

文章编号: 1000-7598 (2013) 04-1140-07

边坡渐进破坏的动态强度折减法研究

陈国庆¹, 黄润秋¹, 周 辉², 许 强¹, 李天斌¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 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实验室, 武汉 430071)

摘 要: 边坡的变形破坏是量变积累到质变的渐进发生过程, 由坡体内部潜在滑动面的逐渐破坏并扩展至整体滑面。基于强度折减法思想, 提出模拟边坡渐进破坏的动态强度折减法。该方法利用屈服接近度指标 YAI 确定边坡的破损区域, 将 $YAI < 0.2$ 的区域定为破损区, 通过不断动态折减局部破损坡体的强度参数, 使边坡潜在滑动面渐进演化至贯通, 边坡达到极限平衡状态。算例计算表明, 该方法可有效解决强度折减法中折减范围的问题, 克服整体强度折减法破损区过大的缺陷, 获得的位移变化趋势与破损区演化过程也具有良好的一致性。动态强度折减法真实再现了边坡渐进失稳过程, 为强度折减法更有效地应用于边坡稳定性定量评价提供有效途径。

关 键 词: 边坡工程; 渐进破坏; 动态强度折减; 失稳判据; 稳定性评价

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method

CHEN Guo-qing¹, HUANG Run-qiu¹, ZHOU Hui², XU Qiang¹, LI Tian-bin¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

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

Abstract: The failure of slope is a progressive process which from quantitative changes to qualitative changes. The whole sliding surface will be taken place by gradual damage of the potential sliding surface in the slope body gradually. Based on the strength reduction method, dynamic strength reduction method that can simulate the progressive failure of slope was proposed. At first, yielding approach index (YAI) is used to appraise the damaged region of slope in the numerical simulation, the region that YAI is less than 0.2 is recognized as the damaged region. Then through the continuous local damage reduction of the strength parameters of the local slope body, the potential sliding surface is damaged gradually and evolved to breakthrough finally. The practical results show that the proposed method can settle the reduction region in the strength reduction method effectively; and overcome the defect of large plastic damage area by the whole strength reduction method. The trend of displacement and damage area change also has better consistency in the reduction process. Dynamic strength reduction method can simulate the progressive failure of the slope truly; and it provides quantitative basis of slope stability appraising for strength reduction method.

Key words: slope engineering; progressive failure; dynamic strength reduction; instability criterion; stability evaluation

1 引 言

近年来, 随着有限元、有限差分等数值计算方法的发展, 强度折减法在边坡稳定性分析中发挥了重要作用, 通过降低岩土体强度参数至边坡失稳, 建立边坡稳定性的定量关系, 可方便求解出边坡的安全系数^[1-2]。与传统的极限平衡法相比, 强度折

减法能够考虑岩土体的非线性本构关系、开挖和保护结构的作用效应等。

众多学者在强度折减计算及其工程应用方面进行了大量研究, 如 Matsui^[3]、Dawson^[4]、赵尚毅^[5]、张振华^[6]、栾茂田等^[7]、郑宏^[8-9]、邓建辉^[10]、Eberhardt^[11]、徐卫亚^[12]、唐春安^[13]等进行了富有成效地探索, 有力地推动了强度折减理论在边坡稳

收稿日期: 2012-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 41130745, No. 41272330); 中国博士后科学基金资助 (No. 201104639, No. 20100481374)。

第一作者简介: 陈国庆, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事岩土工程数值分析和地质灾害防治方面的研究。E-mail: chgq1982@126.com

定性分析与评价方面的应用。

边坡的实际失稳过程并非一次瞬间完成,而是由坡体局部应力集中或力学参数的减弱,导致坡体局部范围出现损伤破坏,随后破坏范围逐渐扩展,并最终形成整体滑面,因此,基于强度折减法的边坡稳定性评价中其折减范围和安全系数倍受关注^[14-16]。杨光华等^[14]采用局部强度折减思路,只对滑动面的强度参数进行了折减,认为如果对全部单元进行强度折减,可能会得出大于实际的位移。只针对滑动带强度参数进行折减是合理的,但目前关于强度折减的研究方法尚未考虑到滑坡形成的渐进演化过程。

