

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.036

用点接触模拟滑面的滑坡稳定性分析方法

王金梅¹, 张迎宾^{1, 2}, 赵兴权^{1, 3}, 余鹏程¹, 王 潘⁴, 侯瑞彬¹, 黄小福⁵, 魏 涛⁶

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 4. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072;
5. 中铁隧道集团有限公司勘测设计研究院, 广东 广州 511458; 6. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410021)

摘 要: 结合有限元强度折减法, 用点接触模拟滑面, 提出了适用于已知滑裂面的滑坡稳定性分析及滑坡推力计算的数值计算方法。以滑坡体为分析对象, 用切向和法向两组弹簧的弹簧力来模拟滑裂面上的剪切力和法向力; 结合强度折减法和摩尔-库仑强度准则对滑面弹簧刚度进行迭代计算, 求解得到了满足静力平衡的数值解。该方法避免了极限平衡条分法求解边坡稳定性时需对条间力进行诸多假设的局限, 也避免了有限元强度折减法求滑坡推力时需加桩计算的不便及收敛困难等问题。新方法能计算出极限状态下滑坡体上的应力、滑裂面上的边界力和稳定性系数以及给定安全系数下滑坡体上任意截面的滑坡推力大小、作用方向和位置, 具有较严格的理论基础, 可为实际工程中滑坡的治理提供一定的参考。

关 键 词: 滑坡稳定性; 滑坡推力; 滑面力; 点接触; 强度折减法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017) 09—2746—11

A method for slope stability analysis by simulating sliding face with point contact

WANG Jin-mei¹, ZHANG Ying-bin^{1, 2}, ZHAO John X.^{1, 3}, YU Peng-cheng¹,
WANG Pan⁴, HOU Rui-bin¹, HUANG Xiao-fu⁵, WEI Tao⁶

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China; 4. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610072, China; 5. Survey, Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China; 6. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410021, China)

Abstract: By simulating the sliding face with point contact, a numerical method for slope stability analysis with a prescribed sliding plane is proposed combining with the FEM and strength reduction theory. For a specific slope, the shear and normal forces of the sliding plane are represented by the forces of the shear and normal springs. Combined with the theory of strength reduction and the Mohr-Coulomb strength criterion, numerical results can be obtained by iteration of the spring stiffness under equilibrium condition. Compared with limit equilibrium method, the present method avoids the limits due to the slice-force assumption. Compared with shear strength reduction method in a finite element model, the present method overcomes the sliding piles and the convergence difficulty. The present method can provide body stress, boundary force and stability coefficient under limit state. The amplitude, direction and action point of the landslide thrust on an arbitrary section of the landslide, can also be obtained under a given safety factor. The present method, with strict theoretical basis, provides some guidance to landslide harness in practical engineering applications.

Keywords: landslide stability; landslide thrust; the force of sliding face; point contact; strength reduction theory

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51408511, No.41672286); 四川省青年科技基金 (No.2017JQ0042); 日本学术振兴会 (No.16F16056)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51408511, 41672286); Science & Technology Department of Sichuan Province (2017JQ0042); Japan Society for the Promotion of Science (16F16056).

第一作者简介: 王金梅, 女, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程和数值分析方法方面的研究工作。E-mail: wangjinmei_xyz@163.com

通讯作者: 张迎宾, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事 DDA 程序开发和应用方面的研究工作。E-mail: yingbinz516@126.com

1 引言

边坡稳定性分析是边坡设计的前提,它决定着其是否失稳以及失稳时存在多大的滑坡推力,以便为支护结构设计提供科学合理的依据^[1]。边坡稳定性分析的一个重要步骤是进行稳定性的定量计算,当前边坡稳定性分析的方法主要有:极限平衡法、极限分析法、滑移线场法、有限元强度折减法等^[2]。就目前工程应用而言,边坡稳定性分析方法中运用较多的主要还是极限平衡法。极限平衡法以刚体极限平衡理论为基础,其视边坡岩土体为刚体,不考虑岩土体变形对边坡稳定性的影响,并且在进行刚体极限平衡分析时,还须进行诸多简化和假定,如条分法中对条间力的作用大小、方向和位置的假设,以满足极限平衡的静力方程,使问题得以求解。由此给分析结果带来一定的误差^[3-6]。但因这类方法能够给出物理意义明确的边坡稳定性系数以及可能发生的破坏面,并能很快求解稳定性系数及滑坡推力,因而在实际工程的边坡稳定性分析中,这类方法得到了广泛的应用^[7-10]。

以有限元强度折减法为代表的数值计算方法^[11-12],在边坡稳定性分析中也发挥着极其重要的作用。这类方法不但能考虑边坡岩土体本身的变形对边坡稳定性的影响,而且能给出边坡岩土体中应力、应变分布,分析边坡破坏的发生和发展过程等^[6,13-14],具有较广泛的应用前景。但这类数值方法计算较为复杂,且其在计算滑坡推力时一般选取桩-土共同作用模型进行分析,对抗滑桩桩后水平应力从滑面到坡顶进行积分,得到滑坡推力^[15-16],因而每计算一处的滑坡推力就要重建一次模型,使计算趋于繁琐。

因此,本文提出了一种以滑体为分析对象,采用点接触模拟滑面,用切向和法向两组弹簧的弹簧力来模拟滑裂面上的剪切力和法向力。结合有限元法,对滑体进行的是弹性分析;应用强度折减法,采用摩尔-库仑准则对滑面上法向力和切向力进行判断,通过迭代滑面弹簧刚度求解得到极限状态下滑面力的解。本文方法适用于已知滑裂面的滑坡稳定性的求解,能给出滑坡的稳定性系数和滑体截面上的推力,计算过程中不需要引入各种假设条件,是介于有限元强度折减法和极限平衡法两种方法之间的一种数值方法。

2 分析模型

对于给定滑坡,其滑裂面已知,但滑裂面上的

受力分布情况未知。以滑体为分析对象,其滑面上受切向力和法向力作用,三维状态下滑面力为两组面力;取单位厚度滑体进行分析,滑体与滑床为线接触,作用力沿滑面线分布,模型如图1所示。

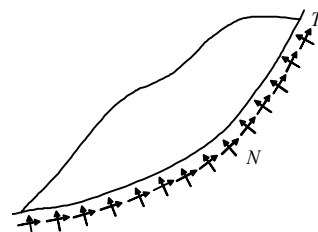
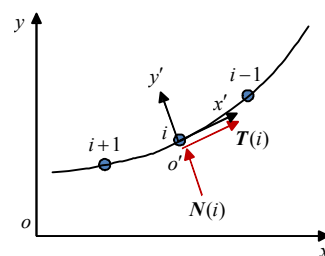


