

文章编号: 1000-7598 (2014) 03-847-08

基于局部强度折减法的边坡多滑面 分析方法及应用研究

李小春, 袁 维, 白 冰, 石 露

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 武汉 430071)

摘 要: 边坡最危险滑动面的搜索方法一直是研究的热点, 但边坡内部次级滑动面也可能不满足安全设计要求, 因此, 考虑边坡多条滑动面的分析方法亦应得到关注。在传统强度折减法中, 对边坡整个区域的抗剪强度参数进行折减, 此方法仅可得到一个临界滑动面和最小安全系数。提出了一种基于局部强度折减法的多滑面分析方法, 即首先定义单元安全系数的概念, 并且计算边坡每个单元的安全系数, 然后自动搜索出单元安全系数处于不同范围内的单元集合, 对各个单元集合的强度参数进行折减计算, 即可得到不同安全系数对应的滑动面。通过单台阶和双台阶边坡算例验证了该方法的可行性, 结果表明, 随着安全系数的增大, 潜在滑面的深度和潜在滑动区域亦增大。最后把该方法应用到某隧道进口仰坡的稳定性评价中, 通过该方法得到的多级滑动面与现场监测数据吻合较好。

关 键 词: 多滑动面; 强度折减法; 边坡; 稳定性分析; 安全系数

中图分类号: TU457

文献标识码: A

Analytic approach of slope multi-slip surfaces based on local strength reduction method and its application

LI Xiao-chun, YUAN Wei, BAI Bing, SHI Lu

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The approach of searching the most dangerous slip surface is always a hot area for research. However, the other secondary potential slip surfaces, which do not meet the requirement of safety, should also receive attentions. The shear strength parameters of the whole area are reduced in the conventional strength reduction method; but only the minimum safety factor and the most dangerous slip surface can be obtained through this approach. An analysis method of slope multi-slip surfaces, which is based on local strength reduction method, is proposed. Firstly, the safety factor of each element is defined and calculated; different element sets with the safety factors falling in various specific scopes are found out automatically. And then the shear strength parameters of those element sets are reduced respectively; the slip surfaces corresponding to different safety factors are located. The feasibility of this approach is verified through a slope with single step and a slope with double steps. The results show that the depth of the secondary slip surface and the slip area enlarge with the increase of the safety factor of the slope. At last, this method is applied to stability analysis of a slope located at the entrance of a tunnel; and the multi-slip surfaces acquired from the proposed method can agree well with the field data.

Key words: multi-slip surfaces; strength reduction method; slope; stability analysis; factor of safety

1 引 言

强度折减法是边坡稳定性分析的一种方法, 由 Zienkiewicz 在 1975 年提出的^[1]。这种方法不需要提前假定滑动面, 可同时得出安全系数与潜在滑动面位置。但由于通常的强度折减法是针对整个边坡区域进

行折减, 只能计算出整体最小安全系数和最危险滑面, 不能计算局部最小安全系数和次级滑面^[2-4]。然而, 边坡中可能存在某些滑动面的安全系数与最小安全系数相差不大, 或者虽比最小安全系数大, 但仍不满足规范中规定的安全要求设定值^[5-7], 因此, 除了治理最危险滑面, 亦应对这些次级滑面进行治

收稿日期: 2012-12-28

基金项目: 国土资源部公益性项目(No.201211063); 中国科学院事业费专项重大重要方向性项目(No.KZCX2-YW-T12)。

第一作者简介: 李小春, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地质埋存地层稳定性评价与工程设计理论方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

理, 比如, 对于多台阶边坡而言, 每级台阶的安全系数和潜在滑面都是值得关注的, 因此, 强度折减法在工程实践中受到一定的限制^[8]。为了解决这个问题, 国内外学者作了一些探索。例如, Cala 等^[9]在 2004 年提出了一种修正的强度折减法来进行多滑面计算, 即首先按照常规强度折减法求出最小安全系数与最危险滑面, 并记下第 1 次失稳的计算步 N_r , 然后逐步提高折减系数, 在每次新的折减系数下计算 $1.1N_r$ 步, 以此可求得一系列新的安全系数与次级潜在滑面。Lin Hang 等^[10]认为, 边坡剪切出口以下的岩体并未发生破坏, 可将其视为弹性介质, 通过调整弹性介质的范围来不断改变折减区域, 由此即可得出各级滑动面位置和安全系数。刘明维等^[11]通过人为约束边坡各个潜在可能的剪切出口, 对一系列不同边界条件的边坡进行折减计算, 亦可得到各种可能的潜在滑面和安全系数。

本文拟首先定义单元的安全系数, 计算出初始应力状态下各个单元的安全系数, 自动搜索单元安全系数处于不同范围内的单元集合, 然后试图通过对不同的单元集合进行强度折减计算来得到不同的滑动面及与之对应的安全系数。最后, 尝试把这种多滑面分析方法应用到某隧道进口仰坡的稳定性分析中。

