

滑坡稳定性评价和监测预报常用方法综述*

谭儒蛟^① 胡瑞林^① 刘衡秋^{①②} 曾如意^③

(^①中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(^②中国矿业大学 北京 100083)

(^③国家电力公司中南勘察设计研究院 长沙 410083)

摘要 本文简要评述了滑坡稳定性评价常用的极限平衡法、数值法和概率法,介绍了用于滑坡监测的常用仪器与技术,以及典型的滑坡预报模型;并就滑坡研究的发展趋势做了初步展望。

关键词 滑坡 稳定性评价 监测预报 常用方法

SUMMARIZATION OF LANDSLIDE STABILITY EVALUATION, MONITORING AND FORECAST METHODS

TAN Rujiao^① HU Ruilin^① LIU Hengqiu^{①②} ZENG Ruyi^③

(^①*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

(^②*China University of Mining and Technology, Beijing 100083*)

(^③*Central - South Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute of State Power Corporation, Changsha 410083*)

Abstract In this paper, the usual methods to landslide stability evaluation are summarized and reviewed, which include limit equilibrium analysis, numerical modeling and probability analysis. The paper also introduces the universal monitoring instruments and forecasting models. And an expectation of landslide studying trends is given in the end.

Key words landslide, Stability evaluation, Monitoring and forecast, Usual methods

滑坡是仅次于地震的第二大全球性地质灾害,它的发生严重危害生态环境和工程建设,往往造成重大的生命和财产损失。滑坡的研究业已成为当前工程地质学、土力学和岩土力学研究的热点和重要课题,在滑坡研究的理论、方法和综合治理技术方面取得了很多有价值的研究成果。本文拟就目前广泛应用于滑坡稳定性评价和监测预报方面的研究方法予以评述。

1 滑坡稳定性评价方法

滑坡稳定性研究的主要任务之一是进行稳定性计算,评价其稳定状态和可能的变化发展趋势。它是在确定了地质模型和物理破坏模式以后,给出合理的数学概化模型,通过计算分析得出结论,使之作为滑坡整治工程设计的依据。到目前为止,滑坡稳定性的计算研究已经有几十种方法,常用的方法可大致概括为三类^[1]:极限平衡法、数值分析法和概率法。

* 基金项目:本文得到中科院知识创新工程重要方向项目(No.:80253030)和973专题(No.:2002CB412702)资助

1.1 极限平衡法

极限平衡法是根据滑体或滑体分块的静力平衡原理和摩尔-库仑准则分析滑坡各种破坏模式下的受力状态,以及滑体上的抗滑力和下滑力之间的定量关系来评价滑坡的稳定性。它是一种定量计算方法,也是工程上使用最多、最成熟的方法。目前工程中常用的极限平衡法有 Bishop 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Janbu 法以及 Sarma 法等。它们的主要特点如表 1 所示。

表 1 常用极限平衡法简表

分析方法	多余变量的简化假定 ^[2,3]	力学分析 ^[2]	适用范围
Bishop 法	条块间只有水平作用力,不考虑条间垂向作用力	1. 整体力矩平衡 2. 条间垂向作用力为零	平面或近似圆弧滑面滑坡,垂直条分滑体
Morgenstern-Price 法	条间切向力和法向力存在比例关系;条间力作用点位置随滑面倾角而变化	1. 分块力矩平衡 2. 分块力平衡	垂直条分滑体,用于任何形状滑面滑体
Spencer 法	条块间水平与垂直作用力之比为常数	1. 分块力矩平衡 2. 分块力平衡	垂直条分滑体,用于任何形状滑面滑体
Janbu 法	假定了条间力作用点的位置,即在离滑面 1/3 处	1. 分块力矩平衡 2. 分块力平衡	垂直条分滑体,适用于任意滑面
Sarma 法	条块间满足极限平衡条件	分块力平衡	任意条分,考虑临界地震加速度,适用于任意形状滑面滑坡

