

元星, 许强, 郑光, 等. 降雨诱发顺层岩质及土质滑坡动态预警力学模型[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 038 - 042. [Qi Xing, Xu Qiang, Zheng Guang, et al. Dynamic mechanics early warning model of rainfall induced bedding rock and soil landslide [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 038 - 042.]

降雨诱发顺层岩质及土质滑坡 动态预警力学模型*

元星, 许强, 郑光, 胡泽铭

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 对于降雨诱发的顺层岩质滑坡, 当滑坡后缘有裂隙存在时, 水通过裂隙渗入坡体内部导致滑带土的软化和抗剪强度减小, 同时, 由于裂隙水的静水压力以及扬压力的影响, 滑坡体稳定性随降雨而动态变化; 对于降雨诱发的土质滑坡, 坡体的增重和滑面的抗剪强度降低使滑坡体稳定性不断变化。通过考虑岩质滑坡后缘裂隙静水压力、扬压力、滑面软化的动态变化过程以及土质滑坡浸润面高度、软化作用的动态变化过程建立了这两类滑坡的稳定性系数预警模型, 并验证了模型在顺层岩质滑坡中的准确性。

关键词: 滑坡; 降雨; 顺层岩质; 土质力学模型; 预警

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)03-0038-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.008

岩质滑坡与土质滑坡的坡体结构不同, 降雨诱发的这两类滑坡机理也有明显差别。岩质滑坡的竖向张裂缝为重要导水通道, 降雨通过裂缝进入坡体内部和滑动面, 并分别在后缘竖向裂缝和底滑面静水压力和扬压力, 由此影响斜坡的稳定性; 土质滑坡中降雨主要通过影响地下水位和坡体的增重对斜坡稳定性产生影响。E. Hoek^[1]在对后缘有张裂缝的楔形岩质边坡做破坏分析时, 对滑面处水压力分布模式作了假设, 最早提出了裂隙水压力和扬压力的分布, 国内外诸多学者对平缓岩层滑坡的成因机理也进行了探讨^[2-8], 王兰生^[9]等对平缓顺层岩质滑坡提出了“平推式滑坡”理论, 认为岩体裂缝中充水的静水压力和沿滑移面空隙水的扬压力对滑坡起了非常重要的作用。黄润秋^[10]进一步提出对于缓倾地层产生的大规模滑坡, 裂隙水压力和地下水的双重作用是主要诱发因素。许强^[11]通过分析四川省南江县兴马中学滑坡和大河中学滑坡, 提出了板梁状滑坡滑动机制, 认为在强降雨条件下, 平行于坡面的张裂缝被快速充水至某一临界高度后, 强大的静水压力将外侧岩体整体平推出去。这类岩质滑坡均为降雨导致后缘拉裂充水, 在后缘静水压力和滑移面处的浮托力联合作用下, 推动滑坡平移, 一般情况下, 裂隙水压力分布模式假设为一个静态的水文条件, 可能仅代表在特大暴雨条件下斜坡中水

压力的实际最大值。但降雨是一个动态过程, 往往持续多天, 在整个降雨过程中, 岩质滑坡地下水压力究竟是如何动态变化的, 滑动面上由于降雨浸润作用导致的随抗剪强度参数随时间减小的特征对斜坡稳定性的影响研究也较少。对于岩质和土质滑坡, 滑动面的抗剪强度可能随着浸水时间产生软化效应, 其稳定性随降雨的动态变化过程并未在静态的极限平衡法力学模型中体现出来。

