

# 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型 与稳定性分析

邹宗兴<sup>1</sup>, 唐辉明<sup>1</sup>, 熊承仁<sup>2</sup>, 吴益平<sup>1</sup>, 刘 晓<sup>2</sup>, 廖少波<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 大型顺层岩质滑坡广泛存在于自然界中, 是滑坡的重要类型之一, 也是滑坡领域关注与研究的重点。根据滑坡滑面发展形态, 将顺层岩质滑坡划分成两大类: 前进式渐进破坏模式和后退式渐进破坏模式。从力学角度揭示顺层岩质滑坡渐进破坏过程的本质是滑坡力学参数弱化的过程。具体体现在滑带本构方程中为初始剪切刚度的降低。由此, 定义弱化后滑带的剪切刚度与初始剪切刚度比值为滑带弱化系数, 并引入 S 型曲线表述滑带弱化系数空间特征。在总结大型顺层岩质滑坡特点的基础上, 提出渐进锁固力学模型, 同时给出该模型的数学表达式。该模型能很好地体现滑坡渐进破坏过程中滑带力学参数的时效性及空间变异性特点。最后, 给出该地质力学模型下渐进破坏过程中斜坡稳定性计算公式及步骤, 并应用于武隆县鸡尾山滑坡中, 分析其临滑前滑坡稳定性变化情况。

**关键词:** 边坡工程; 顺层岩质滑坡; 鸡尾山滑坡; 渐进破坏; 滑带本构方程; S 型曲线

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)11 - 2222 - 10

## GEOMECHANICAL MODEL OF PROGRESSIVE FAILURE FOR LARGE CONSEQUENT BEDDING ROCKSLIDE AND ITS STABILITY ANALYSIS

ZOU Zongxing<sup>1</sup>, TANG Huiming<sup>1</sup>, XIONG Chengren<sup>2</sup>, WU Yiping<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>, LIAO Shaobo<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Large consequent bedding rockslides widely exist in nature, which are one of the major types of landslides and have been the focus in landslide research area. Based on development morphology of sliding surface, consequent bedding rockslide is divided into two categories: advancing consequent bedding rockslide and regressive consequent bedding rockslide. It reveals from the mechanical point that the nature of progressive failure of consequent bedding rockslide is weakening process of mechanical parameters of landslide. It reflects in the constitutive equation of sliding zone is the reduction of the initial shear stiffness. Thus, ratio of the shear stiffness of weaken sliding zone to initial shear stiffness is defined as the weakening coefficient of sliding zone; and the S-shaped curve is introduced to depict the spatial characteristics of the weakening coefficient in sliding zone. Based on the characteristics of large consequent bedding rockslide, the progressive-locking mechanical model is proposed; and its mathematical expression is given. The model could well reflect the characteristics of the timeliness and spatial variability of mechanical parameters of sliding zone in the progressive failure process of the

**收稿日期:** 2012 - 05 - 17; **修回日期:** 2012 - 06 - 28

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB710606); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41102195); 中国地质调查局西部地区复杂山体成灾机制研究项目(1212011014030)

**作者简介:** 邹宗兴(1988 -), 男, 2009年毕业于中国地质大学(武汉)工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学及滑坡演化机制等方面的研究工作。E-mail: zouzongxing123@126.com。通讯作者: 唐辉明(1962 -), 男, 博士, 现任教授。E-mail: tanghm@cug.edu.cn

landslide. Finally, formulas and steps for calculating the stability of progressive failure landslide under this model are put forward. The model is applied to the case of Jiweishan landslide in Wulong county to analyze its stability before sliding.

**Key words:** slope engineering; consequent bedding rockslide; Jiweishan landslide; progressive failure; constitutive equation of sliding zone; S-shaped curve

## 1 引言

顺层岩质边坡是处于褶皱构造两翼, 岩层倾角小于斜坡坡度的一类斜坡体, 以沿软弱带顺层剪切方式破坏为主<sup>[1-2]</sup>。广泛发育于我国中西部地区, 是我国滑坡主要类型之一。此类滑坡灾害频繁发生, 所造成的损失与危害也较大<sup>[3-5]</sup>。据有关统计, 山西省高速公路砂岩夹泥岩或煤层地型顺层滑坡占全省滑坡的 50.7%<sup>[6]</sup>。此外, 在重庆乌江流域、万州、鄂西等地区<sup>[7]</sup>, 也广泛发育有硬岩(灰岩、砂岩)夹软岩(煤线、泥岩)地型控制的大型顺层滑坡, 严重威胁着人民的财产与生命安全。

顺层滑坡具有显著区域性特点, 与所处的地质环境密切相关。大型顺层滑坡通常具有以下特点: (1) 明显的软弱夹层构成顺层滑坡的滑带, 常为泥岩、煤层或遇水极易软化的砂页岩等软弱岩层; (2) 由于受控于软弱层, 大型岩质滑坡表现出较为明显的蠕变特性; (3) 具有显著地渐进破坏特点, 这不仅仅表现在滑坡的宏观变形上, 也体现在滑坡的力学参数的渐进退化方面。

对于顺层岩质斜坡渐进破坏机制, 各学者做了大量的研究<sup>[1, 8-16]</sup>, 朱晗迺等<sup>[11-13]</sup>将顺层斜坡破坏问题概化为板梁弯曲失稳问题, 给出了其稳定性位移判据; 刘爱华和王思敬<sup>[14]</sup>首次提出了平面渐进破坏模型, 并给出了该模型的稳定性计算方法; 余飞等<sup>[1, 15-16]</sup>采用了基于接触单元模型的数值模拟方法, 探讨了顺层岩质高斜坡渐进变形失稳机制。然而, 目前的研究仍存在如下缺陷: (1) 板梁破坏模型只针对长条薄层状岩质斜坡的破坏分析, 而对厚层状顺层斜坡不具适用性。(2) 目前的研究均未体现顺层岩质斜坡的渐变蠕滑破坏特性。(3) 常用的极限平衡法计算斜坡稳定性时所取的力学参数均为定值, 而实际中, 斜坡力学参数随渐进破坏是损伤弱化的过程。因此, 需考虑力学参数的时效性及空间上的变异性。(4) 利用传统极限平衡法进行顺层岩质斜坡稳定性计算时, 假设岩土体介质为钢塑性材料, 而这种假设未能充分反映滑带抗剪应力和位