极限平衡法的优点是在不能给出岩土体结构变形图像情况下,能对结构稳定性给出定量的结论;其局限性是不能确定滑体内及滑面上的实际应力分布情况,也不能解决岩体本身的变形对应力分布及稳定性的影响,其基于滑裂面的平面假定,与滑坡实际失稳的三维滑裂面特征有着较大的差异,也难以反映滑坡失稳的真实情况。

近年来不少学者也致力于三维极限平衡法的研究,如 Hovland 法和 Leshchinsky 法等等。现有的三维极限平衡分析法,它们实际上是二维“条分”的拓展,它们把滑体离散成柱体,柱体按行、列系列编排,并应用力平衡条件和摩尔-库仑准则求解安全系数^[4]。与二维方法相似,必须在滑裂面的形状和柱间内力方面引入一些假定,从而限制了三维极限平衡法的实际应用和推广。

极限平衡法受制于超静定方程的多余变量的处

理,其改进和发展的可能途径是建立任意条分方式下的通用方程,或者引入新的破坏判据,因为摩尔-库仑准则并非极限平衡分析法的根本准则^[3]。

1.2 数值分析法

数值法是应力应变分析方法,它是通过求解滑坡结构体内部的应力应变来分析滑坡的变形和稳定性问题。这种分析方法能深入地了解滑坡内应力、变形规律及其对稳定性的影响,可用于精确计算。目前主要的数值分析法包括有限单元法、离散单元法、有限差分法和边界单元法。

1.2.1 有限单元法

有限单元法的基本原理^[5]是将所研究的区域划分为有限个小区域,即单元。单元与单元之间仅在指定点处相连,这些指定点称为节点。在离散化的模型上,对单元逐个地进行分析,再将各单元组合到一起进行整体分析,然后结合所要求解问题的位移(或应力)边界条件,按结构分析中的位移法(或力法)求解各节点处的位移,并进而求出各单元的应力、应变及所研究区域的屈服区。在滑坡有限元分析计算中,一般采用四节点四边形单元和三节点三角形单元。滑坡稳定性分析时结合岩体结构特征、对每一滑动面给出其在每一单元内的长度、倾角、粘聚力、内摩擦角及边坡饱和时每一单元的水位值。利用有限元分析结果,由每一单元的主应力计算出滑面上每一单元的剪应力及正应力,再用摩尔-库仑破坏判据确定整个滑面的稳定系数。

有限单元法是基于弹性力学的小变形假设,以虚功原理为理论基础而建立的,它讨论的主要是小变形的问题。有限单元法能简便地处理复杂情况下岩土体边界条件和地质条件,如果计算参数的选取和模型建立比较合理的话,计算结果非常接近实际情况。

1.2.2 离散单元法

离散单元法的基本原理是将岩体视为由裂隙切割的非连续介质,块体间按照岩体的裂隙切割形成相互镶嵌排列且构成块体的集合体。当这一集合体作用有力系或其边界约束条件发生变化时,块体间就会产生相互作用力(包括重力和分力),从而导致块体产生一定的加速度及相应的位移,使其空间状态发生变化。位移的块体之间由于差异位移矢量的存在,从而使块体之间彼此又发生新的作用,这种作用在离散单元法中用块体之间产生一定的位移“迭合”来描述,根据力——位移关系,按“迭合”位移又

可计算出新的作用力系,从而计算出集合体各块体在新力系下的加速度、位移及新的运动位置^[6]。如此反复迭代,直至整个体系作用的力系达到新的平衡状态为止,从而真实地模拟出岩体的运动过程。

离散单元法是在块体准刚性假设的前提下,以牛顿第二定律为理论基础建立起来的,它研究的是块体集合体的运动特征问题,并以微小运动状态的求解来准确模拟地质体的宏观大变形,如地质体变形演化发展到后期阶段所具备的变形特征等。因此离散单元法不仅能给出滑坡的最终破坏形式,也能模拟滑坡的动态过程,是滑坡这种典型的非连续性大变形问题研究的有效方法和发展方向。