因此, 本文通过考虑滑坡体 c, φ 值随降雨入渗而变化的特征, 结合极限平衡法得到滑坡稳定性随降雨的动态变化过程, 建立单体滑坡预警的稳定性力学概化模型。

1 顺层岩质滑坡力学模型

在降雨作用下, 水对顺层岩质滑坡的主要影响为降雨沿滑坡后缘裂隙渗入并对裂隙壁面产生的静水压力, 也对潜在滑动面产生扬压力, 随着降雨持续, 滑坡体裂缝中的水位不断积聚上升, 裂隙中的水在底滑面位置由后缘向前方不断渗透, 呈动态变化, 而裂隙水的高度也随时间不断变化, 滑坡体的稳定性也由于裂隙水和底部扬压力的影响而变化。同时, 滑带岩土体随雨水的浸润而产生抗剪强

* 收稿日期: 2015-01-15 修回日期: 2015-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB733200); 中国地质调查局地质调查项目(水[2014]02-028-004); 四川省科技支撑计划(2012SZ0066)

作者简介: 元星(1988-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事地质工程相关研究. E-mail: qixing2009@163.com

度随时间增长减小的软化特性,使滑坡体的整体稳定性不断降低。

这类滑坡的形成机制可简化为单个裂缝的顺层岩质滑坡,采用极限平衡法进行解析计算,分析滑坡体稳定性随整个降雨过程的变化情况,获得滑坡体稳定性系数 K 值随滑坡后缘拉裂缝中静水压力和底滑面扬压力以及滑带抗剪强度的不断改变而呈现出的动态变化规律,并可采用稳定性系数接近或达到临界平衡状态时构建降雨诱发顺层岩质滑坡的物理预警模型。考虑滑坡体中裂隙水、扬压力、内摩擦角和内聚力均随时间产生变化,假设滑坡体作整体运动,滑面为直线,其受到的软化作用衰减幅度相同。

设某一滑坡体岩层倾角为 θ ,后缘裂缝竖直的岩质斜坡,潜在滑面总长为 L ,地下水从 C 点已经入渗到潜在滑面 A 点, AC 的高度为 h ,那么此时后缘裂缝内已经充水并产生了一定的水头高度为 h_w ,在经过时间 t_f 过后,地下水刚好渗流至 O 点贯通, t_f 为地下水由后缘向坡体前缘渗流贯通的总时间。由于该点底滑面上的地下水为持续渗流状态, AB 段的扬压力呈三角形分布,为了简化方便,本文考虑 B 点此时的水头为 0,在 $t(t < t_f)$ 时刻,地下水运移到 B 点,长度为 x ,在 $t(t > t_f)$ 时刻,地下水运移到 O 点,长度为 L ,假设滑动面内摩擦角为 φ ,粘聚力为 c ,如图 1 所示。

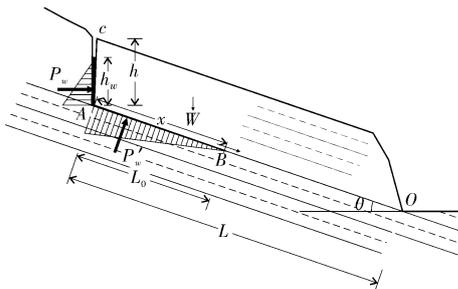


图 1 顺层岩质滑坡极限分析法示意图

极限平衡分析法滑坡体稳定性系数 K 值为:

$$K = \frac{(w \cos \theta - P'_w \sin \theta) \tan \varphi + cL}{w \sin \theta + P_w \cos \theta} \quad (1)$$

式中: w 为滑坡体重力, θ 为岩层倾角, P'_w 地下水扬压力, P_w 为静水压力等效集中荷载, c 、 φ 为滑坡体粘聚力和内摩擦角, L 为潜在滑面总长。

滑坡体重力 w 为:

$$w = rhL \quad (2)$$

式中: r 为坡体岩土体重度, h 为坡面到潜在滑面的垂直高度。

滑坡体地下水扬压力为:

$$P'_w = \frac{1}{2} r_w h_w x \quad (3)$$

式中: r_w 为水的重度, h_w 为裂缝充水高度, x 为滑坡体滑面扬压力长度。

裂隙水作用在裂隙壁面的静水压力为:

$$P_w = \frac{1}{2} r_w h_w^2 \quad (4)$$

带入以上参数后可得到坡体的稳定性系数 K 值为:

$$K = \frac{(rhL \cos \theta - \frac{1}{2} r_w h_w x - \frac{1}{2} r_w h_w^2 \sin \theta) \tan \varphi + cL}{rhL \sin \theta + \frac{1}{2} r_w h_w^2 \cos \theta} \quad (5)$$