本文针对折减范围的讨论,提出了动态强度折减方法,进行边坡渐进失稳过程的计算研究。应用量化的岩土体破损评价指标,确定边坡体的局部破损范围。在折减计算过程中,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。算例表明,本文提出的动态强度折减法能较好地模拟边坡渐进破坏过程,为强度折减法更有效地应用于边坡稳定性评价提供了一条新的计算途径。

2 动态强度折减

2.1 动态强度折减计算原理

边坡岩土体的强度特征具有非均质性,岩土体首先从局部薄弱位置开始破坏,随后逐步渐进扩展。为研究边坡从局部破坏发展到整体失稳这一渐进过程,提出动态强度折减计算方法,见图1。该方法思路清晰、计算简便,具有以下特点:

(1) 折减范围动态变化。在计算过程中,折减范围从局部到整体动态扩展,反映了边坡渐进破坏过程。

(2) 搜索出渐进滑动面。利用不断扩展的折减范围,搜索出边坡失稳的破损区,最终获得滑坡的滑动面。

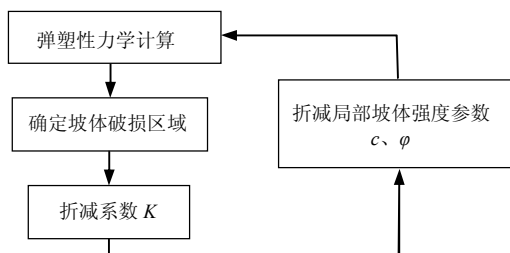


图1 动态强度折减计算过程

Fig.1 Calculation process of dynamic strength reduction

首先,折减边坡整体单元的强度参数,使局部坡体单元出现破损,随后折减破损单元的强度参数,并进行弹塑性力学平衡计算,坡体破损区域将扩大。在进行下一步强度折减计算时,将新破损区域内力学参数按新折减系数进行折减,通过不断折减局部坡体单元的强度参数,使坡体破损区域和折减程度不断增加,直到边坡达到极限平衡状态。

依据弹塑性准则计算边坡破损区域时,用折减系数 K 折减岩土材料的力学强度参数,即

$$c_{\text{loc}} = \frac{c}{K}; \quad \varphi_{\text{loc}} = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{K}\right) \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; c_{loc} 为局部破损区的黏聚力; φ_{loc} 为局部破损区的内摩擦角。

Mohr-Coulomb 准则作为一种描述岩土体剪切破坏的屈服准则,是目前岩土工程中应用最为广泛的强度准则,本文采用该准则作为弹塑性计算中的强度准则,其表达式为

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏量第二不变量; θ_σ 为应力罗德角。

动态折减法需要解决折减范围这一核心问题,即边坡体在破坏过程中破损区域将不断扩展,因此,确定边坡渐进失稳过程中的破损区域非常重要。本文利用屈服接近度 YAI ^[17-18] 量化确定动态强度折减计算过程中的破损区域, YAI 为主应空间内初始屈服面与未屈服应力点的相互关系,基于 Mohr-Coulomb 准则的 YAI 计算公式为

$$YAI = \frac{\frac{(I_1 \sin \varphi)}{3} + \left(\cos \theta_\sigma - \frac{\sin \theta_\sigma \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi}{\frac{I_1 \sin \varphi}{3} - c \cos \varphi} \quad (3)$$

YAI 的值域为 $[0, 1]$, 当 $YAI = 0$ 时,应力点发生屈服;当 $YAI = 1$ 时,处于最安全状态。Martin 等^[19]在试验中发现,岩土体在加载过程中不稳定开裂的应力阈值大约为峰值强度的 80%,本文取 80% 的底限阈值确定折减计算中破损区范围,即 $YAI < 0.2$ 的区域为破损区。需要特别强调,本文中的破损区为计算所得的塑性区 ($YAI = 0$) 与损伤区 ($0 < YAI < 0.2$) 之和,因此坡体破损区应大于屈服破坏区。

2.2 边坡渐进破坏计算步骤

根据边坡的渐进破坏演化特征和动态强度折减法原理,建立了模拟边坡渐进破坏过程的计算方法,见图2。具体步骤:

