

考虑残余强度的动态强度双折减系数法研究

陈愿成

(江西省地矿局赣南地质调查大队,江西 赣州 341000)

摘要:由于岩体材料具有非均质、各向异性和不连续性等特性,导致岩质边坡稳定性分析存在诸多待完善的地方.本文通过对岩体的强度折减系数— SRF_i 和 SRF_j 间的关系进行理论研究,以实现将双折减系数法转换为由其中某一个折减系数控制的单折减系数法,极大的简化了数值模拟的操作过程.为了分析岩质边坡的稳定性,本文提出了考虑残余强度的动态强度双折减系数法来动态观察边坡潜在滑带的拓展过程.本文的研究成果可解决边坡稳定性预测问题、为岩质边坡工程的设计提供基础和依据.

关键词:岩质边坡;潜在滑带;强度折减;动态局部折减

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4701(2018)01-0000-05

岩质边坡发生滑坡是由多因素参与下导致的^[1],滑坡突变过程的研究大多从岩层倾角、岩性、结构面、水的作用、人工开挖、地震、爆破震动效应、风化和时间效应等方面入手,讨论其中某一方面或者某些方面对滑坡灾变的影响.一般采取的主要研究手段有物理模拟和数值模拟两种,但是滑坡的灾变过程极其复杂,其全过程均由多种因素综合参与下导致的^[2],很难具体地区分是哪种因素导致或者主导灾害发生的,因此需要借助一种手段来综合体现其影响.

有限元强度折减法的应用^[3]为岩质边坡的稳定性研究引入了一种新的思路,其计算核心是通过不断地对滑坡抗剪强度参数进行折减,直至边坡发生破坏.强度折减法尚存在如下几点不足:

(1)折减范围过大,与实际不符^[4].该方法不对滑坡范围内的岩体进行区分,折减是针对滑坡全范围的降低抗剪强度参数.实质上,滑坡渐进失稳过程中,最主要的是滑带的形成和贯通过程,同时对应着其强度由峰值强度过度到残余强度的过程.因此,对于滑坡不同部位的折减程度不应完全一致,应重点突出滑带的参数弱化.

(2) c 和 φ 按照等比例强度折减不够合理^[5].对滑坡稳定性分析时,常采用强度折减法将 c 和 φ 同时除以某一确定的系数来对滑坡进行折减.而滑坡的灾变是一个由局部破损渐进扩展以至交汇贯通形成新滑面的

过程,在此过程中不论从物理机制还是力学机制, c 和 φ 发挥作用的先后和程度、衰减速度和程度都是不相同的.显然将 c 和 φ 按照相同比例对滑坡进行折减是不合理的,合理且符合实际的方法是采用不同的比例强度对滑坡进行折减.

针对不足(1)中的“滑坡折减范围大,与实际不符”的问题,根据不同部位处岩体抗剪强度参数需要折减程度的不同,本文采用了动态强度折减法来模拟滑坡体滑移面的拓展破坏过程;针对不足(2)中的“ c 和 φ 按照等比例强度折减不够合理”的问题,本文根据抗剪强度参数发挥的先后次序与发挥程度的不同,采用了不同的折减系数来模拟滑坡灾变过程.

1 双折减系数— SRF_i 和 SRF_j 间的关系研究

图1为针对岩体峰后的应力应变模式提出的本构关系,归纳起来有以下三种形式:弹脆性模型、应变软化模型和弹塑性模型.

