

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.058>



应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度

何 成¹, 唐辉明^{1,2*}, 申培武¹, 苏雪雪¹

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: 针对现有考虑应变软化效应的边坡渐进破坏分析模型中计算假定条件不符合实际情况的不足, 以三峡库区赵树岭滑坡为研究对象, 考虑地下水位波动和地震力的影响, 提出用于分析多场耦合条件下应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度的方法. 结果表明, 地下水位波动和地震力会不同程度地影响滑坡的渐进破坏模式和破坏概率. 滑坡在 145 m、175 m 水位和库水位从 175 m 陡降为 145 m 三种工况下整体稳定, 但分别有 14.119%、20.266% 和 21.797% 的概率发生局部渐进破坏; 在烈度为Ⅶ的地震力作用下同时考虑 3 种蓄水工况, 该滑坡分别有 34.067%、38.061% 和 38.405% 的概率发生整体渐进破坏; 根据滑坡渐进破坏模式指出最佳加固位置应在沿江大道前沿. 该分析方法具备可靠性, 可为边坡的渐进破坏模式及稳定性评价研究提供参考.

关键词: 应变软化效应; 岩土参数不确定性; 渐进破坏; 稳定性; 工程地质.

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2021)02-697-11

收稿日期: 2019-10-17

Progressive Failure Mode and Stability Reliability of Strain-Softening Slope

He Cheng¹, Tang Huiming^{1,2*}, Shen Peiwu¹, Su Xuexue¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Three Gorges Research Center for Geo-Hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Aiming at the shortcomings of the calculation assumptions proposed in the existing slope progressive failure analysis model considering the effect of strain-softening, the Zhaoshuling landslide in the Three Gorges Reservoir area is taken as the research object, and the influence of groundwater level fluctuations and seismic forces is considered to propose the progressive failure mode and stability reliability analysis method of strain-softening slope under multi-field coupling conditions. The results show that the groundwater level fluctuation and seismic force would affect the progressive failure mode and failure probability of the landslide to various degrees. The landslide was stable at 145 m, 175 m water level and the steeply reduced reservoir water level from 175 m to 145 m, but it had a local progressive failure probability with 14.119%, 20.266% and 21.797% respectively. And the landslide had a total progressive failure probability with 34.067%, 38.061% and 38.405% respectively under the action of seismic force with intensity VII, also three kinds of water storage conditions were considered. Moreover, according to the progressive failure mode of landslide, it is pointed out that the best reinforcement position should be at the front of Yanjiang Avenue. The analysis method is reliable and can provide a reference for the progressive failure mode and stability evaluation of slopes.

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2017YFC1501305); 国家重大科研仪器研制项目(No. 41827808); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 1810491T13).

作者简介: 何成(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土体边坡稳定性分析及评价研究. ORCID: 0000-0002-5577-1908. E-mail: hecheng@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 唐辉明, ORCID: 0000-0002-0385-8155. E-mail: tanghm@cug.edu.cn

引用格式: 何成, 唐辉明, 申培武, 等, 2021. 应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度. 地球科学, 46(2):697-707.

Key words: strain-softening effect; uncertainty of geotechnical parameter; progressive failure; stability; engineering geology.

0 引言

边坡稳定性分析一直是岩土工程研究中极其重要的部分.随着极限平衡法及数值计算分析等各类确定性分析方法的不断发展与完善,考虑土性参数随机性的可靠度分析理论也逐渐发展.国内外诸多学者在边坡可靠度分析方法研究领域作出了巨大贡献(Vanmarcke, 1977a; 祝玉学, 1993; Liang *et al.*, 1999).

随着可靠度分析方法的不断改进与完善,目前主要包括一次二阶矩法(王永刚等, 2006)、随机有限元法(李典庆等, 2013, 2016a; 李萍等, 2019)、概率矩点估计法(李琦, 2008)、蒙特卡罗随机模拟方法(李育超等, 2005; 陈将宏等, 2017)等,在边坡稳定性分析评价中均被广泛应用.也形成了协同式分析方法(李典庆等, 2016b)、基于广义子集模拟的分析方法(杨智勇等, 2018)、基于模型修正的空间变异边坡分析方法(蒋水华等, 2018)、基于高斯过程回归的响应面法(朱彬等, 2019)等一系列边坡可靠度分析方法.但这些方法大多假定边坡发生破坏时,滑动面上各点的剪应力同时达到峰值抗剪强度,滑体沿着滑动面产生整体滑动.大量相关研究表明这一假定明显不符合边坡破坏的实际情况,而是表现为由局部到整体逐渐发生破坏、破坏面逐渐延伸直至贯通整个边坡的渐进破坏模式(Bishop, 1971).

“渐进破坏”的概念被提出后,在应变软化边坡的稳定性分析与评价(张嘎和张建民, 2007; 薛海斌等, 2016)以及渐进破坏过程模拟(Srbulov, 1995; 陈国庆等, 2013; 唐朝晖等, 2019)等方面取得了一定的进展.同时,考虑岩土体应变软化效应的边坡稳定性可靠度研究也逐渐展开,在 Chowdhury and Tang(1987)建立了考虑强度参数粘聚力 $c \neq 0$ 而内摩擦角 $\varphi = 0$ 的均质土坡渐进破坏概率模型后,杨庆等(2000)和涂帆(2004)采用破坏概率模型对相应的滑坡模型进行了分析,但均未考虑岩土材料的应变软化特性.吴晓明(2006)以及谢新宇等(2015)虽然考虑了这个特性,但前者在确定边坡渐进破坏传递路径时限定破坏只能从坡脚开始;后者改进了此计算假定条件,仍限制渐进破坏只能向相邻的土条扩展.不可否认的是,边坡在失稳过程中常出现

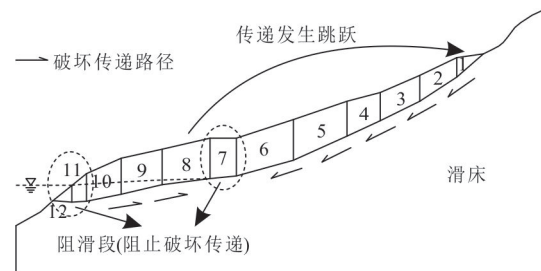


图1 边坡复合式渐进破坏失稳过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of progressive failure process for combined slope

某局部区域发生破坏,坡体进行应力调整后,已破坏的局部区域与其相邻区域稳定,坡体内其他位置再次发生破坏,即破坏传递具有跳跃性,如图1所示的边坡复合式渐进破坏失稳演化过程.因此,现有研究中的计算假定条件并不符合边坡渐进破坏的实际情况.

