

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.075

不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究

谭福林, 胡新丽, 张玉明, 何春灿, 章 涵

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 滑坡的类型一般可分为牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡, 根据其滑面的发展形态, 依次表现为前进式渐进破坏模式、后退式渐进破坏模式和复合式渐进破坏模式。基于岩土体应变软化特性, 揭示了滑坡渐进破坏过程的本质是滑带力学参数弱化的过程, 初步探讨了 3 种类型滑坡渐进破坏过程的运动特点和力学特征和滑坡渐进演化过程。以不平衡推力法和 3 种类型滑坡的演化特征为基础, 提出 3 种类型滑坡渐进破坏过程中临界状态条块确定方法, 通过建立滑坡渐进破坏稳定性计算模型和计算公式, 提出滑坡随着渐进演化过程的滑带参数取值方法, 并阐述了渐进破坏过程的稳定性计算实现过程, 实现不同类型滑坡渐进破坏过程的稳定性分析。以 3 个典型滑坡为例, 分析得出滑坡渐进破坏过程中牵引式滑坡和复合式滑坡稳定性降低速率由大到小再到和推移式滑坡稳定性降低速率由小到大的过程, 3 种类型滑坡在渐进破坏过程中不同部位对稳定性的贡献不同, 验证了不同类型滑坡的变形规律。研究结论可对不同类型滑坡的稳定性发展进行初步预测和为滑坡治理提供指导意义。

关 键 词: 牵引式滑坡; 推移式滑坡; 复合式滑坡; 渐进破坏; 稳定性

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增2-0597-10

Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides

TAN Fu-lin, HU Xin-li, ZHANG Yu-ming, HE Chun-can, ZHANG Han

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Deformation types of landslides generally include retrogressive landslide, load-caused landslide and complex landslide, which present regressive progressive failure mode, advancing progressive failure mode and composite progressive failure mode, respectively based on the development form of sliding zone. Based on the strain-softening behavior of sliding zone, the nature of progressive failure of landslide is weakening process of mechanical parameters of sliding zone which is revealed from the mechanical point. The movement and mechanical characteristics of three types of landslides in the process of progressive failure are determined preliminarily; and evolution process of different types of landslides are revealed. The distinguish criterion of sliding block of critical state is proposed based on the unbalanced thrust method and progressive evolution process. The calculation model and calculation formula of stability of progressive failure of landslides are established and the parameter value method of sliding zone is proposed, and the process to achieve stability calculation of the progressive failure is described. The method shows a complementary relationship in solving the stability problem of strain-softening landslides. Moreover, the progressive failure and stability variation for three typical examples of landslides are analyzed. The results show that the law of reducing speed of retrogressive landslide and complex landslide is from large to small to large; and the law of reducing speed of load-caused landslide is from small to large. In addition, the different part of landslide plays a different role on stability in the progressive failure process of three types of landslides; and the deformation regularity of different types of landslides is verified. The research results can predict the development of stability for different types of landslides preliminarily and provide guidance for landslide control.

Keywords: retrogressive landslide; load-caused landslide; complex landslide; progressive failure; stability

收稿日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41272305); 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (No. 2011CB710604)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41272305) and the National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB710604).

第一作者简介: 谭福林, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性分析及边坡防治研究工作。E-mail: tanfulin868889@163.com

通讯作者: 胡新丽, 女, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值模拟与稳定性评价等方面的研究工作。E-mail: huxinli@cug.edu.cn

1 引言

我国滑坡地质灾害分布广泛,滑坡失稳破坏是一类常见的工程问题,大部分失稳破坏不是一个突然、瞬间发生的整体破坏,而是一个局部破坏发展直至贯通的渐进破坏过程^[1],滑带的性质对于滑坡稳定具有控制作用。滑带是在内外动力作用下经过地质历史长期演化而形成的、直接影响着滑坡的发育、发生、复活和解体^[2]。

现有的滑坡稳定性分析方法诸如 Janbu 法、简化 Bishop 法、楔形体法、传递系数法、瑞典法、Sarma 法和有限元强度折减法等都是建立在极限状态之上,即假定滑带整体达到临界状态,显然这样的假设与实际相差甚远。很多学者对滑坡进行了长期的研究,发现边坡变形破坏是一个渐变的过程,打破了边坡传统的整体静态研究的思维。王庚荪等^[3-4]研究了边坡的渐进破坏过程对边坡稳定性的影响。唐芬等^[5]讨论了土坡渐进破坏的双安全系数。刘爱华等^[6]首次提出了平面渐进破坏模型,并给出了模型的稳定性计算方法。朱雷等^[7]提出基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性评价方法,研究了滑坡力学参数与稳定性的动态变化过程。卢应发等^[8-10]在滑坡渐进变形破坏分析的基础上建立了一种全新的边坡条块力-位移分析方法,确定边坡在不同荷载和位移条件下的稳定性,并提出几种新的滑坡稳定性系数计算方法。沈华章等^[11]、薛海斌等^[12]提出了一种基于应变软化本构模型及矢量和法模拟应变软化边坡渐进性破坏过程的分析方法。

以上研究大多针对较为理想边坡模型进行渐进破坏分析,实际中由于滑坡的成因复杂和外界多因素作用导致其变形的复杂性,如在库水位作用或人工开挖,引起由前至后变形的牵引式滑坡^[13-18]、由于后缘常年加载及降雨作用等,导致由后向前变形的推移式滑坡^[19-25]以及在前后复杂因素作用下导致由前后向中间变形的复合式滑坡^[26-28]等。因此,准确地认识滑坡的变形破坏模式,分析滑坡的变形破坏过程在工程中尤为重要,是不同类型滑坡定性、定量分析及防护治理的前提。

笔者等长期从事三峡库区和西南地区等滑坡地质灾害的研究,接触过各种类型的滑坡,由于滑坡变形复杂多样,本文通过分类确定不同类型滑坡,基于滑带参数弱化特征研究不同类型滑坡的渐进式演化过程,建立滑坡渐进破坏稳定性计算模型和计算公式,准确地反映不同类型滑坡渐进破坏过程中

