

基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展

杜岩^{1,2)}, 谢谟文¹⁾✉, 蒋宇静^{2,3)}, 刘卫南¹⁾, 刘日成²⁾, 刘秋强⁴⁾

1) 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083 2) 长崎大学工学研究科, 长崎 852-8521
3) 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 青岛 266590 4) 中国地质环境监测院, 北京 100081
✉通信作者, E-mail: mowenxie@ustb.edu.cn

摘要 崩塌灾害的早期预警一直是岩土工程领域研究的热点问题之一。传统的监测预警方法监测指标相对单一,更多关注于加速破坏前兆的识别,使得崩塌的早期预警存在诸多困难。本文首先引入动力学监测指标,对岩土体破坏过程中的动力响应进行综述,得出基于固有振动频率等动力学监测指标可以为危岩体的损伤提供数据支持。随后基于最新的实验研究发现动力学监测指标可以有效反应边坡的物理力学特征的变化,进而可以实现岩体损伤与稳定性的动态识别和定量判断。在对国内外现状进行综述发现,基于分离阶段破坏前兆识别的岩块体崩塌灾害预警思路,具有更好的时效性,是未来崩塌早期预警的发展方向,同时对崩塌的早期预警指标体系进行展望,得出基于动力学指标、静力学指标和环境量指标三位一体的早期监测预警指标体系,必将在工程监测与灾害预警方面发挥更大潜力,为从事应对崩塌等脆性破坏灾害预警预防的研究工作者提供有效参考。

关键词 崩塌; 早期预警; 动力学监测指标; 分离破坏前兆; 监测预警体系

分类号 TG142.71

Research progress on dynamic monitoring index for early warning of rock collapse

DU Yan^{1,2)}, XIE Mo-wen¹⁾✉, JIANG Yu-jing^{2,3)}, LIU Wei-nan¹⁾, LIU Ri-cheng²⁾, LIU Qiu-qiang⁴⁾

1) Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan
3) State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
4) China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China
✉Corresponding author, E-mail: mowenxie@ustb.edu.cn

ABSTRACT Early warning of rock collapse is one of the hot issues in the field of geotechnical engineering. The traditional monitoring and early warning methods of monitoring indicators are relatively uniform, with more attention being paid to the identification of accelerated damage precursors, which means that the early warning of collapse disasters has many inherent difficulties. In fact, rock-block collapse is caused by the dynamic failure of system instability, so it can be more effective to apply kinetic monitoring indicators to realize more scientific early warnings. In this paper, dynamic monitoring indexes were introduced to summarize the dynamic responses of rock and soil failure processes. A dynamic monitoring index based on natural vibration frequency can provide data for detecting damage in a dangerous rock mass. Based on the latest experimental research, it is concluded that the dynamic monitoring index can effectively reflect changes in physical and mechanical characteristics, and thus, can be used to dynamically and quantitatively analyze the damage and stability of a rock mass. A review of the literature on the current development of this field in China and abroad indicates that the early warning method of rock mass collapse disaster based on precursor failure identification in the detachment phase has better timeliness and will also prove to be more useful in future. Meanwhile, the development of an early warning index system of collapse is

收稿日期: 2018-09-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFE0101100); 国家自然科学基金资助项目(41702371, 41572274); 中国博士后科学基金资助项目(2016M591078); 中央高校基本科研业务资助项目(FRF-TP-16-014A1)

forecasted. An early monitoring and early warning index system based on dynamic, static, and environmental quantity indexes has greater potential for effective engineering monitoring and disaster warning. However, this new early warning method and its tripartite early warning indicator system offers a foundation for better responses to rock collapse in high-risk regions, and thus can improve the current passive prevention approach of rock-block monitoring and reduce the casualties and property losses that follow instantaneous rock collapse. This paper provides an effective reference for researchers studying early warning systems and the prevention of brittle damage disasters such as collapse.

KEY WORDS rock collapse; early warning; kinetic monitoring indicators; failure precursor in detachment phase; monitoring and early warning system

高陡边坡的瞬时崩塌破坏在岩土工程界最为常见,但在监测中成功预警的实例却很少。其原因主要是在边坡上的危岩体监测中,往往是通过静力学指标(如变形、应力等)或是环境量指标(如地下水、降雨量等)来进行监测。通过静力学指标,虽然可以识别其破坏,但是预警的时效性有待进一步商榷;而通过对诱发因素等环境量指标的监测预警,虽然可以识别其风险,但是预警的科学性和准确率存在一定不足。因此这些指标在土质滑坡或泥石流等塑性破坏灾害的早期预警方面可以发挥一定作用,但是在崩塌等脆性破坏灾害的早期预警实现方面存在一定差距,而发展与脆性破坏灾害相适应的监测预警体系和预警方法,是实现崩塌早期预警的关键所在。

国内外很多学者都对岩块体的崩塌破坏问题进行了大量研究,并取得了阶段性成果。Strom 与 Korup^[1]认为危岩破坏失稳及其运动致灾过程是不断演化的动力学过程;Aref 等^[2]在对也门山区危岩体及落石进行调查后,总结出该地区崩塌破坏的诱发因素,并提出相应的加固措施;Freyssines 和 Hantz^[3]通过沉积地区的岩体崩塌灾害分析了高陡边坡岩体的破坏机制;Huang 等^[4]认为对于不同的岩体须根据其赋存的地质环境差异和威胁对象不同,应采用不同的防治等级和针对性的技术方法;Youssef 等^[5]对 Raidah 悬崖公路旁边的岩质边坡进行稳定性分析,发现六处可能发生岩块体崩塌滑落的区域,后通过数值分析得出其中四处威胁公路安全,并提出相应的工程措施;Royán 等^[6]使用地面激光雷达对边坡岩块体进行了长期的时空变形分析,对发生高落石的 9 个区域进行变形监测,增加了对岩落破坏前兆特征的认知;Wang 等^[7]对飞凤山的某边坡岩体进行定量风险分析,通过对旱季和雨季发生的破坏的概率、波及范围等方面的评估,为当地管理者做出科学决策提供参考;许强等^[8]在对重庆武陵鸡尾山特大型山体崩塌案例中研究发现,岩体不仅赋存不良的地质构造,且长期受到来自岩溶等

