

考虑渐进破坏的边坡稳定分析方法

曹永华^{1,2,3,4}, 张嘎⁵, 宋飞⁶, 罗方悦⁷

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 3. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222; 4. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 5. 清华大学, 北京 100084; 6. 长安大学, 陕西 西安 710064; 7. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 由于地层力学指标和破坏面各处应力水平存在差异, 采用极限平衡法分析实际边坡稳定性时各土条应具有不同的安全系数, 进而不同的土条破坏发生的时刻并不一致, 而是体现为渐进破坏过程。常规边坡稳定分析采用的均匀安全系数难以反映实际工程情况, 易造成分析结果偏差。现有的渐进破坏研究多采用数值计算方法, 计算较为繁琐。为探究渐进破坏过程对边坡稳定分析的影响, 本文假定边坡部分土条安全系数为已知, 推导了 3 种典型极限平衡法考虑渐进破坏时的边坡稳定计算方法, 并基于新方法对某典型破坏边坡工程进行了计算。工程实例计算表明, 土层中存在明显硬土层时, 采用均匀安全系数会高估软弱层的安全度, 所以即使边坡整体安全系数大于 1.0, 也可能因渐进破坏发生失稳, 因此在存在明显硬土层情况下采用均匀安全系数方法得到的整体安全系数无法真实反映边坡实际安全储备。

关键词: 边坡; 安全系数; 稳定计算; 渐进破坏

中图分类号: U6; U656.105; TU443 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)09-0011-05

doi: 10.7640/zggwjs202609002

Slope stability analysis method considering progressive failure

Cao Yonghua^{1,2,3,4}, Zhang Ga⁵, Song Fei⁶, Luo Fangyue⁷

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of CCCC, Tianjin 300222, China; 4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 5. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 7. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Due to the differences in the mechanical properties of strata and the stress levels at various locations of the failure surface, each soil slice of an actual slope yields different safety factors in stability analysis using the limit equilibrium method. As a result, the failure of different soil slices does not occur simultaneously but rather shows a progressive failure process. The uniform safety factor commonly used in conventional slope stability analysis cannot accurately reflect the actual engineering situation and may lead to deviations in the analysis results. Most existing studies on progressive failure of slopes adopt numerical calculation methods, which involve cumbersome computation procedures. To explore the influence of the progressive failure process on slope stability analysis, this paper assumes that the safety factors of some soil slices of the slope are known and derives the slope stability calculation methods considering this progressive failure for three typical limit equilibrium methods. Based on the new methods, a calculation is conducted for a typical slope failure engineering case. The calculation of the engineering example shows that when there is a distinct hard soil layer within the profile, using a uniform safety factor will overestimate the safety of the weak layer. Therefore, even if the overall safety factor of the slope is greater than 1.0, instability may occur due to progressive failure. Thus, in the presence of a distinct hard soil layer, the overall safety factor obtained by the uniform safety factor method cannot truly reflect the actual safety margin of the slope.

Key words: slope; safety factor; stability calculation; progressive failure

收稿日期: 2026-03-12 修回日期: 2026-07-22

作者简介: 曹永华 (1977—), 男, 湖南常德人, 博士, 正高级工程师, 从事岩土工程和港口工程的科研与检测。E-mail: caoyonghua@126.com

0 引言

在自然界中,自然灾害以地质灾害为主,而地质灾害又以滑坡为主;在工程实践中,边坡稳定问题又常常成为工程成败的主导因素,因此边坡稳定问题成为土力学和岩土工程的经典课题^[1-3]。边坡稳定分析方法主要有极限平衡法和数值分析方法,前者假设土体为刚塑性体,概念清晰且计算简单方便,缺点是只能得到安全系数。数值计算方法能计算出变形和安全系数,现在逐渐成熟,但由于数值计算方法引入了土的本构关系,因此计算较为复杂且对使用者的经验要求较高。近年来,有研究将此2种方法相结合,提出了数值极限分析方法^[4]。上述计算方法是在假定破坏面上(或滑动带内)各点的剪应力同时达到抗剪强度的条件下得出的,其计算的安全系数(或抗力分项系数)只能反映破坏面上土体稳定的平均情况(或整体稳定情况)。实际上,由于地层沉积特性或坡体功能设计的差异,坡内土体材料通常是非均匀的,且坡体内应力总是不均匀的,而土的抗剪强度又与应力水平相关,因此破坏面上各点的剪应力同时达到抗剪强度即同时发生破坏几乎不可能。因此,实际边坡发生破坏时,往往是部分土体先发生破坏,破坏后的土体强度下降为残余强度,但坡体的下滑力是不变的,因此需要将部分下滑力荷载转嫁至其他土体,从而进一步导致其他土体的破坏,此破坏过程由局部逐渐发展至全局,因此称为渐进破坏或连续破坏。多数边坡的破坏过程为渐进破坏,如何考虑破坏过程对安全系数的影响是个难题,多数研究采用数值计算方法进行分析^[5-8],计算过程较为繁琐。本文基于极限平衡法,通过对不同土体设置不同安全系数,提出了一种考虑渐进破坏过程的边坡稳定分析方法。

