

文章编号:1671-6833(2002)02-0037-04

应变软化土质边坡渐进破坏的演化模型

刘忠玉, 陈少伟

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 考虑到土体的流变效应, 通过推广不平衡推力法, 提出了具有应变软化性质的土质边坡渐进破坏的一个力学模型. 该模型采用 Maxwell 松弛模型描述局部破坏后滑裂面上土体的抗剪强度随时间的变化情况, 用时间安全系数来描述边坡的稳定状态, 并且不必假定渐进破坏从坡角开始, 因而更接近实际情况. 通过数值模拟, 清晰地揭示了边坡渐进破坏的历时演化过程, 并证实了边坡的安全系数随时间推移而逐渐变小的规律.

关键词: 滑坡; 渐进破坏; 安全系数; 应变软化

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

用于边坡稳定性计算的条分法一般都隐含着假定: 滑裂面上的土体是刚塑性的. 对于具有应变硬化性质的土坡, 作为设计工具这些方法已经被证实具有重要意义. 但是, 若用该法评价具有应变软化性质的土质边坡的稳定性时, 常常会得出错误的结果^[1]. 造成这种差别的主要原因是边坡破坏演化过程不同^[2,3]. 早在 20 世纪 60 年代, Skempton^[4] 在研究超固结粘土边坡的稳定性时就指出了这种差别, 并首次提出了边坡渐进破坏的概念. 他认为, 土体的强度并非在整个滑裂面上同时发挥作用, 而是当土中某一点的剪应力增加到超过土的强度时, 该点发生剪切破坏. 由于这种剪切破坏逐渐传递, 使得渐进破坏面逐渐扩大, 最后当滑动推力上升到超过滑裂面的抗剪强度时便发生坡体的整体滑动. 所以, 根据渐进破坏的概念, 滑坡是一个土体随时间而缓慢变形和突发性崩塌的过程, 因此, 一个可靠的边坡稳定性分析方法应该考虑到渐进破坏的影响.

要精确分析边坡的渐进破坏过程, 不仅需要掌握土的所有基本特性, 而且还要掌握土的瞬时和长期特性, 同时要引入或发展新的数值模型. 不过, 在大多数情况下要得到这些必需的资料是很困难的, 以致使分析边坡渐进破坏常用的数值方法受到了一定的限制, 尽管这种比较复杂的分析有时是可以实现的, 而且也取得了不少成果^[4~9], 但是, 为了更直观地理解和认识滑坡发生破坏的

力学机制和演化过程, 运用较简单的模型对其进行分析仍具有实际意义. 所以文献^[7] 提出了平面坡体渐进破坏模型, 但仅适用于滑裂面为平面且滑体厚度较为一致的顺层滑坡. 在条分法的基础上, 考虑土体的流变效应, 文献^[8] 建议了时间安全系数的定义, 并提出了一个滑坡渐进破坏演化模型, 但其假定渐进破坏首先从坡角开始, 原因是由于在边坡的坡角附近存在剪切应力集中, 所以该处的土体将先达到峰值强度而进入塑性破坏. 事实上, 对于均匀的简单边坡的确是这样的, 但是对于复杂边坡, 特别是在滑裂面上各点土体的抗剪强度参数不一样时, 则未必如此. 文献^[9] 曾建议把滑裂面分为四部分: 后部拉裂段、后部锁固段、中部蠕滑段和前部锁固段, 这就意味着首先发生局部破坏的区域可能在边坡中部, 而不见得是在坡角处. 因此, 我们需要根据工程调查情况, 合理假定局部破坏的开始处. 本文拟结合不平衡推力法提出一个可以假定渐进破坏从任意处开始的演化模型.

1 演化模型

1.1 极限平衡方程

考虑平面应变问题, 将滑体从上往下依次分成 n 个竖直土条, 如图 1 所示, 且采用不平衡推力法的假定, 即条间力的合力与上一条土条底面相平行. 考虑任意一根滑动土条的力的平衡, 有

收稿日期: 2002-01-10; 修订日期: 2002-03-10

基金项目: 河南省科技攻关项目(0224670009)

作者简介: 刘忠玉(1968-), 男, 河南省延津县人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事岩土力学方面的研究.

$$N_i - W_i \cos \alpha - P_i - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha) = 0; \quad (1)$$

$$T_i + P_i - W_i \sin \alpha - P_i - \cos(\alpha_{i-1} - \alpha) = 0. \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 条的重量; N_i, T_i 分别为其底面的支持力和剪切力; α 为底面的倾角; P_i 为第 i 条和下一条之间的条间力(推力). 由式(1)可得

