

考虑滑坡渐进破坏的改进简布条分法

王 振¹, 叶晓明², 刘永新³

(1. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 重庆市涪陵城市建设投资集团有限公司, 重庆 400045)

摘 要: 为考虑位移因素对于滑坡渐进性发育的影响, 基于简布条分法基本原理, 提出一个新的能够考虑滑带土抗剪能力与剪切位移关系的滑坡稳定性简化评价方法。该方法从以下两个方面对简布条分法进行了改进: (1) 将滑动面剪应力-剪切位移本构模型与沿滑动面的剪切位移模型相结合, 以考虑滑坡随着变形发展渐进破坏的过程; (2) 提出局部安全系数的概念并对整体安全系数进行重新定义, 物理意义更加明确。推导了该方法的计算公式, 给出了其迭代计算思路, 并编制 Matlab 计算程序。通过计算实例表明, 应变软化边坡的安全系数不仅取决于土的抗剪强度指标, 还与其剪应力-剪切位移关系密切相关, 基于峰值强度的极限平衡条分法应用于实际工程是偏于危险的。同时该方法还可以有效地模拟边坡从开始破坏到最终滑动面贯通的发育过程, 实现了坡体位移与安全系数之间一一对应的定量关系, 进而实现边坡的稳定性的预测预报。

关 键 词: 位移; 滑坡; 渐进性; 应变软化; 安全系数

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0675-08

Improved Janbu slices method considering progressive destruction in landslide

WANG Zhen¹, YE Xiao-ming², LIU Yong-xin³

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Fuling City Construction Investment Group Co., Ltd., Chongqing 400045, China)

Abstract: To consider the impact of displacement factor on the progressive development of landslide, a modified Janbu slices method considering the relationship between shear stress and shear displacement of sliding face was presented to evaluate the stability of a landslide. The modified Janbu slices method is improved in the following two aspects: firstly, combined the constitutive shear stress-strain model and shear displacement model along the slide face to simulate the progressive failure process of landslide with deformation development; secondly, the overall safety factor was redefined using concept of partial safety factor with clearer physical meaning. The formula of the simplified method was derived and implemented by Matlab code. An example of simulation shows that the stability factor for slope with strain-softening behavior depends on the strength parameters, and also on the shear stress-shear displacement relationship of slip zone soil. It is unsafe for the limit equilibrium method to be applied to practical engineering. This method can also effectively simulate the development process from the beginning towards the entire sliding face failure of slope. The simulation realizes the quantitative correspondence relationship between displacement and safety factor, and can be used to predict the long-term stability of slope.

Keywords: displacement; landslide; progressive property; strain-softening; safety factor

1 引 言

早在 20 世纪 60 年代 Skempton 研究土质边坡稳定性时就首次提出边坡渐进性破坏的概念, 认为边坡失稳过程中, 滑动面上并不是全部同时进入塑性状态, 而是与位移相关的渐进过程。卢应发等^[1]对边坡沿滑面进行了划分, 认为在某一时刻有的区

段滑坡处于破坏后区, 局部滑坡破坏处于峰值应力状态, 有的区段滑坡处于峰值应力以前状态, 且这些区段随位移的变化而变化。然而现行的边坡稳定性分析方法(毕肖普条分法、费伦纽斯条分法、简布条分法、传递系数法等)均建立在极限平衡理论基础, 假设滑动面上各点同时达到临界应力状态, 所采用的假设忽略了土体位移因素对稳定性分析的

影响,因而不能考虑土体随着变形发展的应变软化性质,同时也不能进行边坡的渐进破坏分析。Filz 等^[2]通过研究表明,只有考虑材料渐进性破坏的垃圾填筑体填筑高度才与实际所能达到的填筑高度相同,按峰值抗剪强度考虑的填筑高度要高于实际高度的 36%。王庚荪^[3]以实例说明考虑边坡渐进性破坏时的稳定性系数比不考虑渐进性破坏的稳定性系数要小 5%~10%。由以上研究可知,基于土的峰值强度的极限平衡条分法应用于实际工程是偏于危险的。

精确分析滑坡的渐进破坏过程,不仅需要掌握土的所有基本特性,而且还要掌握土的瞬时和长期特性,同时要引入或发展新的数值模型。尽管复杂的分析有时是可以实现的,而且也取得了不少成果^[4-7],但为了更直观地理解和认识滑坡发生破坏的力学机制和演化过程,运用较简单的模型对其进行力学演绎仍具有实际意义。不少学者对条分法进行改进以在滑坡稳定分析中考虑土的应力-应变关系特性,从而可以模拟滑坡的渐进破坏过程^[8-12]。现有的各种改进条分法或是不能描述岩土体应变软化的性质,或是假设岩土体为一次跌落的软化材料(即强度达到峰值后无需剪应变增量而降为残余值),未能较好地考虑土的应力-应变关系在达到峰值强度之前的硬化段和达到峰值强度之后的软化段。因此,现有方法在合理评价应变软化边坡的稳定性时尚存在局限。

