

某反倾页岩边坡破坏面确定及其稳定性分析

尹锡杰, 晏鄂川, 孙兆来

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

摘要: 破坏面确定是边坡稳定性分析的基础, 存在各级滑动面。不同结构类型边坡, 其确定方法也随之不同。对于反倾软岩边坡, 不能通过不连续面空间展布分析确定其破坏面。联合 FLAC^{3D} 和极限平衡方法分析具有节理块体切割破坏模式的某反倾页岩边坡稳定性。在野外调查基础上分析边坡的变形破坏机制, 应用 FLAC^{3D} 研究其应力、应变等值线及相应增量等值线图确定边坡潜在最危险滑动面和次级滑动面, 计算其稳定性系数。在防护设计中考虑次级滑动面, 针对边坡危险区域分析其防护效果。应用强度折减计算两危险区域稳定性系数, 表明防护后边坡整体稳定性较好。该方法对反倾软岩边坡的稳定性分析有一定的借鉴价值, 在防护设计中考虑次级滑动面的影响具有一定的实际指导意义。

关键词: 滑动面; FLAC^{3D}; 极限平衡法; 稳定性系数; 抗剪强度折减

中图分类号: TU454

文献标识码: A

Slip surface ascertaining and stability analyzing of the countertendency shale slope

YIN Xi-jie, YAN E-chuan, SUN Zhao-lai

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The slip surface, which has different grades, is the base of the slope stability analysis and the methods for ascertaining it are different with the different slope structures. For countertendency soft rock slope, it can not be ascertained from the distribution of discontinuities as usual. Combined with FLAC^{3D} and limit equilibrium method, the stability of countertendency shale slope with block cutting by discontinuities failure model is analyzed. Based on the field investigation, the deformation and failure mechanism is studied, the different grades slip surfaces are obtained from the analysis of the strain, stress and their increment pictures from FLAC^{3D} analysis and the factor of safety is computed respectively. The prevention schemes are decided with the considering of the sub slip surface and the prevention effect is analyzed by aiming at the dangerous area. The safety factors of two dangerous areas, which are computed by shear strength reduction, indicate that the stability of the slope after prevention is good. The method used in this paper can be used as a reference to analyzing the stability of countertendency soft rock slope. The consideration of sub slip surface in prevention design has some practical guiding values.

Key words: slip surface; FLAC^{3D}; limit equilibrium method; factor of safety; shear strength reduction

1 引言

在边坡稳定性分析中, 关键的两个要素是潜在滑动面和稳定性系数。边坡潜在滑动面的形式和确定方法, 随边坡结构型式不同而不同。一般来说, 边坡破坏模式可归纳为: 崩塌破坏、平移滑动破坏、楔形破坏、倾倒破坏和圆弧破坏等模式。对于层面倾向坡内的陡倾边坡, 一般为倾倒破坏, 其特征是优势结构面走向大体与边坡一致, 倾角甚陡, 倾向

与边坡相反。不稳定岩体以分离体形式失稳时发生顺坡面倾倒, 或向临空面转动或转动滑移^[1, 2]。但如本文所述反倾页岩边坡, 层面倾向坡内, 岩性较软, 存在陡倾节理, 对岩体存在较严重的切割现象。故不能形成明显的倾倒变形, 分析该边坡的破坏模式为块状切割滑动破坏, 亦即陡倾节理将岩体切割脱离母岩, 切割的块体无明显的不连续面控制, 在自重应力下沿着岩体本身的薄弱部位滑动破坏, 最终导致边坡失稳。因此, 对于该种破坏模式应用极限

平衡法计算稳定性系数确定潜在滑动面比较困难,通过分析结构面的空间展布不能确定潜在滑动面。另外,理论上来说,边坡存在最危险滑动面和次级滑动面^[3]。一般在边坡稳定性分析中只注重于对最危险滑动面分析和防护,而忽视了次级滑动面。但是,如果次级滑动面的稳定性系数不能满足边坡稳定性要求,则即使在治理后最危险滑动面满足边坡稳定性要求,次级滑动面将成为边坡的薄弱部位,潜在滑移体仍可沿着次级滑动面滑动,边坡仍将处于不稳定状态。所以,研究边坡次级滑动面是有必要的。