本文在前人研究的基础上,考虑边坡岩土材料的应变软化性质和土性参数的不确定性,基于可靠度理论和刚体极限平衡法,进行更符合实际情况的条件假定,提出可用于多场耦合条件下应变软化边坡变形演化机理及稳定性可靠度分析的方法.将其运用到灾害频发的三峡库区(李松林等, 2018; 林松等, 2019; 史绪国等, 2019),以三峡库区赵树岭滑坡为案例,分析了6种工况下滑坡的潜在破坏模式及稳定性可靠度,为边坡渐进破坏模式的研究及稳定性评价提供参考.

1 边坡渐进破坏原理

沈珠江(2000)阐述了岩土材料应变软化的机制.大量试验研究也表明,岩土体承受的剪力值一旦超过其峰值强度,岩土体将随着变形的增加而呈现软化现象,典型的应力应变曲线如图2所示.

为计算方便,在边坡稳定性分析过程中常采用如图3所示的简化曲线(Potts *et al.*, 2001),即岩土体发生剪切破坏后,其抗剪强度降为残余值.图2与图3中, τ 、 τ_p 、 τ_r 分别为应变软化材料的剪切应力、峰值剪切应力、残余剪切应力; γ 、 γ_p 、 γ_r 分别为应变软化材料的剪切应变、峰值及残余剪切应力对应的剪切应变.

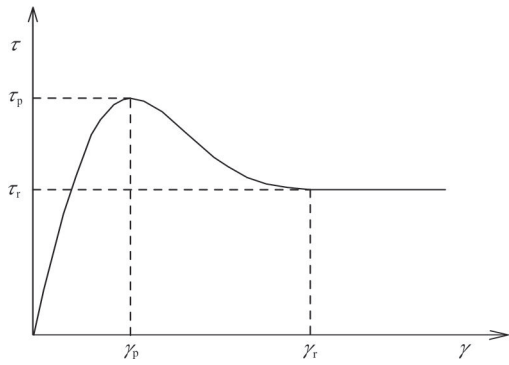


图 2 应变软化土的剪应力—应变关系

Fig.2 Shear stress-strain relations of strain-softening soil

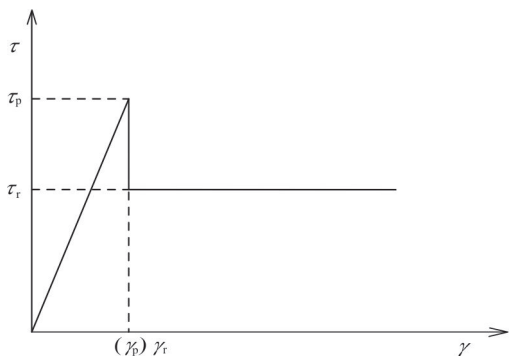


图 3 应变软化土的简化曲线

Fig.3 Simplified curve for strain-softening soil

通常,引起边坡渐进破坏的因素主要为坡体内不均匀的应力分布.在边坡体发生破坏的过程中,应力水平较大的岩土体条块将率先超过其峰值抗剪强度而发生破坏,导致抗剪能力下降;剩余剪力传递到坡体内其他未破坏条块上,当某条块的剪力也超过本身的峰值抗剪强度,将发展为新的软化破坏区域,坡体发生渐进式破坏.

2 边坡渐进破坏模式与可靠度分析

在边坡工程的稳定性评价方法中,安全系数法被广为接受.但在实际工程中常出现安全系数 $F_s > 1$ 的边坡发生失稳破坏,而安全系数 $F_s < 1$ 的边坡却长期保持稳定状态.因此,边坡系统中的多种不确定性因素对其稳定性均有影响,本文主要考虑土性参数不确定性的影响.对于应变软化边坡,由渐进破坏理论可知,确定初始破坏位置与破坏传递路径,即可分析边坡渐进破坏的可靠性.

2.1 初始破坏位置的确定

安全余量功能函数作为应变软化边坡渐进破

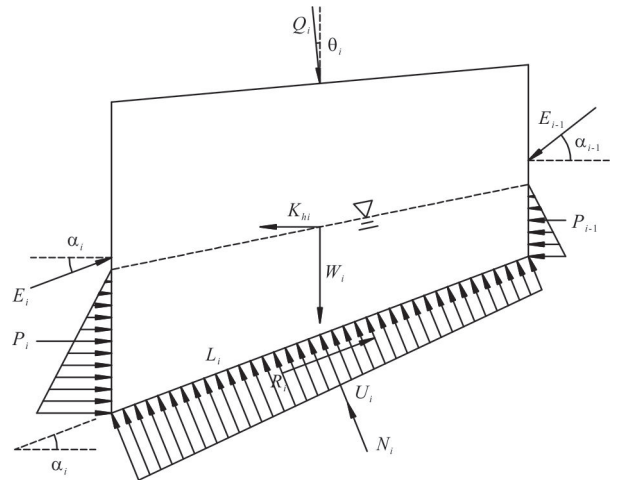


图 4 土体条块受力情况示意图

Fig.4 Schematic diagram of the force of the soil block

坏概率计算的基础,对坡体内任意岩土体条块 i ,其安全余量 SM_i 函数式可表示为:

$$SM_i = R_i - T_i = f_i N_i + c_i L_i - T_i, \quad (1)$$

其中, R_i 为条块的抗滑力; T_i 为条块的下滑力; f_i, c_i 分别为条块底面的内摩擦系数和粘聚力; N_i 为作用于条块底面的法向力; L_i 为条块底面长度.考虑岩土体的应变软化简化曲线, f_i, c_i 根据条块是否发生剪切破坏而取相应的强度参数值,且采用不同的稳定性计算模型, N_i, T_i 的表达式不同.