对坡积土、泥岩、砂质泥岩和板岩等质量一般的岩体而言,都呈现出应变软化现象,滑坡体内的这些软弱覆岩也容易最早形成薄弱部位,通过不断拓展而最终引发滑坡灾变.总而言之,滑坡的滑带形成过程伴随着由峰值强度到残余强度的过程,具有典型的应变软化特性,强度折减过程也必须考虑岩体的应变软化特性.低

围压条件下岩体的应力应变关系曲线如图2所示。

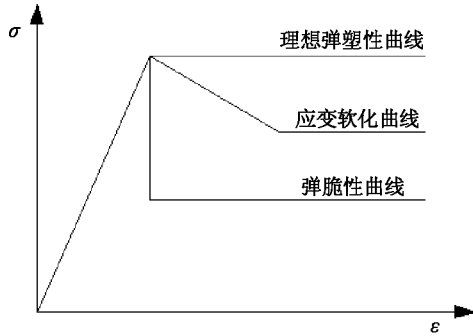


图1 岩石材料峰后变形的3种形式

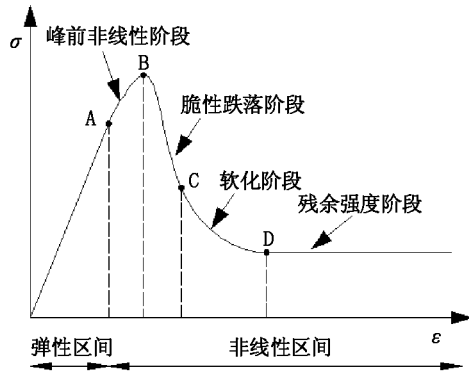


图2 低围压条件下岩石材料的应力应变关系曲线

双折减系数法最早由唐芬等^[6]提出,对 c 和 φ 采用了差异性的折减系数,来合理的模拟滑坡破坏的机理,从而得到 c 和 φ 值的不同安全储备,最后综合的评定滑坡的稳定性。双折减系数^[7]可根据抗剪强度参数发挥的先后次序与发挥程度的不同,采用不同的折减系数进行模拟,虽然更符合实际,但是该方法却并未直接给出 c 和 φ 的折减系数—— SRF_i 和 SRF_j 之间的大小关系。

简单的线性软化模型假设峰值强度与残余强度之间呈线性过渡,认为强度参数与软化参数 ζ (ζ 包括等效塑性应变、最大塑性主应变和塑性剪应变等)为分段线性函数关系^[8]。峰前弹性区间和非线性阶段虽然会产生塑性变形,但抗剪强度参数(黏聚力、内摩擦角)不发生变化,即应变软化参数为零;而峰后脆性跌落和软化阶段,应变软化参数大于零,强度参数发生变化。应变软化参数 ζ 在岩石材料应力-应变曲线中的演化规律如图3所示。

对图3中的非线性曲线段 $\widehat{AB}$ 和 $\widehat{BC}$ 进行线性处理。首先连接曲线段 $\widehat{AB}$ 的端点成线段AB,假设线段AB为弹性变形阶段与残余强度之间的线性过渡段;然后以B

点为射线端点作射线 BC' 平行于 ε 轴,简化后的强度参数 c 、 $\tan\varphi$ 随着塑性剪应变 ζ 的变化曲线如图4所示。

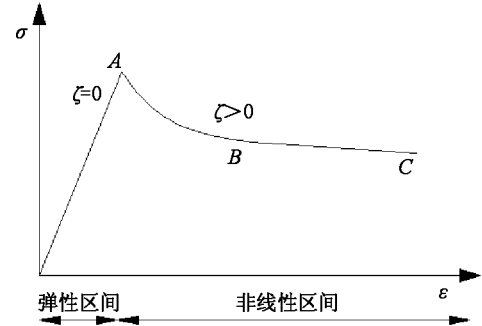


图3 应变软化参数峰前峰后变化规律

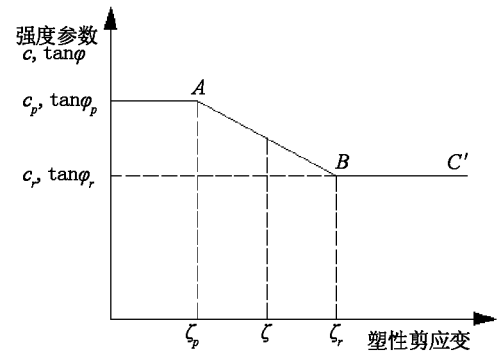


图4 强度参数随塑性剪应变的变化曲线

由图4可知,应变软化阶段强度参数与软化参数的关系:

$$\frac{\zeta_r - \zeta}{\zeta_r - \zeta_p} = \frac{c(\zeta) - c_r}{c_p - c_r} \quad (1)$$

$$\frac{\zeta_r - \zeta}{\zeta_r - \zeta_p} = \frac{\tan\varphi(\zeta) - \tan\varphi_r}{\tan\varphi_p - \tan\varphi_r} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: ζ 为应变软化参数; P 为峰值强度,kPa; r 为残余强度,kPa。

