

# 边坡变形和应力监测技术研究进展及展望

周鑫磊<sup>1</sup>, 张卫兵<sup>1,2</sup>, 刘臻祥<sup>1</sup>, 李晓<sup>1</sup>, 雷过<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

<sup>2</sup>旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川

收稿日期: 2022年2月10日; 录用日期: 2022年3月2日; 发布日期: 2022年3月9日

## 摘要

对滑坡变形和应力进行监测, 可以提前预测滑坡灾害, 以便采取相应的措施减少滑坡带来的损失。本文从变形监测和应力监测两个方面对边坡监测方法进行了总结, 变形监测又分为表面变形监测和内部变形监测两个方面, 在此基础上得出了这些方法的优缺点, 针对各种方法的优缺点, 对未来边坡监测技术中需要改进和加强研究的方面进行了展望。

## 关键词

边坡工程, 变形监测, 应力监测, 传感器, 研究进展

# Research Progress and Expectation of Slope Deformation and Stress Monitoring Technology

Xinlei Zhou<sup>1</sup>, Weibing Zhang<sup>1,2</sup>, Zhenxiang Liu<sup>1</sup>, Xiao Li<sup>1</sup>, Guo Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan Ningxia

Received: Feb. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2022; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Monitoring the deformation and stress of landslide can predict the landslide disaster in advance, so as to take corresponding measures to reduce the loss caused by landslide. This paper summarizes the slope monitoring methods from the two aspects of deformation monitoring and stress monitoring. The deformation monitoring is divided into surface deformation monitoring and in-

ternal deformation monitoring. On this basis, the advantages and disadvantages of these methods are obtained. According to the advantages and disadvantages of various methods, the aspects that need to be improved and strengthened in the future slope monitoring technology are prospected.

## Keywords

Slope Engineering, Deformation Monitoring, Stress Monitoring, Sensors, Research Progress

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在各种自然地质作用和人类活动等因素的影响下, 无论天然边坡还是人工边坡一直处于变形之中, 常以发生滑坡为主要形式引发工程灾害[1], 造成经济损失, 危及人们的生命安全。国家统计局所给数据表明: 我国因地质灾害所带来的损失较大, 2013~2017 年累计 255 亿元, 5 年累计伤亡 3104 人, 滑坡和崩塌占到全部地质灾害的 80% 以上。

近年来, 我们在滑坡灾害方面的研究取得了一定的成果, 但是由于各种不确定性因素, 滑坡灾害还是难以避免。与此同时, 国家地质灾害局逐步开展了地质调查和排查工作, 建立了全国地质灾害数据库。在此背景之下, 开展边坡监测的重要性就体现出了, 通过边坡监测, 可获得边坡局部和整体变形走势, 应力状态, 再结合岩土体力学理论的相关知识, 就可提前对其变形进行预测, 提前采取防护措施, 在一定程度上降低滑坡灾害造成的经济损失, 减少对人们生命安全的威胁。本文对现有的边坡监测方法进行了总结, 并对边坡监测技术的发展趋势进行讨论。

## 2. 变形监测

边坡的监测主要分为两个方面[2], 一方面是边坡表面的变形监测, 表面监测主要是考虑到坡体内部没有变形位移的发生, 或者内部变形位移很小的情况下, 表面在风化、雨水等大气因素的综合作用下经常会出现崩塌现象, 而且表面变形累积到一定程度上就能体现出边坡滑坡的趋势; 另一方面是边坡土体内部不同深度处的变形监测, 坡体内部变形更能表征整个边坡的运动状态与趋势, 通过内部变形可以有效识别滑动面的具体位置, 在预测预报方面具有良好的精准性。总之, 表面和内部的变形监测都不可或缺, 都具有重要意义。

### 2.1. 边坡表面的变形监测

#### 2.1.1. 人员的现场巡视与观测

这种监测方法主要是指有关技术工作人员在边坡可能失稳的范围内开展周期性的观测, 定期用游标卡尺等测量工具测量裂缝开裂宽度、观察裂缝的发展趋势等, 做出不同颜色的标示警示[3]。这种监测依靠技术人员的肉眼观测, 可以发现边坡较为明显的变形, 但肉眼无法察看到边坡表面微小形变, 因此技术人员的现场察看无法达到细致入微的监测效果, 也无法做到实时监测。从工程监测与预警要求来讲, 人员的现场巡视可以作为自动化监测的有效补充, 且技术人员积累的工程经验往往对于预测结果具有实际的指导意义。这种人员观测法一直伴随着边坡工程的发展, 尽管目前有很多自动化的监测仪器, 但该方法仍延续使用。