本文采用广泛应用于我国滑坡稳定性分析且适用于复杂形状滑动面的传递系数法稳定性计算模型.对边坡体内任意一个条块 i ,推导考虑孔隙水压力、地震力(殷跃平和王文沛,2014)及其他外荷载作用下其安全余量的表达式,条块受力情况如图 4 所示.

图中, R_i 为条块 i 受到的抗滑力; E_i, E_{i-1} 分别为条块 $i+1$ 、条块 $i-1$ 作用于条块 i 上的条间力; α_i, α_{i-1} 分别为条块 i 、条块 $i-1$ 底面倾角; Q_i 为外荷载作用力; θ_i 为作用力 Q_i 与垂直线之间的夹角; P_i, P_{i-1} 分别为条块 i 两侧水压力; N_i 为条块 i 底面受到的法向力; U_i 为条块 i 底面受到的浮托力; K_{hi} 为水平地震力系数; W_i 为含水条块 i 的重力; L_i 为条块 i 底面切线长度.根据力系平衡,可知:

$$R_i + E_i + Q_i \sin(\theta_i - \alpha_i) + (P_i - P_{i-1}) \cos \alpha_i = W_i \sin \alpha_i + K_{hi} W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i), \quad (2)$$

$$N_i + U_i + K_{hi} W_i \sin \alpha_i = (P_i - P_{i-1}) \sin \alpha_i + W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + Q_i \cos(\theta_i - \alpha_i). \quad (3)$$

又由 Bishop (1967) 关于剪切力 R_i 的定义,

可知:

$$R_i = \frac{1}{F_s} (f_i N_i + c_i L_i). \quad (4)$$

联立(1)~(4)式,得:

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + K_{hi} W_i \cos \alpha_i - Q_i \sin(\theta_i - \alpha_i) - (P_i - P_{i-1}) \cos \alpha_i - \frac{c_i L_i}{F_s} - \frac{f_i}{F_s} [W_i \cos \alpha_i + (P_i - P_{i-1}) \sin \alpha_i + Q_i \cos(\theta_i - \alpha_i) - U_i - K_{hi} W_i \sin \alpha_i] + E_{i-1} \psi_i, \quad (5)$$

式中, F_s 为安全系数; $\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - f_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) / F_s$ 为传递系数; 特别地, $E_0 = 0$.

为确定条块 i 的安全余量,若某边坡共含 n 条条块,不断假定 F_s 的值代入上式进行迭代求解,最终确定 F_s 的值满足 $E_n = 0$, 计算任意条块 i 的条间作用力 E_i, E_{i-1} , 从而:

$$SM_i = f_i [(P_i - P_{i-1}) \sin \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + W_i \cos \alpha_i + Q_i \cos(\theta_i - \alpha_i) - U_i - K_{hi} W_i \sin \alpha_i] + c_i L_i - [K_{hi} W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + W_i \sin \alpha_i - Q_i \sin(\theta_i - \alpha_i) - (P_i - P_{i-1}) \cos \alpha_i - E_i]. \quad (6)$$

本文考虑岩土性参数不确定性的影响. 相关统计研究表明, 岩土体的重度因变异性小而视为定值, 岩土体的内摩擦系数 f 与粘聚力 c 可同时接受正态分布与对数正态分布, 且两者呈现较强的负相关性(范明桥和盛金保, 1997; 陈立宏等, 2005).

由 $E_0 = 0$ 及式(5)可知, 对于任意条块 i 受到的条间力 E_i 的迭代求解, E_i 与条块 1, 2, 3, ..., i 的岩土参数均有关, 即 E_i 为随机变量 $f_i (i = 1, 2, \dots, i)$ 、 $c_i (i = 1, 2, \dots, i)$ 的多元非线性函数, 则 E_i 为随机变量. 安全余量 SM_i 是随机变量 E_i, E_{i-1}, f_i, c_i 的函数, 故也为随机变量. 为方便计算, 且能确定随机变量 SM_i 的分布类型, 对于划分有 n 条条块的边坡, 作以下假设: (1) 随机变量 $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 、 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 均满足正态分布, 各变量的变异系数均小于 0.3, 即随机变量出现负值的概率极低, 可忽略不计; (2) 条间力 E_i 的计算中, 随机变量 $f_i (i = 1, 2, \dots, i)$ 、 $c_i (i = 1, 2, \dots, i)$ 均取各自的均值即假定为定量, 则参数 E_i, E_{i-1} 均为定量.

由式(6)可知, SM_i 作为随机变量 f_i, c_i 的线性函数必然也满足正态分布. 根据概率公式, 可将该函数按均值展开成泰勒级数并取一阶近似, 得到安全

余量 SM_i 的均值和方差表达式, 并采用式(1)所示的简记形式:

$$E(SM_i) = \bar{f}_i N_i + \bar{c}_i L_i - T_i, \quad (7)$$

$$\text{Var}(SM_i) = N_i^2 \text{Var}(f_i) + L_i^2 \text{Var}(c_i) + 2N_i L_i \text{Cov}(f_i, c_i), \quad (8)$$

式中, \bar{f}_i, \bar{c}_i 分别为 f_i, c_i 的均值; $\text{Var}(f_i), \text{Var}(c_i)$ 分别为 f_i, c_i 的方差; $\text{Cov}(f_i, c_i)$ 为 f_i, c_i 的协方差, 其计算式为:

$$\text{Cov}(f_i, c_i) = \rho_{f_i, c_i} \sqrt{\text{Var}(f_i) \cdot \text{Var}(c_i)}, \quad (9)$$

式中, ρ_{f_i, c_i} 为 f_i, c_i 的相关系数. 对某应力状态下坡体内的任意条块 i , 当条块 i 的安全余量 $SM_i \leq 0$, 即认为此时条块 i 发生破坏, 结合可靠度理论, 求得条块 i 发生破坏的概率 P_{fi} :

$$P_{fi} = P(SM_i \leq 0) = 1 - \phi\left(\frac{E(SM_i)}{\sqrt{\text{Var}(SM_i)}}\right). \quad (10)$$

由式(10)求得坡体内所有条块的局部破坏概率. 假设局部破坏概率最大的条块最先发生破坏, 其概率值为 P_{f1} , 则该条块所在位置即为边坡初始破坏位置.

