文章编号：1674−599X(2020)04−0054−07

考虑边坡渐进破坏的分区计算模型

蒋茂林，陈文胜，戴嘉宁，李颖豪
(长沙理工大学 土木工程学院，湖南 长沙 410114)

摘 要：为了弥补传统条分法对边坡各处土体的抗剪强度均采用极限应力状态计算方法的不足。根据边坡渐进破坏的机理，提出了分区计算的条分模型。该模型依据力学分析搜索边坡的失稳区、临界区、稳定区。针对各区域真实应力状态，计算相应的抗剪强度，分析边坡的稳定性。本研究基于分区计算模型，开发了相应的稳定性分析软件。通过理论分析和案例计算表明：分区计算比传统条分法更贴合工程实际。当边坡存在失稳区时，分区计算所得安全系数偏小；当边坡都处于稳定区时，分区计算所得安全系数与瑞典条分法一致，且该模型通过对边坡分区可更经济、有效地指导边坡加固。

关键词：边坡；条分法；抗剪强度；分区计算模型；局部失稳区
中图分类号：TU443 **文献标志码**：A
DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.008

Partition calculation model for progressive failure of slope

JIANG Mao-lin, CHEN Wen-sheng, DAI Jia-ning, LI Ying-hao
(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The disadvantage of the traditional slices method is that the shear strength of all the soil in the slope is calculated according to the boundary state of stress. In order to address this problem, according to the mechanism of progressive failure, the partition calculation model is proposed in this paper. According to the mechanical analysis, the model searches three regions of the slope: instability region, critical region and stable region, and calculates the corresponding shear strength according to the true stress state of each region. Finally, the model analyzes the slope stability. In this paper, the stability analysis software is developed based on partition calculation model. Through theoretical and case analysis, it can be found that partition calculation model is more in line with the engineering practice. When there is instability region in the slope, the safety factor calculated by partition is smaller. When the whole slope is stable region, the safety factor calculated by partition calculation method is the same as that calculated by Fellenius simplified method. And partition calculation model can guide slope reinforcement more economically and effectively.

Key words: slope; slices method; shear strength; partition calculation model; local instability region

边坡稳定性分析是土木工程领域长期研究热点之一[1]，已有很多边坡稳定性分析和评估方法。其中，以极限平衡理论为基础的传统条分法(瑞典条分法、毕肖普条分法、Janbu法、传递系数法等)[2−4]仍是最主要的边坡分析方法。条分法是先将复杂的滑体划分为若干竖直条块。然后，通过力的平衡条件求解，获得各条块上的相互作用力。最后，通过极限平衡理论，求解阻滑力(矩)和下滑力(矩)的比值，获得安全系数。但无论哪种条分法，都对条块受力进行了简化，使问题静定可解。简化后，问题

收稿日期：2020−07−01
基金项目：国家自然科学基金(51778067)
作者简介：蒋茂林(1996−)，男，长沙理工大学硕士生。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以解答，但会给结果带来不可避免的误差。

伴随计算机计算技术的发展，广泛应用的还有数值分析方法，如：有限单元法、离散单元法、无网格法、无界元法等。数值分析方法旨不同边界条件下，求解边坡的位移场、应力场、渗流场，并模拟边坡破坏过程，其精度主要取决于所采用的本构模型。因为计算原理的差异，不同的数值分析方法，所以会有不同的适用范围和特点。尽管分析边坡的方法愈来愈多，但因条分法具有直观、简便、易于理解等优点，是边坡稳定性分析和评估中应用最多的方法。

1　传统条分法的特点及渐进破坏

传统条分法无论是只适用于圆弧滑动面的瑞典条分法，还是可以适用于任意形式滑动面的 Janbu 法、传递系数法等，都存在 2 个特点：

1) 滑动面上所有点的安全系数相同，目的均为求解得到边坡整体安全系数。认为边坡的整体安全系数与各条块的局部安全系数处处相等，从而方便计算整体的安全系数。该特点同样延续至有限元的强度折减法中(对材料强度参数的折减，处处相等)。这一特点造成计算过程中认为：当边坡将要发生滑动破坏时，其滑面各处同时达到强度极限。

