

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202210312024081966

文章编号: 1674-599X(2024)04-0109-07

引用格式: 陈文胜, 胡林韬. 边坡倾倒破坏模式的多米诺骨牌模型研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 109-115.

Citation: CHEN Wensheng, HU Lintao. Study on domino model method for toppling failure mode of slope[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 109-115.

## 边坡倾倒破坏模式的多米诺骨牌模型研究

陈文胜, 胡林韬

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 边坡稳定性分析是边坡安全评估和加固的理论依据, 针对多米诺骨牌分析方法只考虑了条块底面滑移剪切破坏的不足, 提出了考虑边坡发生倾倒破坏形式的多米诺骨牌分析方法。给出了多米诺骨牌模型在倾倒破坏假设下的计算方法和求解步骤, 并提出了边坡发生倾倒破坏、滑移破坏和倾倒与滑移混合破坏的判别方法。通过研究倾倒破坏模式的多米诺骨牌模型, 进一步完善和推进了边坡稳定性分析方法的理论及其在边坡工程中的应用。

**关键词:** 边坡; 多米诺骨牌模型; 倾倒破坏; 滑移破坏

中图分类号: TU43

文献标志码: A

## Study on domino model method for toppling failure mode of slope

CHEN Wensheng, HU Lintao

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

**Abstract:** Slope stability analysis is the theoretical basis for slope safety assessment and stabilization. The inadequacy of the domino analysis method only considers the sliding shear failure of the bottom surface of the strip, and a domino analysis method considering the form of toppling failure of the slope is proposed. In this study, the calculation method and solution steps of the domino model under the assumption of toppling failure are given, and the discriminant method for toppling failure, sliding shear failure and mixed toppling and sliding shear failure of slope is proposed. The theory of domino analysis method for slope stability and its application in slope engineering are further refined and promoted by investigating the slope stability of domino model under toppling failure mode.

**Key words:** slope; domino model; toppling failure; sliding shear failure

边坡稳定性分析是岩土工程的一个重要研究领域, 是边坡安全性评估和加固的基本理论依据。传统的极限平衡条分法是边坡稳定性分析和评估的主要方法, 如瑞典条分法、毕肖普条分法、Janbu法、传递系数法等<sup>[1-3]</sup>。这些方法都各自作出了假定, 其中最常见的一个假定就是安全系数为常数。为了求解安全系数, 这一核心问题又分为两个方面: 一是安全系数的定义<sup>[4]</sup>, 安全系数可以被认为是

边坡的整体安全系数<sup>[5]</sup>; 二是安全系数的求解方法。可无论是传统的条分法, 还是改进后的 Morgenstern-Price法、FLAC<sup>3D</sup>模拟施工<sup>[6]</sup>、严格 Janbu法和 Sarma法<sup>[7]</sup>等, 其求解得到的整体安全系数都着重于回答边坡是否整体稳定, 而没有着重研究边坡发生渐进失稳破坏的过程。多米诺骨牌分析方法的目的是在条分法框架下, 不仅明确回答边坡的整体稳定状态, 更着重研究边坡发生渐进性破坏的过程。

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778067)

通信作者: 陈文胜(1966—), 男, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: 13319504070@126.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

文献[4]给出了多米诺骨牌分析方法中的基本假定、求解方法与步骤,但仅解决了骨牌模型在发生底部剪切破坏时的边坡稳定性分析。在真实的边坡滑坡事件中,存在的可能不仅仅是底部剪切破坏,还有可能发生倾倒破坏的情况,且无论边坡是发生底部剪切滑移破坏,还是发生倾倒破坏,总是从某一部位先失稳,之后失稳区域逐渐扩大,最后边坡全局滑坡。从这一过程可以看到,各条块局部强度的发挥是不一样的,最先失稳的部位最先发挥百分百的强度达到极限,而后才影响到后续的部位。这一过程即是我们熟悉的边坡的渐进破坏,采用整体安全系数是无法分析这一渐进过程的。

