

## 基于加速度的边坡和挡土墙稳定性分析

介玉新<sup>1</sup>, 柏永亮<sup>2</sup>, 张 彬<sup>2</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

**摘 要:**评价边坡稳定性可以用最小安全系数,也可以用基于加速度的指标,比如最大加速度、最大惯性力、最大角加速度等。它们可以从另外的角度来看待边坡的稳定和失稳行为。这种思路也可以推广到挡土墙土压力计算。算例计算表明:基于瑞典条分法和简化毕肖甫法的假定对加速度、惯性力和角加速度的计算结果相同,说明它们的计算对条间力的假定不敏感;相对于滑体质心的角加速度不能单独用来判断滑体的稳定情况;对挡土墙土压力来说,由于外部支撑力的引入改变了土条的受力条件,最大惯性力的大小和方向与土压力并没有一致性的关系;随着土的强度参数的不同,最大惯性力可能大于挡土墙土压力,也可能小于土压力;以此类比,根据事先引入支挡结构力的作用方向得到的不平衡推力会更合理。

**关键词:**边坡;挡土墙;加速度;角加速度;惯性力;安全系数;土压力;条分法

**中图分类号:**TU43;P642.11<sup>+</sup>6

**文献标志码:**A

## Stability Analysis of Slopes and Retaining Walls Based on Acceleration

JIE Yu-xin<sup>1</sup>, BAI Yong-liang<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Like the minimum safety factor, the indices based on acceleration, such as the maximum acceleration, maximum inertial force and maximum angular acceleration, can also be employed to evaluate the stability of slopes. In fact, they provide the probability to review the stability and instability of slopes from another point of view. This approach can also be extended to studying the soil pressure of retaining walls. Numerical results show that it is the same for the acceleration, inertial force and angular acceleration calculated based on the assumptions of Sweden slice method and simplified Bishop method, respectively, which imply that they are not sensitive to the assumption of forces between slices; the angular acceleration relative to the barycenter of the slip mass can not be independently used to evaluate the stability of slopes; for the soil pressure of retaining wall, due to the external bracing force changes the stress state of slices, the maximum inertial force is not consistent with the soil pressure either in magnitude or in direction; with the different strength parameters of soils, the maximum inertial force may be greater, or less than the soil pressure of retaining wall; analogously, it will be more reasonable to compute the imbalance thrust force of retaining structures by introducing its direction in advance.

**Key words:** slope; retaining wall; acceleration; angular acceleration; inertial force; safety factor;

收稿日期:2015-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51279085);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2013CB036402);  
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2013-KY-4)

作者简介:介玉新(1970-),男,河南新安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jieyx@tsinghua.edu.cn.

soil pressure; slice method

## 0 引言

边坡稳定性分析的要点是求取最小安全系数及其对应的临界滑动面,常用的分析方法有极限平衡法、极限分析方法和基于有限元的方法<sup>[1-5]</sup>。边坡稳定性分析涉及土体的极限平衡状态。在极限平衡法中,极限平衡条件的引入是不可缺少的。Spencer法、Morgenstern-Price方法等能够满足全部平衡条件,瑞典条分法、简化毕肖甫(Bishop)法、不平衡推力传递法、Janbu法等则只能满足部分平衡条件。

虽然最小安全系数对应的临界滑动面从受力上讲是最不稳定的,但在失稳时并不一定是最先滑动的。如果两个潜在滑动面的安全系数都小于1,那么它们都是可以滑动的,由于运动快慢与加速度有关,显然在同样情况下加速度最大的滑动面可能最先滑动。因此,在安全系数之外,可以引入加速度作为评价参数<sup>[6]</sup>。在这里,将最大加速度对应的临界滑动面称为加速度临界滑动面,而通常与安全系数对应的滑动面称为安全系数临界滑动面。

如果边坡不稳定,就需要采取加固措施。挡土墙就是直立边坡的加固方法之一;另外,常用的边坡加固方法是抗滑桩。保证边坡稳定的支撑力也可以按类似思路来求解。适用于边坡稳定性分析的方法也可以用于挡土墙土压力的计算<sup>[7-8]</sup>。与加速度相应的是惯性力,也可以通过搜索最大惯性力来定性估算保证边坡稳定的支撑力。

