

基于原位监测的边坡滑动原因初步分析

姜晨光, 姜忠平, 王纪明, 潘吉仁, 顾建荣, 王焯文, 潘月明

(江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214122)

摘要: 目前, 人们常常借助实验室对边坡滑动的机理进行模拟分析, 从而得出各种各样的滑坡模型, 这些模型各有千秋、难分伯仲, 在适用性方面也各有所长, 实践发现, 用实验室模型研究成果来代表实际滑坡的代表性误差有时会相当大, 甚至有时会出现很大的谬误。从根本上弄清滑坡的实际机理是一个非常重要的问题, 以原形监测分析法十余年的原位监测数据为依据, 初步分析了边坡滑动的外因与内因, 利用数学模拟原理初步总结出了边坡滑动与诸滑坡因素间的关联关系。同时叙述了边坡原位监测的一些行之有效的方法与技术手段(包括 GPS、测量机器人等)。

关键词: 边坡工程; 滑动; 机理; 外因; 内因; 关联关系; 原位监测; 测量机器人

中图分类号: P 642.2; TD 854.6; TU 458⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5360 - 06

PRIMARY ANALYSIS CAUSES OF SLOPE SLIP BASED ON IN-SITU MONITORING

JIANG Chen-guang, JIANG Zhong-ping, WANG Ji-ming, PAN Ji-ren, GU Jian-rong,
WANG Zhao-wen, PAN Yue-ming

(Department of Civil Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Presently, scientists often perform the simulated analysis of the mechanism of slope slip with the aid of tests in laboratory. Based on the tests in laboratory, many models of slope slip have been established. The experimental models have different characteristics and different adaptabilities. The representative of actual landslide with laboratory results leaves relatively large errors, even great falsehood, sometimes. How to recognize fundamentally the actual mechanism on landslide is one of the problems on which the author and his research group have studied for more than ten years. The method on which the author and his research group study depend is prototype monitoring analysis method. Based on ten years' in-situ monitoring data, this article analyzes the external cause and internal cause of landslide, and concludes primarily the relevant relations between the slide and the various factors of landslide with the aid of the mathematic simulation theory are primarily achieved. Also, it depicts some effective methods and techniques on slope slip field monitoring (including GPS, measuring robot, etc.).

Key words: slope engineering; slide; mechanism; external cause; internal cause; relevant relations; field monitoring; measuring robot

1 引言

边坡包括自然边坡和人工边坡。自然边坡在地

应力、温度应力、化学应力、生物营力、地质营力、以及水的复杂营力等的作用下, 会出现各种各样的外部变化, 一般情况下, 这种变化是缓慢的和渐进的, 但当出现较大的应力(或营力)改变时, 自然边

收稿日期: 2005 - 04 - 30; **修回日期:** 2005 - 06 - 12

基金项目: 江南大学 211 建设科研启动基金重点资助项目(020016); 2000 年山东省交通科研基金资助项目(LJK - 0009)

作者简介: 姜晨光(1964 -), 男, 1984 年毕业于中南矿冶学院矿山系, 现任教授, 主要从事岩土工程、勘察工程、防灾减灾工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangcg999@yahoo.com.cn.

坡外型会因粘聚力的不足而迅速地改变(或崩解),这就是滑坡。对于人工边坡由于切坡形成临空面也极易造成滑坡。不管是自然边坡还是人工边坡,滑坡给人类带来的灾难是极其沉痛的,其给人类和社会造成的危害难以估量。如何才能控制滑坡、躲避滑坡灾害是人类一直在关注、思考和研究的重要科学问题之一。要控制滑坡、躲避滑坡灾害就必须从根本上弄清滑坡的机理、滑坡的关联因素、滑坡的诱因、滑坡的运动规律,而这一切都需要站在宏观的高度、深入微观世界进行艰苦的探索。

关于边坡稳定问题,自1915年瑞典彼德森(K. E. Petterson)提出了圆弧分析滑动法(称为瑞典圆弧法)以来,人们提出了许许多多的方法,这些方法大致经历了以下不断的演进与分化过程。人们基于瑞典圆弧法提出过用于粘性土边坡的条分法和瑞典条分法。1955年,毕肖甫(A. N. Bishop)考虑条块侧面力提出了毕肖甫法,后来又将其加以改进称为简化毕肖甫法。N. Janbu考虑条块间水平作用力的关系提出了普通条分法(也称简布法)。后来又出现了更多的边坡理论,像基于试验的莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度理论、邓肯(J. M. Duncan, 1978)提出粗粒土的内摩擦角理论和非线性E-B模型、图解分析法、容许安全系数法、总应力法、有效应力法、不平衡推力法、反演分析法、数值积分法、普通有限元法、弹塑性有限元法、三维空间有限元法、蠕变演进法、Spencer法、非线性破坏准则、非定常渗流理论、协同-分岔模型、灰色预测、边坡动力响应问题、堆积层边坡表层位移矢量角问题、边坡演化的开放度问题、剪胀角问题、各向异性非线性方法、遗传算法、模式识别法、岩体高边坡的卸荷理论等等^[1~30]。