移变化的这一特性。本文针对顺层岩质滑坡特点及目前分析顺层岩质斜坡方法所存在的问题, 提出一种新的力学模型: 渐进锁固力学模型。并给出了该模型下顺层滑坡稳定性求解思路。

## 2 大型顺层岩质斜坡渐进破坏模式

斜坡破坏是坡体累积变形发展的最终状态<sup>[17]</sup>。顺层斜坡从变形发展至破坏时, 空间上存在 3 种形态: 蠕滑段、过渡段、剪切段。剪切段是滑坡蠕滑发展的最终阶段, 而过渡段则是介于另两者之间的一种滑带形态。为了更清晰地剖析顺层滑坡, 建立其力学模型, 将顺层岩质滑坡从滑面空间发展形态上划分为两大类: 一类滑带由后缘向前端贯通, 破坏前空间上为后端剪切段、前端蠕滑段(表现为前端锁固(见图 1)), 该类型称为前进式渐进破坏模式; 另一类模式恰与第一类相反, 滑带由前缘向后缘逐渐贯通, 破坏时空间上为前端为剪切段、后端为蠕滑段(表现为殿后锁固<sup>[18]</sup>(见图 2)), 称该类型为后退式渐进破坏模式。

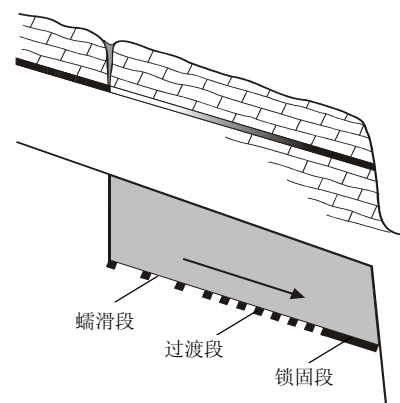


图 1 前进式顺层岩质滑坡概化模型

Fig.1 Generalized model of advancing consequent bedding rockslide

前进式渐进破坏型顺层滑坡通常发生于中倾角 ( $>20^\circ$ ) 岩质斜坡中。如 2007 年发生于重庆市彭水县城区的沙子口滑坡<sup>[19]</sup>, 2009 年发生于重庆市的鸡尾山滑坡<sup>[20-21]</sup>。该类滑坡的形成主要是由于坡体后缘张拉应力作用, 加之多处于灰岩地区, 溶沟、

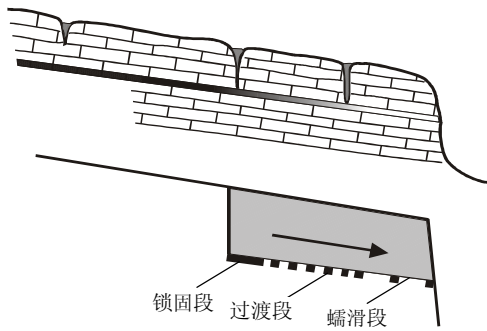


图2 后退式顺层滑坡概化模型

Fig.2 Generalized model of regressive consequent bedding rockslide

溶槽极为发育，甚至直切底部软弱层。地表水由后缘裂缝渗入，加剧了斜坡后缘由蠕滑向剪切状态发展，而前端仍为蠕滑状态。宏观上表现为后缘位移大于前端，前段常存在锁固段。

后退式渐进破坏顺层滑坡通常发生于缓倾角 ( $<10^\circ$ ) 岩层地区。如 1981 年在特大暴雨的诱发下，四川发生了大量缓倾角 ( $<10^\circ$ ) 顺层滑坡<sup>[22]</sup>，2004 年发生于四川宣汉县的天台乡特大型滑<sup>[23]</sup>。这类滑坡宏观上都表现为前缘位移大、后部位移小。

大量的岩体力学试验表明，岩石材料表现出软化特性居多，因此，本文对滑带的研究都是基于材料应变软化这一特性展开。

### 3 滑带本构模型

滑带本构方程是反映剪应力与剪切位移之间关系的方程式。由于滑带具有明显的软化特性，因此，可引入负指数型本构方程<sup>[24-26]</sup>来反映滑带这一特性：

$$\tau(u) = G_s \frac{u}{h} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中： $G_s$  为剪切初始模量， $h$  为蠕滑带的厚度， $u_0$  为平均测量长度， $m$  为均匀性指标或称脆性指数， $u$  为滑体沿滑床滑动方向错动的位移， $\tau(u)$  为滑带剪应力。图 3 给出了不同  $m$  下滑带本构曲线形态。

滑带本构曲线形态由  $G_s$ ， $m$ ， $u_0$  所控制。 $G_s$  控制着模型曲线的初始斜率，反映软弱结构面刚度大小； $m$  越大，材料的均匀性及脆性程度越大，其软化特性越明显<sup>[24]</sup>； $u_0$  是与应力水平有关的参数，控制着曲线峰值点的位置，法向应力水平越高， $u_0$  值也越大。实际中，滑坡的峰值强度位移也随滑坡厚度增加而提高。

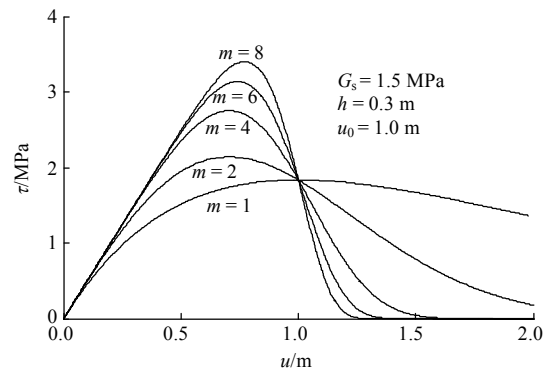


图3 不同  $m$  值下滑带本构曲线

Fig.3 Constitutive curves of sliding zone for different values of  $m$

对式(1)求导可得

$$\tau'(u) = \frac{G_s}{h} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \left[1 - m \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1}\right] \quad (2)$$