采用加速度的概念能够从另外的角度考察边坡和挡土墙的稳定问题。它的缺点是不能像常规极限平衡法那样充分利用平衡条件,但它的优点也在于此,即可以不受平衡条件的限制进行计算;而且由于它计算的是整体的加速度或惯性力,对条块间力不敏感,所以可以降低对条块间力假定的要求。

本文给出了基于加速度的边坡稳定性分析的基本原理和计算方法;并针对典型边坡,采用瑞典条分法和简化毕肖甫法对边坡的加速度、惯性力和角加速度进行计算,并与安全系数的计算结果进行对比;在此基础上,基于最大惯性力对挡土墙土压力进行分析。

## 1 基本原理

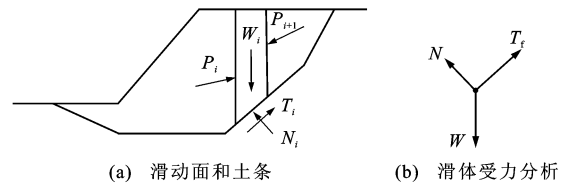
对于图1(a)所示的边坡和滑动面,可以划分竖向的土条,假定在各条块滑动面上满足极限平衡条

件,即

$$T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \varphi_i}{F_s} = c_{ei} l_i + N_i \tan \varphi_{ei} \quad (1)$$

式中: $F_s$ 为安全系数; $T_i$ 为第*i*个土条底部的切向力; $l_i$ 为第*i*个土条底部边长; $N_i$ 为第*i*个土条底部的法向力; $c_i$ 、 $\varphi_i$ 为第*i*个土条抗剪强度指标; $c_{ei} =$

$$\frac{c_i}{F_s}; \varphi_{ei} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \right)。$$



$W_i$ 为第*i*个土条重力

图1 边坡滑动面及土条受力分析

Fig. 1 Slope Slip Surface and Stress Analysis of Soil Slice

对条间力进行适当假定,然后对每个土条进行力平衡分析和力矩平衡分析,即可采用极限平衡法求解其安全系数。

可以直接利用极限平衡法的结果计算加速度或惯性力。假定滑动面上的滑体已发生滑动,此时 $T_i$ 应当取 $T_{fi}$ 。把滑面之上的滑体整体作为隔离体,可以看出它所受到的力为重力 $W$ 、法向力合力 $N$ ,以及切向力合力 $T_f$ 。重力 $W$ 为隔离体的自重;法向力 $N$ 由各土条底部的法向力 $N_i$ 通过矢量累加得到;切向力合力 $T_f$ 则由各土条的切向力 $T_{fi}$ 通过矢量累加得到。

$T_{fi}$ 表达式为

$$T_{fi} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i \quad (2)$$

计算 $T_{fi}$ 用的是 $c_i$ 和 $\varphi_i$ ,而不是 $c_{ei}$ 和 $\varphi_{ei}$ 。于是得到滑体滑动的加速度为

$$\vec{a} = \frac{\vec{W} + \vec{N} + \vec{T}_f}{W} \quad (3)$$

上述算式是除以重力加速度 $g$ 后无量纲化的加速度,因此,分母为重力而不是质量。加速度大小 $a$ 为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (4)$$

式中: $a_x$ 和 $a_y$ 分别为水平和竖直方向的加速度分量。

显然条块间力在加速度计算中不出现,因此,加速度计算还是非常方便的,且受条块间力假定的影响会比较小。式(2)、(3)中涉及的法向力可以采用常规方法,如瑞典条分法、简化毕肖甫法、不平衡推

力传递法、Morgenstern-Price 方法等求解<sup>[6]</sup>。

由式(4)也可以计算惯性力  $R$ , 其表达式为

$$R = Wa \quad (5)$$

类似于求取最小安全系数, 可以通过改变滑动面位置和形状进行搜索, 从而得到最大加速度和最大惯性力对应的临界滑动面(加速度临界滑动面和惯性力临界滑动面)。除了这种加速度, 也可以计算针对滑体质心或某一转动中心的角加速度。