1.2.3 边界单元法

边界元法基本原理是通过把求解域内的边界剖分为若干单元,将求函数解简化为求单元结点上的函数值,求解积分方程就化为求解一组线性代数方程组^[7]。边界元法是在经典积分方程的基础上,吸收了有限单元法的离散技术而发展起来的一种数值方法。其突出优点是可降低求解问题的维数,数据准备量少,边界内或外的有关物理量可由解析式的离散形式直接求出,提高了计算精度。传统边界元法只需将表面离散成边界单元,用于分析均质弹性问题,但是实际上岩体是非均质和粘弹性塑性的,并含有大量的节理和软弱夹层,要用边界元法模拟这类非线性、非均质的岩体滑坡则不如有限元法。

1.2.4 有限差分法

有限差分法是从微分方程出发,将求解区域经过离散化处理后,近似地用差分代替微分,将微分方程和边界条件的求解归结为求解一个线性代数方程组^[8]。在滑坡稳定性分析方面应用的最多的是显式拉格朗日差分法及FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)系列数值模拟软件。

FLAC软件的基本原理即是拉格朗日差分法,此程序可以在初始模型中加入诸如断裂、节理构造等地质因素因而适宜于处理大尺度、大变形工程和地质问题。其中FLAC家族中的FLAC^{3D}(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions)采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程,并应用了混合单元离散模型,能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形。与有限元法相比较,FLAC^{3D}有以下几个优点^[9]:采用混合离散化法,正确的模拟了塑性破坏及塑性流动;采用动态方程求解,克服了系统模

型内的不安定因素;采用显式解析法,不需要建立刚性矩阵,节省内存,在解决非线性问题时大大提高了运算速度。但是有限差分法也有缺陷:局限于规则的差分网格,灵活性较差;近似解的导数不准确,沿非线性边界难于引入边界条件,几何上复杂的域难于准确表达以及不适用于非均匀的网格等。

数值法还有块体理论(BT)、不连续变形分析(DDA)和流行元法(NNM)等,但其应用不如前述几种数值方法普遍,本文不予详述。

随着计算机技术的迅速发展和普及,数值分析方法获得了长足进展,并逐渐趋向成熟。但是由于滑坡岩体的复杂性,工程因素的复杂影响,以及它们的相互作用和随时间的变化,使数值分析方法在滑坡稳定性评价中的应用仍存在许多有待解决的问题,数值方法目前还处于充实、完善和发展阶段。其发展趋势是不同数值方法相互耦合,耦合法能充分发挥各自的特长,减少计算量,提高计算精度,从而达到经济高效的目的。如果我们把滑坡从变形演化、发展、运动到破坏视作一个复杂的从量变积累到质变的动态力学行为,量变的积累可以视为小变形过程,而质变发生后的破坏和运动则为大变形,用有限元和离散元的耦合来统一表述两种变形过程。但是建立其数学—力学模型是一个难点,若能突破就是数值法上的创新。

1.3 概率分析法

概率分析法是一种非确定性方法。它针对影响滑坡稳定的诸因素进行概率分析,用稳定性系数值的破坏概率来评价滑坡的可靠性,适宜于分析含有较多结构面的岩质滑坡。概率法能够反映出岩土体计算参数的随机性^[10],从宏观上把握其物理力学特征,进而了解参数未来变化趋势,找出其内在分布规律性。其次因岩土体试验数据众多,且参数选择对计算结果有着显著影响,采用概率法分析滑坡稳定克服了指标选取的困难,而且计算得出的破坏概率能准确反映滑坡安全程度。

基于概率法思想的Monte-Carlo法是求解滑坡稳定可靠性指标和破坏概率的行之有效的方法^[11]。采用Monte-Carlo法可以估计滑坡稳定可靠度,预测出指定条件下的滑坡体的稳定状态,是复杂的时空相互作用问题得以处理,它受问题条件限制的影响较小,适应性强,可以求解任意多个变量、分布任意的滑坡稳定可靠度问题。

非确定性方法除了概率分析法以外,还有模糊

数学分析法、灰色理论分析法和灰色模糊综合法等。

2 滑坡监测预报方法

滑坡的失稳破坏,都有一个从渐变到突变的发展过程,一般单凭人们的直觉是难以发现的,必须依靠精密的监测仪器和适宜的技术方法进行周密监测,实现滑坡的早期预报,从而最大限度地减少和防止滑坡所造成的损失。