1 考虑渐进破坏的边坡稳定分析方法构建

采用极限平衡法求解图1的边坡稳定问题(图中 (x_R, z_R) 为滑弧圆心; h 为破坏面纵坐标; x_0 和 x_N 为破坏面入坡底点和出坡点的横坐标; x_k 为破坏面上一点的横坐标; p_z 为边坡表面竖向荷载),一般采用库伦屈服准则和毕肖普法对安全系数的定义,即:

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / F_s \quad (1)$$

式中: F_s 为安全系数(为区别考虑渐进破坏后的安全系数也可称为整体安全系数); c 为土黏聚力; φ 为土内摩擦角; τ 为破坏面上的抗剪强度或剪应

力; σ 为破坏面上正应力。

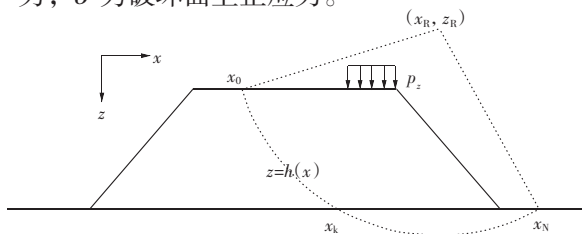


图1 边坡示意图

Fig. 1 Slope schematic

整体安全系数常常以滑动力矩和抗滑力矩表示为:

$$F_s = \frac{M_R}{M_0} \quad (2)$$

式中: M_0 为滑动力矩; M_R 为抗滑力矩。

从式(1)和式(2)可以看出,在常规的边坡稳定分析中,除了常规的条间力假定,还包含了所有土条安全系数均匀的假定。

对图1所示边坡,水运工程常用的3种边坡稳定方法为简单条分法、简化毕肖普法和复合滑动面法。对二维边坡稳定问题,若采用圆弧形破坏面,则3种方法的滑动力矩可以用式(3)表示^[1]。

$$M_0 = \int_{x_0}^{x_N} (x_R - x)(w_\gamma + p_z) dx \quad (3)$$

式中: w_γ 为微分土条的重量, $w_\gamma = \int_{h_s}^h \gamma dz$, γ 为土体重度, h_s 为边坡表面纵坐标。

不同方法的抗滑力矩有所不同。

对简单条分法^[1]:

$$M_R = \int_{x_0}^{x_N} (h - z_R) [(w_\gamma + p_z - u(1 + h'^2)) \tan \varphi + c(1 + h'^2)] dx \quad (4)$$

式中: h' 为破坏面斜率; u 为孔隙水压力。

对简化毕肖普法^[1]:

$$M_R = \int_{x_0}^{x_N} \frac{h - z_R}{1 + F_\varphi h'} (1 + h'^2) \times [(w_\gamma + p_z - u) \tan \varphi + c] dx \quad (5)$$

式中: $F_\varphi = \tan \varphi / F_s$ 。

应用此方法, $1 + F_\varphi h'$ 有时很小或出现负值,导致不适用。

复合滑动面法由黄传志提出^[1],由于在该方法推导过程中采用了屈服函数的极值条件,因此采用了更合理的条间力假定,该方法可以适应任意形状的滑动面,且在大多数情况下,计算结果与简化毕肖普法和严格条分法等计算精度得到公认的方法接近,但避免了简化毕肖普法等方法在滑动面斜率为负时产生的分母趋近于0的问题,是JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》优先推荐