图1 滑体分析模型

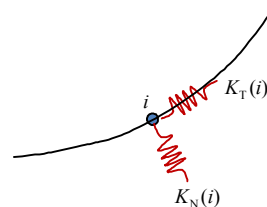
Fig.1 Analysis model of sliding body

结合有限元法,将滑面上的线接触简化为作用在滑面节点上的点接触,滑面上连续分布的切向和法向作用力等效为作用在滑面节点上的两组点荷载,用 $T(i)$ 、 $N(i)$ 表示,如图2(a)所示。

滑面形成初期,滑体处于稳定状态或者蠕滑状态。初始阶段,以小变形为主。忽略滑床变形的影响,滑体在滑面法向方向上位移为0,切向位移未知;滑面上滑体受法向力 N 和切向力 T ,其大小未知。由于边界上已知条件不能满足求解要求,故在边界节点上施加法向和切向两组弹簧,刚度分别为 K_N 、 K_T ,以其弹簧力代替滑面节点上的法向力和切向力,如图2(b)所示。图中, xoy 为整体坐标系, $x'o'y'$ 为局部坐标系。



(a) 滑面节点受力图



(b) 滑面节点弹簧模型

图2 滑面受力分析

Fig.2 Force analysis of a sliding surface

滑面上,弹簧作用点处于节点 i 上,在节点 i 上沿局部坐标 x' 和 y' 方向分别作用两个弹簧,弹簧刚度分别为 $K_T(i)$ 、 $K_N(i)$,弹簧力为

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{T}(i) \\ \mathbf{N}(i) \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_T(i) & 0 \\ 0 & K_N(i) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i \\ \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} = [\mathbf{K}_i] \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i \\ \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}'_i$ 、 $\mathbf{v}'_i$ 为节点在局部坐标下的位移; $i=1, 2, \dots, N_f$, N_f 为滑面上的节点总数。

弹簧应变能为

$$\Pi_f = \frac{1}{2} [K_T(i) \mathbf{u}'^2 + K_N(i) \mathbf{v}'^2] = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i & \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} K_T(i) & 0 \\ 0 & K_N(i) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i \\ \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

局部坐标与总体坐标下节点位移的关系为

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{v}_i \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i \\ \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} = [\lambda_i] \begin{Bmatrix} \mathbf{u}'_i \\ \mathbf{v}'_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[\lambda_i]$ 为坐标转换矩阵; α_i 为节点 i 处局部坐标与总体坐标的夹角, 逆时针为正。

将式 (3) 代入式 (2) 得

$$\Pi_f = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i & \mathbf{v}_i \end{Bmatrix} [\lambda_i] \begin{pmatrix} K_T(i) & 0 \\ 0 & K_N(i) \end{pmatrix} [\lambda_i]^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{v}_i \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i & \mathbf{v}_i \end{Bmatrix} [\lambda_i] [\mathbf{K}_i] [\lambda_i]^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{v}_i \end{Bmatrix}^T \quad (4)$$

式中: $[\lambda_i] [\mathbf{K}_i] [\lambda_i]^{-1}$ 是边界节点上因加弹簧而增加的系统刚度。

选取合适的滑面弹簧刚度初值 K_N 、 K_T , 组建滑体总体平衡方程进行迭代求解。

迭代计算的过程中, 允许切向弹簧刚度在初始值的 0.1~10 倍范围内调整。若切向弹簧刚度过大, 会增强滑面切向的约束而使计算收敛困难; 若切向刚度过小, 会引起过大切向位移。实际计算表明, 切向弹簧刚度初始值的量级一般取在滑坡体剪切模量量级左右, 计算收敛较快, 也比较接近实际情况, 并能得到合理的计算结果。由于滑体在滑面法向方向上位移近似为 0, 故采用有限元方法对固定边界的典型处理方式, 即在滑面法向方向上施加一组刚度较大的弹簧, 以使求解满足法向位移边界条件。

同时, 求解过程中, 需对滑面力进行以下判断:

① 滑面法向力 $\mathbf{N}(i)$ 不能出现拉力, 从滑坡后缘开始, 若节点法向力为拉, 则适当减小节点法向弹簧刚度, 直至法向力为正值或 0 值。② 本文求滑坡稳定性的方法是针对滑坡体极限状态进行的分析, 通过不断地折减和迭代计算, 使滑面力最终满足下式:

$$\mathbf{T}(i) = c' L(i) + \mathbf{N}(i) \tan \varphi' \quad (5)$$

式中: c' 、 φ' 为折减后的强度参数; $L(i)$ 为节点 i

控制的滑面长度。计算过程中, 处理方式: 若节点 i 上剪切力大于最大抗剪强度值, 且 $K_T(i) > 0.1kk$, $kk = K_T(1)$, 则适当减小节点切向弹簧刚度; 若节点 i 上剪切力小于最大抗剪强度值, 且 $K_T(i) < 10kk$, $kk = K_T(1)$, 则适当增大节点切向弹簧刚度, 直到滑面力在允许的误差范围内满足式 (5)。

根据以上判断, 更新滑面力弹簧刚度矩阵, 重新进行求解, 直至所有节点力都满足要求。

由于对接触弹簧刚度采用的是迭代求解, 求解过程中弹簧刚度并不是一直不变的, 通过滑面弹簧刚度的迭代而使切向力达到摩尔-库仑准则下的极限值, 计算中严格满足力的平衡条件, 适当放宽了对滑面位移解的限制, 对滑面接触的模拟是一种近似的弹塑性模拟。

3 数值算法

对 Mohr-Coulomb 材料, 强度折减系数 ω 可表示为

$$\tau' = \frac{\tau}{\omega} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\omega} = \frac{c}{\omega} + \sigma \frac{\tan \varphi}{\omega} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (6)$$

式中: σ 、 τ 分别为正应力和剪应力; c 、 φ 分别为黏聚力和摩擦角; c' 、 φ' 分别为经折减后的黏聚力和摩擦角, 且有 $c' = \frac{c}{\omega}$, $\tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{\omega}$ 。

根据传统方法, 稳定性系数 F_s 定义由滑动面的抗滑力 (矩) 与下滑力 (矩) 之比得到。因此, 结合强度折减法, 在一定的折减系数下, 当抗滑力与下滑力之比为 1 时, 此时的折减系数 ω 即为滑坡体的稳定性系数。

由于滑面上作用力大小未知, 因此, 本文计算方法主要目标是通过滑面弹簧刚度进行迭代, 得到一组满足力边界和受力平衡的滑面力的解。

具体计算步骤如图 3 所示。

对于稳定性系数未知的边坡, 可先在折减系数为 1 的情况下对边坡稳定性进行试算, 若计算不收敛, 则说明边坡不稳定, 求稳定性系数时折减系数应小于 1; 反之, 折减系数取大于 1 进行数值计算。改变折减系数 ω , 重复上述计算流程, 直至滑面上土体都处于极限平衡状态, 此时的折减系数即为滑坡的稳定性系数。其中, GG 为滑面上不满足边界条件的节点数。