基于此,本章拟在简布条分法基本理论的基础上,引入滑动面岩土体剪应力-剪切位移本构模型,建立一种新的可以考虑土的抗剪能力与剪切位移关系的滑坡稳定性简化评价方法,后文称之为基于位移改进的简布条分法。提出其具体实现算法,编制有关计算程序,对某一滑坡算例进行分析,考虑位移因素对渐进性滑坡发育过程、滑坡稳定性分析及滑坡推力的影响,实现坡体位移与安全系数一一对应的定量计算。

2 基于位移改进的简布条分法

2.1 滑动面剪应力-剪切位移本构模型研究

滑带土是滑坡的重要组成部分,其对滑坡的发展、变形、稳定性评价有着重要意义,因此,滑带土工程特性的研究常成为滑坡研究中一个必要内容^[13]。滑坡发生的机制与滑带土的应力-应变特性密切相关,Terzaghi 等^[14]最早阐述了边坡渐进性破坏是因为材料在破坏过程中具有峰值与残余强度的差异,造成坡体局部因破坏先后不同而出现承载能力的差

异。具有软化性质的岩土体典型应力-位移关系曲线如图 1(a)所示,为此寻找一种能够准确描述滑带土软化性质的剪应力-剪切位移本构模型是研究滑坡渐进性破坏的基础。

笔者在总结现有本构模型基础上,认为卢应发等^[1, 15]所提出的节理本构模型有一定的应用前景。该模型克服了传统理想弹塑性模型(如图 1(a)所示)的缺点,可以描述应变软化材料在不同正应力作用下剪应力-剪应变的全过程特征,其基本方程为

$$\tau = G\gamma(1 + \gamma^m / s)^\rho \quad (1)$$

式中: τ 、 γ 分别为剪应力和剪应变; G 为剪切模量; m 、 s 、 ρ 为不同法向应力下的常系数; τ 、 G 的单位为 MPa 或 kPa 或 Pa, m 、 s 、 ρ 为无量纲参数。各参数确定方法参见文献[1]。

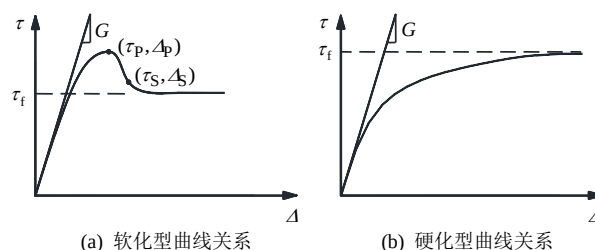


图 1 滑带土剪应力-剪切位移关系
Fig.1 Relationships between shear stress and displacement of sliding zone soil

该模型属于纯数学模型,与严格理论推导的物理模型相比,数学模型属于数学拟合过程,即卢应发等^[1, 15]所提出的本构模型,可以用来拟合应力-应变关系,也可以用来拟合应力-位移关系,乃至可以用来拟合符合该函数曲线特性的所有物理、化学过程。为适应本文的研究思路,以剪切位移 Δ 的概念代替剪切应变 γ ,将该模型改进为如下形式:

$$\tau = G\Delta(1 + \Delta^m / s)^\rho \quad (2)$$

式中: τ 、 Δ 分别为剪切应力和剪切位移, τ 的单位为 MPa 或 kPa 或 Pa, Δ 的单位为 m 或 mm; G 为滑带土剪应力-剪切位移曲线初始斜率(见图 1); m 、 s 、 ρ 为不同法向应力下的常系数; m 、 ρ 为无量纲参数。

值得说明的是:①在大剪切位移作用下传统应变定义是不成立的,为描述大剪切位移作用下岩土体软化的性质有必要用剪切位移 Δ 的概念代替剪切应变 γ ;②用剪应变描述岩土体剪切强度与现行用剪切位移表示的试验方法不一致,需要进行剪切应变与剪切位移的转换,而这个转换实际上是很难

实现的, 本文用剪切位移 Δ 代替剪切应变 γ 并结合剪切试验数据避免了复杂的应力 $\rightarrow$ 应变 $\rightarrow$ 位移之间的理论推导; ③数学拟合过程与物理推导过程相比, 只存在数值之间的相互比较而不存在量纲上的严密性。

该模型具有如下性质:

(1) 峰值剪切位移 Δ_{peak} 为

$$\Delta_{\text{peak}} = {}^m \sqrt{-s / (1 + m\rho)} \quad (3)$$

相对应的峰值应力 τ_{peak} 为

$$\tau_{\text{peak}} = G \sqrt{-s / (1 + m\rho) [1 - 1 / (1 + m\rho)]}^\rho \quad (4)$$

(2) 在某一法向应力状态下, 该模型峰值应力与摩尔-库仑失效准则求得的临界状态剪应力相等, 即峰值应力 (式 (4)) 还可表达为

$$\tau_{\text{peak}} = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (5)$$

(3) s 是一个与滑动面法向应力相关的参数, 其确定方法为

$$s = -\frac{(c + \sigma_n \tan \varphi)^2}{G^2} \left(\frac{2\rho}{1 + 2\rho} \right)^{-2\rho} (1 + 2\rho) \quad (6)$$