式中: h_w , x , c , φ 值随着浸水时间的变化而变化,与降雨时长有关,记为 $h_w(t)$, $x(t)$, $c(t)$, $\varphi(t)$ 。 $h_w(t)$ 可以通过对滑坡体的实际监测获得裂缝充水高度与时间的关系, $x(t)$ 与土体滑面的渗透系数有关,

$t_f = \frac{L}{v}$ 。当渗透时间小于地下水渗流贯通的总时间

t_f 时,渗透距离为 $x(t)$,当渗透时间大于地下水渗流贯通的总时间 t_f 时,渗透距离为坡体总长 L 。滑带岩土体的软化规律可通过实验得到 c , φ 与浸水时间的规律公式 $c(t)$, $\varphi(t)$, 因此,稳定性系数 K 也是跟时间有关的函数,记为 $K(t)$ 。将以上参数代入稳定性系数公式中可得到以下公式:

当浸水时间 $t < t_f$ 时,稳定性系数 K 值为:

$$K(t) = \frac{(rhL \cos \theta - \frac{1}{2} r_w h_w(t) x(t) - \frac{1}{2} r_w h_w(t)^2 \sin \theta) \tan \varphi(t) + c(t)L}{rhL \sin \theta + \frac{1}{2} r_w h_w(t)^2 \cos \theta} \quad (6)$$

当浸水时间 $t > t_f$ 时,稳定性系数 k 值为:

$$K(t) = \frac{(rhL \cos \theta - \frac{1}{2} r_w h_w(t)L - \frac{1}{2} r_w h_w(t)^2 \sin \theta) \tan \varphi(t) + c(t)L}{rhL \sin \theta + \frac{1}{2} r_w h_w(t)^2 \cos \theta} \quad (7)$$

根据式(7)可以得到滑坡体稳定性系数 K 随滑坡体浸水时间的关系。当滑坡体处于极限平衡状态时,令稳定性系数 $K = 1$,把 r 、 h 、 L 、 θ 、 r_w 的值和 $x(t)$, $c(t)$, $\varphi(t)$ 三个与时间 t 的关系式代入上式中,即可得出 $K = 1$ 时滑坡体达到极限平衡状态时所需要的时间 t 。

2 顺层岩质滑坡实例分析

为了检验这类岩质滑坡预警思路和公式的有效性,采用 2011 年四川省南江县“9.16”强降雨诱发的窑厂坪滑坡和石板沟滑坡进行验证。

2011 年 9 月 6 日,南江县境内普降中到大雨,降雨断断续续直到 9 月 15 日,前期过程累积降雨量达到 268.1 mm。9 月 16 日 20:00 左右,区域内再次出现大暴雨,连续 2 d 日均降雨强度分别达到 250.4 mm、179.1 mm,超过了 9 月份的月平均降雨量 182.6 mm(图 2)。南江县缓倾单斜顺层构造较发育,由于强降雨的作用,此次降雨导致窑厂坪滑坡和石板沟滑坡两处典型的顺层岩质滑坡发生。