当要求滑坡具有一定的安全系数 K 时, 在此安全系数的折减下, 若计算收敛, 说明滑坡满足稳定要求, 不需要进行治理; 反之, 则在该安全系数的

折减下, 滑坡不能稳定, 需要对其进行治理。当滑坡不满足稳定要求时, 为了得到滑坡推力, 计算中进行如下处理, 在滑体下 endpoint 处施加一固定支座, 用以承受滑坡体的不平衡力, 并使强度经折减后的滑面土体都处于极限平衡状态, 计算收敛后即可求得滑坡体上的滑坡推力。

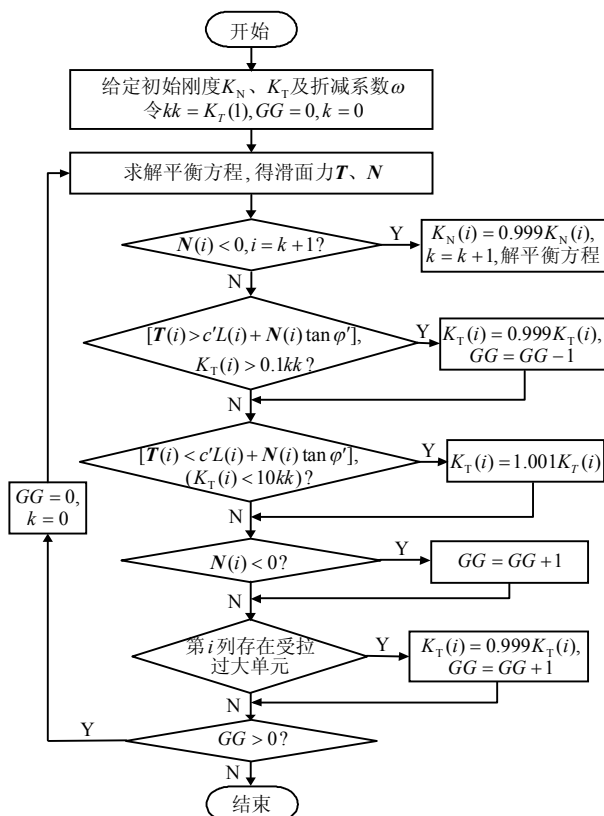


图3 计算流程图

Fig.3 Algorithm flow diagram

4 边坡概化模型分析

选取澳大利亚计算机应用协会 (ACADS) 针对边坡稳定性的考题 EX11^[17]来建立滑坡模型, 取文献[18]搜索出的圆弧形滑裂面作为滑动面, 滑面圆心为 (30.32, 51.70), 滑坡模型如图 4 所示。取滑体为分析对象, 其有限元网格划分如图 5 所示。

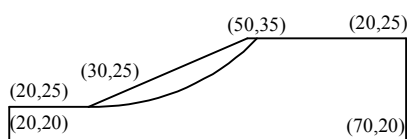


图4 滑坡示意图 (单位: m)

Fig.4 Schematic of a landslide (unit: m)

计算中, 滑体材料参数见表 1^[19]。采用平面应变计算, 滑体厚度取 1 m。由于滑体在滑面法向上

位移为 0, 故在滑面法向加 1 组刚度较大的弹簧, 法向弹簧初始刚度取为: $K_N(i) = 500 \text{ MN/m}$, $i = 1, 2, \dots, N_f$ 。

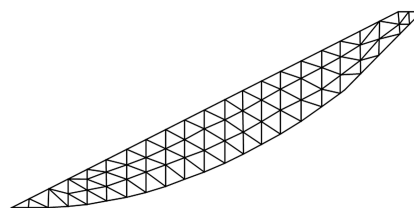


图5 滑体网格划分

Fig.5 Meshing of landslide body

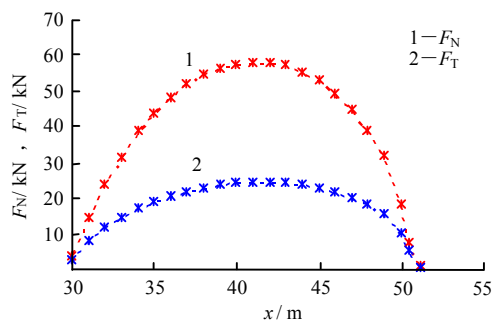
表1 滑体材料参数

Table 1 Material parameters of the landslide body

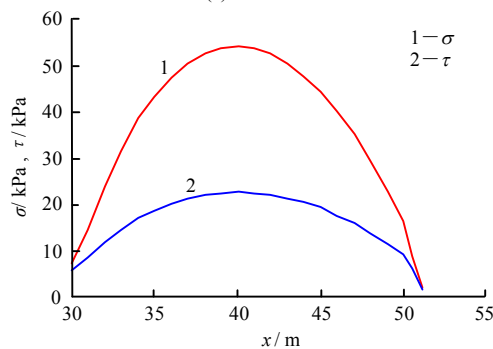
黏聚力	内摩擦角	重度	弹性模量	剪切模量	泊松比
c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	E / MPa	G / MPa	μ
3.0	19.6	20	10	4	0.25

4.1 稳定性分析

计算时, 切向弹簧初始刚度取 $K_T(i) = 100 \text{ kN/m}$, $i = 1, 2, \dots, N_f$ 。计算结果表明, 沿该滑面此滑体处于不稳定状态, 其稳定性系数 $F_s = 0.9838$, 与文献[18]的计算结果 ($F_s = 0.9790$) 及传递系数法的计算结果 ($F_s = 0.9865$) 都较为接近。极限平衡状态下, 从滑面顶点开始沿滑面从上到下, 滑面上的节点力和等效应力如图 6 所示, 滑面上最大正应力和切应力均发生在滑面中下部。



