

文章编号: 0451-0712(2016)12-0019-05

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

基于局部强度折减法的多级边坡潜在滑动面分析

杨建成¹, 邓 琴²

(1. 云南建投建设集团有限公司 昆明市 650032;

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 武汉市 430071)

摘 要: 目前山区高速公路经常出现多级边坡, 传统的全局强度折减法只能求得边坡的最危险滑面, 而次级滑动面往往会遗漏。针对该问题, 提出一种新的局部强度折减法。该方法将已进入塑性区和未考虑破坏的区域采用弹性材料代替, 其他区域土体进行强度折减, 直至计算不收敛, 可以得出多级边坡的潜在滑动面。通过二级边坡和复杂边坡算例验证了该方法的可行性, 且获得的边坡潜在滑面可为工程加固提供建议和参考。

关键词: 多级边坡; 局部强度折减法; 塑性区; 潜在滑面

边坡的稳定性计算方法目前主要有极限平衡法^[1]、极限分析法^[2]和强度折减法^[3]。其中极限平衡法需要事先知道滑面的位置和形状, 极限分析法目前只是针对简单边坡可以进行有效的分析。相比较而言, 强度折减法由于无需提前假定滑动面即可获得边坡的潜在滑面与安全系数, 因而获得广泛应用^[4-5]。随后, 大量学者对其开展了大量的探索和创新, 包括考虑双参数的强度折减^[6]、动态强度折减^[7]、变模量强度折减^[8]、强度折减安全系数的取值^[9]等, 这些都大大促进了强度折减法在工程中的应用及推广。然而, 通常的强度折减法是针对整个研究区域进行折减, 仅能计算出最危险滑面和相应的最小安全系数, 不能计算局部潜在滑面和安全系数^[10-11]。因此, 该方法在涉及到多级边坡时会受到一定的限制。为了解决这个问题, 许多国内外学者进行了一些有益的探索, 如 Cala^[12]充分利用有限差

分软件 Flac3D 的计算大变形、非线性的优势, 采用强度折减法计算边坡的多滑面。该方法需要手工调整计算步数, 且需耗费大量的时间。刘明维^[13]通过约束潜在滑面的剪出口方式, 采用有限元的强度折减进行潜在多滑面的搜索, 然而所选算例仅是针对有确定滑带的边坡, 对未知滑带的边坡计算效果如何并未进行分析探讨。Lin Hang^[14]通过调整弹性区的范围来得到边坡的多个潜在滑动面, 该方法只是针对简单边坡进行了分析, 未用到多级边坡的滑面确定。李小春^[15]通过定义单元安全系数的概念, 对各个单元集合的强度参数进行折减计算来得到边坡不同安全系数的滑面。肖锐铎^[16]、薛雷^[17]等考虑岩土体多次局部强度折减, 可得到边坡不同深度、不同岩层控制的多级潜在滑动面, 然而需要根据实际情况分析局部强度折减的适用性。

本文综合上述方法的优点, 提出一种新的局部

基金项目: 云南省交通运输厅科技项目, 云交科 2014(A)01

收稿日期: 2016-03-21

20%; all three kinds of the warm mix technique can significantly reduce the mixture construction temperature, the best cooling effect is Evotherm which can reach 20°C ~ 30°C, and 12% dosage can improve the aging of rubber asphalt mixture performance, but the effect is not obvious; Sasobit can lead a maximum increasing on dynamic stability of mixture, and a certain influence on the low temperature performance, but little influence on high temperature performance; Tor can improve the compatibility of rubber powder particles and asphalt, and the storage stability of rubber asphalt, also significantly improve the high temperature viscosity of the rubber asphalt and the performance of a high or low temperature.

