

基于局部强度阶梯折减法的边坡渐进破坏研究*

侯世伟¹, 马士贺¹, 李宏男^{1,2}, 张皓¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过强度折减法获取边坡的潜在滑裂带是目前数值计算广泛使用的方法, 研究边坡滑裂带形成的渐进过程及坡体内部土体的应力状态具有重要的理论意义和工程价值。基于边坡破坏的渐进性思想, 针对均质边坡提出了一种局部强度阶梯折减的方法。该方法以屈服接近度(YAI)作为判别土体是否存在破损区的评价标准, 将局部破损区按不同破损次序分配予不同的折减系数, 利用通用软件ABAQUS对局部坡体进行强度折减计算, 研究边坡渐进变形过程, 直至边坡发生整体破坏。计算结果表明, 坡体内部初始破损区参与了潜在滑裂面的形成过程, 对边坡后期渐进变形具有贡献; 有效解决了传统强度折减法潜在滑裂面上折减区和非折减区边界处的塑性应变值的跳跃性问题, 合理地演化了边坡的渐进失稳进程。

关键词: 局部强度阶梯折减; 边坡; 滑裂带; 渐进破坏; 数值模拟

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0072-07

Research on Progressive Slope Failure based on Stepwise Reduction Method of Local Strength

HOU Shiwei¹, MA Shihe¹, LI Hongnan^{1,2}, ZHANG Hao¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Ministry of Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The strength reduction method is one of the widely used methods to obtain the potential slip zones of slopes in numerical calculation. It is of great significance to study the progressive process of slip surface and the stress state of the soil slope. Based on the idea of progressive failure, a method to stepwisely reduce local soil strength for the homogeneous slope is proposed. At first, the yield approach index (YAI) is regarded as the evaluation index of the damaged area, and the local breakage areas were assigned to different reduction coefficients according to the damage order. Then, the local slope body was calculated in ABAQUS and the slope progressive deformation was studied until the overall failure. The results show that the internal initial breakage area of the slope is involved in the formation process of the potential sliding surface and contributes to the progressive deformation of the slope in the later stage. The leaping problem of the plastic strain value at the boundary of the reduction area on the potential sliding surface was effectively solved, and the progressive failure process of the

* 收稿日期:2018-02-25;修回日期:2018-05-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1100404)、国家自然科学基金项目(51308355)、辽宁省自然科学基金项目(20170540736)资助

作者简介:侯世伟(1982-),女,副教授,硕导,博士。主要从事土体渐进破坏模拟研究。Email:hsw1375@126.com

slope is reasonably reproduced.

Keywords: local strength stepwise reduction; slope; sliding surface; progressive failure; numerical simulation

引言

边坡的稳定性评价方法中,传统的极限平衡方法和依托计算机平台的数值分析方法占据着主要地位。随着计算机技术的不断发展,数值分析方法可以更多地将土体的本构关系考虑在内进行更为精确的计算分析^[1],在模拟和分析边坡的渐进破坏过程中有一定优势。强度折减法作为数值分析的一种方法,最早由 O.C.Zienkiewicz 等^[2]于 1975 年提出。该方法简单实用,把岩土体材料的力学参数按一定程度进行强度折减,使土体破坏程度不断发展,再依据给定的判断边坡失稳的判据,最终确定出边坡达到临界失稳的状态并给出边坡的安全系数^[3-5]。

之后,不少学者对强度折减法的理论分析及工程应用进行了探讨。在搜索边坡滑裂面方面,闫超等^[6]通过分析边坡剪切滑裂带的对数螺旋曲线分布,确定出多组剪切滑裂带,并折减其局部强度,得到相应的滑裂带;李小春等^[7]经过计算归类得到边坡个体单元的安全程度,对其进行划分,分别给予不同的折减系数进行强度折减,获得了相应的滑裂带。薛雷等^[8]把计算收敛性准则和特征点位移突变准则分别作为判据并利用内嵌 FISH 语言,开发了可以自动锁定安全系数的强度折减程序,对边坡折减范围进行了研究。H.Lin 等^[9]将边坡剪切出口以下的岩体看作弹性材料,然后不断选取不同岩质体部位进行计算,以此来确定需要折减的范围。杨光华等^[10]先利用整体强度折减法确定出滑裂带,再对该区域进行局部折减研究,该方法对局部参数进行强度折减是可行的。陈国庆等^[11]通过对岩土体破坏程度的划分动态地获取到边坡的局部破损区,利用动态折减计算的方法成功捕捉到边坡潜在的滑裂面。