自然扰动和采矿等人类活动的影响;张永兴等^[9]分析了岩块体内张性地应力和岩腔发育深度对差异风化型岩体破坏的影响;王述红等^[10]对边坡岩块体进行稳定性判别,发现危岩块体的划分必须满足 3 个条件:具有出露面、几何可移动和稳定系数小于规定值。陈洪凯等^[11-15]针对砂岩和泥岩交互沉积地区的危岩崩塌灾害探讨了崩塌形成机制,基于损伤力学和断裂力学对岩块体主控结构面端部损伤特性、裂隙水压力作用下的疲劳断裂特性、岩体断裂稳定性分析方法、岩块体弹冲动力参数和拉剪型危岩发育过程等做了大量研究并进行相关试验,得出危岩破坏具有链式效应,这种链式效应导致岩块体破坏通常具有群发性,出现链式效应的动力因素应该与岩体破坏激振效应有关。Valentin 等^[16]通过对振动监测信号的频谱分析,得出不同的动力学参数(固有振动频率、振幅等),揭示了动力学指标对岩石断裂的指示作用,建议可通过检测这种不连续性的存在,实现对不稳定岩体的表征。

这些丰富的案例研究表明,岩体的崩塌破坏在发生脆性动力学破坏的过程中,也伴随着强度的实时退化^[17]。事实上,崩塌的核心是其主控结构面的损伤和断裂的扩展^[18],因此如何识别其结构面的损伤并对其进行动态识别是崩塌破坏早期预警的关键。根据结构动力学理论,动力学监测指标与结构体的物理性质有关。而结构发生破坏或损伤必先导致结构体物理参数发生变化。因此,动力学监测指标必然会在结构体发生损伤时产生变化^[19-20],同时基于振动的监测技术可以测得许多复杂结构损伤^[21-22]。这些理论研究和技术的发展为崩塌灾害安全监测与早期预警提供了新的技术思路。基于此,本研究从监测指标、实验研究、应用技术开发等多个方面进行文献综述与分析,基于动力学指标监测对岩体崩塌灾害的损伤识别、动态稳定性评价等进行综述,提出适用于崩塌等脆性破坏灾害的新的技术理论和监测指标体系,以便为崩塌灾害早期预警的实现提供参考。

1 动力学监测指标

通常,结构可以被认为由刚度、质量、阻尼等物理参数组成的力学系统。一旦结构发生损伤,必然引起系统物理特性的变化,进而导致动力学监测指标的变化。常用的指标参数主要有:固有振动频率、阻尼比、模态振型、模态应变能、模态曲率、模态柔度、模态刚度、传递函数等。基于结构动力学,通过选取合理的动力学监测指标,将测得的动力特征参数与基准值做比较,对结构损伤进行定性乃至定量分析,是最为典型的损伤识别方法。

国内外学者在对岩土体破坏过程中的动力学监测上做了大量工作。王来贵等^[23]从动力学系统稳定性的观点出发,认为滑体滑动的稳定与滑动的阻尼性质密切相关,系统存在的正负阻尼的差别,是边坡稳定与破坏的一个标志,并提出判别边坡滑动系统稳定性的准则。林成功^[24]认为边坡于地震期间的动力行为的变化是受地震波特性、边坡几何形状、材料性质及是否有弱面存在等因素的影响,指出动力数值分析是最佳模拟应力应变行为的方法。Zheng等^[25]根据现场调查,发现汶川地震引起的边坡破坏是由地震的蹦床机理效应所致,以此提出了一种新的“多元加速度模型”,并在振动台试验中进行验证。殷跃平等^[26]运用FLAC3D模拟大光包滑坡变形失稳特征,并输入距离滑坡约4.3 km的清平台站强震加速度三向记录,认为动力响应较为复杂,其结果与岩体结构等多种因素有关。Burjáneek等^[27]利用环境振动来分析边坡的动力响应,得出在不稳定边坡测点的光谱比与稳定边坡测点相比表现出放大效应和一定的方向性,并得出固有振动频率分析可以有效分析边坡的物理参数变化。随后Burjáneek等^[28]又通过 $f-k$ 方法、基点光谱比率法和时频依赖极化等方法对潜在不稳定边坡体的波场进行分析,据此划分边坡体的不稳定区域,这种边坡动力特征评价是一种十分新颖的评价方法,可有效将稳定区域与不稳定区域进行划分。Gao等^[29]用依据二维动力学模型和加速度计成功监测山体隧洞的损伤,并验证了基于固有振动频率的动力特性参数监测技术可以有效评价结构的健康状况,这为危岩体的安全监测与损伤识别提供了新的技术思路。

相比较于其他动力学监测指标,基于固有振动频率的损伤识别不需要较多的测点与转动自由度等测试信息^[30],因此,固有振动频率作为一个简单直接易得的动力特征参数,首先应用于工程监测领域变得可能。最新的研究也表明,固有振动频率等动