2.2 渐进破坏路径的确定

确定初始破坏位置后, 为确定渐进破坏传递路径, 作以下假设: (1) 渐进破坏传递概率最大的条块为破坏传递条块, 且条块发生破坏传递具有单次唯一性; (2) 渐进破坏可向坡体内任意未破坏的条块发生传递, 即破坏传递具有非定向性.

为计算渐进破坏传递概率, 假定条块 i 所在位置为初始破坏位置, 将破坏由条块 i 传递给条块 j 的概率记为 $P_{f(i,j)}$, 且满足 $j \neq i$. 传递概率表征为条件概率, 即为事件 A “条块 i 破坏”发生的条件下事件 B “条块 j 破坏”发生的概率:

$$P_{f(i,j)} = P(B|A) = \frac{P(SM_j \leq 0 \cap SM_i \leq 0)}{P(SM_i \leq 0)}, \quad (11)$$

式中, SM_j 为未破坏条块 j 的安全余量; SM_i 为已破坏条块 i 的安全余量.

由岩土体的应变软化简化曲线(图3)可知, 对于未发生破坏的天然条块, 其岩土参数取天然峰值 f_p, c_p , 而已发生破坏的天然条块, 其岩土参数取天然残余值 f_r, c_r ; 对于未发生破坏的含水条块, 其岩土参数取饱和峰值 f_{sp}, c_{sp} , 而已发生破坏的含水条块, 其岩土参数取饱和和残余值 f_{sr}, c_{sr} .

以天然条块为例,假定只有同一条块上岩土参数的峰值和残余值是相关的,不同条块上的峰值和残余值是独立的.前述已假定条间作用力为定量,则由式(6)可知 SM_{j_i} 和 SM_j 分别是参数 f_r, c_r 和参数 f_p, c_p 的函数,即两者之间是相互独立的变量,则由(11)式得:

$$P_{f(i,j)} = P(SM_j \leq 0). \quad (12)$$

计算条块 i 向条块 $j = 1, 2, \dots, k, \dots, n$ 传递破坏的概率,若 $\max\{P_{f(i,1)}, P_{f(i,2)}, \dots, P_{f(i,k)}, \dots, P_{f(i,n)}\} = P_{f(i,k)}$,则条块 $j = k$ 为破坏传递条块.令 $P_{f1} = P_{f(i,k)}$, P_{f1} 表示第一次发生破坏传递的概率,则 P_{fl} 为第 l 次发生破坏传递的概率;若未发生破坏传递,则令 $P_{f0} = 1$.

条块 j 破坏后,则计算破坏由条块 i, j 向下一个条块传递的概率,其同样表征为条件概率.同理可确定该次破坏传递条块,以此类推,逐一计算破坏传递概率,同时确定破坏传递路径.对于含水条块,不同的只是参数的选取,其计算与上述过程相同,限于篇幅此处不再赘述.

2.3 边坡渐进破坏可靠性

对于应变软化边坡,其破坏形式常表现为破坏持续进行的整体渐进破坏和破坏传递终止的局部渐进破坏,计算出初始破坏条块的局部破坏概率与破坏传递的概率即可计算以上两种情况的渐进破坏概率.假定含 n 块条块的边坡共进行了 $n-1$ 次破坏传递“发生整体渐进破坏”,记为事件 N ;或经过 m 次传递后破坏终止“发生局部渐进破坏”,记为事件 M .则边坡发生整体渐进破坏事件和局部渐进破坏事件的概率分别表示为:

$$P(N) = P_{f1} \prod_{l=0}^{n-1} P_{fl}, \quad (13)$$

$$P(M) = P_{f1} \prod_{l=0}^m P_{fl} (1 - P_{f(m+1)}). \quad (14)$$

当 $n-1 = m$ 时,事件 M 与 N 等价,即 $P_{fm} = 0$.

3 赵树岭滑坡实例

以三峡库区巴东县赵树岭滑坡为例,滑坡由基岩和碎裂岩、碎石块等组成的崩滑体层构成,其稳定性关系到新县城沿江大道安全(唐辉明等, 2002).根据滑坡的工程地质条件,选择合理计算区域,建立滑坡概化模型(胡修文等,2005),如图5所示,图中虚线为实际可能的地下水位线.滑坡物理

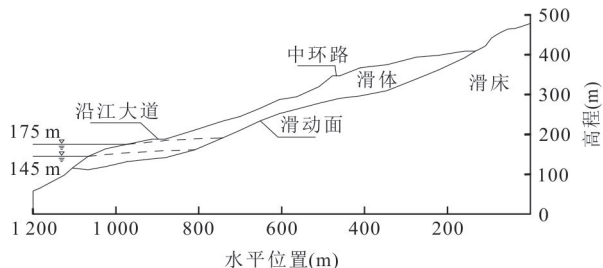


图5 滑坡概化模型示意图

Fig.5 Sketch of conceptualization model for landslide

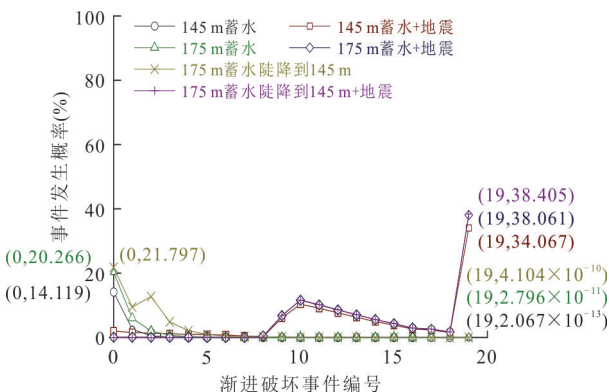


图6 不同工况条件下滑坡渐进破坏事件及事件概率

Fig.6 Progressive failure event and probability of landslide under different working conditions

力学参数统计值(唐辉明等,2002;徐平,2011)如表1所示.