2) 传统条分法在计算各条块的阻滑力(矩)时，都是按照其峰值强度求得。实际上，边坡往往因内外界因素的作用，存在局部失稳区。而局部失稳区若按峰值强度计算，其阻滑力较工程实际大。这一特点认为：滑面各点安全系数处处相等，而导致后遗症。因为每一条块的特异性，其抗剪强度与下滑力均不同，所以各自达到峰值强度时刻不一致。当某一条块的下滑力超过其峰值强度时，该条块就会发生剪切破坏，承受能力会从峰值强度衰减到残余强度。故采用传统条分法进行分析和评估时，一般会高估边坡的承受能力，高估后果会导致工程、生态出现巨大损失。

大量工程实践表明：边坡发生失稳滑坡并不是一蹴而就。坡体总是由某一部位先失稳，失稳区域再逐渐扩大，最后导致边坡整体滑坡，因此坡体各局部的强度发挥是不一样的。最先失稳部位的强度最先达到极限，随后开始影响周边条块，失稳区逐渐扩展，该过程就是边坡的渐进破坏[5]。其本质是局部坡体先达到峰值强度而破坏，其抗剪强度由峰值变为残余值，之后超额剪应力转嫁给相邻土体，导致相继破坏，最终形成贯通滑面[6]。

为了实现对边坡渐进破坏的分析，得到合理的安全系数，本研究提出一种基于条分块体的模型，即分区计算模型。

2　边坡分区计算模型

分区计算模型通过条块间的力学分析，在考虑边坡渐进破坏的基础上，准确判断发生破坏或将要破坏的土体区域，将这部分土体按残余强度来计算阻滑力，而能抵挡下传推力的稳定土体按极限强度来计算阻滑力，最后对边坡进行稳定性分析。分区计算模型的示意图如图 1 所示。

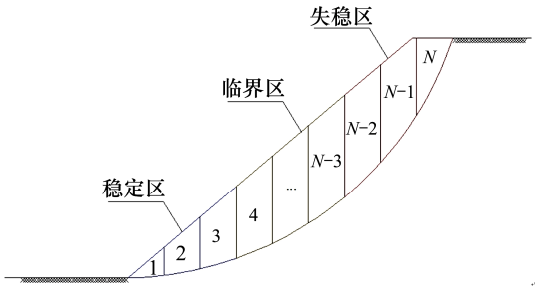


图 1　分区计算模型示意

Fig. 1　Schematic diagram of partition calculation model

准确找到破坏后，按残余强度计算的土体、能抵抗住剩余推力和自身下滑力的土体位置是分区计算模型的关键。模型基于每个条块的力学特点，将边坡土体分为 3 个区域：

1) 失稳区。自身的下滑力大于其极限抗剪强度，从而产生局部破坏。

2) 临界区。极限抗剪强度只够抵挡自重产生的下滑力，而无法承受失稳区剩余推力与自身下滑力的双重作用，土体发生局部破坏。

3) 稳定区。极限强度足以承受失稳区的剩余推力和自身下滑力的双重作用，土体稳定。

不对边坡进行处理的情况下，失稳区和临界区就是边坡土体的剪切破坏区。

分区计算模型示意图如图 1 所示，自上而下分别为失稳区、临界区、稳定区。但实际工程中，由于边坡的复杂性，可能存在仅有失稳区或稳定区、3 种区域相互穿插等情况。因此，应严格按各条块受力情况和局部安全系数进行分析判断。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1 基本假设

分区计算模型按传统条分法竖向条分法进行条块划分，条块底面视为平面。基本假设为：

1) 滑坡是渐进发生的，由某一条块先失稳，之后沿潜在滑移方向，依次影响下一个条块。

2) 各条块潜在破坏模式为沿底面剪切滑动。

3) 每个条块都有自身的安全系数，也称之为条块的局部安全系数。该系数是判断条块分区的重要指标。

4) 条块所受剩余推力的方向与其上一条块的底面平行。

5) 根据力产生的条件，物体之间必须有相互作用，认为：只有上部条块突破极限强度破坏，存在剩余推力的传递，才有条间力的存在。

6) 土体不受拉，条块间不存在拉力。

2.2 求解方法和受力分析

分区计算模型先从边坡最上方的条块 N 开始，一直计算到最下方的条块。然后，在该过程中，对各条块进行了完整的力学分析和局部安全系数计算。最后，综合各区域抗剪强度和下滑力，对边坡稳定性作出评价。