纵观目前各种边坡稳定理论和分析方法,其适用范围各有侧重,其准确性也各有千秋,具体应用应根据实际工程特点结合既有边坡工程经验、既有边坡工程试验结果、既有边坡工程实测结果合理地选择恰当的边坡理论。客观的讲,目前没有一种方法是具有普遍性的、可应用于所有边坡的通用方法。

笔者及科研组成员多年来一直致力于边坡稳定问题的研究与监测工作,在研究和监测实践中,积累了不少的资料和研究体会。科研组一直认为,对于边坡问题的研究不能完全依赖实验室进行模型或模拟研究,更重要的是深入工程第一线进行现场研究,只有通过现场研究才能比较准确的搞清滑坡的

关键要素以及各滑坡要素对滑坡的贡献率。为此,科研组十几年来以实际原位监测数据为依据,综合运用多学科基本理论,对边坡稳定的真实机理进行了初步的分析与探讨,取得了一定的进展。下面,谈一谈笔者及科研组在现场研究基础上对自然边坡稳定研究方面的一些不成熟的看法与看法。

2 滑坡原位监测的优选方法

笔者及研究小组在进行滑坡原位监测时主要采用了GPS-RTK实时自动监测技术和测量机器人实时自动监测技术,在监测实践中对这两项技术进行了技术开发和有针对性的改造,取得了良好的监测效果,下面分别进行介绍。

2.1 测量机器人实时自动监测法

测量机器人是指具有马达驱动、激光寻点、CCD技术、自动目标识别、自动照准、自动测角、自动测距、自动跟踪目标、自动记录、具有标准数据接口(比如RS232串行接口)或Modem、可实现现场作业与远端办公室同步数据通讯的智能电脑全站仪。

目前,测量机器人的测量速度可达每秒钟一个点,三维定位精度可优于1mm。其高精度的原因在于利用了基准站间的标准长度比对技术(或叫距离差分技术),该技术可较好地消除或削弱大气折射误差、仪器及装备的固有系统性误差。

测量机器人的核心技术是自动目标识别与追踪系统(automatic target recognition, ATR)。

测量机器人的出现是以1999年1月1日瑞士Leica集团的TCA2003上市为标志的(其代表型仪器为测角精度 $\pm 0.5''$ 、测距精度 $1\text{mm} + 1 \times 10^{-6}D$ 的TCA2003,以及测角精度 $\pm 1.0''$ 、测距精度 $1\text{mm} + 2 \times 10^{-6}D$ 的TCA1800),Leica集团专门开发了TCA+APSWin系统。目前测量机器人已经有了长足的进步,其典型的代表是瑞士Leica集团的TPS1100 Powersearch系列(包括TCRA1105 - plus - 5''、TCRA1103 - plus - 3''、TCRA1102 - plus - 2''、TCRA1101 - plus - 1''),TPS的含义是totalstation position system,同时,瑞士Leica集团还开发了RCS1100遥控系统可对所有的徕卡电子测量仪器进行遥控测量。最近,日本TOPCON公司也生产出了具有测量机器人功能的GPT-8200A系列(包括GPT-8201A, GPT-8203A/8203AF, GPT-8205A/8205AF)。

测量机器人监测滑坡必须在滑坡影响范围以外岩土结构非常稳定的地区均匀设置4到5个基准点,基准点应具有一定的高度,应设置强制归心观测墩,若进行无人职守的连续长期实时动态监测应对各个基准点设置观测塔楼。基准点的置埋深度应到达硬岩层,困难时应达到稳定持力层。基准点间的相互距离应以不低于1/700 000的精度进行准确测量,基准点的三维点位精度应优于 ± 0.3 mm。监测时在用于监测作业的基准点(称监测站)上设置测量机器人,在其余基准点上设置固定的反射棱镜。