## 2 基于加速度的边坡稳定性分析

### 2.1 计算方法简介

不失一般性, 这里以瑞典条分法和简化毕肖甫法这两种最常用的条分法为例进行分析。加速度可以根据式(2)~(4)进行计算。这里主要介绍角加速度的计算方法。

简化毕肖甫法与瑞典条分法的最大区别在于是否考虑土条条块间力的影响。由于条块间力互为作用力与反作用力, 在角加速度计算中并不出现, 所以两种方法在计算角加速度时是相同的。

计算简图如图 2。相对于滑动面圆心计算角加速度, 由  $M = \alpha I$  可知, 角加速度  $\alpha$  为力矩  $M$  与转动惯量  $I$  之比。由于法向力  $N_i$  的力臂为 0, 所以对圆心  $O$  的力矩为

$$M = \sum W_i d_i + \sum T_{fi} R_i \quad (6)$$

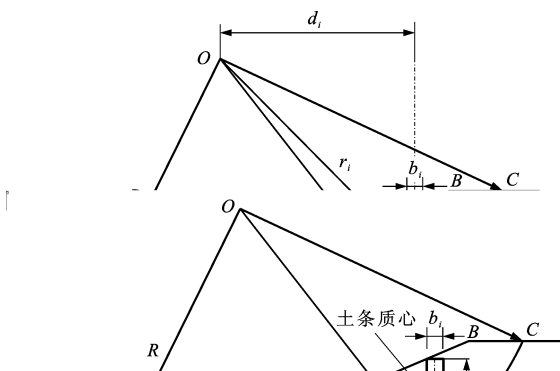


图 2 相对于圆心  $O$  的角加速度分析  
Fig. 2 Analysis of Angular Acceleration Relative to Center  $O$

其中,  $T_{fi}$  用式(2)进行计算。将各个土条的形状简化成矩形, 根据矩形转动惯量计算公式可得第  $i$  个土条相对于圆心  $O$  的转动惯量为

$$I_i = (a_i^2 + b_i^2) m_i / 12 + m_i r_i^2 \quad (7)$$

式中:  $r_i$  为第  $i$  个土条质心距圆心  $O$  的距离;  $a_i$ 、 $b_i$  分别为第  $i$  个简化的矩形土条的长度和宽度;  $m_i$  为第  $i$  个土条的质量。

进一步可得相对于圆心  $O$  的角加速度计算公式为

$$\alpha = \frac{\sum W_i d_i + \sum T_{fi} R_i}{\sum [(a_i^2 + b_i^2) m_i / 12 + m_i r_i^2]} \quad (8)$$

如果计算相对于滑体质心的角加速度, 首先计算出滑体质心位置, 然后计算相对于滑体质心的力矩。力矩计算公式为

$$M = \sum W_i d_i + \sum T_{fi} l_i + \sum N_i s_i \quad (9)$$

式中:  $d_i$ 、 $l_i$  及  $s_i$  分别为  $W_i$ 、 $T_{fi}$  及  $N_i$  相对于土条质心的力臂(图 3)。

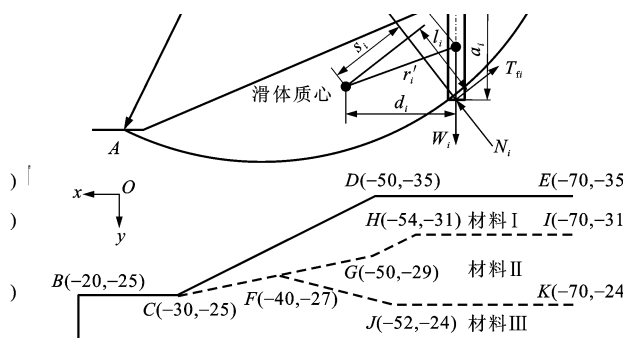


图 3 相对于滑体质心的角加速度分析

Fig. 3 Analysis of Angular Acceleration Relative to the Barycenter of Slip Mass

将各土条简化成矩形, 可以计算各土条相对于滑体质心的转动惯量。第  $i$  个土条转动惯量计算公式为

$$I_i = (a_i^2 + b_i^2) m_i / 12 + m_i r_i'^2 \quad (10)$$

式中:  $r_i'$  为第  $i$  个土条质心距滑体质心的距离。

由此可以得到相对于滑体质心的角加速度计算公式为

$$\alpha = \frac{\sum W_i d_i + \sum T_{fi} l_i + \sum N_i s_i}{\sum [(a_i^2 + b_i^2) m_i / 12 + m_i r_i'^2]} \quad (11)$$