(4) ρ 是一个描述沿土体软化特征参数, 与材料的本身的特性有关。当 $\rho = -0.5$ 时, 可以描述理想弹塑性材料; 当 $\rho = 0$ 时, 可以描述理想弹性材料; 当 $-0.5 < \rho < 0$ 时, 可以描述应变硬化材料; 当 $-0.5 < \rho < -1$ 时, 可以描述应变软化材料。

2.2 沿滑动面剪切位移模型

本节引入沿滑动面的位移协调方程来描述各滑动土条底部剪切位移之间的关系。基于条分法中土条均一变形假设, 且认为条块之间没有宏观上的分离, 则土条彼此之间不发生脱离和重叠, 类似于多块体机构^[16]。考虑土条之间的剪胀性质, 如图 2 所示, 第 i 条块和第 $i-1$ 条块底部剪切位移存在如下关系:

$$\Delta_i = \Delta_{i-1} \frac{\cos(\alpha_{i-1} - 2\nu)}{\cos(2\nu - \alpha_i)} \quad (7)$$

式中: Δ_i 、 Δ_{i-1} 为第 i 、 $i-1$ 条块底部剪切位移; ν 、 α_i 、 α_{i-1} 见图 2。

依次类推, 可以得到用首条块竖向位移表示的沿滑动面剪切位移模型为

$$\Delta_i = \Delta_0 f(\alpha_i) \quad (8)$$

式中: Δ_0 为坡顶条块的竖向位移。

$$f(\alpha_i) = \frac{1}{\sin(\alpha_1 - \nu)} \frac{\cos(\alpha_1 - 2\nu)}{\cos(2\nu - \alpha_i)} \quad (9)$$

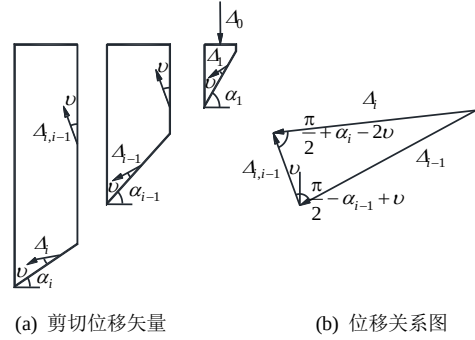


图 2 相邻条块的位移协调关系
Fig.2 Displacement coordination
between adjacent slices

2.3 改进的简布条分法

目前滑坡稳定性计算方法 (包括简布条分法、传递系数法隐式解以及国际上其他各种条分法) 都采用的是强度储备安全系数, 即滑裂面上抗剪强度指标按同一比例降低为 c/K 和 φ/K , 则土体沿着此滑裂面处处达到极限平衡状态。这存在两大问题: ①根据渐进式破坏的概念, 在同一时刻有的滑坡区段处于破坏后区、局部滑坡破坏处于峰值应力状态、有的区段滑坡处于峰值应力以前状态, 对处于峰值应力状态乃至峰后应力状态的滑坡区段来说已经不具备强度储备, 对其进行折减已经没有意义 (见文献[1]); ②同时对黏聚力和内摩擦角进行折减, 不考虑岩土体随着变形的发展黏聚力退出机制和摩擦力产生机制。

本节从以下两个方面对传统简布条分法进行改进: ①将引入的 τ - Δ 本构模型 (式 (2)) 与沿滑动面的剪切位移模型 (式 (8)) 相结合建立基于位移改进的简布条分法, 以考虑推移式滑坡随着变形的发展渐进破坏过程; ②对安全系数重新定义: 首先, 引入局部安全系数 K_i , 对于处于峰值应力状态和峰后应力状态的滑坡区段条块安全系数定义为 $K_i = 1$, 处于峰前应力状态的滑坡区段条块安全系数 $K_i = S_{if} / S_i$ (其中 S_i 、 S_{if} 分别代表 i 条块滑面处的剪切应力和抗剪强度, 通过 τ - Δ 本构模型计算得出); 然后, 定义整体安全系数 $K = \sum S_{if} / \sum S_i$ (其中对处于峰值应力状态和峰后应力状态的滑坡区段条块分子中 S_{if} 替换为 S_i)。

取图 3 所示滑动体中一个分条进行受力分析, 不考虑动水压力、坡面荷载、地震力的作用, 条块上作用力有: 分块的重量 W_i , 条间作用力的法向分力 E_i 、 E_{i-1} , 条间作用力的切向分力 T_i 、 T_{i-1} , 条块底面的抗剪力 S_i , 条块底面的法向力 N_i 。力系在水平和竖直方向的平衡:

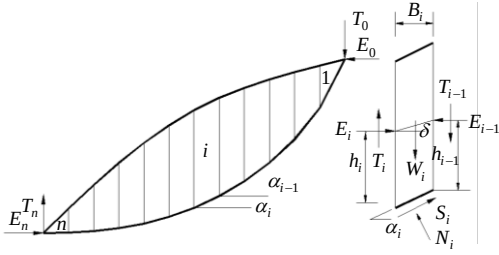


图3 改进简布条分法分析简图

Fig.3 Analysis diagram of improved Janbu slices method

$$\sum F_x = 0: \Delta E_i = N_i \sin \alpha_i - S_i \cos \alpha_i \quad (10)$$

$$\sum F_y = 0: N_i = (W_i - \Delta T_i) \sec \alpha_i - S_i \tan \alpha_i \quad (11)$$

对滑动面中点力矩的平衡, 并略去高阶微项:

$$T_i B_i = E_i \tan \delta_i - \Delta E_i \frac{h_i}{B_i} \quad (12)$$

式中: δ_i 为 i 条块推力线角; h_i 为推力 E_i 作用点高度; B_i 为 i 条块宽度。

由局部安全系数的定义可得

$$S_{if} = K_i S_i \quad (13)$$

对处于峰前应力状态的滑坡区段条块滑面处抗剪强度 S_{if} 根据式 (5) 计算为

$$S_{if} = c_i B_i \sec \alpha_i + N_i \tan \varphi_i \quad (14)$$

式中: c_i 、 φ_i 为第 i 条块滑带力学参数。

将式 (11)、(13) 代入式 (14) 得

$$\sum \frac{(W_i - \Delta T_i) \tan \varphi_i + c_i B_i \cdot \frac{\Delta_0 f(\alpha_i)[1 + \Delta_0^m f^m(\alpha_i)/s_i]^p}{\sqrt[m]{-s(1+m\rho)[1-1/(1+m\rho)]^p}}}{\left(1 + \frac{\tan \varphi_i \tan \alpha_i}{K_i}\right)} = \sum (W_i - \Delta T_i) \tan \alpha_i \quad (22)$$

整理得

$$\Delta_0 = \frac{\sum (W_i - \Delta T_i) \tan \alpha_i}{\sum \frac{(W_i - \Delta T_i) \tan \varphi_i + c_i B_i \cdot \frac{f(\alpha_i)[1 + \Delta_0^m f^m(\alpha_i)/S]^p}{\sqrt[m]{-s(1+m\rho)[1-1/(1+m\rho)]^p}}}{\left(1 + \frac{\tan \varphi_i \tan \alpha_i}{K_i}\right)}} \quad (23)$$

未知数和已有的等式列述于表 1, 由此可知未知数的个数和已有等式的个数相等, 改进简布条分法静定可解。由于坡顶竖向位移 Δ_0 出现在等式 (23) 两侧, 需要通过反复迭代, 计算步骤如下:

(1) 初次迭代时, 分别假设 $\Delta T = 0$, $\Delta_0 = 0$, $K_i = 1$, 利用式 (15)、(16) 求抗剪强度 S_{if} 、剪切应力 S_i ;

(2) 根据式 (10) 求 ΔE_i , 进而求得条块间水平推力 E_i , 根据式 (11) 求 N_i ;

$$S_{if} = \frac{c_i B_i \sec \alpha_i + (W_i - \Delta T_i) \sec \alpha_i \tan \varphi_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi_i}{K_i}} \quad (15)$$

$$S_i = \frac{c_i B_i \sec \alpha_i + (W_i - \Delta T_i) \sec \alpha_i \tan \varphi_i}{K_i + \tan \alpha_i \tan \varphi_i} \quad (16)$$

对处于峰值应力状态和峰后应力状态的滑坡区段条块 $K_i = 1$, 则

$$S_{if} = S_i = \frac{c_i B_i \sec \alpha_i + (W_i - \Delta T_i) \sec \alpha_i \tan \varphi_i}{1 + \tan \alpha_i \tan \varphi_i} \quad (17)$$

由式 (6)、(11) 确定, 引进 τ - Δ 本构模型中与正应力的相关参数 s_i 为

$$s_i = -\frac{(c_i + \sigma_{ni} \tan \varphi_i)^2}{G^2} \left(\frac{2\rho}{1+2\rho} \right)^{-2\rho} (1+2\rho) \quad (18)$$

其中:

$$\sigma_{ni} = \frac{N_i}{l_i} = \frac{(W_i - \Delta T_i) \sec \alpha_i - S_i \tan \alpha_i}{l_i} \quad (19)$$

式中: l_i 为第 i 条块底面长度。

由局部安全系数的定义 (式 (13))、沿滑动面的剪切位移模型 (式 (8))、 τ - Δ 本构模型 (式 (2)、(3)) 可得

$$K_i = \frac{S_{if}}{S_i} = \frac{\sqrt[m]{-s_i(1+m\rho)[1-1/(1+m\rho)]^p}}{\Delta_0 f(\alpha_i)[1 + \Delta_0^m f^m(\alpha_i)/s_i]^p} \quad (20)$$