### 2.1.2. 利用卫星遥感技术监测边坡表面位移

利用卫星遥感技术(RS)监测是 20 世纪新兴的边坡监测技术,这类监测技术的原理是根据电磁波理论和遥感成像原理,对远距离目标所辐射和反射的电磁波进行收集、处理,最后成像,通过对图像的变化进行对比分析从而对地面监测边坡进行探测和识别的一种综合技术。唐新建[4]等利用遥感技术对边坡进行了监测,将监测获得的图像结果和人员实地勘察的结果进行了对比,两种结果吻合,将之前的静态研究、定性分析过渡到动态研究、定量分析,遥感技术也极大促进了边坡监测的监测效率,可实现实时监测。将卫星遥感技术引入到边坡监测领域后,出现了分辨率易受天气、地形等因素的影响,且对于其获取的海量遥感数据,存储、对数据的深度挖掘处理、处理后的精度成为了后续研究的难点问题[5]。针对这些问题,L. Bruzzone [6]等提出了分层检测的方法,来识别图像之间存在的所有可能变化,提高了图像处理精度。2010 年以来,我国成功发射多个遥感卫星,高分系列卫星使得遥感技术分辨率得到跨越式发展,随着遥感技术分辨率得到很大提高。而对于数据的挖掘处理需有相关数学理论、计算机技术的支撑,随着计算机技术的不断提升,这一问题也会不断解决。

### 2.1.3. 利用近景摄影技术监测边坡表面位移

相较于遥感技术,近景摄影技术获取监测目标信息的监测距离较小,近景摄影技术的监测原理是在 300 米的范围之内,在不接触待测物的前提下迅速采集目标待测物的影像数据,进而获得被测物的坐标信息,通过对不同时期坐标数据的处理得到被测物的变形量[7]。由于获取监测信息的距离相对较小,其测量精度相对较高,而且信息存储量大,对于边坡表面的裂缝,近景摄影技术可测量将裂缝宽度,获取相关的变形信息[8],近年来已经发展为边坡监测的一项重要技术。AN Matori [9]等使用近景摄影测量方法对边坡进行变形监测,对边坡数位高程模型(DEM)进行叠加分析得到了边坡形变量,模拟出山体的升降。Alameda-Hernández P [10]等人基于近距离地面数字摄影测量(CR-TDP)方法快速、精确获取了边坡 DEM,对边坡稳定性进行评价。针对于近景摄影技术监测的滑坡需要建立边坡立体模型,刘志奇[11]等设计了一种单像滑坡监测方案,即通过滑移前后相邻影像同名点位移场计算滑移矢量场,达到监测预警的目标,但是这种监测方案只在室内模拟条件下验证成功,并未应用到实际工程中。此外基于近景摄影技术的边坡监测技术仍存在数据量大、数据处理复杂的问题,且难以实现实时监测。

### 2.1.4. 利用 GPS 技术监测边坡表面位移

广义来讲,利用 GPS 监测边坡位移属于遥感监测的一种,与遥感监测不同之处在于 GPS 监测对象是边坡表面有限监测点(GPS 观测点),而遥感技术监测的是边坡表面整个面。GPS 监测原理是获取不同时期监测点的坐标,通过计算坐标变化来推演位移变化。徐绍铨[12]等将 GPS 应用到了三峡边坡监测中,通过对比 GPS 监测方法和大地测量法的监测数据,发现 GPS 的监测数据能满足精度要求,验证了 GPS 在边坡监测中的适用性。相较于大地测量法,GPS 具有全天候、可监测三维坐标变化的优点。M Peyret [13]等将 GPS 应用到滑坡监测中,提出了三组基于 GPS 的位移矢量,以此获得了滑坡内部位移速率的准确信息,通过 GPS 监测技术获得了滑动带的准确范围。GPS 监测设备昂贵,陈正阳[14]等对一台 GPS 接收机连接多个天线监测系统进行了研究,在满足实时监测的基础上降低了监测成本,但是这样设计后监测系统的稳定性也有所降低,监测质量有所下降。GPS 监测是基于点的测量,如果要用于面的监测,就需要联合其他方法一起使用,而且在一些海拔高的山区、较深的峡谷中,其监测信号不易反射,会导致监测不够精准,误差较大。此外,GPS 适用于位移的连续测量,连续测量的误差可以达到毫米级,一旦测量系统出现中断故障,监测精度会大打折扣[15][16]。