模型中，条块受力分析、安全系数计算和力的传递都是在传统条分法的基础上，结合分区计算模型渐进失稳过程中条块的受力特点进行的。

计算过程中，有 3 个计算阶段，条块底面存在 2 种应力状态：极限应力状态和残余应力状态。为达到各计算阶段预期实现的目的，在满足力学分析的条件下，模型对 2 种应力状态进行合理运用，实现对边坡各区域的搜索判定和稳定性分析。具体计算过程为：

1) 阶段一，所有条块不考虑条间力，按极限应力状态计算，求所有条块的局部安全系数 f_i。f_i 为极限抗剪强度与剪切力之比。f_i<1 的条块为失稳区条块，这些条块即使没有条块间推力的作用，也会发生自发性的剪切破坏。

2) 阶段二，从边坡顶部条块(受到推力为 0)开始，在考虑剩余推力的作用下，按极限应力状态计算局部安全系数 f_i^r。当 f_i^r>1 时，判定条块 i 属于稳定区，剩余推力以 0 向下传递。当 f_i>1 且 f_i^r<1 时，判定条块 i 为临界区，并按残余应力状态计算其剩余推力向下传递。按滑坡趋势从上至下逐一传递剩余推力，完成每个条块的力学分析和所属区域的判断。

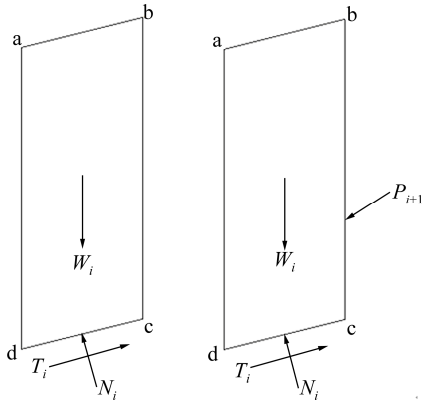
3) 阶段三，基于失稳区、临界区的残余强度和稳定区的峰值强度，计算边坡的安全系数，完成边坡稳定性的评估，并指出基于分区计算模型理论上最佳的支护加固位置。

在这 3 个阶段中，值得注意的是：①尽管直接进行阶段二的计算，也能获得渐进破坏下土体的破坏区域，最终边坡安全系数的计算结果一致，但是无法划分失稳区和临界区。利用模型搜索判定失稳区和临界区的理由，除两区域的失稳是否具有自发性外，更重要的是在边坡治理领域中，若采取合理措施，对临界区起点条块的位置进行加固，可抵挡住还未累积过大的剩余推力。此时，由于临界区不受剩余推力作用，不会发生剪切破坏，能继续维持其峰值强度，因此，可经济有效地提高边坡稳定性。②剩余推力加入计算过程中，若无推力产生，则将推力大小以 0 传递，提高计算过程的程序化，便于编程计算。③分区计算模型考虑边坡的渐进破坏，主要体现在阶段二对边坡各区域的分析判定中。模型中，从失稳区开始，对破坏土体采取残余应力状态进行计算，获得剩余推力不断向下传递和分析，从而明确基于渐进发展过程中区分边坡各区域界限。

分区计算模型中，极限应力状态下的条块阻滑力，可直接由受力分析和库仑公式求得。而残余应力状态因为剪切面已经出现，则不宜采用极限应力状态继续计算。基于极限应力状态，通过对黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值进行调整，以满足残余应力状态的计算。对于边坡剪切破坏面而言，由于土体性质的差异，黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的衰弱程度[7−9]不同，用衰减系数 k_c,k_φ 表示，而衰弱程度的大小主要与土体黏粒含量及塑性指数有关。Skempton[10−11]通过实验证明：当黏粒含量超过 50%后，土体残余强度可由黏土矿物之间的摩擦力决定。对于黏土边坡而言，剪切破坏后的残余强度由摩擦力维持，此时可以考虑滑带土黏聚力 c 为 0(k_c=0.0)。

分区计算模型条块的受力如图 2 所示。未承受剩余推力的条块受力图如图 2(a)所示，有剩余推力传递的条块受力图如图 2(b)所示。推力 P_{i+1} 可以为 0，推力的传递机制与不平衡推力传递系数法相似。因为假设条块沿底面滑移，P_{i+1} 的作用点对该条块局部安全系数和剩余推力的计算没有影响。图 2 中，