的方法。对于复合滑动面法, 当破坏面位于圆弧时:

$$M_R = \int_{x_0}^{x_n} (h - z_R) [(w_{\gamma} + p_z - u) \tan \varphi + c] \left(1 + \frac{(h' - F_{\varphi})^2}{1 + F_{\varphi}^2} \right) dx \quad (6)$$

为考虑渐进破坏, 需放弃常规方法采用的所有土条安全系数相同的假定, 进而对不同土条采用不同的安全系数。由于各土条将破坏面自然分成了若干段, 因此, 需将积分形式的公式改写为求和格式, 假设破坏面上共 n 个土条 (见图 2)。

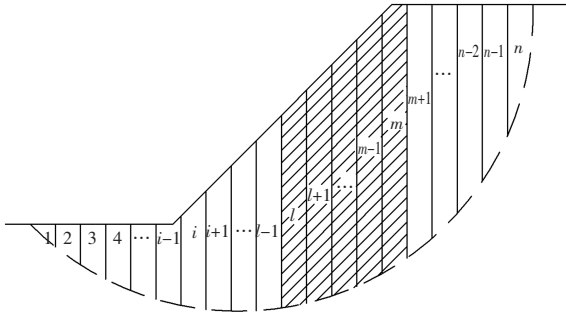


图 2 边坡稳定分析中的土条

Fig. 2 Soil slices for slope stability analysis

$$\sum_{i=1}^n M_{0i} = \sum_{i=1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n M_{0i} = \sum_{i=1}^n (x_R - x_i) (w_{\gamma_i} + p_{z_i}) \times \Delta x_i \quad (8)$$

式中: Δx_i 为划分土条时横坐标的间距, 绝对值为土条宽度。

对简单条分法:

$$\sum_{i=1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{F_{si}} (h_i - z_{Ri}) [(w_{\gamma_i} + p_{z_i} - u_i) (1 + h_i'^2) \cdot \tan \varphi + c_i (1 + h_i'^2)] \quad (9)$$

对简化毕肖普法:

$$\sum_{i=1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{F_{si}} \frac{h_i - z_{Ri}}{1 + F_{\varphi_i} h_i'^2} (1 + h_i'^2) [(w_{\gamma_i} + p_{z_i} - u_i) \cdot \tan \varphi + c_i] \quad (10)$$

对复合滑动面法:

$$\sum_{i=1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{F_{si}} (h_i - z_{Ri}) [(w_{\gamma_i} + p_{z_i} - u_i) \tan \varphi + c_i] \cdot \left(1 + \frac{(h_i' - F_{\varphi_i})^2}{1 + F_{\varphi_i}^2} \right) \quad (11)$$

根据式(7)~式(11), 可以考虑渐进破坏对边坡稳定安全系数的影响。若除第 l —第 $l+m$ 外的各土条安全系数均为 F_{si} , 假设第 l —第 $l+m$ 土条的安全系数为 F_{slm} , 则有:

$$\sum_{i=1}^n M_{0i} = \sum_{i=1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} = \sum_{i=1}^{l-1} \frac{M_{Ri}}{F_{si}} + \sum_{i=l}^{l+m} \frac{M_{Ri}}{F_{slm}} + \sum_{i=l+m+1}^n \frac{M_{Ri}}{F_{si}} \quad (12)$$

利用式(12), 可以求出滑动体某区段安全系数已知时其他区段的局部安全系数, 也就是在放弃不同土条具有相同安全系数这一假定前提下, 实现了渐进破坏过程对安全系数的影响, 提出了一种新的考虑渐进破坏的边坡稳定分析方法。

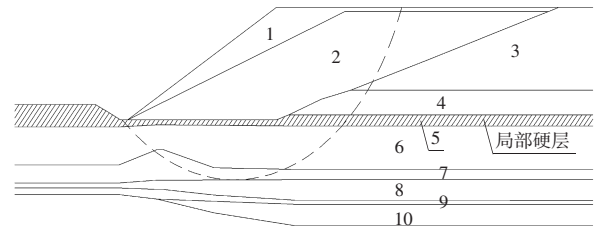
2 应用验证

当土层强度指标相差较大时, 在边坡稳定分析时需要引起特别的注意。

1) 边坡土层中含有软弱夹层, 对于此类边坡, 如果按常规的圆弧破坏面进行计算, 则会得到偏大的安全系数。较为合理的处理方式是采用复合滑动面法或严格条分法并按经软弱夹层的非规则破坏面进行计算, 这一点已在工程界和学术界取得共识。

