

AGI

边坡监测系统应用与开发

沈细中 冷元宝 张俊霞 张慧 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金重点项目(编号: 60934009)
水利部“948”项目(合同号: 200708)资助

AGI

边坡监测系统应用与开发

沈细中 冷元宝 张俊霞 张慧 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书在详细介绍 AGI (美国 Applied Geomechanics Inc.) 边坡监测系统的基础上, 通过开展室内模型试验, 消化、吸收 AGI 系统的基本使用方法, 在此基础上进行现场监测试验, 总结了 AGI 系统应用中的关键技术问题; 并基于人工智能原理, 尝试建立了边坡安全评价模型, 采用 MATLAB 平台开发了实用性更强, 具有数据管理、统计分析、边坡稳定性数值分析功能的监测数据后处理系统; 并针对工程安全监测的发展需求, 开展了系统推广应用工作, 为边坡安全评价提供科学依据。

本书可供从事边坡安全监测的工程技术人员阅读参考, 也可作为相关领域高校师生的参考资料。

图书在版编目 (C I P) 数据

AGI 边坡监测系统应用与开发 / 沈细中等编著. —
北京: 中国水利水电出版社, 2010. 12
ISBN 978-7-5084-8265-1

I. ①A… II. ①沈… III. ①边坡—监测系统—研究
IV. ①U416. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第262931号

书 名	AGI 边坡监测系统应用与开发
作 者	沈细中 冷元宝 张俊霞 张慧 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 10 印张 237 千字
版 次	2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	28. 00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《AGI 边坡监测系统应用与开发》

编写人员名单

主 编	沈细中	黄河水利委员会黄河水利科学研究院
	冷元宝	黄河水利委员会黄河水利科学研究院
编写人员	沈细中	黄河水利委员会黄河水利科学研究院
	冷元宝	黄河水利委员会黄河水利科学研究院
	张俊霞	黄河水利委员会黄河水利科学研究院
	张 慧	长江科学院河流研究所
	卢 健	水利部科技推广中心
	付志刚	上海三维工程建设咨询有限公司

前言

边坡稳定问题是一个古老而复杂的岩土工程问题，当边坡上的地层或岩土体在自重作用下沿自身软弱结构面（带）发生移动，即产生所谓的滑坡现象。从自然灾害的角度来看，滑坡给世界各国带来的损失可能仅次于地震和海啸。因出现的频度和广度远远大于地震和海啸，滑坡是人类面临的最广泛、受害最重和时间最长的地质灾害。诸多国家和地区，如俄罗斯的高加索及黑海沿岸，英国的南威尔士，肯尼亚中部，美国加利福尼亚州、新泽西州及得克萨斯州，法国南部阿尔卑斯，意大利中部等，均为滑坡多发地区或发生过大型滑坡。我国也是一个崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生十分频繁和灾害损失极为严重的国家，尤其是西部地区，每年由此造成的直接经济损失约 200 亿元。而且，直接由工程建设诱发的崩滑灾害事件也屡见不鲜。据统计，20 世纪 80~90 年代初，每年因地质灾害造成 300~400 人死亡，经济损失 100 多亿元。20 世纪 90 年代中期以来，每年造成近 1000 人死亡，经济损失高达 200 多亿元，而且损失呈逐年上升的趋势。近几年来，采矿、水利、交通和建筑等工程更加蓬勃发展，所形成的矿山边坡、大坝坝肩边坡、水库库岸边坡、铁路和公路的道路边坡等规模之大、数量之多、环境之复杂、地质条件之复杂均是空前的。因此对边坡实施安全监测与预警系统建设，是科学管理边坡和正确处理潜在问题的重要依据。

岩土工程中边坡失稳破坏，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，以保证工程的施工、运行安全；同时，又通过监测验证设计、优化设计来提高设计水平。目前边坡监测技术较多，其中美国 Applied Geomechanics Inc. 生产的 AGI 边坡监测系统集传感器监测技术与 TDR 技术于一

体，辅之数据采集系统，可以实现边坡监测自动化；并能与 GPS、GIS 有机结合，从而实现大范围的边坡安全监测与预警。对比其他监测系统，该系统功能强大，性能稳定，精度高，性价比强。引进该系统，可以提高我国边坡监测装备的现代化水平，推动我国边坡监测与预警自动化水平的提升。