稳定性变化情况,同时研究不同类型滑坡的稳定性,进一步说明滑坡渐进式破坏问题,为滑坡未来的变形发展实施初步预测和为滑坡治理提供指导意义。

2 滑坡渐进破坏规律

2.1 岩土体渐进式破坏力学特性

滑坡变形破坏过程与岩土体的力学特性紧密相关,滑坡的演化规律遵循量变到质变的过程,即滑坡渐进破坏过程。渐进性破坏一般源于岩土材料的应变软化效应,滑带本构方程是反映剪应力与剪应变之间关系的方程式,卢应发等^[8, 29]提出一种新的节理本构模型能很好地描述具有应变软化属性的岩土体介质渐进式破坏力学特性,本文针对滑带的研究都是基于材料应变软化这一特性展开。

滑坡在渐进破坏过程中随着滑坡的逐渐变形滑动,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,使滑带力学强度经历峰前应力阶段、软化阶段、残余应力阶段 3 个阶段,如图 1 所示。从滑带力学参数弱化过程中可以从宏观上刻画滑带在空间上存在峰前应力、临界应力、残余应力 3 种状态^[13]。有试验表明,对于应变软化的岩土体,当岩土体承受的剪切力达到最大剪切强度 $\tau_{\max}$ 后,随着岩土体连续的变形而发生剪切破坏,岩土体的抗剪强度便降到残余强度。

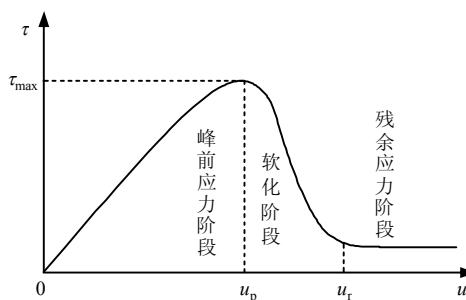


图 1 滑带本构曲线

Fig.1 constitutive curves of sliding zone

2.2 渐进破坏过程

滑坡渐进破坏的实质是滑带的力学参数弱化的过程^[30],渐进破坏过程主要表现在:(1)在空间上,滑带参数弱化是逐步产生发展的,不同部位滑带的力学参数存在差异性;(2)在时间上,滑带力学参数随着滑坡渐进演化发展而呈现不同的速率弱化两方面。

斜坡破坏是坡体累积变形发展的最终状态^[31]。卢应发^[10]分析了滑坡的变形机制、不同的破坏模

式,建立了相应的破坏模式的控制标准,将滑坡从滑带空间发展形态可分为两种类型:第一类是滑带由前向后逐步贯通,表现为后退式渐进破坏模式。第二类是滑带由后向前逐步贯通,表现为前进式渐进破坏模式。在此基础上,第三类同时具有前面两类的特征,滑带由前后向中间逐步贯通,表现为复合式渐进破坏模式,3种渐进破坏模式对应滑坡类型为牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡。结合滑带应变软化特性和王恭先^[32]提出了一般滑坡的主滑段、牵引段和抗滑段受力状态分析,这里以牵引式滑坡、推移式滑坡和复合式滑坡为例,阐述渐进破坏过程及相应的应力状态。

(1) 牵引式滑坡渐进破坏过程

牵引式滑坡的坡脚是重要的阻滑段,经过人工开挖或者河流冲刷,加上持续降雨作用,滑坡前部首先变形,随着内外因素的进一步影响,滑坡由前至后逐步发生主动土压破裂,大主应力 σ_1 主要为土体自重应力,小主应力 σ_3 为水平压应力,由于 σ_3 的减小(前部失去支撑)而逐步产生主动土压破裂,破裂面与大主应力 σ_1 的夹角为 $45^\circ - \varphi/2$, φ 为滑带的内摩擦角(见图2)。到达一定程度时出现滑坡由下往上逐渐产生拉裂缝等现象,在一定时间内滑坡后缘发生变形并伴随着牵引式滑坡整体破坏,为后退式渐进破坏过程。滑坡在整个演化过程中在二维平面内一般只有一点处于峰值应力状态(临界状态)^[9-10]。因此,牵引式滑坡在整个渐进演化过程中滑坡体应力不断调整,塑性区逐步向后扩大,当某条块下滑力等于抗滑力时滑坡条块一般处于临界状态,处于此条块之前的条块为残余应力状态条块,即发生剪切破坏,处于此条块之后的条块处于峰前应力状态条块,即未发生剪切破坏,临界状态位置随着渐进破坏过程而逐渐向上移动,如图2所示。

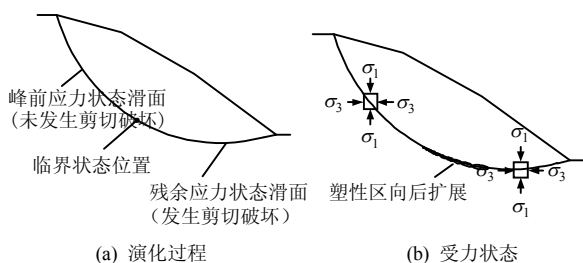


图2 牵引式滑坡渐进演化过程及受力图

Fig.2 Force and progressive failure process of retrogressive landslide

(2) 推移式滑坡渐进破坏过程

推移式滑坡由于后缘常年的加载,后缘滑体荷

载不断积累,加上降雨作用影响,触发了滑坡的变形,引起后部失稳始滑,一开始主要发生主动土压力破裂(受力同牵引式滑坡),滑坡后缘滑动带向下扩展,随着塑性区的扩大,应力集中范围向中部扩大,滑坡中部受平行滑面的下滑推力与滑面的阻力构成的一对力偶作用即受纯剪切力,派生出主压应力 σ_1 和主张应力 σ_3 (见图3),在应力不断调整的过程中变形逐渐向前缘积累,滑坡主要表现为由后向前出现鼓胀、隆起等现象。随着时间的积累,滑坡前缘发生变形破坏并伴随着推移式滑坡整体变形破坏,为前进式渐进破坏过程。对于推移式滑坡,当某条块下滑力等于抗滑力时滑坡条块一般处于临界状态,处于此条块之前的条块为峰前应力状态条块即未发生剪切破坏,处于此条块之后的条块处于残余应力状态条块即发生剪切破坏。临界状态位置随着渐进破坏过程而逐渐向下移动,如图3所示。

