

文章编号: 1674-599X(2020)02-0022-07

# 求解推移式滑坡的一种改进条分方法

丁博, 陈文胜, 潘峰

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为解决传统条分法在推移式滑坡的边坡稳定性分析计算中存在的不足, 基于推移式滑坡的破坏机制, 对传统的条分法模型进行了改进, 建立了一种简便的适应推移式滑坡的边坡稳定性分析模型, 定义了其安全系数, 并推导出了相应的稳定性安全系数计算公式, 开发出了推移式滑坡的边坡稳定性分析软件。该软件能准确识别推移式滑坡形式、滑坡的最薄弱条块或条块群, 工程师们可针对薄弱部位采取更合理、准确及经济的加固措施。通过计算案例的对比与分析, 考虑推移破坏模式下, 其所得的安全系数通常较传统法小。因此, 对于推移式滑坡在评估和加固时, 推荐采用推移式计算方法得到安全系数。

**关键词:** 推移式滑坡; 条分法; 推移式 Bishop 条分法; 安全系数

中图分类号: U418.5<sup>+</sup>2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.004

## An improved slice method for solving thrust-type landslide

DING Bo, CHEN Wen-sheng, PAN Feng

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to solve the shortcoming of the traditional slice method in stability analysis and calculation of thrust-type landslide, based on landslide mechanism, the traditional slices mode was improved to establish a handy slope-stability-analysis model of thrust-type landslide. And a new safety factors was defined. The corresponding formula for calculating the stability safety factor was deduced. Moreover, the analysis computer program of thrust-type landslide was developed. The sliding form of thrust-type landslide and frail slices can be precisely distinguished by the program. Therefore, rational, accurate and economical measures can be taken to reinforce the slope. Comparing with traditional slice method, the safety factor of thrust-type landslide is usually smaller. The method is recommended to evaluate and reinforce the slope.

**Key words:** thrust-type slope; slices analysis method; thrust-type Bishop's method; safety factor

边坡稳定性分析是岩土工程中遇到的常见问题。目前, 求解方法有极限分析、极限平衡和有限元数值计算等。传统的以极限平衡理论为基础的条分法有瑞典条分法和 Bishop 条分法等, 现仍为边坡分析和评估的主要方法。

在条分法的研究过程中, 出现了一系列的简化方法。如: Bishop 法、Morgenstern-Price 法及 Spencer 法等, 使边坡稳定性求解变得简单和易实现。近年

来, 陈祖煜<sup>[1-5]</sup>等人致力于条分法的研究, 对边坡稳定性分析基本理论做出了有益的推进和补充。

依据滑坡始滑部位或位移形式的差异, 可将非整体式滑坡划分为推移式滑坡、牵引式滑坡和更复杂的位移模式。学者们对推移式滑坡做了大量研究, 卢应发<sup>[6-7]</sup>等人基于推移式滑坡渐进破坏机制, 提出了推移式滑坡的 2 种破坏模式, 并通过对滑坡破坏控制的研究, 提出了不同破坏模式的控制标准

收稿日期: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778067)

作者简介: 丁博(1992-), 男, 长沙理工大学硕士生。

及几种新的滑坡稳定性计算方法。杨光华<sup>[8-9]</sup>等人通过分析和判断滑坡应力场和位移的破坏类型,发现推移式滑坡上部的位移和应力水平高于下部的;基于变模量强度折减法,求解推移式滑坡的安全系数。王宝亮<sup>[10-11]</sup>等人对推移式滑坡的演化规律进行了研究。但牵引式或推移式滑坡的力学特点明显不符合整体式滑坡求解安全系数的特点,其滑动面是渐进破坏的,滑动面的强度发挥和达到极限或破坏有明显的先后次序。因此,针对推移式滑坡,作者在条分法模型的基础上,拟对传统的 Bishop 条分法进行改进,提出一种推移式滑坡的简便计算分析方法,并开发推移式滑坡的边坡稳定性分析软件 AOSS-DC。而牵引式滑坡的分析理论及滑坡破坏的控制标准与推移式滑坡的存在着较大的差异,已另文进行了分析<sup>[12]</sup>。