本书在对国内外边坡监测技术的现状与进展进行调查分析的基础上，详细总结了 AGI 边坡监测系统的特点、功能与优势。通过开展 AGI 边坡监测系统模型试验与现场边坡监测试验，总结了系统的应用技巧；同时通过监测成果与数值仿真的相互验证，对 AGI 边坡监测系统的可靠性与计算模型及参数选取的正确性进行了评价。在此基础上，基于人工智能原理尝试建立了边坡安全评价模型，利用 MATLAB 程序开发了实用性更强的边坡监测数据后处理系统；针对工程安全监测的发展需求，开展了 AGI 边坡监测系统推广应用工作，为边坡安全评价提供科学依据。

全书共分 9 章，第 1~第 3 章总结了边坡监测基本理论与技术，并介绍了 AGI 系统的使用方法。从 AGI 边坡监测系统的主要特点及优势，系统硬件组成、软件组成及其功能特性，系统使用方法，并且总结了系统查验、使用、维护、监测数据换算等应用方法，便于推广应用。第 4~第 6 章进行了 AGI 边坡监测系统模型试验及现场试验，总结 AGI 系统应用中的关键技巧，并对数值模拟成果与现场监测结果进行了分析、验证，在此基础上对 AGI 边坡监测系统的可靠性进行了评价。第 7 章、第 8 章进行了基于人工智能的边坡安全评价模型的研究，对 AGI 边坡监测数据后处理系统开发的基本原理与关键技术进行了探讨，利用 MATLAB 程序开发了具有数据管理、统计分析、数值分析功能的边坡监测数据后处理系统。第 9 章对全书进行了概括与总结。

本书由黄河水利委员会黄河水利科学研究院沈细中编写第 7、第 8 章，冷元宝编写第 9 章，张俊霞编写第 4 章、第 5 章第 1~第 2 节；长江科学院河流研究所张慧编写第 1 章、第 3 章；水利部科技推广中心卢健编写第 5 章第 5~第 6 节和第 6 章；上海三维工程建设咨询有限公司付志刚编写第 2 章、第 5 章第 3~第 4 节；在本书的编著过程中得到了常向前、乔惠忠、李海晓、张敏、兰雁、郑军、孟献颖、杨小平、马卫东、王笑冰、李莉、房殿荣、张建伟、尚远合、刘巍巍、陈永等同志的协助及大力支持；AGI 边坡监测系统是在水利部科技推广中心的大力支持下，由欧美大地仪器设备中国有限公司北京办事处景国强、河南海恒设备仪器科技发展有限公司任海杰与黄河水利科学研究院计财处唐华、李清珍、郑易、李庆国等负责采购与引进，编写本书时参考并引用了欧美大地仪器设备中国有限公司及美国 Applied Geomechanics Inc.

等提供的技术资料；编写过程中，参考并引用了国内外大量专家学者的科技成果；本书得到了国家自然科学基金重点项目（编号：60934009）、水利部“948”项目（合同号：200708）经费的资助，在此一并表示最诚挚的谢意。

限于作者的水平 and 经验，本书的不妥之处，敬请读者批评指正，相关意见与建议请发电子邮件至 shenxz@126.com。

编 者

2010 年 12 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 边坡监测技术动态	1
1.2 边坡安全评价理论与方法动态	2
1.3 边坡安全预警预报系统动态	3
2 边坡监测基本理论与技术	5
2.1 概述	5
2.2 边坡监测基本原理与技术	8
2.3 边坡监测常用仪器设备	11
2.4 边坡安全评价理论与方法	18
2.5 边坡安全预警系统	27
3 AGI 边坡监测系统原理与使用方法	35
3.1 系统特点与应用情况	35
3.2 系统组成与功能	37
3.3 系统使用	54
3.4 监测数据换算	59
4 AGI 边坡监测系统模型试验	65
4.1 概述	65
4.2 室内边坡模型设计与制作	66
4.3 室内边坡模型土工试验	69
4.4 AGI 边坡监测系统应用操作技巧	71
4.5 边坡监测试验成果及分析	72
5 AGI 边坡监测系统现场试验	78
5.1 概述	78
5.2 工程概况	78
5.3 现场试验边坡选取及监测网布设	80
5.4 现场边坡土工试验成果	83
5.5 AGI 边坡监测系统现场应用操作技巧	83
5.6 现场边坡监测试验成果及分析	84