令  $\tau'(u) = 0$ ，则得曲线峰值强度对应的位移  $u_r$  为

$$u_r = u_0 \left(\frac{1}{m}\right)^{1/m} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)中，得到峰值强度为

$$\tau_{\max} = \frac{G_s}{h} u_0 \left(\frac{1}{m}\right)^{1/m} \exp\left(-\frac{1}{m}\right) \quad (4)$$

对式(2)求导可得

$$\tau''(u) = \frac{G_s}{h} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \left[-\frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1}\right] \left[1 + m - m \left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] \quad (5)$$

令  $\tau''(u) = 0$ ，得模型曲线拐点处的位移  $u_l$  为

$$u_l = u_0 \left(\frac{m+1}{m}\right)^{1/m} \quad (6)$$

对滑带本构曲线在峰值强度前进行泰勒级数展开，得到  $\tau_0(u) \approx \frac{G_s}{h} u$ ，其截断相对误差为

$$\delta(\tau) = \frac{\Delta\tau}{\tau(u)} = \frac{\tau(u) - \tau_0(u)}{\tau(u)} = \frac{\exp(-(u/u_0)^m) - 1}{\exp(-(u/u_0)^m)} \quad (7)$$

由式(6)容易得到不同  $m$  值下的误差曲线簇，如图 4 所示。

由图 4 可以看出，滑带本构曲线在蠕滑阶段可以很好地用线性概化，随  $m$  值增大，蠕滑阶段线性

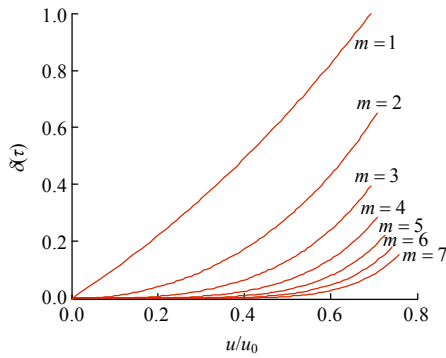


图 4 不同 m 值下的误差曲线簇

Fig.4 Series of error curves for different values of m

概化越准确。如图 5 所示，随着位滑带移的增大，滑带经历软化阶段(过渡段)后，最终进入剪切阶段。

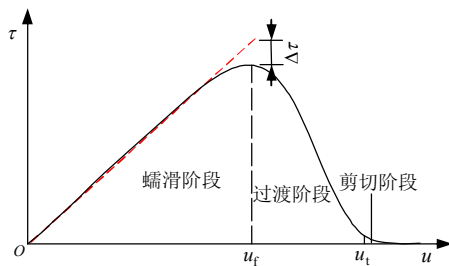


图 5 滑带本构曲线

Fig.5 Constitutive curve of sliding zone

## 4 滑坡渐进破坏力学参数变化规律

### 4.1 力学参数变化基本规律

在外界地质营力，如在雨水等作用下，岩土材料会发生弱化，通常表现为抗剪强度参数  $c$ ， $\varphi$  降低。具体反映到滑带本构模型中，可通过用剪切刚度的弱化来反映滑带强度  $c$ ， $\varphi$  的降低程度。

如前所述，不同的  $u_0$  对应着不同级别的正应力  $\sigma$ ，设两者对应关系为  $\sigma = Pu_0$ ，其中， $P$  为  $\sigma$  与  $u_0$  的关系系数，将式(3)代入  $\sigma = Pu_0$  中得

$$\sigma = P \left( \frac{1}{m} \right)^{-1/m} u_f \quad (8)$$

令  $\xi = P \left( \frac{1}{m} \right)^{-1/m}$ ，则有  $\sigma = Pu_0 = \xi u_f$ ，也即

$\sigma$ ， $u_0$ ， $u_f$  三者有着一一对应的关系。

因此，当给定一组  $u_{0i} = \{u_{01}, u_{02}, \dots\}$ ，根据峰值强度公式(式(4))以及  $\sigma$ ， $u_0$ ， $u_f$  三者关系，可以得到如下 3 组公式：

$$(u_{0i}, \tau_{\max i}) = \left( u_{0i}, \frac{G_s}{h} u_{0i} \left( \frac{1}{m} \right)^{1/m} \exp \left( -\frac{1}{m} \right) \right) \quad (9)$$

$$(\sigma_i, \tau_{\max i}) = \left( Pu_{0i}, \frac{G_s}{h} u_{0i} \left( \frac{1}{m} \right)^{1/m} \exp \left( -\frac{1}{m} \right) \right) \quad (10)$$

$$(u_{fi}, \tau_{\max i}) = \left( \left( \frac{1}{m} \right)^{1/m} u_{0i}, \frac{G_s}{h} u_{0i} \left( \frac{1}{m} \right)^{1/m} \exp \left( -\frac{1}{m} \right) \right) \quad (11)$$

根据力学试验中获取结构面力学参数  $c$ ， $\varphi$  的基本思路，当给出一组正剪应力  $(\sigma_i, \tau_i)$  数据，通过最小二乘法拟合该组数据，即可得到  $c$ ， $\varphi$  值。因此对式(10)中的数据进行最小二乘拟合，即可得到滑带力学参数  $c$ ， $\varphi$  值。假设对(11)中的数据进行最小二乘拟合得到的直线斜率为  $K$ ，那么容易得到：

$$\varphi = \arctan(K / \xi) \quad (12)$$

称由式(11)数据拟合得到的直线(见图 6)为等效强度包络线。因为  $K$  值与剪切刚度  $G_s$  相关，进而由式(12)可知， $\varphi$  与剪切刚度也是相关的。