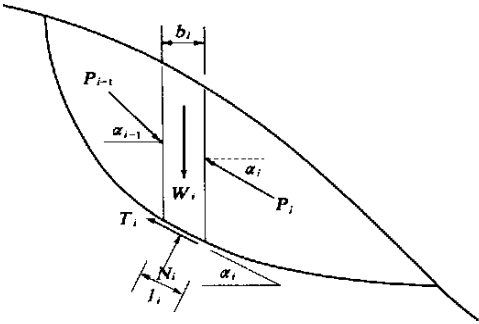


图1 土条划分及受力图

Fig. 1 Slice partition for a soil mass and forces acting on a slice

$$N_i - W_i \cos \alpha - P_i - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha) = 0. \quad (3)$$

根据摩尔-库伦破坏准则,第 i 条土条底部的允许最大抗剪力 T_{pi} 和滑床的支持力 N_i 之间满足下式:

$$T_{pi} = c'_{pi} + (N_i - u_{li}) \tan \varphi'_{pi}, \quad (4)$$

式中: c'_{pi}, φ'_{pi} 分别为岩土的有效峰值强度参数.

如果土条底部的剪力 T_i 达到最大(峰值)抗剪力 T_{pi} , 则

$$T_{pi} = c'_{pi} + [W_i \cos \alpha - P_i - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha) - u_{li}] \tan \varphi'_{pi}. \quad (5)$$

同理,如果土条底部的剪力 T_i 降为残余抗剪力 T_{fi} , 则

$$T_{fi} = c'_{fi} + [W_i \cos \alpha - P_i - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha) - u_{li}] \tan \varphi'_{fi}, \quad (6)$$

式中: c'_{fi}, φ'_{fi} 分别为岩土的有效残余强度参数.

1.2 局部破坏

实验结果表明:对于应变软化土,当土体承受的剪切力达到最大剪切强度后,随着土体连续的变形,土体的抗剪强度便降到残余强度,实验曲线如图2所示.为了便于分析研究,我们用图3的简化曲线代替图2的实验曲线,即认为土体的抗剪强度在从峰值强度向残余强度过渡的过程中,应变保持不变,这样土体的蠕变变形受到了限制,其强度得不到充分发挥,土体内的应力便发生松弛.我们假定局部破坏的演化就从此时开始.

本文采用 Maxwell 松弛模型,即

$$T_r(t) = T_f + (T_p - T_f)e^{-t/t_r}. \quad (7)$$

式中: t_r 为松弛时间; $T_r(t)$ 为 t 时刻允许承受的

抗剪强度.当某处条块发生局部破坏后,随着该处应力的松弛,其底部所允许的剪切力减小,附加力必须传递到相邻的条块,引起应力的重分布,这将导致进一步的局部破坏.

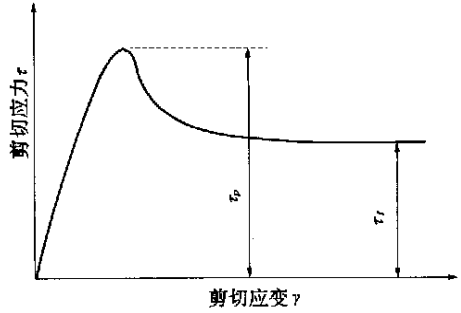


图2 应变软化土的实验曲线

Fig. 2 Experimental curve for strain-softening soil

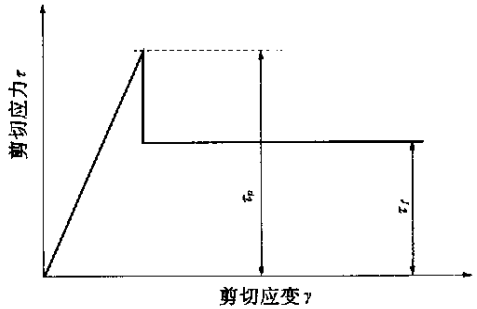


图3 应变软化土的简化曲线

Fig. 3 Simplified curve for strain-softening soil

在重力、孔隙水压力和附加力的作用下,若原来未发生局部破坏的条块其底部所承受的剪切力在时刻 t 达到允许承受的最大剪切力 T_p , 那么局部破坏开始演化,此时发生局部破坏的条块承受的剪切力实际上是 T_p . 对于下一个时刻 t_1 , 它们所承受的剪切力应为

$$T(t_1) = T_r(t_1 - t) = T_f + (T_p - T_f)e^{-(t_1 - t)/t_r}, \quad (8)$$

这个过程直到局部破坏不再传递或滑坡发生为止.

