

DOI: 10.11779/CJGE201507022

基于模态参量变化的边坡动态稳定分析新方法

杜 岩^{1,2}, 谢谟文^{*1}, 吕夫侠¹, 王增福³, 王桂杰⁴, 刘秋强⁴

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 长崎大学工学部, 长崎 852-8521; 3. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘 要: 边坡稳定问题一直是岩土工程领域研究的重要课题, 但对于基于模态参量变化的动态稳定分析研究不多。因此, 研究将坡体重点区域的黏聚力作为动态参量, 实现边坡体动态稳定分析评价。基于 GIS 三维滑坡分析模块, 结合实时固有振动频率对黏聚力参量进行调整, 实现坡体更加客观的强度折减。固有振动频率与滑坡黏聚力关系的构建, 可以有效解决数值分析中参数选取和调节的困难。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, 避开了极限平衡法主观缺点, 模拟结果更加符合客观实际。同时, 分析结果更加客观、合理, 在充分考虑边坡的空间特性的同时, 也能客观评价强度折减情况, 为边坡稳定性分析提供一个客观有效的新方法。

关键词: 边坡稳定; 动态分析; 固有振动频率; 安全系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)07-1334-06

作者简介: 杜 岩(1985-), 男, 河南新乡人, 博士, 主要从事岩土工程和土木工程防灾减灾方面研究。E-mail: mowenxie@126.com。

New method for dynamic analysis of rock slope stability based on modal parameters

DU Yan^{1,2}, XIE Mo-wen¹, LÜ Fu-xia¹, WANG Zeng-fu³, WANG Gui-jie⁴, LIU Qiu-qiang⁴

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan; 3. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 4. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The slope stability analysis is a focal problem in the geotechnical engineering field. However, few dynamic stability analyses are made based on the ever-changing modal parameters. Therefore, the cohesion in key regions is taken as the dynamic parameter so as to realize the dynamic stability analysis of the slope. By using GIS (geographic information systems) 3D slope stability analysis models, the cohesion can be adjusted by real-time data of natural vibration frequencies in order to make the strength reduction method more real and effective. The establishment of the inherent relationship between the vibration frequency and the cohesion of landslide can effectively solve the difficulty of selection and adjustment of the parameter in numerical analysis. The experimental results show that the dynamic stability analysis based on the variation of modal parameters makes full use of the objective advantages of strength reduction and avoids the subjective disadvantages of the limit equilibrium method. Thus, the simulated results are more close to the actual conditions. Furthermore, this new method can take into full account the slope space features and allow an objective evaluation of the strength retrogression, so it is reliable for slope stability analysis.

Key words: slope stability; dynamic analysis; natural vibration frequency; safety factor

0 引 言

边坡稳定性问题作为土力学三大经典问题之一, 其稳定分析的方法一直是科学研究者和工程实践者研究的重要领域。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^[1]。但由于模型参数具有获

取困难, 静态且偏于保守的特点, 其理论解在计算滑坡安全性方面过于保守, 经常出现边坡安全系数小于 1, 实际却是稳定的现象^[2]。边坡实际是一个充满复杂性的系统, 以某一局部或某一时间段内测量的相对静

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372370); 北京科技大学“创新人才”培养项目(USTB201309FX)

收稿日期: 2014-10-07

*通讯作者

态的模型参数来反应整体或全周期下滑坡的相对动态的模态参量, 必然会有其局限性和不完善性。国外研究表明, 滑坡的失稳往往是脆性拉伸破坏的同时, 也伴随着强度的实时退化^[3]。因此, 对边坡强度的实时折减, 是数值分析应用实践的瓶颈所在。国内许多学者也因此做了大量研究: 赵尚毅等^[4]利用有限元, 通过强度折减来分析滑坡安全系数, 得到了坡体的实际滑动面; 杨光华等^[5]在边坡弹性阶段对强度参数等指标也进行动态折减, 并用位移数据进行验证, 取得了良好的拟合效果; 之后, 钟志辉等^[6]采用局部强度折减法, 对边坡的关键区域进行强度折减, 得到了接近实际的直剪强度。

因此, 无论从理论研究还是从生产实践方面, 对边坡稳定性模态参量的动态调整是必要的, 越来越多的边坡工程提出建立基于实际工程指标的动态稳定分析的要求。本研究基于强度折减法原理, 引入激光测振技术, 将滑坡关键区域的黏聚力参数调整作为研究对象, 运用固有振动频率指标对模态参量进行修正^[7], 同时结合三维分析模型, 分析基于监测数据指标的动态参数解析解的可靠性与实用性, 从而为边坡稳定分析方法提供新的思路。