2) 边坡土层中含有强度指标相对好很多的土层时, 也就是含有硬夹层时, 如果按常规的极限平衡法假设各土层具有相同的安全系数进行计算, 也会得到偏大的安全系数。此时较为合理的计算方法是考虑渐进破坏的计算方法。

某边坡在施工期发生过几次失稳破坏, 失稳前其典型断面如图 3 所示。



注: 图中 1—10 为土层编号。

图 3 边坡断面图

Fig. 3 Slope cross-section

根据勘察与施工资料, 涉及边坡稳定计算土层共 10 层, 主要物理力学指标见表 1。

表 1 边坡土层的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of slope strata

土层	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	18.0	0	30.0
2	18.0	0	30.0
3	17.6	13.8	8.5
4	16.5	22.3	7.4
5	19.2	48.7	12.8
6	17.5	29.9	7.8
7	18.1	21.6	3.7
8	17.5	29.9	7.8
9	20.0	38.7	10.1
10	18.0	0	34.0

如上所述,该边坡在施工过程中发生了失稳破坏,为弄清楚失稳原因,各方学者对此进行了研究,一直还没有形成统一意见,如有学者认为施工扰动破坏了原地基土强度造成了边坡失稳。

由于土层特性和施工工况的复杂性,目前的研究都只是揭示了边坡失稳诱因的某一个方面。本文现从渐进破坏的角度进行分析。

按常规极限平衡法分析,采用不同计算方法得到的整体安全系数见表2。

表2 失稳边坡的整体安全系数

Table 2 Overall safety factor of unstable slope

计算方法	安全系数
简单条分法	1.070
简化毕肖普法	1.156
复合滑动面法	1.159

由表2可知,该失稳边坡的整体安全系数大于1.0,但施工期却发生了破坏,说明由常规极限平衡法计算得到整体安全系数未真实反映边坡的安全储备。

为此,采用渐进破坏计算模式对此边坡进行分析。

由于此岸坡中各土层的抗剪强度指标相差较大,尤其是第5层土,其强度指标明显优于其他土层,因此破坏面上各点的剪应力同时达到抗剪强度几乎是不可能的,对于不同的土层,应具有不同的安全系数。而当不同土层抗剪强度相差较大时,可能会给岸坡安全系数的计算带来较大的误差。

本工程具有局部硬层,见图3。将局部硬层的安全系数从1.0到2.0变化,并采用基于简单条分法、简化毕肖普法和复合滑动面法的3种基于渐进破坏的安全系数计算模式,求得除局部硬层以外的土体的安全系数。

除局部硬层以外的土体的安全系数随局部硬层安全系数的变化见如图4所示。从图4可以看出,随着局部硬层安全系数的增大,其他土体安全系数有下降的趋势。图中安全系数的下降幅度较小,这是因为此局部硬层的厚度较小,破坏面在硬层的有效作用区段较短,因此,此局部硬层安全系数的变化没有导致其他土体安全系数的明显改变。该现象说明了在存在局部硬层的情况下,由于局部硬层的安全系数被低估会导致其他土体的安全系数被高估。

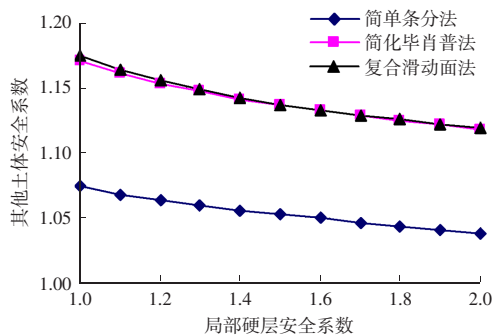


图4 其他土体安全系数随局部硬层安全系数的变化

Fig. 4 Variation of safety factors of surrounding soils with the safety factor of the local hard strata

若硬层厚度加大,则此硬层安全系数的变化必然导致其他土体安全系数的明显变化。也就是说,当土层中相对硬层厚度较大时,其他土体的安全系数被高估的幅度会较大。某区段土体的安全系数被高估后,可能会在实际施工过程中首先破坏,然后此段土体的抗剪强度由峰值衰减为残余强度,将下滑力矩向相邻区段的土体转移,导致相邻区段的土体相继破坏,最终形成渐进破坏过程。