联立式(1)和(2)可得

$$\frac{c(\zeta) - c_r}{c_p - c_r} = \frac{\tan\varphi(\zeta) - \tan\varphi_r}{\tan\varphi_p - \tan\varphi_r} \quad (3)$$

化简式(3)有

$$\frac{c_r(\tan\varphi_p - \tan\varphi_r)}{(c_p - c_r)\tan\varphi_r} = \frac{c(\zeta)(\tan\varphi_p - \tan\varphi_r)}{(c_p - c_r)\tan\varphi_r} + 1 - \frac{\tan\varphi(\zeta)}{\tan\varphi_r} \quad (4)$$

根据强度折减系数的定义,结合图3对岩体的粘聚力折减系数 SRF_i 和内摩擦角折减系数 SRF_j 作如下假设:

$$SRF_i = \frac{c_p}{c_r} \quad (5)$$

$$SRF_j = \frac{\tan \varphi_p}{\tan \varphi_r} \quad (6)$$

式(5)和(6)中: c_p 、 φ_p 分别为岩体的初始粘聚力, kPa 和初始内摩擦角, °; c_r 、 $\tan \varphi_r$ 分别为岩体的残余粘聚力, kPa 和残余内摩擦角, °。

由于 ζ 为应变软化参数, 故可令 $\zeta = p$, 并将式(5)和式(6)代入式(2)中, 以构造粘聚力折减系数 SRF_i 和内摩擦角折减系数 SRF_j 的关系式为

$$\frac{c_r(\tan \varphi_p - \tan \varphi_r)}{(c_p - c_r)\tan \varphi_r} = \frac{SRF_j - 1}{SRF_i - 1} \quad (7)$$

由于岩体的强度参数为定值, 因此, 式(7)左边的参数式为一常数, 故可令

$$\frac{c_r(\tan \varphi_p - \tan \varphi_r)}{(c_p - c_r)\tan \varphi_r} = \chi \quad (8)$$

则有:

$$\frac{SRF_j - 1}{SRF_i - 1} = \chi \quad (9)$$

由上式化简可得到折减系数 SRF_i 和 SRF_j 的关系为:

$$SRF_j = \chi(SRF_i - 1) + 1 \quad (10)$$

实际工程中, 往往可以由实验获得岩体参数的峰值抗剪强度和残余抗剪强度值, 即可以获得式(9)中的系数 χ 。那么, 可以将双折减系数法转换为由其中某一个折减系数控制的单折减系数法, 极大的简化了数值模拟的操作过程。

2 动态强度局部折减法

有限元强度折减法的计算核心是通过不断的对滑坡进行折减的方式, 使抗剪强度参数不断变小, 直至边坡发生失稳破坏。经强度折减后, 岩体的抗剪强度参数 c' 、 φ' 如式(11)和(12)所示。

$$c' = \frac{c}{F_{sr}} \quad (11)$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F_{sr}} \quad (12)$$

式(11)和(12)中: c 、 φ 分别为岩体的粘聚力, kPa 和内摩擦角, °; F_{sr} 为强度折减系数; c' 、 φ' 分别为岩体经强度折减后的粘聚力, kPa 和内摩擦角, °。

在保持折减原理不变的基础上, 动态强度折减法主要是在折减范围和折减程度的问题上进行探讨, 其计算原理为由达到峰值强度部分的岩体来确定滑坡体的局部破损范围。此范围内抗剪强度参数应处于峰后应力状态, 且随着塑性区的不断拓展, 逐渐转化为残余强度,