多数学者开展了局部折减研究,但都没有考虑坡体内部破损区对边坡渐进破坏过程中的影响,对边坡的破坏演化过程解读不充分。而且,由于其折减区域和折减系数的持续加大,边坡折减区和非折减区的边界处的塑性应变差值过大,不能真实表现

边坡失稳的渐进性和连续性。基于此,本文以屈服接近度作为破损区的评判指标,将局部破损区按不同破损次序分配予不同的折减系数,对坡体局部强度进行了阶梯式折减计算。研究了边坡失稳破坏的渐进性,并对潜在滑裂面的整个形成过程进行了分析。

1 局部强度阶梯折减法

边坡土体的破坏具有明显的渐进性,边坡体的失稳也都是由局部不利部位开始发展,随后逐步向周围土体扩张,直至最后破坏,形成一条稳定的滑裂带。为了更好地研究边坡破坏的一系列渐进过程,本文提出了局部强度阶梯折减的概念。

1.1 局部强度阶梯折减的基本原理

局部强度阶梯折减,顾名思义就是将边坡的局部土体按阶梯式折减。首先,把边坡初始约束条件及相关参数代入模型进行计算,得到初始局部破损区 S_1 ;或者先对边坡进行一次整体强度折减,以确保获得初始破损区。再对破损区按一定折减系数进行强度折减,以获得新的破损区 S_2 ;对不同折减次数得到的破损区 S_1 和 S_2 给予不同的折减系数,以保证潜在滑裂面上的土体强度折减参数保持过渡性和连续性。随着边坡局部土体的折减区域和折减系数的持续加大,该部位土体强度将逐渐减小,最终边坡形成一条明显的贯通区。

折减方法采用:

$$c' = \frac{c}{k}; \tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{k} \quad (1)$$

式中, c 为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角; c' 为局部破损区黏聚力; φ' 为局部破损区内摩擦角; k 为强度折减系数。

屈服准则选取的是岩土体材料常用的 Mohr-Coulomb 屈服准则,其表达式为:

$$F(\sigma) = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi + (\cos \theta_\sigma - 1/\sqrt{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \sqrt{J_2} \quad (2)$$

式中, φ 为土体内摩擦角; I_1 为第一主应力不变量; J_2 为第二偏应力不变量; θ_σ 为应力罗德角^[12]。

对于破损区的划分,本文选用屈服接近度(YAI)作为判断标准。其概念可表达为:描述一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比, $YAI \in [0, 1]$ ^[13]。文献[13]基于最不利应力路径给出其相对于某一强度理论的定义。文献[14]在此基础上基于最有利计算应力路径给出其相对于某一强度理论的定义。两种屈服接近度的定义对于平直型屈服函数来说,计算方法是一样的。所以,对于Mohr-Coulomb屈服函数其YAI的计算公式均可表示为:

$$YAI = \left[\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - \sqrt{J_2} (1/\sqrt{3} \sin \theta_s \sin \varphi - \cos \theta_s) - c \cos \varphi \right] / \left(\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi \right) \quad (3)$$

基于文献[15]的试验结果,当加载到峰值强度的80%时,岩土体材料会开始产生不同程度的裂隙,本文设定边坡中任一点状态处于 $YAI \in [0.2, 1]$ 时为安全区, $YAI \in [0, 0.2]$ 时为破损区。 YAI 值最小为0时,表示坡体内该点达到屈服状态; YAI 值最大为1时,表示该点处于最稳定状态。需要指出的是,本文引用文献[15]的观点将破损区间定义为 $YAI \in [0, 0.2]$,只是为了将破损标准量化,给其一个破损界值。破损区同样也可以定义在其他合理区间,破损区界值的大小,只影响破损区判断的早晚时间和折减系数,并不会影响判断整体边坡的破损情况及破损趋势。