2 强度折减法的折减过程分析

2.1 单元安全系数的定义

为了说明强度折减法的折减过程, 先定义单元安全系数。任意单元的应力状态可在 $\sigma - \tau$ 坐标系中用应力圆来表示, 应力圆上任意点坐标用 $P(\sigma_n, \tau_n)$ 表示, 过 P 点作竖直线交 σ 轴于 O 点, 交折减前的强度线 $\tau = c + \tan \varphi \cdot \sigma$ 与 P' 点, 因此 P 点的安全系数 F 可由式 (1) 定义, 如图 1 所示。

$$F = \frac{|OP'|}{|OP|} = \frac{c + \tan \varphi \cdot \sigma_n}{\tau_n} = \frac{c + \tan \varphi \cdot (\sigma_0 - \sqrt{r^2 - \tau_n^2})}{\tau_n} \quad (1)$$

式中: σ_0 、 r 分别为应力圆的圆心横坐标和半径。

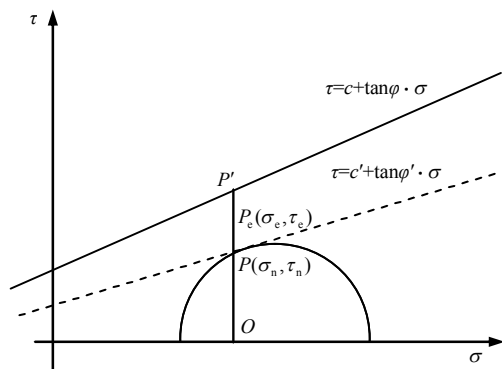


图 1 单元安全系数定义示意图
Fig.1 Definition of safety factor of each element

显然, F 不是一个定值, 它是 τ_n 的函数。笔者定义 F 的最小值作为单元安全系数 F_e , 应力圆上与之对应的点为 $P_e(\sigma_e, \tau_e)$ 。通过对 F 函数求极值, 可得到 F 的最小值如式 (2) 所示, P_e 点坐标如式 (3) 所示:

$$F_e = \frac{\sqrt{(c + \tan \varphi \cdot \sigma_0)^2 - (\tan \varphi \cdot r)^2}}{r} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \sigma_0 - \frac{r^2 \tan \varphi}{c + \tan \varphi \cdot \sigma_0} \\ \tau_e &= \frac{r \sqrt{(c + \tan \varphi \cdot \sigma_0)^2 - (\tan \varphi \cdot r)^2}}{c + \tan \varphi \cdot \sigma_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

过 P_e 点作切线 (如图 1 中虚线所示), 令其切线方程为

$$\tau = c' + \tan \varphi' \cdot \sigma \quad (4)$$

假设该切线方程是由初始强度线折减得到, 黏聚力与内摩擦角的折减系数分别为 K_c 和 K_φ , 可表示如下:

$$K_c = \frac{c}{c'}, K_\varphi = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi'} \quad (5)$$

联立式 (3) ~ (5) 可导出:

$$K_c = K_\varphi = \frac{\sqrt{(c + \tan \varphi \cdot \sigma_0)^2 - (\tan \varphi \cdot r)^2}}{r} \quad (6)$$

由式 (2) 和式 (6) 可得 $F_e = K_c = K_\varphi$, 这表明强度折减法使单元达到临界状态的折减系数恰好等于单元安全系数, 因此, 可以通过强度折减法来计算安全系数, 即不断调整折减系数, 当单元恰好处于临界状态时, 此时的折减系数即为单元的安全系数。

2.2 减过程分析

采用强度折减法计算边坡安全系数, 通常需要将边坡划分为若干单元。当单元划分得足够密时, 则单元的应力状态即可表征边坡某点的应力状态。在强度折减计算之前, 需要初始化计算以得到坡体真实的应力场分布。边坡各个单元真实应力状态按单元安全系数从小到大依次排序后表征在 $\sigma - \tau$ 坐标轴中, 如图 2 所示。在强度折减过程中, 逐渐增大折减系数, 每增大一次折减系数, 就进行一次弹塑性计算, 若边坡未整体失稳, 则继续增大折减系数, 再重复进行弹塑性计算, 若边坡恰好整体失稳, 则此时的折减系数即为边坡的安全系数。从这个过程来看, 强度折减可分为两个过程, 即单元强度参数折减和参数折减后弹塑性迭代计算。显然, 每次折减计算全过程都存在两种应力状态, 即弹塑性迭代计算前真实应力状态和弹塑性迭代计算后的最终

应力状态。假设某步折减计算的折减系数取值为 k ，则由 2.1 节分析可知，针对真实的应力状态而言，如果坡体单元足够密的话，折减后的强度线必然与边坡某个单元的应力圆相切（图 2 的红色应力圆），而单元安全系数小于 k 值的应力圆必然与折减后的强度线相割（图 2 的蓝色应力圆），再通过弹塑性计算，坡体不断进行应力调整得到新的应力状态，如图 3 所示（绿色应力圆表示弹塑性计算后的屈服单元）。随着折减系数增大，新的强度线所切应力圆的单元安全系数也增大，被其所割的应力圆数目亦增大，则弹塑性计算后屈服单元数目亦增大。当折减系数增大至某个值时，若边坡整体失稳，则在真实应力状态下被新强度线所切应力圆的单元安全系数即为边坡整体安全系数。因此，当某个折减系数能使边坡达到临界状态，笔者定义真实应力状态下被该新强度线所切和所割的单元为诱导单元集合，定义在弹塑性计算后屈服的若干应力圆为屈服单元集合，定义单元安全系数与边坡整体安全系数相等的单元为关键单元。

