

基于固有振动频率的滑坡安全评价新方法

杜岩¹⁾, 谢谟文^{1)✉}, 蒋宇静²⁾, 李博³⁾, 刘秋强⁴⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 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
3) 长崎大学工学部, 长崎 852-8521, 日本 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 运用模型实验, 在保持下滑力不变的情况下, 通过固有振动频率对滑坡内部的黏结力、摩擦力等抗滑力指标进行分析。通过在弱稳定阶段中实际静摩擦力是否达到最大静摩擦力的方法, 科学地判识滑体的稳定情况。结果表明: 计算的摩擦力可以有效分析滑坡在弱稳定阶段期间的安全性, 并证明固有振动频率监测比位移监测更加敏感。同时, 固有振动频率的监测可对滑坡损伤做出定量判断, 并可以评估滑坡静摩擦力指标, 从而实现扰动后滑坡的安全评价。

关键词 固有振动频率; 安全评价; 滑坡; 损伤

分类号 P642.22

A new method for landslide safety assessments based on natural vibration frequency

DU Yan¹⁾, XIE Mo-wen^{1)✉}, JIANG Yu-jing²⁾, LI Bo³⁾, LIU Qiu-qiang⁴⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
3) Faculty of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan
4) China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China
✉ Corresponding author, E-mail: mowenxie@ustb.edu.cn

ABSTRACT Using model experiment, in the condition that the sliding force unchanged, the internal cohesive force and friction force of the slope were analyzed by the natural vibration frequency. The stabilization of landslides was decided by comparing the friction force with the maximum static friction force in the weak stable phase. Experimental results show that the friction force can effectively analyze the safety of landslides in the weak stable phase and that the natural vibration frequency is more sensitive than the displacement. By monitoring the natural vibration frequency, a quantitative assessment about the damage of landslides can be made, which provide the static friction force index, and the safety assessment of landslides after disturbances is achieved.

KEY WORDS natural vibration frequency; safety assessments; landslide; damage

滑坡因经历地震、强降雨等扰动, 本身抗滑力不断下降, 使得原有的安全评价与实际产生较大偏差。然而新的评价不仅需要人力物力的投入, 同时从现场勘查、数据分析, 再到初步结论, 往往耗时较长, 不利于灾害防治和应急决策。因此, 如何运用常规测量手段来快速分析扰动后的滑坡安全稳定性, 是工程亟待解决

的问题之一^[1]。目前常用的传统方法是以应力应变监测为主, 辅助以环境量监测, 对滑坡等安全预警提供指示作用。这种基于监测数据的方法, 可判定当下实际结构的应力应变扩展现状并分析其变化趋势, 是目前应用最广的安全预警手段。虽然其有许多理论解析所无可取代的优势, 但不可否认的是, 由于在实际监测

中缺少扰动后或是工程加固后的结构内部抗滑指标的分析,使得实际监测的应力应变不能科学实施预警预报,而只能被动采集表层化的信息来进行相对静态的预警监测,从而导致“测者不灾,灾者不测”的情况时有发生。

如何实现预警的科学性与时效性的有机统一,实施动态预警预报,则需要一种指标来反应滑坡的结构参数变化情况。通过与传统应力应变数据和环境量数据的有机结合,可在提高预警效果的同时,实现基于现场指标分析的结构安全初步评价。近年来,基于固有振动频率等动力特征参数的损伤识别理论得到了较快发展,随着光学测振技术精度和测量距离等性能的提升,基于固有振动频率的滑坡监测无论在理论上还是技术应用上都已具备了客观条件。殷跃平等^[2]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,得出动力响应结果受控于斜坡形态、岩体(地质)结构等因素。Burjánek 等^[3]利用环境振动来分析滑坡的动力响应,用固有振动频率分析得出不稳定滑坡区域。Gao 等^[4]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,这为滑坡快速识别提供了新的技术思路。随着测振技术的优化和计算机技术的发展,国外已把基于固有振动频率参数的结构损伤检测作为一种新的研究方向,并受到了广泛的关注^[5]。本文的技术思路是,以频率监测为主要手段,辅助以应变监测来进行对比分析,实现基于频率监测的滑坡安全快速识别新方法,并提出一种新的以监测数据为基础的现场安全评价方案。