在边坡稳定性分析方法中,极限平衡法仍然是最主要的基本方法,由此得到的稳定性系数,为工程提供了直观简单边坡稳定状态的判断依据。但其发展到现在仍存在不足,其潜在滑动面是人为确定的,因此,在此基础上计算的稳定性结果具有人为任意性。

另外,FLAC^{3D}作为一种数值模拟方法在边坡稳定性分析中应用得越来越普遍。应用该方法可以分析边坡的变形破坏机制,根据分析得到的应力、应变等值线图及相应增量等值线图可以确定边坡体内应力-应变的分布,从而确定各级滑动面;利用FLAC^{3D}可以分析防护后边坡内应力-应变分布形式,并分析防护效果^[4,5]。同时其也存在不足,分析时需要大量的数据,这在一般工程中满足不了。

本文联合以上两种方法分析某反倾页岩边坡稳定性,发挥两种方法的优点,弥补各自的不足。应用FLAC^{3D}宏观上控制计算的方向和精度,确定各级滑动面;应用极限平衡计算边坡稳定性系数,为工程提供简单直观的判断依据;最后再次应用FLAC^{3D}分析该边坡在前述分析基础上防护设计效果。

2 抗剪强度折减法

抗剪强度折减法基本原理是将岩体参数 c , φ 同时以系数 F 折减,得到一组新的参数 c' , φ' 值,该值作为新的材料参数代入模型进行试算。当计算正好收敛时,对应的 F 即为该点稳定性系数。当假定边坡内所有岩体抗剪强度的发挥程度相同时,该折减系数定义为边坡的整体稳定性系数^[6]。本文应用此方法分析某两点的稳定性系数。

假设边坡内滑裂面上某一点的应力状态为已知,根据Mohr-Coulomb准则,若此时岩体没有发生剪切破坏,岩体中的实际剪应力与实际中得以发挥的抗剪强度相同,即

$$\tau = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c' + \sigma'_n \tan \varphi}{F} = c_m + \sigma'_n \tan \varphi \quad (1)$$

由此可知实际中得以发挥的抗剪强度相当于折减后抗剪强度的指标。折减后的抗剪强度指标分别为

$$\left. \begin{aligned} c_m &= \frac{c}{F} \\ \varphi_m &= \arctan(\tan \varphi / F) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

强度折减法分析边坡稳定其失稳判据通常采用某个部位的位移、迭代求解过程的不收敛、广义剪应变、等效塑性应变等作为评判指标。本文采用Mohr-Coulomb准则,形式如下:

$$|\tau_n| = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi \\ \tau_n &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: τ_n 为剪应力; σ_n 为正应力; c , φ 分别为岩体的凝聚力和内摩擦角。

3 工程实例

该边坡位于沪蓉西高速公路第十合同段线路右侧,属中低山沟谷地貌单元,斜坡坡面朝南,自然坡角 50° 左右,为陡倾岩质边坡。边坡上覆碎石土,厚度在 $2 \sim 4$ m 左右。下伏志留系粉砂质页岩,基岩上部风化强烈,呈碎片状。开挖形成边坡高 90 m 左右的 8 级边坡,边坡岩层产状为 $16^\circ \angle 40^\circ$ 。

由于由较软的粉砂质页岩组成反倾边坡(图1、图2),不连续面对其潜在滑动面形成不起控制性作用。综合分析,该边坡岩体的破坏模式为反倾块体切割破坏模式。即在层面和节理的共同作用下,边坡后部岩体被切割成块状或次块状脱离母岩,在自重和外力作用下沿着岩体本身的软弱部位发生滑动。因此,应用传统的方法,由不连续面的空间展布来分析确定其潜在滑动面比较困难。本文应用FLAC^{3D}分析未经防护边坡,应用分析结果确定各级滑动面。本文由达到某一幅值应力、应变及相应增量等值线大幅度贯通,而且能使其上的潜在滑移体在脱离该面后能滑动作为判断各级滑动面的依据。以达到上述依据的最大应力-应变等值线为最危险潜在滑动面,达到以上依据的第2大应力、应变等值线为次级滑动面。具体为:潜在最危险滑动面,剪应变增量达到 $0.75 \sim 1.5$ 个单位贯通面、 x 位移和剪应变率达到 $-18 \sim -19.9$ 个单位贯通面;次级滑动面, x 位移和剪应变率达到 $-6 \sim -8$ 个单位贯通面。