Key words: crumb rubber; construction stage; aging reaction; interactive response; warm mix technology

强度折减法。该方法基于有限元软件 ABAQUS,对多级边坡进行逐层的潜在滑面搜索。其中已搜索到的潜在滑面所在单元和将要计算层边坡以下的区域变换为弹性材料,其他区域按照原参数进行强度折减计算,直至计算到最后一层区域,并应用于双台阶边坡和复杂边坡来验证该方法的可行性。

1 局部强度折减法分析

1.1 计算原理

强度折减法是由 Zienkiewicz 在 1975 年提出的,其基本原理是在研究区域进行弹塑性计算时,通过不断降低岩土体的强度参数(包括黏聚力 c 和内摩擦因数 $\tan\varphi$),使得计算达到不收敛状态,此时得到的强度折减系数就是安全系数。也就是:

$$c' = \frac{c}{F}, \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F}\right)$$

式中: c' 、 $\tan\varphi'$ 代表折减后的强度参数; F 表示折减系数。

安全系数的确定目前主要有 3 种标准,包括:迭代不收敛;计算区域塑性区贯通;关键点位移突变。本文采用迭代不收敛时的折减系数为安全系数。

1.2 计算流程

假定一个存在 n 级的边坡,如图 1 所示。在有限元软件 ABAQUS 的背景下,其分析计算的具体流程如下:

(1)首先将多级边坡按照台阶进行区域划分。对于 n 级边坡,可将其从上至下划分为 $n+1$ 个区域,如图 1 所示。其中需要注意的是,台阶宽度可以为零,这里为了表述明确,均给台阶一定的宽度。

(2)对已划分区域的多级边坡进行有限元网格划分,且施加边界条件。

(3)针对第 1 阶边坡(即区域 1):将区域 1 赋予真实的弹塑性材料,区域 2~区域 $n+1$ 设置为弹性材料进行强度折减计算,得到区域 1 的潜在滑面和安全系数。

(4)针对第 2 阶边坡(即区域 2):将区域 1 中控制边坡破坏(也就是等效塑性应变集中区域)的单元和区域 3~区域 $n+1$ 材料设置为弹性材料,进行强度折减分析得到区域 2 的潜在滑面和安全系数。

(5)重复步骤(3),进行区域 3 的潜在滑面搜索,直至到最后一个区域 $n+1$ 。需要注意的是,在进行区域 n 的潜在滑面搜索时,需要将区域 1~区域 $n-1$ 中控制边坡破坏的单元均设置为弹性材料。

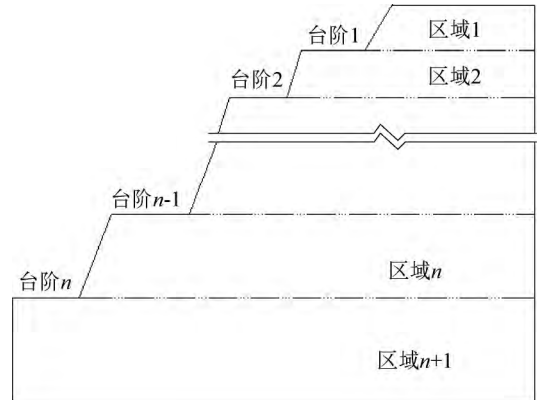


图 1 n 级边坡示意

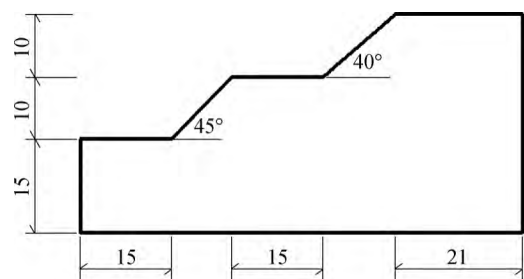
至此,就可以搜索出 n 级边坡中每级边坡的潜在滑面和相应的安全系数,并可根据安全系数的大小判断出整个边坡的最危险滑面。

需要说明的是:(1)在使用有限元强度折减分析边坡问题时,在计算不收敛时往往会出现等效塑性应变集中区域,即控制边坡破坏单元,在 ABAQUS 后处理文件中可通过控制等效塑性应变最大最小值将其获取;(2)除区域 1 以外,其他区域进行强度折减搜索得到的滑面可能会通过已经搜索过滑面的区域,如区域 2 搜索的潜在滑面可能会通过潜在滑面 1。这和边坡的形态和材料参数有关。