考虑到 $\sum \Delta E_i = 0$, 得

$$\sum (W_i - \Delta T_i) \tan \alpha_i - \sum S_i \sec \alpha_i = 0 \quad (21)$$

将式 (13)、(20) 代入式 (21), 可得

(3) 根据式 (18)、(19) 求滑面岩土体本构参数 s_i , 进而根据式 (3) 求峰值位移 Δ_{peak} ;

(4) 根据式 (23) 求迭代一次近似坡顶条块竖向位移 Δ_0 ;

(5) 根据式 (20) 求迭代一次近似局部安全系数 K_i (程序自动判断, 若 $\Delta \geq \Delta_{peak}$ 则 $K_i = 1$);

(6) 由推力线的位置可知 h_i 、 δ_i , 利用式 (12) 可求得 T_i , 再由求差的方式得到 ΔT_i ;

(7) 重复以上步骤, 直到所求的 Δ_0 符合精度要求。

表1 改进简布条分法中所有的未知数和等式

Table 1 All unknowns and equations in improve Janbu slices method

未知数	个数	等式	个数
N_i	n	$\Sigma F_x = 0$	n
S_i	n	$\Sigma F_x = 0$	n
E_i	$n-1$	$\Sigma M_o = 0$	n
T_i	$n-1$	$h_i = 1/3 \cdot H_i$	$n-2$
h_i	$n-1$	局部安全系数定义(式(13))	n
K_i	n	条块底部剪切应力(式(16))	n
s_i	n	本构模型参数 s_i (式(17))	n
Δ_0	1		
总数	$7n-2$	静定可解	$7n-2$

3 实例分析

上节已经给出了改进简布条分法的基本原理和计算思路,笔者采用 Matlab 编制了相关计算程序可以方便地实现其计算。本节采用陈祖煜院士编写的《土质边坡稳定分析——原理·方法·程序》^[16]中介绍的 EX1(c)算例进行分析探讨。该算例是澳大利亚计算机协会(ACADS)公布的标准考核题中的一题,为非均质边坡,共有 28 家单位提供了计算答案。

已知土坡坡度比为 1:2, 土坡高度 $H=10$ m, 共包含 3 个土层, 该边坡的几何特征如图 4 所示, 各土层的物理力学指标如表 2 所示。浸润线处于滑动面以下, 不考虑水、荷载和地震力的作用, 滑动面采用文献[17]中介绍的搜索优化临界滑面, 根据滑动面折点把边坡分成 20 条。

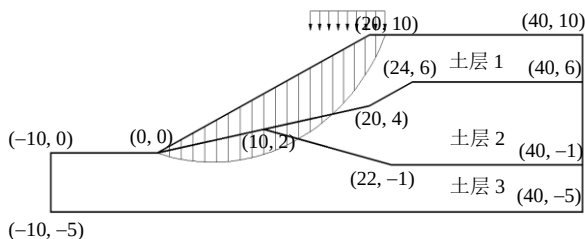


图4 非均质土坡剖面几何形态(单位: m)

Fig.4 Sectional geometry of heterogeneous slope (unit: m)

表2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil

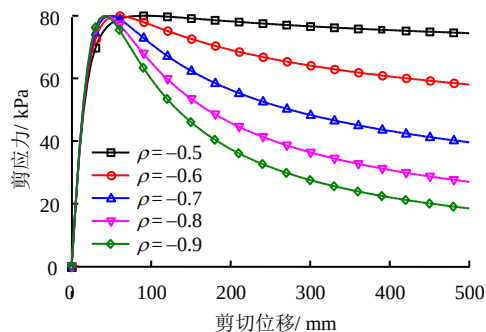
土体	黏聚力	内摩擦角	重度	本构参数		
	c / kPa	φ / (°)	γ / (kN/m ³)	G	m	ρ
土层 1	0.0	38	19.5	4 000	2	-0.7
土层 2	5.3	23	19.5	4 000	2	-0.7
土层 3	7.2	20	19.5	4 000	2	-0.7

注: 上述本构参数 G 由公式 $G = E / 2(1 + \nu)$ 计算得出, 由于缺乏原始资料, m 、 ρ 根据经验自拟。

3.1 τ - Δ 本构模型适用性分析

为更直观地表达参数 ρ 的作用, 该算例中土层 3

在法向应力为 200 kPa 的情况下, 分别令 $\rho = -0.5 \sim -0.9$, 则滑带土的 τ - Δ 曲线呈现出如图 5 所示的特征。可见 ρ 对峰前硬化段影响不大, 主要反映了岩土体随位移发展的软化特性, 与残余黏聚力和残余内摩擦角相关。

图5 τ - Δ 本构模型曲线特征Fig.5 τ - Δ constitutive model curve characteristics

该算例依靠经验取参数 $\rho = -0.7$, 分别令正应力分别为 100、200、300、400、500 kPa, 则土层 3 剪应力-剪切位移关系可以描述为如图 6 所示一系列曲线。从图中可以看出, 该本构模型可以描述不同压应力条件下地质材料的抗剪力学特性。