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)未承受剩余推力　(b)有剩余推力传递

图 2　条块受力

Fig. 2　Forces applied on a slice

P_{i+1} 作用点并非真实作用点。

1) 条块底面的法向力

①未受剩余推力作用，条块的法向力 N_i 为：

$$N_i = W_i \cos\alpha_i 。 \tag{1}$$

②承受剩余推力作用，条块的法向力 N_i^r 为：

$$N_i^r = W_i \cos\alpha_i + P_{i+1} \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) 。 \tag{2}$$

式中：W_i 为条块重力；α_i 为条块 i 底面与水平面的夹角；P_{i+1} 为上一条块传递下来的剩余推力(若上一条块稳定或自身为最顶端条块则 P_{i+1}=0)；α_{i+1} 为上一条块底面与水平面的夹角。

2) 条块下滑力

①未受剩余推力作用，条块的下滑力 Q_i 为：

$$Q_i = W_i \sin\alpha_i 。 \tag{3}$$

②承受剩余推力作用，条块的下滑力 Q_i^r 为：

$$Q_i^r = W_i \sin\alpha_i + P_{i+1} \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i) 。 \tag{4}$$

3) 极限应力状态下的阻滑力

①未受剩余推力作用，条块的阻滑力 T_i 为：

$$T_i = c_i l_i + W_i \cos\alpha_i \tan\varphi_i 。 \tag{5}$$

②承受剩余推力作用，条块的阻滑力 T_i^r 为：

$$T_i^r = c_i l_i + W_i \cos\alpha_i \tan\varphi_i + P_{i+1} \tan\varphi_i \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) 。 \tag{6}$$

式中：c_i 为土体黏聚力；l_i 为条块底边长；φ_i 为土体内摩擦角。

4) 残余应力状态下的阻滑力

①未受剩余推力作用，条块的阻滑力 T_i' 为：

$$T_i' = c_i l_i \times k_c + W_i \cos\alpha_i \tan(\varphi_i \times k_\varphi) 。 \tag{7}$$

②承受剩余推力作用，条块的阻滑力 $T_i^{r'}$ 为：

$$T_i^{r'} = c_i l_i \times k_c + W_i \cos\alpha_i \tan(\varphi_i \times k_\varphi) + P_{i+1} \tan(\varphi_i \times k_\varphi) \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) 。 \tag{8}$$

式中：k_c,k_φ 分别为残余应力状态下黏聚力和内摩擦角的衰减系数。

5) 条块的局部安全系数

①未受剩余推力作用，条块的局部安全系数 f_i：

$$f_i = \frac{T_i}{Q_i} 。 \tag{9}$$

②承受剩余推力作用，条块的局部安全系数 f_i^r：

$$f_i^r = \frac{T_i^r}{Q_i^r} 。 \tag{10}$$

其中：f_i 主要用于阶段一寻找失稳区条块；f_i^r 主要用于阶段二寻找临界区、稳定区条块。

6) 剩余推力为：

$$P_i = Q_i^r - T_i^{r'} 。 \tag{11}$$

式中：P_i 为第 i 个条块的剩余推力，考虑土体不存在拉力，故 $P_i \geqslant 0$；若计算得到 f_i^r>1，取 P_i=0。

7) 边坡安全系数为：

$$K = \frac{R \times \sum (T_{Ii}' + T_{Ci}' + T_{Si})}{R \times \sum Q_i} = \frac{\sum (T_{Ii}' + T_{Ci}' + T_{Si})}{\sum Q_i} 。 \tag{12}$$

式中：T_{Ii}',T_{Ci}' 为失稳区及临界区条块残余应力状态下的阻滑力；T_{Si} 为稳定区条块极限应力状态下的阻滑力；R 为圆弧滑动面半径；K 为边坡安全系数。

通过式(1)～(12)依次分析所有条块的受力状态和局部安全系数，完成边坡区域的搜索，并求得边坡安全系数。

2.3　计算步骤

分区计算模型完成滑动面搜索和条块划分后，以条块为基本单元，搜索边坡各区域，并基于各区域不同应力状态计算边坡安全系数。

在整个计算流程中，每个条块需考虑自发破坏的无剩余推力作用和基于渐进破坏[12]的有剩余推力作用进行两次力学分析计算，完成分区后，再求解边坡安全系数，其计算步骤为：

1) 不考虑剩余推力，通过公式(9)，计算出边坡每个条块的局部安全系数 f_i。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