1.2 边坡渐进破坏具体模拟步骤

边坡渐进破坏局部阶梯折减过程如图1所示。

(1) 根据边坡的相关材料参数及边界条件,建立相应的数值计算模型。

(2) 令 $k=1$,先代入边坡的初始材料参数,根据式(3)计算边坡土体内部任一点的YAI值,并绘制等值线图,给出破损标准($YAI < 0.2$),将破损面积大于50%的单元定为破损单元,从而确定出破损区。如果没有出现破损区,则加大折减系数 k 值,对整体边坡单元进行强度折减,再重新进行有限元计算,直到边坡出现初始局部破损区为止。

(3) 记初始破损区为 S_1 ,确定折减系数 k_1 ,然后按式(1)计算破损部位的材料参数,最后将新的材料参数按上一步的折减计算过程进行有限元计算,并判断新的破损区。

(4) 记第1次进行局部强度折减时得到的新破损区为 S_2 ,则第 i 次进行局部强度折减时得到的新

破损区为 S_{i+1} (S_{i+1} 为最新破损区);将折减系数 k_i 赋予最新破损区 S_{i+1} , k_{i-1} 赋予破损区 S_i ,以此类推,直至将折减系数 k_i (k_1, k_2, \dots, k_i 依次增大)赋予初始破损区 S_1 ,以此来保证折减区向非折减区的力学参数的平滑过渡,避免由折减区和非折减区相接处土体力学参数的跳跃性而带来的与实际不符的塑性应变区。对于每一计算步 k 值的增量是通过试验法确定的。每一步 k 值增量的大小,都会直观反映在破损区的面积增加上。 k 值的增量较大时,下一步的破损区面积的增幅相对也会较大。但是,并不会对最终边坡发生贯通破坏时的 k 值的确定产生较为明显的影响。所以,前期破损区计算时,可采用较大增量;后期破损区破坏较为敏感时,可采用更精细的增量来获得更精确的计算结果。

(5) 对不同阶段出现的破损区按不同的折减系数进行强度折减,并进行有限元计算。随着计算的进行,坡体局部破损区 k 值不断增大,其面积也不断向坡顶延伸扩展,边坡潜在滑裂面逐步显现,并最终形成一条完整塑性贯通区,完成边坡的渐进破坏模拟。

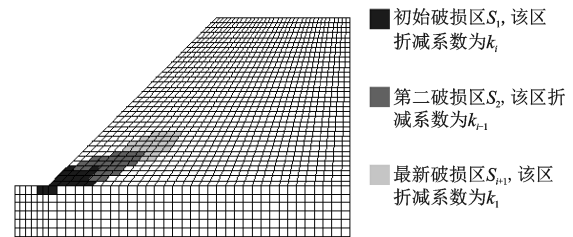


图1 局部强度阶梯折减示意

Fig.1 Sketch of local strength stepwise reduction method

2 算例分析

本算例采用的是E.M.Dawson等^[16]分析的一个均质土坡。该算例已经被国内外诸多学者用很多方法(如FLAC等)进行了验证性分析^[17],因此,该算例计算结果可以验证本方法在ABAQUS中应用的合理性和可行性。

边坡几何尺寸如图2所示,坡高 $H=10.0$ m,坡角 $\beta=45^\circ$,土体容重 $\gamma=20$ kN/m³,弹性模量 $E=100$ MPa,泊松比 $\nu=0.35$,黏聚力 $c=15.48$ kPa,内摩擦角 $\varphi=24.46^\circ$ 。土体材料符合Mohr-Coulomb屈服准则并采用非关联流动法则。边坡应力场为自重应力场。边界条件如图2所示,限制边坡左右两