力特征监测在理论、室内实验和初期应用实践可以为危岩体的损伤识别和安全评价提供新的技术支持:一方面可以定量识别岩块体的损伤,识别崩塌破坏前的动力破坏前兆,另一方面也促进了基于输出模态损伤识别技术的安全评价方法的发展^[31],为工程现场形成一套考虑累计损伤的实时安全评价和早期预警方法提供数据支持。

2 基础实验研究

2.1 岩块体稳定评价基础实验

崩塌的核心是岩体主控结构面的断裂扩展,而如何识别其断裂情况是早期预警的关键问题之一。基于此,Ma等^[32]以混凝土试块为例,通过改变其黏结面积,将频率监测与试块安全性系数进行比较,取得了良好的效果。如图1所示,通过改变黏结面积的形式来测量滑体在不同损伤条件下的频率变化情况。

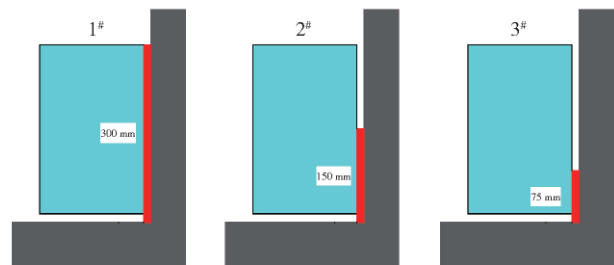


图1 模型示意图

Fig.1 Schematic of the model

表1为岩块体模型实验数据结果及误差分析。结果可知:根据黏结面积得出的抗滑力与频率计算出来的折减系数误差在5%左右。误差来源主要是黏结层物理属性不同造成动力响应不同^[33],从而引起的频率误差。基于结构面物理参数测试困难,用动力学指标,可反向分析岩块体的损伤和断裂情况^[34],使得崩塌的早期预警在理论上成为可能。

表1 实验数据误差分析

Table 1 Analysis of the experimental data error

模型	有效黏结面积/m ²	实际折减系数/%	频率/Hz	计算折减系数/%	误差/%
1#	0.048	—	310	—	—
2#	0.030	62.5	210	67.7	5.2
3#	0.015	31.3	111	35.4	4.1

随着黏结面积的减少,频率也发生相应下降。由实验可知,自振频率可以有效反应边坡损伤后潜在滑移面的结构参数变化。随着岩体因地震,或是降雨引起的抗滑面物理力学等属性的变化^[35],必然

会在结构固有频率的监测中有所体现.

随后, Ma 等^[36]又分别对不同边坡坡度和不同质量滑块等做了一系列实验,进一步证明固有振动频率不仅定量可以分析岩体的损伤情况,同时还可以为数值模拟在滑移面的结构参数选取上提供数据支持^[37].

2.2 危岩体动态稳定评价方法

杜岩等^[38]通过简化动力模型(图 2),建立振动方程及其频率如下:

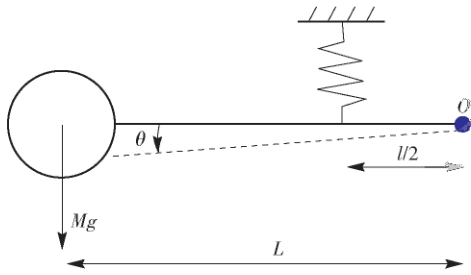


图 2 简化实验模型
Fig. 2 Simplified experimental model

$$ML^2\ddot{\theta} + \frac{\mu Sl^2}{2}\theta = 0 \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu Sl^2}{2ML^2}} \quad (2)$$

其中: \$f\$ 为固有振动频率, Hz; \$M\$ 为试块质量, kg; \$L\$ 为型心到原点 \$O\$ 的距离, mm; \$\mu\$ 为黏结系数, \$N \cdot mm^{-2}\$; \$S\$ 为模块宽度, mm; \$l\$ 为黏结长度, mm; \$\theta\$ 为转角, (\$^\circ\$); \$g\$ 为重力加速度, \$m \cdot s^{-2}\$.

通过公式(2),将频率与抗滑力指标黏结系数建立相关关系,并在实验中进行验证.

图 3 为实验模型. 滑体与基座之间的潜在滑移面黏结强度随着时间推移不断降低,并最终在重力作用下发生破坏. 实验得出,在滑体与基座之间的潜在滑移面随着时间黏结力逐渐减弱的过程中,固有振动频率不断下降,并通过固有振动频率的变化模拟滑坡体的抗滑黏结力强度变化.

随后,杜岩等^[39-43]应用激光多普勒测振仪,通

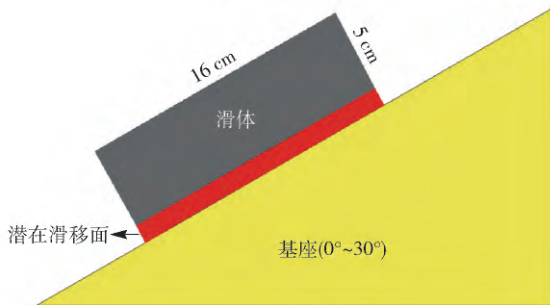


图 3 实验模型
Fig. 3 Experimental model

过实测的固有振动频率来实现对潜在滑移面的黏结力指标的动态修正,从而快速得出边坡上的危险岩土体的安全系数,并取得了与现场实际相吻合的结果. 基于强度折减原理和地理信息系统三维安全分析模块,通过实时监测的动力学监测指标对黏结力参量进行调整,实现坡体更加客观的强度折减. 通过试验和实际边坡的应用,基于模态参量变化的动态数值分析,避开了数值模拟参数选取困难和极限平衡法主观缺点,实现了岩质边坡或边坡岩体的动态安全评价.