1 原理

滑坡可以被认为由刚度、质量、阻尼等物理参数组成的力学系统。当结构发生损伤时,会引起系统物理特性的变化,从而导致动力特征参数的变化。因此,在工程监测和滑坡快速安全识别中,引入固有振动频率监测指标,不仅具有扎实的理论基础,同时也具有很强的现实意义和指导意义。

1.1 固有频率监测参数的引入

结构的固有频率作为广义刚度和广义质量的瑞利商,反映的是结构整体动态特性。由于结构的固有频率易于测量,且测试精度高,稳定性容易保证,使得基于频率的敏感参数在结构健康监测和损伤识别中应用广泛^[6]。忽略阻尼系数,固有振动频率如下式^[7]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1)$$

式中 f 为固有振动频率, Hz; K 为等效刚度系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; M 为质量, kg。

当质量不变的情况下,滑坡整体的刚度系数与频率的平方成正比:

$$K = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot M \quad (2)$$

滑坡的等效刚度应力,即抗滑力中的黏结力指标如下所示:

$$F = Kx = 4\pi^2 f^2 \cdot M \cdot x \quad (3)$$

式中 F 为刚度应力, N; x 为该刚度系数相对于中性点的位移值, m。

1.2 抗滑力指标分析

国外研究表明,滑坡的失稳发生脆性破坏的同时,也伴随着强度的实时退化^[8],即在地震或雨水侵蚀等扰动作用下,导致岩体潜在在滑移面强度逐渐降低,最终导致破坏。抗滑力主要由黏结力和摩擦力两部分组成,按照抗滑力指标组成,可将滑坡破坏全过程分为三个阶段:强稳定阶段、弱稳定阶段和破坏阶段。

阶段 1: 强稳定阶段。该阶段滑体与基座有效黏结,滑体抗滑力完全由黏结力提供。由式(3),该阶段内的抗滑力可由如下式所示:

$$F_R = K_1 x_1 \quad (4)$$

式中 K_1 为该阶段黏结力效刚度系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; x_1 为阶段 1 相对于中性点的位移, m。

阶段 2: 弱稳定阶段。随着黏结强度的降低,当黏结层不足以抵抗下滑力时,开始进入弱稳定阶段。该阶段内仍然稳定是由于抗滑力中有摩擦力的作用,因此定义为弱稳定阶段。大部分滑坡都处在这个阶段,因此也使得摩擦力成为滑坡稳定分析中不可或缺的因素,并在抗滑力中占据了相当大的比重。相比较强稳定阶段,该阶段有两个特点:一是在刚度上有较大下降,二是位移会出现较为缓慢的变化。该阶段抗滑力由黏结力和静摩擦力组成,抗滑力为

$$F_R = K_2 x_2 + \mu M g \cos \theta \quad (5)$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_2 \quad (6)$$

式中 μ 为静摩擦系数; K_2 为该阶段黏结力效刚度系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; x_2 为阶段 2 相对于中性点的位移, m; Δx_2 为 x_2 相对于 x_1 的位移, m,即在两个时刻之间的所测得的位移变化量。

阶段 3: 破坏阶段。当滑坡再进一步受到扰动,达到最大静摩擦力,滑块产生滑动,摩擦力不足以弥补黏结力的进一步损失,滑体出现较大位移,开始破坏。该阶段位移出现急剧的上升,同时刚度也伴随着出现下降。抗滑力及位移公式如下所示:

$$F_R = K_3 x_3 + \mu_0 M g \cos \theta \quad (7)$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x_3 \quad (8)$$

式中 μ_0 为动摩擦系数; K_3 为该阶段黏结力效刚度系数, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; x_3 为阶段 3 相对于中性点的位移, m; Δx_3 为 x_3 相对于 x_1 的位移, m。

根据式(2),三个阶段的等效刚度系数,可分别由

固有振动频率求得:

$$K_1 = 4\pi^2 \cdot M \cdot f_1^2, \quad (9)$$

$$K_2 = 4\pi^2 \cdot M \cdot f_2^2, \quad (10)$$

$$K_3 = 4\pi^2 \cdot M \cdot f_3^2. \quad (11)$$

式中 f_1 、 f_2 和 f_3 分别为三个阶段所测得的固有振动频率, Hz.