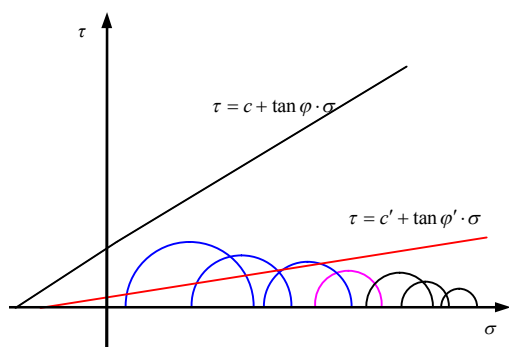


图2 折减计算前单元应力状态示意图
Fig.2 Stress status of each element before reduction of shear strength parameters

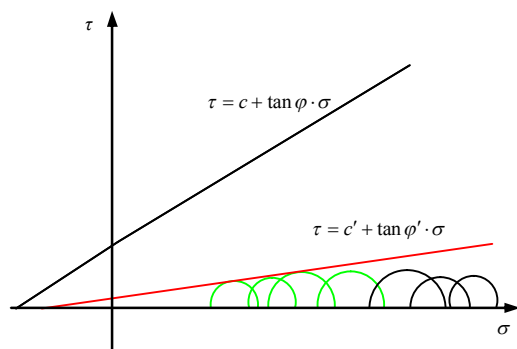


图3 折减计算后边应力状态示意图
Fig.3 Stress status of each element after reduction of shear strength parameters

以某边坡为例，用强度折减法得出的该边坡整

体安全系数为 1.021，弹塑性计算前单元安全系数小于 1.021 的单元集合如图 4 浅红色区域所示，弹塑性计算后屈服单元集合如图 5 中深红色区域所示。边坡最危险滑动面如图 6 中彩色区域所示。

由前面的分析可知，最危险滑动面（见图 6）必然对应于诱导单元集合（见图 4）与屈服单元集合（见图 5），当黏聚力与内摩擦角除以折减系数时，诱发单元集合中的所有单元首先屈服，然后通过应力调整导致其他位置的单元屈服以形成滑动面，也就是说，通过折减使局部某些单元安全系数较小的单元先屈服，进而引发其他单元屈服，且此时边坡整体安全系数必然与诱发单元集合中（见图 4）单元安全系数最大值相等或接近。因此，强度折减法求解边坡安全系数与最危险滑动面过程就是寻找诱导单元集合与关键单元的过程。

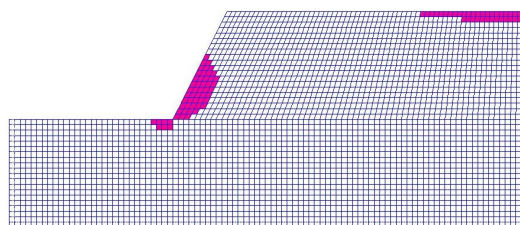


图4 诱导单元集合示意图
Fig.4 Induction element sets

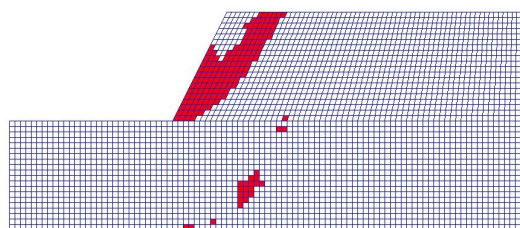


图5 屈服单元集合示意图
Fig.5 Yield element sets

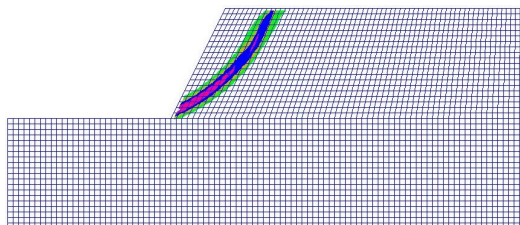


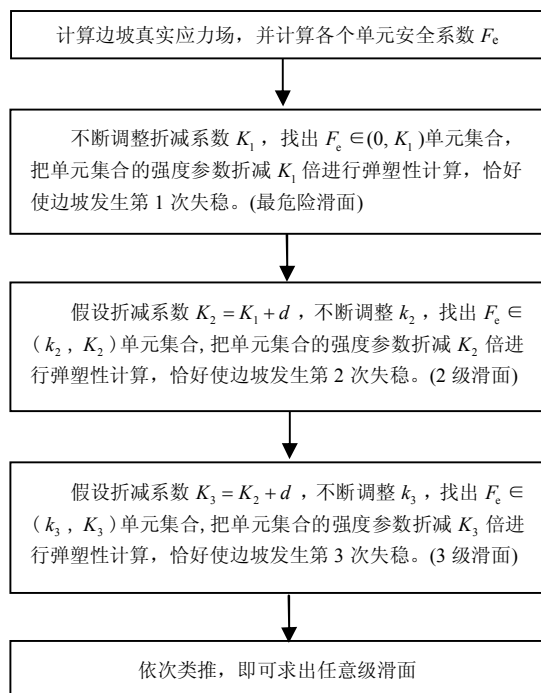
图6 边坡最危险滑动面
Fig.6 Most dangerous slip surface