侧水平位移及底边的水平和竖向两个方向位移。

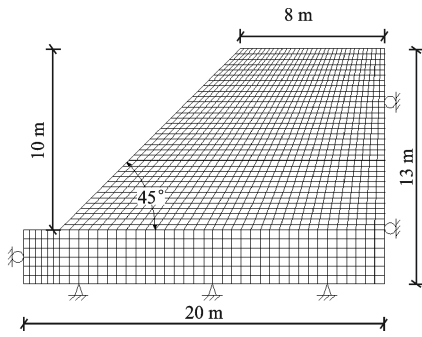


图2 边坡模型示意

Fig.2 Sketch of the soil slope model

2.1 边坡渐进破坏过程模拟结果分析

在 $k=1$ 的情况下,代入边坡的相关参数对图2所示模型进行弹塑性力学平衡,计算坡体单元的YAI值,并绘制出YAI等值线图,得到边坡的初始局部破损区,如图3所示。

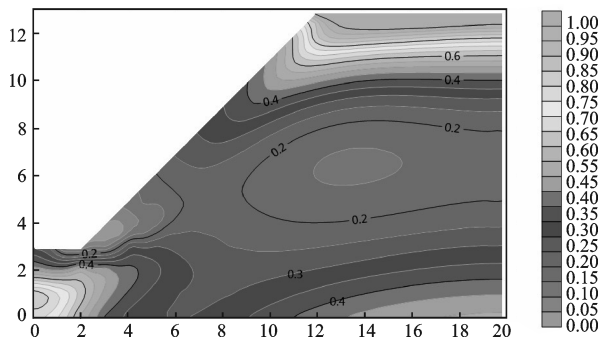


图3 边坡初始YAI分布

Fig.3 Initial YAI distribution of slope

由图3可见,坡脚位置及坡体内部中间部位 $YAI \in [0.2, 1]$,即首先达到了破损标准。坡脚位置首先出现破损区是符合我们对边坡破坏的常规认识的。对于坡体内部中间部位出现的破损区,认为这是由于坡体内部土体受重力较大,加之边坡临空面的自由度在水平方向不受限制,导致该部分土体的水平变形不能受到有效约束,使其处于单向受压状态,故该部分土体的YAI值相对较小。但其四周土体的YAI值较大,会对其提供一定的安全保障,故该部分土体相对安全。文献[18]利用可靠度分析方法确定了边坡最危险的土条位于坡体内部中上部位,因此坡体内部的破损区不应该被忽视。而坡脚水平线以下土体由于受到两侧及底部位移的

约束,其在重力作用下相当于处于三向受压状态,故其即便受重力较大也能处于一种较安全状态,YAI值也较上部土体大。文献[19]也指出,在应用其他软件模拟计算时,也会得到坡体内部存在成片塑性区的结果。

图4是不同折减系数下边坡土体各单元的YAI值的变化过程,同时也详尽地展示了坡体的整个渐进失稳过程。初始破损区 k 值在 $1.0 \sim 1.2$ 变化时,坡脚破损区的发展较为缓慢; k 值达到 1.23 以后,破损区由坡脚延伸到了坡体中部,并且对坡体中部破损区有继续冲破的趋势。最终, k 值达到 1.28 时,破损区由坡脚达到了坡顶,形成了贯通区,边坡体也随之达到临界失稳状态。此时,坡脚初始破损区的 k 值为 1.28 ,与原模型的标准折减系数 1.25 相近,表明该方法在ABAQUS中的模拟运用正确合理。该系数略大于原模型的标准折减系数也与文献[10]中局部强度折减法安全系数略大于整体强度折减法安全系数的结果相吻合。

由图4(c)~(f)可见,在坡体中部出现了比坡脚处的YAI值还要小的破损区域,该区域的形成是由于坡脚破损区向上延伸到了坡体内部受重力较大的区域,致使该部位水平方向的限制效果进一步减弱,从而造成其危险程度加大、YAI值减小的结果。