1.3 实验模型

简化滑坡模型如图 1 所示, 滑体与基座之间为潜在滑移面, 并随着时间推移黏结力逐渐减弱. 该模型下滑力始终保持不变:

$$F_s = Mg \sin \theta, \quad (12)$$

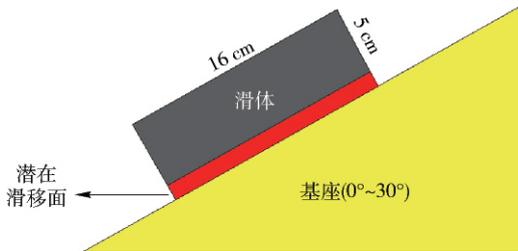


图 1 滑坡模型

Fig. 1 Landslide model

根据力学平衡原理:

$$F_s = F_R. \quad (13)$$

根据式(4)、式(12)和式(13)可推知阶段 1 的中性点位移 x_1 ; 根据式(5)、式(12)和式(13)可推知阶段 2 中的静摩擦力 (F_Q); 根据(7)、式(12)和式(13), 可推知破坏时刻滑块的动摩擦力 (F_M) 大小. 三个参量如下所示:

$$x_1 = \frac{Mg \sin \theta}{K_1}, \quad (14)$$

$$F_Q = \mu Mg \cos \theta = Mg \sin \theta - K_2 x_2, \quad (15)$$

$$F_M = \mu_0 Mg \cos \theta = Mg \sin \theta - K_3 x_3. \quad (16)$$

1.4 实验设备

多普勒激光测振仪 (laser doppler vibrometer, LDV) 的激光为氦-氖激光束, 波长为 632.8 nm, 高频带宽高达 20 MHz. 基于多普勒效应, 测得物体的瞬时速度和位移. 图 2 为 U 型激光测振仪. 图 3 为多普勒激光测振仪监测的数据指标, 分别为初始振动速率、仪器振动速率和修正后的振动速率. 同时还可以根据用户需要, 测得目标体的位移、加速度等监测指标. 与传统的振动传感器相比, 无论在远程监测, 还是在测试精度和高空间分辨率等性能上具有明显优势.



图 2 激光测振仪

Fig. 2 Laser doppler vibrometer (LDV)