大量的实验研究表明,动力学监测指标对危岩体损伤和稳定性评价具有一定的指示作用,建立与之相关的监测预警指标体系,可有助于形成基于稳定性分析的岩体崩塌损伤识别方法,进而实现崩塌灾害的早期预警预报.

3 崩塌灾害早期预警

3.1 传统预警方法

基于应力应变等静力学监测指标或降雨量等环境量监测指标,在对于崩塌等脆性灾害的早期预警方面具有一定局限,主要有以下两个方面制约.

一是早期预警的思路存在明显的缺陷. 如图 4 所示,土质滑坡等塑性灾害加速破坏阶段较长,破坏前有明显的破坏前兆,如位移增大等,且其前兆异常事件与其发生时刻有较大的时间差,因此可以实现早期预警;而崩塌破坏加速破坏阶段时间很短,因此关注破坏阶段并对其破坏前兆进行识别虽然可以实现其破坏时刻的准确识别,但没有充分的预警避险时间,很难达到早期预警的目的. 因此,基于加速破坏前兆识别的早期预警思路来对崩塌等脆性破坏灾害具有明显的不适用性.

二是取用的监测指标不能满足脆性破坏早期预警的需要. 岩块体崩塌多是岩体与边坡岩体黏结程度不断降低而最终导致的动力破坏. 在这个变化过程中,高精度的应力应变监测以及相应的环境量监测虽然在识别崩塌的结果与风险评价上起到一定的

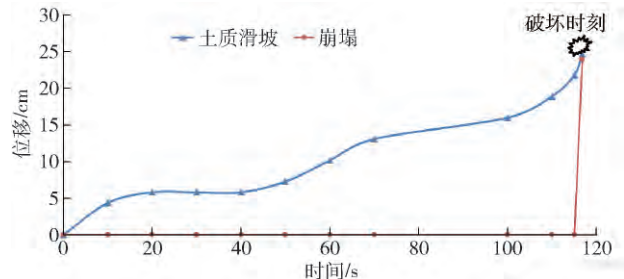


图 4 土质滑坡与崩塌破坏特征对比
Fig. 4 Comparison of soil landslide and rock collapse

效果^[44],但是在预警时效性、正确率和准确性方面还有待考量. 以位移变形为例,可以根据变形—时间曲线,提出的不同尺度的时间预测预报模型和方法,如采用速度倒数模型或斋藤迪孝模型等,但是因崩塌加速变形阶段的快速性和突发性,使其很难满足在加速变形前实现崩塌的早期预警^[45].

因此,转变目前的预警思路,并建立与脆性破坏相适应的早期预警指标体系,是岩体崩塌等脆性破坏灾害早期预警的必然选择. 越来越多的研究表明,边坡上的岩块体崩塌等脆性破坏多是系统不稳定导致的动力破坏^[46-47],且发生破坏时的动力学指标前兆现象十分明显^[48]. 因此,选取合适的预警思路并建立含有动力学监测指标的预警指标体系,才能有效改变目前崩塌灾害监测被动预防的态势.

3.2 基于分离阶段破坏前兆的早期预警

前人在对块体崩塌破坏进行预警研究发现,岩块体在破坏前,一般需要经历两个阶段^[49]:

一是分离阶段,通常伴随裂隙的扩展、小变形或是小颗粒岩石的掉落等;

二是加速破坏阶段,则伴随着潜在破坏面的强度的丧失并产生崩塌破坏.

在过去的几十年时间里,人们在地质灾害的早期预警研究中,更加关注的是加速破坏阶段,预警思路往往过多关注于识别加速破坏前兆事件,故难以实现崩塌等具有脆性破坏特征灾害的早期预警. 大量群测群防资料也显示,基于加速破坏阶段前兆识别的早期预警思路,虽然可以实现对崩塌灾害的判断,但是无法实现崩塌的早期预警;而通过分离阶段的早期预警,往往可以实现崩塌的早期预警预防. 因此在针对崩塌等脆性破坏中,关注分离阶段前兆识别的预警思路,是改变岩块体崩塌等脆性破坏灾害早期预警被动预防态势的有效手段之一.

表2为脆性破坏灾害不同阶段的预警效果对比分析. 由表2可知,基于稳定阶段的预警历时太久,无法起到预警效果;而基于加速或是破坏阶段,则时效性较差,没有充分的预警避险时间,只能指示崩塌的发生或进行相关反演计算;但在分离阶段或是分离→加速过渡期实施预警,却具有较好的时效性.

表2 不同阶段的预警效果

Table 2 Warning effects at different stages

阶段	稳定阶段	分离阶段	分离→加速	加速阶段	破坏阶段
一般持续时间	几十年	多天	数十秒	数秒	数十毫秒
距破坏时刻	—	10 s 以远	10 s 以远	10 s 以内	1 s 以内
预警时效性	太久	合适	合适	差	差

由于岩体崩塌等不可控的能量释放可能由一系列小事件引起^[50],因此从早期预警的实际需求出发,实现并发展基于分离破坏前兆识别的岩块体崩塌灾害预警思路,可为工程现场提供一种相对可行的针对岩体脆性破坏灾害的早期预警思路:应用激光测振等多种监测技术对分离阶段破坏前兆进行预警识别,充分利用“分离阶段”或“分离→加速阶段”这些脆性破坏的预警黄金时间,进而满足工程应急避险预警的需要,实现崩塌灾害早期预警之目的.