本文考虑水库水位变动和烈度为Ⅶ的地震作用下的6种计算工况(唐辉明等,2002),工况的类别及其对应的滑体条块划分情况见表2.图6中,“渐进破坏事件编号”取 m 值时,表征事件“滑坡经过 m 次渐进破坏传递后破坏传递终止”,所对应的概率值即为“事件发生概率”.分别计算确定每种工况下滑坡的峰值稳定性系数(强度参数为峰值时滑坡的稳定性系数)、渐进破坏路径、可能发生的渐进破坏事件及对应的事件发生概率(采用(14)式计算),其结果分别如表3及图6所示.

4 结果分析与讨论

由表3可知,不同工况条件下,该滑坡在峰值强度参数下的整体稳定性系数均为非单一值,且滑坡体中前部小于中后部.表明滑坡体中前部的稳定性小于中后部,因此最有可能出现如图7所示的非单一滑动面的情况,并将之划分为两个滑体.

根据表3滑坡渐进破坏路径分析滑坡的渐进破坏模式.在无地震作用时,滑坡在145 m和175 m蓄

表 1 滑坡物理—力学参数统计值

Table 1 Statistics of landslide physical-mechanical parameters

物理参数	天然密度(kg·m ⁻³)				饱和密度(kg·m ⁻³)			
	2 500				2 600			
力学参数	天然内聚力 (MPa)	残余内聚力 (MPa)	饱和内聚力 (MPa)	饱和和残余内聚力 (MPa)	天然内摩擦 系数	残余内摩擦 系数	饱和内摩擦 系数	饱和和残余内摩 擦系数
	0.020	0.015	0.015	0.010	0.364	0.325	0.325	0.287
变异系数	δ_{c_p}	δ_{c_r}	$\delta_{c_{sp}}$	$\delta_{c_{sr}}$	δ_{f_p}	δ_{f_r}	$\delta_{f_{sp}}$	$\delta_{f_{sr}}$
	0.13	0.13	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20
相关系数	$\rho_{c_p, f_p} = \rho_{c_r, f_r} = \rho_{c_{sp}, f_{sp}} = \rho_{c_{sr}, f_{sr}} = -0.3$							

注:变异系数与相关系数是根据现有研究成果进行的合理取值,其实际值应通过统计分析获得。

表 2 滑坡计算工况及滑体条分情况

Table 2 Calculation conditions of landslide and slice details of sliding body

滑坡计算工况	滑体条分情况
145 m 水库蓄水	
145 m 水库蓄水+地震作用	
175 m 水库蓄水	
175 m 水库蓄水+地震作用	
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位	
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位+地震作用	

注:红色实线为地下水位线;库水位陡降时,不考虑坡体内孔隙水压力的消散,即假定坡体内的地下水位线与降落前相同,仅考虑库水位的变动(郑颖人等,2004)。

水工况下, I #滑体整体上均表现为中部推移前部并牵引后部的渐进破坏模式;在 175 m 蓄水位陡降为 145 m 工况下, I #滑体整体上表现为前部牵引与后部推移的模式;3 种工况下, II #滑体整体上均表现为中部推移前部并牵引后部的渐进破坏模式。滑坡在烈度为 VII 的地震作用下,3 种工况的 I #滑体与 II #滑体整体上均表现为前部牵引与后部推移的渐

进破坏模式。

从图 6 中可以查明滑坡在每种工况下最大概率发生的渐进破坏事件及发生的概率值(整体稳定时, $P(\text{整体稳定}) = 1 - P(\text{整体渐进破坏})$)。如表 4 所示,不考虑地震力时,3 种蓄水工况下滑坡发生整体渐进破坏的概率均近于零,即滑坡整体稳定的可靠度指标近于 1;考虑地震力时,3 种工况滑坡发生

表 3 各工况条件下滑坡峰值稳定性系数及渐进破坏路径

Table 3 Stability coefficient for peak parameters and progressive failure path of landslide under various working conditions

计算工况	峰值强度参数下滑坡 稳定性系数		渐进破坏路径
145 m 水库蓄水	中前部 1.217	中后部 1.322	
145 m 水库蓄水+地震作用	/	中后部 0.840	
175 m 水库蓄水	中前部 1.112	中后部 1.322	
175 m 水库蓄水+地震作用	/	中后部 0.840	
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位	中前部 1.044	中后部 1.322	
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位+地震作用	/	中后部 0.840	

注:稳定性系数不唯一且小于 0.840.

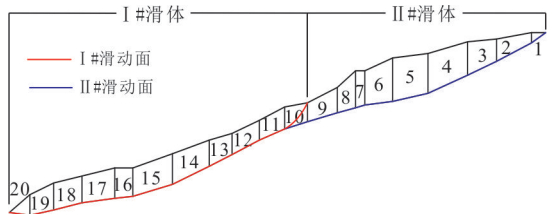


图 7 滑坡非单一滑动面示意图

Fig.7 Sketch of non-single sliding surface for landslide

整体渐进破坏的概率分别为 34.067%、38.061% 和 38.405%。地震力作用下,3 种工况滑坡发生整体渐进破坏的概率值较接近;虽然 3 种蓄水工况+地震

作用下, I #滑体的受力情况不同(地下水位影响), 但计算所得 I #滑体发生整体渐进破坏的概率值相差较小且均近于 1(考虑地震力时,建议对该滑坡进行合理加固);另外,三者的 II #滑体所处状态完全相同,且滑坡整体失稳概率是滑坡体内所有条块破坏传递概率的乘积.因此,3 种工况下滑坡发生整体渐进破坏事件概率的计算结果相差较小.