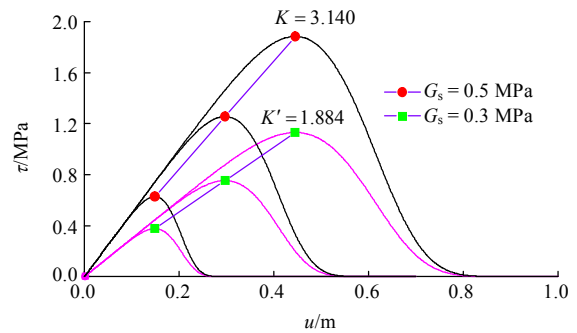


图 6 等效强度包络线

Fig.6 Envelope curves of equivalent strength

例如某滑带初始剪切刚度  $G_s = 0.5$  MPa，初始内摩擦角为  $\varphi$ ，当滑带剪切刚度弱化至 0.3 MPa 时，那么即可确定弱化后滑带的内摩擦角  $\varphi'$ 。滑带弱化前、后参数对比如表 1 所示。

表 1 滑带弱化前、后参数对比

Table 1 Comparison of parameters before and after weakening of sliding zone

$G_s /$ MPa	$u_f / m$			$\tau_{\max} / \text{MPa}$			$K /$ (MPa · m <sup>-1</sup> )
	$u_0 =$ 0.2 m	$u_0 =$ 0.4 m	$u_0 =$ 0.6 m	$u_0 =$ 0.2 m	$u_0 =$ 0.4 m	$u_0 =$ 0.6 m	
0.5	0.148 4	0.296 7	0.445 1	0.628	1.256	1.884	3.140
0.3	0.148 4	0.296 7	0.445 1	0.377	0.754	1.130	1.884

注： $h = 0.1$  m， $m = 6$ 。

由式(12)可得

$$\frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} = \frac{K'/\xi}{K/\xi} \quad (13)$$

由此可以确定弱化后滑带的内摩擦角为

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{K'}{K} \tan \varphi\right) = \arctan(0.6 \tan \varphi) \quad (14)$$

因此，材料的损伤及软化导致结构面强度参数的变化，可采用剪切刚度进行刻画。

斜坡的演化规律遵循量变到质变的规律，也就是通常所谓的斜坡渐进破坏。斜坡渐进破坏的实质是斜坡体的力学参数退化的过程，具有以下特点：

- (1) 力学参数空间上的变异性。滑带力学参数沿整个滑带分布并非一致，存在着差异，并且这种差异与滑坡的演化特征密切相关。例如在前进式顺层滑坡中，雨水从滑坡后缘裂缝渗入滑带后，使滑带后部力学参数低于未受地下水影响的前部滑带。
- (2) 力学参数的时效性。滑带力学参数随斜坡不断发展，在滑带不同部位以不同的速率退化。如本文的第一类滑坡中，当滑坡后缘的位移不断增大，滑带后部损伤也在加剧，使整个滑带力学参数由后向前递进退化。

在由结构面控制的一类滑坡中，从力学角度，可以将滑动面渐进破坏概化为剪切刚度渐进弱化的过程。如上述分析，剪切刚度的弱化可以反映通常所接受的结构面力学参数  $c, \varphi$  的降低。因此，若找到合适模式概括滑带剪切刚度弱化规律，本质上也就可以概括滑坡渐进破坏过程。

### 4.2 滑带力学参数弱化模式

所谓滑带力学参数弱化是指滑带在地下水作用及滑带滑移使滑带发生损伤等导致其力学强度降低的现象。定义滑带弱化后剪切刚度  $G'_s$  与初始剪切刚度  $G_s$  比值为滑带弱化系数，即

$$k = \frac{G'_s}{G_s} \quad (15)$$

在滑坡演化的任意时刻，滑带每个位置上都有着相应的弱化系数，每个位置上的弱化系数即构成滑带弱化系数状态曲线，其具有如下特点：(1) 在原始状态下材料未弱化，弱化系数为 1。在地下水及损伤作用下，弱化系数变小，最终会趋于一个极值。(2) 不同阶段，曲线不断发展，也体现了滑带力学参数在滑坡演化过程中的时效性特征。

不管是陆生动物、水生动物、微生物种群，还是细胞的生长，都遵循 S 型模式(见图 7)。S 型曲线的特征是数值由一个起始值渐进过渡到另一数值。这种渐进特点能够很好地反映斜坡力学参数渐进弱

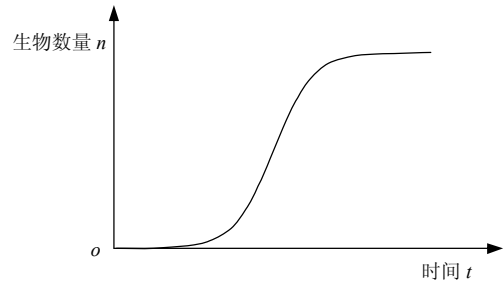


图 7 S 型增长曲线

Fig.7 S-shaped growth curve

化特性。因此，可引入 S 型曲线来表述弱化状态曲线。

下面以前进式顺层滑坡为主，论述顺层滑坡演化过程中滑带力学参数弱化的基本规律。

如图 8 所示，该类滑坡演化过程经历着如下几个阶段：(1) 材料从薄弱部位开始弱化，直至弱化系数趋于某一极值；(2) 完整的 S 型曲线形成；(3) 随着斜坡发展，S 型曲线不断向前推进；(4) S 型曲线推进到一定的位置，锁固段所承载的切向荷载达到极限时，临滑锁固段形成，滑坡进入临滑状态。