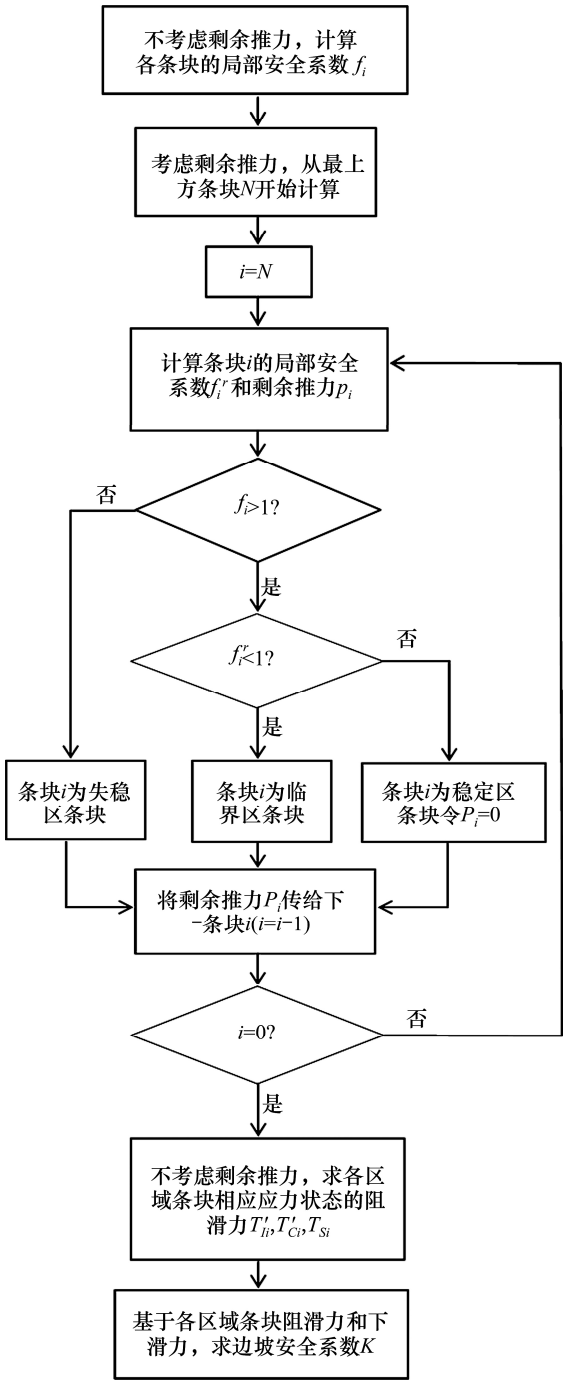


图 3 分区计算模型流程

Fig. 3 Calculation flow chart for partition calculation model

2) 从边坡顶部条块N开始计算，通过公式(10)，(11)，求得其安全系数f_N^r和剩余推力P_N，将P_N传递给下一条块$N-1$，通过相同公式计算其安全系数f_{N-1}^r和剩余推力P_{N-1}。

3) 重复第(2)步中剩余推力的传递及条块的分析计算，直到计算完最底端条块的安全系数f_1^r。

4) 通过有无剩余推力，求得每个条块的 2 种局部安全系数f_i^r和f_i的大小，实现对边坡各区域范围的判断。当f_i<1，该条块处于失稳区；当f_i>1 且f_i^r<1，条块处于临界区；当f_i>1 且f_i^r>1，条块属于稳定区。

5) 对于不同区域的条块，应采取不同的应力状态来计算其阻滑力。稳定区采取极限应力状态下的阻滑力计算式(5)，临界区和失稳区采取残余应力状态下的阻滑力计算式(7)，采用式(12)计算边坡的安全系数。

3 算例

3.1 程序介绍

为了更好地实现分区计算模型与传统条分法的对比分析，结合滑动面搜索方法及分区计算模型，开发了边坡稳定性分析程序 Slope-PCS。该程序设计了交互式的操作界面，采用面向对象的 C++作为开发语言，利用微软基础类库 MFC，遵守最新的编码规范。程序主要包括文件系统、视图设置、模型绘制、参数设定、分析计算及数据结果可视化 6 个模块。