直至不断拓展而贯通。因此, 在实际强度折减计算时, 只需对局部破损部位的抗剪强度参数进行折减而使滑坡体的滑移面渐进贯通发生失稳破坏即可。

3 计算流程

依靠动态强度双折减系数法, 重现上述典型滑带的形成过程, 实现滑坡灾变过程模拟的具体计算流程图 5 所示。

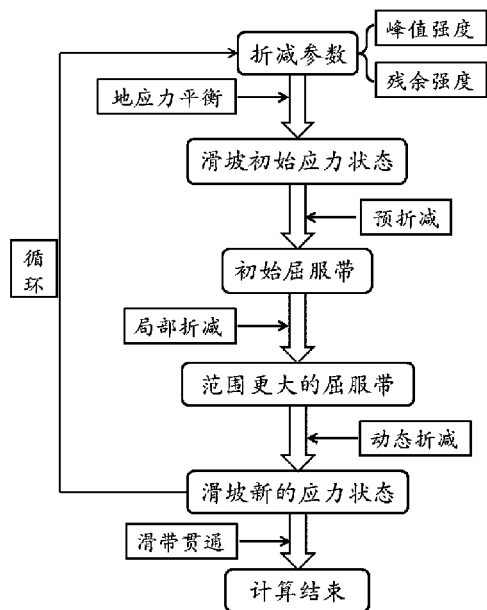


图5 滑坡灾变的计算流程图

4 工程应用

4.1 工程地质概况

广西某山区在建高速公路, 由于爆破、开挖等工程扰动, 造成该山区沿线多处岩质边坡有滑坡危险。现运用动态强度双折减系数法对该公路沿线的 K13 + 421 ~ K13 + 532 段进行边坡稳定性分析。

地形地貌: 研究路段边坡位于斜坡中上部, 属于中山河谷地貌, 整体上坡面较为平整, 东高西低, 整体向北西侧倾斜。在纵向(东西)上坡面整体呈直线型, 坡高约为 60 m, 坡角 45°。

气象与水文: 研究路段属亚热带季风气候, 气候温和, 雨量充沛。研究路段属长江水系, 流域面积 876.5 km², 河床平均比降 2‰~8‰, 河床与河岸高差一般 1~5 m。

地层结构: K13 + 421 ~ K13 + 532 路段边坡工程区主要出露地层为上元古界震旦系和新生界第四系。

4.2 算例分析

研究路段的具体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 均质土坡的简单物理力学参数

名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
土层	20	25	16.5	5.2	0.25

借助有限元软件,根据图 5 所示的计算流程,运用整体强度折减法和本文提出的动态强度折减法分别对研究路段进行模拟,二者等效塑性区对比如图 6 所示;二者折减系数分布的对比如图 7 所示。