### 2.2 算例分析

本文采用澳大利亚计算机应用协会(ACADS)的 EX1(c)算例进行验证。边坡示意如图 4, 土层参数见表 1, 不考虑地下水对边坡的影响, 其建议的安全系数为 1.39。

$A(-20, -20)$

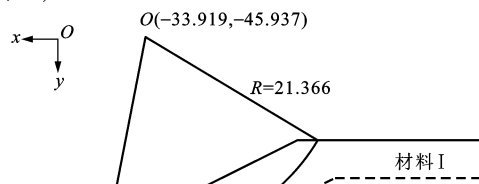


图 4 边坡算例

Fig. 4 Schematic of Slope

表 1 边坡的土层参数  
Tab. 1 Soil Parameters of Slope

材料编号	$c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
材料 I	0.0	38	19.5
材料 II	5.3	23	19.5
材料 III	7.2	20	19.5

注: $c$  为内聚力; $\varphi$  为内摩擦角; $\gamma$  为重度。

首先,采用陈祖煜基于极限平衡法的软件 STAB<sup>[2,7]</sup> 进行计算,取初始滑动面圆心  $O(-33.919,-45.937)$  半径  $R$  为 21.366(图 5)。计算得到采用瑞典条分法时边坡最小安全系数  $F_s$  为 1.269,采用简化毕肖甫法时  $F_s$  为 1.383,临界滑动面位置见图 6。

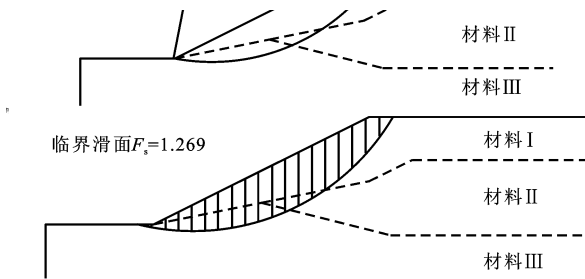


图 5 初始滑动面  
Fig. 5 Initial Slip Surface

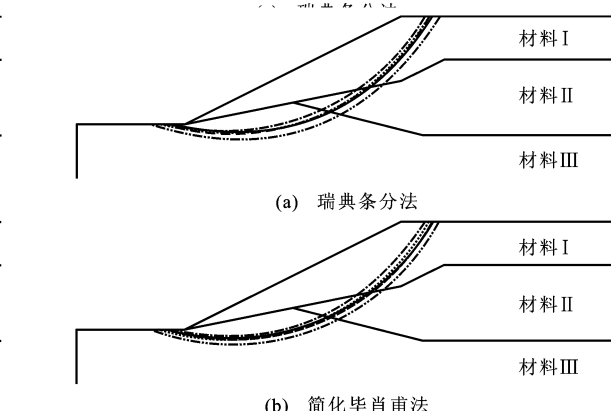


图 6 最小安全系数和临界滑动面

Fig. 6 Minimum Safety Factor and Critical Slip Surface

然后,利用本文编写的程序对该算例进行计算。选择同样的初始滑动面圆心及半径,采用瑞典条分法和简化毕肖甫法得到的最小安全系数分别为 1.265 和 1.393,与软件 STAB 的计算结果比较接近。进一步可以计算最大加速度、最大惯性力、最大角加速度以及对应的临界滑动面。针对临界滑动面,还可以计算出其他指标的数值。计算结果见图 7 以及表 2、3。表 2、3 中对角线上的黑体数值是搜索得到的对应该计算条目的最小值(安全系数)或最大值(加速度、角加速度),非对角线上的数值是对应该临界滑动面其他指标的数值。加速度和角加速