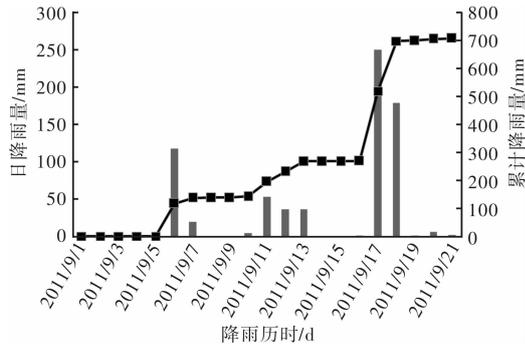


图2 四川省南江县2011年“9.16”强降雨过程

窑厂坪滑坡位于南江县高桥乡三星村，9月16日开始的长历时、高强度降雨作用使滑坡体后缘裂隙中的水头高度迅速增加，最终导致窑厂坪发生大规模滑坡，造成65户住户约275间房屋被毁，滑坡堆积体将前缘主干公路掩埋，并堵塞岷江。

窑厂坪滑坡长650 m，宽约580 m，相对高差150 m，滑体平均厚度15 m，总体积约 3.0×10^6 m³，为大型顺层岩质滑坡。滑面主要为灰白色、紫红色砂泥岩互层，倾向为 $330^\circ \sim 350^\circ$ ，倾角 $8^\circ \sim 16^\circ$ ，滑坡结构特征见滑坡前典型工程地质剖面图(图3)。

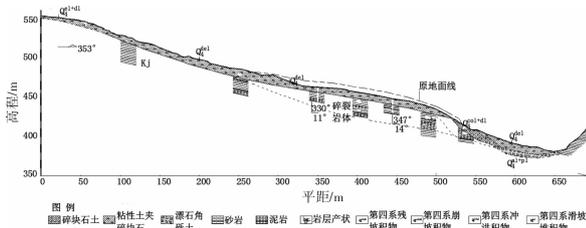


图3 窑厂坪滑坡工程地质剖面图

石板沟滑坡位于南江县沙河镇将营村，9月18日上午10时20分左右，在强降雨作用下山体发生大规模滑坡，导致487间房屋被毁，多人伤亡。

石板沟滑坡长600 m，平均宽约250 m，滑坡堆积体长度超过1 000 m，相对高差290 m，滑体平均厚度17 m，滑体体积约 4.0×10^6 m³，为大型顺层岩质滑坡。滑面主要为薄层状泥岩软弱夹层，岩层产状 $170^\circ \angle 12^\circ$ 。滑坡结构特征见石板沟滑坡前典型工程地质剖面图(图4)。

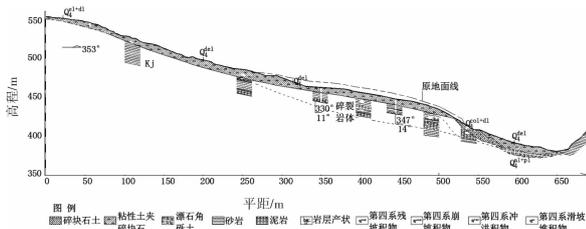


图4 石板沟滑坡工程地质剖面图

根据两处典型滑坡的基本特征参数，采用前文推导的稳定性系数公式计算出两滑坡在“9.16”降雨过程中稳定性系数K值的变化过程，采用取样得到的

滑带土进行室内室内实验得到内聚力和内摩擦角随浸水时间的变化规律^[12]，内摩擦角 $\varphi = 19.9 -$

$$3.9(\ln t) (\text{°}), \text{粘聚力 } c = 11.199 + \frac{44.181}{1 + (\frac{t}{6.347})^{2.55}}$$

(kPa)，同时，根据水文报告，区域内的滑动面土体渗透速率约为 $v = 50$ m/d。

窑厂坪滑坡岩层平均倾角为 10° ，坡长 $L = 650$ m，坡体重度 $w = 122\ 042$ (kN)；石板沟滑坡岩层倾角为 12° ，坡长 $L = 600$ m，坡体重度 $w = 224\ 400$ (kN)。根据以上参数计算坡体在此次降雨过程中稳定性系数变化值，得到窑厂坪滑坡、石板沟滑坡稳定性系数随降雨时间的变化如图5、图6所示。