1 原理

1.1 滑坡稳定分析方法

试验所采用滑坡稳定分析方法是基于 GIS 系统的三维分析模型^[8], 该系统将 Hovland 三维模型, 扩展 Janbu 三维模型, 扩展 Bishop 三维模型和修正的 Hovland 三维模型同时集成到 3Dslope 中对边坡安全系数进行计算, 具体流程如图 1 所示。

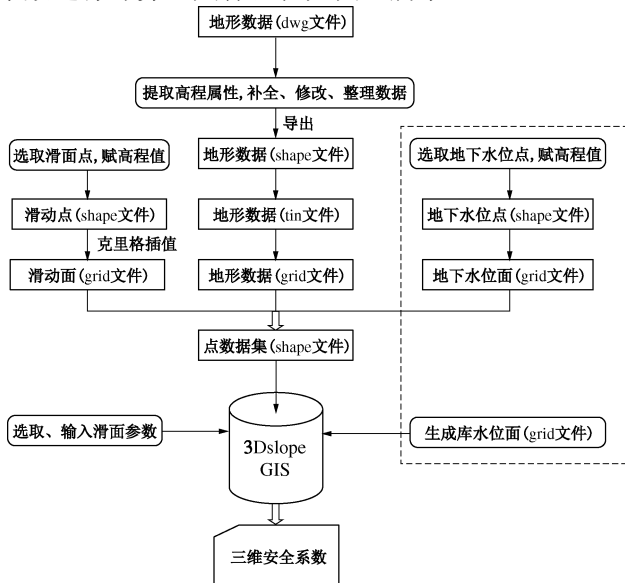


图 1 边坡三维安全系数计算流程图

Fig. 1 Flow chart of calculating three-dimensional safety factor of slopes

1.2 试验仪器

试验仪器为日本铁道综合技术研究所研发的 UD100激光多普勒测振仪。设备激光源为氦-氖激光束, 基于多普勒效应, 可测得目标表面的瞬时速度和位移。图2为U型多普勒激光测振仪。与传统的振动传感器相比, 无论在测试精度, 还是在测距等性能上具有明显优势。



图 2 激光测振仪

Fig. 2 Laser Doppler vibrometer (LDV)

1.3 固有振动频率与黏聚力的关系

基于简化模型^[9], 振动方程及其频率方程如下:

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

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

式中, f 为固有振动频率 (Hz), M 为试块重量 (N), L 为型心到原点 O 的距离 (mm), μ 为黏结系数 (N/mm²), S 为黏结宽度 (mm), l 为黏结长度 (mm), θ 为转角 (°)。

在其他条件不变的情况下, 黏聚力 c 与固有振动频率的平方成正比。在确定初始黏聚力和初始振动频率后, 可得动态黏聚力指标:

$$c = \frac{c_0}{f_0^2} \cdot f^2 \quad (3)$$

式中, c_0 为初始测得黏聚力 (kPa), f_0 为初始黏聚力对应的固有振动频率 (Hz)。

坡体从局部破坏到整体滑坡是一个渐进的失稳变形过程, 针对传统强度折减法用于边坡分析时, 通常仅是折减强度参数^[5], 而强度折减在对黏聚力折减敏感度要优于内摩擦角^[10], 因此引入实测固有振动频率

来对潜在滑移面的黏聚力指标进行动态修正,从而快速得出滑坡等危险地质体的安全参数。

2 模型试验与结果

简化滑坡模型如图3所示,滑体与基座之间为潜在滑移面,该滑移面的黏聚力随着时间推移逐渐减弱。通过激光测振仪定向监测滑体的固有振动频率可定向反应滑坡潜在滑移面的黏聚力变化。滑体自计时起,245 s后发生破坏,设备分别记录了40,100,200,220 s时的振动情况。图4为激光测振仪测得的振动速度曲线以及经过傅里叶变换后的振动速度谱。