### 2.1.5. 利用三维激光扫描技术监测边坡表面位移

为了解决监测人员难以监测而又相对危险的高边坡的监测问题、提高地质调查的速率,三维激光扫

描技术应用而生,它突破了基于点测量的 GPS 监测技术,实现了面监测。三维激光扫描技术又称实景复制技术,其监测原理是在被监测边坡范围以外安装三维激光扫描仪,扫描获得边坡表面大量密集点的位置坐标,进而快速构建出相应的三维模型,通过计算位置坐标的变化来反映边坡位移变化。与近景摄影技术类似,三维激光扫描技术获得的数据都是直接扫描的真实数据,很大程度上减小了数据的误差,使得后续数据处理真实可靠[17]。在滑坡急剧变形阶段,滑坡上的监测设备会失效,这种情况下采用三维激光扫描技术是可行的,可以获得边坡急剧变形阶段的变形速率[18]。但是目前大部分的三维激光扫描监测主要针对岩质边坡,不包括植被或植被很少的边坡,大多数的监测环境较为理想[19]。Abellán [20]等对岩质边坡在测量时遇到遮挡的问题进行了研究,通过提取结构面来分析岩体的稳定性和移动趋势。此外,三维激光扫描技术在坐标转换过程中存在误差,难以实现实时监测,且对于扫描得到的大量数据的处理是目前研究的难点和热点[21]。

#### 2.1.6. 利用合成孔径干涉雷达技术监测边坡表面位移

合成孔径干涉雷达技术(InSAR)是合成孔径雷达技术(SAR)和干涉测量技术结合而成的技术,其监测原理是雷达发射波信号,通过 InSAR 平台对波信号的不断处理来反映边坡的变形信息,其中 SAR 获取地面影像数据,干涉测量技术通过处理地面影像来提取地面变形信息[22]。1989年 Gabriel [23]等首次利用合成孔径雷达差分干涉测量技术监测了美国一个灌溉区的地表变形,其测量精度达到了厘米级,国内对该项技术的研究始于2000年左右,游新兆[24]等将 InSAR 技术应用到三峡地区的测量中,解决了利用 GPS 监测中由于地形起伏大、难以形成监测网的难题,降低了监测成本。Carlo Colesanti [25]等指出大气干扰和相位干涉影响了这项技术的监测精度,提出了对永久散射体长时间干涉数据的处理来克服这一缺点,并提出与 GPS、光学测量仪器同时来监测,三者监测结果互补,从而提高监测质量和可靠性。岑仲阳[26]等通过 InSAR 差分技术对其监测过程中大气水分等干扰因素进行了处理,提高了监测精度。何朝阳[27]等将 InSAR 技术应用到四川地区一滑坡监测中,并将监测结果和 GPS 监测结果进行了对比,进一步证明了 InSAR 技术在边坡监测中具有监测精度高,可实时监测的优点,在边坡监测领域具有良好的应用前景。随着传统的 InSAR 技术不断发展,在 InSAR 的基础上演变出了多种监测系统,其监测精度有了很大的提升,监测维度也更加多维,但从根本上来看,这类监测需借助 SAR 卫星,与前述的遥感监测技术在优缺点上有相同之处。

#### 2.1.7. 利用电荷耦合器件(CCD)微变形技术监测边坡表面位移

CCD (电荷耦合器件)是一种将光学信号转换为数字信号的微型传感器,监测原理是在边坡表面布设光电标靶,边坡与标靶成为一个整体,当边坡发生位移时,光电标靶也发生位移,位移导致标靶传输的光的波长发生变化,这一变化被 CCD 监测主机感知,这样边坡的位移就被监测了。Angeli [28]等首先将 CCD 应用到边坡监测中,发现该监测系统在长期定点监测中具有独特优势,监测成本低。浙江大学等利用 CCD 微变形监测技术对边坡监测进行了研究,高杰[29]等将该系统应用到了实际的边坡监测中,并对同一边坡同时开展 GPS、全站仪监测,通过对比监测结果,发现该系统监测的数据稳定性较好、可靠性高,验证了该系统具有监测精度高、适合于长距离实时监测的优点,而且其监测成本低。需要指出的是,CCD 监测技术是长期定点监测,能够实现对边坡的实时监测,但其属于微变形监测,而且其光电标靶在外界环境的长期综合作用下可能损坏。