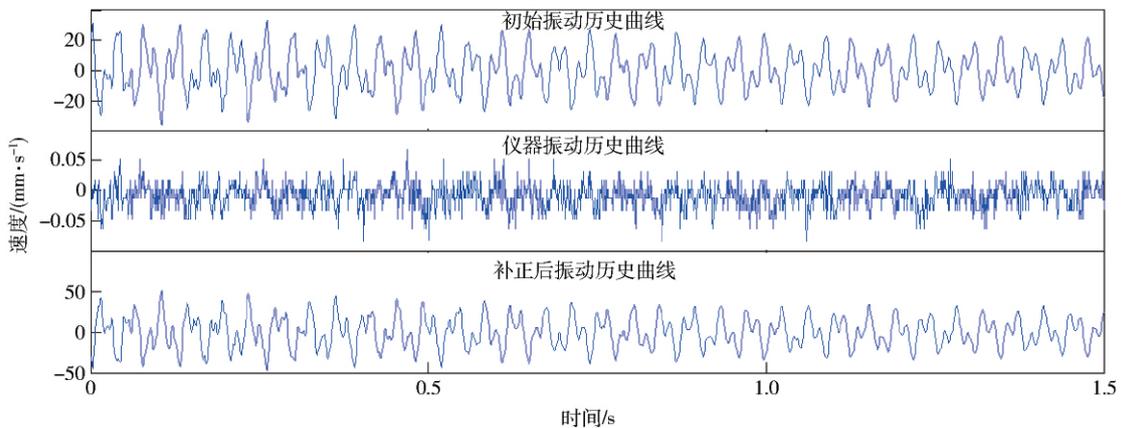


图 3 激光测振仪监测振动数据

Fig. 3 Display of vibration data measured by LDV

2 实验过程与结果

滑体自计时算起, 经历 1030 s 后破坏下滑. 设备

分别记录了滑体固有振动频率和滑块累计位移, 有效模拟滑坡在收到扰动后滑移面力学参数变化后发生破坏的动力参数变化规律, 尤其是在自重作用下

发生破坏的全过程. 图 4 为部分时间段内的滑块振动历史曲线和傅里叶变换变换后的振动速度谱. 在

对测量数据进行去噪后即可求得该时段的固有振动频率^[7].

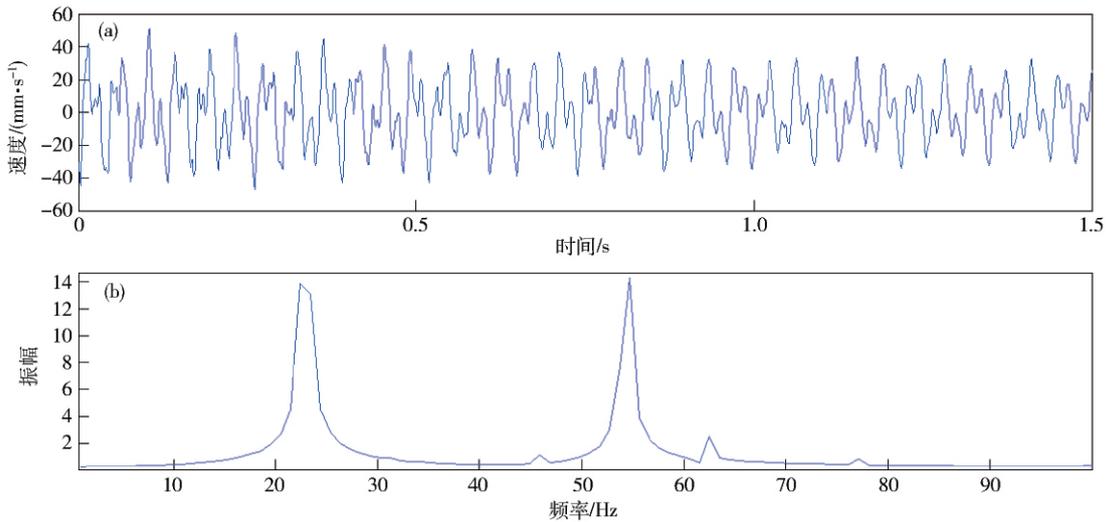


图 4 振动历史曲线(a) 与其振动速度谱(b)

Fig. 4 Vibration history (a) and its velocity spectrum (b) of the vibration

实验结果如表 1 所示. 由频率与位移历时曲线 (图 5) 可知: 滑块在 600 s 时由强稳定阶段进入弱稳定阶段, 静摩擦力开始发挥作用, 弥补了黏结力的损失, 虽然有较小位移, 依然处于稳定状态. 到达 970 s 时, 静摩擦力不足以弥补黏结力的进一步损失, 滑块开始滑动, 位移出现拐点, 随后发生破坏. 如图所示, 频率在 600 s 时发生明显下降, 其预警指示时段明显优于位移指标(该预警时段在 960 s).