程序设计的计算方法有：瑞典条分法、毕肖普法、不平衡推力法及本研究提出的分区计算模型。通过网格法，实现对滑动面的搜索试算，能较全面地实现边坡的稳定性分析，找到最不利滑面。同时，为保证分区计算模型与其他方法的严格对比分析，程序还设计了指定滑动面的功能，保证了单一变量的原则。

3.2 程序算例分析

本研究提出的分区计算模型，在传统条分法的基础上，考虑了边坡渐进破坏及条块局部稳定性，对各个条块的应力状态做出了力学分析。针对不同应力状态的条块，求解其对应的阻滑力，并基于这种真实应力状态下的阻滑力，计算边坡的安全系数。为了探讨分区计算模型的特点，作者拟采用 Slide 软件计算说明书中的工程案例，该黏性土边坡模型如图 4 所示，土体容重、黏聚力和内摩擦角分别为 20.0 kN·m^{-3}、20.0 kN·m^{-2}、20°。

分别采取瑞典法、毕肖普法及分区计算模型计算，利用自编程序 Slope-PCS 进行分析。考虑为黏土边坡，依据 Skempton 的实验结论[10−11]，设定残余应力状态下黏聚力 c 的衰减系数 k_c=0，内摩擦角

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

φ 的衰减系数 k_φ=1，即残余应力状态下黏聚力为 0，而内摩擦角不变。

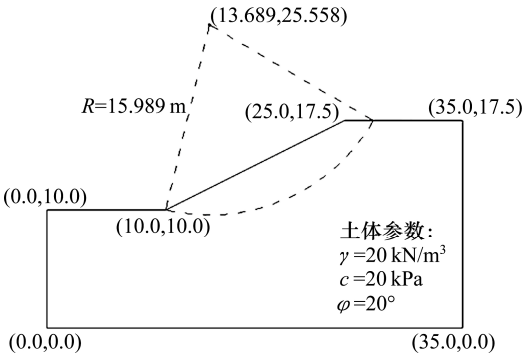


图 4　土质边坡模型

Fig. 4　A soil slope model

本程序中，各传统条分法计算结果与 Slide 软件进行对比，验证了程序的正确和计算结果的可靠性。

程序依据瑞典条分法和分区计算模型，得到的结果示意图如图 5,6 所示。图 6 中，分区计算模型图基于各条块的力学分析和局部安全系数，判断出滑动面各条块的所属区域。工程应用中，可依据该分区标识，进一步进行滑坡治理工作。

由瑞典条分法、毕肖普条分法、分区计算模型计算得到安全系数，分别为：2.039 6,2.124 6,1.461 7。由计算结果可知，对于图 4 中的滑动面，分区计算模型的结果较瑞典条分法、毕肖普条分法的偏小。主要是分区计算模型基于边坡渐进破坏，考虑了土体的真实应力状态。上部条块自发性滑移产生剩余推力，并不断累积作用于下一条块，致使坡体某些条块底面的土体发生破坏。这些会产生破坏的土体，按其残余应力状态进行计算。因此，破

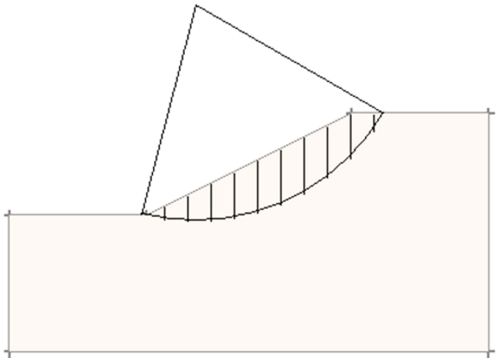


图 5　瑞典条分法分析结果

Fig. 5　Result by Swedish slice method

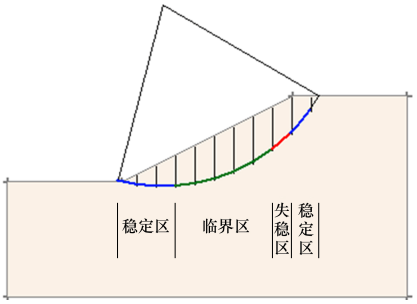


图 6　分区计算模型分析结果

Fig. 6　Result by partition calculation model

坏土体的阻滑力采用的是残余强度，分区计算模型的结果可使工程更安全。

传统条分法安全系数为边坡阻滑力(矩)与下滑力(矩)的比值。其中，阻滑力矩均在极限应力状态下求得，滑面各处皆处于稳定状态。但现实中的边坡往往因为内外部因素的影响，而存在局部失稳区，如：牵引式滑坡[13]、推移式滑坡[14]。所以实际工程中，按照传统条分法分析边坡稳定性，虽然稳定性分析所得安全系数满足要求，但仍可能发生滑坡破坏。

