

考虑拉破坏的离散元双强度折减法的岩质边坡稳定性分析

孙丹芳 胡修文^{*} 李雨 朱杭琦

(中国地质大学工程学院,武汉 430074)

摘要 岩质边坡在发生破坏时往往同时存在张拉破坏和剪切破坏。在考虑拉破坏的同时,结合双强度非等比例相关联折减法和强度折减的最短路径理论,改进了传统的双强度折减法,避免了以往双强度折减时选择比例系数的盲目性,所得的边坡稳定性系数更符合最小值理论。综合以上方法提出考虑拉破坏的离散元双强度折减法,并利用离散元软件 udec 对一顺层岩质边坡进行模拟。结果表明,该方法能够较好地反映边坡破坏过程中粘聚力与内摩擦角的发挥程度,所得稳定性系数与 MP 法所得结果更为接近,并且小于不考虑拉破坏时所得值。

关键词 岩质边坡 拉破坏 双强度折减法 udec

中图法分类号 P642.31; **文献标志码** A

岩质边坡的变形破坏主要受节理、裂隙、断层、软弱夹层等不连续结构面控制,特别是对于节理岩质边坡而言,有限元的数值模型就变得不适用。基于不连续性假设的离散单元法是比较适合求解节理岩体的数值方法^[1]。近年来采用强度折减法计算边坡的安全系数逐渐得到广泛的应用。传统的强度折减法^[2]对整个边坡单元的抗剪强度度参数 c 、 φ 采用同一折减系数进行折减,直至边坡失稳,并采用此时的折减系数作为边坡稳定性系数,但由于边坡变形破坏过程中抗剪强度度参数 c 、 φ 的衰减程度不同,因此采用单一的折减系数很难反映强度参数的安全储备。为此,唐芬等^[3-5]提出了对 c 、 φ 采用不同折减系数的双安全系数法,该方法通过改变粘聚力折减系数与摩擦角折减系数之间的比例关系可以体现 c 、 φ 不同衰减程度,但其比例的选择具有一定的盲目性。为克服以上不足,薛海斌等^[6]基于强度参数分布服从线性衰减假定,提出了双强度非等比例相关联折减法。

以往的研究中^[7,8],大多基本不考虑岩土体本身抗拉强度,将边坡失稳破坏看成整体的剪切破坏,而岩质边坡真实的破坏往往是张拉剪切复合破坏。袁维等^[9]在分析实际边坡破坏模式的基础上提出了将抗拉和抗剪一同折减的强度折减法,弥补了先前强度折减法无法描述坡顶张拉破坏区的不足。为

便于边坡稳定性安全储备的评价,赵炼恒等^[10]提出采用强度折减的最短路径来定义边坡的综合安全系数。本文综合以上方法的优点,将离散单元法与考虑拉破坏的双强度折减法结合,并利用离散元软件 udec 对顺层岩质边坡稳定性进行分析,验证该方法的适用性,为分析节理岩质边坡稳定性提供一种有效的新手段。

1 考虑抗破坏的双强度折减法的实现

1.1 考虑拉破坏的强度折减法

Paul^[11]为了弥补 Mohr-coulomb 准则无法描述张拉破坏的不足,提出在破坏面上法向应力为压时采用 Mohr-coulomb 准则,破坏面上法向应力为拉时采用最大拉应力准则,即剪切-张拉复合破坏准则。袁维^[9]等在此基础上将抗拉强度的折减引入到强度折减法中,并推导出了抗拉强度伴随 c 、 φ 折减的折减公式:

$$f_{ti} = \frac{2c_i \cos\varphi_i}{1 + \sin\varphi_i} \beta \quad (1)$$

式(1)中, f_{ti} 、 c_i 、 φ_i 分别为第 i 步折减后的抗拉强度、黏聚力和内摩擦角; β 为常数,且有

$$\beta = \frac{1 + \sin\varphi}{2c \cos\varphi} f_t \quad (2)$$

式(2)中, f_t 为折减前岩土体的抗拉强度。

通过式(1)和式(2)可得折减前和折减后抗拉强拉强度与抗剪强度参数的关系如下:

$$f_{ti} = \frac{2c_i \cos\varphi_i}{1 + \sin\varphi_i} \cdot \frac{1 + \sin\varphi}{2c \cos\varphi} f_t \quad (3)$$