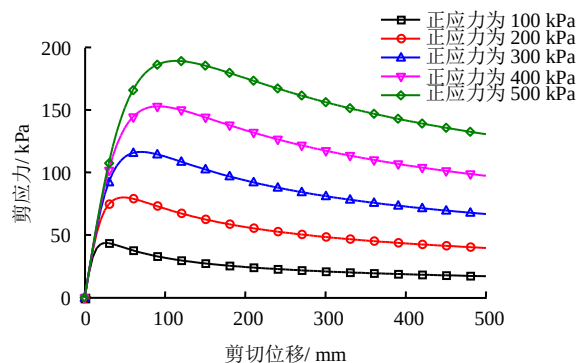


图6 不同正应力下本构模型曲线

Fig.6 Constitutive model curves under different normal stresses

3.2 基于位移改进简布条分法分析

(1) 与传统计算方法对比

传统简布条分法与改进简布条分法都需要迭代计算, 图 7 为通过本文编写的计算程序得到的安全系数迭代收敛图, 从图中可以看出二者收敛速度非常快。传统简布条分法得到的安全系数为 1.387, 与本算例推荐的裁判答案(见表 3)极为接近。改进的简布条分法得到的安全系数为 1.288, 略低于传统方法, 这不是偶然, 众多研究^[2-3, 12]表明, 基于土的峰值强度的极限平衡条分法应用于实际工程是偏于

危险的, 基于土的残余强度的极限平衡条分法应用于实际工程又是偏于保守的。具有应变软化性质的滑(边)坡的安全系数不仅取决于土的抗剪强度指标, 还与剪应力-剪切位移关系密切相关。本文的改进方法在传统简布条分法基础上初步考虑了滑带岩土体的抗剪能力与剪切位移的关系, 计算得到的安全系数更加合理。

表3 本算例推荐的安全系数裁判答案

Donald	SSA (Baker)	STAB (Chen)	GWEDGEM	EMU	Fredlund
1.390	1.390	1.385	1.390	1.390	1.406

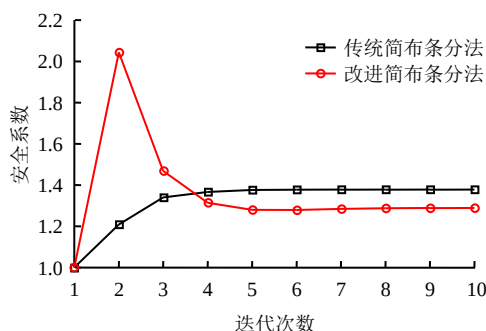


图7 安全系数迭代收敛曲线

Fig.7 Iterative convergence curves of safety factor

(2) 局部安全系数及条间水平推力分析

传统简布条分法假设整个滑面上的安全系数相同, 而改进方法从安全系数的本义出发提出局部安全系数的定义, 对处于峰后应力状态的条块安全系数取为 1。图 8 为改进简布条分法计算得到的局部条块安全系数。从图中可知: 1#~2#条块安全系数为 1, 属于破坏状态(不稳定状态), 不具有安全储备; 3#~20#条块安全系数分布呈现驼峰状(土质交界处有突变), 其中 10#条块安全系数最高为 1.564, 两侧条块安全系数顺势减小。图 9 为两种计算方法得到的条块间水平推力分布。从图中可以看出: 1#~11#条块为主滑段, 12#~20#为抗滑段; 改进简布条分法计算得到的滑坡推力小于传统简布条分法计算得到的滑坡推力, 这是因为改进方法对靠近滑坡后缘的主滑段抗滑能力“折减”较小。

通过上述计算得到初始工况下坡顶 1#条块的竖向位移 $A_0 = 18.2 \text{ mm}$, 各种外部和内部条件的改变(例如: 水位高度的变化、孔隙水压力的变化、滑坡后缘崩塌加载、使用条件的变化、地震作用、岩土体自身的流变性等)都会导致坡体产生额外的位移。本文通过在 1#~7#条块顶部施加分级面荷载来