测量机器人监测滑坡时,还必须在滑坡区内均匀地、有代表性地设置适量的形变观测点,形变观测点也应设置强制归心观测墩,每个观测墩上也均应安置固定的反射棱镜。形变观测点观测墩应采用三种形式:一种是置放在滑坡体表面的平台支撑式观测墩,一种是置埋深度在滑坡体内中部的浅埋墩台支撑式观测墩,另一种是置埋深度在滑坡体内近底层的深埋墩台式观测墩。

测量机器人监测滑坡要求各基准点、各形变观测点棱镜与监测站测量机器人通视,这一点在基准点和形变观测点的选择时必须注意。

测量机器人监测滑坡的过程是先从监测站上人工对所有的基准点和形变观测点进行三维坐标测量,获得各点的初始三维坐标。然后,根据各点的初始三维坐标对测量机器人设置观测顺序(称为测量机器人自学习),同时,设定测量机器人的观测程序(测量次数、正倒镜、时间间隔、通讯参数,等等)。然后,启动自动测量功能,测量机器人就可以按设定的程序进行滑坡的自动监测了,监测的所有信息和结果都通过数据通讯实时地传输到监测中心办公室。监测中心办公室也可在任何时候对测量机器人进行控制。监测中心办公室的计算机可以通过专用的软件对监测数据进行分析、画图或处理。不同监测时刻获得的形变观测点三维坐标与该点初始三维坐标的差值即为该形变观测点的三维空间位移量。

2.2 GPS-RTK 实时自动监测法

GPS技术作为当代一种最先进的空间导航与定位技术已经在全球各个专业技术领域得到广泛的应用。GPS-RTK技术是GPS技术的一个重要发展,目前其单点定位精度可达亚毫米级、单点定位速度优于2 s,若利用差分技术其三维定位精度可达毫米级。GPS-RTK技术可实现现场作业与远端办公室的同步数据通讯。目前能生产GPS-RTK测量系统的厂家很多很多,制造水平比较高的国家是美国、瑞士、

加拿大、日本。

GPS-RTK实时自动监测滑坡的现场布置与测量机器人实时自动监测滑坡的现场布置大致相同,也需要设置基准点(只需2到3个)和形变观测点,基准点和形变观测点的设置方法同测量机器人实时自动监测法,GPS-RTK实时自动监测滑坡的最大优点是对所有的基准点和形变观测点均没有通视要求。

选择一个基准点作为基站,其余基准点为参考站。监测时将基站接收机强制归心安置在基站点上,将各流动接收机强制归心安置在其余基准点和各个形变观测点(称流动站),根据同步接收到的基站和流动站GPS卫星信息,借助专业软件获得各流动站的三维坐标数据,不同时段流动站的三维坐标变化量即为流动站处形变观测点的三维空间相对位移。

不同时段各形变观测点的实测三维坐标与首次测量三维坐标的较差即为各形变观测点的绝对三维空间位移。当监测的基准点和形变观测点较少时可以通过一个基站接收机同时控制数个流动站接收机,实现滑坡的同步实时监测。当监测的基准点和形变观测点较多时可以通过一个基站接收机同时控制数个流动站接收机分组、分时段进行滑坡监测,实现滑坡的分组同步、整体异步、间断性的准实时监测。

GPS-RTK监测时要求基站位置地势高,周围200 m范围内不能有GPS信号反射体和可能导致多路径效应的物体(比如:高大建筑物、大面积水域、高压线、通讯设备、微波站等)。

2.3 滑坡体内部构成要素采样的方法

滑坡体内部的物质构成是滑坡能否发生的关键,因此,必须借助勘探手段较为全面地获取滑坡体内部的物质构成信息。

勘探的方法多种多样,笔者及科研组采用的方法是钻探法,在滑坡区域内合理地、按较为均匀的间隔设计探孔的位置,探孔不宜太多(因费用较高),但必须有代表性。探孔的钻探深度以钻透第一层硬岩为度。通过钻探取得滑坡体的岩土芯,通过岩土芯的实验室测试获得岩土芯试样的天然容重、干容重、组分结构状态、滑床上方单位水平面积滑坡堆积体的平均质量 W_s 、以及滑床的平均倾角 δ 等信息。