大量的工程观测发现真实的发生倾倒失稳的边坡是一个渐进发展的过程,即边坡局部先达到峰值强度而破坏,破坏后的破坏面强度由峰值变为残余值。对于倾倒破坏,抗弯强度的残余值一般可认为是0,上部土体的不平衡力传递给相邻土体从而导致后继破坏,并最终形成边坡贯通破坏。

为了实现对渐进破坏模式更全面的分析,本文定义了包含倾倒破坏模式的安全系数,研究了考虑边坡发生倾倒破坏的多米诺骨牌模型求解方法及步骤,提出多米诺骨牌模型倾倒破坏模式下的分析方法。该方法将边坡条块的渐进破坏与多米诺骨牌的倒塌这两种现象及其过程进行对比分析,实现了一种新的考虑了渐进倾倒破坏和不同条块安全系数差异的边坡稳定性分析方法。

## 1 边坡稳定性多米诺骨牌分析方法

### 1.1 基本假设和稳定性安全系数定义

边坡稳定性多米诺骨牌分析方法<sup>[4]</sup>的力学模型是建立在传统条分法的力学模型基础上的,同时,多米诺骨牌分析方法还做出了假设与定义。

多米诺骨牌分析方法基本假设和边坡滑动面安全系数定义可大致概括为:边坡中所有的条块都各为一个多米诺骨牌;在骨牌中有“启动条块”和“控制条块”,“启动条块”是滑动面内最先“倒塌”的条块,“控制条块”是滑动面内最难“倒塌”的条块,“启动条块”和“控制条块”同时存在,且每个条块都可以是“启动条块”或“控制条块”;每一组“启动条块”和“控制条块”对应一个滑动面,“控制条块”的安全系数即为这个滑动面的安全系数,安全系数为条块的底面抗剪切强度与底面实际剪切合力的比

值,取所有滑动面的最小安全系数作为边坡的整体安全系数。

### 1.2 求解步骤和受力分析

图1为多米诺骨牌模型示意图,该模型和边坡条分模型是一致的。

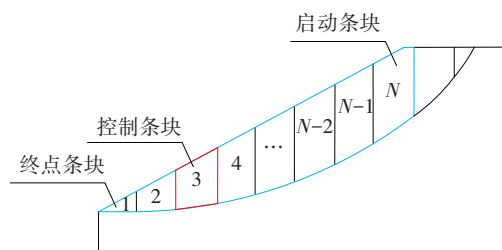


图1 多米诺骨牌模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of domino model

一次完整的多米诺骨牌模型计算过程为:首先假定以边坡模型最上面的条块 $N$ 为启动条块,依次计算到终点条块,比较所有条块的局部安全系数,局部安全系数最大的条块作为该启动条块 $N$ 对应的控制条块,以控制条块的局部安全系数代表该滑动面(启动条块至终点条块之间的滑动面)的安全系数。然后,依次假定条块 $N-1, N-2, \dots, 1$ 为启动条块(启动条块需要自上而下搜索),按以上流程重复计算,得到各启动条块下滑动面的安全系数。最后,通过比较找到最小安全系数所对应的启动条块及相应滑动面。

启动条块与非启动条块受力分析如图2所示,图中 $W_i$ 为第 $i$ 条块的重力, $P_{i+1}$ 是第 $i+1$ 条块对第 $i$ 条块的作用力, $N_i$ 是第 $i$ 条块所受法向力, $T_i$ 为第 $i$ 条块所受摩擦力。骨牌模型内的每块条块受力分析(启动条块除外)都需要用到上一条块的剩余推力。在计算过程中需要注意的是若剩余推力为负时,将其视为0继续向下传递,直到计算完终点条块才开始下一个启动条块的计算,条块之间不存在拉力。