图5是折减计算过程中坡脚和坡体内部破损区面积变化曲线,表现了坡脚破损区和坡体内部破损区的发展过程。由图5可知,在折减过程中,局部阶梯折减法得到的最终坡体内部破损区面积是 53.55 m^2 ,较最初破损区面积仅增加 26% 。而利用整体强度折减法获得的坡体内部破损区则呈现明显的持续扩张的趋势,计算完成时的破损区面积是初始计算时破损区面积的3倍。这表明在折减计算过程中,局部强度阶梯折减法获得的坡体内部破损区面积较为稳定,能有效控制坡体内部破损区的大面积开展,能真实地展现边坡的破坏过程。大量试验及模拟结果表明,土体渐进破坏也是应变局部化的一个过程。坡脚处的破损区一开始发展较为平缓,当 k 值达到 1.23 后,有一个明显加速破坏的过程。结合图4(c),当 $k=1.23$ 时,坡脚破损区开始“侵入”坡体内部破损区,所以认为坡脚和坡体内部破损区的交汇是导致边坡后期加速破坏的原因,实际工程中应重视内部破损区范围的预测研究。

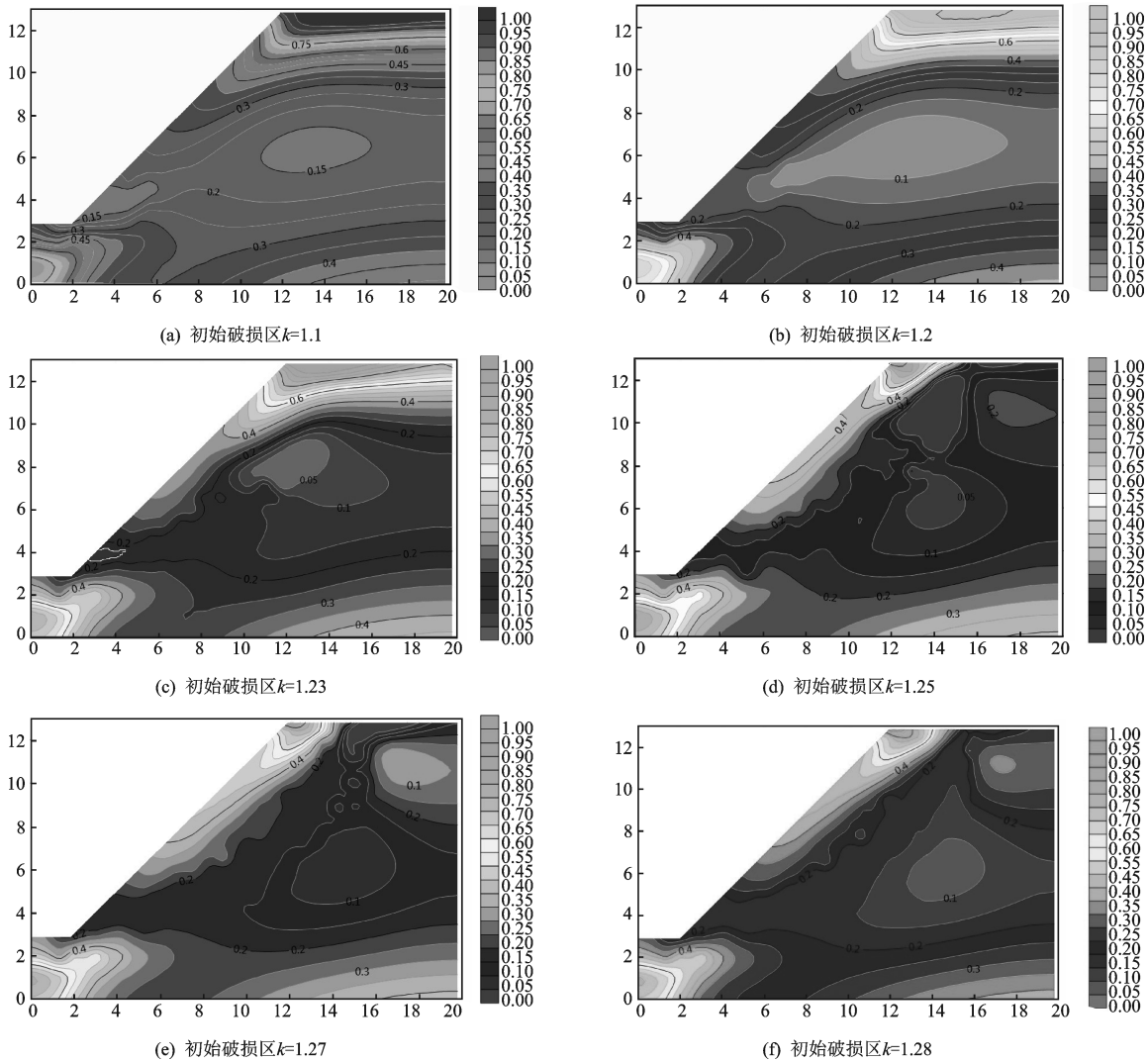


图4 折减计算过程中边坡YAI渐变过程

Fig.4 Gradual process of slope YAI under reduction

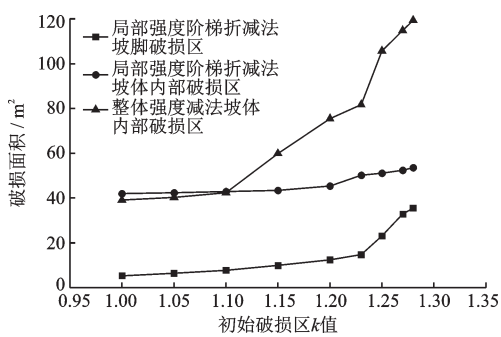


图5 折减计算过程中坡脚和坡体内部破损区面积变化

Fig.5 Changes in damaged area of slope foot and slope interior under reduction

2.2 潜在滑裂带上折减区边缘塑性应变差值分析

对于局部破损区采用统一折减系数的方法,如动态强度折减法,在折减区与非折减区的接触部位