(a) 节点力



(b) 应力

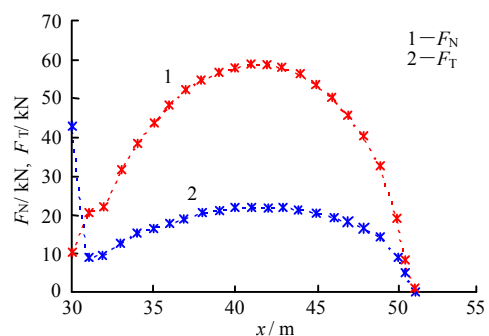
图6 极限平衡状态下滑面力分布

Fig.6 Distribution of force on sliding surface under a limit equilibrium state

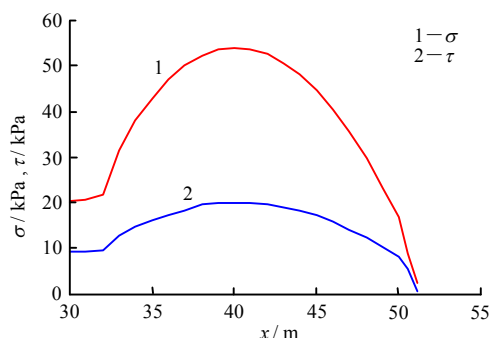
4.2 滑坡推力计算

在滑坡防护与治理工程中, 一个关键的问题是支挡结构的设计方法是否合理, 这就首先要求准确确定作用在支护结构上的滑坡推力。作为挡土结构设计的一个准则是, 在给定的安全系数下, 要求土体处于极限平衡状态, 岩土体抗剪强度得到充分发挥, 此时支挡结构上承受主动土压力。

选用安全系数 K 值, 主要应从滑坡活动可能造成的后果、防治工程措施的目的、建筑物的重要性及其容许变形值, 以及对滑坡的性质、滑动因素、滑体和滑带岩土的结构与强度指标调查了解的可靠程度等方面来综合考虑。算例分析中取安全系数 $K=1.1$, 切向弹簧初始刚度取 $K_T(i)=110 \text{ kN/m}$, $i=1, 2, \dots, N_f$ 。计算得到滑面受力如图 7 所示, 图中横轴的始端对应滑面的最底端。由于在此安全系数的折减下, 滑体不能处于稳定状态, 故在滑体下端最末的滑面节点上施加一固定支座来承受滑坡体的不平衡力。由于固定支座的施加, 滑坡体尖端局部范围内受力趋势有所改变。图 7(a)中在滑面最底端节点上的节点力由于不平衡力(剩余下滑力)的作用而发生突变, 且主要表现在切向方向, 滑体的这种剩余下滑力主要由施加的固定点承担; 图 7(b)为滑面应力分布。由于滑面法向力一定, 其能提供



(a) 节点力



(b) 应力

图 7 滑面力分布($K=1.1$)

Fig.7 Distribution of force on sliding surface($K=1.1$)

的抗剪力也一定, 故在滑面底端的滑面应力并不会由于不平衡力的作用而发生较大突变。

滑体截面力合力 F 的作用位置、作用方向(与 x 轴正方向的夹角)规定如图 8 所示。

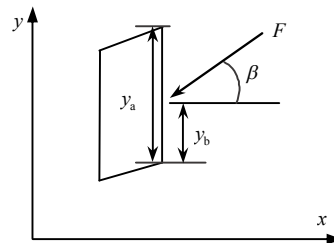
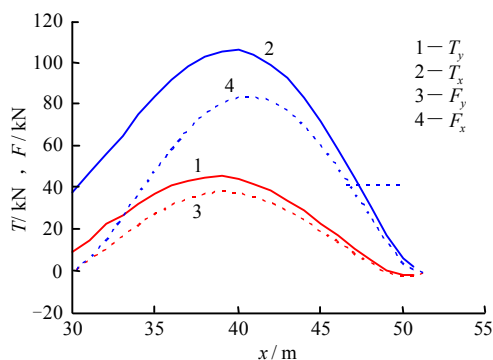


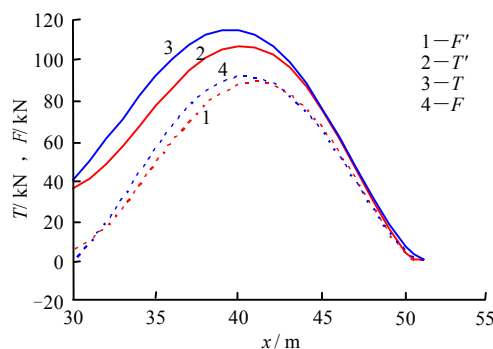
图 8 作用于滑体竖向截面的基本力系

Fig.8 The force on vertical section of landslide body

图 9 给出了极限平衡状态($\omega = F_s = 0.9838$)和安全储备系数 $K=1.1$ 时, 两种状态下滑坡推力的对比情况。在滑坡的治理防护中, 主要关注的是滑坡体作用在抗滑结构上的水平推力大小, 图 9(a)分别给出了两种情况下滑坡推力分量的分布。其中, F_x 、 F_y 分别是极限平衡状态下的滑坡推力分量, T_x 、 T_y 分别是 $K=1.1$ 时的滑坡推力分量。可见, 安全储备系数 K 取 1.1 时, 由于对滑面强度参数进行了折减,



(a) 分力



(b) 合力

图 9 滑坡推力对比

Fig.9 Comparison of landslide thrusts

滑面能提供的抗滑力不足以抵挡滑体的下滑力, 因而在滑体的固定点处积累下不平衡力, 且由于不平衡推力的作用, 滑坡推力的水平分量明显增大, 且在合力中起主导作用。图 9(b)分别给出了上述两种情况下滑坡推力的合力, 用 T 和 F 表示, 图中 T' 和 F' 分别对应为用传递系数法计算得到的滑坡推力合力。由计算结果可以看出, 本文计算方法得到的滑坡推力 T 、 F 与传递系数法计算得到的滑坡推力 T' 、 F' 变化趋势基本一致, 但由于本文方法避免了条间力假设带来的误差, 且考虑了滑坡体变形的影响, 计算得到的滑坡推力在滑坡体中下部分较用传递系数法得到的结果偏大, 使结果偏于保守, 因而可以采用本文方法计算滑坡推力。

图 10 给出了滑坡体中部的 5 个截面上滑坡推力水平分量沿截面竖向方向的分布。图中, Y 为滑体纵向截面上单元节点编号 (从上至下)。由图可知, 水平推力大致呈抛物线型或拱形分布, 与文献[15]计算得到的趋势较为一致, 比较接近实际。而在传统滑坡的治理中, 一般假设作用在支护结构上的滑坡推力成三角形、矩形或梯形分布, 可见, 这种假设与实际情况相比可能存在偏差。