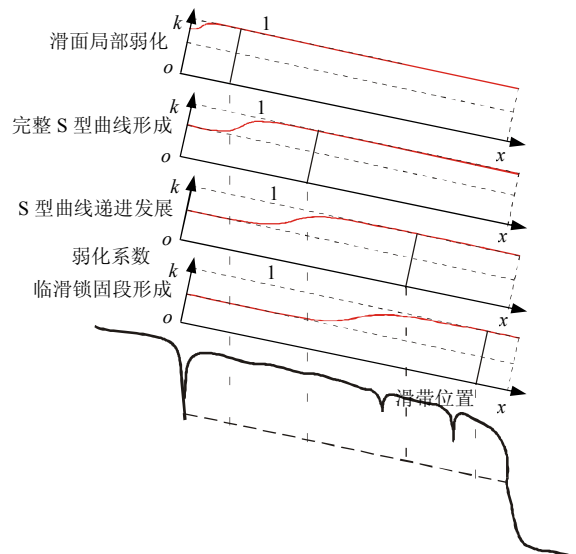


图 8 前进式顺层滑坡不同阶段弱化系数状态曲线

Fig.8 Weakening coefficient state curves at different stages for advancing consequent bedding rockslide

### 4.3 弱化系数状态曲线方程的求解

S 型弱化系数状态曲线方程可表示为

$$k(x) = \frac{A}{1 + e^{-c'(x-b)}} + H \quad (16)$$

式中： $A$  为弱化幅值； $c'$  为 S 型曲线形态系数； $b$  为阶段表征值； $H$  为弱化极限值，且  $A+H = 1$ ； $x$  为滑带空间位置。

定义 S 型曲线中，从某一极值过渡到另一极值

的宽度为渐变带宽  $\Delta x$ 。S 型弱化系数状态曲线如图 9 所示，由于 S 型曲线始终是逼近某一极限值，而不可达到该值，因此定义渐变带宽的宽度需设定一个误差限：

$$\delta(k) = \frac{1-k}{1} = 1 - \frac{1}{1+e^{-c'\Delta x/2}} = \frac{e^{-c'\Delta x/2}}{1+e^{-c'\Delta x/2}} = \frac{1}{e^{c'\Delta x/2} + 1} \quad (17)$$

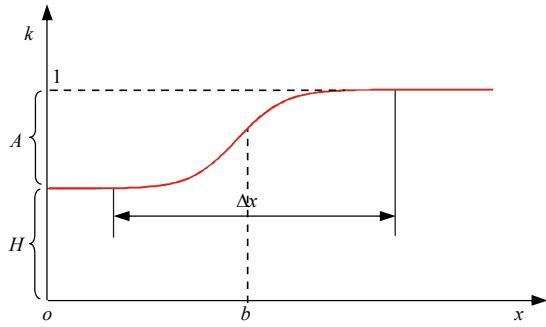


图 9 S 型弱化系数状态曲线

Fig.9 S-shaped curve of weakening coefficient

设相对误差限为 0.1%，得  $e^{c'\Delta x/2} = 999$ ，则有

$$c'\Delta x \approx 13.8 \quad (18)$$

S 型曲线方程各参数的确定。鉴于目前结构面大型原位剪切试验数据较少，特别是大型结构软化试验，因此，直接确定弱化系数有一定的难度，可借鉴材料力学软化试验。对于黏土岩、泥质胶结砂岩等软化性较强的岩石，软化系数一般取 0.4~0.6<sup>[27]</sup>。软化系数对应于弱化曲线方程中的弱化极限值  $H$ 。弱化幅值为  $A=1-H$ 。由式(18)可知，只需确定带宽  $\Delta x$ ，即可确定 S 型曲线形态系数  $c'$ 。 $b$  为 S 型曲线渐变带中点位置，表征着整个滑带演化所处的阶段。 $b$  值越接近滑带长度，表明滑坡演化越处于后期。

例如：设某一滑带长度为 610 m，渐变带宽为滑带长的 1/3，临滑锁固段长度为 96 m，滑带弱化极限值为 0.45。

由上述条件可得： $H = 0.45$ ， $A = 1 - H = 0.55$ ， $c' = 13.8 / \Delta x = 13.8 / 203.33 \approx 0.06788$ ， $b = 610 - (96 + 203.33 \times 0.5) = 412.33$  m。

故临滑时刻滑带弱化系数状态方程为

$$k(x) = \frac{0.55}{1 + e^{-0.06788(x-412.33)}} + 0.45 \quad (19)$$

#### 4.4 S 型弱化系数状态曲线方程的内涵

需进一步说明的是，S 型曲线中各参数，其中， $A$ ， $H$  为材料的属性参数， $c'$  为反映曲线形态特征的参数，而  $b$  则是随滑坡演化所处的不同阶段而变化

的一个值，因此，从某种意义上说，它是一个与时间有特定关系的参量，故称其为阶段表征值。要精确地确定  $b$  与时间的对应关系，实际操作中存在一定的困难。但  $b$  与时间的对应关系的确是存在的，且  $b$  是随时间递增的函数，也就可以认为阶段表征值  $b$  的变化是蕴含着时间的变化。因此，从时间意义上理解，S 型曲线方程也体现了剪切刚度随时间弱化的规律。

为更清楚地说明 S 型曲线方程中所蕴含的时间概念，假设某时刻  $t_1$  滑带的阶段表征值为  $b_1$ ，弱化到时刻  $t_2$  时滑带的阶段表征值为  $b_2$ ，根据 S 型曲线方程，给出这 2 个时刻的 S 型弱化状态方程曲线如图 10 所示，图中， $\Delta x_1$ ， $\Delta x_2$  分别为  $t_1$ ， $t_2$  时刻渐变带宽度； $\Delta l_1$ ， $\Delta l_2$  分别为  $t_1$ ， $t_2$  时刻锁固带宽度。