2 算例

2.1 双台阶边坡

考虑几何形状如图 2 所示的算例。其中材料参数的取值如表 1 所示。



单位:m

图 2 双台阶边坡几何示意

表 1 双台阶边坡岩土参数

参数	重度 kN/m ³	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 kPa	内摩擦角/(°)	剪胀角 (°)
参数值	20	10.2	0.35	11	23	11

根据上面的分析,首先将双台阶边坡分为 3 个

区域,从上至下分别是区域1~区域3,如图3所示。

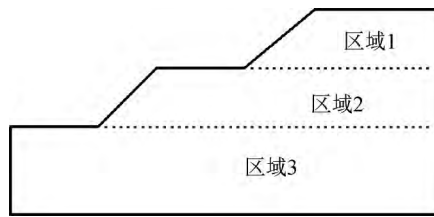
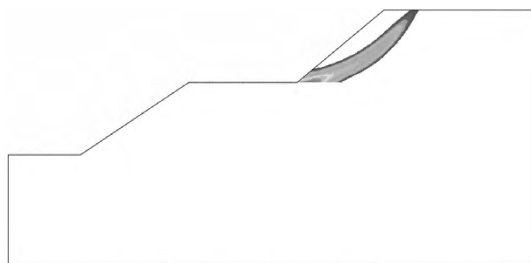
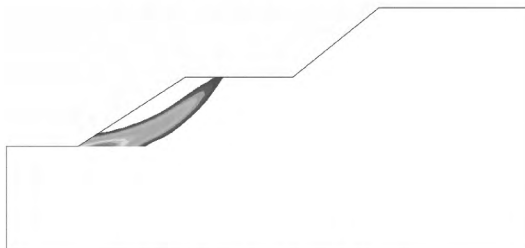


图3 区域划分

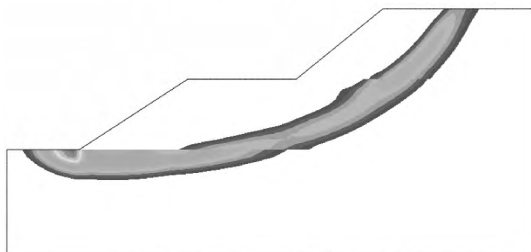
根据上述分析步骤,获得各阶边坡的潜在滑面和安全系数如图4所示。将结果和文献[12]比较,可以看出,本文方法得出的潜在滑面和安全系数是可行的。从图4中可以看出,该方法不仅可以搜出各阶边坡的潜在滑面,还可以搜索出边坡整体滑移时的潜在滑面,如图4(c)所示。根据安全系数的大小可知,下台阶的潜在滑面是该边坡最危险滑面。



(a) 区域1的潜在滑面($F=1.308$)



(b) 区域2的潜在滑面($F=1.109$)



(c) 区域3的潜在滑面($F=1.875$)