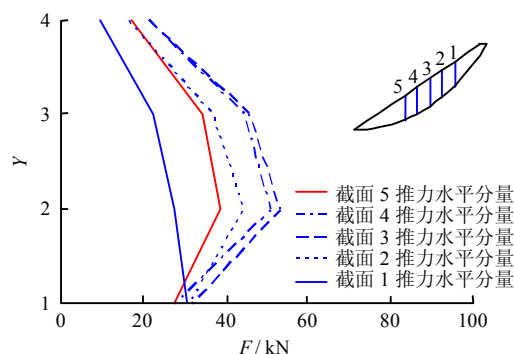


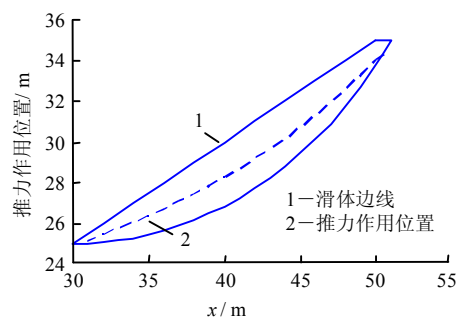
图 10 截面水平推力分布

Fig.10 Distribution of the horizontal landslide thrust

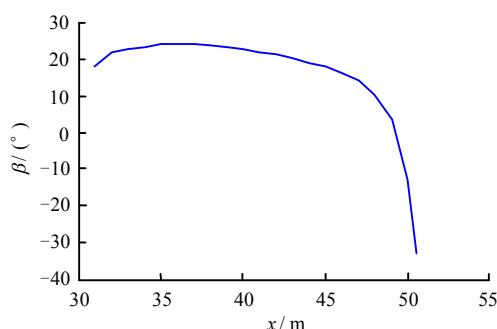
安全储备系数 $K=1.1$ 时滑坡推力合力的作用位置如图 11 所示。在该情况下, 滑坡推力的作用位置主要集中在滑体截面高度的 40%~50%处, 推力与水平轴的夹角 β 主要集中在 20° 左右。由此可见, 传统条分法为了减少未知量和方程数, 一般对条间力的作用位置 and 方向进行了假设, 以便于求解, 其假设可能会与实际情况存在一定偏差。

图 12 给出了相应的滑体上第 1 和第 3 主应力 σ_1 、 σ_3 及剪应力 τ_{xy} 的分布趋势。由于抗滑力的不足, 滑坡体上部作用力向下推挤, 主应力最大值发生在滑体中部滑面附近, 而剪应力最大值发生在滑

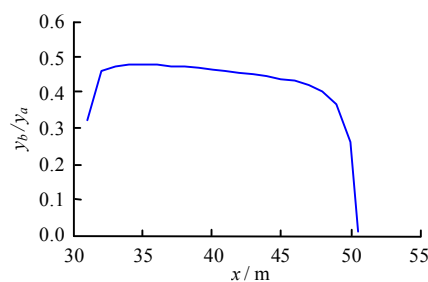
体上部, 说明滑体最易在上部发生剪切破坏。



(a) 推力作用位置



(b) 推力与 x 轴的夹角 β



(c) 高度比 (y_b/y_a)

图 11 滑坡推力作用位置

Fig.11 Acting position of landslide thrust

4.3 滑面力讨论

图 13 给出了不同安全系数下, 滑面力达到极限状态时滑面上法向力和切向力的分布。从图中可知, 除去由于施加固定点对滑面局部范围的影响外, 随着安全系数的增大, 滑面上的切向力随之减小, 剩余下滑力逐渐增大; 而滑面上的法向力变化较小。

安全系数的作用是对滑面的参数进行折减, 由此可知, 对一确定滑坡体, 随着参数 c 、 φ 值的改变, 滑面上法向力的变化并不明显。由此, 可先求出滑面上的法向力, 再结合其他稳定性计算方法, 如求解边坡稳定系数的矢量和法^[18, 20], 可用以简化稳定系数的求解过程。

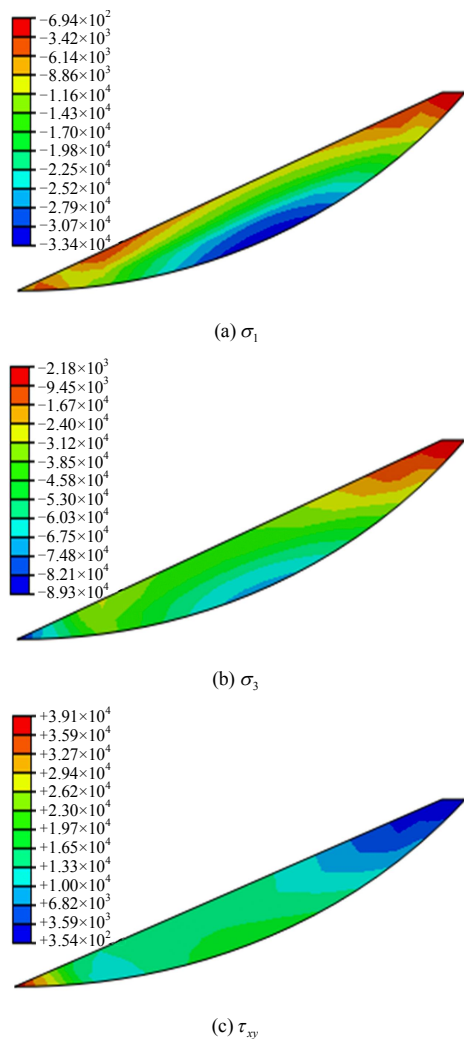


图 12 滑体应力 (单位: Pa)

Fig.12 Stress of landslide body (unit: Pa)

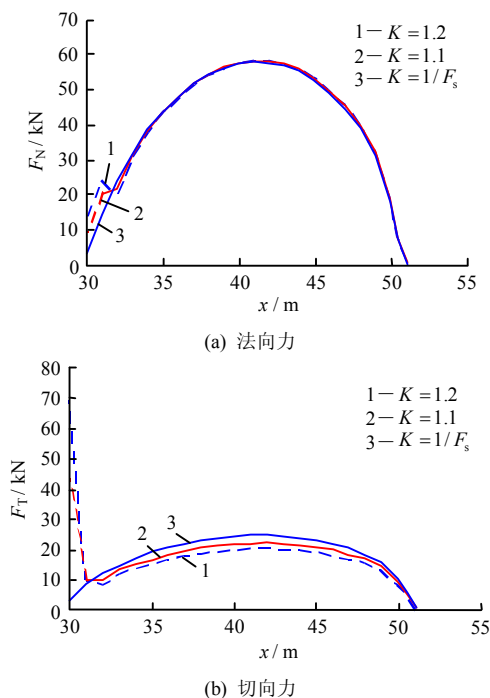


图 13 不同参数下的滑面力

Fig.13 Forces of sliding face under different parameters

5 工程实例分析

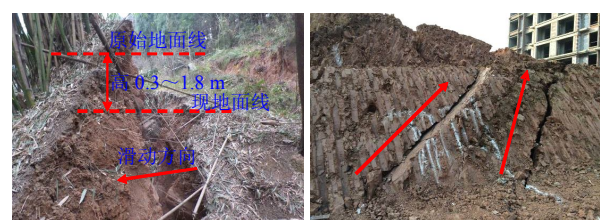
滑坡位于广元市利州区万源新区 6 号道路 3 段 (简称万源滑坡), 由于当地进行建筑物基坑开挖及施工开挖边坡, 导致施工场地南侧斜坡土层局部出现了微弱变形, 2014 年 12 月斜坡变形加剧, 后缘形成连续贯通的拉张裂缝、错落坎; 中部至前部拉张、剪拉裂缝发育; 前缘、中前部陡坎也发生不同程度垮塌、鼓胀变形、剪出口土体反翘; 左侧缘房屋开裂变形。滑坡体已出现整体的滑移变形迹象, 处于蠕滑变形阶段。