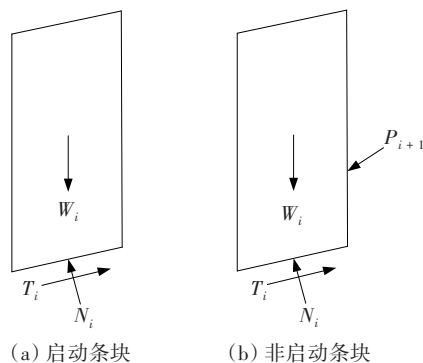


图2 条块受力图

Fig. 2 Forces applied on a slice

## 2 多米诺骨牌分析方法边坡倾倒破坏模型

### 2.1 岩质边坡倾倒破坏模型

岩质边坡中存在一组与边坡走向近似、插入坡内的主控裂隙组,如层理、页理等。边坡类似叠合悬臂梁,由于重力作用,岩层承受着拉伸和压缩弯曲应力<sup>[8]</sup>。图3为岩质边坡倾倒模型中的倾倒-滑移段,该部分岩体按残余强度来计算阻滑力<sup>[9]</sup>,其中 $\sigma_t$ 是条块沿破坏面所受拉应力, $F_s$ 是条块安全系数, $H$ 是边坡高度, $\theta$ 为破坏面倾角, $\beta$ 为边坡倾角, $\alpha$ 为条块与水平面夹角。条块是无限延长的,图中粗实线表示的是从该岩质边坡模型坡脚发出的、成一定角度向上的破坏面<sup>[10]</sup>。

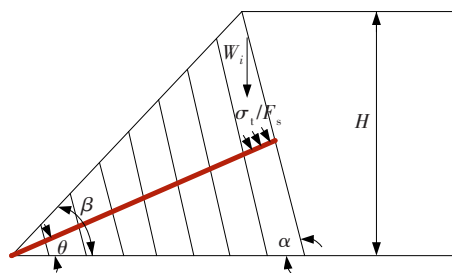


图3 岩质边坡倾倒破坏模型

Fig. 3 Toppling failure model for rock slope

### 2.2 基本假定与安全系数定义

基本假定:

1) 满足边坡稳定性多米诺骨牌分析方法对应的基本假设与定义。

2) 边坡中的每个条块均被视为刚体。

3) 边坡中某滑动面发生倾倒破坏或者有发生倾倒破坏的趋势时,研究单位以破坏面内的条块为主。启动条块在倾倒前有倾倒的趋势时,仅受自身重力、破坏面拉应力(仅存在于岩质边坡内)和支持力作用,与上一个条块没有力的作用。启动条块破坏前对下一条块不产生力的作用,破坏后,将剩余不平衡力传递给下一条块。该不平衡力可分为垂直于两条块间接触面的推力和两条块之间的剪力,该推力作用点位于该条块与下一条块接触面的顶点,方向垂直于两条块间的接触面,剪力方向平行于两条块间的接触面。非启动条块将承受上一条块传递的不平衡力,在倾倒前有倾倒的趋势时,受重力、拉应力(仅存在于岩质边坡内)、支持力、上一条块传递给该条块的不平衡力作用。非启动条块

破坏前对下一条块不产生力的作用,破坏后,将剩余不平衡力传递给下一条块。

4) 所有条块均在给出的破坏面上倾倒,一般情况下,边坡破坏面可为直线或者折线。

5) 所有条块只发生倾倒破坏或滑动破坏的其中一种形式。可分别计算倾倒破坏局部安全系数和滑动破坏局部安全系数。通过比较,安全系数较小者,即为该条块发生的破坏形式。

6) 条块开始倾倒的一瞬间就可视为破坏失衡。

7) 岩质边坡土体受拉应力作用,而土质边坡不受拉应力作用。

8) 若计算过程中有条块趋于稳定,为了继续往下寻找控制条块,依旧假设该条块会向下倾倒,并且将不平衡推力传递给下一条块。

根据如上假定,边坡某一破坏面的安全系数即为该破坏面上控制条块的局部安全系数,控制条块是潜在破坏面能否贯通时遇到的具有最大局部安全系数的条块。

边坡的最小安全系数是所有破坏面(启动条块到终点条块之间为一个破坏面)中,安全系数最小的破坏面所对应的安全系数。

每个条块局部安全系数的定义为:阻止条块绕底部靠倾倒方向角点向下倾倒的力矩与使条块产生向下倾倒趋势的力矩之比。

### 2.3 条块受力分析与计算

条块受力分析如图4所示,图中 $F_{si}$ 是第*i*条块安全系数, $P_i$ 为第*i*-1条块所受上一条块的作用力, $Q_i$ 为第*i*-1条块与上一条块之间的剪力。