通过上述内容可以看出,几类遥感监测技术的监测原理有相通之处,优缺点也比较相近,在实际工程应用中,需根据工程特性情况,综合考虑监测成本、不同方法的适用范围选择合适的监测方法,达到精准预测的效果,表1列出了上述几类监测方法的优缺点。

**Table 1.** Comprehensive comparison of slope surface displacement monitoring methods**表 1.** 边坡表面位移监测方法综合对比表

监测方法	监测对象	优点	缺点
遥感监测	表面大量密集点	实时监测, 经济快速, 信息量丰富	地形、天气等影响其分辨率
近景摄影监测	表面大量密集点	精度高, 数据易于储存	受气候影响、难以实时监测
GPS 监测	表面少量点	实时监测, 可监测三维坐标	成本高, 天气、地形影响其精度
三维激光扫描监测	表面大量密集点	速率快, 数据误差小	成本高, 表面植被等影响监测精度
CCD 监测	表面少量点	数据稳定性好, 精度高	光电标靶可能损坏
InSAR 监测	表面密集点	精度高, 实时监测	大气延迟、轨道误差影响监测精度

## 2.2. 边坡内部的位移监测

边坡内部的位移监测方法主要有测斜仪监测、阵列位移计监测、时域反射技术(TDR)监测、分布式光纤传感技术监测等。

### 2.2.1. 利用测斜仪监测边坡内部位移

测斜仪测量原理简单、成本低, 在边坡深部变形监测中使用广泛, 其核心部件是加速度计, 加速度计能够在测斜管道移动的过程中感知岩土体的角度变化并将其转化为位移值的大小, 监测不同深度的滑移。测斜仪的使用历史较长, 其发展经历了竖向测斜仪、斜坡测斜仪、水平测斜仪三个阶段[30]。彭小平[31]等将其应用到滑坡监测中, 监测结果表明位移随深度变化曲线呈 V 型、D 型、B 型、r 型以及复合型, 不同的曲线代表着滑坡的不同类型, 根据不同类型的曲线可对滑坡内部位移情况进行判别。彭纪超[32]等先对滑坡方向进行了预判, 只在可能发生滑坡的方向埋设测斜仪, 将这一个方向的监测结果与钻孔、坑探结果进行了对比, 结果一致, 这一思路大大提升了监测效率, 节省了时间。当滑坡变形值较大时, 测斜管有可能被损害, 导致测斜仪无法使用, 且传统的测斜仪无法实现实时测量基于此, 李果[33]等引入了新型的柔性测斜装置, 当传统的测斜仪失效时, 柔性测斜装置还能继续测量位移, 柔性测斜装置具有安装简便, 精度高和易于实现自动采集预警的突出优点, 但是该类设备目前造价昂贵。总体来讲, 测斜仪在深部位移监测中应用广泛, 原因在于其构造原理简单, 操作使用也较为简单, 相比于其他几类监测方法也不够新, 但正是由于它的简单实用才一直延续使用至今。

### 2.2.2. 利用阵列位移计监测边坡内部位移

阵列式位移计(SAA)的工作原理与测斜仪类似, SAA 由多个子阵列串联而成; 每个子阵列长 30 或 50 cm, 由 7 个 MEMS 加速度传感器、1 个微处理器和 7 个连接关节组成。每个子阵列的 MEMS 加速度传感器通过感知加速度的变化来测量位移量, 微处理器用来收集并发送子阵列的测试数据, 连接关节用来连接传感器或微处理器, 最后将每个子阵列的位移值累加得到总的变形量。由于由连接关节相连, 相比于传统的测斜仪 SAA 具有较强的抗剪、抗扭、抗拉能力。国外对该类方法的研究较多, T. Abdoun [34]等通过室内试验测试了 SAA 的监测效果, 并将其应用于桥址岸坡的监测, SAA 表现出了较高的监测性能, 相比于测斜仪的监测, SAA 具有精度高、量程大、数据量大、稳定性好等优点。邱东炜[35]等将其应用到京张铁路一处边坡监测中, 通过地质勘察数据、本构模型分析结果、测斜仪监测数据的相互对比, 发现 SAA 可以准确的分析出滑动面位置, 具有布设方式灵活、自动化程度高的优点。D. D. Dasenbrock [36]等应用 SAA 远程监控系统对滑坡进行了监测, 得出采取 SAA 监测方法可以测量更大的位移, 数据可以远程采集, 在恶劣天气影响下该监测系统仍然有效。SAA 监测技术是一种新型的监测技术, 在国外研究中仍处于初期实践阶段, 国内关于这方面的研究相对较少, 在工程中的应用也较少, 只是在少数工程中

