

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.005

# 边坡稳定性能的判定方法研究及其工程应用

赵博<sup>1,2</sup>, 赵亚琼<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学 建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006;  
3. 山西省水利建筑工程局有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:** 我国边坡工程数量众多, 具有地质条件复杂、岩土体离散性和复杂性等特点, 边坡稳定性是一个多因素相互作用、协调发展的复杂系统问题, 其中如何确定合适的边坡稳定性判据是一个具有重要意义和价值的研究工作。在研究了分析常见的边坡稳定性评价方法后, 基于监测资料从多个角度来挖掘边坡的变形破坏情况, 构建了以变形控制指标为主, 辅以其他监控指标的体系, 来探讨边坡稳定性的判据和变形控制阈值。最后将该研究成果应用于实际边坡工程中, 具有很好的效果, 为确保整个工程的安全提供了技术依据和科研支撑。

**关键词:** 边坡工程; 稳定性判据; 安全监控; 阈值

中图分类号: TV698

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0025-05

## Evaluation Methods of Slope Stability and its Engineering Application

ZHAO Bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Yaqiong<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;  
2. Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China;  
3. Shanxi Water Conservancy Construction Bureau, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract:** A number of large slope engineering exist in China which have complex geological conditions. So slope stability is a complex problem of multifactor interaction and coordinated development, among that appropriate criterion of slope stability is an important issue. In this paper the common stability evaluation methods were analyzed first, after which slope deformation and failure excavated from plurality angles, deformation control threshold and stability criterion of slope at different stages were proposed by settlement control indicators and supplement other monitoring indicators. Finally the results were applied in the practical slope engineering and good effects were acquired.

**Keywords:** slope engineering; stability criterion; safety monitoring; threshold

在工程实践中, 由于边坡的地质差异、岩体离散性和复杂性, 具有很大的不确定性, 各种边坡稳定性评价方法得到的结果表达方式也会有所不同。目前用于评价边坡稳定性的方法主要有定量分析法、定性分析法、物理模拟法、不确定性分析法和现场监测法等等<sup>[1-5]</sup>。由于边坡变形与破坏的问题十分复杂, 各种单一指标和判据的适用范围都非常有限, 很难用某一指标进行稳定性判别就获得好的效果, 因此应根据边坡的承受能力, 确定合适的阈值或阈值范围来判断其是否稳定、是否需要加固处理等等, 而这个阈值或阈值范围被称为稳定性判据。研究确定合适的判断指标或评价方法来分析边坡的稳定性,

是一个非常重要和关键的研究内容, 也是一项十分有意义的研究工作。

安全监测资料是所有因素综合作用的结果, 真实反映了监测对象的变化状况, 随着监测仪器和手段的多元化, 积累了大量丰富的监测数据, 可以充分、合理有效地反映边坡稳定性能的综合状态。为此, 本文在研究现有边坡稳定性分析方法的原理、特点、优缺点以及适用范围后, 采用多种方法来研究边坡的变形控制指标, 从应力、应变、位移、速率等多个角度分析边坡变形破坏的特点, 对观测数据进行深入定量分析, 找出安全监测数据与稳定性之间的映射关系, 挖掘出边坡在不同阶段变形的异常情况, 来

收稿日期: 2016-10-01

修稿日期: 2016-11-03

基金项目: 太原理工大学引进人才科研启动基金项目(tyut-rc201518a); 太原理工大学青年基金项目(2015QN026)

作者简介: 赵博(1986—), 男, 山西太原人, 博士, 讲师, 主要从事边坡的安全监控和健康诊断工作。E-mail: tongjdx.4dw.ok@163.com

探讨边坡稳定性的判据和变形控制阈值。提出以变形控制指标为主,辅以其他监控指标来建立起边坡失稳的判据。最后将其应用于实际边坡工程中,实例检验其效果。

## 1 边坡工程稳定性判据研究

边坡稳定性是一个多因素相互作用、协调发展的复杂系统问题,从变形至破坏是一个从渐变到突变的连续累积发展过程、从量变到质变的转换过程,在失稳前或临界状态下,其物理量会发生实质性变化,都会有征兆。