2.1 滑坡监测方法

目前滑坡监测的常用方法大致可分为人工法和仪器测定法两种^[12]。人工法简单易行,但只能在滑坡进入加速变形末期后进行预报,且无法提供具体数据进行未来整体破坏时间预报,是一种较原始的定性监测方法。为了能对尚处于初始变形阶段和稳定变形阶段的滑坡进行未来整体破坏时间预报,必须借助于多种先进的技术设备,即采用仪器测定法。滑坡监测仪器多数都属于变形监测仪器,常用于工程中的主要有:

- (1) 钻孔多点位移计:多用于坡体深部岩土体内部相对位移量的观测。
- (2) 收敛计:应用范围广,简便快捷,但在高差较大时不易操作。
- (3) 测斜仪:多用于观测不稳定边坡潜在滑动面位置或已有滑动面的变形位置,适用于滑坡变形量小的坡体中。
- (4) 全站仪:可用于滑体地表监测点的三维测量,其优点是精度高、操作方便、测量速度快和大大降低测量工作者的劳动强度等,缺陷是应用受通视条件的限制。
- (5) GPS 卫星定位仪:已逐步在有条件的地方或通视条件差的林区实施^[13]。

(6) TDR 监测系统^[17]:TDR 系统是根据 TDR (Time Domain Reflectometry 时间域反射测试技术)的电缆反射波进行滑坡监测,在欧美等发达国家已得到广泛应用。TDR 系统与传统监测仪器相比优点是:价格低廉,检测时间短,可远程访问,数据提供快捷,安全性高;不足在于不能用于需要监测倾斜情况但不存在剪切作用的区域,无法确定滑坡移动量和滑坡移动的方向。因此,当前国外在进行滑坡监测时广泛采用以 TDR 系统作为主监测仪器,辅以倾斜仪等传统监测设备的方法,从而达到更好的滑坡监测效果。

2.2 滑坡预报方法

滑坡预报是滑坡研究的重要课题,其任务是及时准确地预报滑坡发生的时间、空间和规模。关于滑坡预报的理论和方法很多,其中斋藤迪孝模型、灰色预报模型、Pearl 生物生长模型和非线性相关分析模型^[14]是预报理论较为充分、研究较为深入、预报效果较有效的方法。

2.2.1 斋藤迪孝模型

蠕变三阶段理论是该预报方法的基础,认为土体变形过程包括不稳定流动阶段、等速粘塑性阶段和加速流动阶段,而最后阶段的直观表现即是滑坡的发生。斋藤总结出坡体破坏时间与变形速率的线性相关关系,使时间预报问题可以简单归结为求取变形速率的问题。经后来学者采用差分法及最小二乘法求解斋藤公式之后,使预报精度大大提高。这类模型适于进行短期预报和临滑预报,应用中适用于前缘不受阻的土质滑坡,有一定局限性。

2.2.2 灰色预报模型

灰色预测的基本思路是将边坡稳定性系统视为一个灰色系统,把随时间变化的随机滑坡形变位移数列,通过丰富而量化的数学方程处理,概化出预报关系式,使之变为一递增时间序列,然后用适当的曲线逼近,以此作为预测模型。滑坡预测中普遍采用 GM(1,1)模型和 Verhulst 模型。此模型将边坡稳定性系统视为一个灰色系统灰色预报模型综合了滑坡变形破坏的复杂性影响因素,并通过丰富而量化的数学方程概化出预报关系式,科学性和合理性较高,适用于中期预报。在实际处理问题时要求掌握充分的数据和信息,尽可能减少人为插值或赋值的情况。在实际应用方面,也取得了一些成功的范例,如甘肃天水黄龙西村滑坡、湖北宜昌新滩滑坡、湖北秭归鸡鸣寺滑坡等。