引入这类监测仪器[37] [38], 目前可能存在成本费用高的问题。

### 2.2.3. 利用时域反射技术监测边坡内部位移

时域反射技术(TDR)最早应用于通讯领域, 国外对其在边坡变形监测中的研究开始于 20 世纪 90 年代 [39], 国内对其研究始于本世纪初, 其监测原理是测孔中的电缆产生变形时, 电缆中脉冲信号产生的反射波会发生变化, 经过对反射波信号分析, 就能确定电缆变形的位置和变形程度[40], 与测斜仪相比有检测时间短、安全性高的优点, 可实现远距离传输[41]。积分方程方法可以模拟微波信号和材料之间的相互作用, Platt Ian [42]等对 TDR 的积分基函数进行了改进, 提高了 TDR 监测技术的精度。张青[43]等将 TDR 技术应用到雅安峡口滑坡监测中, 将 TDR 的监测数据和测斜仪的监测数据进行了对比, 两者的数据较好吻合, 但是仅通过 TDR 监测技术难以确定滑坡方向, 且无法测出微小变形。谭捍华[44]利用时域反射测试技术监测了高速公路边坡, 发现不同型号的同轴电缆对边坡变形的反应程度不同, 需要根据实际工程情况选择合适的同轴电缆, 此外需要指出, TDR 监测技术只能用于有剪切作用的监测情形, 可用其确定滑移面的位置。

### 2.2.4. 利用分布式光纤传感技术监测边坡内部位移

分布式光纤传感技术(DFOS)是 20 世纪 70 年代末伴随光时域反射技术(OTDR)产生的一种新型传感技术[45]。其监测原理是当光纤受到外界土体变形而产生应变时, 光纤所产生的布里渊散射光的频移会发生变化, 由于变形量和频移量之间存在线性对应关系, 通过频移量的变化就可推算出位移量的变化, 光纤传感技术就是利用这一对应关系而建立起的一种监测技术[46]。这种监测方式集传感与传输于一身, 具有体积小、耐腐蚀、抗干扰性能强、可长距离传输信息等优点[47]。针对分布式光纤传感技术中的温度和应力的解耦问题, He Jianping [48], 等对进行了研究, 提出了同时测量温度和应力的方法, 为监测时温度和应力相互影响提供了一种解决方法。刘永莉[49]等将布里渊散射光时域反射监测技术(BOTDR)应用到碎石土边坡的表面变形监测中, 针对 BOTDR 在监测中的同步协调变形及温度补偿问题进行讨论, 总结实践经验, 提出改进方案, 推动了 BOTDR 在边坡工程变形监测中的发展, 为今后 BOTDR 技术在边坡监测领域提供了可借鉴的经验。在后续的边坡监测中, 李旭辉[50]等将其应用到长距离大范围的边坡监测中, 进一步探索了分布式光纤传感技术在大范围监测中的优势。

通过上述内容, 测斜仪和阵列位移计的监测原理类似, 都是通过仪器内部加速度传感器感知位移的变化, 阵列位移计可承受更大的变形, 可实现监测数据的远距离传输, 监测性能优于测斜仪, 只是其成本费用可能较高。TDR 和 DFOS 类似, 相比之下, TDR 监测技术成本较低, 只适用于监测滑移面的位置, DFOS 的监测性能较好, 但是受温度变化的影响较大。

将上述关于边坡内部位移监测方法的优缺点进行总结, 见下表 2。

**Table 2.** Comprehensive comparison of slope internal displacement monitoring methods

**表 2.** 边坡内部位移监测方法综合对比表

监测方法	监测内容	优点	缺点
测斜仪监测	内部位移	技术成熟、操作简单	效率低, 对边坡扰动大、难以测量较大变形
SAA 监测	内部位移	抗剪、抗扭能力好, 精度高, 可测量较大位移	成本高
TDR 监测	内部位移	实时监测、速率快	只对剪切变形敏感、难以预测滑坡方向
DFOS 监测	内部位移	抗电磁干扰能力强, 灵敏性高, 远距离监测	成本高, 光纤受较大剪切变形易断裂