### 1.1 应力判据

在外力作用下,应力达到屈服极限或极限强度时,用来表征岩石破坏应力条件的函数称为破坏判据准则。常见的方法有强度破坏准则,摩尔库仑准则,最大正应变准则,结构面剪切破坏准则、格里菲斯强度理论、剪应变能强度理论等<sup>[6-8]</sup>。目前,这种应力判据主要是通过数值模拟边坡岩土体中的塑性变形,以不允许出现过大变形区来作为控制标准。由于数值模拟中有许多假设和简化,在物理力学参数、边界条件等选取上都可能与实际状况有差异,其结果必然会造成与边坡实际情况有所不同;且边坡岩土体是一种黏弹塑性体,一般能在承受较大的塑性变形后,历经较长的时间却不发生破坏,因此在工程实践中,会出现在数值模拟过程中存在很大的塑性区时,实际边坡却安然无恙的情况。因此,仅以数值模拟的结果作为分析的依据还不够充分。

### 1.2 位移判据

位移是反馈边坡变形过程的重要信息,不管边坡作用机理如何复杂,其经受内外各种因素综合作用后的结果以位移体现出,通过位移可以了解边坡的力学动态、随时间变化的规律以及空间分布等信息,因此最直观的反映了边坡的稳定状态,且比较容易获得。传统的分析方法是现场监测、室内模型试验等方法获得的边坡岩体变形数据,绘制其时序过程线,通过其变化趋势来对边坡的稳定状态做定性分析。目前多以定性分析为主,缺少定量的判断标准,需要构造更精确的定量分析法来进一步分析边坡的位移量及空间分布等特征,准确评判边坡稳定性的变化情况。

位移速率是目前研究成果最为丰富的一种方法,以位移速率角方法作为边坡变形发展阶段的辨识指标,绘制边坡变形时序曲线如图 1 所示。 $\theta = \arctan(\Delta s / \Delta t)$ ,当  $\theta$  接近  $90^\circ$  时作为边坡失稳破坏的判断准则。将边坡的变形破坏过程分为相应的几

个阶段,当边坡岩土体在变形启动阶段时,变形以减速发展且曲线斜率逐渐减小;在匀速蠕滑阶段时,变形大致以等速发展,蠕变曲线近似一条倾斜直线,此时速率大体不变;在快速发展阶段时,岩土体的变形从  $c$  点开始迅速增加,变形速率明显加快,但尚未破坏;当进入破坏趋势阶段时,变形速率剧增,岩土体很快破坏在  $de$  段,各阶段起始时刻的预报分别称之为长期预报、中期预报、短期预报和临滑预报。

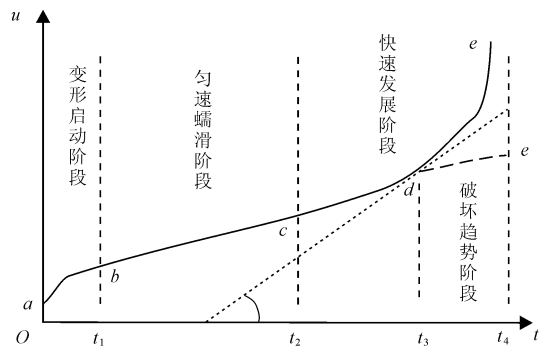


图 1 边坡变形时序曲线速率角<sup>[9]</sup>

在实际应用中,可以根据上述公式建立位移的统计模型,在确定边坡变形速率临界值时,应充分考虑边坡的工程环境、地层岩性、岩体结构类型、地下水、地应力、潜在滑动面的性状和破坏模式、边坡工程的重要性及破坏后的严重性等因素,通过工程类比、现场监测结果,再结合室内试验和数值计算来综合考虑后,合理地选择和确定变形速率的临界值范围。

### 1.3 其它判据

(1) 安全系数法。安全系数法作为评价边坡稳定性的定量评价方法,历史悠久是目前工程实践中最普遍应用的,适用于边坡失稳的长期预报。

(2) 可靠度概率法。近年来人们把可靠性理论引入到边坡稳定性计算中,考虑了岩土体的强度指标  $C$ 、 $\varphi$  等指标的变异性,应用概率论的原理研究边坡的评价标准,避免了安全系数使用过程中的绝对化。该法概念明确、应用较广,但目前仍存在问题:如何合理选取各因素的概率模型及数字特征,未得到很好解决;比常规的极限平衡方法计算复杂、困难;以稳定系数计算为基础的建立的极限状态方程,由于边坡滑动模式的复杂性,边坡稳定性系数在大多数情况下都没有显式表达极限状态函数。