1.2 非等比例相关联双强度折减法

双强度折减法重在强调 c 、 φ 的折减程度不同,

2016 年 6 月 18 日收到

第一作者简介: 孙丹芳(1991—),女,河南开封人,硕士研究生。研究方向: 岩土体性质与边坡稳定性,E-mail:1249472633@qq.com。

*通信作者简介: 胡修文(1968—),男,湖北潜江人,副教授。研究方向: 岩土工程与地质工程,E-mail:18064098523@163.com。

对 c, φ 应采用不同的折减系数, 可表示为:

$$\begin{cases} SRF_c = \frac{c_0}{c_i} \\ SRF_\varphi = \frac{\tan\varphi_0}{\tan\varphi_i} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, c_0 和 φ_0 分别为初始黏聚力与初始内摩擦角, c_i 和 φ_i 为第 i 次折减后的黏聚力与内摩擦角; SRF_c 为黏聚力 c 的折减系数; SRF_φ 为内摩擦角的折减系数。

薛海斌等^[6]基于岩土体峰值强度参数与残余强度参数之间呈线性过度的假定, 推导出了内摩擦角折减系数与黏聚力折减系数之间的非等比例关系, 其关系式如下:

$$\begin{cases} SRF_\varphi = \frac{SRF_c}{\lambda + (1 - \lambda) SRF_c} \\ \lambda = \frac{c_p(\tan\varphi_p - \tan\varphi_r)}{(c_p - c_r)\tan\varphi_p} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, c_p, φ_p 分别为峰值强度对应的黏聚力与内摩擦角; c_r, φ_r 为残余强度对应的黏聚力与内摩擦角。

1.3 边坡稳定性系数的确定

在实际工程中, 评价边坡的稳定性安全储备往往只采用单一参数, 因此当采用双强度折减技术时需将双折减系数转换为单一的综合稳定性系数。Taylor^[12]指出双强度折减系数之间可能存在无数种组合方式, 赵炼恒等^[10]通过分析比较现有的几种组合, 建议采用 Isakov 等^[13,14]提出的组合方式, 即通过强度折减的最短路径(R)来定义边坡综合安全系数, 其表达式为:

$$\begin{cases} F_s = \frac{1}{1 - R/\sqrt{2}} \\ R = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{F_{sc}}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{F_{s\varphi}}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, R 为强度折减的最短路径的长度; $F_{sc}, F_{s\varphi}$ 分别为 c 和 φ 对应的稳定安全系数; F_s 为边坡综合稳定性系数。

综上, 本文按照式(3)对岩块抗拉强度进行折减, 按照式(4)、式(5)对结构面和岩块抗剪强度参数进行折减, 反复计算直至边坡失稳, 并采用式(6)计算所得的综合稳定性系数作为边坡的稳定安全系数。

2 算例分析

现通过一个顺层岩质边坡算例来验证考虑拉破坏的离散元双强度折减法分析边坡稳定性的适用性。顺层岩质边坡坡高 $h = 30.0$ m, 坡脚 45° , 层面倾角 35° , 层厚 3 m, 坡面上设置有 A、B、C、D 四个位

移检测点, 模型见图 1。岩块与结构面物理力学参数见表 1、表 2。边界条件为左右两侧约束水平位移, 底边约束竖向位移, 采用 Mohr-Coulomb 与抗拉破坏准则结合的屈服准则^[1], 初始应力场按自重应力场考虑, 采用 udec 对其进行模拟分析, 失稳判据为特征点位移突变。

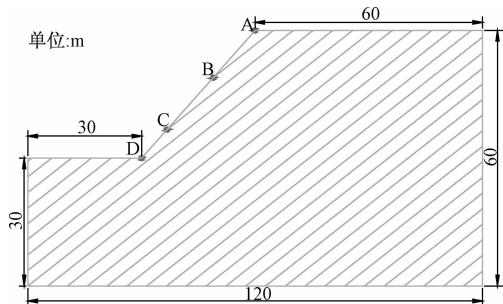


图 1 边坡计算模型及监测点布置图

Fig. 1 Model and arrangements of observation points of slope

表 1 岩块物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock

重度/(kN·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
2 500	10	6
内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	抗拉强度/kPa
50	200	200