6	边坡数值仿真分析与验证	96
6.1	概述	96
6.2	数值分析原理与方法	96
6.3	室内模型试验数值仿真分析与验证	99
6.4	现场边坡监测数值仿真分析与验证	101
7	基于人工智能的边坡安全评价模型研究	111
7.1	人工神经网络	111
7.2	模糊神经推理	114
7.3	灰色理论	116
7.4	突变理论	118
8	AGI 边坡监测数据后处理系统开发	121
8.1	概述	121
8.2	边坡监测数据后处理系统设计	122
8.3	边坡监测数据后处理系统主界面开发	133
8.4	边坡监测数据管理系统开发	135
8.5	边坡监测数据统计分析系统开发	138
8.6	边坡稳定性数值分析系统开发	140
9	结语	145
	参考文献	148

1 绪 论

1.1 边坡监测技术动态

目前国内外应用于边坡安全监测的技术和方法很多,从传统的测斜管、压力计、雨量计和位移计,到新型的 GPS、TDR 和光纤传感器,都大量运用于实际工程监测中,而且很多是以多种技术集成的形式出现的。传统监测技术虽然在数字化自动化方面比较落后,但在长期的工程实践中,积累了大量的成功经验,相关的分析手段也比较完备和成熟,而一些新型的监测技术运用了新的测试原理,显示出更优异的性能。

20 世纪 90 年代初,陆业海等 (1995 年)^[1]将 GPS 空间测量技术用于研究三峡库区的新滩岩崩区九湾溪断裂构造运动与岩崩滑坡的相互关系,使研究局部地区的滑坡变形与大区域构造运动之间的关系从单纯定性分析发展到定量分析。

日本电报电话公共公司的 Kihara M、Hiramatsu K 和 Shima M (2002 年)^[2]等人将光纤分布于日本高知的 Niyodo 河和鹿儿岛 Sendai 河的河堤中,用偏振光时域反射 (BOTDR) 来监测河堤的塌陷位移情况,取得了良好的效果。

三峡大学蔡德所等 (2001 年)^[3]研究了基于微弯机制强度调制光时域反射 (OTDR) 技术的分布式光纤传感,并在室内进行了光纤模拟边坡滑移状态下的实验。试验方案已在隔河岩电厂内的高陡边坡监测中得到了实施,而且在较困难的作业环境下成功地进行了埋设,为推广应用及技术改进提供了经验。

中国地质科学院周策等 (2004 年)^[4]提出了一种用弹膜片和微弯调制机构进行压力传感方案,用 OTDR 技术进行分布式压力测量。使用单膜光纤微弯压力传感原理及对岩体推力进行系统监测,对灵敏度和空间分辨率进行了分析、标定,并进行了野外试验。

电子科技大学代志勇等 (2004 年)^[5]研制了一种基于光纤应力传感的山体滑坡预警监测系统,应力测量范围 0~15MPa,空间分辨率 2m,测量距离 1km 的山体滑坡监测系统,并实验验证了监测方法的可行性。

浙江大学陈云敏等 (2004 年)^[6]采用国内常规同轴电缆及试验材料进行室内剪切试验,研究了同轴电缆的剪切变形对 TDR 波形的影响,总结了不同型号同轴电缆的反射系数随剪切位移的变化规律及力学特性,对于 TDR 技术在国内岩土工程领域的推广应用有很大的实际意义。

中南大学聂春龙、傅鹤林 (2007 年)^[7]针对某边坡工程的破坏模式和滑坡诱因,设计了边坡自动监测系统。该系统采用 TDR、测斜仪等监测手段,以数据采集仪、GSM 和 PCTDR 等进行数据采集、传输和分析;监测过程自动化程度高,采集数据精确连续,并得到人工监测数据的验证,取得了较好的监测效果。

1.2 边坡安全评价理论与方法动态

1.2.1 国外边坡安全评价理论与方法研究进展

工程实践的需求是岩土工程得以快速发展的主要动力。边坡工程的稳定性问题是岩土工程的主要研究内容之一。纵观国外边坡工程稳定性研究的发展历程,大体可划分为三个阶段^[8]。

第一阶段:20世纪20年代以前,边坡工程稳定性的计算分析,基本采用材料力学和土力学的原理和方法,以半经验、半理论性质并假定滑动面具有某一固定位置和形状为显著特点。例如,1915年彼得森(Petterson)提出了只考虑摩擦力而不计黏聚力的圆弧滑动面的分析方法^[9];1926年费勒纽斯(Fellenius)^[10]等提出了同时考虑摩擦力和黏聚力的瑞典条分法。该阶段边坡工程稳定性的计算分析在力学原理上是很粗浅的,所作出的基本假定也是脱离力学实际的。