3.3 崩塌监测预警指标体系

针对岩体脆性破坏灾害,除了形成合理的预警思路,还需建立与之相适应的预警指标体系. 大量案例证明,相对单一的预警指标虽然可以在具体的工程应用中起到一定作用,但是暴露的缺点也是毋庸置疑的. 以单一位移指标为例,无法实现崩塌等脆性破坏的早期预警;但通过频率等多指标监测,可识别其分离阶段破坏前兆,从而可以实现对崩塌等脆性破坏的早期预警识别^[31]. 另外,以单一的应力指标和应力—频率多指标对比为例:在单一的应力

监测中,监测指标不能主动识别主控结构面的损伤,因此导致预警的显著滞后,在235 s才实现黄色预警,如图5所示;而基于应力—频率多指标对比分析,对应力的预警指标进行动态调整,实现了岩体在地震及环境发生重大变化下的内部损伤和健康状况的考量,可提前15 s实现预警(图6).

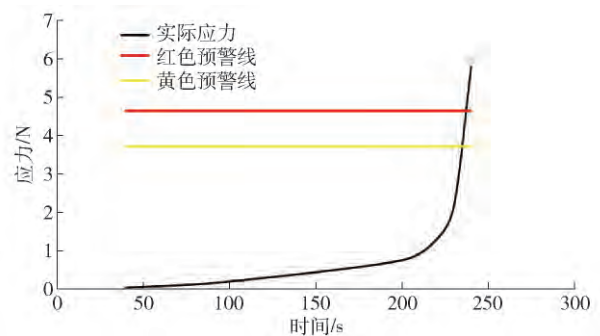
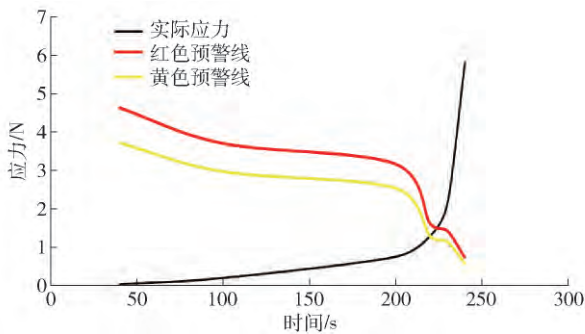


图5 固定预警线指标预警分析^[39]

Fig. 5 Safety analysis based on fixed warning line index^[39]

因此,多监测指标的相互验证与结合,可以提供预警效果. 而开发一套与崩塌灾害早期预警相适应

图 6 基于频率的早期预警^[39]Fig. 6 Early warning analysis based on frequency^[39]

的多指标监测指标体系,是目前工程监测发展的主流方向之一。国外在崩塌灾害的早期预警方面发展迅速,已开发了一套多监测指标的岩石边坡稳定性评价系统,并开始在工程中进行应用^[51]。这套最新的系统不仅引入了固有振动频、阻尼比等动力学监测指标,还提出了一种新的岩石稳定性评价方法:基于动力学监测指标的安全评价方法,将工程实际测量参数与安全评价指标进行直接对接,为工程安全监测提供了相对丰富的指标体系。

实际上,危岩体是一个不平衡、不稳定、充满复杂性的系统,虽然振动频率等动力学指标的引入使得人们在崩塌的早期预警上前进了一步,不可否认的是,仅仅依靠目前相对有限且孤立的监测指标,来实现诸如危岩等复杂系统的早期预警仍存在诸多差距,还需要不断探索实践。这不仅需要与其他传统监测数据进行综合分析和相互校准,同时还需要更多新的技术理论和专业设备来进行不断补充和完善,才能实现崩塌等早期预警在量的进步中实现质的飞跃。

而从国内外的工程实践和目前实验研究结果,基于固有振动频率等的动力学指标监测,可以快速得到结构力学指标的变化,判定岩体是否存在扰动,并对安全系数进行动态的定量分析^[52]。因此可以初步形成一种相对丰富的监测预警指标体系^[53]:基于动力学指标监测、静力学指标监测和环境量指标监测的三位一体的监测预警指标体系,从而提高现有崩塌灾害时空预测与早期预警的效率和水平。

3.4 动力学监测指标的应用

实际上,制约动力学监测指标在工程监测的应用更多来自于技术设备层面。然而近几年,随着光学测振技术的发展,尤其是基于激光多普勒原理的测振设备的引入,使得危岩体远程振动监测成为可能,而这在 10 年前是不可想象的。

由于监测现场地质复杂且有巨大危险性,这种

非接触的采集方式更加保证测试人员的安全。同时其精度和灵敏度的提高,以及数据处理流程的进一步简化,也使得灾害监测和预警的时效性和科学性大大提升,以最新的激光测振仪为例,其速度分辨率已可达 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,可满足工程所需的精度要求。新的测振技术的发展,使得动力学指标的监测在岩土工程领域成为可能,并还可为如下研究领域提供新的技术支持:

(1) 有限元动力学分析的进一步发展;(2) 基于有限元在损伤方面的跟进模拟与实例验证;(3) 定义相对稳定的岩体与危岩体,实现广域危岩体的快速识别;(4) 基于动力损伤识别技术的危岩体稳定性评价等。