(3) 能量突变准则。将边坡系统从稳定的平衡状态到失稳前的临界状态这一整个过程看作是个准静态过程<sup>[10]</sup>,以岩石单元的应变能为状态变量,借助突变理论的方法,以岩石材料破坏的判断准则为基础,建立起岩体工程系统失稳破坏的应变能突变准则,用系统的应变能变化来判断所研究边坡工程

的稳定性问题。

(4) 声发射率判据。岩体在临近滑坡前,其声发射的频度和幅度一般都会显著增加,大振幅声发射信号明显增多,释放能量显著增加;当破坏达到新的平衡后,其声发射频度和幅度也随之减少<sup>[11]</sup>。该方法可以了解岩体的应力状态、弱化地点及预测其稳定性,监测范围可达数米至数十米。

(5) 宏观信息判据。边坡临滑前其本身及周边环境量常显现出许多种直观、明了、易于被人们捕捉的各种宏观前兆现象,如出现裂缝、小型岩体的崩塌和滑落、边坡前缘膨胀松动或频繁崩塌、边坡的加固设施大范围的失效或损坏、地下水位动态异常、地声或地热异常、动物表现异常等等。

综上所述由于边坡工程的极端复杂性,对于边坡的稳定性问题目前还没有一个统一的失稳判据,采用不同的失稳判据所得到的结果一般是有差异的,以上方法在对研究岩石边坡失稳上发挥了很好的作用,从规律性分析的角度而言,很难采用某种确定性的数学、力学模型及其相应的破坏准则来准确描述边坡系统的整体破坏失稳的问题,并绝对化地普遍推广应用。应根据具体情况有选择的将几种方法综合使用会更为适合,也更接近边坡的实际情况,不失为是一种分析解决边坡问题的有意义方法。

## 2 工程应用

目前一些重要的大型边坡都布设有监测系统,实时动态监控边坡的状况,监测仪器具有多样化、精度和自动化程度高等特点,众多的仪器为分析边坡的稳定状况提供了丰富的数据资料。选取某边坡工程进行研究<sup>[12]</sup>,从中选择最具代表性和最能直接反映边坡安全状态的监测指标与相应信息来进行研究分析。

### 2.1 监测成果分析

(1) 位移计。监测位移过程曲线见图2所示,从图2中可以看出,该区域边坡变形最大为TP3,目前水平累计合位移为134.41 mm,水平合位移向临空面变形,倾向上游,同时还有71.4 mm的沉降变形;TP1初始观测时间最早,测量周期长,经历了边坡的整个开挖过程,目前水平累计合位移为96.19 mm,在边坡开挖过程中,该部位岩体变形显著,均有小幅度沿临空面的变形,但当开挖结束后,随着岩体卸荷和地应力的释放后逐渐趋于稳定,现阶段变形已趋于收敛;其余各测点的水平累计合位移变形目前也均趋于稳定。边坡的变形形态呈现出上部大、下部小的分布规律。