度以使滑体向临空面滑动为正值。显然,对本算例来说,由于边坡有足够的安全性,加速度和惯性力均为负值。图 7 是按不同条目搜索得到的临界滑动面,对该边坡来说,不同条目对应的临界滑动面是很接近的。

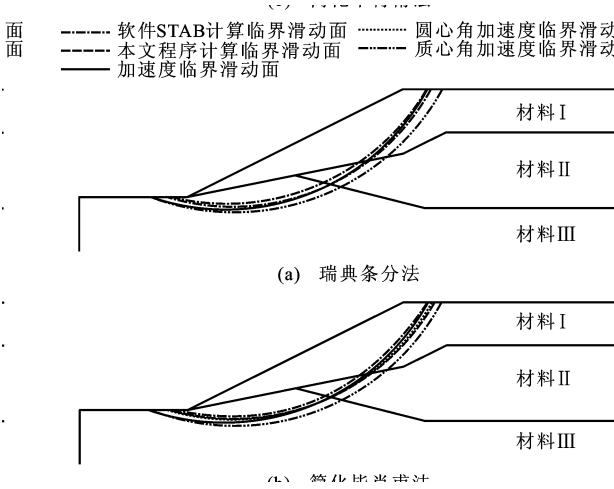


图 7 临界滑动面计算结果对比  
Fig. 7 Comparison of Calculated Critical Slip Surfaces

表 2 瑞典条分法计算结果  
Tab. 2 Results Calculated by Swedish Slice Method

计算条目	安全系数	加速度	惯性力/kN	相对于圆心的角加速度	相对于滑体质心的角加速度
最小安全系数	<b>1.265 0</b>	-0.118 1	-202.693 0	-0.055 0	-0.136 7
最大加速度	1.265 0	<b>-0.1171</b>	-205.099 8	-0.055 0	-0.135 1
最大惯性力/kN	1.330 8	-0.137 1	<b>-147.464 3</b>	-0.071 7	-0.136 7
相对于圆心的最大角加速度	1.271 7	-0.119 2	-204.779 2	<b>-0.054 7</b>	
相对于滑体质心的最大角加速度	1.313 5	-0.130 1	-272.862 3		<b>-0.133 7</b>

表 3 简化毕肖甫法计算结果

Tab. 3 Results Calculated by Simplified Bishop Method

计算条目	安全系数	加速度	惯性力/kN	相对于圆心的角加速度	相对于滑体质心的角加速度
最小安全系数	<b>1.393 0</b>	-0.117 8	-171.753 4	-0.058 5	-0.140 9
最大加速度	1.394 3	<b>-0.117 1</b>	-205.099 8	-0.055 0	-0.135 1
最大惯性力/kN	1.437 5	-0.137 1	<b>-147.464 3</b>	-0.071 7	-0.151 6
相对于圆心的最大角加速度	1.400 2	-0.119 2	-204.779 2	<b>-0.054 7</b>	
相对于滑体质心的最大角加速度	1.462 3	-0.130 1	-272.862 3		<b>-0.133 7</b>

接着,将表 1 中各材料的强度参数  $c$  和  $\tan \varphi$  除以 1.4,采用上述方法进行计算,得到的临界滑动面

见图 8。安全系数、加速度等的计算结果见表 4、5，表 4、5 中对角线上的黑体数值是搜索得到的对应计算条目的最小值(安全系数)或最大值(加速度、角加速度)，非对角线上的数值是对应该临界滑动面其他指标的数值。从表 4、5 可以看出，此时边坡的最小安全系数小于或接近于 1(表 5 中最小安全系数略大于 1，可能是计算误差)，边坡处于失稳状态，相应地最大加速度和相对于圆心的最大角加速度都为正值，但相对于滑体质心的最大角加速度仍为负值，无法单独用来判断滑体的稳定情况。因此，除非遇到存在力偶的情况，否则单纯采用相对于滑体质心的角加速度是不合适的。