会出现较大的塑性应变差值,如图6所示,这也会使得坡体塑性区有较大的跳跃性,不符合边坡渐进破坏的概念。此外,当破损区面积较大时,其折减系数也会较大,导致折减区和非折减区的土体强度参

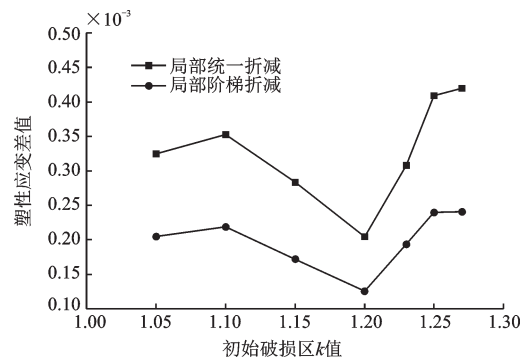


图6 不同折减方式中折减边界的塑性应变差值

Fig.6 Differences of plastic deformation of the boundary in different reduction methods

数差异较大,不符合真实的边坡强度参数分布。本文采用了局部阶梯折减的方法,使强度参数变化由折减区到非折减区有一个过渡的过程,大大减小了折减区和非折减区接触部位的塑性应变差值。计算结果显示,使用局部强度阶梯折减法平均降低了接触部位40%的塑性应变差值,克服了潜在滑裂面上的塑性应变值的跳跃性,更真实地体现了坡体的渐进失稳过程。

3 结语

本文利用局部强度阶梯折减的方法对边坡进行强度折减过程模拟,再现了边坡的渐进失稳过程。研究结果显示,边坡会首先在坡脚和坡体内部出现破损区。并且,该方法可以有效地控制坡体内部破损区的大面积开展,对边坡的渐进破坏模拟更符合真实的边坡失稳过程。通过对破损区发育过程的详细记录和深入分析,认为坡体内部的破损区是造成边坡后期加速破坏的主要因素,因此在实际工程应用分析中不能忽略坡体内部破损区的存在。

对局部强度进行阶梯折减计算可以保证边坡破坏过程的渐进性,平均降低折减区和非折减区接触部位40%的塑性应变差值,有效地解决了局部强度统一折减方法中潜在滑裂面上的塑性应变值的跳跃性问题,使塑性区变化保持连续性,真实地模拟边坡的破坏过程。