滑床上方单位水平面积滑坡堆积体的平均质量 W_s 根据岩土芯试样的天然容重及钻孔深度(到第一

硬岩层的铅直距离)概略算出。

岩土芯的直径以 $\phi 150\text{ mm}$ 为适宜,当然直径为 $110\sim 150\text{ mm}$ 也是可以的。

滑床的平均倾角 δ 及倾角方向根据整个滑坡地区各钻孔处的地面标高及钻孔深度(到第一硬岩层的铅直距离)计算与推断得出,可借助计算机计算或绘图。

3 自然边坡稳定性的判别方法

本文通过对 10 余个滑坡体的监测数据分析,总结得出了影响自然边坡稳定的关键要素和自然边坡稳定性的判别准则。

3.1 影响自然边坡稳定的关键要素

实际监测与计算机模拟显示,影响自然边坡稳定的关键要素主要有 4 个,它们是滑坡堆积体的自然容重平均增率 K ,滑坡堆积体的平均组分结构系数 S_T ,滑床(第一层硬岩)的平均倾角 δ ,滑床上方单位水平面积滑坡堆积体的平均质量 $W_s\text{ (t/m}^2\text{)}$ 。

在实际滑坡监测数据的支持下,通过计算机大量的模型筛选与试算,笔者及科研组总结出了影响自然边坡稳定的上述 4 个关键要素,同时,根据计算机辅助建模技术,笔者及科研组总结出了自然边坡稳定度 A 的经验型判别公式,即

$$A = 0.981\ 06KW_sS_T \sin \delta + 0.018\ 3 \quad (1)$$

其中,

$$K = \Sigma K_i / n \quad (2)$$

式中: K_i 为采样样本的自然容重增率,且有

$$K_i = \rho / \rho_d \quad (3)$$

式中: ρ 为采样样本的天然容重,是采样体质量 W 与其自然采样体积 V 的比值(t/m^3); ρ_d 为采样样本的干容重,是采样体烘干后的质量 W' 与其自然采样体积 V 的比值(t/m^3)。

$$S_T = \Sigma S_{Ti} / n \quad (4)$$

$$S_{Ti} = \Sigma \ln a_i \quad (5)$$

式中: S_{Ti} 为每个采样样本的组分结构系数, S_T 为不同粒径的样本物质烘干质量 W_i 与样本烘干总质量 W' 的百分比比值 a_i (%)自然对数的和。

粒径的规格分 10 级,分别为 $d \geq 100\text{ mm}$, $100\text{ mm} > d \geq 60\text{ mm}$, $60\text{ mm} > d \geq 20\text{ mm}$, $20\text{ mm} > d \geq$

10 mm , $10\text{ mm} > d \geq 5\text{ mm}$, $5\text{ mm} > d \geq 2\text{ mm}$, $2\text{ mm} > d \geq 1\text{ mm}$, $1\text{ mm} > d \geq 0.5\text{ mm}$, $0.5\text{ mm} > d \geq 0.1\text{ mm}$, $d < 0.1\text{ mm}$,其中 d 为颗粒的直径。

例如:某采样样本各种粒径物质的烘干质量 W_i 分别为见表 1,则 $S_{Ti} = \ln 15.5 + \ln 6.4 + \ln 4.4 + \ln 11.2 + \ln 9.2 + \ln 12.1 + \ln 12.9 + \ln 8.0 + \ln 9.6 + \ln 10.7 = 22.476$ 。

表 1 某采样样本各种粒径物质的烘干质量 W_i
Table 1 Dry mass W_i of the various size matter of a sampling product

粒径规格	烘干质量 W_i/g	$a_i/\%$
$d \geq 100\text{ mm}$	4 869	15.5
$100\text{ mm} > d \geq 60\text{ mm}$	2 026	6.4
$60\text{ mm} > d \geq 20\text{ mm}$	1 397	4.4
$20\text{ mm} > d \geq 10\text{ mm}$	3 524	11.2
$10\text{ mm} > d \geq 5\text{ mm}$	2 883	9.2
$5\text{ mm} > d \geq 2\text{ mm}$	3 797	12.1
$2\text{ mm} > d \geq 1\text{ mm}$	4 051	12.9
$1\text{ mm} > d \geq 0.5\text{ mm}$	2 536	8.0
$0.5\text{ mm} > d \geq 0.1\text{ mm}$	3 008	9.6
$d < 0.1\text{ mm}$	3 382	10.7
合计	3 1473	100.0