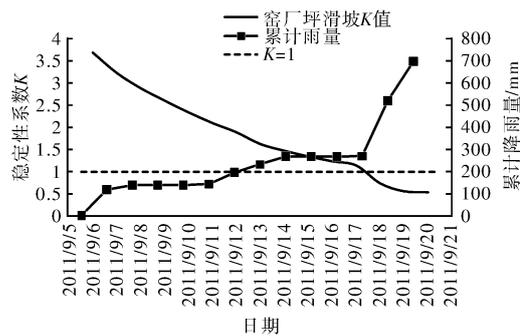


图5 窑厂坪滑坡稳定性系数与降雨关系

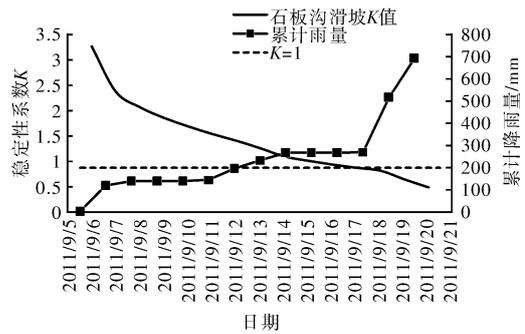


图6 石板沟滑坡稳定性系数与降雨关系

可见，这类岩质滑坡与后缘静水压力以及滑带浸水软化关系密切，对于这类缓倾顺层岩质滑坡，滑坡稳定性系数随着随着降雨强度及降雨历时的变化而变化。随着降雨过程的持续，滑坡稳定性系数K值逐渐下降，结合降雨过程分析及考虑滑面软化效应的稳定性评价方法对这类缓倾顺层岩质滑坡的形成过程进行预测得到的结果与实际情况较为吻合。

3 浅层土质滑坡力学模型

土质滑坡在降雨过程中的稳定性主要受降雨入渗的影响，降雨渗入土体后导致土体自重增加，土体粘聚力和内摩擦角随含水量的变化而变化，从而影响土体抗剪强度，降雨成为了土质滑坡的重要

致滑因素^[13]。若土体后缘也有拉裂缝存在,降雨通过拉裂缝进入土体内部,并到达潜在滑动面,增加滑动面附近孔隙水压力,并由于软化和有效应力减小双重作用,削弱土体抗剪强度,最终导致滑坡。

因此,可以以斜坡的稳定性系数 K 作为基本依据,采用解析方法分析整个降雨过程中斜坡稳定性系数随土体重量增加、渗透压力和滑带抗剪强度的不断改变的动态变化规律,并以稳定性系数接近或达到临界平衡状态例如 $K = 1$ 作为预警判据,构建降雨诱发缓倾角浅表层土质滑坡的物理预警模型。

假定土体为圆弧滑动面,滑面总长为 L ,在降雨过程中随着降雨时间 t 的变化,坡体内含水量也随之变化,对应土体的抗剪强度参数也产生变化。假设土体滑动面的内摩擦角为 φ ,粘聚力为 c ,如图 7 所示。

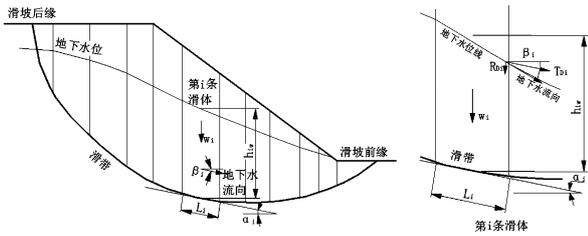


图 7 土质滑坡极限分析法示意图^[14]

极限平衡分析法滑坡体稳定性系数 K 值为:

$$K = \frac{\sum (w_i \cos \alpha_i - N_{wi} - R_{Di}) \tan \varphi_i + c_i L_i}{\sum (w_i \sin \theta + T_{Di})} \quad (8)$$