### 3. 应力监测

前面对边坡的变形监测进行了综述,但变形只是滑坡发生的必要条件,而非充分条件,即滑坡发生前一定会有位移的发生,有位移发生并不一定会产生滑坡,从本构关系看,应力变化是发生滑坡的内在因素,变形是滑坡发生的外在表现。且往往位移变化滞后于应力变化。对于岩质边坡,位移变形滞后于滑坡灾害的发生,当大变形位移出现时,灾害已经发生,位移监测就失去了其原有的意义,而应力变化的时间要提前得多,因此对于岩质边坡,应力监测当属首选。鉴于此,何满朝[51]等研发了滑坡地质灾害远程预报监测系统,对边坡内部应力进行了监测。这一系统的监测原理是先在边坡中穿刺锚索,在锚索上人为施加一个摄动力,摄动力与边坡内部应力构成一对力与反力的关系,通过测量摄动力来达到监测边坡应力的目的,并将该系统成功应用到众多的边坡应力监测中,监测结果表明应力的变化超前于位移的变化,对应力的监测更能提前预警,监测效果显著。郭永建[52]对边坡锚杆轴力进行了监测,提出了通过监测全长锚杆轴力来达到监测边坡应力的目的,将其应用到实际边坡监测中,取得了较好的监测效果。目前对于边坡应力的监测主要是通过监测锚杆、框架梁等的应力实现,因此对于有锚杆、框架梁等支护结构的一些边坡,只需在这些支护体系上布设监测仪器即可实现对边坡应力的监测。监测仪器主要有电容式压力传感器、光纤压力传感器、应变式压力传感器。

电容式传感器利用电容器原理,外界压力引起电容器极板间相对位置发生改变而引起电容量发生改变,通过测量电容量的改变就能获得压力值的大小。王阳[53]等利用差分式开关电容电路原理,将微电容量转化为电压信号输出,有效的解决了微电容量难以测量的难题。总体来说,电容式压力传感器具有很好的动态响应、结构简单坚固、低功耗等优点,但是在实际应用中外界环境的温度、湿度变化会对传感器材料的介电常数、极板间的距离有所影响,带来测量结果的误差。

光纤光栅压力传感器在分布式测量方面具有优势,灵敏度高,抗腐蚀性好,近几年来成为研究的热点,但是由于封装材料和封装工艺的因素,在实际环境下要考虑材料的粘接、防水性以及温度交叉敏感等问题[54]。为解决温度干扰,姜德生[55]等提出了差动式光纤光栅传感器测量的方法,将温度影响作为共模信号消除,并通过温度特性实验进行了检验,结果表明其温度稳定性很好,随着工作温度范围的减小,其热稳定性会更好。

应变式压力传感器的工作原理是:当外力作用在由敏感材料制成的导体上时,导体产生变形使导体电阻阻值发生改变,通过建立电阻阻值与被测压力之间的函数关系来确定压力值。金属应变式压力传感器具有结构简单,体积小,成本低廉的优点,缺点是输出灵敏度低。相比之下,半导体材料的灵敏度要高出数十倍,硅作为一种天然半导体材料,用其制成的硅压阻压力传感器具有抗压能力强、动态响应性能好的优点,克服了传统金属应变式传感器的缺点,但是其成本较高[56]。

概括来讲,在实际工程中采用较多的是对边坡变形的监测,而对边坡应力的监测相对较少,原因可能在于变形数据更为直观的表现边坡的变形趋势,而应力监测数据不够直观,此外变形监测比应力监测更易实现,使得在工程中变形监测的应用较多。

### 4. 存在的问题及展望

通过上述对边坡监测方法的总结,这些监测方法存在以下一些问题:

- 1) 现有的监测方法已经较多,众多的研究围绕提高监测精度展开,但是缺少监测精度的评价指标;
- 2) 缺少对数据的深度挖掘,目前对边坡监测数据处理分析还未能充分挖掘出其包含的变形信息,对于大量数据的处理分析仍是一个难题。

展望:

- 1) 制定相应的边坡监测规范,根据不同类型的边坡,结合各类监测方法的优缺点及适用性,推荐一

种或几种监测方法,方便各种监测方法的推广使用,并制定出监测精度评价的指标,方便对监测结果进行评估。

2) 开发与监测方法相匹配的专门数据分析软件,可以将不同边坡的监测数据统一处理,深化数据处理融合,与相关的数学知识和计算机软件开发融合发展。

3) 目前多数监测方法的智能化程度低,在未来的研究中,监测方法可能会与物联网、5G、大数据云计算等结合,智能化程度显著提高。

## 参考文献

- [1] 孔令伟,陈正汉.特殊土与边坡技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(5):141-161.
- [2] 郭永兴.基于光纤光栅的高陡边坡及危岩落石监测技术与应用研究[D]:[博士学位论文].武汉:武汉理工大学,2014.
- [3] 董文文,朱鸿鹤,孙义杰,施斌.边坡变形监测技术现状及新进展[J].工程地质学报,2016,24(6):1088-1095.
- [4] 唐新建,陶洪久,章光,袁从华.利用遥感图像对滑坡进行调查和监测分析研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(A02):2515-2520.
- [5] 杨景玉.基于高分遥感影像的道路灾害监测关键技术研究[D]:[博士学位论文].兰州:兰州交通大学,2019.
- [6] Liu, S., Bruzzone, L., Bovolo, F., et al. (2014) Hierarchical Unsupervised Change Detection in Multitemporal Hyperspectral Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **53**, 244-260. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2321277>
- [7] 张敏.近景摄影技术在露天矿山边坡变形监测中的应用初探[J].科技创新与应用,2020(20):171-172.
- [8] 刘朝辉,田峰.近景摄影测量在边坡变形监测中的应用[J].科技创新与应用,2016(9):300.
- [9] Matori, A.N., Mokhtar, M.R.M., Cahyono, B.K., et al. (2013) Close-Range Photogrammetric Data for Landslide Monitoring on Slope Area. 2012 *IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering (CHUSER)*, Kota Kinabalu, 3-4 December 2012, 398-402. <https://doi.org/10.1109/CHUSER.2012.6504346>
- [10] Alameda-Hernández, P., Hamdouni, R.E., Irigaray, C., et al. (2017) Weak Foliated Rock Slope Stability Analysis with Ultra-Close-Range Terrestrial Digital Photogrammetry. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **78**, 1157-1171. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1119-z>
- [11] 刘志奇,李天子,刘昌华,张慧慧.基于单像近景摄影测量的滑坡裂缝探测方法[J].金属矿山,2018(8):108-113.
- [12] 徐绍铨,程温鸣,黄学斌,李征航.GPS用于三峡库区滑坡监测的研究[J].水利学报,2003(1):114-118.
- [13] Peyret, M., Djamour, Y., Rizza, M., et al. (2008) Monitoring of the Large Slow Kahrod Landslide in Alborz Mountain Range (Iran) by GPS and SAR Interferometry. *Engineering Geology*, **100**, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.013>
- [14] 王劲松,陈正阳,梁光华.GPS一机多天线公路高边坡实时监测系统研究[J].岩土力学,2009,30(5):1532-1536.
- [15] 赵永红,王航,张琼,徐安东,田罡.滑坡位移监测方法综述[J].地球物理学进展,2018,33(6):2606-2612.
- [16] 冯春,张军,李世海,许利凯.滑坡变形监测技术的最新进展[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):11-16.
- [17] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(z2):3629-3635.
- [18] 徐进军,王海城,罗喻真,王尚庆,严学清.基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J].岩土力学,2010,31(7):2188-2191+2196.
- [19] 谢谟文,胡嫚,王立伟.基于三维激光扫描仪的滑坡表面变形监测方法——以金坪子滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):85-92.
- [20] Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., et al. (2014) Terrestrial Laser Scanning of Rock Slope Instabilities. *Earth Surface Processes & Landforms*, **39**, 80-97. <https://doi.org/10.1002/esp.3493>
- [21] 吴玉泉.基于三维激光扫描技术的边坡形变监测研究[D]:[硕士学位论文].赣州:江西理工大学,2019.
- [22] 朱建军,李志伟,胡俊.InSAR变形监测方法与研究进展[J].测绘学报,2017,46(10):1717-1733.
- [23] Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. and Zebker, H.A. (1989) Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **94**, 9183-9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>