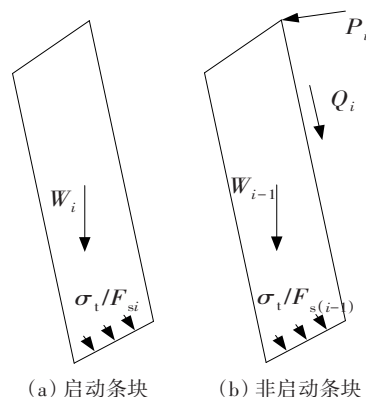


图4 倾倒模型条块受力分析图

Fig. 4 Force analysis of toppling failure slice

1) 对于启动条块:

① 使条块产生向下倾倒趋势的弯矩。

$$M_i^1 = \frac{1}{2} W_i h_i \sin \theta \sin (\theta + \alpha) \quad (1)$$

式中:  $h_i$  为条块上边中点到下边中点的高。

② 阻止条块向下倾倒的弯矩。

$$M_i^{\text{II}} = \left( \frac{W_i \cos \theta}{t} + \frac{\sigma_t}{F_{si}} \right) \frac{2I}{t} \quad (2)$$

式中:  $t$  为条块的宽;  $I$  为条块惯性矩,  $I = t^3/12$ 。

③ 条块弯矩。

$$M_i = M_i^{\text{I}} - M_i^{\text{II}} \quad (3)$$

④ 条块局部安全系数。

$$F_{si} = \frac{M_i^{\text{II}}}{M_i} \quad (4)$$

⑤ 传递给下一条块的力。

$$F_i = \frac{M_i^{\text{I}}}{h_{Li}} \quad (5)$$

式中:  $h_{Li}$  为第  $i$  条块与下一条块接触面边长。

2) 对于非启动条块:

① 使条块产生向下倾倒趋势的弯矩。

$$M_{i-1}^{\text{I}} = F_i l_{i-1} + \frac{1}{2} W_{i-1} h_{i-1} \sin \theta \sin(\theta + \alpha) \quad (6)$$

$$l_{i-1} = h_{L(i-1)} - \frac{t}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

式中:  $l_{i-1}$  为力  $F_i$  到条块底边左角点的力臂。

② 阻止条块向下倾倒的弯矩。

$$M_{i-1}^{\text{II}} = \left( \frac{W_{i-1} \cos \theta}{t} + \frac{\sigma_t}{F_{s(i-1)}} \right) \frac{2I}{t} + F_i t \tan \varphi \quad (8)$$

式中:  $\varphi$  为层面内摩擦角<sup>[11]</sup>, 根据陈从新等<sup>[12]</sup>的假设,  $F_i \tan \varphi$  为两条块之间的剪力。

③ 条块弯矩。

$$M_{i-1} = M_{i-1}^{\text{I}} - M_{i-1}^{\text{II}} \quad (9)$$

④ 条块局部安全系数。

$$F_{s(i-1)} = \frac{M_{i-1}^{\text{II}}}{M_{i-1}} \quad (10)$$

式(1)~(10)是一次简单的运算, 可通过这些公式求得所有条块的局部安全系数及其受力, 通过比较, 可得出其中局部安全系数最大的控制条块。通过式(6)~(10)的运算, 相当于计算了边坡中的一个破坏面, 其中, 启动条块的  $F_{si}$  的求解公式可最终简化为:

$$F_{si}^2 - g_1 F_{si} - g_2 = 0 \quad (11)$$

$$g_1 = \frac{\lambda_i^{\text{II}}}{\lambda_i^{\text{III}}} \quad (12a)$$

$$g_2 = \frac{\lambda_i^{\text{I}}}{\lambda_i^{\text{III}}} \quad (12b)$$

$$\lambda_i^{\text{I}} = \frac{2I\sigma_t}{t} \quad (13a)$$

$$\lambda_i^{\text{II}} = \frac{2IW_i \cos \theta}{t^2} \quad (13b)$$

$$\lambda_i^{\text{III}} = \frac{1}{2} W_i h_i \sin \theta \sin(\theta + \alpha) \quad (13c)$$