在确定破坏传递路径时,本文作出的假定更符合实际情况.滑坡发生局部破坏时,破坏条块的剩余剪力传递给未破坏条块,坡体向更稳定的状态进行应力调整,调整后坡体内将产生一个最大概率破

表 4 滑坡最大概率发生的渐进破坏事件及概率值

Table 4 Progressive failure events with maximum probability and their probability values of landslide

计算工况	渐进破坏事件	发生概率(%)
145 m 水库蓄水	整体渐进破坏	2.067×10^{-13}
	局部渐进破坏: 16#条块发生破坏且破坏停止传递	14.119
145 m 水库蓄水+地震作用	整体渐进破坏	34.067
175 m 水库蓄水	整体渐进破坏	2.796×10^{-11}
	局部渐进破坏: 16#条块发生破坏且破坏停止传递	20.266
175 m 水库蓄水+地震作用	整体渐进破坏	38.061
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位	整体渐进破坏	4.104×10^{-10}
	局部渐进破坏: 20#条块发生破坏且破坏停止传递	21.797
175 m 库水位陡降为 145 m 库水位+地震作用	整体渐进破坏	38.405

注: 计算所得概率值并非真实概率值, 但计算结果具备较强的参考性。

坏条块, 这个条块不一定是已破坏条块的相邻条块 (如相邻条块的破坏概率均小于某一条块的破坏概率)。该假定能合理解释边坡非连续性破坏的情况以及图 1 所示的前部牵引与后部推移相继进行的滑坡复合式渐进破坏模式。

一般地, 土性指标与其所处的空间位置有关, 即土性参数存在空间变异性。目前描述该特性比较合理的方法是由 Vanmarcke (1977b) 提出的随机场模型, 该模型分别将土性参数的空间均值、空间变异系数与点均值、点变异系数联系起来。具体表达式为:

$$\begin{cases} \bar{f}_v = \bar{f}; \bar{c}_v = \bar{c} \\ \delta_v = \delta \cdot \Gamma(\Delta Z); \Gamma(\Delta Z) = \begin{cases} 1 & (0 < \Delta Z < \lambda) \\ \sqrt{\frac{\lambda}{\Delta Z}} & (\Delta Z \geq \lambda) \end{cases} \end{cases}, \quad (15)$$

式中, \bar{f}_v 、 \bar{c}_v 和 \bar{f} 、 \bar{c} 分别为土性参数的空间均值和点均值; δ_v 、 δ 分别为土性参数的空间变异系数与点变异系数; $\Gamma(\Delta Z)$ 称为点变异系数在 ΔZ 空间范围内的折减系数; λ 为土性参数的自相关距离。

因此, 考虑土性参数空间变异性的影响, 可将其点均值、点变异系数和点方差分别用空间均值、空间变异系数和空间方差代替, 根据统计资料确定土性参数的自相关距离, 按照本文 (7)~(14) 式进行计算。土坡随机场问题极其复杂, 上述内容仅为考虑土性参数空间变异性影响的边坡稳定性可靠度分析方法提供一种思路, 并未进行严格验证, 其适用性有待考究。

本文对土体强度参数的变异系数和相关性系数的取值具有依据性、合理性和可行性, 计算结果

具备较强的参考性。由三峡库区各库岸段大量滑坡滑带土实测强度参数 c 、 φ 的统计分析结果 (徐平, 2011), 可知天然及饱和状态下滑坡滑带土峰值和残余强度参数的变异系数满足 $\delta_p \approx \delta_r$, 因此采用 $\delta_p = \delta_r$ 对变异系数进行取值。同时, 赵树岭滑坡滑带土与三马山滑坡滑带土在岩性特征和力学性质方面具有高度相似性 (徐平, 2011), 采用三马山滑坡滑带土实测试验获取的变异系数值进行计算具有可行性。本文提出岩土参数的变异系数值均需小于 0.30, 是由于在此条件下, 岩土参数作为随机变量出现负值的概率均小于 0.040%, 可假定在此极低的概率条件下随机变量不出现负值 (本文计算参数满足该条件)。相关系数的取值源于文献 (涂帆, 2004; 吴晓明, 2006; 谢新宇等, 2015)。

5 结论

(1) 不考虑地震作用时, 滑坡在 145 m、175 m 水位和库水位从 175 m 陡降为 145 m 三种工况下整体稳定, 稳定性的可靠度指标近于 1, 但分别有 14.119%、20.266% 和 21.797% 的概率发生局部渐进破坏 (表 4)。

(2) 当发生烈度为 VII 的地震时, 3 种蓄水工况下该滑坡分别有 34.067%、38.061% 和 38.405% 的概率发生整体渐进破坏。渐进破坏模式为滑坡前缘与中部相继产生局部变形破坏, 在滑体前缘的牵引和中部对前部的推移作用下产生变形和滑移; 随后前部与中部的变形给后部岩土体以牵引, 同时滑体后缘产生的局部破坏给后部以推移作用, 最终产生整体渐进破坏。

(3) 不同工况下滑坡的渐进破坏模式均表明,

如果要对其进行加固,加固措施的最佳布置位置应为16#条块(即沿江大道)前缘.一方面可有效避免滑体中部岩土体推移前部或16#条块破坏后牵引中部岩土体产生滑移,进而避免形成临空面牵引滑体后部岩土体产生滑移;另一方面可充分利用16#条块的抗滑阻力.

(4)本文在变异系数与相关系数参数值的确定中,采用具有依据性、合理性和可行性的取值,计算所得概率值均具较强参考性.在具备大量的滑坡滑带土体强度指标试验值时,应对其进行统计分析,获取变异系数及相关系数的实际值,采用本文方法进行边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度分析.