3 基于局部强度折减法的多滑面分析方法基本原理与算例验证

3.1 基本原理

边坡除了最危险滑动面外，还存在其他各级次级滑面。由第 2 节分析可知，最危险滑动面对应于

一个真实应力状态下的诱导单元集合和临界状态时的屈服单元集合,由此推而广之,其他各级滑面必然亦存在与之对应的诱导单元集合和屈服单元集合,寻找多滑面的过程也就是搜索各种不同单元集合的过程。通过不断搜索不同的诱导单元集合,首先对强度参数进行折减使这些局部单元先屈服,继而进行弹塑性计算引发相应的单元屈服以形成各级滑面。各级滑面的安全系数等于与之对应的诱导单元集合中单元安全系数最大值。多级滑面的分析流程如图7所示。



注: 流程图中 d 可以取任意值, 因此, 可以搜索任意安全系数的滑动面。

图7 多级滑面分析流程图
Fig.7 Procedure for analysis of multi-slip surfaces

3.2 算例验证

3.2.1 单台阶边坡算例

单台阶边坡几何模型尺寸见图8, 岩体参数取值见表1。

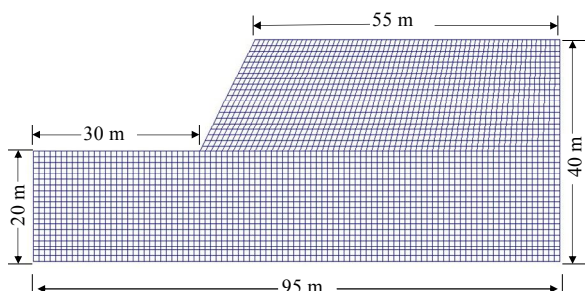


图8 单台阶边坡几何模型尺寸
Fig.8 Model size of a slope with single step

表1 单台阶边坡岩体参数表
Table 1 Mechanical parameters of rock mass for the slope with single step

重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
25	10.2	0.35	42	27

根据上述方法可以得出任意安全系数的滑动面,笔者选取最危险滑面和其中两个次级滑动面(用最大剪应变增量表示)说明该方法的可行性,如图9~11所示。

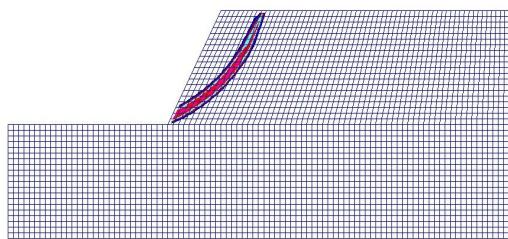


图9 安全系数为 1.02 对应的滑面(最危险滑动面)
Fig.9 Slip surface corresponding to safety factor equal to 1.02 (i.e., the most dangerous slip surface)

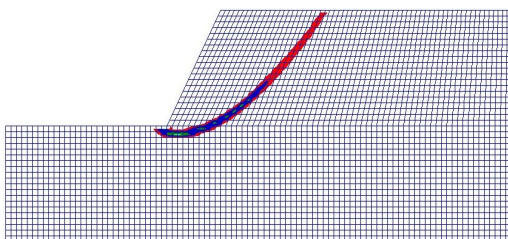


图10 安全系数为 1.52 对应的滑面
Fig.10 Slip surface corresponding to safety factor equal to 1.52

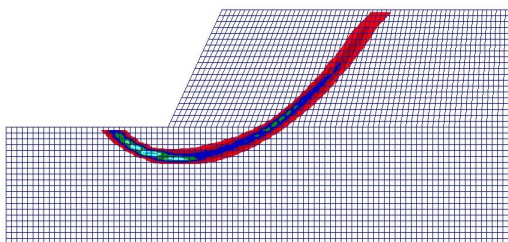


图11 安全系数为 2.02 对应的滑面
Fig.11 Slip surface corresponding to safety factor equal to 2.02

由极限平衡法计算该边坡的最危险滑面对应的安全系数为 1.012,与本文所提出方法得到的最小安全系数接近。同时,由图9~11可以看出,不同的安全系数对应于不同位置的滑面,且随着安全系数的增大,滑面的深度亦增大。因此,在工程实践中,若需要治理安全系数规定值对应的滑面,用这种方法就可以找出滑面位置和治理范围。

3.2.2 双台阶边坡算例

岩体参数取值见表2,双台阶边坡几何模型尺寸见图12。

表2 双台阶边坡岩体参数表
Table 2 Mechanical parameters of rock mass for the slope with double steps

重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏结力/kPa	摩擦角/(°)
20	10.2	0.35	11	23

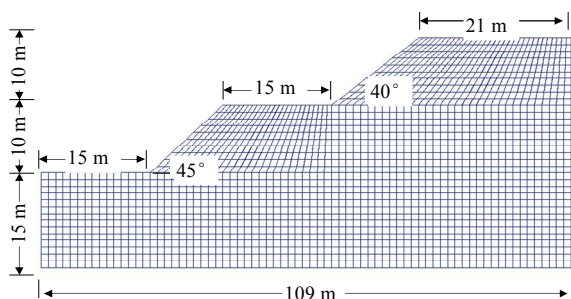


图12 双台阶边坡几何模型尺寸

Fig.12 Model size of a slope with double steps

根据上述方法, 可以搜索任意安全系数的滑动面。笔者选取最危险滑面、上台阶某个滑面、整体破坏某个滑面(用最大剪应变增量表示)说明该方法的可行性, 如图13~15所示。