分析所取参数如表 1。



图 1 边坡全貌

Fig.1 The whole slope picture



图 2 边坡节理分布图

Fig.2 The discontinuities distribution of the middle part slope

表 1 FLAC^{3D} 分析输入参数值
Table 1 The parameters for FLAC^{3D} analysis

岩性	体积模量 / 10^9Pa	剪切模量 / 10^9Pa	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	摩擦角 / ($^\circ$)	凝聚力 / kPa
基岩	8.8	4.3	23	20	38.4
风化层	7	3	21.5	15	25

分析 FLAC^{3D} 模拟结果(图 3~5), 由 x 方向位移云图(图 4)可知, 两条明显的 x 位移幅值变化界限, 由此可以确定其潜在滑动面和次级滑动面, 根据剪应变增量(图 3)和剪应变率云图(图 5)可以看到明显的相应参数的变化带, 据此可以确定一条潜在滑动面。虽然由图 3~5 所确定的最危险滑动面和次级滑动面不完全一样。但是综合考虑, 就可以确定出该边坡的滑动面和次级滑动面(图 6)。图 6 为在此基础上确定的该边坡稳定性计算剖面图。应用极限平衡理论计算其稳定性系数分别为: 滑动面为 0.98, 次级滑动面为 1.08。可见该边坡不稳定, 在开挖的过程中必须进行防护。

工程中该边坡采取的防护措施为: 第 1 级边坡采用路堑抗滑挡墙防护; 第 2~5 级边坡采用锚喷与锚杆框架交替防护; 第 6~8 级边坡仍采用挂网锚喷防护。在设计防护时, 不仅考虑了边坡潜在滑动面, 还将次级滑动面纳入防护设计考虑的范围。在设计

时将锚杆穿过潜在滑动体中下部, 为上部潜在在滑动体提供阻力, 防止其下滑。使得防护后潜在在滑移体既不能沿着潜在滑动面滑动, 也不能沿着次级滑动面滑动, 这就保证了边坡的稳定性, 同时降低了防护措施保守程度, 使其更加经济, 减少了浪费。

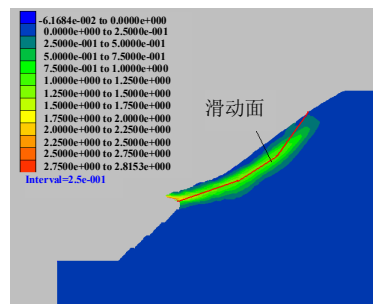


图 3 剪应变增量云图

Fig.3 Contour of shears train increment without prevention

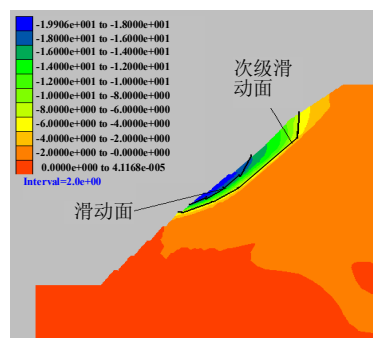


图 4 x 位移云图(单位: m)

Fig.4 Contour of x displacement without prevention(unit: m)