2.2.3 Pearl 生物生长模型

滑坡失稳破坏的发展过程与生物生长曲线相类似,滑坡变形发展阶段、急剧变形阶段分别对应于生物的产生阶段、发展阶段;滑坡的失稳平衡破坏阶段,变形急剧增加直至发生破坏,然后趋于稳定,相当于生物生长的成熟阶段,这时曲线的分界点(拐点)就是所要寻找的预报点,预报的问题变成了求参数得出拟合曲线方程的问题。该方法理论基础充分而可靠,需要在实践中进一步检验。

2.2.4 非线性相关分析模型

它从滑坡演化的混沌特征出发,通过曲线拟合

相关检验的方法,将观测现象和数据资料视为方程组的一系列特解,即作为动力模型的一系列离散值,得到非线性动力学方程,确立预报的非线性动力学模型。它适用于发展变化规律复杂、变形破坏具有偶然性的滑坡预报。缺陷是该模型应用时受限于系统状态变量的选择和具体斜坡的工程地质条件。

其他预报方法如指数平滑法、动态跟踪法、BP—GA 混合算法、协同一分岔模型、类比分析法等,本文不再以赘述。各种方法都有自己的使用条件和适用范围,也存在其弊端。随着一些新的技术手段的应用和发展,以及相临学科的渗透和新学科的兴起,滑坡预报这一理论和实践上尚未完全解决的技术难题必会取得突破,趋于完善和成熟。

3 滑坡研究展望

滑坡研究旨在指导实践,形成生产力以减灾防灾。结合国内外滑坡研究动态,以笔者之陋见,认为加强滑坡的地质基础研究和引入新理论新方法是发展的趋势和要求。首先,滑坡孕育在特定地质环境下,研究不能脱离地质基础,其中滑坡的地质结构特征和孕灾、成灾机理的研究是核心。例如最近有专家学者致力于研究地应力场、水应力场、重力场、温度场及外动荷载等多场协同耦合作用与滑坡成灾关系的前沿课题,就是加强滑坡地质基础研究的代表。其次,引入新理论也是发展的方向,具代表性的是非线性理论的引入。该理论抓住了滑坡的系列非线性本质特征,如构成滑坡岩土体材料的非线性,滑坡体赋存环境的非线性以及滑坡演化过程的非线性。非线性理论引起滑坡稳定性评价以及监测

预报方法的变革,开辟了非线性工程地质学这一充满勃勃生机的新领域。

参 考 文 献

- [1] 刘传正. 论滑坡稳定性评价的几个关键问题. 中国地质灾害与防治学报,1996,7(3):55~59.
- [2] 谭成轩等. 滑坡稳定性三维数值模拟分析. 长春科技大学学报,1999,29(3):267~271.
- [3] 林峰,黄润秋. 边坡稳定性极限平衡条分法的探讨. 地质灾害与环境保护,1997,8(4):9~12.
- [4] 张发明等. 滑坡稳定性评价的三维极限平衡方法及应用. 地质灾害与环境保护,2002,13(2):56~57.
- [5] 詹军等. 有限元法在滑坡稳定性分析中的应用. 煤田地质与勘探,2000,30(1):45~46.
- [6] 毛新虎. 某滑坡体变形演化过程的离散元数值模拟. 山西建筑,2002,28(8):p41.
- [7] 曹庆林. 节理岩体的边界元模型及其应用. 中国矿业,1996,5(4):56~60.
- [8] 潘别桐等. 工程地质数值法. 北京:地质出版社,1994.
- [9] 陈祥军等. 用FLAC^{3D}进行马崖高边坡稳定性分析. 石家庄铁道学院学报,2002,15(3):76~79.
- [10] 沈怀至. 引黄工程8#隧洞进口边坡稳定性概率法分析. 水利水电工程设计,2003,22(1):48~50.
- [11] 李强等. 基于 Monte - Carlo 法的滑坡稳定可靠性分析. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1674~1676.
- [12] 郭晓岗等. 滑坡监测的现状与进展. 无损检测,2000,23(1):49~51.
- [13] 韩建设. 岩土工程中滑坡监测的主要技术方法简述. 西北水电,2002,(2):57~59.
- [14] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述. 世界地质,2000,19(4):370~374.