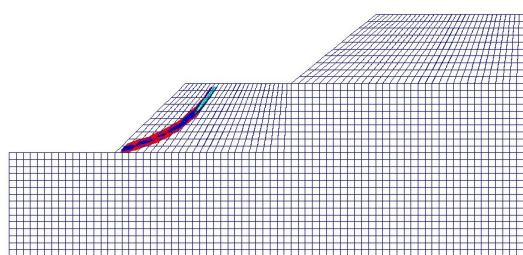


图13 安全系数为1.064对应的滑面(最危险滑动面)
Fig.13 Slip surface corresponding to safety factor equal to 1.064 (i.e., the most dangerous slip surface)

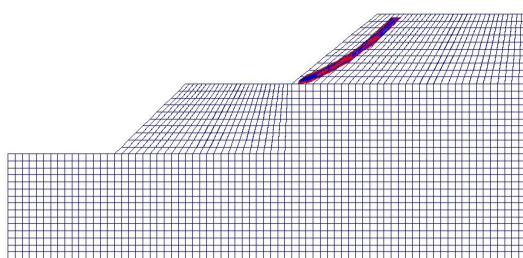


图14 安全系数为1.315对应的滑面
Fig.14 Slip surface corresponding to safety factor equal to 1.315

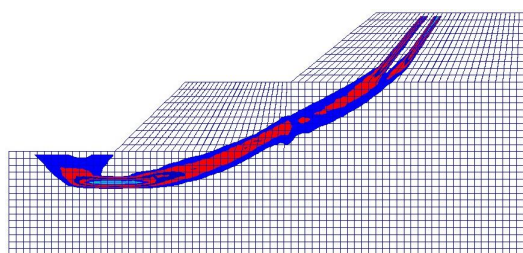


图15 安全系数为1.985对应的滑面
Fig.15 Slip surface corresponding to safety factor equal to 1.985

由极限平衡法计算该边坡的最危险滑面对应的安全系数为1.053, 且最危险滑面也位于下台阶处, 与本文所提出方法得出的结果接近。同时, 由图13~15可知, 该方法不仅可以搜索出下台的阶潜在滑动面, 还可以搜索出上台阶的潜在滑面以及边坡整体滑移时的潜在滑面。在工程实践中, 工程师们不仅关注各级台阶的安全系数和潜在滑面, 亦关注边坡整体失稳的潜在滑面和安全系数, 因此, 本文所提出的方法可以搜索出相应的潜在滑面及与之对应的安全系数, 为边坡治理提供指导意见。

4 工程应用

某隧道进口仰坡呈3级台阶状, 平均坡度为20°左右, 隧道入口位于最低级台阶处, 进口段最浅埋深约为11 m, 初始设计方案拟在洞口设置5 m明洞, 20 m超前管棚。根据钻孔资料, 仰坡地层岩性分为4层, 自上而下为碎石土(厚度为6~13 m)、强风化片岩(厚度为3.5~9.6 m)、中风化片岩(厚度为5.8~17 m)和微风化辉绿岩(未揭穿)。由于连续降雨, 地表位移较大, 第1、2级台阶处出现多条张拉裂缝, 第3级台阶处的裂缝不明显, 因此, 初步判定该仰坡已处于临界状态。为了揭示仰坡潜在的滑面位置以及研究治理方案, 在各级台阶的平台处设置了深部位移测斜孔。测斜孔、隧道、地面线和地层分界线相互关系位置图如图16所示。图中水平虚线代表拟开挖隧道, 折线代表地层分界线, 1#、2#、3#代表1~3号为测斜孔, 且分别位于第1、2、3级台阶上。

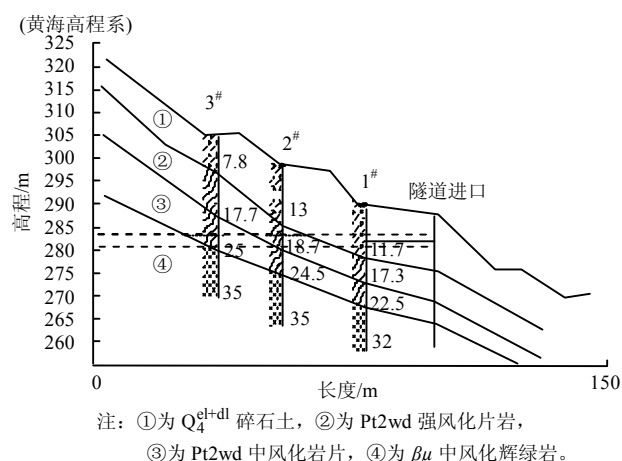


图16 钻孔、隧道、地面线和地层分界线示意图
Fig.16 Relative position of drills, tunnel, ground surface and division lines of strata