第二阶段:到20世纪50年代,边坡工程稳定性分析进入了重要发展阶段,以采用均质体弹塑性理论和极限平衡理论,能够考虑岩体材料的特性及岩体结构面对边坡失稳的控制作用为显著特色。例如,1954年索柯洛夫斯基(Соколовский)根据松散介质极限平衡原理提出边坡工程稳定性计算方法,使边坡工程稳定性的分析方法向前迈进了一步,引起了普遍的重视。但该法忽视了岩体的结构特征和力学状态,计算结果与实际不相符;与此同时,费先柯(Фисенко)考虑了岩体中结构面对边坡失稳的控制作用,结合松散介质极限平衡原理提出了一套岩质边坡稳定性的计算分析方法,但此方法采用了不够合理的静力学条分法,计算结果与实际情况差别较大。

第三阶段:20世纪60年代以后,边坡工程稳定性分析进入了深入发展阶段,研究人员将岩体视为黏弹性、弹塑性或具有裂隙的脆性介质,并展开了岩体非均质、各向异性和非连续性的研究,对岩体应力应变关系及岩体流变特性等进行了研究。边坡工程稳定性的计算分析,基本上沿着两条路径进行:一是以极限平衡理论为基础,考虑岩体中断裂结构面控制,利用图解法或计算分析法,最后求得“安全系数”或类似“安全系数”的概念来进行边坡工程稳定性的定量评价。例如,1962年太沙基提出的临界边坡理论;1970年约翰(John)提出的半球体图解计算分析等。另一途径则是以有限单元法,近似地分析边坡工程岩体的变形特征和应力状态,但常由于对边坡岩体的基本力学特性、边坡的力学状态和应力特征等研究得不够,给计算与分析等带来了一定的困难,因而,目前通过各种计算方法所得到的结果与实际情况均有一定的差异,还有待进一步深入研究和发

1.2.2 我国边坡安全评价理论与方法研究进展

我国从1949年到现在,对边坡工程稳定性问题的研究可划分为四个阶段。

第一阶段:20世纪50年代,我国开始对露天煤矿边坡、铁路路堑边坡和引水渠道边坡等开展研究。当时着重从边坡工程造成的地质灾害出发,进行边坡工程破坏的定性分类,利用基于刚体极限平衡的分析方法,同时利用工程地质类比法,对边坡工程的稳定性进行评价和设计^[11]。

第二阶段:到20世纪60年代,孙玉科等提出了岩体结构及控制的观点^[12-13],划出了

边坡岩体的结构类型^[14]，并在应用赤平极射投影的基础上，提出了实体比例投影方法，用以进行块体破坏的计算、判断边坡工程的稳定性。同时结合露天煤矿边坡工程稳定性研究，开展了大型野外工程岩体的力学试验^[15-16]，在边坡工程的稳定性计算方面有了很大的进展。

第三阶段：从 20 世纪 70 年代开始，进行边坡工程变形破坏机制的研究。在计算分析方面，不仅应用极限平衡原理，还应用弹塑性力学等理论，并随着计算机技术的发展，广泛采用有限单元法等来分析边坡工程变形破坏的条件，以及评价边坡工程的稳定性。到 20 世纪 70 年代末 80 年代初，已经形成了一套比较完整的工程地质力学学术观点和方法^[17]，在边坡工程稳定性问题研究方面积累了比较丰富的实践经验。

第四阶段：20 世纪 80 年代以后，边坡工程稳定性研究进入了一个新的发展阶段。一方面，随着计算机理论及技术的发展，数值模拟技术已广泛应用于边坡工程稳定性研究中^[18]，且逐步从定性过渡到半定量研究边坡工程的变形破坏及其内部的作用过程，从整体上认识边坡工程变形破坏的机制和边坡工程稳定性的发展趋势。与此同时，诸多学科间的相互交叉、渗透，使许多与现代科学有关的系列理论方法，如系统论、非线性科学等^[19-22]被引入到边坡工程稳定性研究中，使边坡工程稳定性的研究进入了一个新的发展阶段。

1.3 边坡安全预警预报系统动态

滑坡预测预报研究是 20 世纪 60 年代才开始起步的，已成为边坡研究中的一个热门课题。由于滑坡问题的复杂性，目前滑坡时间预报还是一个世界性的科学难题。国内外已取得了一些成果，预报成功的也不乏其例，如长江三峡新滩滑坡等。但这些成功预报大多是通过监测工作实现的。而运用什么样的理论，建立何种理论模型进行预报，并没有完全解决。甚至是否存在这样的理论模型，能有效地解决崩塌、滑坡的时间预报，还是一个处于探索中的问题^[23-24]。