表 1 实验测试结果

Table 1 Experimental results

测量时间/s	位移/ μm	频率/Hz
5	1.585	41.02
300	3.289	35.16
500	8.153	34.18
600	9.960	35.16
650	14.596	22.46
700	18.171	24.41
750	21.159	21.48
810	27.304	23.44
860	30.965	26.37
910	32.545	18.55
960	37.449	10.74
1010	302.049	5.80

已知滑坡坡度为 30° , 由图 5 可知, 600 s 滑坡进入阶段 2, 因此将此刻数值代入式 (14), 可计算相对中性点位移. 根据式 (15) 和式 (16) 可得阶段 2 的滑块摩擦力和破坏时刻的动摩擦力指标, 如表 2 所示. 由于

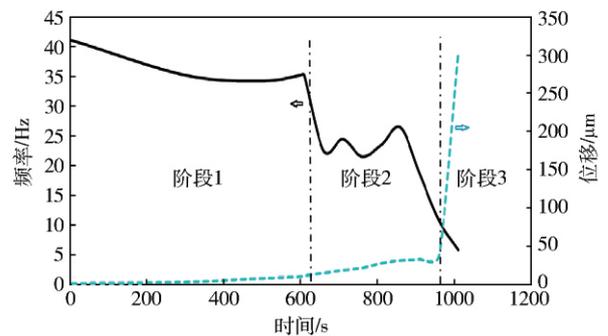


图 5 频率和位移历时曲线

Fig. 5 History curves of frequency and displacement

实测最大静摩擦力阈值区间为 $[0.5 \text{ N}, 0.65 \text{ N}]$, 故取 0.5 N 作为摩擦力预警线. 由计算摩擦力与位移曲线对比可知(图 6), 在弱稳定阶段, 基于固有振动频率的监测可以有效反应滑坡内部应力状况和安全储备, 相比较位移监测, 可提前预判工程危险程度和健康状况.

3 讨论

3.1 固有振动频率监测指标可行性分析

边坡稳定分析的方法很多, 不同边坡都有与之对应的力学模型和分析方法, 从早期的土质边坡的圆弧分析法, 到岩质边坡的 Sarma 法, 从连续介质力学方法到基于渗流等的耦合分析, 分析的精度和时效性都得到了大幅提高. 但是, 由于模型参数具有获取困难和随机性的特点, 其理论解多为寻找滑坡破坏各种作用因素的组合条件. 随着固有频率的引入, 在模型参数获取上的困难也会迎刃而解, 如式 (2), 频率指标可为模型参数的选取提供科学的数据支持, 并可实现模态

表 2 摩擦力计算结果
Table 2 Friction calculation results

测量时间/s	距离中性点位移/mm	黏结力/N	摩擦力/N	摩擦力占最大静摩擦力的比重/%	摩擦力在抗滑力中的比重/%
600	0.0986	0.73	0	0	0
650	0.1036	0.31	0.42	65.22	57.53
700	0.1072	0.38	0.35	54.35	47.95
750	0.1102	0.30	0.43	66.77	58.90
810	0.1163	0.38	0.35	54.35	47.95
860	0.1200	0.49	0.24	37.27	32.88
910	0.1215	0.25	0.48	74.53	65.75
960	0.1265	0.086	0.644	100.00	88.22
1010	0.3910	0.078	0.652	—	89.32