表 2 结构面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of structural plane

法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	峰值黏聚力/kPa	峰值内摩擦角/(°)	抗拉强度/kPa
20	5	35	3
切向刚度/(GPa·m ⁻¹)	残余黏聚力/kPa	残余内摩擦角/(°)	
2	3.2	30	

2.1 考虑拉破坏的稳定性系数结果

边坡稳定性系数 F_s 与监测点 A、B、C 位移量曲线如图 2, 监测点 A、B、C 位移量基本相同, 监测点

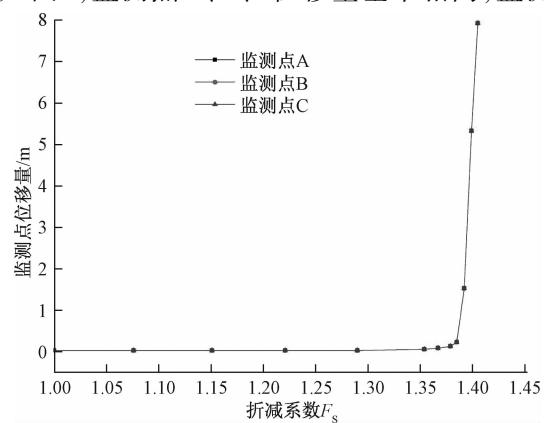


图 2 综合折减系数 F_s -监测点位移量曲线

Fig. 2 Curve of the reduction factor F_s and displacement for monitoring points

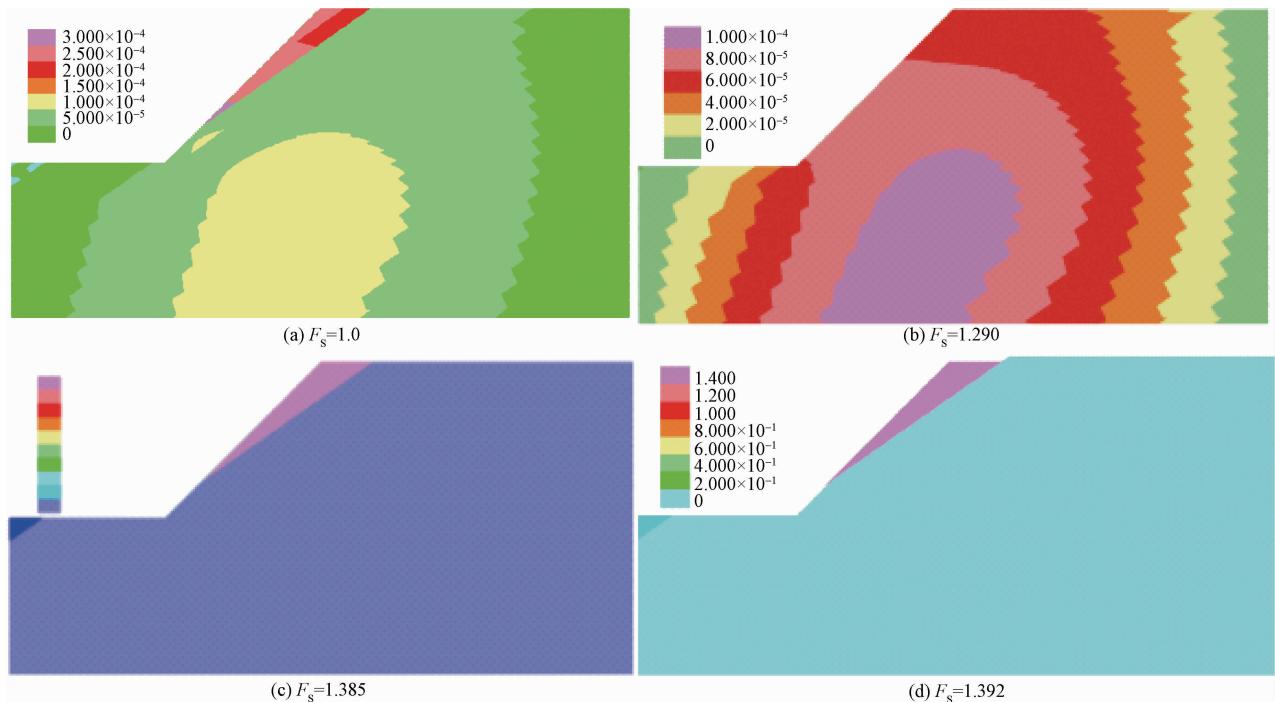


图3 不同综合折减系数下的水平位移量云图

Fig. 3 Xdisplacement increment cloud under different reduction factor

水平位移量随着 F_s 的增大逐渐增加,当 F_s 约为 1.385 时监测点位移发生突变,随后位移不收敛。不同综合折减系数下的水平位移量云图如图 3,当 $F_s = 1.0$ 时,边坡岩体内部位移很小,且水平位移量由坡内中下部向两侧逐渐减小;随着 F_s 的增大,监测点 C 所在结构面以上的岩体中水平位移量最大;当 $F_s = 1.385$ 时,监测点 C 所在结构面以上的岩体水平位移量趋于一致,且远大于边坡其他部位水平位移量;当 $F_s = 1.392$ 时,可明显看到监测点 C 所在结构面以上的岩体沿结构面整体向下滑动。综合以上分析,边坡稳定性系数取为 1.385。从速度矢量图 4 可知,滑面为沿监测点 C 的结构面。

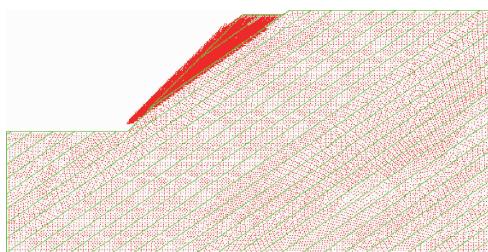