经过 30 多年的研究，国内外许多滑坡专家，不断探索，使滑坡理论有了较大发展，纵观其发展过程，大致可分为三个阶段。

第一阶段：现象预报和经验预报为主。这一阶段处于 20 世纪 60~70 年代，滑坡预报主要以现象预报和经验预报为主。人们利用滑坡的一些破坏现象和失稳的宏观前兆，对滑坡进行推断，显然这种方法只适用于有明显前兆的滑坡，预报精度也不高。1968 年日本学者斋藤迪孝通过大量的试验，提出了蠕变破坏的三阶段理论，建立了滑坡时间与蠕变速率之间的经验公式，1974 年利用该模型对日本的高汤山隧道滑坡进行了成功预测。1977 年，E. Hoek 根据 1969 年智利 Chuquicamata 矿滑坡监测位移—时间曲线提出了利用滑坡变形曲线的形态和均势进行外延并推求滑动时间的外延法，其预报的理论依据与斋藤是相同的。由于这些方法是在一定条件下建立的经验公式，所求得的蠕变破坏时间属于概算，预报精度受到一定的限制，仅适用短期预报和临滑预报。

第二阶段：位移—时间统计分析预报阶段。进入 20 世纪 80 年代后，在滑坡预报研究方面取得了显著进展。许多学者大量引入数学方法和理论模型，用于拟合不同滑坡的位移

一时间曲线,根据所建的模型作外推预报。1984年,王思敬提出了边坡失稳总变形量和位移速率的综合预报方法。1985年,日本学者福囿用砂和土两种材料采用人工降雨方法进行大比例尺模型试验,根据试验结果,提出了预报滑坡破坏时间的福囿法。1988年,陈道东、王兰生首先将灰色系统理论中的GM(1,1)模型引入滑坡位移—时间曲线的拟合外推,提出利用滤波灰色分析法进行滑坡中期预报。1988年,晏同珍根据对滑坡孕育、发生、发展的过程特征,提出了二次曲线回归拟合和灰色理论中Verhulst生物繁衍的动态模型预测方法。晏同珍还于1987年和1988年提出了回归模型和泊松旋回模型。1988年,张倬元等提出了黄金分割法进行滑坡预报。1989年,崔政权提出了梯度正弦模型。1989年,美国学者B. Voight提出了多参数预报的经验公式。

此外,还有不少学者尝试了马尔科夫预报、模糊数学方法预报和图解法等多种方法,使滑坡预报方法向定量化方向迈进了一大步。但是,这一阶段学者们主要注重预报方法的探讨而对与滑坡密切相关的一些基本问题,如观测数据的分析、处理、预报时序资料的选择、干扰信息的剔除与有用信息的增强等还认识不足;对滑坡基础研究与预报相结合方面的探讨也较少,也很少在利用上述先进理论和方法的同时,将预报参数与斜坡变形破坏和演变机制联系起来考虑,因而大大影响了预报精度。

第三阶段:综合预报模型及预报判据研究阶段。随着滑坡研究的深入发展,20世纪90年代人们认识到滑坡位移—时间曲线的拟合外推常常只能对滑坡近期行为趋势做出有限的预测,在众多因素,尤其是非线性因素的作用下,要准确、可靠地预报滑坡的长期行为是困难的。因此,学者们逐步形成了跟踪预报的思想。李天斌等对此做了有益的探索,利用滑坡动态数据的时间序列分析法建模的思想,提出了滑坡动态跟踪预测的观点^[24]。另一方面,由于系统科学和非线性科学的发展,人们认识到滑坡是一个开放系统。滑坡预报不仅仅是一个纯方法问题,要实现较为准确的预报,必须将斜坡变形破坏机制分析与定量预报相结合,必须对滑坡密切相关的基本问题进行研究,运用系统综合、系统分析、系统模拟的方法对滑坡系统进行识别、模拟及预测预报。因此人们开始重视对滑坡宏观前兆和宏观判据的研究,并着重从物理现象和物理模型分析入手进行滑坡预报的探索。孙广忠特别强调了宏观判据研究的重要性。1993年,秦四清以非线性动力学理论为基础,提出滑坡孕育的非线性动力学模型,进而预报滑坡发生时间。1994年,廖小平依据弹塑力学原理提出了滑坡预测的功率模型。1997年,文宝萍等提出了滑坡灾变判据及灾变预测的数学模型。1997年,黄润秋等提出了全新的蠕动边坡失稳预测模型理论。