## 1 推移式滑坡模型介绍

### 1.1 推移式滑坡的破坏机制

推移式滑坡的始滑部位位于滑坡后缘,即其破坏始发于坡体上部。在坡体自重或附加荷载的作用下,坡体上部率先打破极限平衡状态,出现局部剪切裂缝,且裂缝呈圆弧状,渐进贯通坡体上部,上部随即失去稳定而产生滑动推力,裂缝开始向坡体下部渐进延伸。随着变形的累积和圆弧滑动面的渐进发育,当坡体下部条块的抗滑力不足以抵抗上部推力时,滑动面贯通坡体下部,边坡整体失去稳定并沿着滑动面产生滑动破坏。

推移式滑坡的破坏过程可视为边坡滑动面由易发生滑动的上部条块群向下部条块群渐进延伸贯通整个边坡的过程,也可视为较为稳定的下部条块群在上部条块群的推动下渐进失稳的过程。因此,在整个渐进破坏过程中,上部条块群扮演着“推”的角色,而下部条块群则相对较稳定。如果将推移式滑坡(或趋势)的滑体分为发起推力的部分和被推移的部分,设:被推移的下部条块群的安全系数为  $F_{sd}$ ;发起推移的上部条块群的安全系数为  $F_{su}$ ;传统方法计算的边坡整体安全系数为  $F_s$ ;按推移式分析后获得的边坡安全系数为  $F_{s-new}$ 。

从理论上讲,推移式滑坡安全系数( $F_{sd}$ ,  $F_{su}$  和  $F_s$ )是不相等的,即:  $F_{sd} > F_s > F_{su}$ ,  $F_{su} < F_{sd}$  是识别推移式滑坡的重要依据。

## 1.2 推移式模型的假设及计算方案的改进

### 1.2.1 推移式模型的假设

在推移式滑坡中,上部条块群较下部条块群更易发生滑动破坏,二者在相对稳定性上存在着大、小的关系。但用传统的 Bishop 条分法计算时,未针对该关系对抗滑力发挥系数作区分,仍将边坡整体安全系数的倒数  $1/F_s$  作为全部条块的抗滑力发挥系数,但计算所得的上部条块群抗滑力与上部条块群实际所能提供的抗滑力存在着一定的误差。在本研究中,假定:①滑体分为2部分,即产生推移力的上部滑体和被推移的下部滑体。②对于上部滑体和下部滑体,按传统的整体式方法分别求解安全系数时,忽略上部与下部条块群接触面上的条间力。③当分析推移式滑坡整体稳定性时,上部与下部条块群接触面上的条间力须予以考虑。④上部滑体对应的上部条块群的抗滑力发挥系数的大小和黏聚力的存在仅取决于其自身的稳定性状况。

### 1.2.2 推移式模型计算方案的改进

基于这些假定,提出改进的计算方案为:①推移式滑坡整体稳定性分析前,应先对边坡进行局部稳定性分析,以此判断边坡的滑动形式,并获取  $F_{su}$ 。②当  $F_{su} \geq 1.0$  时,则上部条块群并未滑动。计算  $F_{s-new}$  时,上部条块群滑动面上的抗滑力发挥系数取上部条块群安全系数的倒数  $1/F_{su}$ 。③当  $F_{su} < 1.0$  时,上部条块群发生滑动,其抗剪强度极限发挥。因此,在计算  $F_{s-new}$  时,应取滑动面上的抗滑力发挥系数为1,滑动面上土体间的黏聚力  $C$  丧失,即应取零。④计算  $F_{s-new}$  时,下部条块群的抗滑力发挥系数取  $1/F_{s-new}$ 。

## 1.3 推移式滑坡的计算模型

边坡条分法模型如图1所示,其条块划分如图2所示。

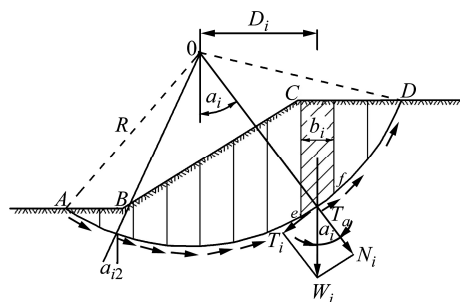


图1 边坡条分法模型

Fig. 1 The mechanical model of slice method

基于图2的模型,考虑推移式滑坡的破坏机制及特点,将所有条块按力学特点分为发起推力的上部条块群和被动受推力的下部条块群。

### 1) 上部条块群

将边坡划分为  $n$  个条块并自上往下编号, 对前  $i(i \leq n, i=1, 2, \dots)$  块土条依次使用传统 Bishop 条分法进行稳定性分析, 获取一系列局部安全系数  $F_{si}$ , 取最小  $F_{si}$  定义为推移式滑坡的上部条块群安全系数, 对应的条块数  $i$  为上部条块群的条块数。上部条块群计算是一个渐进搜索对比分析的过程(如图3所示), 其计算式为:

示), 其计算式为:

$$\begin{cases} F_{si} = \frac{\sum_{m=1}^i M_r}{\sum_{m=1}^i M_s} (i \leq n, i=1, 2, \dots, L); \\ F_{su} = \min(F_{si}). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i$  为上部条块群的条块数;  $n$  为推移式滑坡的条块数;  $M_r$  为上部条块群的抗滑力;  $M_s$  为上部条块群的致滑力。

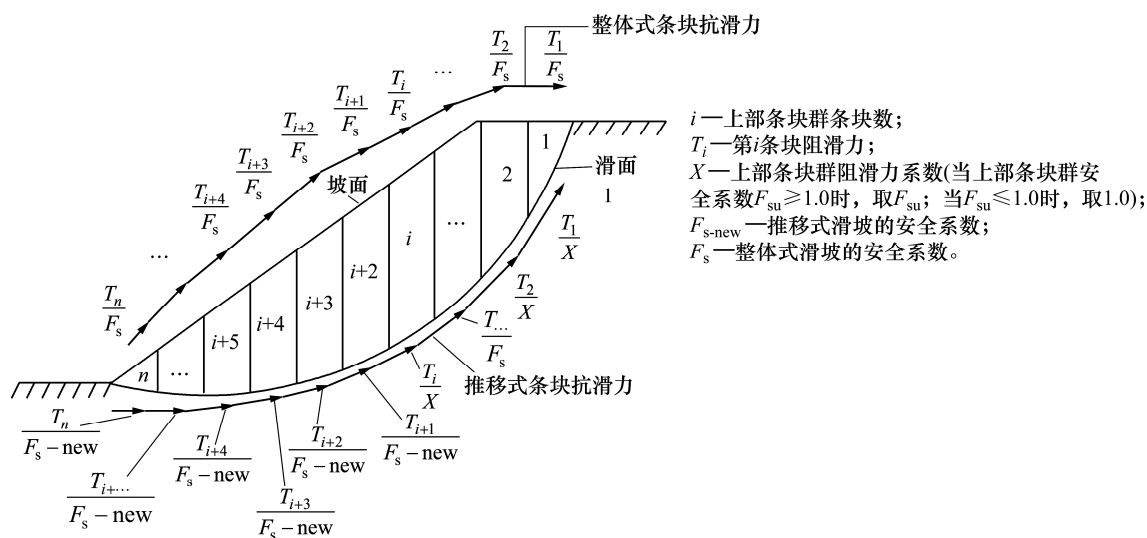


图2 条块划分

Fig. 2 The division of slices

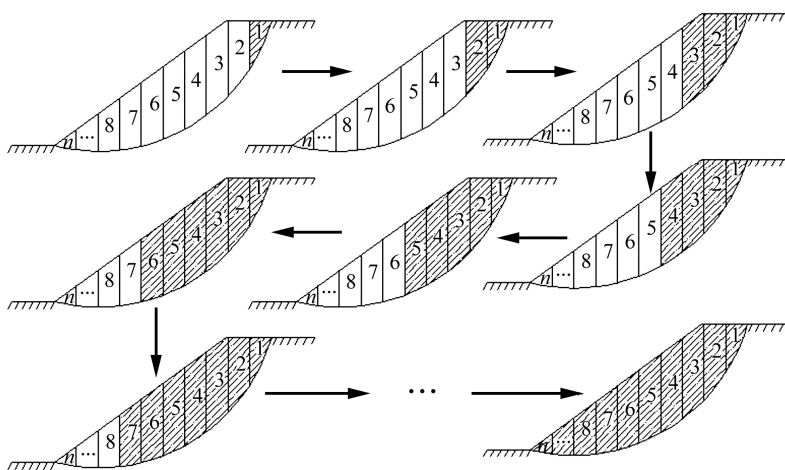


图3 上部条块群搜索计算示意

Fig. 3 The computed sketch of upper slices

### 2) 下部条块群

确定上部条块群数  $i$  后, 将边坡剩余条块(前第  $i+1$  块至第  $n$  块区域)定义为下部条块群, 使用传统

Bishop 条分法对该区域进行稳定性分析, 所得安全系数  $F_{sd}$  定义为下部条块群的安全系数, 其计算式为:

$$F_{sd} = \frac{\sum_{m=i+1}^n M_r}{\sum_{m=i+1}^n M_s} \quad (2)$$

上部条块群和下部条块群作为边坡整体的一部分,分别对其独立进行局部稳定性分析是判断边坡滑动形式的重要手段。当分析所得的局部安全系数存在的关系为:① $1.0 < F_{su} \leq F_{sd}$ ; ② $F_{su} < 1.0 < F_{sd}$ ,则可初步判断该边坡可能出现推移式破坏。

$F_{s\text{-new}}$  是以改进的上部条块群实际所能提供的抗滑力为基础,在考虑局部条块群接触面的条间作用力的前提下,对下部条块群进行局部迭代求解得到的,其与局部条块群的抗滑力发挥系数存在着函数关系,由于函数关系式左右均含有未知数  $F_{s\text{-new}}$ ,因此,  $F_{s\text{-new}}$  仍须通过迭代求解。

$$F_{s\text{-new}} = \begin{cases} f\left(\frac{1}{F_{su}}, \frac{1}{F_{s\text{-new}}}\right), & F_{su} \geq 1; \\ f\left(1, \frac{1}{F_{s\text{-new}}}\right), & F_{su} < 1. \end{cases} \quad (3)$$

#### 1.4 推移式模型与传统整体式模型的对比分析

当  $F_{su} \geq 1.0$  时,取上部条块群(前  $i$  块)抗剪强度发挥系数  $1/F_{su}$ 。与整体式滑坡抗剪强度发挥系数  $1/F_s$  相比,改进后上部条块群提供的抗滑力将有所提高,上部条块群产生的下滑力亦有所提高,因此,计算所得的  $F_{s\text{-new}}$  小于  $F_s$ 。

当  $F_{su} < 1.0$  时,取(前  $i$  块)滑动面上的抗剪强度发挥系数为 1。与  $1/F_s$  相比,改进后上部条块群提供的抗滑力会有所提高或者降低。①当  $F_{su} < 1.0 \leq F_s$  时,若采用  $1/F_s$ ,会使上部条块群的抗滑力不能充分发挥,那么改进后的上部条块群实际提供的抗滑力将有所上升,则有  $F_{s\text{-new}} < F_s$ 。②当  $F_{su} < F_s < 1.0$  时,若采用  $1/F_s$ ,会使上部条块群发挥的抗滑力超过其实际所能提供的抗滑力,那么改进后的上部条块群的实际提供的抗滑力将有所下降。但由于上部条块群产生滑动后土体黏聚力  $C$  丧失。因此,  $F_{s\text{-new}}$  与  $F_s$  的大小关系受制于具体的边坡和参数的影响,作者将在算例部分对二者的大小关系作说明。

传统的整体式 Bishop 条分法的较推移式 Bishop 条分法而言,其计算过程更简单,对无须考虑滑动破坏机制的边坡稳定性分析,有着不可替代

的地位和优势。

推移式 Bishop 条分法对条块进行的局部稳定性分析是传统整体式 Bishop 条分法所不具备的。通过局部稳定性分析,可判断边坡相对易产生滑动的区域,并针对该区域提前采取加固措施,提升边坡的整体稳定性。由于其考虑了边坡的滑动破坏机制,因此,更适用于分析出现推移式破坏的边坡。

## 2 Bishop 条分法的改进计算式

### 2.1 整体式的 Bishop 条分法计算式

Bishop 条分法考虑了土条两侧法向力  $E_i$ , 忽略了切向力  $X_i$ , 通过减少未知数使平衡方程静定可解。条块受力分析如图 4 所示。

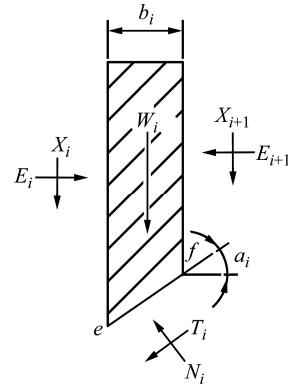


图4 条块受力分析

Fig. 4 Sketch of force analysis of slice

Bishop 条分法假定,当边坡尚未破坏时,若边坡的安全系数为  $F_s$ ,则土条滑动面上的抗剪强度只发挥了一部分( $1/F_s$ ),这部分抗剪强度与滑动面上的切向力  $T_i$  相平衡,即:

$$T_i = \frac{\tau_{fi} l_i}{F_s} = \frac{1}{F_s} (N_i \tan \alpha_i + C_i l_i) \quad (4)$$