①首先确定边坡的地质地形、岩土体力学参数、应力场等,为动态强度折减法数值计算提供基本的初始条件,建立相应的数值计算模型。

②在 $K=1$ 的情况下进行边坡的弹塑性力学计算,利用屈服接近度指标 YAI 判断坡体单元是否发生破损 ($YAI < 0.2$),如无单元发生破损,则增加折减系数 K ,重新进行弹塑性力学计算,直至坡体局部单元发生破损为止。

③利用 YAI 指标确定边坡渐进破坏过程中的破损区域,按照式(1),由折减系数 K 折减局部破损区域内的强度参数,然后将折减后的参数代入上一次折减计算程序进行弹塑性力学平衡。

④按照图1的动态折减计算过程,随着折减次数的增多和折减系数 K 的不断增大,边坡破损区域不断扩展,边坡滑动面逐渐形成,岩土体自稳能力下降,当边坡破损区贯通时(即滑动面形成),边坡接近极限失稳状态,此时,边坡的渐进破坏完成。

⑤折减计算完成后,绘制边坡关键部位位移与折减次数的关系曲线,依据位移-折减次数曲线,获得位移发生突变点,该时刻边坡变形将由等速变形向加速变形阶段发展,可将突变点对应的位移值作为边坡稳定性评价及预警的重要依据。

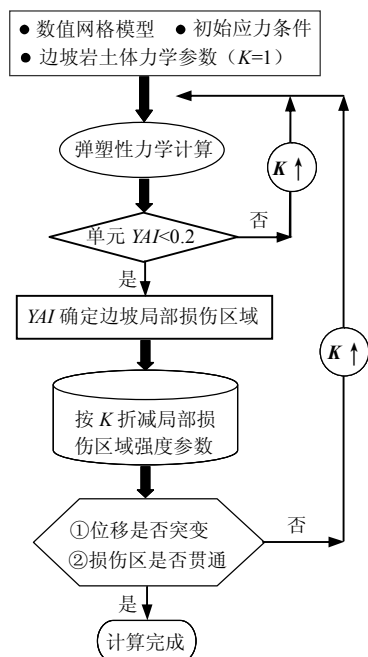


图2 基于动态强度折减法的边坡渐进失稳模拟

Fig.2 Simulation of progressive failure for slope based on dynamic strength reduction method

3 算例分析

算例采用均质土坡,边坡基本形状和网格划分如图3(A~D为监测点)所示,网格单元尺寸为0.5 m,网格单元数为1360个,均质土坡坡高 $H=10$ m,土体重量为 20 kN/m^3 ,黏聚力为 20 kPa ,内摩擦角为 20° ,体积模量取 800 MPa ,剪切模量取 30 MPa ,坡角为 45° ,边坡应力场为自重应力场。边界条件为左右两侧约束水平位移,底边固定。

本文分别采用动态和整体强度折减法计算该均质边坡的渐进破坏过程,以便分析动态强度折减法的合理性和可行性。

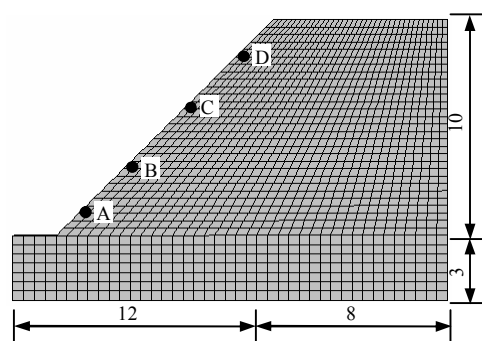


图3 均质边坡计算模型示意图(单位: m)

Fig.3 Mesh sketch of the homogeneous soil slope(unit: m)

3.1 动态强度折减法计算

按照图2的动态强度折减计算步骤,根据初始条件进行了弹塑性力学计算,用式(3)对坡体单元的屈服接近度 YAI 进行计算,并判断是否有单元 $YAI < 0.2$,计算表明在坡脚处有局部单元出现了破损,见图4。