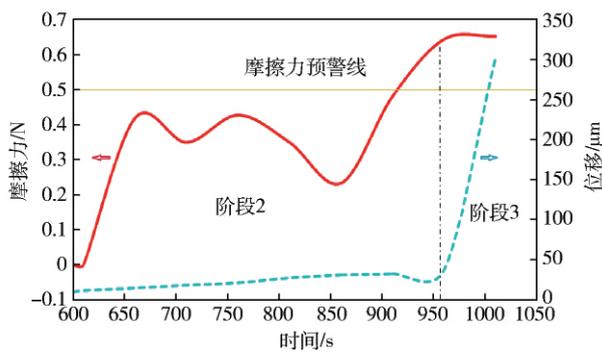


图 6 摩擦力和位移历史曲线

Fig. 6 History curves of frictional force and displacement

参数的动态设置和分析。

另外,判定现场结构变形域扩展形式和安全状况,目前多是依靠现场监测数据来进行。较为普遍的方法是通过位移或应力等监测数据来对实际工程进行预警。虽然监测手段可以直接反应滑坡的发生,但预警的时效性不够,也无法评判现阶段的安全储备情况。为了能够实现早期预警,人们将滑坡的诱发因素的测量加入日常监测中,如降雨量、地下水位等,通过这些因素的监测来进行早期预警,得到了很好的效果。然而,这些只是诱发因子,真正产生滑坡失稳的是这些诱发因子导致的滑坡抗滑力指标的下降和安全储备的丧失。因此,需要引入一个反应滑坡体内部健康状况的指标,即固有振动频率,是必然选择。

国际上运用多普勒激光测振仪等设备,已达到远程测定滑坡等不良地质体固有振动频率的要求^[9]。最新的实验数据表明,固有振动频率可以有效应用于滑坡监测和安全性识别。自振频率作为一种整体评价滑坡安全性的综合指标,可以有效反应该滑坡体的自身属性变化^[10],并且在技术上已经成熟。另外,引入振动频率观测量,可以快速有效计算在地震及强降雨等作用后,复杂滑坡体内部结构抗滑应力指标,进而为工程预警提供直观的数据支持。综上所述,固有频率

的引入,不仅可以为现场工程监测早期预警提供科学理论依据,而且可以为模型参数的选取和滑坡的快速安全评价提供强有力的数据支持。

3.2 基于频率的静摩擦力计算

实际滑坡抗滑力中,摩擦力是不可或缺的因素,也是分析较为复杂的指标之一。许多滑坡在扰动后从强稳定阶段到弱稳定阶段,由于静摩擦力承担了相当一部分抗滑成分,使得滑坡依旧处于稳定阶段。本实验中,在弱稳定阶段,摩擦力最大占据了整个抗滑力的 88.22%。因此,在滑坡处于弱稳定阶段时,需要对滑坡的摩擦力进行有效甄别。在多次实验中,静摩擦力达到 0.5 N 到 0.65 N 这一阈值区间时发生破坏(本次试验为 0.64 N),因此将 0.5 N 作为预警线,即静摩擦力达到这个值时就预示着滑坡已快达到破坏极限。这种针对静摩擦力的评估方法,可为现场滑坡安全评价提供一种新的技术思路。

摩擦力作为一种安全储备,是弱稳定阶段中抗滑力的的重要组成部分,实际工程中大部分滑坡都处在这个阶段。如果没有摩擦力的作用,这些滑坡应该在强稳定阶段的末期就会发生破坏。弱稳定阶段力学分析相对复杂,一方面因为滑坡的静摩擦力作为一种安全储备,不断发生变化(图 6),难以监测;另一方面,最大静摩擦力也是随环境的变化不断变化的,很难准确评估。本实验基于下滑力不变的前提下,将摩擦力与黏结力进行有效剥离,并与测得最大静摩擦力阈值区间的最小值进行比较,判识在弱稳定阶段时期滑坡的安全情况。根据实验,滑坡体的最大静摩擦力大于动摩擦力,因此滑坡体一旦达到最大静摩擦力,会迅速发生破坏。这也是部分岩质滑坡在小变形位移下发生破坏的原因之一。

3.3 应用可行性分析

基于固有振动频率的滑坡安全性分析,可有效对滑坡安全性进行判识,并且具有很强的预判性。然而实际中,还有其他因素的干扰。

(1) 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一定的噪音和误差, 如何去掉这些误差是能否真正实现现场应用的关键.

(2) 滑坡是一个不平衡、不稳定且充满复杂性的系统, 而实验是基于下滑力不变的情况下进行分析. 实际中, 滑坡的下滑力不可能是一成不变. 地质的抬升、孔隙水压力的增大, 都会导致下滑力的增加, 从而造成滑坡破坏. 同时, 最大静摩擦力指标也会随着周围环境变化和地质变化而不断发生变动. 因此, 基于固有振动频率的监测并非取代传统监测, 相反还需进一步与孔隙水压力计、地下水水位计等环境监测手段相结合, 从而科学评估下滑力的变化指标, 才能建成更加完善的安全评价体系.