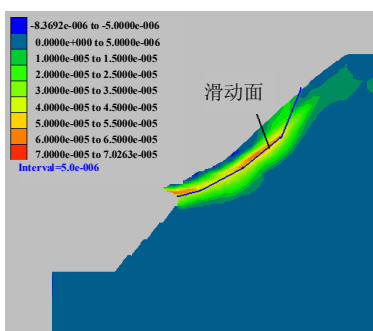


图 5 剪应变率云图

Fig.5 The contour of shear strain rate

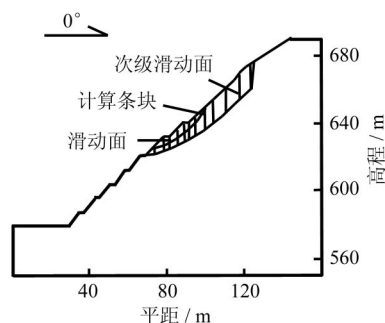


图 6 计算剖面图

Fig.6 The section plane for safety factor computed

分析边坡防护模拟效果,可见其整体防护效果比较好(图7、图8)。为了对边坡防护效果有量的认识,在模拟过程中对A、B两点最大、最小主应力进行跟踪(图7、图8),由图可以看出A、B两点为位移、剪应变相对最大点,亦即最危险点,对以上两点进行分析,应用强度折减理论计算该两点的稳定性系数,将其代表边坡的整体稳定性系数,因此,得出的结果是偏安全的。具体计算为将跟踪所得 σ_1 , σ_3 代入式(4),得到法向和剪切应力 σ_n , τ_n ,将 c , φ 代入式(2)得到 c_m , φ_m ,将 σ_n , c_m , φ_m 代入式(3)得 $|\tau_n|$ 。与 τ_n 比较,当 $|\tau_n| > \tau_n$,该点未破坏,继续增大 F ,反之破坏;当 $|\tau_n| = \tau_n$ 或接近相等时,所取 F 为该点稳定性系数,分别为 $F_A=1.32$, $F_B=1.38$ (表2),因此可以认为边坡防护后的稳定性系数为两者均值,即1.35,大于1.3。由此可见,边坡在防护后处于稳定状态,达到了防护效果。

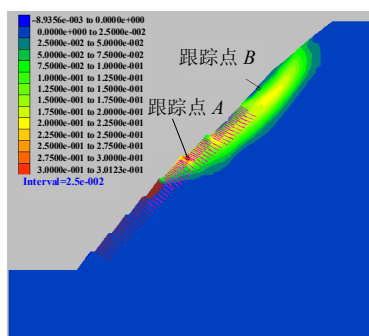


图7 剪应变增量云图

Fig.7 Contour of shear strain increment

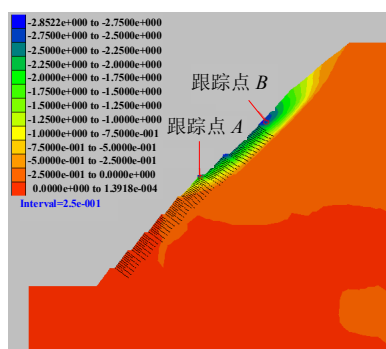


图8 x位移云图(单位: m)

Fig.8 Contour of x displacement(unit: m)

表2 A、B跟踪点破坏判断

Table 2 The destroy judging for points A and B

点号	σ_1 / kPa	σ_3 / kPa	φ / (°)	c / kPa	σ_n / kPa	τ_n / kPa	c_m / kPa	φ_m / (°)	$ \tau_n $ / kPa	F
A	60	8	15	25	40.7	26.9	18.9	11.3	27.1	1.32
B	180	90	15	25	146.6	45.9	18.1	10.8	46.2	1.38

4 结 论

潜在滑动面是边坡稳定性分析的基础,在防护设计时考虑次级滑动面对防护后边坡稳定性和防护的经济合理性有一定的意义。考虑到本文反倾页岩边坡不能通过分析其不连续面展布来确定滑动面以及极限平衡理论和FLAC^{3D}分析边坡稳定性的不足,本文尝试联合该两种方法分析边坡稳定性,达到了预期效果,得到如下结论:

(1) 该页岩边坡破坏模式为块体切割滑动模式,在近地表处的破裂趋向于通过岩体本身发生。

(2) 将由FLAC^{3D}分析结果确定的两级滑动面以及在此基础上得到的稳定性系数用于防护设计,第1级边坡采用路堑抗滑挡墙防护,第2~5级边坡采用锚喷与锚杆框架交替防护,第6~8级边坡仍采用挂网锚喷防护。将锚杆穿过次级滑动面中下部,为上部潜在滑体提供阻力。

(3) 由FLAC^{3D}分析边坡防护效果,跟踪两危险点A、B,应用强度折减理论计算该两点的稳定性系数分别为1.3, 1.42,两数均知代表边坡的整体稳定性系数,结果偏安全。因此,确定防护后边坡的稳定性系数为1.36。边坡在文中所述防护措施下处于稳定状态,防护效果好,和实际工程相符。

参 考 文 献

- [1] 孙玉科,牟会宠,姚宝魁. 边坡岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] 罗国煜,王培清,陈华生,等. 岩坡优势面分析理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [3] 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.
- [4] 刘波,韩彦辉. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continuum 3 Dimensions (Version 2.0), User's Manual[R]. [s. l.]: Itasca Consulting Group, Inc. 1997.
- [6] 赵尚毅,郑颖人. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.