分区计算模型基于边坡的渐进破坏，利用式(9)，(10)求解各条块的 2 种局部安全系数，完成对各条块真实应力状态的判断，并以此进行边坡稳定性分析。这是在传统条分法的基础上做出补充和完善，更符合工程实际。

分区计算模型最重要的是对失稳区、临界区及稳定区进行搜索判断，本质是判断边坡各部分土体真实的应力应变状态。由公式(12)可知，与传统条分法的主要区别是阻滑力的计算。其计算结果不仅与土体原始强度参数 c,φ 相关，还与残余强度参数、各区域大小有关。根据 Skempton 的实验结果，确定黏土边坡残余应力状态下黏聚力衰减为 0，而内摩擦角不变。实际工程中，需因地制宜，考虑滑带土残余强度进行计算，发现边坡整体处于稳定区时，分区计算模型的计算结果与瑞典法的相同。

该方法也为边坡治理提供了新思路，有效减少边坡中处于残余应力状态的条块数量，可以大幅度提升边坡稳定性。基于失稳区和临界区发生剪切破坏的特点，在两区域交界处，实施滑带注浆[15]、锚索等支护手段，可以在剩余推力较小时阻断渐进破坏的发展，让临界区条块不受力或少受力，从而转变为稳定区，有效提高坡体稳定性。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结论

1) 基于条分法提出了新的边坡稳定性分析模型−分区计算模型。区别于传统条分法是将所有条块按极限应力状态计算，该模型会判断各条块真实的应力状态，计算阻滑力，更符合工程实际。因此，计算的安全系数也更加可靠。

2) 通过计算不考虑条间力的条块局部安全系数 f_i 及基于渐进破坏考虑剩余推力的条块局部安全系数 f_i^r，实现边坡分区。当 f_i<1 时，条块处于失稳区；当 f_i>1 且 f_i^r<1 时，条块处于临界区；当 f_i>1 且 f_i^r>1 时，条块处于稳定区。

3) 分区计算模型基于条块破坏的自发性和渐进破坏的发展规律，提出了边坡支护最合理的位置，即临界区与失稳区的交界处。由于临界区失稳的直接原因是受到了上部传递的推力。因此，在临界区顶部条块或失稳区底部条块进行支护加固，让临界区条块少受力或不受力，使其成为稳定区条块，能有效提高边坡稳定性。

4) 通过算例计算表明：当存在失稳区时，按条块真实应力状态求解的边坡安全系数较传统条分法的偏小；而当边坡整体处于稳定区时，其得到的安全系数与传统条分法的相同。这一结果符合工程实际，表明该方法可行。

参考文献(References)：

[1] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征—基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):32−37.(LI Yuan,MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China−Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 32−37.(in Chinese))

[2] Fellenius W. Erdstatische berechnungen mit reibung und Kohasion (in German)[M].Berlin: Ernst,1927.

[3] Bishop,Alan W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J].Géotechnique,2015(5):7−17.

[4] 张均锋.三维简化 Janbu 法分析边坡稳定性的扩展[J].岩石力学与工程学报,2004(17):2876−2881.(ZHANG Jun-feng. Extension of three-dimensional simplified Janbu's method for slope stability analysis[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(17): 2876−2881.)

[5] 张先良.边坡渐进破坏及稳定性分析[D].长沙:中南大学,2008.(ZHANG Xian-liang.The progressive failure and the stability analyses of slopes[D].Changsha:Central South University,2008.(in Chinese))

[6] 蹇宜霖.基于渐进式破坏的滑坡稳定性分析[D].长沙:湖南大学,2018.(JIAN Yi-lin.Analysis landslide stability based on progressive failure[D]. Changsha: Hunan University,2018.(in Chinese))

[7] 张芳枝,陈晓平,吴煌峰,等.东深供水工程风化泥质软岩残余强度特性研究[J].工程地质学报,2003,11(1):54−57.(ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping, WU Huang-feng, et al.The characteristics of residual strength of soft clayey rocks of the east river-Shenzhen water supply project[J]. Journal of Engineering Geology, 2003,11(1): 54−57.(in Chinese))