本文提出了一种用于多种耦合条件下应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度分析的方法,并将其应用于三峡库区赵树岭滑坡.研究结论与赵树岭滑坡物理模型试验成果(胡修文等,2005)有较好的一致性,可为同类型或不含地下水与地震条件边坡的渐进破坏模式研究及稳定性评价提供参考.但对于边坡不具有明确滑动面、坡体岩土材料参数作为随机变量符合其他分布形式(如对数正太分布)以及考虑土性参数空间变异性的影响等情况,应变软化边坡滑动面的选取以及边坡渐进破坏概率的计算分析方法需进一步探讨.

References

- Bishop, A. W., 1967. Progressive Failure with Special Reference to the Mechanism Causing It. In: Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soil and Rocks. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, 142—150.
- Bishop, A. W., 1971. The Influence of Progressive Failure on the Choice of the Method of Stability Analysis. *Geotechnique*, 21(2): 168—172. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.2.168>
- Chen, G. Q., Huang, R. Q., Zhou, H., et al., 2013. Research on Progressive Failure for Slope Using Dynamic Strength Reduction Method. *Rock and Soil Mechanics*, 34(4): 1140—1146 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.H., Li, J.L., Xu, X.L., et al., 2017. Algorithm for Generation Correlative Variables and Monte Carlo Simulation of Slope Reliability. *Rock and Soil Mechanics*, 38(11): 3341—3346 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L.H., Chen, Z.Y., Liu, J.M., 2005. Probability Distribution of Soil Strength. *Rock and Soil Mechanics*, 26(1): 37—40, 45 (in Chinese with English abstract).
- Chowdhury, R. N., Tang, W. H., Sidi, I., 1987. Reliability Model of Progressive Slope Failure. *Geotechnique*, 37(4): 467—481. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.4.467>
- Fan, M. Q., Sheng, J. B., 1997. Cross-Correlation of Soil Strength Indicators φ, c . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 19(4): 100—104 (in Chinese).
- Hu, X. W., Tang, H. M., Liu, Y. R., 2005. Physical Model Studies on Stability of Zhaoshuling Landslide in Area of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(12): 2089—2095 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.H., Yao, C., Yang, J.H., et al., 2018. Model Correction Factor Method Based Approach for Reliability Analysis of Spatially Variable Slopes. *Engineering Mechanics*, 35(8): 154—161 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Q., Jiang, S.H., Zhou, C.B., et al., 2013. Reliability Analysis of Slopes Considering Spatial Variability of Soil Parameters Using Non-Intrusive Stochastic Finite Element Method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(8): 1413—1422 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Q., Xiao, T., Cao, Z. J., et al., 2016a. Slope Risk Assessment Using Efficient Random Finite Element Method. *Rock and Soil Mechanics*, 37(7): 1994—2003 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Q., Xiao, T., Cao, Z. J., et al., 2016b. Auxiliary Slope Reliability Analysis Using Limit Equilibrium Method and Finite Element Method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(6): 1004—1013 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Bai, J.Z., Griffiths, D.V., et al., 2019. Random Finite Element Analysis for the Reliability of Loess Slopes. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(1): 116—126 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., 2008. Reliability Analysis of Loess High Slope: Take Baojixia Division Project as an Example (Dissertation). Northwest A & F University, Yangling (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Xu, Q., Tang, M.G., et al., 2018. Study on Spatial Distribution and Key Influencing Factors of Landslides in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(1): 341—354 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.C., Ling, D.S., Chen, Y.M., et al., 2005. Slope Stability Analysis Using Monte Carlo Technique with Fem. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(11): 1933—1941 (in Chinese with English abstract).

- Liang, R. Y., Nusier, O. K., Malkawi, A. H., 1999. A Reliability Based Approach for Evaluating the Slope Stability of Embankment Dams. *Engineering Geology*, 54(3–4): 271–285. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(99\)00017-4](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(99)00017-4)
- Lin, S., Wang, W., Deng, X.H., et al., 2019. Geophysical Observation of Typical Landslides in Three Gorges Reservoir Area and Its Significance: A Case Study of Sifangbei Landslide in Wanzhou District. *Earth Science*, 44(9): 3135–3146 (in Chinese with English abstract).
- Potts, D.M., Zdravković, L., Addenbrooke, T. I., et al., 2001. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory. Thomas Telford, London.
- Shen, Z.J., 2000. Theoretical Soil Mechanical. China Water & Power Press, Beijing (in Chinese).
- Shi, X.G., Xu, J.H., Jiang, H.J., et al., 2019. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis. *Earth Science*, 44(12): 4284–4292 (in Chinese with English abstract).
- Srbulov, M.M., 1995. A Simple Method for the Analysis of Stability of Slopes in Brittle Soil. *Soils and Foundations*, 35(4): 123–127. <https://doi.org/10.3208/sandf.35.4.123>
- Tang, H.M., Ma, S.Z., Liu, Y.R., et al., 2002. Stability and Control Measures of Zhaoshuling Landslide, Badong County, Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 27(5): 621–625 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z.H., Yu, X.L., Chai, B., et al., 2019. Energetic Criterion of Entering Acceleration in Progressive Failure Process of Bedding Rockslide: A Case Study for Shanshucao Landslide. *Earth Science*, 1–9 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.960>
- Tu, F., 2004. Reliability of Progressive Failure of Soil Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 25(1): 87–90 (in Chinese with English abstract).
- Vanmarcke, E.H., 1977a. Probabilistic Modeling of Soil Profiles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(11): 1227–1246. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90012-8)
- Vanmarcke, E.H., 1977b. Reliability of Earth Slopes. *Journal of the Geotechnical*, 103(11): 1247–1265. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90159-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90159-6)
- Wang, Y.G., Ren, W.Z., Chen, H., et al., 2006. First-Order Second-Moment Method and Its Application in Slope Reliability Analysis. *Journal of China & Foreign Highway*, 26(2): 42–46 (in Chinese).
- Wu, X.M., 2006. Reliability Analysis of Progressive Failure of Homogeneous Earth Slope (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.Y., Feng, X., Wu, X.M., 2015. Reliability Analysis of Progressive Failure of Strain Softening Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 36(S2): 679–684 (in Chinese with English abstract).
- Xu, P., 2011. Reliability Study on Stability of Submerged Slide Mass in Three-Gorges Reservoir Area (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Xue, H.B., Dang, F.N., Yin, X.T., et al., 2016. Stability Analysis Methods for Strain-softening Slopes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(3): 570–576 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Jiao, J.K., Luan, M.T., et al., 2000. Reliability Analysis and Risk Evaluation of the Slope Engineering. *Journal of Engineering Geology*, 8(1): 86–90 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.Y., Li, D.Q., Cao, Z.J., et al., 2018. System Reliability of Soil Slope Using Generalized Subset Simulation. *Rock and Soil Mechanics*, 39(3): 957–966, 984 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., Wang, W.P., 2014. Researches on Seismic Landslide Stability Analysis. *Journal of Engineering Geology*, 22(4): 586–600 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Zhang, J.M., 2007. Stability Evaluation of Strain-Softening Slope Based on Swedish Slice Method. *Rock and Soil Mechanics*, 28(1): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.R., Shi, W.M., Kong, W.X., 2004. Calculation of Seepage Forces and Phreatic Surface under Drawdown Conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(18): 3203–3210 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B., Pei, H.F., Yang, Q., 2019. Gaussian Process Regression-Based Response Surface Method and Reliability Analysis of Slopes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(S1): 209–212 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.X., 1993. Reliability Analysis of Slope. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等, 2013. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究. *岩土力学*, 34(4): 1140–1146.
- 陈将宏, 李建林, 许晓亮, 等, 2017. 相关变量生成算法及边坡可靠度 Monte Carlo 模拟. *岩土力学*, 38(11): 3341–