采样样本的组分结构状态(或叫岩土芯试样的组分结构状态)通过钻探取岩土芯获得,岩土芯样的直径一般为 $\phi 150\text{ mm}$ 或 $\phi 110\text{ mm}$ 。岩土芯样取得后马上按 1 m 一段进行采样样本的天然容重的测量。然后,按 1 m 一段将岩土芯样放在 $\phi 800\text{ mm}$ 、深 500 mm 、盛有适量水的特制铁桶中进行分散,然后,对分散后的混合物进行筛分(按 10 种粒径规格)、分别盛放,待静置沉淀后撇去适量水分,将 10 种筛样进行烘干称重获得采样样本各种粒径物质的烘干质量 W_i 和总质量 W' ,进而获得采样样本的组分结构系数 S_{Ti} 及采样样本的干容重 ρ_d 。

根据计算得出的自然边坡稳定度系数 A ,即可判别自然边坡的稳定性并进行科学的边坡预警。

3.2 自然边坡稳定性的经验判别准则

根据计算得出的自然边坡稳定度系数 A 可通过表 2 判别自然边坡的稳定性。

当计算的 A 值处于临界结构状态时应进行边坡滑动预警,当计算的 A 值等于 30 时滑坡体将开始滑动, A 值超过 30 后值越大滑动程度越剧烈。

表2 自然边坡稳定性的判别准则

Table 2 Criterion to distinguish the natural slope stability

自然边坡稳定度系数 A	自然边坡的稳定状况
$A \leq 5$	超稳定结构
$5 < A \leq 10$	稳定结构
$10 < A \leq 15$	较稳定结构
$15 < A \leq 20$	基本稳定结构
$20 < A \leq 25$	半稳定结构
$25 < A \leq 30$	临界结构
$A > 30$	滑坡结构

4 示 例

本文提出的监测方法及边坡稳定性判别准则在卧牛川、云滩、鸭儿沟、娘娘坡、嵯步岭等多个滑坡体监测中均有着优异的表现。

下面是鸭儿沟滑坡的几次监测数据。

鸭儿沟地区滑坡体的平均干容重 ρ_d 为 1.693 t/m^3 ，平均组分结构系数 S_T 为 25.612，滑床(第一层硬岩)的平均倾角 δ 为 $9^\circ 32'$ 。

2001年3月19日测得滑坡体的平均天然容重 ρ 为 1.805 t/m^3 ， W_s 为 4.266 t/m^3 ，根据式(1)可计算出 $A = 18.9$ ，于是，根据表2可知边坡基本稳定，监测得到的平均累计滑动量为 0.61 mm 。

2001年6月22日测得滑坡体的平均天然容重 ρ 为 1.953 t/m^3 ， W_s 为 4.876 t/m^3 ，根据式(1)可计算出 $A = 23.4$ ，于是，根据表2可知边坡处于半稳定状态，监测得到的平均累计滑动量为 1.97 mm 。

2001年9月6日测得滑坡体的平均天然容重 ρ 为 2.014 t/m^3 ， W_s 为 5.290 t/m^3 ，根据式(1)可计算出 $A = 26.2$ ，于是，根据表2发出了边坡滑动预警信息，随后，就出现了一定程度的滑坡，当然滑移量不大，平均滑动量为 5.10 mm 。

5 结 语

本文的自然边坡稳定度系数计算公式(式(1))及自然边坡稳定性的判别准则是建立在大量边坡实际原位监测数据的基础之上的，笔者及科研组为了公式及准则的构建，利用计算机进行了大量的运算并且进行了大量的计算模型比选工作，经验公式和经验判别准则的实际应用效果显示，本文的研究成果还是具有一定准确性的。当然，由于岩土结构的极端复杂性，本文的研究成果肯定会存在一定的代表

性误差甚至谬误，恳请大家多多提出批评。

本文提出的边坡自动监测方法(GPS-RTK技术、测量机器人技术)对于提高边坡监测的质量、精度和效率具有重要的参考价值，建议大家在边坡监测中采用。

参考文献(References):