式中:  $\tau_{fi}$  为土体的抗剪强度;  $C_i$  为土体黏聚力;  $N_i$  为土条底面的法向力;  $\alpha_i$  为土条底面中点的法线与竖直线交角;  $l_i$  为土条底边的长度。

根据假设,传统 Bishop 方法的安全系数计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\alpha_i}} (W_i \tan \phi_i + C_i l_i \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (5)$$

其中:  $m_{\alpha_i} = \cos \alpha_i + \frac{1}{F_s} \tan \phi \sin \alpha_i$ 。

式中:  $W$  为土体自重;  $\phi$  为土体内摩擦角。

## 2.2 基于推移式滑坡的 Bishop 条分法计算式

$F_{s-\text{new}}$  的计算分 2 种情形进行。

### 2.2.1 情形一( $F_{su} \geq 1.0$ )

1) 上部条块群提供的抗滑力为:

$$A_1 = \sum_{m=1}^i \frac{W_i \tan \phi_i + c_i l_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_{su}} \tan \phi_i \sin \alpha_i} \quad (6)$$

2) 下部条块群提供的抗滑力为:

$$B_1 = \sum_{m=i+1}^n \frac{W_i \tan \phi_i + c_i l_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_{s-\text{new}}} \tan \phi_i \sin \alpha_i} \quad (7)$$

3) 边坡的下滑力为:

$$C_1 = \sum_{m=1}^n W_i \sin \alpha_i \quad (8)$$

4) 推移式滑坡的安全系数为:

$$F_{s-\text{new}1} = f\left(\frac{1}{F_{su1}}, \frac{1}{F_{s-\text{new}1}}\right) = \frac{A_1 + B_1}{C_1} \quad (9)$$

### 2.2.2 情形二( $F_{su} < 1.0$ )

1) 上部条块群提供的抗滑力为:

$$A_2 = \sum_{m=1}^i \frac{W_i \tan \phi_i}{\cos \alpha_i + \tan \phi_i \sin \alpha_i} \quad (10)$$

2) 下部条块群提供的抗滑力为:

$$B_2 = \sum_{m=i+1}^n \frac{W_i \tan \phi_i + c_i l_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_{s-\text{new}}} \tan \phi_i \sin \alpha_i} \quad (11)$$

3) 边坡的下滑力为:

$$C_2 = \sum_{m=1}^n W_i \sin \alpha_i \quad (12)$$

4) 推移式滑坡的安全系数为:

$$F_{s-\text{new}2} = f\left(1, \frac{1}{F_{s-\text{new}2}}\right) = \frac{A_2 + B_2}{C_2} \quad (13)$$

安全系数  $F_{s-\text{new}}$  通过反复迭代求解, 求解方法同传统的 Bishop 条分法。  $F_{s-\text{new}}$  初始迭代值假定为 1。

## 3 算例

### 3.1 程序的介绍

边坡稳定性计算程序 AOSS-DC 为 Analysis of

side slope-DC 的缩写。其开发基于 MFC 的单文档程序, 使用交互式操作界面及 C++ 开发语言, 开发环境为 Visual Studio 2013 集成开发环境。该程序包括文件系统、模型绘制、模型设定、分析计算及数据可视化五大模块, 各模块独立开发, 低耦合, 具有良好的整体稳定性。

### 3.2 上部条块群安全系数 $\geq 1.0$ 的算例

根据程序功能, 建立了简单均质边坡模型, 如图 5 所示。其坐标参数为(0,0)、(500,0)、(500,250)、(400,250)、(200,200)和(0,200), 搜索区域的参数左上角坐标设定为(25,490), 右下角坐标设定为(435,280)。