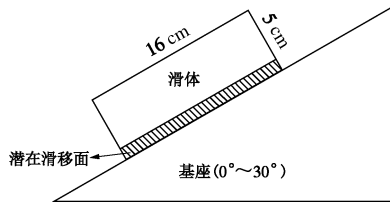


图3 滑坡模型

Fig. 3 Landslide model

已知潜在滑移面初始黏聚力为27.8 kPa,对应40 s时的固有振动频率,通过式(3),基于测得的固有振动频率可知在100,200,220 s时的黏聚力并求得安全系数。试验结果如表1所示。

当时间到达220 s时,安全系数已经趋于1,随后发生破坏下滑,模拟与实际结果相符。因此,基于固

有振动频率可以为黏聚力等模态参数的调整提供客观数据支持。

表1 试验结果

Table 1 Experimental results

| 测量时间/s | 频率/Hz | 黏聚力/kPa | 安全系数 |
|--------|-------|---------|-------|
| 40 | 12.67 | 27.8 | 1.776 |
| 100 | 11.33 | 22.2 | 1.348 |
| 200 | 10.00 | 17.3 | 1.146 |
| 220 | 7.30 | 9.2 | 1.004 |

3 应用研究

研究区域位于日本长崎县西北向南东倾斜的小型斜坡上,该斜坡坡度自上而下为35°~15°,接近坡脚地带又变陡。边坡发育在侏罗系碎屑岩中,岩性为中一厚层粉砂岩夹粉沙质泥岩、页岩,倾向与斜坡坡向基本一致,构成顺向坡。6月21日~7月1日,地区总降雨量为162.7 mm。设备于雨季前后分别监测边坡的振动状况。

图5为激光测振仪分别在3月16日和7月16日监测的边坡表面振动情况。左侧分别为两次时间段测得的振动速度历时曲线,右侧为经过变换后的振动速度谱。如图可知,3月16日边坡固有振动频率为10.74 Hz,而经过暴雨之后,7月16日的固有振动频率降低为8.789 Hz。