- 3346.
- 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅, 2005. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究. 岩土力学, 26(1): 37-40, 45.
- 范明桥, 盛金保, 1997. 土强度指标 φ , c 的互相关性. 岩土工程学报, 19(4): 100-104.
- 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣, 2005. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 24(12): 2089-2095.
- 蒋水华, 姚池, 杨建华, 等, 2018. 基于模型修正的空间变异边坡可靠度分析方法. 工程力学, 35(8): 154-161.
- 李典庆, 蒋水华, 周创兵, 等, 2013. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法. 岩土工程学报, 35(8): 1413-1422.
- 李典庆, 肖特, 曹子君, 等, 2016a. 基于高效随机有限元法的边坡风险评估. 岩土力学, 37(7): 1994-2003.
- 李典庆, 肖特, 曹子君, 等, 2016b. 基于极限平衡法和有限元法的边坡协同式可靠度分析. 岩土工程学报, 38(6): 1004-1013.
- 李萍, 白健忠, Griffiths, D. V., 等, 2019. 黄土边坡可靠度的随机有限元分析. 地球科学与环境学报, 41(1): 116-126.
- 李琦, 2008. 黄土高边坡稳定可靠性分析(硕士学位论文). 杨陵: 西北农林科技大学.
- 李松林, 许强, 汤明高, 等, 2018. 三峡库区滑坡空间发育规律及其关键影响因子. 地球科学, 45(1): 341-354.
- 李育超, 凌道盛, 陈云敏, 等, 2005. 蒙特卡洛法与有限元相结合分析边坡稳定性. 岩石力学与工程学报, 24(11): 1933-1941.
- 林松, 王薇, 邓小虎, 等, 2019. 三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义: 以万州区四方碑滑坡为例. 地球科学, 44(9): 3135-3146.
- 沈珠江, 2000. 理论土力学. 北京: 中国水利水电出版社.
- 史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 等, 2019. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新. 地球科学, 44(12): 4284-4292.
- 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣, 等, 2002. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究. 地球科学, 27(5): 621-625.
- 唐朝晖, 余小龙, 柴波, 等, 2019. 顺层岩质滑坡渐进破坏进入加速的能量学判据. 地球科学, 1-9. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.960>
- 涂帆, 2004. 土坡渐进破坏的可靠度. 岩土力学, 25(1): 87-90.
- 王永刚, 任伟中, 陈浩, 等, 2006. 一次二阶矩法及其在边坡可靠性分析中的应用. 中外公路, 26(2): 42-46.
- 吴晓明, 2006. 均质土坡渐进破坏可靠性分析(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 谢新宇, 冯香, 吴晓明, 2015. 应变软化土坡渐进破坏的可靠度分析. 岩土力学, 36(S2): 679-684.
- 徐平, 2011. 三峡库区涉水滑坡体稳定性的可靠度研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.
- 薛海斌, 党发宁, 尹小涛, 等, 2016. 应变软化边坡稳定性分析方法研究. 岩土工程学报, 38(3): 570-576.
- 杨庆, 焦建奎, 栾茂田, 等, 2000. 边坡可靠性与经济风险分析及其应用. 工程地质学报, 8(1): 86-90.
- 杨智勇, 李典庆, 曹子君, 等, 2018. 基于广义子集模拟的土坡系统可靠度分析. 岩土力学, 39(3): 957-966, 984.
- 殷跃平, 王文沛, 2014. 论滑坡地震力. 工程地质学报, 22(4): 586-600.
- 张嘎, 张建民, 2007. 基于瑞典条分法的应变软化边坡稳定性评价方法. 岩土力学, 28(1): 12-16.
- 郑颖人, 时卫民, 孔位学, 2004. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算. 岩石力学与工程学报, 23(18): 3203-3210.
- 朱彬, 裴华富, 杨庆, 2019. 基于高斯过程回归的响应面法及边坡可靠度分析. 岩土工程学报, 41(S1): 209-212.
- 祝玉学, 1993. 边坡可靠性分析. 北京: 冶金工业出版社.