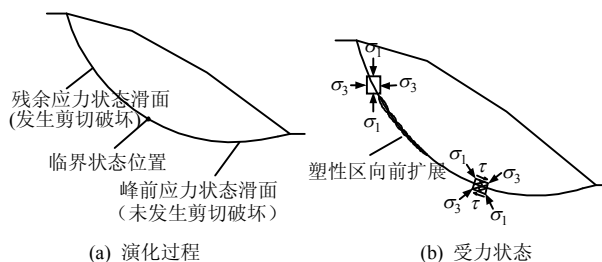


图3 推移式滑坡渐进演化过程及受力图

Fig.3 Force and progressive failure process of load-caused landslide

(3) 复合式滑坡渐进破坏过程

复合式滑坡同时具有牵引式滑坡和推移式滑坡的特点,变形始于前缘和后缘坡体,一开始前部和后部主要产生主动土压力破裂,引起后部失稳始滑以及前部关键阻滑段缺失,使得滑坡中部受平行滑面的下滑推力与自身的滑面阻力构成的一对力偶作用即受纯剪切力,派生出主压应力 σ_1 和主张应力 σ_3 (见图4)而使中部出现滑动。随着时间的推移,滑坡前部和后部发生变形破坏,塑性区由前后逐步向中间扩展并伴随着复合式滑坡整体变形破坏,为由前后至中间的复合式渐进破坏过程。对于复合式滑坡,临界状态位置有2个,前部的临界条块定义为第一临界状态条块,后部的临界条块定义为第二临界状态条块,第一临界状态条块前部和第二临界状态条块后部的条块处于残余应力状态条块即发生剪切破坏,第一临界状态条块和第二临界状态条块之间的条块处于峰值应力状态条块即未发生剪切破坏;临界状态位置随着渐进破坏过程而逐渐

由前后向中间移动,如图4所示。

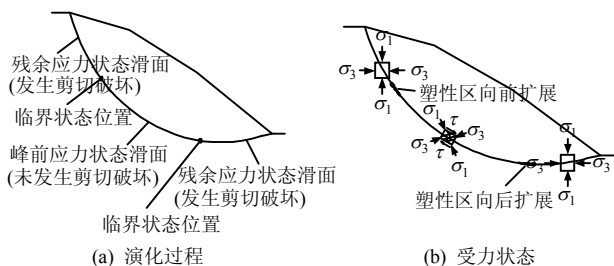


图4 复合式滑坡渐进演化过程及受力图
Fig.4 Force and progressive failure process of complex landslide

2.3 临界状态位置的确定

滑坡在渐进破坏过程中条块的应力出现不断地调整,从稳定状态向不稳定状态转化。图5为3种类型滑坡条块典型的失稳过程示意图。条块在临界状态之前, $T_m < N_m$, 其中 T_m 为第 m 条块的下滑力; N_m 为第 m 条块的抗滑力; 条块达到临界状态时, $T_m = N_m$; 条块大于临界状态时, $T_m > N_m$, 直至条块失稳。

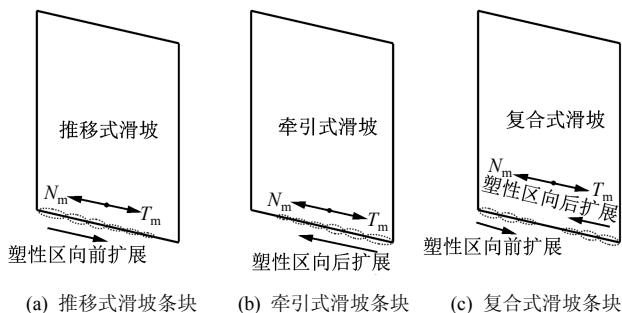


图5 条块失稳过程示意图
Fig.5 Instability process sketch of sliding block

对于滑坡临界状态条块的定义和确定,卢应发等^[9-10, 33-34]详细地描述了渐进破坏过程临界状态条块,并提出了相应的确定方法,本文在其基础上分别确定3种类型滑坡的临界条块,同时基于不平衡推力法,采用文献^[35-36]的基本公式,考虑3种类型滑坡的变形机制,在滑坡渐进破坏过程中应力出现不断调整,现假设滑坡的第 m 条块在某一时刻达到临界状态,其受力分析如图6所示,本文对3种类型的滑坡分别进行判别。

2.3.1 牵引式滑坡

牵引式滑坡是后退式渐进破坏过程,其临界状态条块是逐渐向后递进的,第 m 条块之上的 $1 \sim m-1$ 条块处于峰前应力状态而未发生剪切破坏,即稳定条块 ($E_{m-1} = 0$),则第 m 条块为临界状态条块的判别标准为式(1)。