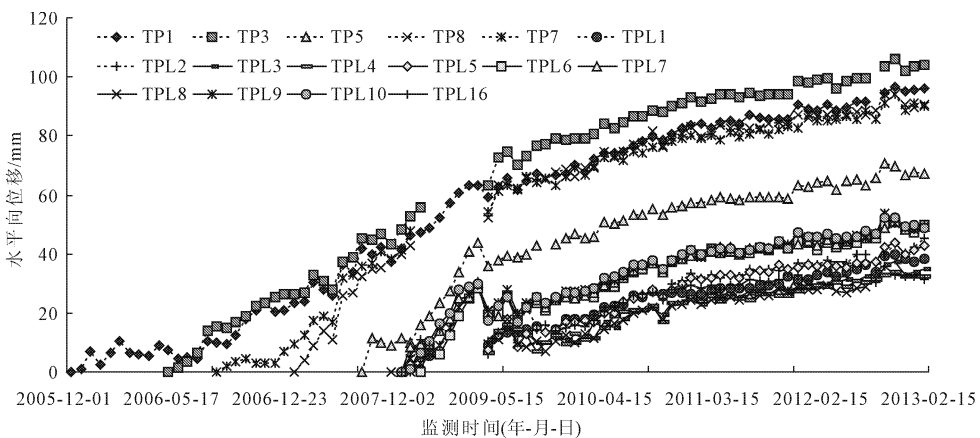


图2 边坡外观变形测点的水平方向合位移时间过程曲线

(2) 锚索测力计。锚索测力计能较好的反映边坡在预应力锚索锚固下的变形情况,可以直观了解和掌握其工作状态,边坡内部应力的变化情况。依据监测统计结果,绘制锚索测力计从锚固力损失量分布的三维云图见图3。

由监测结果可知,锚索测力计的锚固力变化大部分呈预应力损失状态(损失量为正),坡面局部区域锚固力损失较大,基本上都处于锚固力平稳变化阶段;个别点出现锚固力增长,但增长的幅度都不大,均处于正常范围内。

(3) 石墨杆收敛计。为了解深部拉裂缝在开挖过程,特别是蓄水运行中的变形规律,检验边坡的整体稳定性和安全裕度,布置了石墨杆式收敛计。各硐口累计位移及各测段位移过程曲线如图4所示。

由图4可以看出,在2008年—2009年两年内位移增长相对较大、速率也较快,位移变化速率均在3.2 mm/月以上,硐口累计位移较大,达到64.5 mm。从2010年以来变形没有继续快速增长,而呈一定的收敛状态。