更为重要的是,动力学监测指标引入,使得危岩体的模糊识别成为可能。在未知的结构模型下,通过高精度的振动监测设备依然可以检测模态损伤位置和损伤程度的信息^[54],这些远远是其他常规测量所无法比拟的。传统的稳定性评价往往需要详细的和可靠的描述岩体的内部特征,而由于这些内部特征不易获取,因此只能定性识别^[55]。而作为未来边坡监测的发展方向,模糊识别技术的发展可为岩块体的动态稳定分析提供新的数据支持。这些新的监测参数经过严格校准可准确地分析完整的岩石力学变化机制,从而集成基于模糊识别的崩塌灾害智能监测系统,使得基于稳定性分析与前兆识别的早期预警成为可能,进而在崩塌等具有突发性的脆性灾害防治方面发挥重要作用^[56]。诚然在技术推广中,也将面临如下技术问题:

一是噪音的影响。由于现场环境的复杂性和仪器的高灵敏度,振动信号不可避免会存在噪音和误差,如何去除这些误差是工程亟待解决的一个问题之一。目前降噪问题主要集中于声学、智能控制、电子学、图像与信号处理以及线性数学等领域,而针对大型结构的模态参数识别问题还缺少相关的信号消噪技术的研究^[57]。

二是提取相关的动力特征参数。由于特征参数受仪器本身振动和大地脉动的影响较大,如何过滤掉这些影响因素,提取真正的特征参数是另一难题^[58],目前最新的监测设备虽然可以实现多种监测参量的获取和收集,但获取最有价值的相关监测参数信息还需进一步研究。

三是校准体系的建立。虽然大量实验已经得出频率等动力学监测指标与安全性的关系,但是现实的岩体会存在多种因素对频率的影响,不规则块石的岩性、几何形态、尺度和空间分布等特征以及含水

率等因素,甚至是环境温度的变化也会对边坡的物理学性质有不同程度的影响,进而为模糊识别带来诸多困难.因此如何进行严格校准并实现基于稳定分析的早期预警,还需要进一步的实验和工程验证.

同时,动力学监测指标的采集和分析系统还需要不断进行优化,例如根据现场技术要求,测量数据必须长期收集,才能为监测预警奠定基础.因此,动力学指标的监测还需进一步克服其在工程中的技术局限性,并进行系统优化,才能在崩塌灾害的应急决策方面发挥更加积极的作用.

4 结论与展望

随着地震等自然灾害的影响和人类活动的加剧,未来几年仍然是岩块体崩塌灾害的多发期.本研究从理论分析,实验验证和工程应用等多个角度对崩塌灾害的早期预警进行综述,得出如下结论:

(1) 随着动力特性分析技术的完善,动力学监测指标必将在土木工程监测和防灾减灾领域发挥重大作用.非接触式的远程监测可保障测量人员的安全;高精度和模糊识别等优势可以使现场安全评价与监测预警更具时效性、安全性和科学性.

(2) 基于固有振动频率等动力学监测指标,可对岩体的损伤做出定性或定量判断,还可实现对应力等静力学指标的预警阈值进行动态分析.动力学监测指标的引入,将改变目前岩块体崩塌监测预警被动预防的局面,有效减少因崩塌等瞬时破坏造成的人员伤亡和财产损失.

(3) 从早期预警的现实需求上,实现并发展基于分离破坏前兆识别的岩块体崩塌灾害预警思路,是未来崩塌早期预警的发展方向.基于分离破坏前兆识别的预警理论可有效利用早期预警的黄金期,具有更好的时效性,可为工程现场提供一种相对可行的崩塌灾害早期预警方法.

(4) 在未来可实现一套基于动力学指标、静力学指标和环境量指标三位一体的早期监测预警体系.这套基于损伤识别和动态稳定性分析的早期预警体系,必将在工程监测与灾害预警方面发挥更大潜力,尤其是对崩塌等具有突发性的脆性破坏灾害的防治方面具有重要的指导意义.

参 考 文 献

[1] Strom A L, Korup O. Extremely large rockslides and rock avalanches in the Tien Shan mountains, Kyrgyzstan. *Landslides*, 2006, 3(2): 125

[2] Aref M, Nei L, Abdo S. Causes of rockfalls in Ai-Huwayshah ar-

ea, Yemen. *Global Geol*, 2009, 12(1): 5

[3] Fraysines M, Hantz D. Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46(7): 1115

[4] Huang R Q, Liu W H, Zhou J P, et al. Experimental field study of movement characteristics of rock blocks falling down a slope. *J Earth Sci*, 2010, 21(3): 330

[5] Youssef A M, Maerz N H, Al-Otaibi A A. Stability of rock slopes along Raidah escarpment road, Asir Area, Kingdom of Saudi Arabia. *J Geog Geol*, 2012, 4(2): 48

[6] Royán M J, Abellán A, Jaboyedoff M, et al. Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, 2014, 11(4): 697

[7] Wang X L, Frattini P, Crosta G B, et al. Uncertainty assessment in quantitative rockfall risk assessment. *Landslides*, 2014, 11(4): 711

[8] Xu Q, Huang R Q, Yin Y P, et al. The jiweishan landslide of June 5, 2009 in wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism. *J Eng Geol*, 2009, 17(4): 433
(许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年6.5重庆武陵鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究. *工程地质学报*, 2009, 17(4): 433)

[9] Zhang Y X, Lu L, Zhang S P, et al. Development and failure principle of differential weathering overhanging rock. *J Civil Arch Environ Eng*, 2010, 32(2): 1
(张永兴, 卢黎, 张四平, 等. 差异风化型危岩形成和破坏机理. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2): 1)

[10] Wang S H, Yang Y, Wang Y, et al. Spatial modelling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry. *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(Suppl 1): 3432
(王述红, 杨勇, 王洋, 等. 基于数字摄影测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊1): 3432)