滑坡总体呈撮箕形 (见图 14), 其边界特征明显。在滑坡区后侧为滑动形成的拉陷槽 (图 15(a)), 其后缘陡坎构成滑坡的后缘边界。滑坡前缘为滑坡滑动后反翘的剪出口 (图 15(b)), 构成滑坡的前缘。滑坡西侧以侧向拉张裂缝和略呈沟型地形为滑坡西侧边界。滑坡东侧也以侧向拉张裂缝和略呈山脊地形为滑坡的东侧边界。



图 14 万源新区 6 号道路 3 段滑坡全景

Fig.14 Full view of the landslide at 3rd section of 6 road in Wanyuan



(a) 拉陷槽

(b) 剪出口

图 15 滑坡后缘拉陷槽和前缘土体反倾剪出口

Fig.15 Trailing edge and shear opening of landslide

滑坡中部、前部为人工开挖的陡坡, 陡坡间由较窄缓平台相连, 滑坡前后缘形成的高差为 31 m, 平均坡度为 17° 。主滑方向上, 滑坡平均长度约 93 m, 平均宽度为 132 m。滑坡面积为 $1.23 \times 10^4 \text{ m}^2$, 钻孔揭露滑体厚度为 6.50~11.00 m, 平均厚度为 8.29 m, 滑坡体积为 $10.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属中型滑坡。

调查表明, 该滑坡已发生了明显整体滑动位移变形, 滑动面已贯通, 滑坡土体主要为粉质黏土。

本次对滑坡的稳定性计算中, 选择其主滑剖面1-1'进行计算, 计算剖面见图16, 滑体网格划分如图17所示。

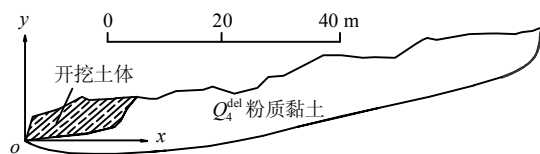


图16 万源滑坡主滑剖面1-1'

Fig.16 Main cross section 1-1' of Wanyuan landslide

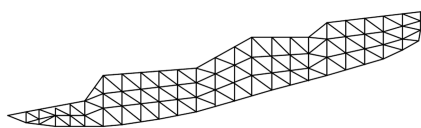


图17 万源滑坡滑体网格划分

Fig.17 Meshing of Wanyuan landslide body

根据滑坡可能遭遇的不利情况, 选取天然状态、持续暴雨状态两种工况来计算。滑坡体主要由粉质黏土组成, 计算参数见表2。采用平面应变计算, 滑体宽度取1 m。法向弹簧初始刚度取为: $K_N(i) = 500 \text{ MN/m}$, $i = 1, 2, \dots, N_f$ 。

表2 万源滑坡材料参数

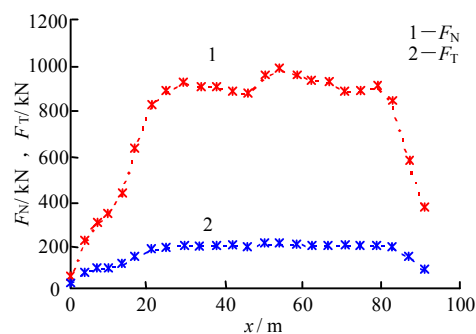
Table 2 Material parameters of Wanyuan landslide

E /MPa	G /MPa	μ	天然状态			饱和状态		
			c /kPa	φ /(°)	γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)	γ /(kN/m ³)
10	4	0.25	14.5	9.4	20.4	12.5	8.4	20.7

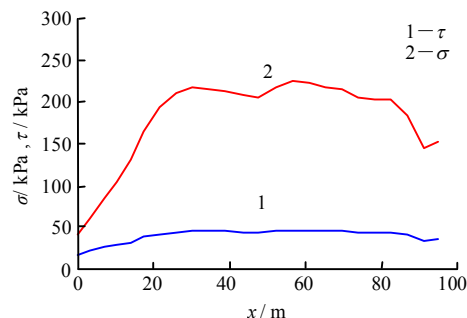
5.1 稳定性分析

计算时, 切向弹簧初始刚度取 $K_T(i) = 2 \text{ MN/m}$, $i = 1, 2, \dots, N_f$ 。依据《滑坡防治工程勘察规范》中的评价标准: 稳定系数 $K < 1.0$ 为不稳定; $1.0 \leq K < 1.05$ 为欠稳定状态; $1.05 \leq K < 1.15$ 为基本稳定状态; $K \geq 1.15$ 为稳定状态。经计算, 天然工况时滑坡稳定系数为 1.11, 处于基本稳定状态; 而在暴雨工况时, 该滑坡稳定系数为 0.98, 处于不稳定状态。用传递系数法算得该边坡在以上两种工况下的稳定性系数分别为 1.10 和 0.97, 与本文方法计算结果相差不大。因此, 随着时间的推移和雨季来临, 滑坡变形将加剧, 产生滑动, 直到达到新的平衡状态为止。

天然工况下, 当滑体处于极限平衡状态时 ($\omega = F_s = 1.11$), 滑面上的节点力和等效应力如图18所示, 该滑坡滑面上最大正应力和切应力均发生在滑面中部。



(a) 节点力



(b) 应力

图18 极限平衡状态下万源滑坡滑面力分布

Fig.18 Distribution of force on sliding surface of Wanyuan landslide under the limit equilibrium state

图19给出了天然工况下极限平衡状态时 ($\omega = F_s = 1.11$) 滑体内推力水平分量 F_x 、竖向分量 F_y 及其合力 F 的分布情况。在滑坡的治理防护中, 主要关注的是滑坡体作用在抗滑结构上的水平推力大小。由图可知, 推力的水平分量大于竖向分量, 其在推力中起主要作用。

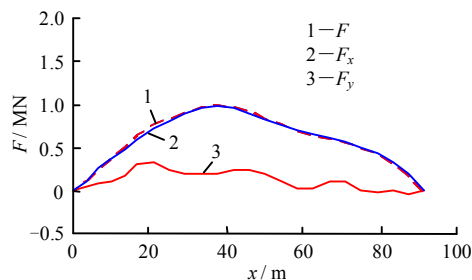
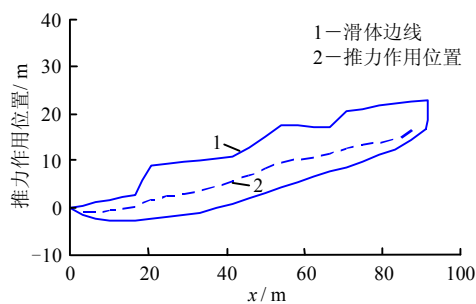