沿测斜孔由孔底至孔口每隔0.5 m设一个测点, 3个测斜孔各个测点将近1个月的累积位移值如图17~19所示。

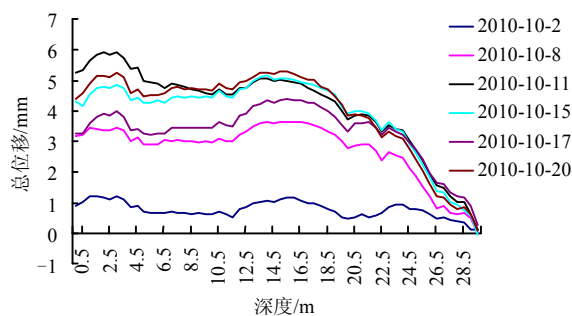


图 17 1#孔各个测点累积位移值

Fig.17 Cumulative displacements of each monitoring point in drill #1

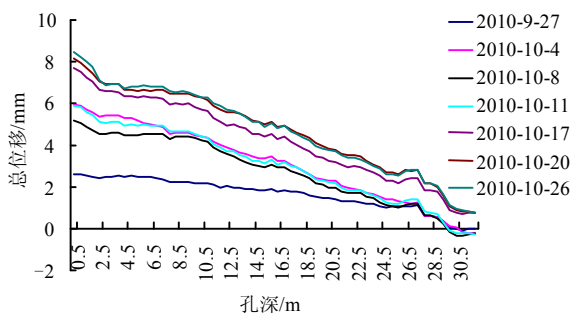


图 18 2#孔各个测点累积位移值

Fig.18 Cumulative displacements of each monitoring point in the drill #2

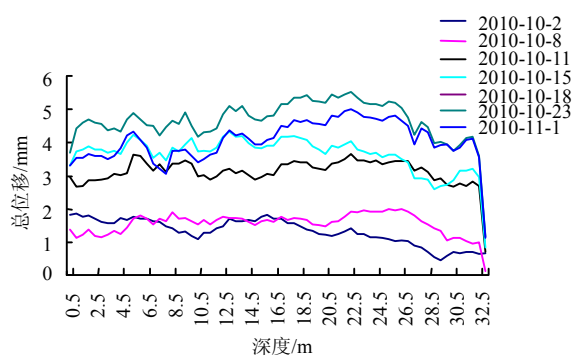


图 19 3#孔各个测点累积位移值

Fig.19 Cumulative displacements of each monitoring point in the drill #3

由图 17~19 可知, 2#孔位移值最大, 距孔口 8 m 左右, 位移增大较明显; 3#孔位移值最小, 且无明显规律; 1#孔位移值在距孔口 6 m 左右存在突变, 这表明第 1、2 级台阶距坡面约 6~8 m 深度范围内土体有向下滑移的趋势, 而第 3 级台阶土体尚未监测到滑移趋势。

为了进一步确定仰坡潜在滑动范围, 采用本文所提出方法和极限平衡法进行稳定性分析。根据室内试验和参数反演分析, 该边坡稳定性分析的岩体参数取值见表 3。

表 3 进口仰坡岩体参数取值表

Table 3 Mechanical parameters of rock mass for a slope located at entrance of a tunnel

岩体	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
碎石土	20.5	47	0.40	78.3	16.8	9.8	18
强风化片岩	24.5	720	0.36	857.0	265.0	58.0	25
中风化片岩	26.5	1 170	0.32	1 080.0	443.0	180.0	28
中风化辉绿岩	28.0	1 460	0.28	1 110.0	570.0	200.0	35

进口仰坡稳定性分析模型左边界高为 70 m, 右边界高为 22 m, 长为 150 m, 平均坡度约为 18°, 共 4 个材料分区, 划分为 10 500 个单元, 几何尺寸及岩体分区如图 20 所示。

根据深部位移监测结果和现场观察到的裂缝分布情况, 仰坡稳定性分析重点针对整体最小安全系数及最危险滑面位置、第 1、2 级台阶最小安全系数及滑面位置和满足规范要求的安全系数所对应的滑面位置。

本文提出的方法和极限平衡法计算的边坡整体最小安全系数分别为 1.012 和 0.985, 两种方法所得最危险滑面位置分别如图 21、22 所示。

两种方法计算的边坡整体最小安全系数与 1.0 极为接近, 这表明边坡确已处于临界状态, 需要及时采取治理措施。由图 21、22 可以看出, 整体最危险滑面处于第 2 级台阶上, 而在现场观察和深部位移监测中, 第 2 级台阶的张拉裂缝最多, 宽度最宽,

同时 2#孔的顶部位移比其他两个监测孔要大, 因此, 计算结果与监测结果一致, 说明第 2 级台阶是最不安全位置。

本文提出的方法和极限平衡法计算的第 1 级台阶最小安全系数分别为 1.089 和 1.080, 两种方法所得第 1 级台阶最危险滑面位置分别如图 23、24 所示。

第 1 级台阶的最小安全系数比整体最小安全系数稍大, 但仍接近于 1.0, 可认为第 1 级台阶亦处于临界状态, 这与现场观察和深部位移监测结果一致。

根据公路相关设计规范规定^[12], 高速公路边坡在正常工况下的安全系数大于 1.20~1.30 时, 可认为其满足稳定性要求。根据这一规定, 笔者通过两种计算方法找出安全系数小于等于 1.25 的滑面所包围的坡体作为治理区域。本文所提方法和极限平衡法得出安全系数小于等于 1.25 的滑面分别如图 25、26 所示。