(3) 计算中选用的固有振动频率被认定是与整体黏结力指标呈确定性变化, 这种简单的处理方法, 可以在具体的工程应用中起到一定作用, 滑坡在经历地震或强降雨等扰动后, 原有强度参数大大折减, 而需重新进行原位实验, 而这些方法往往耗时且耗资昂贵, 因此间接的评估方法更容易应用于工程实践^[11]. 不可否认的是, 固有振动频率的引入使得人们在滑坡安全识别上与客观实体又靠拢了一步, 下一步工作是将该实验方法应用在小型岩质滑坡, 并基于频率指标对滑坡三维模型的黏聚力等强度指标进行动态折减, 进行现场应用可行性研究.

4 结论

(1) 根据抗滑力的组成成分不同, 将滑坡破坏分为三个阶段: 强稳定阶段、弱稳定阶段和破坏阶段. 通过与应变监测对比分析, 频率监测在预警的科学性和时效性方面具有无可比拟的优越性. 随着动力特性分析技术的完善和硬件设备及其配套软件设备的发展, 固有振动频率监测可以在土木工程监测、防灾减灾领域发挥重大作用.

(2) 固有振动频率指标不仅可以反映滑坡体在扰动后的黏结力损失, 同时配合以位移指标可以有效分析弱稳定阶段内的摩擦力、静摩擦系数等指标. 通过与最大静摩擦力的比较, 可有效分析弱稳定阶段滑坡内部物理力学参数变化和稳定状况, 并且固有频率指标可为滑坡快速安全评价提供客观的数据支持.

(3) 滑坡在弱稳定阶段, 摩擦力有效弥补了黏结力下降带来的抗滑力损失. 通过简单实验模型, 运用

频率和位移数据, 有效推出了该阶段内摩擦力指标, 为工程安全监测提供一种新的技术思路. 滑坡安全监测需要对滑坡系统信息进行快速有效的组织和集成, 固有振动频率的引入无疑拓宽了该系统信息的内涵, 并且必将在未来滑坡安全评价体系中发挥重大作用.

参 考 文 献

- [1] Chen S K, Yang T H, Zhang H X. The slope stability under underground mining of Anjialing open-pit mine in Pingshuo. *J China Coal Soc*, 2008, 33(2): 148
(陈仕阔, 杨天鸿, 张华兴. 平朔安家岭露天矿地下采动条件下的边坡稳定性. *煤炭学报*, 2008, 33(2): 148)
- [2] 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)
- [3] Burjánek J, Moore J R, Molina Y, et al. Instrumental evidence of normal mode rock slope vibration. *Geophys J Int*, 2012, 188(2): 559
- [4] Gao Y, Jiang Y J, Li B. Estimation of effect of voids on frequency response of mountain tunnel lining based on microtremor method. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2014, 42: 184
- [5] Jiang Y J, Gao Y, Li B. Research on health assessment technique of tunnel lining based on power spectrum density characteristics of microtremors. *J Jpn Soc Civ Eng*, 2012, 68(3): 111
- [6] Salawu O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Eng Struct*, 1997, 19(9): 718
- [7] 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
- [8] 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): 217
- [9] Ma G C, Kazuhide S, Hideki S, et al. Study on evaluating rock block stability by using a remotely positioned laser. *Int J GEO-MATE*, 2012, 2(1): 247
- [10] Jin A B, Sun J H, Gao Y T. Numerical modeling on the dominant frequency and its influence factors of slope dynamic response. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(3): 383
(金爱兵, 孙金海, 高永涛. 边坡动力响应主导频率及其影响因素的模拟分析. *北京科技大学学报*, 2011, 33(3): 383)
- [11] Fener M, Kahraman S, Bilgil A, et al. A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks. *Rock Mech Rock Eng*, 2005, 38(4): 329