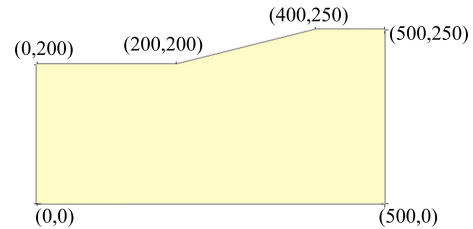


图 5 算例边坡模型(单位: 0.1 m)

Fig. 5 Slope model of the example(unit: 0.1 m)

案例 1: 土层容重取  $5.0 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力取  $10.0 \text{ kN/m}^2$ , 内摩擦角取  $28.0^\circ$ 。图 6 的计算结果为:  $F_{s-\text{new}}=2.740 \ 50$ ,  $i=3$ ,  $F_{su}=1.309 \ 00$ ,  $F_s=2.840 \ 60$ 。

计算结果表明: 在上部条块群安全系数大于 1.0 时, 推移式模型的计算结果相对传统方法降低了 3%。

### 3.3 上部条块群安全系数 $< 1.0$ 的算例

1)  $F_{su} < 1.0 \leq F_s$

案例 2: 土层容重取  $20.0 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力取  $10.0 \text{ kN/m}^2$ , 内摩擦角取  $12.0^\circ$ 。图 7 的计算结果为:  $F_{s-\text{new}}=1.036 \ 70$ ,  $i=1$ ,  $F_{su}=0.447 \ 80$ ,  $F_s=1.503 \ 00$ 。图 8 的计算结果为:  $F_{s-\text{new}}=1.030 \ 30$ ,  $i=3$ ,  $F_{su}=0.555 \ 20$ 。

计算结果表明: 在上部条块群的安全系数小于 1.0 且整体式安全系数大于 1.0 时, 推移式模型相对

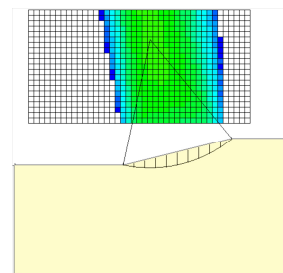


图 6 案例 1 推移式模型计算结果

Fig. 6 The result of thrust-type model of case one

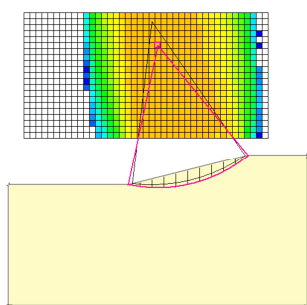


图7 案例2推移式模型计算结果

Fig. 7 The result of thrust-type model of case two

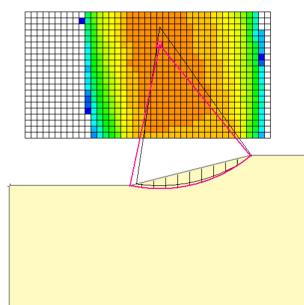


图10 案例4推移式模型计算结果

Fig. 10 The result of thrust-type model of case four

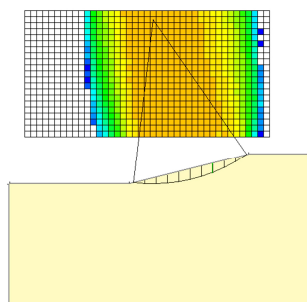


图8 案例2推移式模型全局计算结果

Fig. 8 The overall result of thrust-type model of case two

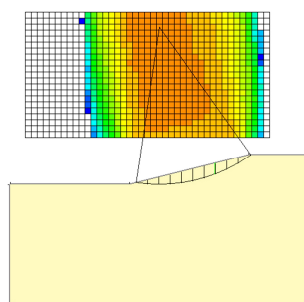


图11 案例4推移式模型全局计算结果

Fig. 11 The overall result of thrust-type model of case four

传统公式的计算结果有所下降。不仅相同滑动面上比原最小安全系数有所降低, 边坡的全局最小安全系数会进一步降低, 推移式模型相对传统整体式模型计算结果降低了2%。

## 2) $F_{su} < F_s < 1.0$

案例3: 土层容重取  $10.0 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力取  $0.60 \text{ kN/m}^2$ , 内摩擦角取  $10.0^\circ$ 。图9的计算结果为:  $F_{s\text{-new}}=0.750\ 40$ ,  $i=1$ ,  $F_{su}=0.401\ 00$ ,  $F_s=0.749\ 60$ 。