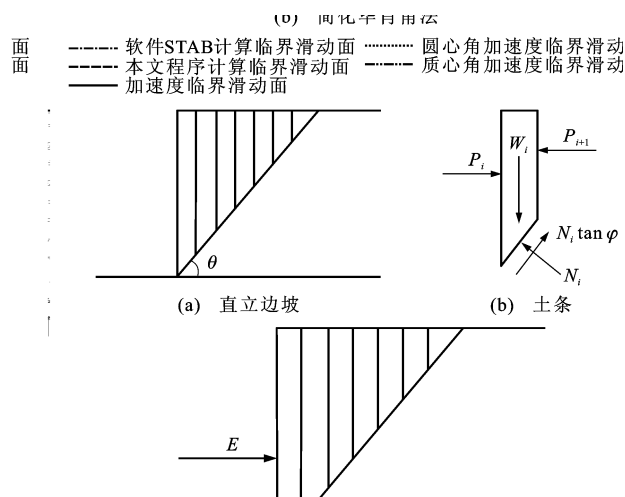


图 8 强度参数降低后临界滑动面计算结果对比

Fig. 8 Comparison of Calculated Critical Slip Surfaces with Reduced Strength Parameters

表 4 强度参数降低后瑞典条分法计算结果

Tab. 4 Results Calculated by Swedish Slice Method with Reduced Strength Parameters

计算条目	安全系数	加速度	惯性力/kN	相对于圆心的角加速度	相对于滑体质心的角加速度
最小安全系数	<b>0.903 5</b>	0.082 8	142.309 7	0.019 8	-0.115 5
最大加速度	0.916 6	<b>0.084 3</b>	145.265 3	0.016 7	-0.117 8
最大惯性力/kN	0.917 8	0.083 1	<b>156.003 5</b>	0.016 5	-0.114 6
相对于圆心的最大角加速度	0.903 5	0.082 8	142.309 7	<b>0.019 8</b>	
相对于滑体质心的最大角加速度	0.938 2	-0.083 9	-175.957 9		<b>-0.119 2</b>

另外，从表 2~5 可以看出，瑞典条分法和简化毕肖甫法对加速度、惯性力和角加速度的计算结果相同。其原因可能在于加速度等是针对滑体整体进行计算，对条间力的假定不敏感。

表 5 强度参数降低后简化毕肖甫法计算结果

Tab. 5 Results Calculated by Simplified Bishop Method with Reduced Strength Parameters

计算条目	安全系数	加速度	惯性力/kN	相对于圆心的角加速度	相对于滑体质心的角加速度
最小安全系数	<b>1.006 6</b>	0.081 8	143.253 1	0.019 8	-0.114 2
最大加速度	1.027 0	<b>0.084 3</b>	145.265 3	0.016 7	-0.117 8
最大惯性力/kN	1.027 8	0.083 1	<b>156.003 5</b>	0.016 5	-0.114 6
相对于圆心的最大角加速度	1.008 1	0.082 8	142.309 7	<b>0.019 8</b>	
相对于滑体质心的最大角加速度	1.055 7	-0.083 9	-175.957 9		<b>-0.119 2</b>

### 3 挡土墙土压力分析

用上述方法进行挡土墙土压力计算。对于直立边坡(图 9)，假定土的重度为  $\gamma$ ，内摩擦角为  $\varphi$ ，显然此时其安全系数小于 0。修建挡土墙相当于在临空面施加一支撑力  $E$ ，使之保持平衡。如果假定墙背垂直光滑，则  $E$  为水平方向。

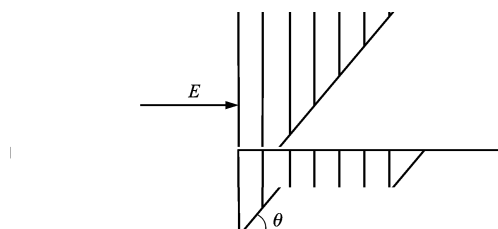


图 9 直立边坡及土条受力分析

Fig. 9 Stress Analysis of Vertical Slope and Soil Slice

对于直立边坡(图 9)，假定直线滑动面与水平面夹角为  $\theta$ ，对土条进行受力分析。直线滑动面可以看成是半径无穷大的圆弧。仿照简化毕肖甫法，假定土条间切向力为 0，只有法向力  $P_i$ 。