2 边坡监测基本理论与技术

2.1 概述

边坡是天然地层经过地质构造作用及人为作用而形成的地形地貌，广泛存在于地表，成为土木建筑、市政、水利水电、公路、铁路交通和矿山等国民经济重大建设工程中常见的建筑场地。特别是山区城镇建设中，大多数建设项目都是劈山而建的，例如，广西百色市隆林县城大部分民用建筑均劈山而建。对于在坡体上的建筑活动及建设工程，要特别关注坡体的稳定性。如果在建设活动之前，没有很好地评价坡体的稳定状态，那么等到在建筑过程中及后期的使用过程中，都可能带来极大的安全隐患，需要再投入巨大的精力、财力整治隐患或方案被迫放弃。一次严重的滑坡事故不仅造成重大的经济损失，还有可能夺去人宝贵的生命，具有极大的危害性。在有些情况下，尽管设计边坡时留有一定的安全余地，滑坡事故仍会发生。这主要是因为在设计时总有考虑不到的因素，就是这些被忽略或没有被考虑的因素，就可能会导致边坡失稳。当前，随着国民经济的快速发展，工程中边坡的高度和规模都在逐步增大，高边坡比比皆是，没有被考虑的因素将会增多。另外，近年来异常气候带来的强降雨对工程边坡和自然边坡的威胁也很大。因此，为了了解异常因素对边坡的危害，就需要加大对边坡稳定程度的监测。边坡稳定性的判别是个古老的问题，人们针对边坡稳定性监测的手段也很多，包括传统的方法以及目前的先进仪器监测法，为了对边坡监测有个清晰的认识，下面介绍边坡监测技术的种类和进展情况。

2.1.1 宏观地质观测法^[25]

宏观地质观测法是用常规的地质路线调查方法，对崩塌、滑坡的宏观变形迹象和其他有关的各种异常现象进行定期的观测、记录。该方法具有直观性、动态性、适应性及实用性强的特点，不仅适用于各种类型的崩塌滑体在不同变形发展阶段的监测，而且监测内容比较丰富，获得的前兆信息直观、可信度高。目前，该方法仍然是多种行业中工程地质调查、勘探工作的主要方法，通过最初的野外观测、地质调查，对拟建场地的稳定性、安全性进行初步的评判，划分出不同稳定程度的区域（地段），能够对后续的场地建设和工程整治提供初步的方案。

2.1.2 简易观测法^[25]

简易观测法是通过人工观测边坡中地表裂缝、鼓胀、沉降、坍塌，建筑物变形及地下水变化、地温变化等的变化。具体实施时，主要通过设置骑缝式简易观测标志，用钢尺等测量工具直接进行观测。简易观测法对于发生病害的边坡进行观测较为合适，也可结合仪器的监测资料进行综合分析，初步判定滑坡体所处的变形阶段，以及中短期滑动趋势。即使是采用先进的仪表观测，简易观测法仍然是重要的辅助手段，该方法监测的内容单一、

精度相对较低,劳动强度较大,但操作简单、直观性强,观测数据可靠,适合于交通不便、经济困难的山区普及推广采用。

2.1.3 设站观测法^[25]

设站观测法是在充分了解了现场的工程地质背景的基础上,在边坡上设立变形观测点(线状观测点或网状观测点),并在变形区影响范围之外的稳定地段,设置固定观测基点,用测量仪器,如经纬仪、水准仪、测距仪、摄影仪及全站型电子测速仪、GPS接收机等,监测变形区内各点的位移变化(或坐标 x 、 y 、 z 改变)的一种有效的监测方法,根据采用的仪器类型的不同,又有以下几种类型。

2.1.3.1 大地测量法^[25-27]

常用的大地测量法主要有两方向或三方向的前方交会法、双边距离交会法、视准线法、小角法、测距法、几何水准测量法以及精密三角高程测量法。其明显的优点为:能确定边坡地表变形范围;仪表量程不受限制;能观测到边坡体的绝对位移量;在滑坡发生剧滑时,监测仪器设施不会因滑坡加速运动而损坏,监测人员不必到滑坡体上,能保证滑坡监测工作的连续性。大地测量法优点较多,在边坡工程的地表监测中占有主导地位。但由于大地测量法受到地形通视条件限制和气象条件的影响,实测时的工作量大、周期长,会使连续观测的能力变差。