其中非启动条块中的  $\lambda_{i-1}^{\text{III}}$  公式需要调整为:

$$\lambda_{i-1}^{\text{II}} = \frac{2IW_{i-1} \cos \theta}{t^2} + F_i t \tan \varphi \quad (14a)$$

$$\lambda_{i-1}^{\text{III}} = \frac{1}{2} W_{i-1} h_{i-1} \sin \theta \sin(\theta + \alpha) + F_i l_{i-1} \quad (14b)$$

启动条块的安全系数求解简化为以上的一元二次方程一般形式( $\lambda$  为由各个已知物理量计算得来的常数)。同理, 依次设定下一个启动条块, 运用式(1)~(14)运算, 直至求得边坡中每一个倾倒面的安全系数。另外, 如果当某一条块的弯矩为负数的时候, 其条块趋于稳定, 但为了继续往下寻找控制条块, 依旧假设该条块会向下倾倒, 并且传递给下一条块不平衡推力。

在骨牌模型中, 介绍了边坡条块滑动和倾倒两种破坏形式, 在真实的边坡破坏情况中, 条块的滑动或倾倒可能单独存在, 也可能同时存在, 类似于孙朝燊等<sup>[13]</sup>提到的复合破坏模式下的复杂破坏形式, 条块局部安全系数的求解需要通过基本假定5) 进行比较。

## 2.4 土质边坡倾倒破坏模型

土质边坡倾倒破坏模型如图5所示, 此时, 土质边坡没有明显结构面或层理存在, 可以按竖直条分进行计算。

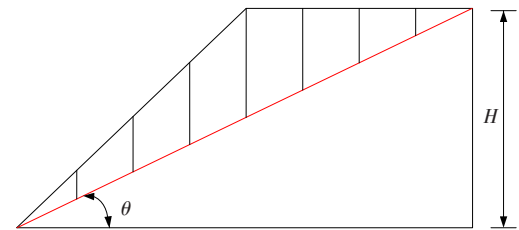


图5 土质边坡倾倒破坏模型

Fig. 5 Toppling failure model for soil slope

土质边坡倾倒破坏模型计算公式和步骤如下:

1) 对于启动条块:

① 使条块产生向下倾倒趋势的弯矩。

$$M_i^{\text{I}} = W_i h_i \sin \theta + F l_i \quad (15)$$

式中:  $h_i$  为条块重心到破坏面的垂直距离;  $l_i$  为外力  $F$  对该条块的力臂。

② 阻止条块向下倾倒的弯矩。

$$M_i^{\text{II}} = \frac{2IW_i \cos \theta}{t^2} \quad (16)$$

③ 条块弯矩。



$$M_i = M_i^I - M_i^{II} \tag{17}$$

④ 条块局部安全系数。

$$F_{si} = \frac{M_i^{II}}{M_i^I} \tag{18}$$

⑤ 传递给下一条块的力。

$$F_i = \frac{M_i^I}{h_{Li}} \tag{19}$$

2) 对于非启动条块:

① 使条块产生向下倾倒趋势的弯矩。

$$M_{i-1}^I = W_{i-1}h_{i-1}\sin\theta + F_i l_{i-1} \tag{20}$$

式中: $l_{i-1}$ 为力 $F_i$ 对第 $i-1$ 条块的力臂。

② 阻止条块向下倾倒的弯矩。

$$M_{i-1}^{II} = \frac{2lW_{i-1}\cos\theta}{t^2} + F_i t \tan\varphi \tag{21}$$

③ 条块局部安全系数。

$$F_{s(i-1)} = \frac{M_{i-1}^{II}}{M_{i-1}^I} \tag{22}$$

式(15)~(22)是从启动条块至终点条块的一次破坏面计算,可通过上述公式求得所有条块的局部安全系数及其受力,再通过比较,得到其中局部安全系数最大的控制条块。求解整个边坡的最小安全系数,需要依次设定启动条块,并按式(15)~(22)计算求得对应破坏面的安全系数。在所有求得的安全系数中,再通过比较,找出其中最小的安全系数,将它作为图5所示破坏面的安全系数。

3 算例分析

3.1 算例1:岩质边坡倾倒破坏

本算例采用本文给出的多米诺骨牌分析方法岩质边坡倾倒破坏模型进行倾倒破坏计算,同时采用文献[4]的方法进行条块滑移破坏计算,求解边坡对应滑动面(破坏面)的安全系数。通过比较计算结果,利用给出的判定条块破坏模式的方法,分析该岩质边坡的破坏模式。

岩质边坡倾倒破坏模型几何参数<sup>[8,12-13]</sup>、岩层及条块的力学性质见表1。条块编码自下而上依次是1,2,⋯,8。

1) 倾倒破坏模型计算分析。

根据表1参数,用该模型进行倾倒破坏计算,计算过程见式(1)~(14)。采用该方法对启动条块进行研究的时候,启动条块发生倾倒破坏时,自身受到重力和条块底面拉应力作用;对非启动条块而言,除了受到以上作用力的影响,还受到上一条块

传递过来的不平衡力的作用。在进行迭代计算的过程中,若某条块弯矩变成负值,这意味着弯矩方向发生改变,原因是条块的重力对其底边左角点的弯矩或者加上条块传递下来的力的力矩小于阻止该条块发生倾倒破坏的弯矩。

表1 岩层及条块性质

Table 1 Rock layer and slices properties

重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	岩块内 摩擦角/ (°)	层面内 摩擦角/ (°)	黏聚 力/ kPa	抗拉 强度/ kPa	边坡 高度/ m	边坡 倾角/ (°)	破坏面 倾角/ (°)	条块 倾角/ (°)
27	18	18	40	1 000	15	55	30	80

2) 滑移破坏模型计算分析。

根据表1数据,采用文献[4]的方法进行滑移破坏迭代计算,由于黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的衰弱程度是不一样的,引入二者衰减系数<sup>[4]</sup>, $k_c=0, k_\varphi=1$ 。

3) 结果分析。

岩质边坡破坏计算结果见表2,比较两种破坏模型的计算结果,可以得出结论:此算例中若在破坏面8-1的启动条块对应的位置发生开裂的话,则边坡更容易发生倾倒破坏,若在破坏面7-1,6-1,⋯,2-1,1-1发生开裂的话,则更容易发生滑移破坏。

表2 模型各破坏面安全系数(算例1)

Table 2 Safety factors of failure surfaces of example 1

破坏面	安全系数	
	倾倒破坏	滑移破坏
8-1	0.91	0.94
7-1	1.05	1.00
6-1	1.24	1.08
5-1	1.52	1.20
4-1	1.95	1.39
3-1	2.73	1.72
2-1	4.56	2.73
1-1	13.59	6.36

注:破坏面8-1指潜在破坏面位于8号条块至1号条块之间。

3.2 算例2:土质边坡倾倒破坏

本算例土质边坡土层性质及条块性质见表3,对土质边坡进行倾倒破坏计算和滑移破坏计算,比较计算结果,利用给出的判定方法,讨论图5所示边坡模型的破坏模式。

表3 土层及条块性质

Table 3 Soil layer and slices properties

重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	倾角/ (°)	边坡高度/ m
18.6	16.7	12	20	20