[11] Chen H K, Xian X F, Tang H M. Developing mechanism for collapse disaster in rocky mountain area——Taking Mt. Hongyan in the national scenic spots of Simianshan as an example. *J Sichuan Univ Eng Sci Ed*, 2010, 42(3): 1
(陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 石质山区崩塌灾害形成机制——以四面山国家级风景名胜区红岩山为例. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(3): 1)

[12] Chen H K, Xian X F, Tang H M. Stability analysis method for perilous rock by fracture mechanics. *J Chongqing Univ*, 2009, 32(4): 434
(陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法. *重庆大学学报*, 2009, 32(4): 434)

[13] Chen H K, Zhang R G, Tang H M, et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock. *J Vib Shock*, 2012, 31(24): 30
(陈洪凯, 张瑞刚, 唐红梅, 等. 压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究. *振动与冲击*, 2012, 31(24): 30)

[14] Chen H K, Tang H M, Wang Z, et al. Frequency domain characteristics of excitation signals for rupture of perilous rocks. *J Vib Shock*, 2014, 33(19): 64

- (陈洪凯,唐红梅,王智,等. 危岩破坏激振信号频域特征研究. 振动与冲击, 2014, 33(19): 64)
- [15] Chen H K, Yang M, Tang H M, et al. Probabilistic and statistic characteristics of excitation signals during rupture of perilous rock. *J Vib Shock*, 2015, 34(8): 139
(陈洪凯,杨铭,唐红梅,等. 危岩破坏激振信号概率统计特征研究. 振动与冲击, 2015, 34(8): 139)
- [16] Valentin J, Capron A, Jongmans D, et al. The dynamic response of prone-to-fall columns to ambient vibrations: comparison between measurements and numerical modelling. *Geophys J Int*, 2017, 208(2): 1058
- [17] Stead D, Eberhardt E, Coggan J S. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Eng Geol*, 2006, 83(1-3): 217
- [18] Chen W, Xu Z M, Liu W L. Mechanical model and failure mechanism of unstable cantilevered rock blocks due to differential weathering. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(1): 195
(陈维,徐则民,刘文连. 差异风化型危岩力学模型及破坏机制研究. 岩土力学, 2015, 36(1): 195)
- [19] Farrar C R, Doebling S W. An overview of modal-based damage identification methods [J/OL]. *CiteSeer^x Digital Library* (2018-12-21) [2019-03-27]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.6.2798&rep=rep1&type=pdf>
- [20] Benedetti A, Pignagnoli G, Tarozzi M. Damage identification of cracked reinforced concrete beams through frequency shift. *Mater Struct*, 2018, 51(6): 147
- [21] Goyal D, Pabla B S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review. *Arch Comput Method E*, 2016, 23(4): 585
- [22] Jiang Y J, Gao Y, Li B, et al. Research on health assessment technique of tunnel lining based on power spectrum density characteristics of microtremors. *J Jpn Soc Civil Engineers*, 2012, 68(3): 111
- [23] Wang L G, Huang R Q, Zhang Z Y, et al. Dynamic models on the process of landslide hazards. *Prog Nat Sci*, 1998, 8(2): 224
(王来贵,黄润秋,张倬元,等. 滑坡灾害发生的动力学模型. 自然科学进展, 1998, 8(2): 224)
- [24] Lin C G. *A Study on the Dynamic of Slope Stability at the 921Chi-Chi Earthquake in Taiwan* [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2003
(林成功. 台湾921集集大地震滑坡动力分析研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2003)
- [25] Zheng L, Chen G Q, Zen K K, et al. Validation of trampoline effect for earthquake induced landslides using numerical analysis. *Memoirs Faculty Eng, Kyushu Univ*, 2011, 71(4): 127
- [26] Yin Y P, Wang M, Li B, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan Earthquake. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(10): 1969
(殷跃平,王猛,李滨,等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1969)
- [27] Burjánek J, Gassner-Stamm G, Poggi V, et al. Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope. *Geophys J Int*, 2010, 180(2): 820
- [28] Burjánek J, Moore J R, Yugsí Molina F X, et al. Instrumental evidence of normal mode rock slope vibration. *Geophys J Int*, 2012, 188(2): 559
- [29] Gao Y, Jiang Y J, Li B. Estimation of effect of voids on frequency response of mountain tunnel lining based on microtremor method. *Tunnell Undergr Space Technol*, 2014, 42: 184
- [30] Li H J, Yang H Z. Research progress on modal parameter identification and damage diagnosis for offshore platform structures. *Eng Mech*, 2004, 21(Suppl 1): 116
(李华军,杨和振. 海洋平台结构参数识别和损伤诊断技术的研究进展. 工程力学, 2004, 21(增刊1): 116)
- [31] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Experimental study on cumulative damage assessment of rock-block using a laser Doppler vibrometer. *Chin J Eng*, 2017, 39(1): 141
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等. 应用激光多普勒测振仪的岩块体累计损伤评价试验研究. 工程科学学报, 2017, 39(1): 141)
- [32] Ma G, Sawada K, Saito H, et al. Study on evaluating rock block stability by using a remotely positioned laser Doppler vibrometer. *Int J Geomate*, 2012, 2(2): 247
- [33] Qi S W, Wu F Q, Liu C L, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake. *Chin J Rock Mech Eng*, 2004, 23(16): 2792
(祁生文,伍法权,刘春玲,等. 地震边坡稳定性的工程地质分析. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2792)
- [34] Feng X T, Zhang Z Q, Sheng Q. Estimating mechanical rock mass parameters relating to the Three Gorges Project permanent shiplock using an intelligent displacement back analysis method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37(7): 1039
- [35] Wang D Y, Zhu Y L, Zhao S P, et al. Study on experimental determination of the dynamic elastic mechanical parameters of frozen soil by ultrasonic technique. *Chin J Geotech Eng*, 2002, 24(5): 612
(王大雁,朱元林,赵淑萍,等. 超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 612)
- [36] Ma G C, Sawada K, Yashima A, et al. Experimental study of the applicability of the remotely positioned laser Doppler vibrometer to Rock-Block stability assessment. *Rock Mech Rock Eng*, 2015, 48(2): 787
- [37] Uehan F, Minoura S. Development of an aerial survey system and numerical analysis modeling software for unstable rock blocks. *Q Rep RTRI*, 2015, 56(3): 212
- [38] Du Y, Xie M W, Lü F X, et al. New method for dynamic analysis of rock slope stability based on modal parameters. *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37(7): 1334
(杜岩,谢谟文,吕夫侠,等. 基于模态参量变化的边坡动态稳定分析新方法. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1334)
- [39] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Methods of determining warning indices based on natural frequency monitoring. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(8): 2284
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等. 基于自振频率的监测预警指标确定方法. 岩土力学, 2015, 36(8): 2284)