在垂直于滑动面方向满足平衡条件，有

$$W_i \cos \theta + P_i \sin \theta - P_{i+1} \sin \theta = N_i$$

即

$$N_i = W_i \cos \theta - \Delta P_i \sin \theta \quad (12)$$

式中： $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$ 。

对于该三角形隔离体，其下滑的加速度(除以  $g$  进行量纲为 1 化)为

$$a = \frac{\sum W_i \sin \theta + \sum \Delta P_i \cos \theta - \sum N_i \tan \varphi}{\sum W_i} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)，有

$$a = \frac{\sum W_i \sin \theta + \sum \Delta P_i \cos \theta - \sum (W_i \cos \theta - \Delta P_i \sin \theta) \tan \varphi}{\sum W_i}$$

由于  $\sum \Delta P_i = 0$ , 式(13)变为

$$a = \sin \theta - \cos \theta \tan \varphi = \sin \theta (1 - \tan \varphi / \tan \theta) \quad (14)$$

当  $\theta = 90^\circ$  时, 加速度最大, 即竖直的临空面是最先滑动的破坏面, 且滑动加速度等于重力加速度。

下滑的最大惯性力  $R$  计算公式为

$$R = \sum W_i \sin \theta + \sum \Delta P_i \cos \theta - \sum N_i \tan \varphi = \\ W(\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi) = \\ \frac{1}{2} \gamma H^2 \cot \theta (\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi) \quad (15)$$

对式(15)进行求导, 可以得到  $R$  取最大值 ( $R_{\max}$ ) 的条件为  $\theta = \theta_c$ 。  $\theta_c$  的表达式为

$$\theta_c = \cot^{-1} \left( \sqrt[3]{\frac{\cot \varphi}{2} + \sqrt{\frac{8}{27} + \frac{\cot^2 \varphi}{4}}} + \sqrt[3]{\frac{\cot \varphi}{2} - \sqrt{\frac{8}{27} + \frac{\cot^2 \varphi}{4}}} \right) \quad (16)$$

显然,  $R_{\max}$  也可以作为维持边坡稳定所需要的支撑力的参考值, 相当于边坡的不平衡推力。但由于支撑力的引入改变了土坡本身的受力条件, 所以不能直接用  $R_{\max}$  或  $R_{\max} / \cos \theta_c$  来确定支撑力  $E$ 。

对于图 10 的情况, 由于  $\sum \Delta P_i = -E$ , 代入式(13)并考虑在  $E$  的作用下使得  $a=0$ , 可以得到

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan(\theta - \varphi) / \tan \theta \quad (17)$$

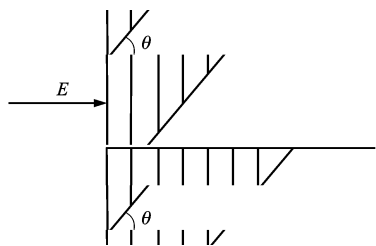


图 10 支撑力示意图

Fig. 10 Schematic of Bracing Force

对式(17)进行求导, 可以得到当  $\theta = 45^\circ + \varphi/2$  时  $E$  取最大值, 即

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 (45^\circ - \varphi/2) \quad (18)$$

式(18)与朗肯或库仑土压力理论的计算结果相同。上述结果对条间力假定不是很敏感。假定条间力的方向与滑动方向平行, 即与水平面夹角为  $\theta$ , 也能得到同样的结果。

最大惯性力  $R_{\max}$  与挡土墙支撑力  $E$  的比较见表 6。从表 6 可以看出,  $\theta_c$  总是小于  $45^\circ + \varphi/2$ , 随着  $\varphi$  的增加, 两者差别逐渐减小。就  $R_{\max}$  和  $E$  的比较来说, 在内摩擦角  $\varphi$  较小时,  $R_{\max} < E$ , 在  $\varphi$  较大时,

表 6 最大惯性力  $R_{\max}$  与挡土墙支撑力  $E$  的比较

Tab. 6 Comparison of Maximum Inertial Force  $R_{\max}$  and Bracing Force  $E$  of Retaining Wall