式中:孔隙水压力 $N_{wi} = r_w h_{iw} L_i \cos \alpha_i$,即近似等于浸润面以下土体的面积 $h_{iw} L_i \cos \alpha_i$,乘以水的容重 r_w 。渗透压力产生的平行滑面分力为:

$$T_{Di} = r_w h_{iw} L_i \sin \beta_i \cos (\alpha_i - \beta_i) \quad (9)$$

渗透压力产生的垂直滑面分力为:

$$R_{Di} = r_w h_{iw} L_i \sin \beta_i \sin (\alpha_i - \beta_i) \quad (10)$$

式中: K 为稳定性系数, h_{iw} 为第*i*条块浸润面高度, w_i 为第*i*条块的重量(kN/m), c_i 为第*i*条块的内聚力(kPa), φ_i 为第*i*条块的内摩擦角($^\circ$), L_i 为第*i*条块滑面长度(m), α_i 为第*i*条块滑面倾角($^\circ$), β_i 为第*i*条块地下水流向($^\circ$)。

带入以上参数后可得到坡体的稳定性系数 K 值为:

$$K = \frac{\sum (w_i \cos \alpha_i - r_w h_{iw} L_i \cos \alpha_i - r_w h_{iw} L_i \sin (\alpha_i - \beta_i)) \tan \varphi_i + c_i L_i}{\sum (w_i \sin \theta + r_w h_{iw} L_i \sin \beta_i \cos (\alpha_i - \beta_i))} \quad (11)$$

式中:稳定性系数 K 随时间的变化而变化,记为 $K(t)$; h_{iw} , c_i , φ_i 值随着浸水时间的变化而变化,与降雨时长有关,记为 $h_{iw}(t)$, $c_i(t)$, $\varphi_i(t)$ 。 $h_{iw}(t)$ 可以通过对滑坡体地下水水位的实际监测获得浸润高度与降雨时间的关系,对于不同特性的土体,可以通过实验获得滑动面土体 c_i , φ_i 值与浸水时间的关系公式 $c_i(t)$, $\varphi_i(t)$, 将以上参数代入稳定性系数公

式中可得到稳定性系数 K 值为:

$$K = \frac{\sum (w_i \cos \alpha_i - r_w h_{iw}(t) L_i \cos \alpha_i - r_w h_{iw}(t) L_i \sin \beta_i \sin (\alpha_i - \beta_i)) \tan \varphi_i(t) + c_i(t) L_i}{\sum (w_i \sin \theta + r_w h_{iw}(t) L_i \sin \beta_i \cos (\alpha_i - \beta_i))}$$

根据公式可以得到滑坡体稳定性系数 K 随坡体滑动面浸水时间的关系。当滑坡体处于极限平衡状态时,令稳定性系数 $K = 1$,把 w_i , r_w , L_i , α_i , β_i , θ 的值和 $h_{iw}(t)$, $c_i(t)$, $\varphi_i(t)$, 三个与时间 t 的关系式代入上式中,即可得出 $K = 1$ 时滑坡体处于极限平衡状态时所需要的时间 t 。

4 结论

降雨过程中,斜坡中地下水位的实时动态变化规律可以通过斜坡地下水位的实际观测得到,如果没有地下水位观测,也可以利用数值模拟软件(如 SEEP/W 专业地下水渗流分析软件)分析计算降雨过程中斜坡地下水位的动态变化过程。降雨过程中,滑带土抗剪强度衰减规律可通过试验得到。图 8 中显示了同时考虑降雨过程中地下水位变化以及滑带土抗剪强度变化等因素后,斜坡的稳定性系数动态变化情况。若将斜坡稳定性系数 $K(t) = 1$ 作为降雨型滑坡预警判据,便可实现降雨型滑坡的动态预警。

