习理论的一种新的通用学习方法^[9],用它建模不必知道因变量和自变量之间的关系,通过对样本的学习,即可获得因变量和自变量之间复杂的非线性映射关系;同时,它是基于小样本的一种学习方法,不必知道太多的数据即可建模。它既有严格的理论基础,又能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,其核心思想就是学习机器要与有限的训练样本相适应。

对于一个非线性位移时间序列,通过监测获得其位移随时间变化的一个时间序列 $\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,对这个非线性位移序列进行预测,就是要寻找在 $i+p$ 时刻的位移值 x_{i+p} 与前 p 个时刻的位移值 $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1}$ 的关系,即 $x_{i+p} = f(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1})$, $f(\cdot)$ 为一个非线性函数,表示位移时间序列之间的非线性关系。根据支持向量机理论,上述的非线性关系可以用支持向量机对 n 个实测位移的学习来获得,也就是通过对 $n-p$ 个位移时间序列 $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1}$ ($i=1, \dots, n-p$) 的学习,来获得位移时间序列之间的非线性关系:

$$f(x_{n+m}) = \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(X_{n+m}, X_i) + b \quad (2)$$

式中 $f(x_{n+m})$ 表示第 $n+m$ 时刻的位移值; X_{n+m} 表示 $n+m$ 时刻前 p 个时刻的位移值, $X_{n+m} = (x_{n+m-p}, x_{n+m-p+1}, \dots, x_{n+m-1})$; X_i 表示第 $p+i$ 时刻前 p 个时刻的位移值, $X_i = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1})$; $K(\cdot)$ 是核函数; α, α^* 和 b 是通过解如下的二次规划问题获得的,最大值为

$$W(\alpha, \alpha^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(X_i, X_j) + \sum_{i=1}^k x_{i+p} (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i + \alpha_i^*) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*) &= 0, \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* &\leq C \quad (i=1, 2, \dots, n-p) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里,作者计算了采用支持向量机预测滑体的深部位移。预测结果见图6,从图中可以看出,预测值与测量值趋势是一致的,其值相差也很小。通过预测,对该滑坡群提出了几次准确报警,使得施工单位和业主及时将滑坡上的居民和施工人员迁移,避免了工程事故的发生。

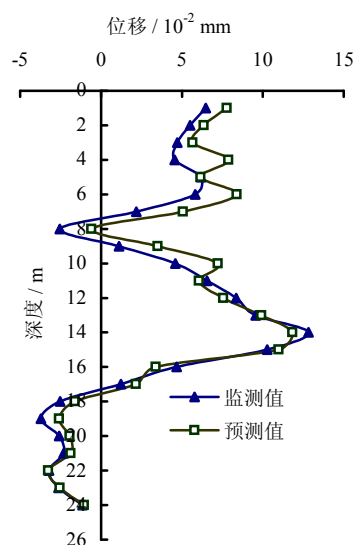


图6 测斜孔位移的支持向量机预测

Fig.6 Prediction of displacements of inclinometer by SVM

5 滑坡动态优化设计

在滑坡设计参数确定后,考虑滑坡变形预测情况,可以进行滑坡的动态优化设计。所谓动态优化设计,主要体现在采用以上各种可视化方法和极限平衡方法等确定的更符合现场实际的参数上。这实际上是考虑目前施工状况的重新设计,采用的设计参数更符合实际情况,更具有代表性,更客观。滑坡加固设计也可以采用各种最优化方法,目前最好方法之一是基于遗传算法的全局优化方法。根据本文提出基于数据处理为核心的信息化施工方法,福宁高速公路八尺门互通区滑坡治理,减去了原设计中坡面上的预应力锚索,投资减少了大约 20 %,经济效益显著。根据目前加固后监测数据来看,滑坡以及抗滑桩和预应力锚索等结构运行良好,变形均很小。

6 结论

(1) 大型滑坡施工前许多设计参数是不确定的,通过信息化施工技术可以在施工过程中优化设计,做到既经济又安全。

(2) 数据可视化是解决大型滑坡信息化施工中巨大数据分析处理的一个有效方法,它能够将隐

含于大量数据中不可见规律显现出来,帮助人们分析理解和充分利用数据。

(3) 变形预测是信息化施工中一项重要内容,采用最新的支持向量机方法预测变形,能解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题,预测结果很好。

(4) 信息化施工最终目的是优化设计和指导施工,对监测数据的处理和利用是关键,本文的以数据处理为核心的信息化施工技术具有很实用的价值。

参考文献

- [1] 周德培. 软岩高边坡工程的信息施工[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 373—377.
- [2] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡的动态设计施工模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 372—1 374.
- [3] 王在泉, 王建波. 复杂边坡工程稳定性监测及信息施工[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (6): 587—590.
- [4] 朱合华, 崔茂玉, 刘学增等. 大型深基坑动态施工反演及稳定性分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(6): 74—79.
- [5] 秦四清. 滑坡工程治理优化设计与信息化施工[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10 (2): 1—9.
- [6] 王维江, 张俊霞. 数据可视化技术研究的新进展[J]. 计算机时代, 2002, (5): 4—6.
- [7] 冯夏庭. 智能岩石力学(3)—智能岩石工程[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 475—478.
- [8] 张友良, 陈从新, 刘小巍. 面向对象的深基坑监测模型与系统开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 1 061—1 064.
- [9] 赵洪波, 冯夏庭, 尹顺德. 基于支持向量机的岩体工程分级[J]. 岩土力学, 2002: 23 (6): 698—701.