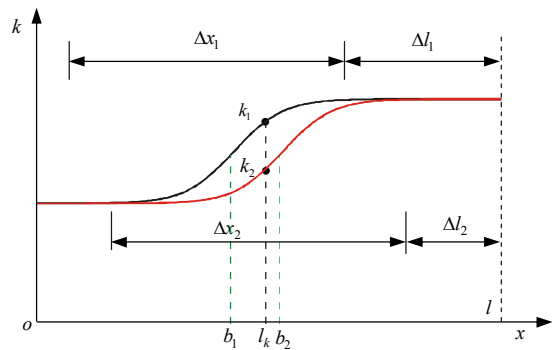


图 10 不同时刻 S 型弱化系数状态方程曲线

Fig.10 S-shaped curves of weakening coefficient in different times

由图 10 可清晰地看出，从  $b_1$  (对应时刻  $t_1$ ) 到  $b_2$  (对应时刻  $t_2$ )， $l_k$  位置处的滑带弱化系数从  $k_1$  减少到了  $k_2$ ，同时，锁固段的长度也相应从  $\Delta l_1$  减小到了  $\Delta l_2$ 。由于图 10 中只变动了  $b$ ，形态系数  $c'$  作为不变量，故在该例子中，渐变带宽度未发生变化。不过，实际应用时可以通过改变  $c'$  值控制渐变带宽度  $\Delta x$  的大小。

由上述可以看出，本文所给定的 S 曲线模型不仅解决了滑带力学参数空间上的变异性问题，也可在时间上反映出了滑带的渐进破坏过程的特性。

## 5 渐进破坏斜坡稳定性计算

刚体极限平衡法分析滑坡的稳定性时，都是假设滑坡为刚塑性材料，将滑带的抗剪强度视为常数。而实际上，滑带的抗剪应力值与蠕滑位移有关，

同时还与力学参数弱化程度密切相关。本文提出的渐进锁固力学模型方法能够较好地解决传统极限平衡法所存在的上述弊端。

以图 8 模型为例，由滑带任意状态下的状态曲线方程(式(16))及初始滑带本构方程(式(1))，可以得到任意时刻滑带上本构方程，进而求得滑带任意位置抗剪应力值。

渐进锁固力学模型的数学表达式为

$$\tau'(x, u) = k(x)\tau(u) =$$

$$\left[ \frac{A}{1 + e^{-c'(x-b)}} + H \right] G_s \frac{u}{h} \exp \left( - \left( \frac{u}{u_0} \right)^m \right) \quad (20)$$

式(20)的前一部分( $k(x)$ )既体现了滑坡演化状态，又能体现锁固段的状况；后一部分( $\tau(u)$ )则体现滑带的本构特性。

假设滑带蠕滑位移由后缘至前端线性分布，那么滑坡位移分布为

$$u(x) = D(1 - x/l) \quad (21)$$

式中： $D$ 为后缘滑体滑移最大位移(滑坡几何形态参数关系见图 11)， $l$ 为滑带视向长度，因此有

$$\tau'(x, u) = \tau'(x) = k(x)\tau(u(x)) \quad (22)$$

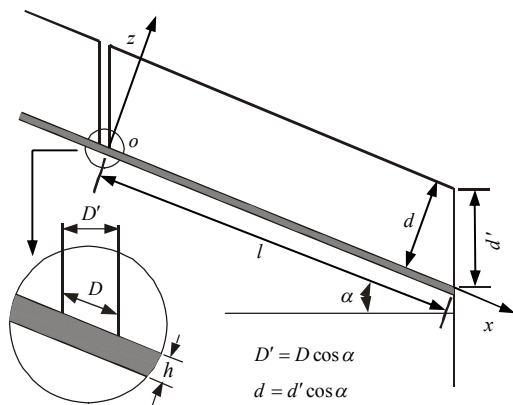


图 11 前进式顺层岩质滑坡几何形态参数关系式

Fig. 11 Relationships of geometric parameters in advancing consequent bedding rockslide

滑坡抗滑力为

$$f_r = \int_0^l \tau'(x) dx =$$

$$\int_0^l \left[ \frac{A}{1 + e^{-c'(x-b)}} + H \right] G_s \frac{u}{h} \exp \left( - \left( \frac{u}{u_0} \right)^m \right) dx \quad (23)$$

对式(23)进行积分求其解析解有一定的难度，

但可以采用数值解。下面给出了复化梯形公式求解顺层边坡稳定性系数的基本步骤：

(1) 将滑带进行等分处理，则

$$\Delta h = l/n \quad (24)$$

式中： $\Delta h$ 为计算步长， $n$ 为等分数。

(2) 等距节点为

$$x_i = i\Delta h \quad (25)$$

式中： $x_i$ 为等距节点值， $i$ 为等距节点序号。

(3) 滑带抗滑力为

$$f_r = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\Delta h}{2} [\tau'(x_i) + \tau'(x_{i+1})] \quad (26)$$

式中： $\tau'(x_i)$ 为节点*i*处滑带剪应力值， $\tau'(x_{i+1})$ 为节点*i+1*处滑带剪应力值。

(4) 滑坡体下滑力为

$$f_s = \rho g d l \sin \alpha \quad (27)$$

式中： $f_s$ 为滑坡体下滑力， $\rho$ 为滑体平均密度， $g$ 为重力加速度， $d$ 为滑体平均厚度。

(5) 可以得到斜坡的稳定性系数  $F_r$  为

$$F_r = \frac{f_s}{f_r} \quad (28)$$

等分数  $n$  越高，所计算得到的结果越精确。

## 6 实例分析

鸡尾山滑坡位于武隆县铁矿乡红宝村，距武隆县城约 75 km<sup>[28-29]</sup>。2009 年 6 月 5 日发生的重庆武隆鸡尾山高速远程滑坡，山体体积约  $560 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，从铁匠沟西岸 75 m 高处峭壁高位剪出，以其巨大的动能，铲刮了位于右前方约  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$  的小山包，沿 NE 向撞向铁匠沟东岸的峭壁，使部分山体垮塌，约  $760 \times 10^4 \text{ m}^3$  的滑体及其铲刮裹挟的破碎物质顺着铁匠沟向下游运动，沿沟底狭长范围堆积，纵向长度 2.2 km。鸡尾山滑坡全貌如图 12 所示。