1.3 条块底部剪切力

忽略滑体内部的变形,即在局部破坏演化过程中每个条块的宽度不变,且假定条块之间有压力时没有宏观的分离,这样每个条块的水平位移均相等.若再假定剪切带厚度均匀,则条块底部的剪应变之间存在下列关系:

$$\gamma_i = \gamma - \cos \alpha / \cos \alpha_{i-1}, \quad (9)$$

那么,在图3所示的直线段即弹性阶段时,第 i 条块底部的剪应力为

$$\tau_i = G_i \gamma_i. \quad (10)$$

式中: G_i 为第 i 条块底部剪切带土体的剪切模量. 所以,第 i 条块底部的剪切力为

$$T_i = G_i b_i \gamma_i. \quad (11)$$

若上式算得结果大于等于 T_{pi} , 说明该条块将发生局部破坏, 则

$$T_i = T_{pi} \cdot$$

(12)

另外, 对于已经发生局部破坏的条块, 其底部的剪切力可按式 8) 求解.

1.4 条间力 推力

根据前面的分析, 如果第 i 条块发生了局部破坏, 则在随后的任一时刻, 该条块底部的剪切力应由式 8) 求出; 如果该条块仍处于弹性状态, 则该条块底部的剪切力应由式(1b) 求出. 这样由式 (3) 可以得出该条块的推力

$$P_i = W_i \sin \alpha + P_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha) - T_i, \quad (13)$$

对任意时刻, 对第 1 条块先假定一个 γ , 对上式从第一条往下逐条推求, 直到求出最后一条的推力 P_n , 后者必须为零, 否则要重新假定 γ 进行试算.

1.5 边坡的安全系数

在传统的边坡稳定性分析中, 对所有的条块采用同一常值安全系数, 这在对边坡进行渐进破坏分析时是不合理的. 在此, 我们采用文献[8] 的做法, 以 t 时刻滑裂面上允许承受的抗剪强度之和与该时刻滑裂面上实际承受的剪切力之和的比值作为边坡整体安全系数新的定义, 称为时间安全系数 F_t , 即

$$F_t = \frac{\sum_1^{n_1} T_p + \sum_1^{n_2} T_r(\Delta_k)}{\sum_1^{n_1+n_2} T}, \quad (14)$$

对于稳定的边坡, 定义最终安全系数 F_f 为

$$F_f = \frac{\sum_1^{n_1} T_p + \sum_1^{n_2} T_f}{\sum_1^{n_1+n_2} T}, \quad (15)$$

式中: n_2 为发生局部破坏条块的总数; n_1 为未发生局部破坏条块的总数; Δ_k 为条块 k 从发生局部破坏的时间 t_k 到时刻 t 的时间间隔.

从上述定义可以看出, 若 $n_1 = 0$, 即所有条块均发生局部破坏, 则有 $F_t = 1, F_f = 1$, 因此我们以 $F_t = 1$ 作为滑坡发生的标准. 同时该定义还表明, 坡体滑动时并非所有条块底部的剪切力都降到其残余强度.

2 算例与分析

某边坡经勘探得到滑体各滑块及滑裂面参数如表 1 所示, 其中条块从坡顶向下依次编号. 若取滑裂面上土体抗剪参数为表中的峰值参数, 按不平衡推力法, 则算得边坡的常规定义的安全系数为 1.25. 实验证明: 局部破坏发生后, 内摩擦角的变化很小, 因此, 本例假定残余摩擦角等于峰值摩擦角, 而残余粘聚力取值如表中所示. 另外取滑裂面处土体的剪切模量为 5 MPa, 然后按上述渐进模型进行了计算.

表 1 计算参数一览表
Tab. 1 Table of computation parameter

| 编号 | 滑块体积 $V_i / (\text{m}^3/\text{m})$ | 滑块重量 $G_i / (\text{kN}/\text{m})$ | 滑面长度 L_i / m | 滑面倾角 $\alpha / (^\circ)$ | 峰值粘聚力 c_{pi} / kPa | 峰值摩擦角 $\varphi_{pi} / (^\circ)$ | 残余粘聚力 c_{fi} / kPa | 残余摩擦角 $\varphi_{fi} / (^\circ)$ |
|----|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 3.728 | 78.735 | 6.70 | 37 | 15.50 | 7.40 | 0 | 7.40 |
| 2 | 51.640 | 493.927 | 19.20 | 40 | 15.50 | 7.40 | 0 | 7.40 |
| 3 | 7.470 | 148.802 | 2.40 | 40 | 33.02 | 12.38 | 5 | 12.38 |
| 4 | 59.620 | 1195.167 | 20.00 | 35 | 33.02 | 12.38 | 5 | 12.38 |
| 5 | 2.441 | 49.634 | 1.80 | 25 | 33.02 | 12.38 | 5 | 12.38 |