图19 万源滑坡截面推力及其分量 ($\omega = F_s = 1.11$)

Fig.19 Thrust and component forces of Wanyuan landslide ($\omega = F_s = 1.11$)

该工况下极限平衡状态时 ($\omega = F_s = 1.11$) 推力合力的作用位置如图20所示。该情况下, 推力的作用位置主要集中在滑体截面高度的40%~50%处; 从滑坡后缘到前缘, 推力与水平轴的夹角 β 逐渐增大。

图21给出了相应的滑体上第1和第3主应力 σ_1 、 σ_3 及剪应力 τ_{xy} 的分布趋势。主应力最大值发



(a) 推力作用位置

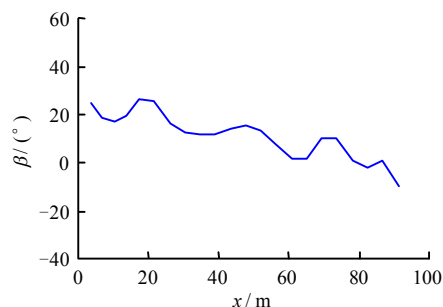
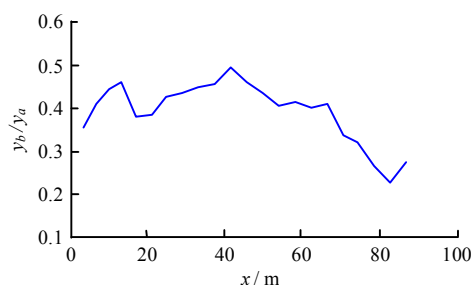
(b) 推力与 x 轴的夹角 β (c) 高度比(y_b/y_a)图 20 万源滑坡截面推力作用位置($\omega=F_s=1.11$)

Fig.20 Acting position of the thrust in Wanyuan landslide

生在滑体中下部滑面附近, 而剪应力最大值发生在滑体中上部滑面附近, 说明该滑坡易在此位置附近发生剪切破坏。这是由于滑坡下部的建筑物基坑开挖及施工开挖边坡, 导致该滑坡后缘形成连续贯通的拉张裂缝, 从而引起滑体上部失稳始滑而推动滑体下部滑动, 使得滑坡推力在中部累积, 滑面逐渐贯通, 故该滑坡属于推落式滑坡。

5.2 滑坡推力计算

图 22 给出了暴雨工况下, 安全系数取 $K=1.2$ 时推力水平分量 F_x 、竖向分量 F_y 及其合力 F 的分布情况, 计算时切向弹簧初始刚度取 $K_T(i)=2 \text{ MN/m}$, $i=1, 2, \dots, N_f$ 。由于计算所取安全系数 K 大于对应工况下该滑坡体的稳定性系数, 因此。滑面能提供的抗滑力不足以抵挡滑体的下滑力, 从而在滑体的固定点处(滑体前缘)积累了不平衡力。图 22(b)同时给出了用传递系数法计算出的推力 T 的分布趋势, 其计算结果与用本文方法计算出的推力大小相差不大。

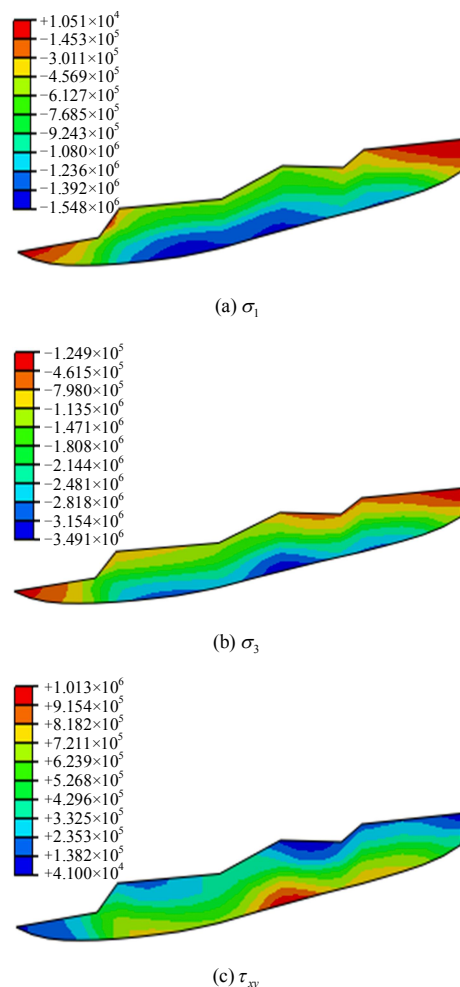
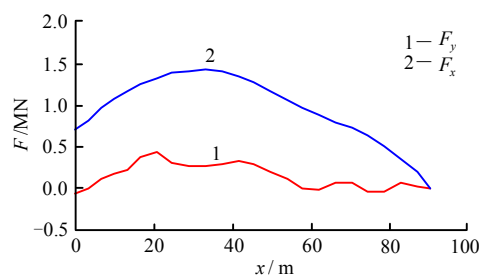
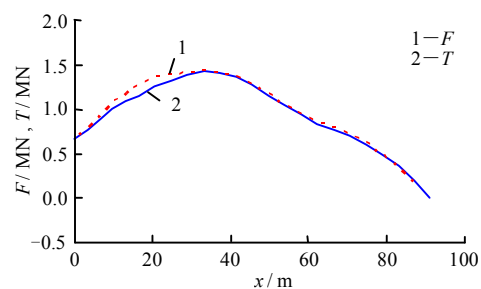


图 21 万源滑坡滑体应力 (单位: Pa)

Fig.21 Stress of the Wanyuan landslide body (unit: Pa)



(a) 分力



(b) 合力

图 22 暴雨工况下万源滑坡截面推力

Fig.22 Landslide thrust of Wanyuan landslide under rainstorm condition

6 讨 论

采用本文提出的数值方法计算滑坡稳定性系数时, 需要赋予切向弹簧刚度初始值。由于本文边界条件采用的是力边界条件, 计算严格满足力的平衡条件, 放宽了对位移的限制。在迭代计算的过程中, 切向弹簧刚度参与迭代, 允许切向弹簧刚度在一定范围内调整, 因此, 对弹簧切向刚度的初始值取值精度要求不是太高。实际计算表明: 若切向弹簧刚度过大, 会增强滑面切向的约束而使计算收敛困难; 若切向刚度过小, 则会引起过大切向位移; 多次数值试验表明, 切向弹簧刚度初始值的量级一般取在滑坡体剪切模量量级左右, 计算收敛较快, 并得到合理的结果。由于迭代计算中允许切向弹簧刚度在初始值的 0.1~10 倍范围内调整, 切向弹簧刚度初始值一旦确定, 其调整范围也随之确定, 但仍可通过弹簧的变形来满足力平衡的要求, 因此, 初始值的选取不会对边坡的抗滑能力造成太大影响。