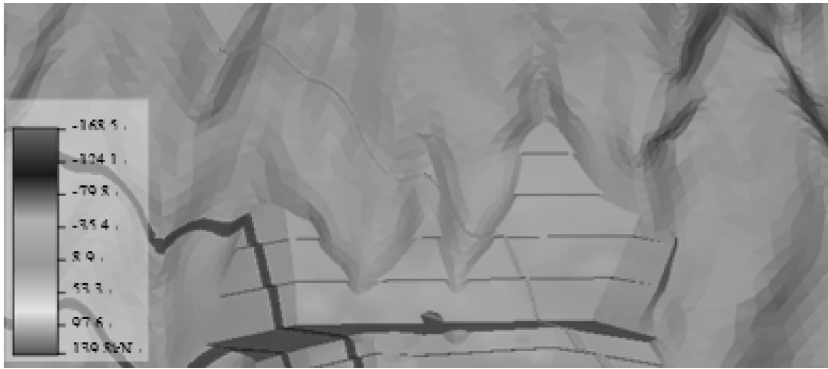


图 3 边坡的锚固力损失量三维云图

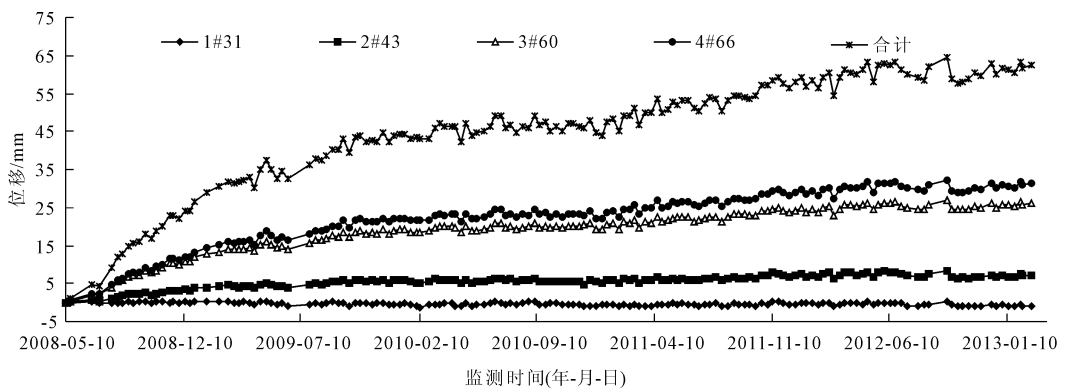


图 4 石墨杆式收敛计 PD40 锚口累计位移及各测段位移过程线

## 2.2 等级划分

通过对监测资料分析、工程类比、专家经验、结合相关文献<sup>[12-16]</sup>和规范<sup>[17]</sup>,将该边坡工程的安全稳定性分成 5 个等级(见表 1),即非常安全、安全、一般、危险和非常危险,它们分别对应 I、II、III、IV、V。其监测表现划分依据当边坡由低速蠕滑阶段进入加速阶段的位移速率可由已有数据系列中的统计结果推算进入加速阶段的位移速率判据;对于预应力锚索其累计锚固力增大表示边坡变形的增长,累计锚固力减小则表示边坡的变形得到了控制,因此选取锚索测力计中累计锚固力增长的锚索占总锚索的比例指标来反映预应力锚索的锚固效果,相应具体的指标分级标准如表 2 所示。该部位的边坡级别

属于 I 级,采用极限平衡法计算得其允许的稳最小安全系数在永久运行(正常)下是 1.25、施工过程时 1.15、考虑降雨的特殊工况为 1.15、考虑地震的特殊工况时为 1.05。

## 3 结 论

(1) 在边坡安全性评价中,选取的判定方法非常重要,对后续的防控和治理工作具有重要价值。本文在详细研究分析了现有稳定性分析方法的原理、特点和适用范围后,指出它们的优缺点。以安全监测资料为基础的研究方法有着其无法比拟的优势,单一方法的评价效果有很大局限性,应采用多种方法对边坡的安全性能进行研究。

表 1 边坡稳定状态定义

| 边坡安全状态 | 安全级别 | 定 义  |
|--------|------|--|
| 非常安全   | I    | 边坡各项物理指标状态良好,无异常情况发生,变形非常小或不会发生变形破坏                    |
| 安全     | II   | 各项物理量状态基本正常,异常现象不显著,边坡有松动,但在短期内不会发生大的变形破坏,不需防护措施       |
| 一般     | III  | 个别物理量出现一定异常,边坡总体是稳定的、没有大的变化,处于接近极限平衡状态,可不采取或只需采取轻型防护措施 |
| 危险     | IV   | 各种破坏因素发育,多项物理指标出现异常,边坡稳定性较差,在一定环境下可能会发生较大的变形破坏,出现局部破坏  |
| 非常危险   | V    | 多项监测物理量出现较大异常,边坡变形破坏强烈、整体趋于破坏,随时会发生大的破坏,出现整体破坏的绝大多数特征  |

表 2 边坡稳定状态分级标准

| 边坡安全级别 | 岩体结构特征(RQD) | 黏聚力/MPa   | 内摩擦角/(°) | 岩体变形模量/GPa | 断层情况 | 岩石单轴湿抗压强度/MPa | 岩石完整性系数   | 月累计降雨量/mm |
|--------|-------------|-----------|----------|------------|------|---------------|-----------|-----------|
| I      | 100~90      | 0.35~0.24 | 45~38    | 30.0~15.0  | 无    | 100~90        | 1.00~0.76 | 0~50      |
| II     | 90~75       | 0.24~0.13 | 38~30    | 15.0~7.0   | 很少   | 90~70         | 0.76~0.56 | 50~100    |
| III    | 75~50       | 0.13~0.08 | 30~20    | 7.0~4.0    | 不活跃  | 70~60         | 0.56~0.36 | 100~150   |
| IV     | 50~25       | 0.08~0.05 | 20~15    | 4.0~1.5    | 活跃   | 60~30         | 0.36~0.16 | 150~250   |
| V      | 25~0        | 0.05~0.00 | 15~0     | 1.5~0.0    | 非常活跃 | 30~0          | 0.16~0.00 | 250~350   |