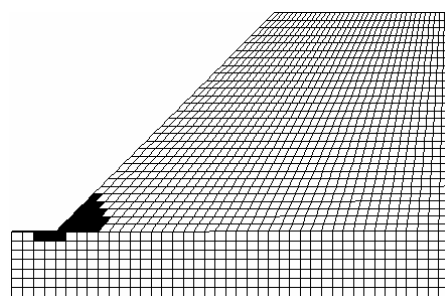


图4 边坡破损区分布图

Fig.4 Damage distribution of slope

在第2次折减计算时,调用第1次折减计算完成的程序,折减如图4所示的破损区域内的强度参数,此时折减系数 $K=1.05$,按照式(1)对坡体局部的破损区域内的强度参数进行折减,并进行弹塑性力学平衡计算。

按照图2的计算步骤,动态折减计算过程中边坡破坏区演化如图5所示,通过对折减系数 K 的反复搜索(采用二分法搜索),在第10次折减计算时,数值计算结果显示边坡正好出现贯通性破坏区,表明边坡已处于临界失稳状态。

在第1~4次折减过程中,折减系数 K 在1.00~1.25范围内,坡脚局部的破坏区发展比较缓慢,见图4和图5(a)。随着折减次数和折减程度的增加,从第8~10次折减,折减系数 K 只从1.41增加至1.43,但坡体破坏区却迅速扩展,至第10次折减时破坏区贯通,见图5(f),可见动态强度折减真实地再现边坡破坏演化过程,边坡从坡脚开始破坏,逐步向上形成滑动面。从潜在滑动面的时间演化过程来看,初期演化较为缓慢,后期快速发展至滑动面贯通,这一演化过程也符合滑坡的形成特点。

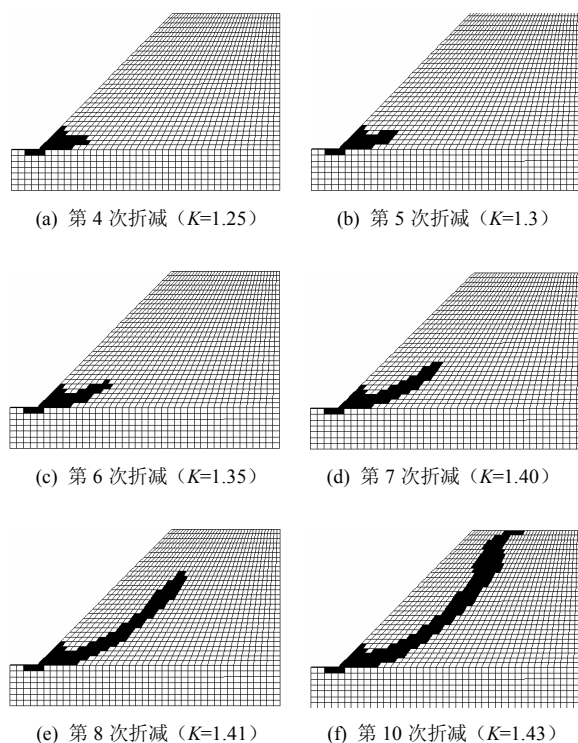


图5 折减计算过程中破坏区演化

Fig.5 Evolution of damage zone of slope under reduction

本算例中,在坡面上共设置A、B、C、D四个监测点(见图3),记录了动态强度折减计算过程中不同折减次数对应的位移变化情况,如图6所示。由图可见,随着折减次数的增加,当折减次数为8时,动态强度折减法计算获得的位移发生突变。随着折减程度的继续增强,当折减次数至10时,边坡滑动面迅速扩展至坡顶(见图5(f)),导致滑动面贯通,进而使边坡的位移量急剧增大,边坡将沿该破坏区滑动面发生滑动。

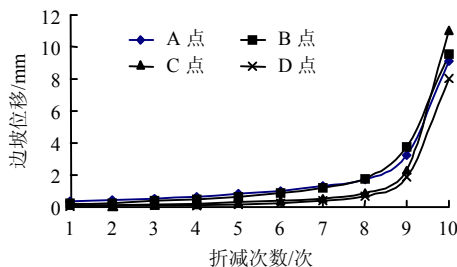


图6 边坡渐进失稳过程中的位移曲线

Fig.6 Displacement curves of slope in the process of progressive failure

3.2 整体强度折减法计算

采用传统的整体强度折减法对同样的边坡进行了分析,对边坡整体单元的强度参数进行了折减,图7为折减过程中破坏区分布图。随着黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的降低,整体强度折减法获得的破坏区首先出现在边坡底部区域(见图7(a)和图7(b)),随后在底部区域贯通(见图7(c)),并向上延伸和扩展。此处应强调,图7中的破坏区域应大于软件计算得到的塑性区。当折减计算不收敛或者边坡位移产生突变时,边坡整体基本为破坏区,出现大面积破坏屈服,这与实际的边坡失稳破坏特征相差甚远。