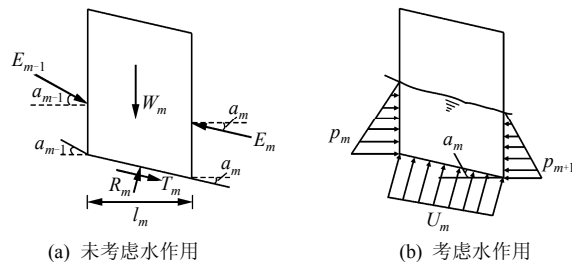


图6 临界状态条块受力分析示意图
Fig.6 Force analysis sketches of critical sliding block

$$\left. \begin{aligned} T_m &= N_m \\ N_m &= (W_m \cos \alpha_m - \Delta p_m \sin \alpha_m - U_m) \tan \varphi_m + c_m l_m \\ T_m &= W_m \sin \alpha_m + \Delta p_m \cos \alpha_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\Delta p_m = p_m - p_{m+1}$; W_m 为第 m 条块的重力; ΔP_m 为第 m 条块土体两侧静水压力的合力; U_m 为第 m 条块土体底部孔隙水压力; α_m 为第 m 条块滑面倾角; c_m 为黏聚力; φ_m 为内摩擦角; l_m 为条块底边长; γ_w 为水的重度。

2.3.2 推移式滑坡

推移式滑坡是前进式渐进破坏,其临界状态条块是逐渐向前递进的,第 m 条块之上的 $1 \sim m-1$ 条块处于残余应力状态而发生了剪切破坏,即为不稳定条块 ($E_{m-1} > 0$),因此第 m 条块受力要考虑上部条块的推力作用,则第 m 条块为临界状态条块的判别标准为

$$\left. \begin{aligned} T_m &= N_m \\ N_m &= (W_m \cos \alpha_m + E_{m-1} \sin(\alpha_{m-1} - \alpha_m) - \Delta p_m \sin \alpha_m - U_m) \tan \varphi_m + c_m l_m \\ T_m &= W_m \sin \alpha_m + E_{m-1} \cos(\alpha_{m-1} - \alpha_m) + \Delta p_m \cos \alpha_m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E_{m-1} 为第 $m-1$ 条块的剩余下滑力,其他符号意义同前。

2.3.3 复合式滑坡

复合式滑坡是复合式渐进破坏过程,在渐进演化过程中存在两处临界状态条块,两处的临界状态条块判别标准为:第一临界状态条块确定按牵引式滑坡的确定方法确定,第二临界状态条块按推移式滑坡的确定方法确定。

3 滑坡渐进性破坏过程稳定性计算

现行的稳定性计算都是滑面整体处于临界状态,即滑面都处于峰值应力状态。从滑坡的渐进演化过程可以看出,如果滑带处处为峰值应力状态,

即由图 1 中的峰值应力决定滑带的强度参数, 将与实际产生非常大的差异, 滑坡稳定性计算时必须考虑其渐进破坏过程。

3.1 稳定性计算模型的建立

通过对 3 种类型滑坡渐进性破坏的研究, 在滑坡在演化过程的某一时刻进行条分, 分为剪切和未剪切 2 段, 并作如下假设: 对于牵引式滑坡, 假设总条块数为 n , 第 m 条块为临界状态条块, 如图 7 所示。对于推移式滑坡, 假设总条块数为 n , 第 k 条块为临界状态条块, 如图 8 所示。对于复合式滑坡, 假设总条块数为 n , 滑坡从上下开始发生剪切破坏, 第 m 条块为第一临界状态条块, 第 k 条块为第二临界状态条块, 如图 9 所示。

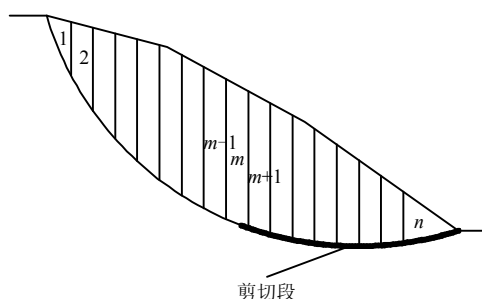


图 7 牵引式滑坡渐进破坏条分图

Fig.7 Slice diagram of progressive failure of retrogressive landslide

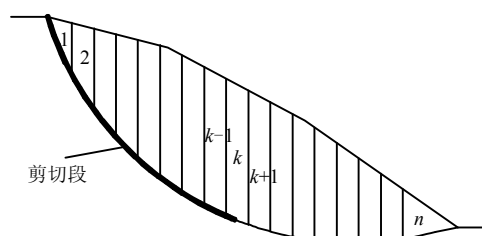


图 8 推移式滑坡渐进破坏条分图

Fig.8 Slice diagram of progressive failure of load-caused landslide

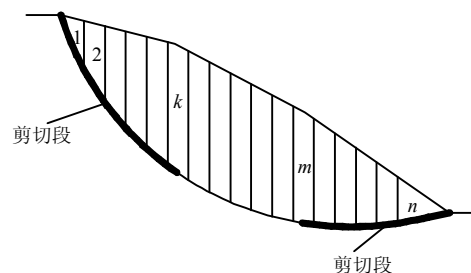


图 9 复合式滑坡渐进破坏条分图

Fig.9 Slice diagram of progressive failure of combined landslide

3.2 稳定性计算公式

滑坡的破坏是由局部破坏逐渐扩展贯通的渐

进式过程, 过程中边坡的稳定性安全系数随着应力状态的调整而有所变化, 在滑坡渐进破坏过程中其稳定系数计算须结合滑带所处的状态, 选择不同的抗剪强度参数, 本文结合滑带本构特性和渐进演化过程, 提供渐进破坏稳定性计算方法, 反映了滑面不断发展的动态过程。

由现有的稳定性计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(N_i \prod_{j=i}^{n-1} \lambda_j \right) + N_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \lambda_j \right) + T_n} \quad (3)$$

通过对滑坡剪切段和未剪切段分开计算, 可得 3 种类型滑坡渐进破坏稳定性计算公式见表 1。

由于传统边坡稳定性计算方法不能考虑土的抗剪能力与应变的相关性, 对于具有应变软化特性的土坡稳定性分析结果影响很大, 整体计算时如果采用峰值强度则偏于危险, 如果采用残余强度则过于安全^[37]。本文基于滑坡滑带渐进弱化的过程中滑带会出现应变软化现象, 滑带从峰值抗剪强度逐渐衰减至残余抗剪强度, 在考虑渐进式演化过程计算滑坡稳定性时提出滑带所处状态来选择强度参数, 即发生剪切贯通段时取残余强度, 未发生剪切贯通段取时峰值强度, 弥补了传统稳定性计算方法不能得到真实的应变软化滑坡稳定性系数的不足。参数选择须说明: (1) 两种强度参数易通过试验获取, 简单易行, 见图 1; (2) 本文选择参数的方法展现了滑带力学参数的弱化过程即渐进破坏过程, 相对现行的稳定性计算方法更为切合实际。