[8] 谭文辉,任奋华,苗胜军.峰值强度与残余强度对边坡加固的影响研究[J].岩土力学,2007,28(S1):616−618.(TAN Wen-hui, REN Fen-hua, MIAO Sheng-jun. Influence of parameters of peak strength and residual strength on the reinforcement of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(S1):616−618.(in Chinese))

[9] 刘动.基于滑带土剪切强度特性的边坡渐进性破坏研究[D].广州:暨南大学,2014.(LIU Dong.Analysis of the progressive failure of slope based on shear strength character of slip zone soils[D].Guangzhou:Jinan University,2014.(in Chinese))

[10] Skempton A W.Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985,35(1):3−18.

[11] Skempton A W.Long-term stability of clay slopes[J]. Géotechnique,1964,14(2):77−101.

[12] 王庚荪.边坡的渐进破坏及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):29−33.(WANG Geng-sun.The progressive failure of slope and the stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(1):29−33.(in Chinese))

(下转至第 68 页)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[12] 蔡恒,卢海林,汤正.基于板壳有限元理论的薄壁箱梁剪力滞效应[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4):779−786.(CAI Heng,LU Hai-lin,TANG Zheng.Shear lag effect of thin-walled box girder based on shell finite element theory[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2017,14(4):779−786.(in Chinese))

[13] 卢海林,蔡恒,黄民水,等.薄壁曲线箱梁剪滞翘曲位移模式研究[J].武汉大学学报:工学版,2019,52(1):40−45,94.(LU Hai-lin, CAI Heng,HUANG Min-shui,et al.Shear lag warping displacement mode research of thin-walled curved box girder[J].Journal of Wuhan University: Engineering Science,2019,52(1):40−45,94.(in Chinese))

[14] 陈玉骥,罗旗帜.考虑3个剪力滞位移函数的曲线箱梁大挠度问题[J].中国铁道科学,2007,28(1):13−18.(CHEN Yu-ji,LUO Qi-zhi.Large deflection of curved box girder considering three shear lag functions[J].China Railway Science,2007,28(1):13−18.(in Chinese))

[15] 张琪,罗旗帜,周旭辉.薄壁曲线箱梁自由振动的有限段法[J].中外公路,2018,38(6):71−75.(ZHANG Qi,LUO Qi-zhi,ZHOU Xu-hui.Finite segment method for free vibration of thin-walled curved box beams[J].China and Foreign Highway,2018,38(6):71−75.(in Chinese))

[16] 马驰,刘世忠,陈权,等.改进型波形钢腹板组合箱梁的动力特性分析[J].铁道工程学报,2019,36(11):30−37,44.(MA Chi,LIU Shi-zhong,CHEN Quan,et al.Dynamic behavior analysis of improved composite box girder with corrugated steel webs[J].Journal of Railway Engineering Society,2019,36(11):30−37,44.(in Chinese))

[17] 乔朋,王宗义,赵丹晨.曲线波形钢腹板箱梁竖向弯曲自振特性[J].铁道建筑,2020,60(8):6−11.(QIAO Peng, WANG Zong-yi,ZHAO Dan-chen.Bending natural vibration characteristics of curved box girder with corrugated steel webs[J].Railway Construction,2020, 60(8):6−11.(in Chinese))

(上接第 60 页)

[13] 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 based on slice method[J].Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(3):1−5.(in Chinese))

[14] 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 Environmental Preservation, 2010, 21(2): 74−77.(in Chinese))

[15] 王恭先.滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J].岩石力学与工程学报.2005,24(21):20−29.(WANG Gong-xian. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(21):20−29.(in Chinese))

[16] 刘龙武,陈海雄,李俊.基于应力分区的二元渗流边坡稳定性分析[J].交通科学与工程,2019,35(4):9−14.(LIU Long-wu,CHEN Hai-xiong,LI Jun.Stability analysis of binary seepage slope based on stress partitioning[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2019, 35(4):9−14.(in Chinese))

[17] 何浪,任其亮.某高速公路黄土边坡稳定性研究[J].公路工程,2019,44(6):123−129,182.(HE Lang,REN Qi-liang. Study on the stability of loess slope of a highway[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 123−129, 182.(in Chinese))

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net