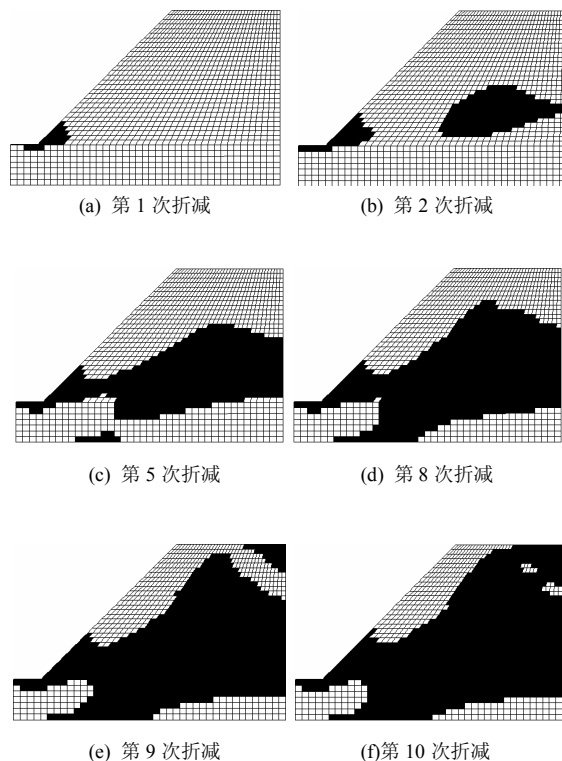


图7 整体强度折减法破坏区演化过程

Fig.7 Evolution of damage zone of slope using whole strength reduction

整体强度折减法获得的位移变化趋势如图8所示,与图6相比,位移发生突变时整体强度折减的

位移值是动态强度折减的 2~3 倍,对全部单元进行强度折减,可能会得出大于实际的位移,故通过折减局部破损坡体获得的变形更接近真实,因此,为了获得边坡的真实变形,对边坡进行局部的动态强度折减更为合理。

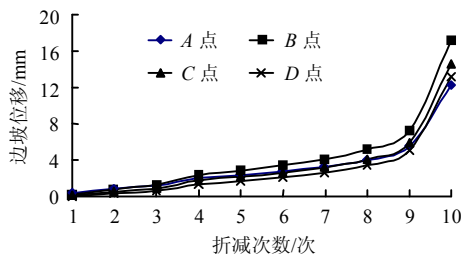


图 8 传统强度折减法位移曲线

Fig. 8 Displacement curves of slope in traditional strength reduction method

3.3 动态强度折减法优越性

图 9 为 3 种强度折减法获得的 A 点位移变化曲线,局部折减法根据文献[14]的计算步骤,对贯通滑动面的力学参数进行折减。在第 10 次折减时(即滑动面贯通),动态折减位移值为 9 mm,局部折减位移为 10.5 mm,整体折减位移值为 12 mm。采用局部强度折减法计算^[14]表明,如果对全部单元进行强度折减,可能会得出偏大于实际的位移值,动态折减获得的位移比局部折减和整体折减都小,本文进一步证明了针对局部的破损区进行折减的合理性。

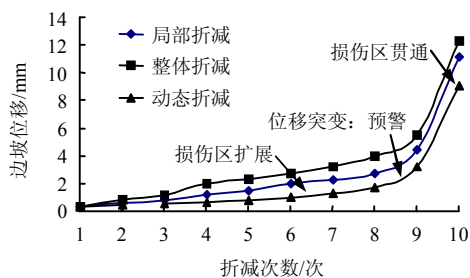


图 9 强度折减法获得的位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of slope by strength reduction method