3.3 稳定性计算实现过程

综上所述, 滑坡在渐进演化过程中滑带在空间上呈现峰前应力、临界应力和残余应力等 3 种状态, 为了更好地解释渐进破坏过程稳定性计算的过程, 以下具体说明实现过程:

第一步, 确定滑坡类型及临界状态条块。确定滑坡的变形破坏类型, 通过对滑坡进行条分, 利用章节 2.3 所述的方法进行不同类型滑坡在渐进破坏过程中临界状态条块的逐步确定。

第二步, 滑带参数取值。确定临界条块后对于牵引式滑坡渐进破坏过程稳定性进行计算时, 临界条块前部的条块 ($m+1 \sim n$ 条块) 参数取残余强度值, 临界条块及其后部的条块 ($1 \sim m$ 条块) 参数取峰值强度; 对于推移式滑坡渐进破坏过程稳定性计算时, 临界条块及其前部的条块 ($k \sim n$ 条块) 参数取峰值强度值, 临界条块后部的条块 ($1 \sim k-1$ 条块)

表 1 滑坡渐进破坏稳定性计算公式
Table.1 Stability calculation formula of progressive failure for landslides

滑坡类型	不同类型滑坡渐进破坏稳定性计算公式	备注
牵引式	$F_{sq} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(N_i \prod_{j=i}^m \lambda_j \right) + \sum_{i=m+1}^{n-m-1} \left(N_i \prod_{j=i}^{n-m-1} \lambda_j \right) + N_n}{\sum_{i=1}^m \left(T_i \prod_{j=i}^m \lambda_j \right) + \sum_{i=m+1}^{n-m-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-m-1} \lambda_j \right) + T_n}$	$\lambda_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \phi_i$ $\prod_{j=i}^m \lambda_j = \lambda_i \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_m$ $\prod_{j=m+1}^{n-m-1} \lambda_j = \lambda_{m+1} \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_{n-1}$ $\lambda_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \phi_i$
推移式	$F_{st} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(N_i \prod_{j=i}^k \lambda_j \right) + \sum_{i=k+1}^{n-k-1} \left(N_i \prod_{j=i}^{n-k-1} \lambda_j \right) + N_n}{\sum_{i=1}^k \left(T_i \prod_{j=i}^k \lambda_j \right) + \sum_{i=k+1}^{n-k-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-k-1} \lambda_j \right) + T_n}$	$\prod_{j=i}^k \lambda_j = \lambda_i \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_k$ $\prod_{j=k+1}^{n-k-1} \lambda_j = \lambda_{k+1} \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_{n-1}$ $\lambda_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \phi_i$
复合式	$F_{sf} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(N_i \prod_{j=i}^k \lambda_j \right) + \sum_{i=k+1}^{m-k-1} \left(N_i \prod_{j=i}^{m-k-1} \lambda_j \right) + \sum_{i=m+1}^{n-m-1} \left(N_i \prod_{j=i}^{n-m-1} \lambda_j \right) + N_n}{\sum_{i=1}^k \left(T_i \prod_{j=i}^k \lambda_j \right) + \sum_{i=k+1}^{m-k-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{m-k-1} \lambda_j \right) + \sum_{i=m+1}^{n-m-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-m-1} \lambda_j \right) + T_n}$	$\prod_{j=i}^k \lambda_j = \lambda_i \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_k$ $\prod_{j=k+1}^{m-k-1} \lambda_j = \lambda_{k+1} \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_{m-1}$ $\prod_{j=m+1}^{n-m-1} \lambda_j = \lambda_{m+1} \cdot \lambda_{i+1} \cdots \lambda_{n-1}$

注: F_s 为稳定性系数; T_i 为作用于第 i 条块上的下滑力(kN); N_i 为作用于第 i 条块上的抗滑力(kN); ϕ_i 为第 i 条块滑带土的内摩擦角($^\circ$); α_i 为第 i 条块滑面倾角($^\circ$)。

参数取残余强度; 对于复合式滑坡渐进破坏过程稳定性计算时, 第一临界状态条块前部和第二临界状态条块后部的条块(1~ $k-1$ 条块和 $m+1 \sim n$ 条块) 参数取残余强度值, 第一临界状态条块及其后和第二临界状态条块及其前的条块($k \sim m$ 条块) 参数取峰值强度。

第三步, 稳定性计算。采用表 1 中不同类型滑坡稳定性计算公式进行稳定性计算, 因为滑坡渐进破坏过程中滑带的参数是逐步弱化, 临界状态位置不是固定不变的而是逐渐发生变化, 即滑坡演化过程中的稳定性是动态变化的(对于在某个时刻状态的稳定性系数为定值)。另外, 在滑坡的稳定性评价时笔者等更关注的是滑坡整体的稳定性和了解、分析滑坡现有的稳定性状态及未来的发展趋势, 因此, 计算滑坡稳定性时需根据滑带弱化逐步求解计算, 得到滑坡整体的稳定性变化曲线, 通过不同类型滑坡的稳定性变化情况反映滑坡的稳定性状态以及预测滑坡稳定性发展过程。

4 实例分析

以巴东县东瀼口镇东瀼口村朱家店滑坡^[38]和宝塔滑坡以及遵义市正安县庙塘镇半边街滑坡等 3 个工程为例。通过野外调查和监测(裂缝监测、GPS 位移监测、倾斜孔监测等)等, 确定朱家店滑坡为