根据表3数据,对该模型进行倾倒破坏迭代计算,计算过程参考公式(15)~(22)和文献[4], $k_c=0$ , $k_\varphi=1$ 。

算例2的计算分析与算例1的大致相同,两种破坏计算结果如表4所示,部分计算过程如表5和表6所示。该土质边坡可能发生倾倒或滑移破坏,就倾倒破坏而言,破坏面最小安全系数为0.76;就滑移破坏而言,破坏面最小安全系数为0.90。通过比较破坏面中的最小安全系数的大小,可初步得到结论,该边坡更容易发生倾倒破坏。然而就5-1、4-1破坏面而言,滑移破坏模式下的安全系数大于倾倒破坏模式下的安全系数,更容易发生倾倒破坏。就其他6个破坏面而言,滑移破坏模式的安全系数均小于倾倒破坏模式下的安全系数,更容易发生滑移破坏。

表5 两种破坏模式下4-1破坏面计算

Table 5 Calculation table for failure surface with No. 4-1 slice in two modes of failure

条块参数					倾倒破坏模式			滑移破坏模式			安全系数	
条块编号	条宽/ m	条重/ (kN·m <sup>-1</sup> )	$\theta$ / (°)	$\varphi$ / (°)	传递推力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	$M_i^1$ / (N·m)	$M_i^2$ / (N·m)	剩余推力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	阻滑力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	下滑力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	倾倒破坏	滑移破坏
4	6.87	1 118.49	20	12	209.54	1 573.57	1 203.21	161.83	342.79	382.55	0.76	0.90
3	6.87	800.33	20	12	578.40	2 903.09	1 163.19	277.62	280.00	435.56	0.40	0.64
2	6.87	482.16	20	12	1 835.45	4 641.50	1 352.97	347.38	217.22	442.53	0.29	0.49
1	6.87	161.54	20	12	0.00	9 262.95	2 821.27	370.76	153.95	402.63	0.30	0.38

表6 两种破坏模式下8-1破坏面计算

Table 6 Calculation table for failure surface with No. 8-1 slice in two modes of failure

条块参数					倾倒破坏模式			滑移破坏模式			安全系数	
条块编号	条宽/ m	条重/ (kN·m <sup>-1</sup> )	$\theta$ / (°)	$\varphi$ / (°)	传递推力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	$M_i^1$ / (N·m)	$M_i^2$ / (N·m)	剩余推力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	阻滑力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	下滑力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	倾倒破坏	滑移破坏
8	6.87	159.70	20	12	12.83	32.08	171.79	23.11	153.58	54.62	5.36	2.81
7	6.87	479.09	20	12	70.57	352.86	533.89	92.42	216.61	186.96	1.51	1.16
6	6.87	798.49	20	12	177.50	1 331.26	960.76	207.95	279.64	365.52	0.72	0.77
5	6.87	1 117.88	20	12	334.69	3 346.86	1 458.58	369.69	342.67	590.29	0.44	0.58
4	6.87	1 118.49	20	12	766.64	5 757.15	1 685.97	531.52	342.79	752.24	0.29	0.46
3	6.87	800.33	20	12	1 689.39	8 479.41	1 966.76	647.32	280.00	805.25	0.23	0.35
2	6.87	482.16	20	12	5 138.91	12 995.31	2 955.50	717.08	217.22	812.22	0.23	0.27
1	6.87	161.54	20	12	0.00	25 875.41	7 586.27	740.45	153.95	772.33	0.29	0.20

## 4 结论

本文基于多米诺骨牌模型分析方法,考虑边坡发生倾倒破坏的情形,提出边坡倾倒破坏模式的多米诺骨牌模型分析方法,结论如下:

1) 本文提出的方法对边坡发生倾倒或滑移破坏分别给出了判别方法。该方法属于条分法,可分析边坡渐进倾倒失稳的过程,计算分析过程简便。

表4 模型各破坏面安全系数(算例2)

Table 4 Safety factors of failure surfaces of example 2

破坏面	安全系数	
	倾倒破坏	滑移破坏
8-1	5.36	2.81
7-1	1.79	1.32
6-1	1.07	1.02
5-1	0.77	0.90
4-1	0.76	0.90
3-1	1.07	1.02
2-1	1.77	1.32
1-1	5.29	2.79