计算结果表明, 在时刻 $t = 0$ 时, 坡顶出现裂缝, 且第 1, 2 条块发生局部破坏, 随着这两块底部的应力松弛, 条间力将作调整; 在时刻 $t = 0.99t_r$ 时, 坡底第 5 条块发生局部破坏; 在时刻 $t = 1.55t_r$ 时, 第 3 条块发生局部破坏; 最后在时刻 $t = 1.62t_r$ 时, 第 4 条块发生局部破坏, 至此所有条块都已破坏, 滑坡将会发生. 由此分析可知, 土体的强度并非是沿整个滑裂面同时得到发挥的. 同时示于图 4 的边坡的时间安全系数 F_t 随时间的变化曲线表明, 边坡的时间安全系数 F_t 基本上是随着时间的推移而减小的.

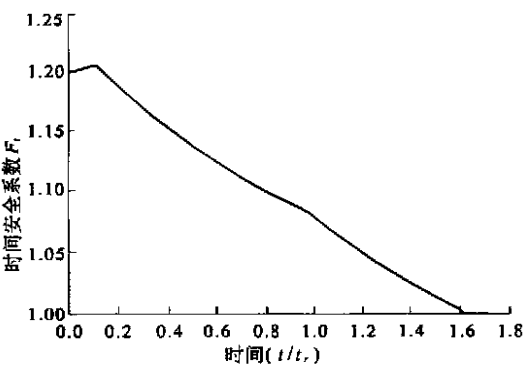


图 4 时间安全系数随时间的变化规律

Fig. 4 Safety factor of a slope varying with time

3 结束语

本文在考虑土体的流变效应的基础上,通过推广常规边坡稳定性分析时常用的不平衡推力法,提出了具有应变软化性质的土质边坡渐进破坏的一个演化模型,数值模拟清晰地揭示了边坡渐进破坏的历时演化过程,其结果都是传统分析方法所无法得到的.所以,渐进破坏模型为更直观地理解和认识滑坡发生破坏的力学机制和演化规律提供了一个新的途径.

参考文献:

[1] SKEMPTON A W.Long term stability of clay slopes[J] . Geotechnique , 1964, 14(1) : 77—101.
[2] LAW T ,LUMB P .A limited equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes[J] .Can Geotech J , 1978, 15(2) : 113—122.

[3] 陈守义.试论土的应力应变模式与滑坡发育过程的关系[J] .岩土力学,1996,17(3) :21—26.
[4] DUNCAN J M.State of the art limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J] .J Geotech Engrg ,ASCE , 1996,122(7) :577—596.
[5] 谭文辉,王家臣,周汝弟.岩体边坡渐进破坏的物理模拟和数值模拟研究[J] .中国矿业,2000,9(5) :56—57.
[6] 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.
[7] 刘爱华,王思敬.平面坡体渐进破坏模型及其应用[J] .工程地质学报,1994,2(1) :1—8.
[8] MAO Tian de , MA Chong wu , WU Sheng zhi .Evolution model of progressive failure of landslides[J] .J Geotech and Geoenvir Engrg ASCE , 1999, 125(10) :827—831.
[9] 徐俊龄.高速远程滑坡研究现状综述[A] .滑坡文集编委会.滑坡文集(第 12 集)[C] .北京:中国铁道出版社,1999.54—64.

Evolution Model of Progressive Failure of Strain -softening Soil Slopes

LIU Zhong -yu , CHEN Shao -wei

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

Abstract : In view of the effects of rheological characteristics of soil , a mechanical model of progressive failure of strain -softening soil slopes is presented by generalizing the method of unbalanced thrust .The maxwell relaxation is introduced to describe the shear strength with time of the soil near the slip surface after local failure ,and the safety factor varying with time is done to express the stability of the slope .Moreover the assumption that the progressive failure starts at the corner first isn't necessary .Thus the presented model should be much close to the practice .The evolutionary process of landslide can be clearly shown and the rule that the safety factor of slope is decrescent with time is validated by computer simulation using the model .

Key words : landslide ; progressive failure ; safety factor ; strain -softening