模拟上述各种变化条件, 进而分析位移因素对于滑坡发育过程的影响。

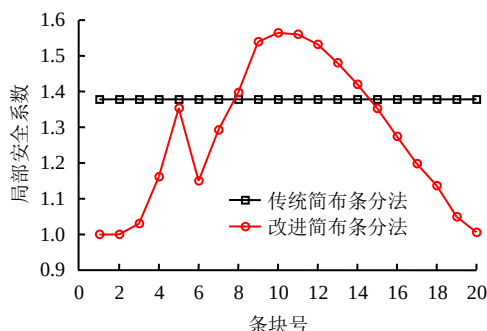


图8 改进简布条分法局部安全系数

Fig.8 Local safety factor of improved Janbu slices method

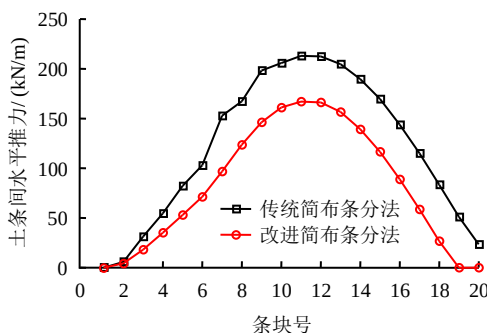


图9 土条间水平推力分布

Fig.9 Horizontal thrust distribution between soil slices

在坡顶共施加 6 级面荷载, 相邻不同等级面荷载增量为 5 kN/m^2 。从图 10 可以看出, 随着荷载等级的加大, 局部安全系数逐渐降低, 在两端率先破坏(安全系数降为 1), 并逐渐向中间延伸, 最终在 6 级面荷载 (30 kN/m^2) 作用下滑动面贯通, 有效地模拟了边坡从开始破坏到最终滑动面贯通的发育过程。这从理论上解释了有些坡体在受到外界扰动后, 发生部分变形可以重新达到稳定状态, 而有些坡体受到外界扰动后, 不能重新稳定的客观事实。同时 9#~12#条块的安全系数始终最大, 可以理解为该滑坡的关键条块, 在加固边坡时要充分利用关键条块的抗滑作用, 诸如抗滑桩等加固措施应该在 13#~14#条块位置处较为合适。

实际工程中关于位移最直观、最可靠的信息往往就是滑(边)坡的变形监测数据, 而且随着坡体变形的逐渐增大, 表现出边坡稳定性也越来越差。然而目前关于滑(边)坡位移的研究还停留在对坡体的变形过程进行定性分析, 或者对坡体稳定预测方法的研究阶段。如图 11 所示, 本文改进的简布条分法实现了坡体位移与安全系数之间的一一对应的

定量关系, 可以通过滑坡的变形的监测对其稳定性进行实时的评价, 进而实现滑坡的危险预警预报功能。

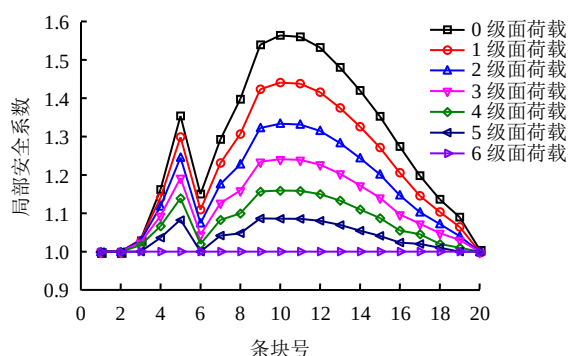


图 10 局部安全系数演化
Fig.10 Evolution of local safety factor

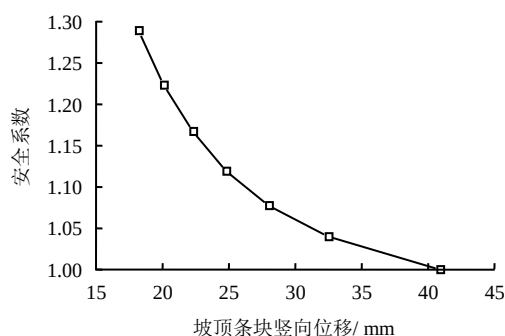


图 11 安全系数与位移之间的定量关系
Fig.11 Quantitative relationship between displacement and safety factor

4 结 论

本文提出基于位移改进的简布条分法并编制了相关的 Matlab 计算程序。通过一个具体计算实例, 表明该方法不存在收敛问题, 并得出以下结论:

(1) 基于土的峰值强度的极限平衡条分法应用于实际工程是偏于危险的, 滑坡的安全系数不仅取决于土的抗剪强度指标, 还与剪应力-剪切位移关系密切相关。本文的改进方法在传统简布条分法基础上初步考虑了滑带岩土体的抗剪能力与剪切位移的关系, 对具有应变软化性质的滑坡稳定性评价具有借鉴意义。

(2) 现行滑坡推力计算方法实质: 将滑坡的抗滑力进行折减, 将折减后的摩阻力用于计算, 从而确定计算断面的滑坡推力。实质上对处于峰值应力状态乃至峰后应力状态的滑坡区段来说已经不具备强度储备, 对其进行折减已经没有意义, 本文基于位移改进的简布条分法从安全系数的定义出发, 提出了局部安全系数的定义, 由此计算得到的安全系