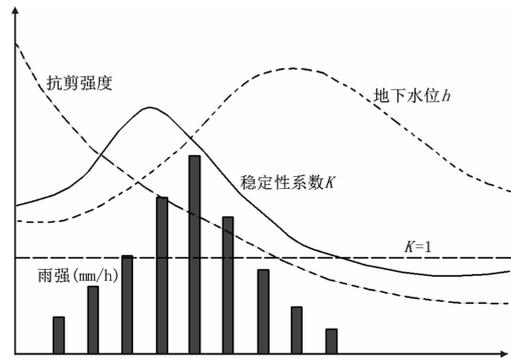


图 8 稳定性系数动态变化示意图

参考文献:

- [1] Hoek E, Brown E T. 岩石地下工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [2] 李保雄, 苗天德. 红层软岩顺层滑坡临滑预报的强度控制方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (supp. 2): 2703 - 2706.
- [3] 范宣梅, 许强, 黄润秋, 等. 四川宣汉天台特大滑坡的成因机理及排水工程措施研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33 (5): 448 - 454.
- [4] 邵江, 周德培, 周应华, 等. 含竖向裂缝的近水平层状岩体边坡的动力学分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39 (7): 94 - 98.
- [5] 罗冲, 殷坤龙, 汪洋. 裂隙水诱发缓倾角滑坡变形破坏机理初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31 (5): 12 - 14.
- [6] 吉随旺, 张俾元, 王凌云, 等. 近水平软硬互层斜坡变形破

- 坏机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 49-52.
- [7] 吕美君, 晏鄂川, 程江涛. 近水平岩层滑坡启动的临界水柱高度分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 207-211.
- [8] 苏爱军, 刘红星, 孙云志, 等. 三峡库区水平层状滑坡成因研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(3): 427-430.
- [9] 王兰生, 张倬元. 斜坡岩体变形的动力学机制[M]//水文地质工程地质论丛. 北京: 地质出版社, 1986.
- [10] 黄润秋, 赵松江, 颌肖冰, 等. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 13-15.
- [11] 许强, 范宣梅, 李园, 等. 板梁状滑坡形成条件、成因机制与防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 242-250.
- [12] 胡泽铭. 四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [13] 熊炜, 范文. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 228-233.
- [14] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0218-2006 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

Dynamic Mechanics Early Warning Model of Rainfall Induced Bedding Rock and Soil Landslide

Qi Xing, Xu Qiang, Zheng Guang and Hu Zeming

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: For rainfall induced bedding rock slope, when the back landslide has fissures, water leads to softening sliding zone and reduce shearing strength. Because of the influence of fissure water hydrostatic pressure and uplift pressure, the stability of the landslide have dynamic change with rainfall; for the soil landslide induced by rainfall, the slope body weight increase and the shear strength reduction makes the stability of the landslide changing. By considering the dynamic change process of hydrostatic pressure, uplift pressure, soften sliding surface in rock landslide and phreatic surface height, softening effect in soil landslide to establish the stability coefficient early warning model of the two kinds of landslide, and validate the model accuracy in layered rock landslide.

Key words: landslide; rainfall; layered rock; soil mechanical model; early warning

(上接第 28 页)

The Comparison between GPS PWV and $PM_{2.5}/PM_{10}$ in Beijing during the Period of APEC

Liu Yanping¹, Wang Yong² and Li Jiangbo³

(1. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. Hebei Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: During the period of APEC, the air quality of Beijing was fine. Is the correlation of GPS PWV (Precipitable Water Vapor) and $PM_{2.5}/PM_{10}$ positive? The correlation between GPS PWV and $PM_{2.5}/PM_{10}$ of Beijing from November 4th to 16th, 2014 is compared. It is concluded that there is significantly positive correlation between GPS PWV and $PM_{2.5}/PM_{10}$, which the correlation coefficient is greater than 0.5 and the best correlation coefficient reached to 0.91. The results indicate that during fine air quality there is obvious positive correlation between GPS PWV and $PM_{2.5}/PM_{10}$.

Key words: $PM_{2.5}/PM_{10}$; Precipitable Water Vapor; GPS; correlation coefficient; APEC; Beijing