由图 6 可看出,动态强度折减法最终计算结果的等效塑性区贯穿程度优于整体强度折减法,且滑弧分布范围更为集中,而据现场勘查知该段边坡确实存在滑坡风

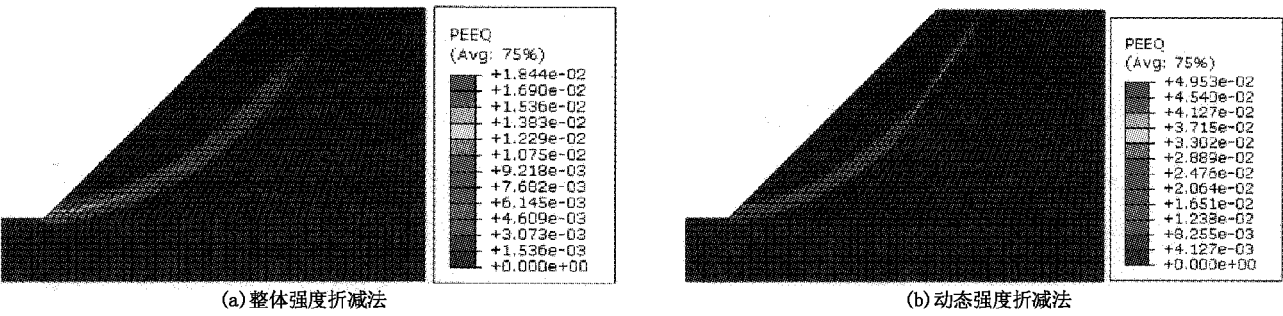


图 6 等效塑性区对比

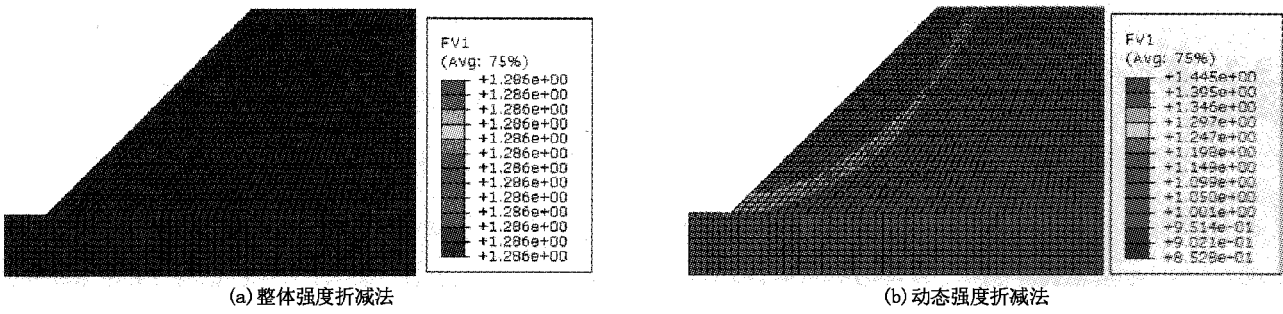


图 7 折减系数分布对比

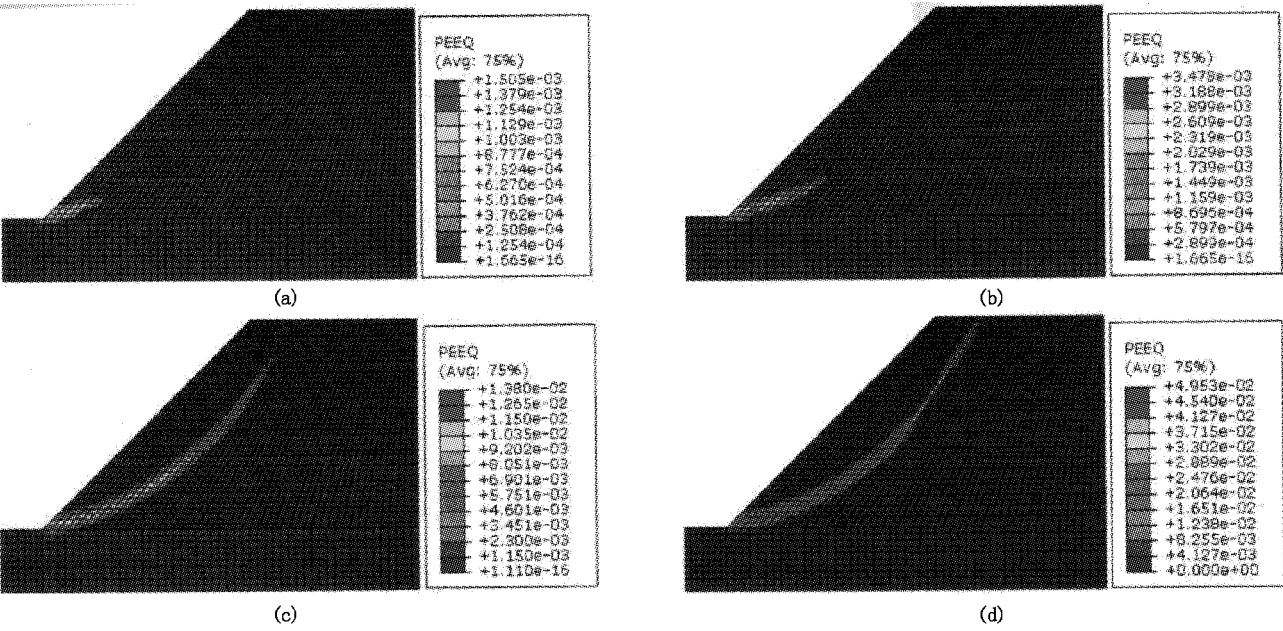


图 8 动态强度折减法——滑带渐进拓展过程

险;由图7可看出,整体强度折减法对滑坡折减程度始终保持一致,无法体现滑坡失稳过程中的局部发育的特征。动态强度折减法实现了对滑坡不同部位的折减系数合理分布,参数弱化仅仅针对进入塑性变形的区域进行,而线弹性部分始终保持不变,且对于等效塑性区更大的区域赋予更大的折减系数。显然,动态强度折减法更为符合灾变过程,其模拟过程如图8所示。

由图8可看出,在滑坡发展初期,滑带首先产生于坡脚,随着参数弱化而塑性区范围不断扩大,折减系数的调整促使滑带不断发育,直到贯穿整个滑坡而达到极限平衡状态,实现了边坡整个灾变过程。

5 结 论

(1)本文对双折减系数(SRF_i 和 SRF_j)间的关系进行了理论研究,推导出的关系表达式将双折减系数法转换为由其中某一个折减系数控制的单折减系数法,极大简化了数值模拟的操作过程。

(2)本文提出了动态强度局部折减法,考虑了岩体的残余强度,实现了只折减局部破损范围内的强度参数,使坡体渐进破坏并自动搜索出潜在滑动面的位置所在。

(3)本文提出的考虑残余强度的动态强度双折减

系数法,能够动态预测岩质滑坡潜在的滑移面,并成功应用于工程实践中,因此可为岩质边坡的稳定性研究提供理论依据和基础。

参考文献:

- [1] 陶志刚,孙忠强,郭占飞,等.耦合多种成灾因素下的边坡稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(03):593~598+603.
- [2] 徐平友,周骅.小波变换在山体滑坡预测中的应用[J].硅谷,2012,5(14):157~158.
- [3] 李华治,金健.有限元强度折减法在边坡分析中的应用[J].中国水运(下半月),2016,16(10):246~247+250.
- [4] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等.基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(02):243~256.
- [5] 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[J].岩土力学,2014,35(10):2977~2984.
- [6] 唐芬,郑颖人,赵尚毅.土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J].岩石力学与工程学报,2007,(07):1402~1407.
- [7] Jiang X, Wang Z G, Liu L Y, et al. The determination of reduction ratio factor in homogeneous soil-slope with finite element double strength reduction method[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7(1): 205~209.
- [8] 韩建新,李术才,李树忱,等.基于强度参数演化行为的岩石峰后应力-应变关系研究[J].岩土力学,2013,34(2):342~346.

编辑:张绍付

Study on dynamic strength double reduction factor method considering residual strength

CHEN Yuancheng

(Geological Brigade of South JiangXi Province, Ganhou 341000, China)

Abstract: The stability analysis of rock slope has many places to be improved because the rock mass material has the characteristics of heterogeneity, anisotropy and discontinuity. In this paper, the relationship between the strength reduction factor of rock mass is studied theoretically. The results show that a single reduction factor method, which converts the double reduction factor method to one of the reduction coefficients, is realized, which greatly simplifies the operation of numerical simulation. In addition, this paper presents a dynamic strength double reduction factor method considering residual strength to dynamically observe the development of potential slip zones on the slopes. The research results show that it can solve the problem of slope stability prediction and provide the basis and basis for the design of rock slope engineering.

Key words: Rock slope; Potential slip zone; Strength reduction; Dynamic partial reduction

翻译:陈愿成