数更加合理。

(3) 本文方法可以考虑位移因素对于滑坡渐进性发育的影响, 可以有效地模拟边坡从开始破坏到最终滑动面贯通的发育过程, 并且实现了坡体位移与安全系数之间一一对应的定量关系, 进而为实现滑坡的危险预警预报功能奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 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 several new methods of stability coefficient calculation of landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2431—2438.
- [2] FILZ G M, ESTERHUIZEN J J B, DUNCAN J M. Progressive failure of lined waste impoundments[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(10): 841—848.
- [3] 王庚荪. 边坡的渐进式破坏及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 19(1): 29—33.
WANG Geng-sun. The progressive failure of slope and the stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 19(1): 29—33.
- [4] 张晓平, 吴顺川, 张志增, 等. 含软弱夹层土样变形破坏过程细观数值模拟及分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1200—1205.
ZHANG Xiao-ping, WU Shun-chuan, ZHANG Zhi-zeng, et al. Numerical simulation and analysis of failure process of soil with weak intercalated layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1200—1205.
- [5] 刘泉声, 胡云华, 刘滨. 基于实验的花岗岩渐进破坏本构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 289—296.
LIU Quan-sheng, HU Yun-hua, LIU Bin. Progressive damage constitutive models of granite based on experimental results[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 289—296.
- [6] 谭文辉, 王家臣, 周汝弟. 岩体边坡渐进破坏的物理模拟和数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2000, 9(5): 56—58.
TAN Wen-hui, WANG Jia-chen, ZHOU Ru-di. Physical and numerical simulation on progressive failure of rock slope[J]. **Chinese Mining**, 2000, 9(5): 56—58.
- [7] XU Tao, XU Qiang, DENG Mao-lin, et al. A numerical analysis of rock creep-induced slide: A case study from Jiweishan Mountain, China[J]. **Environmental Earth**

- Sciences**, 2014, 72(6): 2111—2128.
- [8] LAW K T, LUMB P. A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(1): 113—122.
- [9] MILUTIN SRBULOV. A simple method for the analysis of stability of slopes in brittle soil[J]. **Soils and Foundations**, 1995, 35(4): 123—127.
- [10] MIAO Tian-de, MA Chong-wu, WU Sheng-zhi. Evolution model of progressive failure of landslides[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, 125(10): 827—831.
- [11] HUANG Ching-chuan. Developing a new slice method for slope displacement analyses[J]. **Engineering Geology**, 2013, 157(8): 39—47.
- [12] 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.
- [13] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1849—1854.
- LIU Xiao-li, DENG Jian-hui, LI Guang-tao. Shear strength properties of slip of landslide: An overview[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1849—1854.
- [14] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1996.
- [15] 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—2799.
- 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—2799.
- [16] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis—Theory methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [17] DONALD I, CHEN Z Y. Slope stability analysis by an upper bound plasticity method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34 (11): 853—862.

《岩土力学》2017 年第 2 期被 EI 收录论文 (38 篇, 收录率 100 %) (1)

序号	论文题名	作者	页码
1	振动荷载作用下软土加速蠕变的微观机制研究	雷华阳, 卢海滨, 王学超, 等	309—316
2	三向土工格栅筋-土界面特性拉拔试验研究	郑俊杰, 曹文昭, 周燕君, 等	317—324
3	表面源激发的瑞利波传播特性分析	柴华友, 柯文汇, 黄祥国, 等	325—332
4	预埋与绑扎埋管形式能量桩传热特性研究	刘汉龙, 吴迪, 孔纲强, 等	333—340
5	修正 Van Genuchten 模型拟合干旱、半干旱地区遗址土颗粒分曲线的可靠性研究	湛文武, 毕骏, 沈云霞, 等	341—348
6	基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究	邓友生, 吴鹏, 赵明华, 等	349—353
7	低温对煤岩渗透性影响试验研究	杨兆中, 张云鹏, 贾敏, 等	354—360
8	桩侧面形式对扩底桩竖向抗压特性影响分析	孔纲强, 顾红伟, 车平, 等	361—367
9	盾构地中对接冻结加固模型试验 (I) ——冻结过程中地层冻结温度场的分布特征	石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等	368—376
10	考虑起始水力坡降的软土大变形非线性固结分析	李传勋, 董兴泉, 金丹丹, 等	377—384
11	蠕动型滑坡滑带土蠕变特性研究	孙淼军, 唐辉明, 王满弘, 等	385—391
12	细/粗粒二元结构边坡的排水防渗效果试验研究	吴庆华, 张家发, 崔皓东, 等	392—399
13	基于修正 Drucker-Prager 准则的岩石次加载面模型	周永强, 盛谦, 朱泽奇, 等	400—408
14	基于声学数据反演定量评价致密砂岩储层微裂隙应力敏感性新方法	尹帅, 丁文龙, 单钰铭, 等	409—418
15	水土化学作用对土体黏聚力的影响——以蒙脱石-石英砂重塑土为例	刘剑, 崔鹏	419—427
16	平移模式下挡墙塑性临界深度极限分析	刘杰, 黄达, 赵飞, 等	428—434
17	描述循环荷载作用下黏土累积变形的改进模型	臧濛, 孔令伟, 曹勇	435—442
18	考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究	张连震, 张庆松, 刘人太, 等	443—452
19	膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征	李晶晶, 孔令伟, 穆坤	453—461
20	多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究	付晓, 张建经, 周立荣	462—470

(未完, 见第 690 页)