图 12 武隆县鸡尾山滑坡全貌

Fig. 12 Full view of Jiweishan landslide in Wulong county

鸡尾山山体属于单斜结构，岩层总体向 N35°W 方向倾斜，倾角 21°，倾向与陡崖临空面走向呈小角度相交，并倾向山内，北侧前缘和东侧两面临空。山顶最高点标高 1 600 m，最低点铁匠沟标高 1 000 m，属中山地貌。滑源区长度约 570 m，后缘宽度 150 m，中间部位宽度 130 m，平均宽度 140 m，厚度约 87 m，滑坡体体积总量约  $560 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。鸡尾山滑坡工程地质剖面图见图 13。

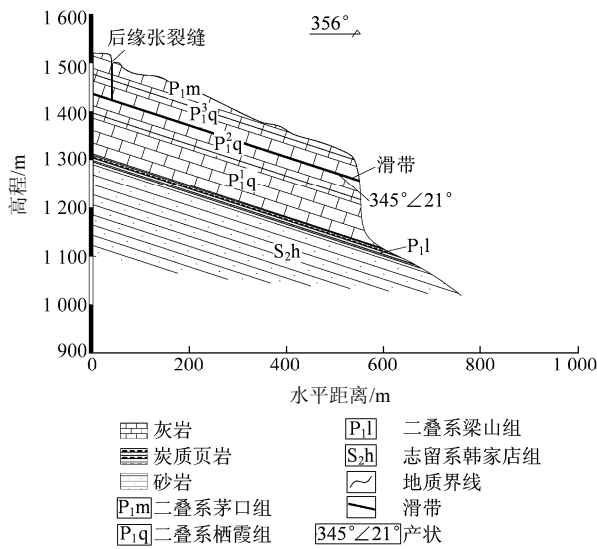


图 13 鸡尾山滑坡工程地质剖面图

Fig.13 Engineering geologic profile of Jiweishan landslide

20 世纪 60 年代，当地居民在后缘边界对应位置的东侧陡崖壁面上就已发现张开裂缝，1999 年专业地勘队伍在调查时发现该裂缝张开度已达  $1.5 \text{ m}^{[20]}$ 。

需说明， $A$ 、 $H$  参考该软弱滑带的相关软化系数数值； $m$  根据其敏感性分析，取  $3^{[30]}$ ；形态系数见式(18)；其他参数为实测值或推测值。模型计算参数如表 2 所示。

表 2 模型计算参数  
Table 2 Calculating parameters for model

$A$	$c'$	$H$	$G_s/\text{MPa}$	$h/\text{m}$	$m$	$u_0/\text{m}$	$l/\text{m}$	$d'/\text{m}$
0.55	0.067 88	0.45	1.5	0.3	3	0.930 95	610	87
$d/\text{m}$	$\alpha/(\text{°})$	$D'/\text{m}$	$D/\text{m}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$			
81.22	21	1.5	1.606 7	2 681	9.8			

反映斜坡渐进破坏所处的不同阶段的表征参数之一为阶段表征值，不同的表征值下可以得到不同阶段斜坡演化过程中的稳定性系数。

图 14 给出了表征值  $b$  由 350 m 变化至 440 m (滑坡临滑前后)，滑坡稳定性系数变化情况。

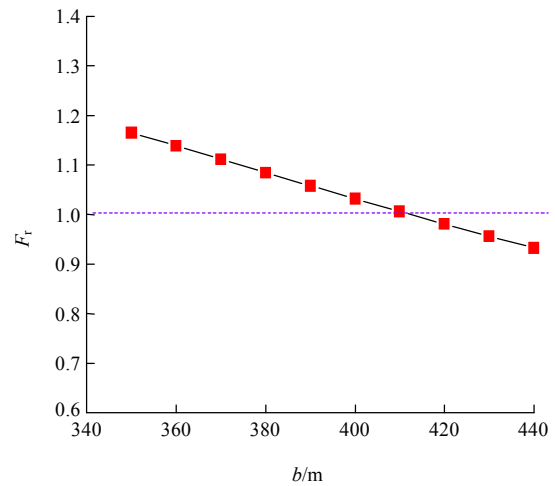


图 14 不同表征值下斜坡稳定性系数

Fig.14 Slope stability coefficients for different representative values

随着 S 型曲线的不断向前推进，即滑坡不断演化，滑坡的稳定性不断降低，并当阶段表征值为 412.33 m 时，稳定性系数为 1，斜坡处于临界滑动状态。

## 7 结论与讨论

(1) 根据滑坡滑面空间发展形态，将顺层岩质滑坡划分成了两大类：前进式渐进破坏模式和后退式渐进破坏模式。

(2) 详细阐述了滑带本构方程中各参数的含义，及滑坡演化过程中滑带力学参数的时效性及空间上的变异性。

(3) 提出了力学参数弱化系数的概念，以衡量滑坡演化过程中力学参数弱化程度。并引入 S 型曲线刻画弱化系数空间分布特征，同时还论述了 S 型曲线所蕴含的时间内涵。

(4) 基于渐进锁固力学模型，推导了渐进破坏斜坡稳定性计算公式。并结合鸡尾山滑坡计算了其不同阶段表征值下滑坡的稳定性，一定程度上展示了该模型的渐进破坏特性。

滑坡演化问题的本质是一个力学问题。本文采用严谨的“渐进锁固”力学模型论述了斜坡的发展演化，更科学地揭示理斜坡演化过程。“渐进”体现了斜坡的动态演化，“锁固”则体现了滑带力学性质的分布特征。该模型能很好地揭示顺层斜坡的演化的基本规律。然而，任何一个力学模型在实际