2.1.3.2 GPS(全球定位系统)测量法^[25-27]

GPS测量法的基本原理是用GPS卫星发送的导航定位信号进行空间后方交会测量,确定地面待测点的三维坐标。在边坡工程监测工作中,GPS测量法优点主要有:观测站之间无须通视,选点方便;观测不受天气条件的限制,可以进行全天候观测作业;观测点的三维坐标可以同时测定,对于运动的观测点还能精确测出它的速度;在测程大于10km时,测量的相对精度能够达到 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$,有的甚至能达到 10^{-7} ,优于精密的光电测距仪。此法适合于边坡地表的三维位移监测,特别适合于地形条件复杂、起伏大或建筑物密集、通视条件差时的边坡监测;测量过程的观测时间短,操作简便。因此GPS测量法应用广泛。

2.1.3.3 近景摄影测量法^[25-26]

近景摄影测量法是通过在近距离内对物体进行拍摄,利用拍摄获得的数字图像,精确测定物体在三维空间中的位置、形状、大小乃至运动的方法。该法的周期性重复摄影方便,在外业过程中省时省力,可以同时测定许多观测点在某一瞬间的空间位置,能够随时对计算结果进行比较,能够满足崩滑体处于速变、剧变阶段的监测要求,也就是说适合危岩临空陡壁裂缝变化(如链子崖陡壁裂缝)或滑坡地表位移量变化速率较大时的监测。

2.1.4 仪表观测法^[25]

仪表观测法是用精密仪器仪表对变形的斜坡体进行地表及深部的位移、倾斜(沉降)动态变化,裂缝相对张开、闭合、下沉、错动变化及地声、应力应变等物理参数与环境影响因素进行监测。监测的参数内容丰富、精度高、灵敏度高,仪器的测程可调、仪器便于携带,可以避免恶劣环境对测试仪表的损害,观测成果含义直观、可靠度高,该方法适用于斜坡体变形的中、长期监测。目前,监测仪器根据监测内容或对象的不同,可分为坡体

位移监测、地下倾斜监测、坡体地下应力测试和环境变量监测。

2.1.5 远程监测法^[25]

随着电子制造技术和计算机技术的发展,许多先进的自动遥控型的监测系统不断出现,为边坡工程、特别是边坡崩塌和滑坡的自动化连续监测创造了有利条件。其中,远距离无线数据传输是远程监测法的最基本特点。由于监测活动的自动化程度高,能够实现全天候连续观测,因此监测过程省时、省力,而且安全,这已经成为当前和未来滑坡监测发展的主要方向。另外,无线监测是边坡监测一个很好的手段,实现一次监测活动中获取更多的参数,是未来研究边坡和评价坡体的稳定性及活动规律的有力工具。

2.1.6 声发射方法

针对岩石或岩体在受力作用时,会不断发生破坏,而破坏形式主要表现为裂纹的产生、扩展及岩体断裂。在裂纹形成或扩展时,由于应力松弛,岩体中贮存的部分能量以应力波的形式被释放出来,在这过程中就会产生声发射。根据声发射的不同规律可以推断岩石内部的形态变化,可以反推岩石的破坏机制。该方法具有的优点为:直接、可靠、快捷;能够进行连续监测,劳动强度低、人为因素少;受气候影响较小,监测结果受干扰影响小。

2.1.7 时域反射法

时域反射测试技术是一种电子测量技术。目前,TDR技术以其方便、安全、经济、数字化及可远程控制等优点而受到广泛应用。一个完整的TDR滑坡监测系统,一般由TDR同轴电缆、电缆测试仪、数据记录仪、远程通讯设备以及数据分析软件等几部分组成。在进行一个边坡的具体监测时,与传统的倾斜仪等监测手段相比,该方法具有的优点为:价格低廉;检测时间短;可远程访问;快速提供数据;安全性高。

但TDR监测系统也有不足之处,即不能用于倾斜监测,但又不存在剪切作用的区域,还不能确定滑坡移动量和滑坡移动方向。

2.1.8 光时域反射法

光时域反射法的测量原理是:传感器输出信号能够反映被测参数(如裂缝)在空间上的变化情况,输出信号主要沿着光纤向前传输,但也有部分信号向后散射,通过光波的传输速度,就能够确定光源到被测点的距离。光时域反射技术能够快速确定滑坡中的变形、应力大小,以及失效的位置,真正实现多点准分布式测量过程^[28]。