2) 本文提出的方法中安全系数是基于骨牌模型的渐进破坏机制而定义的,包括局部安全系数和边坡安全系数,突破了传统条分法的常安全系数或整体安全系数假定的局限。

3) 本文提出的方法是对骨牌模型分析方法的补充,使得骨牌模型分析方法能更加全面地分析边坡在各种破坏形式下的稳定性。

4) 通过算例论证了本文方法的可行性。分析结果说明采用多米诺骨牌模型分析边坡倾倒破坏

甚至更复杂的倾倒-滑移混合破坏有其优越性。

### 参考文献(References):

- [1] FELLENIUS W. Calculation of the stability of earth dams [C]//Transactions of the 2nd Congress on Large Dams. Washington: International Commission on Large Dams, 1936, 4: 445-463.
- [2] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7.
- [3] JANBU N. Slope stability computations [C]// Embankment-dam Engineering; Casagrande Volume. New York: John Wiley, 1973: 47-86.
- [4] 陈文胜, 蒋茂林, 戴嘉宁, 等. 边坡稳定性的多米诺骨牌模型分析方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 112-120. DOI: 10.11779/CJGE202101013.  
CHEN Wensheng, JIANG Maolin, DAI Jianing, et al. A domino model based method for slope stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 112-120. DOI: 10.11779/CJGE202101013.
- [5] 童志怡, 陈从新, 徐健, 等. 边坡稳定性分析的条块稳定系数法[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1393-1398. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.05.036.  
TONG Zhiyi, CHEN Congxin, XU Jian, et al. A slice-stability method for stability analysis of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1393-1398. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.05.036.
- [6] 李毅, 程宝平, 何学春, 等. 涪天河渠道土质边坡失稳分析与对策研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 53-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.007.  
LI Yi, CHENG Baoping, HE Xuechun, et al. Instability analysis and countermeasure research of soil slope in Centianhe canal [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 53-63. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.007.
- [7] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对3种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 183-194. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.02.001.  
ZHU Dayong, LI Chaofen, HUANG Maosong, et al. Modifications to three well-known methods of slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 183-194. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2005.02.001.
- [8] 郑允, 陈从新, 刘秀敏, 等. 层状反倾边坡弯曲倾倒破坏计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4252-4261. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0588.  
ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Investigation on calculation method of layered counter-tilt slope for flexural toppling failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(sup 2): 4252-4261. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0588.
- [9] 蒋茂林, 陈文胜, 戴嘉宁, 等. 考虑边坡渐进破坏的分区计算模型[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 54-60, 68. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.008.  
JIANG Maolin, CHEN Wensheng, DAI Jianing, et al. Partition calculation model for progressive failure of slope[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 54-60, 68. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.008.
- [10] SUN C Y, CHEN C X, ZHENG Y, et al. Numerical and theoretical study of bi-planar failure in footwall slopes [J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105234. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105234.
- [11] ZHENG Y, CHEN C X, LIU T T, et al. Study on the mechanisms of flexural toppling failure in anti-inclined rock slopes using numerical and limit equilibrium models [J]. Engineering Geology, 2018, 237: 116-128. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.02.006.
- [12] 陈从新, 郑允, 孙朝燚. 岩质反倾边坡弯曲倾倒破坏分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2174-2187. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1001.  
CHEN Congxin, ZHENG Yun, SUN Chaoyi. An analytical approach on flexural toppling failure of counter-tilt slopes of layered rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2174-2187. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1001.
- [13] 孙朝燚, 陈从新, 郑允, 等. 岩质反倾边坡复合倾倒破坏分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 130-138. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.01.016.  
SUN Chaoyi, CHEN Congxin, ZHENG Yun, et al. Analysis of anti-dip rock slopes against composite toppling failure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1): 130-138. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.01.016.

(责任编辑:熊怡;英文编辑:冯硕)