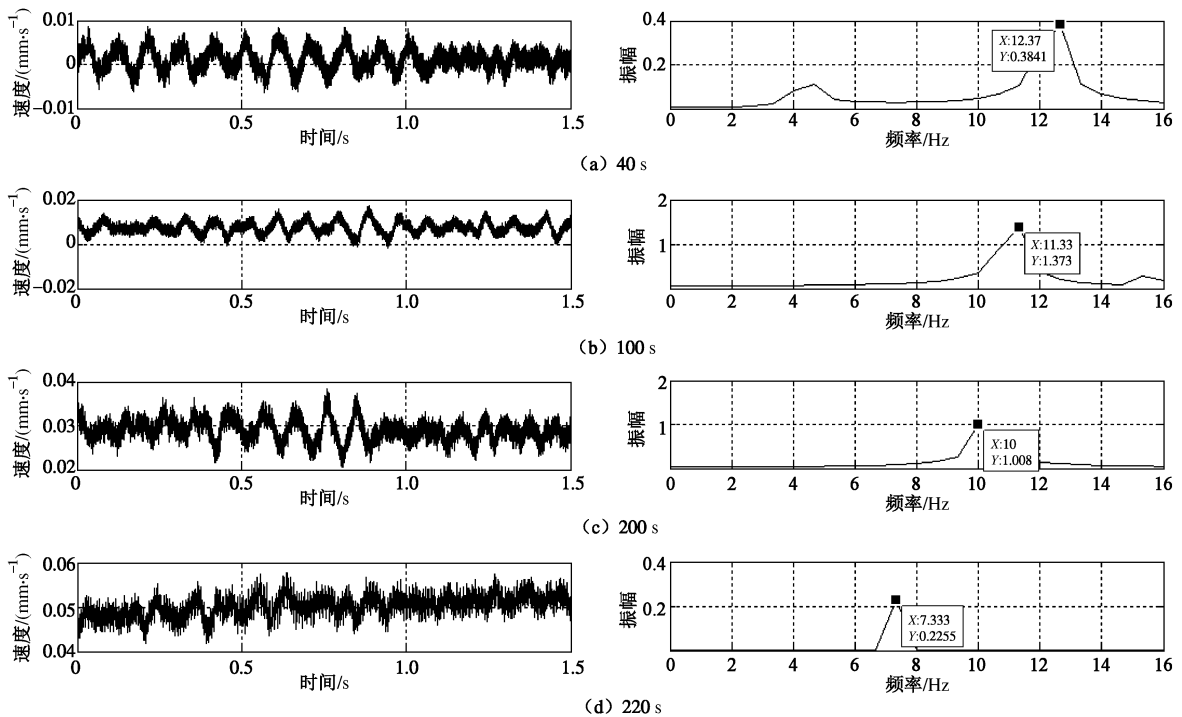


图4 振动历史曲线和其振动速度谱

Fig. 4 Curves of vibration history and its velocity spectra

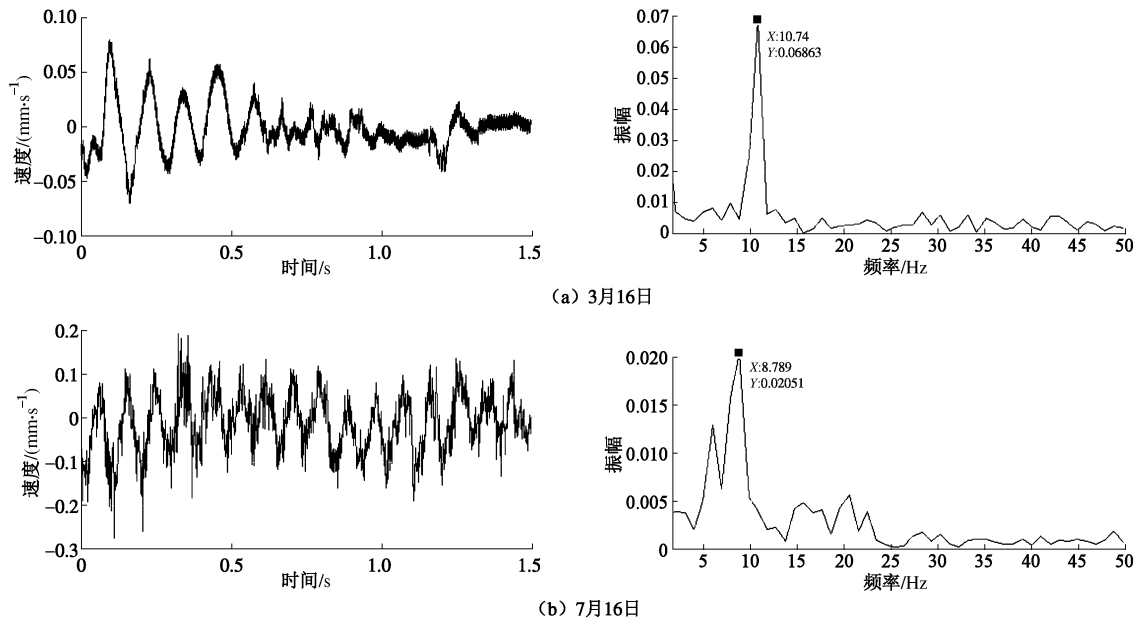


图 5 边坡振动历史曲线和其振动速度谱

Fig. 5 Curves of slope vibration history and its velocity spectra

计算所需参数见表 2 所示。由于大雨对潜在滑移面中影响最大，因此只对不易测得的潜在滑移面的黏聚力进行折减。

表 2 稳定性计算参数表

Table 2 Parameters for stability calculation

| 模型 | 3 月 16 日 | | | 7 月 16 日 | | |
|-------|-----------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------|--------------|
| | 重度 (kN·m ⁻³) | 黏聚力 /kPa | 摩擦角 φ/(°) | 重度 (kN·m ⁻³) | 黏聚力 /kPa | 摩擦角 φ/(°) |
| 潜在滑体 | 24.2 | 23.2 | 25.1 | 25.8 | 23.2 | 22.3 |
| 潜在滑移面 | 19.7 | 17.2 | 16.8 | 21.2 | 11.5 | 16.8 |
| 滑床 | 25.8 | 4500 | 42.5 | 26 | 4500 | 42.5 |

3.1 三维安全系数计算

在现场测得的固有振动频率有效修正潜在滑移面上的黏聚力之后，根据基于 GIS 系统的三维分析模型和修正后的黏聚力分别用 4 种模型计算其安全系数。如表 3 所示。

表 3 三维安全系数统计表

Table 3 Statistical values of 3D safety factors

| 时间 | Hovland 三维模型 | Bishop 三维模型 | Janbu 三维模型 | Hovland 三维模型 |
|----------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|
| 3 月 16 日 | 1.259 | 1.292 | 1.278 | 1.273 |
| 7 月 16 日 | 1.052 | 1.077 | 1.069 | 1.06 |