应用过程中, 其结果的准确性及精度都受该模型参数选取的合理性所影响。今后将通过补充更多实例, 使该模型在参数选取方面更合理。

### 参考文献(References):

- [1] 余 飞, 陈善雄, 余和平. 顺层岩质边坡渐进破坏及失稳机制的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 36 - 40.(YU Fei, CHEN Shanxiong, YU Heping. Numerical simulation study on progressive destruction and failure mechanism of bedding rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 36 - 40.(in Chinese))
- [2] 白云峰, 周德培, 王 科, 等. 顺层滑坡的发育环境及分布特征[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 39 - 43.(BAI Yunfeng, ZHOU Depei, WANG Ke, et al. Development environment and distribution characteristics of bedding plane landslides[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 39 - 43.(in Chinese))
- [3] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 3.(XU Bangdong. Landslide analysis and control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001: 3.(in Chinese))
- [4] 成永刚, 王玉峰. 层面倾角对顺层岩质滑坡贡献率研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3 708 - 3 712.(CHENG Yonggang, WANG Yufeng. Research on contribution rate for dip angle of bedding landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3 708 - 3 712.(in Chinese))
- [5] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 302.(WANG Sijing, HUANG Dingcheng. Century achievement of engineering geology in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 302.(in Chinese))
- [6] 成永刚. 顺层滑坡数值模拟与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3 746 - 3 752.(CHENG Yonggang. Numerical simulation and monitoring analysis of bedding landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 746 - 3 752.(in Chinese))
- [7] 殷跃平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 31.(YIN Yueping. Major geologic hazards and the prevention on relocation sites of the Three Gorges Reservoir, the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 31.(in Chinese))
- [8] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454(In Chinese))
- [9] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 13 - 15.(HU Guangtao. Landslide dynamics[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1995: 13 - 15.(in Chinese))
- [10] 李定夺, 李 晓, 吴 疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480.(LI Dingduo, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2 473 - 2 480.(in Chinese))
- [11] 朱晗迺, 马美玲, 尚岳全. 顺倾向层状岩质边坡屈屈破坏分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(9): 1 144 - 1 149.(ZHU Hanyan, MA Meiling, SHANG Yuequan. Analysis of buckling failure of consequent rock slope[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(9): 1 144 - 1 149.(in Chinese))
- [12] 刘 钧. 顺层边坡弯曲破坏的力学分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 335 - 356.(LIU Jun. Mechanical analysis of bend failure of anacinal slope[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(4): 335 - 356.(in Chinese))
- [13] 李云鹏, 杨治林, 王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定性位移理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 747 - 750.(LI Yunpeng, YANG Zhilin, WANG Zhiyin. Displacement theory of structure stability for rock mass bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 747 - 750.(in Chinese))
- [14] 刘爱华, 王思敬. 平面坡体渐进破坏模型及其应用[J]. 工程地质学报, 1994, 2(1): 1 - 8.(LIU Aihua, WANG Sijing. Progressive failure model for slope with plane sliding surface and its application[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [15] 王庚荪. 边坡的渐进破坏及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 29 - 33.(WANG Gengsun. The progressive failure of slope and the stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 29 - 33.(in Chinese))
- [16] 王庚荪, 孔令伟, 郭爱国, 等. 含剪切带单元模型及其在边坡渐进破坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 852 - 3 857.(WANG Gengsun, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Element model with shear band and its application to progressive failure analysis of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 852 - 3 857.(in Chinese))
- [17] 张俾元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 327 - 330.(ZHANG Zuoyuan, WANG Shitian, WANG

- Lansheng. Analyzing principle of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 327 - 330.(in Chinese))
- [18] 潘岳, 李爱武. 殿后锁固坡体剪断边坡变形能释放与滑体起动速度关系分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1 522 - 1 530.(PAN Yue, LI Aiwu. Analysis of relationship between deformation energy release of slope while locked slope bringing up rear shearing and starting velocity of landslide body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1 522 - 1 530.(in Chinese))
- [19] 刘轶, 覃冷. 浅层基岩顺层滑坡的形成机制和变形破坏特征[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1 052 - 1 055.(LIU Yi, QIN Leng. Analysis of forming mechanism and deformation characteristics of shallow bedded rock landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1 052 - 1 055. (in Chinese))
- [20] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年“6·5”重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机制初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 432 - 444.(XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide on June 5, 2009, in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 432 - 444.(in Chinese))
- [21] XU Q, FAN X M, HUANG R Q, et al. A catastrophic rockslide-debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization and causes[J]. Landslides, 2010, 7(1): 75 - 87.
- [22] 王志俭. 万州区红层岩土流变特性及近水平地层滑坡成因机制研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.(WANG Zhijian. Rheological experimental study and mechanism research on gentle-dipped landslides of Jurassic red strata in Wanzhou City[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.(in Chinese))
- [23] 黄润秋, 赵松江, 宋肖冰, 等. 四川省宣化县天台乡滑坡形成过程和机制分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 13 - 15.(HUANG Runqiu, ZHAO Songjiang, SONG Xiaobing, et al. The formation and mechanism of Tiantai landslide, Xuanhan County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (1): 13 - 15.(in Chinese))
- [24] 秦四清, 王思敬, 孙强, 等. 非线性岩土力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 33 - 34.(QIN Siqing, WANG Sijing, SUN Qiang, et al. Nonlinear mechanics fundamentals for rock and soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 33 - 34.(in Chinese))
- [25] QIN S Q, JIAO J J, LI Z G. Nonlinear evolutionary mechanisms of instability of plane-shear slope: catastrophe, bifurcation, chaos and physical prediction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 39(1): 59 - 76.
- [26] QIN S Q, JIAO J J, WANG S J, et al. A nonlinear catastrophe model of instability of planar-slip slope and chaotic dynamical mechanisms of its evolutionary process[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(11): 8 093 - 8 109.
- [27] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 36.(LIU Yourong, TANG Huiming. Rock mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 36.(in Chinese))
- [28] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 217 - 226.(YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 217 - 226.(in Chinese))
- [29] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 297 - 304.(LIU Chuansheng. Mechanism analysis for the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 297 - 304.(in Chinese))
- [30] 秦四清, 王媛媛, 马平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 873 - 880.(QIN Siqing, WANG Yuanyuan, MA Ping. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 873 - 880.(in Chinese))