在算例的计算过程中,破损区边界部分的确定与计算模型网格的大小关系密切,显然,越精细的网格划分确定得到的破损区边界越精确。但该问题并不会对边坡的破坏形式及破坏发展趋势产生明显影响。在接下来的研究工作中考虑利用梯度塑性理论,对边坡材料的屈服方程引入软化参数的梯度项,限制模型计算的网格依赖性,以此来更客观地得到计算结果。

局部强度阶梯折减法是对传统强度折减法的继承和发展,从折减系数的阶梯折减上就能体现渐进性思想,更能真实地模拟边坡的失稳破坏过程。

参考文献:

[1] 刘金,李勤昌,马秀媛.有限元强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J].山东大学学报(工学版),2016,46(4):83-88.
Liu J, Li Q Ch, Ma X Y. Application of strength reduc-

tion FEM method in slope stability analysis[J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2016, 46(4):83-88.(in Chinese)

[2] 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.

[3] 栾茂田,武亚军,年廷凯.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 M T, Wu Y J, Nian T K. The plastic zone criterion and its application of slope failure in strength reduction finite element method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(3):1-8.(in Chinese)

[4] 陈冉,刘飞.基于双折减系数法的土坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报, 2013, 33(增1):105-110.
Chen R, Liu F. Soil slope stability analysis based on dual reduction factor method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(Sup 1):105-110.(in Chinese)

[5] 张爱军,莫海鸿.有限元强度折减法中边坡失稳位移突变判据的改进[J].岩土力学, 2013, 34(增2):332-337.
Zhang A J, Mo H H. Improving displacement mutation criterion of slope failure in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2):332-337.(in Chinese)

[6] 闫超,刘松玉,籍晓蕾.一种基于强度折减法的次级滑动面分析方法研究[J].岩土力学, 2016, 37(4):935-942.
Yan Ch, Liu S Y, Ji X L. Research on a secondary sliding surface analysis approach based on strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4):935-942.(in Chinese)

[7] 李小春,袁维,白冰,等.基于局部强度折减法的边坡多滑面分析方法及应用研究[J].岩土力学, 2014, 35(3):847-854.
Li X Ch, Yuan W, Bai B, et al. Analytic approach of slope multi-slip surfaces based on local strength reduction method and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3):847-854.(in Chinese)

[8] 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 L, Sun Q, Qin S Q, et al. Scope of strength reduction for inhomogeneous slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):275-280.(in Chinese)

[9] Lin H, Cao P, Gong F Q, et al. Directly searching method for slip plane and its influential factors based on critical state of slope[J]. Journal of Central South Uni-

- versity of Technology, 2009, 16(1):131-135.
- [10] 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2):53-58. Yang G H, Zhong Zh H, Zhang Y Ch, et al. Slope stability analysis by local strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 2): 53-58. (in Chinese)
- [11] 陈国庆, 黄润秋, 周 辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研[J]. 岩土力学, 2013, 34(4):1 140-1 146. Chen G Q, Huang R Q, Zhou H, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1 140-1 146. (in Chinese)
- [12] 郑颖人, 孔 亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. Zheng Y R, Kong L. Geotechnical plastic mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 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):3 083-3 087. Zhou H, Zhang Ch Q, Feng X T, 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): 3 083-3 087. (in Chinese)
- [14] 高丽燕, 于广明, 赵建锋, 等. 材料破坏准则下的屈服接近度分析与应用[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(5):73-81. Gao L Y, Yu G M, Zhao J F, et al. Analysis and applica-
- tion of yielding approach based on material strength criteria[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(5): 73-81. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Ge'otechnique, 1999, 49(6):835-840.
- [17] 费 康, 彭 劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017. Fei K, Peng J. ABAQUS geotechnical engineering examples [M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 谢新宇, 冯 香, 吴晓明. 应变软化土坡渐进破坏的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增2):679-684. Xie X Y, Feng X, Wu X M. Reliability analysis of progressive failure of strain softening slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 2):679-684. (in Chinese)
- [19] 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 H, Li Ch G, Li Zh F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5):626-628. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)