$\varphi/(^\circ)$	10	20	30	40	50
$45^\circ + \varphi/2$	50	55	60	65	70
$\theta_c/(^\circ)$	35.2	46.5	55.1	62.3	68.7
$E$	0.704	0.490	0.333	0.217	0.132
$R_{\max}$	0.612	0.450	0.341	0.260	0.194
$\epsilon/\%$	-13.1	-8.1	2.4	19.8	47.0

注:  $E$  和  $R_{\max}$  均为除以  $\gamma H^2/2$  后量纲为 1 的值;  $\epsilon = (R_{\max} - E)/E$ 。

$R_{\max} > E$ , 最大误差约 50%。在  $\varphi = 30^\circ$  时, 两者大小比较接近, 但考虑到两者方向并不相同, 且支撑力的引入实际上改变了边坡的受力状态, 因此,  $R_{\max}$  只能用于  $E$  的定性估计。另外, 计算中只考虑了直线型滑动面, 如果考虑曲线滑动面以及支撑力作用点位置的影响, 计算结果就可能会又有所不同<sup>[7-8]</sup>。

## 4 结 语

(1) 评价边坡稳定性可以用最小安全系数, 也可以用其他指标, 包括最大加速度、最大惯性力、最大角加速度等。本文给出了相应的计算方法, 并用算例进行验证, 这种思路也可以推广到挡土墙土压力计算中。

(2) 针对边坡稳定性的计算分析表明, 基于瑞典条分法和简化毕肖甫法的假定对加速度、惯性力和角加速度的计算结果相同, 说明它们对条间力的假定不敏感。计算结果也表明相对于滑体质心的最大角加速度在边坡最小安全系数小于 1 时仍可能为负值, 说明其不能单独用来判断滑体的稳定情况。因此, 除非遇到存在力偶的情况, 否则单纯采用相对于滑体质心的角加速度是不合适的。

(3) 针对挡土墙土压力的计算结果表明, 最大惯性力可以作为土压力的参考, 但它与土压力的关系比较复杂。由于外部支撑力的引入使得土坡中应力重新分配, 改变了土条的受力条件, 所以最大惯性力的大小、方向与土压力并没有一致性的关系。土的强度参数不同, 最大惯性力可能大于挡土墙土压力, 也可能小于土压力。最大惯性力对应的是不平衡推力, 因此, 根据事先引入支挡结构力的作用方向得到的不平衡推力会更合理。

(4) 采用安全系数评价边坡的安全性是从静力平衡方面看待当前边坡与破坏失稳之间的距离, 相当于考察其强度储备。基于加速度的评价则从运动学方面看待边坡当前状态与滑动状态之间的距离,

相当于考察边坡滑坡时的动力学行为,即在运动加速度方面的储备。基于加速度的分析并不是要取代安全系数的计算,而是提供新的视角,从另外的角度来看待边坡的稳定和失稳行为,有利于更全面地认识边坡稳定这一经典问题。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] DUNCAN J M. State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577-596.
- [2] 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 and Power Press, 2003.
- [3] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil

Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

- [5] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, LI An-hong, et al. FEM Limit Analysis and Its Application in Slope Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [6] 介玉新, 柏永亮, 余卓憬, 等. 边坡的潜在滑动面分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(增): 242-246.  
JIE Yu-xin, BAI Yong-liang, YU Zhuo-jing, et al. Analysis on Potential Sliding Surface of Slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(S): 242-246.
- [7] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 1-11.  
CHEN Zu-yu. Limit Analysis for the Classic Problems of Soil Mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 1-11.
- [8] 陈祖煜, 迟鸣, 孙平, 等. 计算柔性支挡结构主动土压力的简化方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 22-27.  
CHEN Zu-yu, CHI Ming, SUN Ping, et al. Simplified Method of Calculating Active Earth Pressure for Flexible Retaining Walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 22-27.

### 《地球科学与环境学报》2016 年度约稿函

#### 尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括:

- 1、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- 2、特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬。
- 3、发表周期短。
- 4、对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表。
- 5、刊登综述类论文。
- 6、可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址: 西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码: 710064

电 话: 029-82334686

E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn; jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部