渐进式后退牵引式滑坡, 半边街滑坡为渐进式前进推移式滑坡, 宝塔滑坡为混合渐进破坏复合式滑坡, 结合其变形特征和滑坡自身工程地质特征, 基于上述 3 种类型滑坡的渐进破坏稳定性计算模型建立和计算公式的推导, 对 3 个滑坡渐进破坏过程建立计算模型, 如图 10 所示。通过 3 个典型滑坡实例进一步研究了滑坡的渐进性破坏规律。

经对岩土室内试验成果分析和对滑坡具代表性剖面的反演分析, 结合工程经验类比, 确定朱家店滑坡滑体土天然重度为 20.5 kN/m³, 饱和重度为 21.0 kN/m³。半边街滑坡滑体土天然重度为 18.6 kN/m³, 饱和重度为 19.4 kN/m³。宝塔滑坡滑体土天然重度为 20.5 kN/m³, 饱和重度为 22.0 kN/m³。滑带土抗剪强度综合取值见表 2。

基于 3 种类型滑坡的滑带渐进弱化过程, 按照上述方法, 分别计算 3 个滑坡随着渐进破坏过程的整体稳定性, 得到渐进破坏过程中滑坡整体稳定系数与滑带剪切段水平投影长度的关系曲线如图 11 所示。计算分析结果表明: (1) 朱家店牵引式滑坡和宝塔复合式滑坡随着渐进破坏过程, 稳定系数下降的速度由大到小、再变大的过程; 半边街推移式滑坡稳定系数下降的速度随着渐进破坏呈现由小到大的过程, 说明由 3 种类型滑坡稳定性变化规律可间接地反映不同类型滑坡具有不同的滑体、滑面形

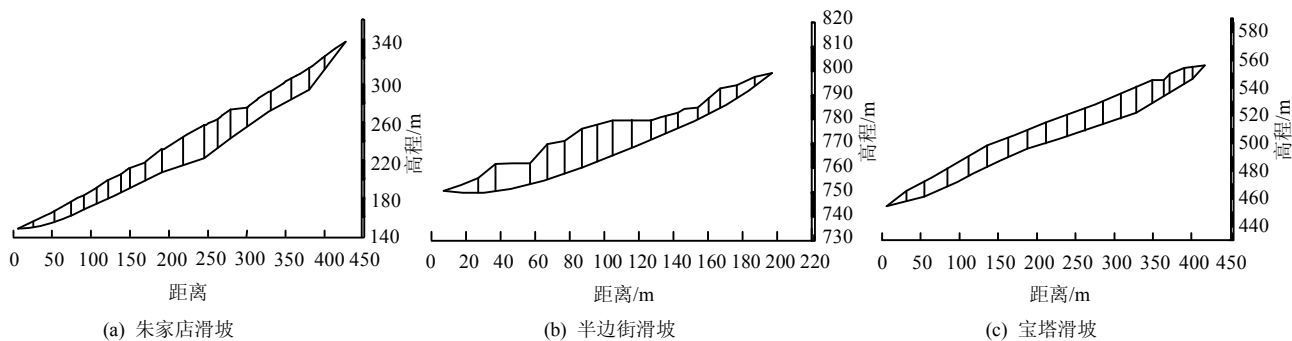


图 10 3 个滑坡计算剖面图
Fig.10 Calculation sections of three landslides

表 2 滑带强度参数
Table 2 Shear strength parameters of slip soil

状态	朱家店滑坡				半边街滑坡				宝塔滑坡			
	峰值强度		残余强度		峰值强度		残余强度		峰值强度		残余强度	
	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
天然	31	22	28	20	30.2	18.3	27.2	16.5	29.4	20.6	26.5	18.5
饱和	25.8	20	22	17	29.1	17.2	24.7	14.6	28.3	19.4	25.0	16.5

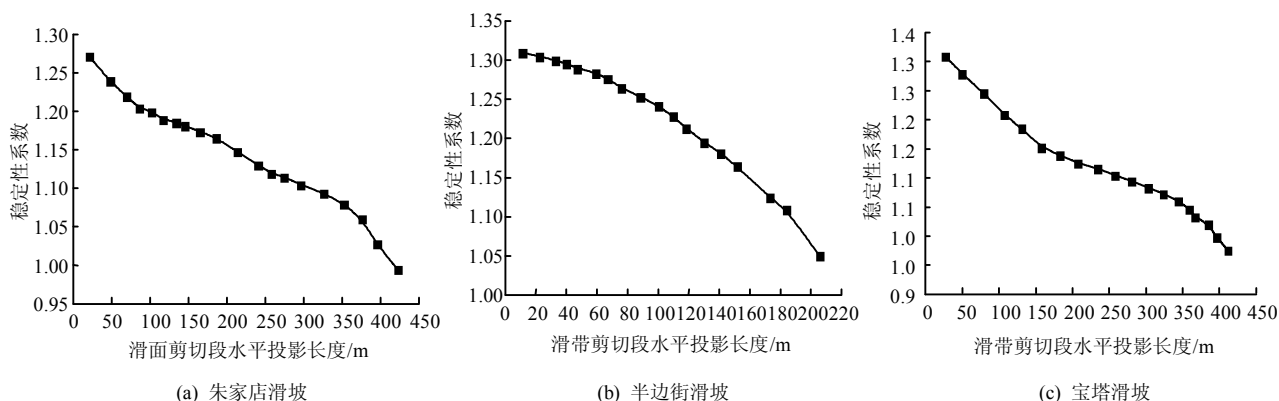


图 11 3 个滑坡渐进性破坏整体稳定性系数变化曲线
Fig.11 Stability coefficient curves of progressive failure of three landslide