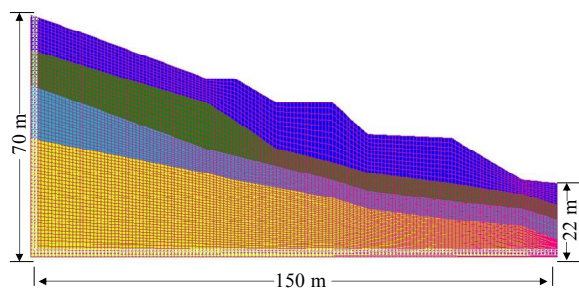


图20 进口仰坡网格模型和材料分区图

Fig.20 Meshes and division of mechanical parameters for a slope located at entrance of a tunnel

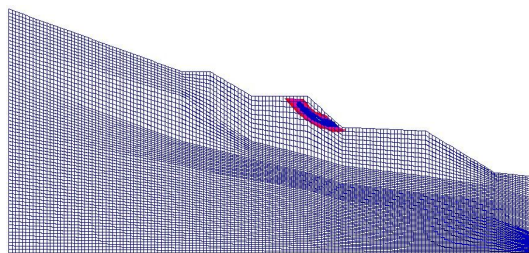


图21 仰坡整体最危险滑面(本文所提方法, 安全系数为 1.012)

Fig.21 Most dangerous slip surface of whole slope (safety factor=1.012, obtained by the proposed method)

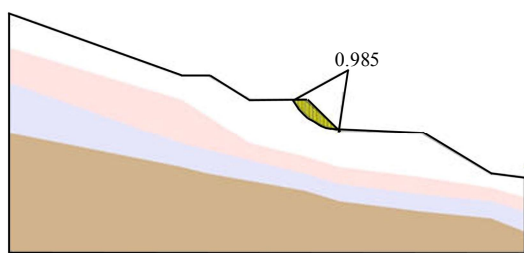


图22 仰坡整体最危险滑面(Bishop 法, 安全系数为 0.985)

Fig.22 Most dangerous slip surface of whole slope (safety factor=0.985, obtained by the Bishop method)

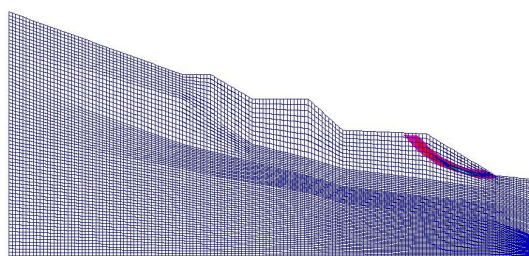


图23 第1级台阶最危险滑面(本文所提方法, 安全系数为 1.089)

Fig.23 Most dangerous slip surface of the first step (safety factor=1.089, obtained by the proposed method)

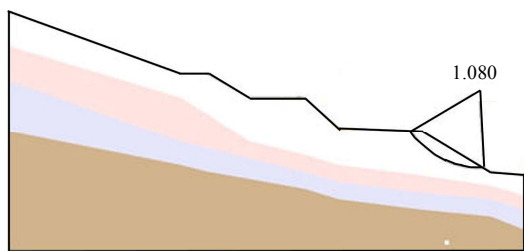


图24 第1级台阶最危险滑面 (Bishop 法, 安全系数为 1.080)

Fig.24 Most dangerous slip surface of the first step (safety factor=1.080, obtained by the Bishop method)

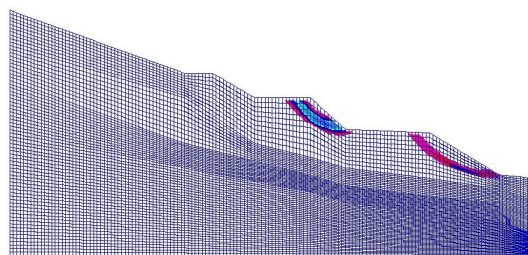


图25 安全系数小于等于 1.25 所对应滑面 (本文方法)

Fig.25 Slip surface corresponding to safety factors less than or equal to 1.25 (the proposed method)

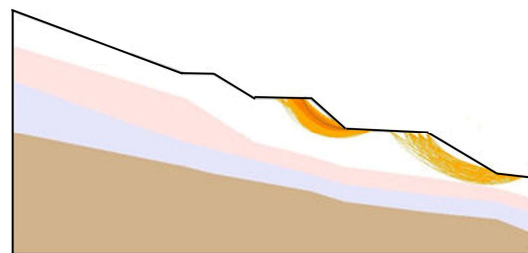


图26 安全系数小于等于 1.25 所对应滑面 (Bishop 法)

Fig.26 Slip surface corresponding to safety factors less than or equal to 1.25 (the Bishop method)

由图 25、26 可知, 安全系数小于等于 1.25 的滑面处于第 1、2 级台阶的最上层岩体里, 而第 3 级台阶尚未出现安全系数小于 1.25 的滑面, 表明潜在的不稳定体主要是最下面两个台阶的碎石土层, 这与现场观察及深部位移监测结果较为一致。

根据监测结果和计算分析, 笔者有以下认识:

①仰坡最下面两个台阶已处于临界状态, 不稳定体由浅表层的碎石土组成, 临界滑面的深度约距坡面 6~8 m 左右; ②碎石土层抗剪强度低、最下面两个台阶局部坡度较大, 是导致此处不稳定的两个重要因素。根据以上分析, 最终该处仰坡的治理方案如下: ①挖除第 1、2 级台阶 6~8 m 深度不稳定土层; ②进口明洞长度由设计的 5 m 增大至 10 m; ③超前管棚长度由设计的 20 m 增大至 28 m, 保证管棚末端进入强风化片岩地层。

5 讨 论

在进行强度折减计算时, 单元安全系数越小, 则该单元越容易屈服, 因此, 根据初始应力分布, 计算各个单元的安全系数, 自动搜索单元安全系数小于某个临界值的单元集合, 然后该单元集合中的所有单元的强度参数除以这个临界值, 再进行弹塑性计算, 若计算结果恰好使边坡达到临界状态, 则这时的临界值为边坡该级滑动面的安全系数。显然, 某级滑动面的安全系数是使边坡达到临界状态的临界折减系数, 而不是一系列单元安全系数的某种平均。另外, 这种折减方法只针对边坡局部范围进行折减, 因此, 得到的最小安全系数可能稍高于对边坡进行整体折减得到的安全系数。

对于某个安全系数而言,与之对应的次级滑动面可能不是惟一的,例如,极限平衡法和基于应力场求解安全系数的方法皆可得到同一个安全系数下的多个次级滑动面。这两种方法均是在当前的应力条件下,并根据假设的任意滑动面分布来计算各个潜在滑动面安全系数。但是,边坡滑动是一个应力不断调整、渐进破坏的过程,在这个过程中,坡体总是沿着最易屈服的方向滑动,因此,针对某个安全系数而言,与之对应的优势次级滑动面亦可能只存在一个。在用强度折减法进行分析时,安全系数低的单元先屈服,然后应力进行重分布,并把荷载转移到周围单元,以此类推,直到边坡整体达到临界状态。因此,强度折减法可在一定程度上刻画这个渐进破坏过程,得到的滑动面可能是某个安全系数对应的优势次级滑动面(本文工程实例验证了该方法得到的次级滑动面与现场监测数据吻合较好)。但是,尚不能严格地证明这种方法得到次级滑动面就一定是优势滑动面,不能排除同一安全系数条件下其他潜在滑动面的存在,故由本文方法所求得的次级滑动面只能作为工程治理的参考。

6 结 论

(1) 强度折减法的折减过程可分为坡体单元强度参数的折减和折减后整体弹塑性迭代计算,因此,折减全过程对应于两种应力状态,弹塑性计算前边坡真实应力状态和弹塑性计算后的最终应力状态。各级滑面皆存在与之对应的两个单元集合,即真实应力状态下的诱导单元集合和最终应力状态的屈服单元集合。

(2) 用强度折减法搜索多级滑面的过程实际上就是搜索各种不同单元集合的过程。找到相应的单元集合,然后对局部单元进行强度折减就可以得出相应的潜在滑面。

(3) 各级滑面的安全系数等于与之对应诱导单元集合中单元安全系数最大值。诱发单元集合可以任意组合,因此,该方法可以求解任意安全系数对应的潜在滑面。

(4) 采用本文提出的方法计算了单台阶和双台阶边坡。针对单台阶算例而言,随着安全系数的增大,潜在滑面的深度和潜在滑动区域亦增大;针对双台阶而言,不仅可以计算最小安全系数及与之对应的滑面,还可以计算各个台阶和边坡整体较大区域滑动时的安全系数及与之对应的潜在滑面。通过这两个算例验证了该方法的可行性。

(5) 本文所提出的方法最后被应用到某个隧道进口仰坡的稳定性分析中,揭示了仰坡潜在滑动区域,其计算结果与现场观察及深部位移监测结果较

为吻合,为该仰坡的治理提供了指导意见。

参 考 文 献

- [1] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(4): 671—689.
- [2] KIM J Y, LEE S R. An improved search strategy for the critical slip surface using finite element stress fields[J]. **Computers and Geotechnics**, 1997, 21(4): 295—313.
- [3] KRAHN J. Limit equilibrium, strength summation and strength reduction methods for assessing slope stability [C]//Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands. [S.l.]: [s.n], 2007: 311—318.
- [4] CHENG Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(3): 255—267.
- [5] 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.
- [6] BAKER R, LESHCHINSKY D. Spatial distribution of safety factors[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(2): 136—145.
- [7] RENAUD J-P, ANDERSON M G, WILKINSON P L. The importance of visualization of results from slope stability analysis[J]. **Geotechnical Engineering**, 2003, 156(1): 27—33.
- [8] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. **Computers and Geotechnics**, 2007, 34(3): 137—150.
- [9] CALA M, FLISIAK J, TAJDUS A. Slope stability analysis with modified shear strength reduction technique[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides: Evaluation and Stabilization. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2004.
- [10] LIN H, CAO P, GONG F. Directly searching method for slip plane and its influential factors based on critical state of slope[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2009, 16(1): 131—135.
- [11] 刘明维, 郑颖人. 基于有限元强度折减法确定滑坡多滑动面方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1544—1549.
- LIU Ming-wei, ZHENG Ying-ren. Determination method of multi-slip surfaces landslide based on strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1544—1549.
- [12] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.