以上介绍的是边坡监测的主要监测技术,但是这些技术有的仅适合于某些特殊的情况,例如声发射监测技术主要适合于岩质坡体;TDR时域反射法不能适合于形不成剪切面的情况;而有的监测方法中的成果数据单一。随着监测技术的快速发展,多种监测手段构成复杂的监测系统是边坡监测技术发展的必然趋势。复杂的监测系统发展坚持可靠性、多层次、以位移作为主要的监测对象、方便适用的原则,这样的监测系统实际上是一种多参数的采集仪器,利用一台仪器就可以控制多个数据采集传感器,并且根据不同边坡的特点,通过选用不同的传感器来任意组合想要采集的数据,最后通过无线网络系统传输到远程中心或其他地方的计算机中,根据专家经验来综合判定被监测坡体的工作状态。

2.2 边坡监测基本原理与技术^[24-28]

边坡监测主要是通过对边坡坡体表面和内部一些力学参数、几何参数的量测,评判被监测坡体的稳定程度,确定变形发展速率,据此划分边坡坡体的安全状态,为工程建设、设计规划及施工提供技术支持。伴随着边坡体的活动,在边坡体上主要发生位移(变形)变化;在坡体蠕动发展过程中,随着滑动面的逐渐形成和剪错,坡体内部的一些性质也会变化,如滑面上含水量增加、滑带土体抗剪强度降低等。因此,可以被用来监测的参数主要有变形(速率)、地声变化、应力应变、孔隙水压力等。另外,外界因素(如降雨量、地震动、人工爆破等)也能够促使边坡失稳。在某些条件下,也需要对这些影响因素进行监测,这些因素对边坡体失稳的反映,可能会存在时间上的滞后性。为了更好地选择边坡变形监测方法和仪器设备,下面对边坡监测的基本原理作一介绍。

2.2.1 裂缝监测

2.2.1.1 地表裂缝监测

地表裂缝是坡体变形的最主要外在反映,通过观测裂缝宽度的变化(扩大、闭合)判断裂缝的发展,常用的地表裂缝监测方法有:

(1) 在监测部位用水泥砂浆敷平,选择若干个点,做好测量基点标志。埋入土中的深度不小于1.0m,用红油漆编号,定时用钢尺测量两个基点标志间的距离变化,就能够求出裂缝的变化规律。如果在不动体上设两个基点,在滑动体上设一个桩,由三角形三边长度的变化也能求出滑动体的移动方向和数量。一般在滑坡主轴断面上的后壁和前壁出口处设两个桩,以便测出滑坡的绝对位移值和平均位移速度。为了能够同时测量滑动体的位移大小和方向,在不动体上水平设置一个桩,桩上设一吊锤,吊锤下的动体上设一混凝土墩,墩顶画上方格坐标,即可求出移动的数值和方向;吊锤长度固定时,还可大致测出滑体的下沉量。

(2) 在垂直裂缝方向,位于裂缝的两边埋设“骑马桩”,“骑马桩”用水泥砂浆和钢筋固定,钢筋上刻十字线,用钢尺测量两个刻画线间的距离,反映裂缝的张合变化。用水准测量法测量两个“骑马桩”高差的变化来测量裂缝上下错动的情况。

2.2.1.2 建筑物裂缝监测

如果要保护坡体上的建筑物,可以在建筑物上的裂缝两侧设置固定点,用钢尺测量距离,也可在裂缝上贴上水泥砂浆片,观测水泥砂浆片被拉张、错开的情况,但无法反映裂缝的微小变化。

2.2.1.3 滑坡裂缝和位移监测

根据裂缝开、合的变化情况,可以使用滑坡记录仪,或称为伸缩计、滑坡计。用法类似于“骑马桩”式的监测方法。在不动体上的裂缝外侧设置一观测显示装置,在滑坡体上设置观测点,观测点和记录仪间的距离以15m为宜。在两个点间拉一根钢尺,裂缝的变化就能带动记录仪进行记录。日本坂田株式会社生产的滑坡自动记录仪可带动12个滑坡监测点进行工作,并且能够自动记录位移变化。这种监测装置可用在滑坡危险性较大、人员不宜接近的环境。如果记录仪配有报警器,就能够在裂缝变化达到危险值时自动报警。滑坡变化记录装置既可用作裂缝观测,也能够用作滑坡位移观测。