- [24] 游新兆, 李澍荪, 杨少敏, 乔学军, 王琪, Tom Logen, 杜瑞林. 长江三峡工程库首区 InSAR 测量的初步研究[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(4): 58-66.
- [25] Rocca, F., Prati, C., Ferretti, A. and Colesanti, C. (2003) Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, **68**, 3-14.
- [26] 涂鹏飞, 岑仲阳, 谌华. 应用重轨星载 InSAR 技术监测三峡库区滑坡形变探讨[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(6): 886-890.
- [27] 何朝阳, 巨能攀, 解明礼. InSAR 技术在地质灾害早期识别中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 32-39.
- [28] Angeli, M.G., Pasuto, A. and Silvano, S. (2000) A Critical Review of Landslide Monitoring Experiences. *Engineering Geology*, **55**, 133-147. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00122-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00122-2)
- [29] 高杰, 尚岳全, 孙红月, 王智磊. CCD 微变形监测技术在边坡远程监控中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1269-1272.
- [30] 葛折圣, 黄晓明, 王自成. 土体测斜仪在软基段路基变形检测中的应用[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 26-29.
- [31] 陈开圣, 彭小平. 测斜仪在滑坡变形监测中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1): 39-41.
- [32] 彭纪超, 王松林, 张运勋, 岳婷, 宋扬. 钻孔测斜仪在滑坡变形监测中的应用研究[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(4): 440-444.
- [33] 李果, 房锐, 戴锐, 吴铸. 新型柔性测斜装置在大变形公路滑坡监测中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(2): 33-35.
- [34] Abdoun, T., Bennett, V., Dobry, R., et al. (2008) Full-Scale Laboratory Tests Using a Shape-Acceleration Array System. In: Danisch, L., *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, ASCE, Reston, 1-9.
- [35] 邱冬炜, 祝思君, 王来阳, 段明旭. 利用阵列式位移传感系统进行地质灾害深部位移动态监测与分析[J]. 测绘通报, 2018(3): 122-125+129.
- [36] Dasenbrock, D.D., Abdoun, T. and Bennett, V. (2011) Real-Time Structural Health Monitoring of Landslides and Geotechnical Assets with ShapeAccelArrays. *Proceedings of Geo-Frontiers 2011*, Dallas, 13-16 March 2011, 1585-1595.
- [37] 陈贺, 李亚军, 房锐, 李果. 滑坡深部位移监测新技术及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4063-4070.
- [38] 李媛. 基于阵列式位移计的滑坡体监测成果分析[J]. 陕西水利, 2019(7): 35-38.
- [39] McAlister, C.M. and Pierce, C.E. (2001) Small-Diameter TDR Cables for Measuring Displacement in Physical Soil Models. *TDR 2001 Symposium*, Evanston, 5-7 September 2001, 867-873.
- [40] 张青, 史彦新, 朱汝烈. TDR 滑坡监测技术的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 64-66.
- [41] 邬晓岚, 涂亚庆. 滑坡监测的一种新方法——TDR 技术探析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 740-744.
- [42] Woodhead, I., Buchan, G., Platt, I. and Christie, J. (2007) Improved Electric Field Modelling for TDR. *Measurement Science and Technology*, **18**, 1110-1117. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)162](https://doi.org/10.1061/41165(397)162)
- [43] 史彦新, 张青. TDR 技术在雅安峡口滑坡监测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2005(1): 55-57.
- [44] 谭捍华, 傅鹤林. TDR 技术在公路边坡监测中的应用试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1331-1336.
- [45] 李晓娟, 杨志. 布里渊分布式光纤传感技术的分类及发展[J]. 电力系统通信, 2011, 32(2): 35-39.
- [46] 隋海波, 施斌, 张丹, 王宝军, 魏广庆, 朴春德. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(z2): 3725-3731.
- [47] 施斌, 张丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 工程地质力学创新与发展暨工程地质研究室成立 50 周年学术研讨会论文集. 北京: 工程地质学报, 2008: 8.
- [48] He, J., Zhou, Z. and Ou, J. (2014) Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using a Hybrid Local and Distributed Optical Fiber Sensing System. *Measurement*, **47**, 698-706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.10.006>
- [49] 刘永莉, 尚岳全, 于洋. BOTDR 技术在边坡表面变形监测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 777-783.
- [50] 李旭辉, 黄奕辉, 吴兴颜, 胡国良. 分布式光纤监测技术在边坡工程中的应用[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(3): 34-36+40.
- [51] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081-1090.
- [52] 郭永建. 基于锚杆轴力监测的公路岩质边坡稳定性评价研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.

- [53] 王阳, 徐加欢, 陈军宁, 刘高平. 集成微电容式传感器检测电路设计与研究[J]. 电子器件, 2013, 36(2): 230-234.
- [54] 林剑涛, 曹晓峰, 祝睿雪, 周俐娜, 程永进. 光纤光栅压力传感器的研究进展与趋势[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 88-94.
- [55] 王俊杰, 姜德生, 梁宇飞, 付晓红, 刘胜春, 黄俊斌. 差动式光纤 Bragg 光栅土压计及其温度特性的研究[J]. 光电子·激光, 2007(4): 389-391.
- [56] 郭冰, 王冲. 压力传感器的现状与发展[J]. 中国仪器仪表, 2009(5): 72-75.