本文方法结合了强度折减法, 对于稳定性系数未知的边坡, 可先在折减系数为 1 的情况下对边坡稳定性进行试算, 若计算不收敛 (迭代次数超过规定值, 计算中取为 10^5), 则说明边坡不稳定, 求稳定性系数时折减系数应小于 1 (按 0.001 梯度递减); 反之, 折减系数取大于 1 进行数值计算。

本文滑坡模型的分析是建立在已知滑裂面的基础之上, 若结合一定的滑裂面搜索方法, 本文分析方法亦可用于边坡的稳定性分析。文中滑体的变形分析是以弹性分析为主, 而实际中土体一般为弹塑性材料, 因此, 建立滑坡体的弹塑性分析模型, 有待对滑坡土体进行弹塑性分析。

7 结 论

本文基于有限元强度折减法, 用点接触来模拟滑面, 通过在滑面节点上施加弹簧来模拟滑面上的法向力和切向力, 并对滑面弹簧刚度进行迭代计算, 求解得到一组满足静力平衡和摩尔-库仑强度准则的滑面力的解, 从而提出一种适用于已知滑裂面的潜在性滑坡稳定性计算和滑坡推力计算的数值方法。

(1) 该方法严格满足了力的平衡条件, 与极限平衡条分法相比, 求解过程不需要过多假设, 也避免了有限元强度折减法等数值方法求解滑坡推力时需要加桩处理带来的诸多不便以及求解过程中收敛困难等问题。

(2) 该方法能够给出滑坡体任意位置处滑坡推

力的大小、方向、作用位置及纵向截面滑坡推力的大小和分布形式, 计算方便快捷, 能为实际工程中滑坡的治理提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝, 等. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 70-76.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu, et al. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[C]//Proceedings of Sessions of the 7th Academic Conference, Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Science and Technology Press, 2002: 70-76.
- [2] 林峰, 黄润秋. 边坡稳定性极限平衡条分法的探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(4): 9-13.
LIN Feng, HUANG Run-qiu. A study on the limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1997, 8(4): 9-13.
- [3] 邹广电, 蒋婉莹. 边坡稳定性分析的一个改建条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1953-1959.
ZOU Guang-dian, JIANG Wan-ying. Rebuilt slice method for slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 1953-1959.
- [4] 杨明成. 基于力平衡求解安全系数的一般条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1216-1221.
YANG Ming-cheng. A general slice method for determination of factors of safety based on force equilibrium[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1216-1221.
- [5] 黄梦宏, 丁桦. 边坡稳定性分析极限平衡法的简化条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2529-2536.
HUANG Meng-hong, DING Hua. Some assumption conditions of limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2529-2536.
- [6] 曾亚武, 田伟明. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5355-5359.
ZENG Ya-wu, TIAN Wei-ming. Slope stability analysis by combining FEM with limit equilibrium method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.2): 5355-5359.

- [7] 王志斌, 李亮, 杨小礼, 等. 水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 29—34.
- WANG Zhi-bin, LI Liang, YANG Xiao-li, et al. Application of horizontal slice method in stability analysis of high fill embankments at slope[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2007, 20(3): 29—34.
- [8] 王小东, 戴福初, 黄志全. 基于瑞典条分法进行水库岸坡最危险滑动面自动搜索的 GIS 实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3129—3134.
- WANG Xiao-dong, DAI Fu-chu, HUANG Zhi-quan. Realization of automated searching by GIS for most dangerous slip surface of reservoir bank slope based on Swedish slice method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.1): 3129—3134.
- [9] 夏元友, 裴尧尧, 王智德, 等. 地下连续墙泥浆槽壁稳定性评价的水平条分法[J]. 岩土工程学报, 2013, 34(6): 1128—1133.
- XIA Yuan-you, PEI Yao-yao, WANG Zhi-de, et al. Horizontal slice method for stability of slurry trench[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 34(6): 1128—1133.
- [10] 于斯滢, 邵龙潭, 刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1185—1190.
- YU Si-ying, SHAO Long-tan, LIU Shi-yi. Stability analysis of tailings dam based on finite element limit equilibrium method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1185—1190.
- [11] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [12] 马萃林, 朱明, 王建华. 有限差分法 FLAC 在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国矿山工程, 2008, 37(5): 19—22.
- MA Cui-lin, ZHU Ming, WANG Jian-hua. Application of finite difference method FLAC in analyzing slope stability[J]. **China Mine Engineering**, 2008, 37(5): 19—22.
- [13] 梁庆国, 李德武. 对岩土工程有限元强度折减法的几点思考[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3053—3058.
- LIANG Qing-guo, LI De-wu. Discussion on strength reduction FEM in geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3053—3058.
- [14] 袁维, 李小春, 王伟, 等. 一种双折减系数的强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2222—2230.
- YUAN Wei, LI Xiao-chun, WANG Wei, et al. Study on strength reduction method based on double reduction parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2222—2230.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求边(滑)坡支撑结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552—3558.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Calculation of inner force of support structure for landslide/slope by using strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3552—3558.
- [16] 徐骏, 李安洪, 肖世国. 折线型滑面滑坡桩排推力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 34(11): 3479—3482+3488.
- XU Jun, LI An-hong, XIAO Shi-guo. Study of landslide thrust distribution law of row of piles in reinforced landslide with polygonal line slip surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 34(11): 3479—3482+3488.
- [17] DONALD I B, GIAM P. The ACADS slope stability programs review[C]//6th International Symposium on Landslides. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1992: 1665—1670.
- [18] 吴振君, 葛修润. 求解边坡矢量和安全系数的条分法[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2337—2342.
- WU Zhen-jun, GE Xiu-run. Solving vector sum factor of safety of slope by method of slices[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2337—2342.
- [19] 张超, 杨春和. 有限差分强度折减法求解边坡稳定性[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 17—21.
- ZHANG Chao, YANG Chun-he. Stability analysis of slope by strength reduction FDM[J]. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2011, 28(2): 17—21.
- [20] 刘艳章, 葛修润, 李春光, 等. 基于矢量法安全系数的边坡与坝基稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2130—2140.
- LIU Yan-zhang, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Stability analysis of slope and dam foundation based on vector method safety factor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2130—2140.