态，从而导致不同的渐进破坏模式；牵引式滑坡一开始稳定性下降较快是由于前缘关键阻滑段在整个滑坡稳定中起到关键作用，随着其滑带逐渐发生剪切贯通而对整体稳定性降影响较大，稳定性下降随即变缓是由于中后部对滑坡具有一定的锁固作用；滑坡稳定性降低速度加快是由于整个滑带趋于剪切贯通而将产生整体滑动，推移式滑坡一开始稳定性下降较慢是由于前部关键阻滑段的滑带未弱化而起到一定的阻滑作用，随着前部滑带逐步弱化使整个滑带趋于剪切贯通而将产生整体滑动，导致稳定性下降加快；复合式滑坡一开始由于前部关键阻滑段的弱化致支撑减弱以及后部滑带的弱化致加载效应，导致稳定性降低加快；稳定性下降随即变缓，说明中间段起到一定的锁固作用，直到整个滑带趋于剪切贯通而稳定性降低加快。(2) 3 种类型滑坡

渐进演化过程中，从稳定性变化情况间接地反映了在内外因素的作用下 3 种类型滑坡的不同部位变形启动先后关系以及不同部位对不同类型的滑坡稳定性所起的作用不同，以至于产生前进式、后退式、复合式等渐进破坏模式。另外，可根据不同类型滑坡渐进破坏的程度进行滑坡稳定性发展趋势的初步判断，为滑坡治理设计提供一定的依据。

5 结 论

(1) 滑带力学强度经历了峰前应力阶段、软化阶段、残余应力阶段，在宏观上刻画了滑坡滑带空间发展形态经历峰前应力状态、临界应力状态、残余应力状态，验证了文献[13]提出滑坡经历此 3 个阶段存在的合理性。充分地揭示了牵引式滑坡后退式渐进演化过程、推移式滑坡前进式渐进演化过程、

复合式滑坡混合式渐进演化过程,提出了3种类型滑坡临界状态条块的确定方法。

(2) 不同类型的滑坡开始失稳都是由于主动土压力破裂引起,只是体现在不同的启动位置。牵引式滑坡是前部首先启动,滑坡表现为支撑的减弱。推移式滑坡是后部先启动,滑坡表现为推力的加载效应。复合式滑坡前后首先启动,表现为支撑的减弱和推力的加载效应。由此揭示了滑坡从稳定-不稳定-稳定、应力不断地调整、局部到整体的循环渐进破坏过程,这个过程中由于滑坡类型的不同表现出不同的应力状态,滑坡的动力学机制也表现不同。

(3) 以不平衡推力法和3种类型滑坡渐进演化特征为基础,建立3种类型滑坡渐进破坏稳定性计算模型和计算公式,提出了滑坡随着渐进演化过程的滑带参数取值方法,即发生剪切段取残余强度和未发生剪切段取峰值强度,阐明了稳定性计算的实现过程,能从不同类型滑坡角度解决了应变软化边坡稳定性分析问题。

以3个典型的工程实例,进一步探讨了不同类型滑坡渐进式破坏过程稳定性变化规律,可为滑坡在演化过程中整体稳定性发展趋势作出初步判断,同时有针对性地为不同类型滑坡治理设计提供理论依据。通过不同类型的滑坡,考虑岩土体材料应变软化特性进行渐进破坏过程中稳定性分析,实际工程中稳定性评价是加固治理的前提,更多有关考虑渐进破坏过程的加固机制等方面的研究将会进一步深入开展。

参考文献

- [1] 曾程, 张泽辉, 杨宏丽, 等. 基于边坡渐进破坏特征对传统极限平衡法几点假设的合理分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 146—150.
ZENG Zeng, ZHANG Ze-hui, YANG Hong-li, et al. Analysis of reasonability of several assumptions used in typical limit equilibrium methods based on progressive failure feature of slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 146—150.
- [2] 李守定, 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): 2473—2480.
LI Ding-ding, 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): 2473—2480.
- [3] 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 Gong-sun. The progressive failure of slope and stability analyses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 29—33.
- [4] 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): 3852—3857.
WANG Geng-sun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, 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): 3852—3857.
- [5] 唐芬, 郑颖人, 赵尚毅. 土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1402—1407.
TANG Fen, ZHENG Yin-ren, ZHAO Shang-yi. Discussion on two safety factors for progressive failure of soil slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1402—1407.
- [6] 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 Ai-hua, WANG Si-jing. Progressive failure model for slope with plane sliding surface and its application[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1994, 2(1): 1—8.
- [7] 朱雷, 黄润秋, 王小群, 等. 基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 431—437.
ZHU Lei, HUANG Run-qiu, WANG Xiao-qun, et al. Stability study of landslide based on dynamic evolution of sliding surface strength parameter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 431—437.
- [8] 卢应发, 杨丽平, 刘德富. 一种新的节理本构模型及几种新的滑坡稳定系数计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2431—2438.
LU Ying-fa, YANG Li-ping, LIU De-fu. A new joint constitutive model and a few new methods of stability coefficient calculation of landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2431—2438.
- [9] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 边坡稳定分析条块力-位移法及其应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2787—2798.
LU Ying-fa, HUANG Xue-bin, LIU De-fu. Slice block force-displacement method of slope stability analysis and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2787—2798.