案例4: 土层容重取  $20.0 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力取  $10.0 \text{ kN/m}^2$ , 内摩擦角取  $10.0^\circ$ 。图10的计算结果为:  $F_{s\text{-new}}=0.884\ 40$ ,  $i=1$ ,  $F_{su}=0.399\ 90$ ,  $F_s=0.897\ 30$ 。图11的计算结果为:  $F_{s\text{-new}}=0.876\ 20$ ,  $i=3$ ,  $F_{su}=0.453\ 10$ 。

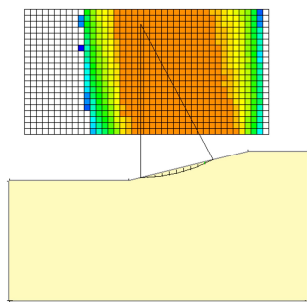


图9 案例3推移式模型计算结果

Fig. 9 The result of thrust-type model of case three

计算结果表明: 当上部条块群的安全系数小于1.0且整体式安全系数小于1.0时, 推移式模型的安全系数  $F_{s\text{-new}}$  与整体式的安全系数  $F_s$  的大小并不明确,  $F_{s\text{-new}}$  可能大于或者小于  $F_s$ , 符合预期。

## 4 结论

改进了 Bishop 条分法计算模型, 并开发了相应的推移式滑坡边坡稳定性分析程序。结合实例, 计算结果证明了该程序的可行性。得出的结论为:

1) 在现有方法的基础之上, 改进并建立了针对推移式滑坡的稳定性分析力学模型, 推导出相应的安全系数计算公式。对于通常的边坡稳定性分析, 该模型亦可帮助识别推移式破坏和发生推移式的滑体部位。

2) 采用推移式计算方法求出的安全系数通常情况下较原整体式所求的安全系数更小, 表明按传统的整体式分析得到的安全系数高估了边坡的安全系数。对于推移式滑坡, 宜采用本模型计算的安全系数。

3) 采用局部条块群稳定性分析方法分别获取边坡的上部和下部条块群的安全系数  $F_{su}$  和  $F_{sd}$ , 并

比较二者的大小。当  $F_{su} \leq F_{sd}$  时, 可判断该边坡可能出现推移式破坏。

### 参考文献(References):

- [1] 陈祖煜.土质边坡稳定分析—原理、方法和程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.(CHEN Zu-yu.Soil slope stability analysis—Principles,methods and procedures[M]. Beijing:China Water & Power Press,2003.(in Chinese))
- [2] 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]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2337–2342. (in Chinese))
- [3] 郑宏.严格三维极限平衡法[J].岩石力学与工程学报, 2007,26(8):1529–1537.(ZHENG Hong.A rigorous three-dimensional limit equilibrium method[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1529–1537.(in Chinese))
- [4] 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].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 36(10): 2787–2798. (in Chinese))
- [5] 陈文胜, 谢亚军, 刘龙武, 等. 边坡稳定性分析条分法的细胞自动机求解和应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3505–3514. (CHEN Wen-sheng, XIE Ya-jun, LIU Long-wu, et al. Cellular automata solution for slope stability analysis by slices model and application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3505–3514. (in Chinese))
- [6] 卢应发,黄学斌,刘德富.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,HUANG Xue-bin,LIU De-fu.Mechanism and stability analyses of progressive failure of thrust-type landslides[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(2):333–345.(in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 杨光华, 钟志辉, 张玉成, 等. 滑坡灾害的机制与力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4009–4017. (YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, ZHANG Yu-cheng, et al. Analysis of mechanism and mechanical characteristics of landslide disaster[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 4009–4017. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 雍睿.三峡库区侏罗系地层推移式滑坡—抗滑桩相互作用研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.(YONG Rui. Interaction between thrust load caused landslide and anti-slide pile in jurassic strata in three gorges reservoir region[D]. Wuhan: China University of Geo-sciences, 2014. (in Chinese))
- [12] 陈文胜,尹哲彬,罗迎迎.基于条分法原理的牵引式滑坡分析方法研究[J].交通科学与工程,2019,35(3):1–5. (CHEN Wen-sheng, YIN Zhe-bin, LUO Ying-ying. Research on tractive landslide analysis method based on slice method[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 1–5. (in Chinese))