如图 5、7 所示,整体强度折减法获得的破损区远大于动态折减计算获得的破损区。在整体强度折减法计算中,坡体内的塑性区不仅被过分夸大^[8-9, 18],而且常出现在坡体深部,这显然与实际情况不符,给准确地确定潜在滑面带来了困难。因此,本文提出的动态折减法可以获得边坡失稳的破损区和滑动面,避免了整体强度折减法破损区过大的缺点。

由于整体强度折减法无法通过破损区获得滑动

面位置,常采用剪应变增量确定滑动面的位置。目前,剪应变增量的选取没有统一标准,需要通过人为试调剪应变增量值获得。文献[14]需要先利用整体强度折减法获得滑动面,相比于该文献,本文可直接由动态强度折减法搜索出滑动面,且直接由破坏区确定滑动面的位置和形状,灵活地实现了边坡破损区渐进演化。

从图 5、9 可以看出,当变形发展到一定程度后(见图 5(e)和图 9 中位移突变点),边坡渐进破坏的进一步发展导致滑动面累进性贯通(见图 5(f)),这一过程伴随着坡体内部的潜在滑动面的逐渐破损,强度逐渐降低,边坡的位移趋势则由等速变形阶段向加速变形阶段转化^[20],动态强度折减法的计算表明,边坡潜在滑动面的渐进发展和坡体位移变化趋势具有良好的一致性。本文利用动态强度折减法获得的位移-破损区演化过程也符合文献[21]提出的变形与坡体内部潜在滑动面逐渐破损孕育这一特征。

文献[16]认为,对于非均质的成层土坡,仅通过对各层土强度的简单折减,不能获得正确的应力场和安全系数,而本文提出的动态强度折减法可以真实地模拟非均质边坡失稳演化过程。动态强度折减法对于非均质边坡更具有强大的生命力,非均质边坡中的局部薄弱单元会首先出现破损,并随之演化扩展,使边坡沿着局部薄弱带滑动。在古滑坡、含节理、断层的岩质边坡等非均质边坡稳定性评价中,动态强度折减法将发挥更大的作用。

4 讨论

文献[9]认为,整体强度折减法造成塑性区被夸大和不规范的根本原因是由位移型协调元本身的插值模式所致。本文从坡体应力条件分析,自重作用使深部坡体单元的应力状态高于顶层单元的应力状态。图 10 中,虚线应力圆代表坡体深部底层单元的应力状态,实线应力圆代表顶层单元的应力状态。当折减强度参数后,强度包络线将下移,底层深部单元将首先达到屈服状态,因此在强度折减过程中深部单元将首先出现塑性和破损(见图 7)。

本文提出的动态强度折减法较好地克服了破损区和塑性区过大的缺陷,量化地动态折减破损区的强度参数。边坡潜在滑动面不断孕育、发展演化,最终进入累进性破坏而贯穿,本文计算获得的破损区演化过程(见图 5)符合这一特点。

在均质边坡的稳定性评价中,整体强度折减法可以获得边坡的整体安全系数,而动态强度折减法

获得的折减系数 K 并不代表边坡的安全系数 (如图 5(f) 中 $K = 1.43$), 还需结合整体和动态强度折减法进一步研究边坡的稳定性评价方法。

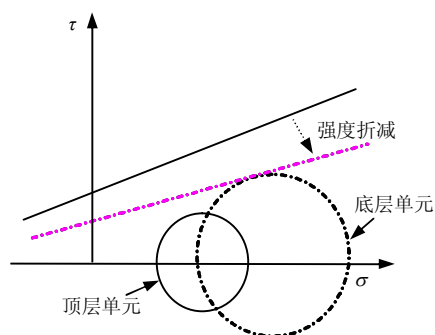


图 10 强度折减法中坡体单元应力状态

Fig.10 Stress state of slope element by strength reduction method

实际边坡稳定性分析中还应该考虑边坡坡顶的拉破坏, 在今后的研究工作中还要将开展坡体抗拉强度折减的研究。在动态强度折减法计算中, 为获得真实可信的变形值, 应准确把握屈服准则和本构关系^[22]、岩土体力学参数和应力场等条件, 同时要恰当控制网格单元的质量和大小, 避免计算误差导致的破损区扩大。本文提出的动态强度折减计算方法是边坡渐进破坏模拟的一种探索, 供同行交流和探讨。