- [10] LU Ying-fa. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2015, 7(2): 109—119.
- [11] 沈华章, 王水林, 郭明伟, 等. 应变软化边坡渐进破坏及其稳定性初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 175—184.
SHEN Hua-zhang, WANG Shui-lin, GUO Ming-wei, et al. A preliminary study of the progressive failure and stability of slope with strain-softening behavior[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 175—184.
- [12] 薛海斌, 党发宁, 尹小涛, 等. 应变软化边坡稳定性分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 570—576.
XUE Hai-bin, DANG Fa-ning, YIN Xiao-tao, et al. Stability analysis methods for strain-softening slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(3): 570—576.
- [13] 卢应发, 邓国栋, 杨丽平, 等. 滑坡关键块力学行为及力传递特征和不同应力状态的稳定系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 884—891.
LU Ying-fa, DENG Guo-dong, YANG Li-ping, et al. Study of mechanical behaviors of key blocks and characteristics of force transmit and stability coefficient of different stress states of landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 884—891.
- [14] 宋东日, 任伟中, 沈波, 等. 牵引式滑坡的破坏机制及其加固措施探讨——以某高速公路牵引式滑坡为例[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3587—3593.
SONG Dong-ri, REN Wei-zhong, SHEN Bo, et al. Discussion on failure mechanism of retrogressive landslide and its reinforcement measures: Taking a certain expressway retrogressive landslide for example[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3587—3593.
- [15] 袁从华, 童志怡, 卢海峰. 牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2853—2858.
YUAN Cong-hua, TONG Zhi-yi, LU Hai-feng. Analysis of characteristics of retrogressive landslide and comparison between active and passive reinforcements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2853—2858.
- [16] 周跃峰, 龚壁卫, 胡波, 等. 牵引式滑坡演化模式研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1855—1862.
ZHOU Yue-feng, GONG Bi-wei, HU Bo, et al. Evolution mode of retrogressive landslide[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(10): 1855—1862.
- [17] 蔡文, 曹洪, 罗彦, 等. 强度折减有限元法模拟边坡牵引式破坏过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3529—3533.
CAI Wen, CAO Hong, LUO Yan, et al. Simulation of retrogressive landslide failure process by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.2): 3529—3533.
- [18] 汪海滨, 李小春, 米子军, 等. 黄土地基排土场滑坡演化机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 672—678.
WANG Hai-bin, LI Xiao-chun, MI Zi-jun, et al. Research on formation evolution mechanism of waste dumps landslides on loess foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 672—678.
- [19] 王宝亮, 彭盛恩, 陈洪凯. 推移式滑坡形成机制的力学演绎[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(2): 74—77.
WANG Bao-liang, PENG Sheng-en, CHEN Hong-kai. Mechanical deduction of formation mechanism for the thrust load caused landslide[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2010, 21(2): 74—77.
- [20] 雍睿, 胡新丽, 唐辉明, 等. 推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 3018—3027.
YONG Rui, HU Xin-li, TANG Hui-ming, et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 3018—3027.
- [21] 易朋莹, 邓时义, 吕涛, 等. 基于 FLAC3D 的浮托型推移式滑坡稳定性分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2012, 25(2): 60—63.
YI Peng-ying, DENG Shi-yi, LÜ Tao, et al. Analysis of stability for floated-pushed landslide based on flac^{3D}[J]. **Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)**, 2012, 25(2): 60—63.
- [22] 胡静, 黄凯湘, 洪念明. 龙王坪滑坡变形模式及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2012, 10(3): 362—368.
HU Jing, HUANG Kuai-xiang, HONG Nian-ming. Deformation mode and stability of longwangping landslide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 10(3): 362—368.
- [23] 胡显明, 晏鄂川, 吕坤, 等. 基于深部位移监测的渐进推移式滑坡变形传递过程研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 338—342.
HU Xian-ming, YAN E-chuan, LU Kun, et al. Deformation process of thrust load-caused landslide on the basis of deep displacement monitoring[J]. **Earth and Environment**, 2011, 39(3): 338—342.

- [24] 夏浩, 雍睿, 马俊伟. 推移式滑坡模型试验推力加载方法的研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(01): 112—116.
XIA Hao, YONG Rui, MA Jun-wei. Method of driving force loading in model test of landslide caused by thrust load[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(01): 112—116.
- [25] 邬爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 32(7): 1297—1303.
WU Ai-qing, DING Xiu-li, LI Hui-zhong, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of qianjiangping landslide using discontinuous deformation analysis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 32(7): 1297—1303.
- [26] 杨光华, 钟志辉, 张玉成, 等. 根据应力场和位移场判断滑坡的破坏类型及最优加固位置确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1879—1887.
YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, ZHANG Yu-cheng, et al. Identification of landslide type and determination of optimal reinforcement site based on stress field and displacement field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1879—1887.
- [27] 肖林萍, 赵玉光. 复合型滑坡体系统的工程地质勘察及其稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(增刊 1): 320—325.
XIAO Lin-ping, ZHAO Yu-guang. Engineering geological exploration and stability analysis of complex landslip system[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(Supp.1): 320—325.
- [28] 石像川, 冯文凯, 刘汉超, 等. 特大多期复合型滑坡稳定性评价及因素敏感性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 975—980.
SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai, LIU Han-chao, et al. Stability evaluation for giant and multiple landslide and sensitive analysis factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 975—980.
- [29] 卢应发, 路韬, 周建军, 等. 一种新的节理模型及其在基桩分析中的应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 967—973.
LU Ying-fa, LU Tao, ZHOU Jian-jun, et al. A new joint constitutive model and its application to pile foundation analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 967—973.
- [30] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2222—2231.
ZOU Zong-xing, TANG Hui-ming, XIONG Cheng-ren, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2222—2231.
- [31] 张倬元, 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 Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1994: 327—330.
- [32] 王恭先. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
WANG Gong-xian. The theory and control technical of land slide[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [33] LU Ying-fa. Mechanism and stability analyses of progressive failure of pull-type landslide[C]//Proceedings of the 3rd Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development. Wuhan: [s.n.], 2015: 281—291.
- [34] 卢应发, 刘德富, 石峻峰. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 333—345.
LU Ying-fa, LIU De-fu, SHI Jun-feng. Mechanism and stability analyses of progressive failure of thrust-type landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 333—345.
- [35] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principle and calculation of soil engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [36] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203—3210.
ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, KONG Wei-xue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203—3210.
- [37] 张嘎, 张建民. 基于瑞典条分法的应变软化边坡稳定性评价方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 12—16.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Stability evaluation of strain-softening slope based on Swedish slice method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 12—16.
- [38] HU Xin-li, ZHANG Ming, SUN Miao-jun, et al. Deformation characteristics and failure mode of Zhujiadian landslide in the Three Gorges reservoir, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013, 31(1): 13—24.