图4 边坡破坏时的速度矢量图

Fig. 4 Displacement vector at failure

2.2 不同方法的计算结果分析

极限平衡法中的 M-P 法具有多年实践经验且计算精度较高,为了验证考虑拉破坏的离散元双强度折减法所得稳定性系数的合理性,本文同时采用边坡稳定性分析程序 GEOSLOPE 中的 M-P 法(滑动

面即为图 4 所示的破坏面)及离散元双强度折减法(不考虑拉破坏,抗拉强度 $f_t = 1 \times 10^8$ kPa)进行了计算,计算结果见表 3。

结果显示:考虑拉破坏的离散元双强度折减法与 M-P 法结果相近,二者误差为 3.13%,并且小于不考虑拉破坏的离散元双强度折减法与 M-P 法之间误差。以上两种方法所求稳定性系数都大于 M-P 法所得结果,这是因为极限平衡法所得解是安全系数的下限值,该结果是合理的。不考虑拉破坏时的边坡稳定性系数大于考虑拉破坏时的边坡稳定性系数,说明边坡破坏不仅是简单整体剪切破坏,实际上是张拉剪切复合破坏,不考虑拉破坏的情况高估了边坡的稳定性。从双强度折减结果看出,考虑拉破坏的情况下,边坡破坏时黏聚力的折减系数为 1.55,而内摩擦角的折减系数仅为 1.259,说明该边坡中黏聚力对抗滑力的贡献大于内摩擦力,边坡的稳定性主要取决于黏聚力水平。

表 3 不同计算方法所得的边坡稳定性系数
Table 3 Slope stability coefficient by different methods

方法	M-P 法	双强度折减法 (不考虑拉破坏)	考虑拉破坏的 双强度折减法
稳定性系数	1.343	1.405	1.385
误差/%		4.62	3.13

3 结论

(1) 边坡破坏一般是张拉-剪切复合破坏模式,

不考虑拉破坏可能高估了边坡的稳定性。本文综合以往研究成果,提出一种新的考虑拉破坏的离散元双强度折减法,并采用该方法对某一顺层岩质边坡进行模拟,所得边坡稳定性系数与M-P法误差仅为3.26%,小于不考虑拉破坏时所得值。

(2)文中边坡稳定性分析结果表明,考虑拉破坏的离散元双强度折减法计算的稳定性系数比M-P法所得结果大一些,这是因为极限平衡法所得的解是安全系数的下限值,该结果是合理的。