3 问题及讨论

渐进破坏概念提出时间已久,但应用却较少见。究其原因,还有问题没有很好地解决。

1) 计算方法没有很好解决。有研究按应变软化来计算,但应变软化无通用模型,每个工程项目都需要单独做试验。本文采用对不同的地层赋以不同的安全系数,基于极限平衡法解决了计算方法的问题,但还未解决计算参数取值问题,具体来说就是不同土层安全系数的相对关系还未确定。这是下一步研究需要解决的问题。

2) 采用渐进破坏计算模式时其安全系数定义没有统一的认识。工程师认为无法像传统方法一样直接用于边坡稳定性判断。笔者认为即使采用渐进破坏,其安全系数的定义仍然是本文式(1)也就是毕肖普法的定义,其内涵并没有改变,因此是可以用于稳定性判断的。

3) 当采用数值计算开展渐进破坏分析时,需依托精细化数值模拟,建模调试复杂、计算耗时久,暂无简易通用的商业化设计软件,该计算区别于传统极限平衡条分法的便捷计算模式,普通设计人员难以熟练运用。而且,现在的国家标准和行业标准都是采用极限平衡法,这也很大程度上限制了数值计算的应用。本文基于极限平衡法

提出了一种相对简便的计算方法,但还未完全解决此问题。

4 结语

边坡内土层强度差异较大时,采用常规均匀系数方法计算稳定性会带来明显误差。当存在软弱夹层时推荐采用可考虑任意形状破坏面的复合滑动面法,当存在硬土层时建议采用渐进破坏计算方法。

边坡内土层存在明显偏硬土层时,采用均匀安全系数进行稳定性评价存在明显缺陷,会高估相对软弱土层的安全系数,软弱土层易率先发生破坏,引发下滑力重新分布,进而诱发边坡整体的渐进破坏。因此当边坡土层中存在局部硬土层或局部加固区时,均匀安全系数法计算得出的边坡安全系数会被高估,分析结果偏于危险,无法准确反映边坡的实际安全状态。

基于极限平衡法提出的考虑渐进破坏的边坡稳定分析方法,通过为不同土条设置不同安全系数,能够更贴合边坡实际的破坏过程,可有效弥补均匀安全系数法的不足,为土层强度差异较大的边坡稳定分析提供更合理的方法支撑。

复合滑动面法计算精度与简化毕肖普法等公认方法接近,且能避免部分方法在特定情况下的不适用性,在考虑渐进破坏的边坡稳定分析中具备良好的应用价值。

参考文献:

- [1] 黄传志,曹永华.岩土工程极限分析理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2019.
- Huang C Z, Cao Y H. Theory and method of limit analysis in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Communications Press,

2019.

- [2] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [3] 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 Z Y. Soil slope stability analysis: Theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [4] 郑颖人,孔亮.岩土塑性力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Zheng Y R, Kong L. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [5] 王伟,陈国庆,朱静,等.考虑张拉-剪切渐进破坏的边坡强度折减法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2064-2074.
- Wang W, Chen G Q, Zhu J, et al. Slope stability calculated with strength reduction method considering tensile and shear progressive failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2064-2074.
- [6] 洪心怡,刘志强.降雨入渗条件下双层非饱和土边坡渐进性破坏数值分析[J].自然灾害学报,2023,32(2):71-80.
- Hong X Y, Liu Z Q. Numerical analysis of progressive failure of double-layer unsaturated slopes due to rainfall infiltration[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(2): 71-80.
- [7] 胡金山.基于局部安全系数的铁路边坡稳定性渐进分析[J].铁道建筑,2023,63(5):140-144.
- Hu J S. Progressive analysis of railway slope stability based on local safety factor[J]. Railway Engineering, 2023, 63(5): 140-144.
- [8] 侯世伟,焦宏宇,杜修力,等.考虑衰减滞后的均质土坡双剪切带破坏模式研究[J].北京工业大学学报,2024,50(12):1437-1447.
- Hou S W, Jiao H Y, Du X L, et al. Failure mode of double shear band on attenuation hysteresis of delamination strength reduction effect[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(12): 1437-1447.

欢 迎 投 稿