5 结 语

通过动态地折减局部破损坡体的强度参数, 使边坡潜在滑动面渐进演化至贯通, 真实地再现了边坡潜在滑动面的形成过程, 克服了整体强度折减法破损区过大的缺陷。

动态强度折减法可直接利用破损区获得边坡的滑动面, 克服了剪应变增量无统一标准的缺点, 破损区与位移变化趋势演化过程也具有良好的一致性。

动态强度折减法可有效解决折减范围的问题, 是强度折减法的一种改进和发展, 为边坡失稳的全过程模拟和定量稳定评价开辟了新的途径。

参 考 文 献

[1] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57—61.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(10): 57—61.

[2] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM to soil and rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(19): 3381—3388.

[3] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59—70.

[4] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835—840.

[5] 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[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis of safety factor of slope stability by strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 343—346.

[6] 张振华, 冯夏庭, 周辉, 等. 基于设计安全系数及破坏模式的边坡开挖过程动态变形监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 603—612.
ZHANG Zhen-hua, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Research on dynamic early warning method of slope deformation monitoring during excavation based on designed safety factor and failure mode[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 603—612.

[7] 栾茂田, 武亚军, 年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1—8.
LUAN Mao-tian, WU Ya-jun, NIAN Ting-kai. A criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(3): 1—8.

[8] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626—628.
ZHENG Hong, LI Chun-guang, LEE C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 626—628.

[9] ZHENG H, LIU D F, LI C G. On the assessment of failure in slope stability analysis by the finite element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, 41: 629

- 639.
- [10] 邓建辉, 魏进兵, 闵弘. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I): 滑带土抗剪强度参数反演分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 896—900.
- DENG Jian-hui, WEI Jin-bin, MIN Hong. 3D stability analysis of landslides based on strength reduction(I): Back analysis for the shear strength of slip soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 896—900.
- [11] EBERHARDT E. Twenty-ninth Canadian geotechnical colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(4): 484—510.
- [12] 徐卫亚, 肖武. 基于强度折减和重度增加的边坡破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 505—511.
- XU Wei-ya, XIAO Wu. Study on slope failure criterion based on strength reduction and gravity increase method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 505—511.
- [13] 唐春安, 李连崇, 李常文, 等. 岩土工程稳定性分析RFPA 强度折减法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1522—1530.
- TANG Chun-an, LI Lian-chong, LI Chang-wen, et al. RFPA strength reduction method for stability analysis of geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1522—1530.
- [14] 杨光华, 钟志辉, 张玉成, 等. 用局部强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 53—58.
- YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, ZHANG Yu-cheng, et al. Slope stability analysis by local strength reduction method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp. 2): 53—58.
- [15] 薛雷, 孙强, 秦四清, 等. 非均质边坡强度折减法折减范围研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 275—280.
- XUE Lei, SUN Qiang, QIN Si-qing, et al. Scope of strength reduction for inhomogeneous slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 275—280.
- [16] 王成华, 高文梅. 强度折减有限元法分析成层土坡的适用性[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(3): 193—196.
- WANG Chen-hua, GAO Wen-mei. Feasibility of shear strength reduction FEM in analysis of layered slope stability[J]. **Journal of Shandong University of Architecture and Engineering**, 2006, 21(3): 193—196.
- [17] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17), 3083—3087.
- ZHUO Hui, ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, et al. Analysis of rock mass stability in tunnel and underground engineering based on yield approach index[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3083—3087.
- [18] ZHANG C Q, ZHOU H, FENG X T. An index for estimating the stability of brittle surrounding rock mass: fai and its engineering application[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 44(4): 401—414.
- [19] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(2): 785—812.
- [20] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104—1112.
- XU Qiang, TANG Ming-gao, XU Kai-xiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1104—1112.
- [21] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544.
- HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.
- [22] 杨光华, 张玉成, 张有祥. 变模量弹塑性强度折减法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1506—1512.
- YANG Guang-hua, ZHANG Yu-cheng, ZHANG You-xiang. Variable modulus elastoplastic strength reduction method and its application to slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1506—1512.