参 考 文 献

- 1 Itasca Consulting Group. Inc. UDEC (universal distinct element code) user's manual. Version 4.0, Minneapolis, Minnesota, 2004.
- 2 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数. 岩土工程学报,2002;24(3):343—346
Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Shi Weimin, et al. Analysis of safety factor of slope stability by strength reduction FEM. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002; 24 (3) : 343—346
- 3 唐芬,郑颖人.边坡稳定安全储备的双折减系数推导.重庆交通大学学报(自然科学版),2007; 26(4): 95—100
Tang Fen, Zheng Yingren. Analysis on safety reserve of slope with two strength reduction factor. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007; 26(4) : 95—100
- 4 唐芬,郑颖人.土坡渐进破坏的双安全系数讨论.岩石力学与工程学报,2007; 26(7): 1402—1407
Tang Fen, Zheng Yingren. Discussion on two safety factors for progressive failure of soil slope. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007; 26 (7) : 1402—1407
- 5 郑颖人,赵尚毅,李安洪,等.有限元极限分析法及其在边坡中的应用.北京:人民交通出版社,2011
Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Li Anhong, et al. Application of strength reduction Finite Element Limit analysis method in slope. Beijing: China Communications Press, 2011
- 6 薛海斌,党发宁,尹小涛,等.边坡强度参数非等比例相关联折减法研究. 岩土工程学报,2015;34(增2):4005—4012
Xue Haibin, Dang Fanling, Yin Xiaotao, et al. Research on method of slope strength parameters non-proportional associated reduction. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015; 34 (supp. 2) : 4005—4012
- 7 雷远见,王水林.基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性. 岩土力学,2006;27(10):1693—1698
Lei Yuanjian, Wang Shulin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDE. Rock and Soil Mechanics, 2006;27 (10) : 1693—1698
- 8 朱超,马士举.顺层岩质高边坡破坏模式分析及稳定性研究. 土工基础,2015; 29(2): 83—85
Zhu Chao, Ma Shiju. The study on the stability and destructive mode of the bedded high rock slope. Engineering and Foundation, 2015; 29 (2) : 83—85
- 9 袁维,李小春,白冰,等.一种考虑拉破坏的强度折减法研究. 岩石力学与工程学报,2014; 33(增1): 3009—3014
Yuan Wei, Li Xiaochun, Bai Bing, et al. A strength reduction method considering tensile failure. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014; 33 (Supp. 1) : 3009—3014
- 10 赵炼恒,曹景源,唐高朋,等.基于双强度折减策略的边坡稳定性分析方法探讨. 岩土力学,2014; 35(10): 2977—2984
Zhao Lianheng, Cao Jingyuan, Tang Gaopeng, et al. Discussion on slope stability analysis with double strength reduction technique. Rock and Soil Mechanics, 2014; 35 (10) : 2977—2984
- 11 Paul B. Modification of the Coulomb-Mohr theory of fracture. Journal of Applied Mechanics, 1961; 28: 259—268
- 12 Taylor D W. Fundamentals of soil mechanics. New York: John Wiley and Sons, 1948
- 13 Isakov A, Korneyev D A, Moryachkov Y. Tow-parameter criterion of road bed stability. Proc. of Engineering Geology, Soil Mechanics and Foundations. Novosibirsk, Russia: [s. n.], 2010
- 14 Isakov A, Moryachkov Y. Estimation of slope stability with using two-parameter criterion of stability. International Journal of Geomechanics, 2013; 14 (3):613—624

Stability Analysis of Rock Slope by Double Strength Reduction Method Considering Tensile Failure Based on Discrete Element Method

SUN Dan-fang, HU Xiu-wen*, LI Yu, ZHU Hang-qi

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China)

[Abstract] The failure mode of rock slope is often composed of both tension and shear failure. Tensile failure is considered. Additionally, the method of double reduction factors is improved combined with the double strength and non-proportional associated reduction method and the theory of minimum strength degradation path. It avoids the blindness of ratio selection in the process of reduction and the stability coefficient of slope is more in line with the minimum theory. The double strength reduction method considering tensile failure which is used to simulate a dip bedding rock slope is proposed based on the above methods. The practical results show that proposed method perfectly reflected the different decay rates of friction angle and cohesion. The stability coefficient is much closer with the result of M-P method, and it is less than the result obtained by the method that tensile failure is not considered.

[Key words] rock slope tensile failure double strength reduction method udec