- [1] Arthur J R F, Chua K S, Dunstan T. Induced anisotropy in a sand[J]. Geotechnique, 1977, 27(1): 13 - 30.
- [2] Arthur J R F, Menzies B K. Inherent anisotropy in a sand[J]. Geotechnique, 1972, 22(1): 115 - 128.
- [3] Bishop A W, Morgenstern N R. Stability coefficients for earth lope[J]. Geotechnique, 1960, 10(1): 129 - 150.
- [4] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7 - 17.
- [5] Bishop A W. The strength of soils as engineering material[J]. Geotechnique, 1966, 16(2): 89 - 130.
- [6] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [7] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [8] Dudumu K, Krmji I S, Ikuo T. Undrained shear characteristics of saturated sand under anisotropic consolidations[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(1): 1 - 11.
- [9] Jiang C G, Wang J M, Jiang Z P, et al. A New recognition of stability of the slope of cut[A]. In: Proceedings of the World Engineers' Convention 2004—Environment Protection and Disaster Mitigation (Vol.D)[C]. Shanghai: China Science and Technology Press, 2004. 2 - 6, 414 - 419.
- [10] Griffith D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [11] Iizuka A, Yatomi C, Yashima A, et al. Effect of stress induced anisotropy on shear band formation[J]. Archive of Applied Mechanics, 1992, 62(2): 101 - 114.
- [12] Morgenstern N R, Price V. The analysis of the stability of general slip surface[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79 - 93.
- [13] Noriyuki Y, Hidekazu M, Masayuki H. Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses[J]. Soils and Foundations, 1991, 131(1): 95 - 109.
- [14] Sloan S W. Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability[J]. J. Geotech. Geoenviron. Engrg., ASCE, 1998, 124(1): 1 - 4.
- [15] Spencer E. The thrust line criterion in embankment stability analysis[J]. Geotechnique, 1973, 23(1): 85 - 100.

- [16] Teruo N, Hajime M. Shear behaviors of sand and clay under three dimension stress condition[J]. *Soils and Foundations*, 1983, 23(2): 26 - 42.
- [17] Vinayagamoorthy S. The effect of anisotropic elasticity on the yielding characteristics of over consolidated natural clay[J]. *Canadian Geotechnique J.*, 2001, 38: 125 - 137.
- [18] Whittle A J, Kavvas M J. Formulation of MIT-E3 constitutive model for over consolidated clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(1): 173 - 198.
- [19] Yasuo Y, Knji I. Anisotropic deformation characteristics of sand under three-dimensional stress conditions[J]. *Soils and Foundations*, 1979, 19(2): 79 - 94.
- [20] 邓建辉, 李焯芬, 葛修润. 岩石边坡松动区与位移反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(2): 171 - 174.(Deng Jianhui, Lee C F, Ge Xiurun. Disturbed zones and displacement back analysis for rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 171 - 174.(in Chinese))
- [21] 郑颖人, 赵尚毅, 邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(12): 1 943 - 1 952.(Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Deng Weidong. Numerical simulation on failure mechanism of rock slope by strength reduction fem[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 1 943 - 1 952.(in Chinese))
- [22] 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层边坡表层层位移矢量角及其在稳定性预测中的作用与意义[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(12): 1 976 - 1 983.(He Keqiang, Yang Jibao, Wang Sijing. Displacement vector angle of colluvial slope and its significance[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 1 976 - 1 983.(in Chinese))
- [23] 黄志全, 廖德华, 姜彤, 等. 边坡系统演化的开放度研究[J]. *工程地质学报*, 2002, 10(2): 152 - 155.(Huang Zhiquan, Liao Dehua, Jiang Tong, et al. Study on opening degree of slope system evolution[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(2): 152 - 155.(in Chinese))
- [24] 李亮, 刘宝琛. 降雨入渗条件下边坡极限承载力的分析[J]. *铁道学报*, 2002, 24(4): 109 - 113.(Li Liang, Liu Baochen. Lower bound limit analysis of slope bearing capacity during the rainfall[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2002, 24(4): 109 - 113.(in Chinese))
- [25] 任青文, 余天堂. 边坡稳定的块体单元法分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 20 - 24.(Ren Qingwen, Yu Tiantang. Slope stability analysis with block element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 20 - 24.(in Chinese))
- [26] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明. 滑坡稳定性评价方法的探讨[J]. *岩土力学*, 2003, 24(4): 545 - 548.(Shi Weimin, Zheng Yingren, Tang Boming. Discussion on stability analysis method for landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 545 - 548.(in Chinese))
- [27] 夏元友, 李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(7): 1 087 - 1 091.(Xia Yuanyou, Li Mei. Evaluation method research of slope stability and its developing trend[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 1 087 - 1 091.(in Chinese))
- [28] 张国祥, 刘宝琛. 边坡滑动面三维空间有限元分析[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(4): 25 - 29.(Zhang Guoxiang, Liu Baochen. Analysis of slope slip surface by three-dimensional finite element method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(4): 25 - 29.(in Chinese))
- [29] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3 552 - 3 558.(Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction fem[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3 552 - 3 558.(in Chinese))
- [30] Jiang C G, He Y, Yan L M. Mathematical simulation and observation of ground subsidence basin in mining area[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, 15(Supp.1): 17 - 19.