| 边坡安全级别 | 日降雨量/mm | 地震烈度 | 地震水平加速度/g | 地下水影响 | 地应力/MPa | 植被     | 多点位移计变形速率/(mm·月 <sup>-1</sup> ) | 石墨杆收敛计变形速率/(mm·月 <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------|------|-----------|-------|---------|--------|---------------------------------|----------------------------------|
| I      | 0~25    | 0~3  | 0.00~0.05 | 微小    | 0~2     | 草      | 0.00~0.10                       | 0.00~0.20                        |
| II     | 25~50   | 3~5  | 0.05~0.10 | 较弱    | 2~8     | 混合但草较多 | 0.10~0.30                       | 0.20~0.50                        |
| III    | 50~60   | 5~7  | 0.10~0.15 | 一般    | 8~14    | 混合但树较多 | 0.30~1.00                       | 0.50~2.00                        |
| IV     | 60~100  | 7~8  | 0.15~0.20 | 较强    | 14~20   | 树      | 1.00~3.00                       | 2.00~10.00                       |
| V      | 100~150 | 8~12 | 0.20~0.40 | 很强    | 20~25   | 无覆盖    | 3.00~10.00                      | 10.00~20.00                      |

| 边坡安全级别 | 锚索测力计/% | 巡视检查情况 | 边坡坡高/m | 边坡坡角/(°) | 支护措施  | 排水设施 | 人工扰动 | 爆破振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------|--------|--------|----------|-------|------|------|------------------------------|
| I      | 0~8     | 优      | 0~30   | 0~20     | 及时、强  | 优    | 无    | 0~12                         |
| II     | 8~15    | 良      | 30~45  | 20~30    | 及时、较强 | 良    | 较弱   | 12~25                        |
| III    | 15~20   | 中      | 45~60  | 30~40    | 一般    | 中    | 一般   | 25~45                        |
| IV     | 20~25   | 差      | 60~80  | 40~50    | 差     | 差    | 较强烈  | 45~65                        |
| V      | 25~30   | 极差     | 80~100 | 50~90    | 无     | 无    | 强烈   | 65~80                        |

(2) 基于安全监测资料从应力、位移、速率、降雨等多角度挖掘边坡在不同阶段变形的情况,探讨了边坡失稳的判据和阈值。构建了以变形控制指标为主,辅以其他监控指标来建立岩石边坡失稳的判据。

参考文献:

[1] 年廷凯,刘 凯,黄润秋,等.多阶多层复杂边坡稳定性的通用上限方法[J].岩土力学,2016,37(3):842-849.

[2] 王衍汇,倪万魁,石博溢,等.延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):52-56.

[3] Crosta G B, Agliardi F. How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002,27(36):1557-1565.

[4] 唐宇峰,施富强,廖学燕.基于 SPH 的边坡稳定性计算中失稳判据研究[J].岩土工程学报,2016,38(5):904-908.

[5] 冯夏庭,周 辉,李邵军,等.岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(9):1737-1744.

[6] 喻和平,袁明明,张 聪,等.基于弹塑性区间有限元的边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):132-135.

[7] Shah P H, Batra R C. Through-the-thickness stress distributions near edges of composite laminates using stress recovery scheme and third order shear and normal deformable theory[J]. Composite Structures, 2015,131:397-413.

[8] 孙 超,吕一彦,吴继敏.大型堆积体边坡极限平衡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):147-150.

[9] 王思敬,等.趋势序列概念与滑坡预报.工程地质学进展[M].北京:地震出版社,1994.

[10] 刘新荣,涂义亮,钟祖良,等.基于能量突变的强度折减法边坡失稳判据[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(6):2065-2072.

[11] 黄昌乾,丁恩保.边坡稳定性评价结果的表达与边坡稳定性判据[J].工程地质学报,1997,5(4):375-380.

[12] 中水顾问集团成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站大坝左岸边坡变形及稳定性分析专题报告[R].成都:中水顾问集团成都勘测设计研究院,2008.

[13] 金海元.高边坡安全监测预警方法研究及应用[D].南京:河海大学,2009.

[14] 袁宝远,杨志法,刘大安,等.边坡不稳定先兆分析系统[J].岩石力学与工程学报,1999,2(18):166-169.

[15] Dawson E. M, Roth W. H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 2015,49(6):835-840.

[16] Zhao B, Xu W Y, Meng Y D, et al. Security monitoring of a large-scale and complex accumulation slope: an application in the Xiluodu hydropower station[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015,74(2):327-335.

[17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.水电水利工程边坡设计规范:DL/T5353-2006[S].北京:中国电力出版社,2006.