3.2 传统安全系数比较

同时运用传统安全系数分析方法：瑞典条分法、Bishop 和 Morgenstern-Price 法，分别在 SLOPE/W 中构建二维计算模型，来对边坡稳定性进行对比分析。

表 4 为基于极限平衡法的二维计算结果，由表可

知，二维分析结果在 7 月 16 日的安全参数皆小于 1，偏向于危险。

表 4 二维安全系数统计表

Table 4 Statistical values of 2D safety factors

| 时间 | 瑞典条分法 | 简化 Bishop 法 | Morgenstern-Price |
|----------|-------|-------------|-------------------|
| 3 月 16 日 | 1.095 | 1.173 | 1.107 |
| 7 月 16 日 | 0.915 | 0.937 | 0.922 |

而现场位移测量结果显示：边坡在降雨末期，部分监测点位移数据有所抬升，分别升高 3~5 mm 不等，然而其他监测设备均未出现异常变化。故现场认定该滑坡依然处于偏稳定状态。

对比表 3, 4 可知，传统二维分析所得的安全系数较为保守，而基于模态参数调整的三维安全分析则更加贴近实际。

4 讨 论

4.1 安全系数误差分析

本研究三维分析是在基于 GIS 的极限平衡软件 3DSlope 软件中进行，而传统二维分析是在 SLOPE/W 中进行，通过比较分析，三维分析更加贴近现场实际监测结果。这主要是因为现实边坡稳定性问题实际是一个复杂三维稳定性问题^[11]，而新的技术参数或是关键信息的获取，有助于人们对滑坡这个复杂系统更为准确的认识和判断。

本研究基于 GIS 的三维稳定性分析能较全面地考虑边坡的空间关联性和信息的复杂性，如地形、地层、地下水、岩体结构等耦合条件，因此更接近现实。在对边坡地形、地层以及地下水等条件相对勘察较为明

朗时, 三维分析无论在收敛性还是在准确性方面, 往往会优于传统二维分析。

4.2 模态参数调整可行性分析

根据结构动力学理论, 动力特征参数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, 动力特征参数必然会在结构体发生微小损伤时, 发生与之对应的变化^[12-13]。基于振动的监测技术已可测得复杂结构损伤^[14-15], 这为滑坡安全监测与损伤评价提供了新的技术思路, 即可以通过固有振动频率等参数的监测来对滑坡的损伤做出定性或定量判断, 进而在数值模型中调整黏聚力等诸参数, 为边坡稳定性评价提供科学合理的数据支持。

由于模型参数具有获取困难和随机性的特点, 使得数值模拟多为寻找滑坡破坏各种作用因素的组合条件。而作为一种反应整体黏聚力监测指标, 固有振动频率的引入, 可以为模型参数的修正提供参考依据。根据试验和应用案例, 基于固有振动频率的监测提供了贴近现实的黏聚力参量。同时, 这种基于动力监测参数的模态参数的调整, 相对传统静态参数理论分析, 在滑坡损伤识别和现场安全分析方面具有无可比拟的优越性, 使滑坡数值模拟在安全分析评价上更具时效性, 适用性和科学性。

4.3 基于模态参量的动态数值分析

目前国外的动力特性监测正在为数值模拟提供损伤后的模态参数^[16], 并已实现了基于固有振动频率的危岩安全评价方法^[17]。最新的试验研究显示测得的固有振动频率等指标不仅可以定量分析岩石边坡的安全性, 同时还可以为数值模拟中的结构参数选取提供新的数据支持。

因此, 基于模态参量变化的动态数值分析, 必将会在边坡实时模拟跟进和现场快速安全评价方面发挥前所未有的作用。随着监测技术的不断更新和损伤识别理论的发展, 数值分析不仅会使模态参数在取值上更加客观, 而且可以实现动态和实时安全评价。同时, 日益完善的监测指标可能会为基于模态参量变化的动态数值分析提供新的技术支持并在稳定评价领域提供更加科学有效的数据支持和理论依据。国外经验证明, 不断更新的监测技术和日益完善的监测指标可为数值分析提供新的技术支持和应用空间, 并将进一步促进模态损伤识别技术在实时预警评价系统中的应用。

5 结 论

基于强度折减法原理和固有振动频率的监测, 对滑坡关键区域的黏聚力指标进行分析: 通过监测的固

有振动频率的变化来对数值分析指标进行动态调整。结论如下:

(1) 固有振动频率与滑坡黏聚力关系的构建, 可以有效解决数值分析中参数变化状况, 结论可知, 基于黏聚力动态参数的三维分析模型, 可为滑坡体在受到降雨等扰动后提供实时的安全系数指标。

(2) 随着监测技术的不断更新和监测指标的日益完善, 必将会为边坡安全评价方法提供新的思路——基于模态参量变化的动态数值分析。评价结果更加趋于实际, 也使得数值分析在边坡实时安全稳定评价方面发挥更大的作用。

(3) 滑坡体是个复杂的结构, 其模型参数具有获取困难和随机性的特点, 而固有振动频率的引入, 作为一种反应整体黏聚力监测指标, 可以为模型参数修正提供基于现场实际状况的数据依据, 使边坡安全分析评价更具时效性, 科学性和适用性。

(4) 随着监测技术的不断更新和损伤识别理论的发展, 基于模态参量变化的动态数值分析必将会成为一种新的发展趋势, 也必将会为现场安全评价和快速应急响应提供新的技术支持和评价手段。

致 谢: 本研究得到了长崎大学工学研究科的大力支持, 特致谢意; 感谢蒋宇静教授、李博助教和高阳博士给予本研究的支持和帮助; 同时感谢两位评审专家给予的宝贵意见。

参考文献:

- [1] 崔政权, 李 宁. 边坡工程: 理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (CUI Zheng-quan, LI Ning. Slope engineering: the latest development of theory and practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 巫德斌. 层状岩体边坡工程力学参数研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (WU De-bin. Study on mechanical parameter of bedded rock mass slope engineering[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [3] STEAD D, EBERHARDT E, COGGAN J S. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques[J]. Engineering Geology, 2006, 83(1): 217 - 235.
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis of safety factor of slope stability by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346. (in Chinese))

- [5] 杨光华, 张玉成, 张有祥. 变模量弹塑性强度折减法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1506 - 1512. (YANG Guang-hua, ZHANG Yu-cheng, ZHANG You-xiang. Variable modulus elastoplastic strength reduction method and its application to slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1506 - 1512. (in Chinese))
- [6] 钟志辉, 杨光华, 张玉成, 等. 基于局部强度折减法的土质边坡位移研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 196 - 201. (ZHONG Zhi-hui, YANG Guang-hua, ZHANG Yu-cheng, et al. Displacement of soil slopes based on local strength reduction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 196 - 201. (in Chinese))
- [7] MA G, SAWADA K, YASHIMA A, et al. Experimental study of the applicability of the remotely positioned laser doppler vibrometer to Rock-Block stability assessment[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(2): 787 - 802.
- [8] 谢谟文, 蔡美峰. 信息边坡工程学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (XIE Mo-wen, CAI Mei-feng. Theory and practice of informational slope engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 杜岩, 谢谟文, 蒋宇静, 等. 基于固有振动频率的监测预警指标确定方法[J]. 岩土力学 (待刊). (DU Yan, XIE Mo-wen, JIANG Yu-jing, et al. Methods of determining warning indicators based on predominant frequency monitor[J]. Rock and Soil Mechanics (in press). (in Chinese))
- [10] EBERHARDT E. Twenty-ninth Canadian Geotechnical Colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(4): 484 - 510.
- [11] FARRAR C R, DOEBLING S W. An overview of modal-based damage identification methods[C]// Proceedings of DAMAS conference. Los Alamos, 1997.
- [12] 冯树仁, 丰定祥. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 657 - 661. (FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 657 - 661. (in Chinese))
- [13] ZOU Z, LINK M. Identification of delamination in composite laminated plates using vibration test data[C]// Proceedings of International Conference on Structural Dynamics, Vibration, Noise and Control. Hong Kong, 1995.
- [14] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [15] JIANG Y, GAO Y, LI B. Research on health assessment technique of tunnel lining based on power spectrum density characteristics of microtremors[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2012, **68**(3): 111 - 118.
- [16] CUNHA Á, CAETANO E. Experimental modal analysis of civil engineering structures[J]. Sound and Vibration, 2006, **40**(6): 12 - 20.
- [17] UEHAN F, SAITO H, MA G. Fundamental study on the remote vibration measuring system for Evaluating Rock Slope Stability[C]// 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, 2012.