- [40] Jia Y C. *Study on Stability Model of Slope Dangerous Rock Mass Based on Dynamic Characteristics* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018
(贾艳昌. 基于动力特征参数的边坡危岩块体稳定性模型研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018)
- [41] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. A new method for landslides safety assessments based on natural vibration frequency. *Chin J Eng*, 2015, 37(9): 1118
(杜岩, 谢谟文, 蒋宇静, 等. 基于固有振动频率的滑坡安全评价新方法. 工程科学学报, 2015, 37(9): 1118)
- [42] Jia Y C, Xie M W, Chang S X, et al. A model for evaluation of stability of sliding-and falling-type dangerous rock blocks based on natural vibration frequency. *Rock Soil Mech*, 2017, 38(7): 2149
(贾艳昌, 谢谟文, 昌圣翔, 等. 基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究. 岩土力学, 2017, 38(7): 2149)
- [43] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Experimental rock stability assessment using the frozen-thawing test. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(4): 1049
- [44] Tao Z G, Li H P, Sun G L, et al. Development of monitoring and early warning system for landslides based on constant resistance and large deformation anchor cable and its application. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(10): 3032
(陶志刚, 李海鹏, 孙光林, 等. 基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用. 岩土力学, 2015, 36(10): 3032)
- [45] Wang Y P. *Study on Deformation and Failure Mechanism of Rockfall Hazards and Monitoring and Early Warning* [Dissertation]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016
(王延平. 崩塌灾害变形破坏机理与监测预警研究. 成都: 成都理工大学, 2016)
- [46] Zheng A X, Luo X Q, Shen H. Numerical simulation and analysis of deformation and failure of jointed rock slopes by extended finite element method. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(8): 2371
(郑安兴, 罗先启, 沈辉. 危岩主控结构面变形破坏的扩展有限元法模拟分析. 岩土力学, 2013, 34(8): 2371)
- [47] Shen T, Wang Y S, Zhang Y H. Numerical simulation of formation mechanism of the Zaojiaotuo collapse. *J Mountain Sci*, 2016, 34(4): 442
(申通, 王运生, 张云辉. 皂角沱崩塌形成机制数值模拟. 山地学报, 2016, 34(4): 442)
- [48] He M C. Real-time remote monitoring and forecasting system for geological disasters of landslides and its engineering application. *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28(6): 1081
(何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1081)
- [49] Sättele M, Krautblatter M, Bründl M, et al. Forecasting rock slope failure: how reliable and effective are warning systems? *Landslides*, 2016, 13(4): 737
- [50] Zubelewicz A. Precursors of dynamic excitations and rupture in rocks. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(6): 1667
- [51] Uehan F, Saito H, Ma G. Fundamental study on the remote vibration measuring system for evaluating rock slope stability // *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, 2012
- [52] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Safety monitoring experiment of unstable rock based on natural vibration frequency. *Rock Soil Mech*, 2016, 37(10): 3035
(杜岩, 谢谟文, 蒋宇静, 等. 基于固有振动频率的危岩安全监测试验研究. 岩土力学, 2016, 37(10): 3035)
- [53] Du Y, Zheng X T, Xie M W, et al. Strength weakening characteristic of rock burst structural planes. *Chin J Eng*, 2018, 40(3): 269
(杜岩, 郑孝婷, 谢谟文, 等. 岩爆结构面强度的弱化特征. 工程科学学报, 2018, 40(3): 269)
- [54] Siringoringo D M, Fujino Y. Experimental study of laser Doppler vibrometer and ambient vibration for vibration-based damage detection. *Eng Struct*, 2006, 28(13): 1803
- [55] Bonilla-Sierra V, Scholtès L, Donzé F V, et al. Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN-DEM modeling. *Acta Geotech*, 2015, 10(4): 497
- [56] Huang R Q, Chen G Q, Tang P. Precursor information of locking segment landslides based on transient characteristics. *Chin J Rock Mech Eng*, 2017, 36(3): 521
(黄润秋, 陈国庆, 唐鹏. 基于动态演化特征的锁固段型岩质滑坡前兆信息研究. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 521)
- [57] Li P. *Theoretical and Experimental Analysis of the Dynamic Properties of Offshore Platforms* [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2011
(李萍. 海洋平台结构动力特性参数识别的理论与实验研究[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011)
- [58] Du Y. *Study on the Model of Rock Block Stability Evaluation based on Natural Vibration Frequency* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016
(杜岩. 基于固有振动频率的危岩块体稳定评价模型研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2016)