图4 潜在滑面示意

2.2 复杂边坡

现考虑一复杂边坡,该算例选自文献[19]。边坡的几何尺寸和材料参数分别如图5和表2所示。

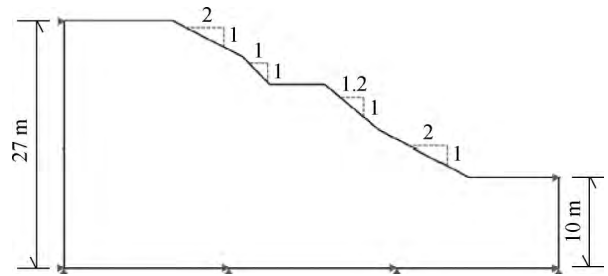


图5 复杂边坡示意

表2 复杂边坡岩体参数

参数	重度 kN/m ³	弹性模量 MPa	泊松比	黏聚力 kPa	内摩擦角/(°)	剪胀角 (°)
参数值	20	14	0.3	4	25	12

从图5中可以看出,该边坡属于4级边坡,因此需要划分为5个区域,如图6所示。和双台阶边坡比较可以看出,该边坡在区域1和区域2、区域3和区域4之间台阶宽度为0m,因此搜索到的潜在滑面和双台阶边坡有不同之处,如图7所示。其中图7(b)显示搜索到的潜在滑面通过了区域1和区域2,图7(d)显示搜索到的滑面通过了区域3和区域4,图7(e)显示搜索到的潜在滑面通过了整个区域。这说明台阶宽度对潜在滑面的搜索是有影响的。

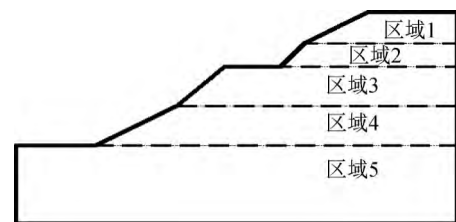


图6 复杂边坡分区示意

图8来自文献[20]。该图显示的是采用强化强度法搜索到的边坡最危险滑面和潜在滑面。比较图7和图8可知,采用本文方法搜索得到的潜在滑面和图8基本一致,但是安全系数有一定的差异,且对于图8中的 $F=1.38$ 的滑面没有搜索到。作者认为这和计算方法、有限元网格划分等因素有关,其结果是可以接受的。

3 结语

本文针对目前普遍采用的强度折减法只能搜索出最危险滑面的特点,结合已有局部强度折减法的特点,提出一种新的局部强度折减法。该方法可以搜索出多级边坡中每阶边坡的潜在滑面和边坡的整

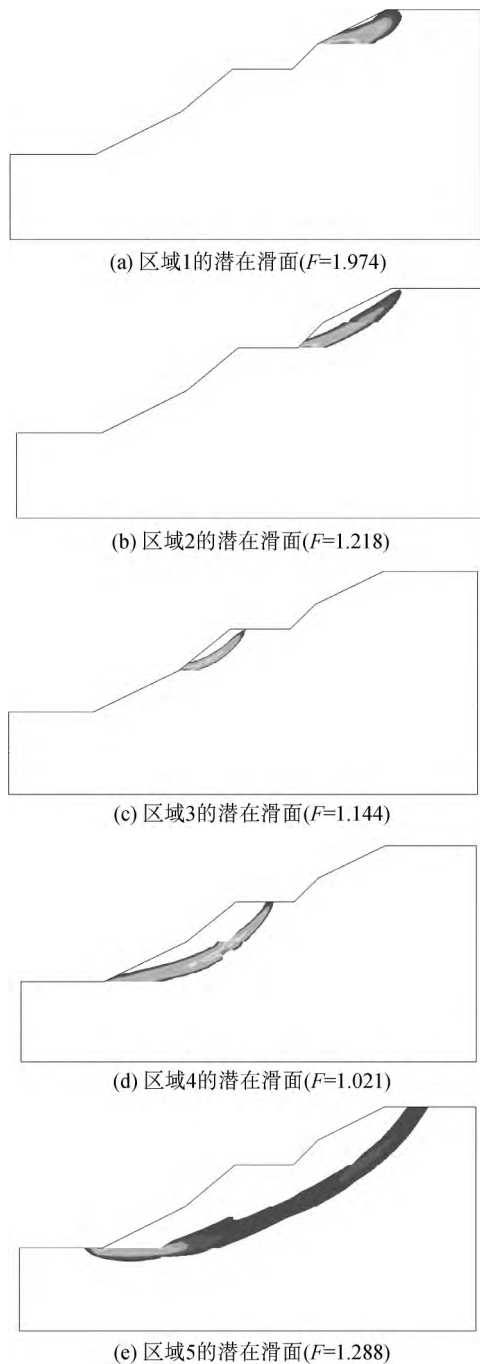


图 7 复杂边坡潜在滑面示意

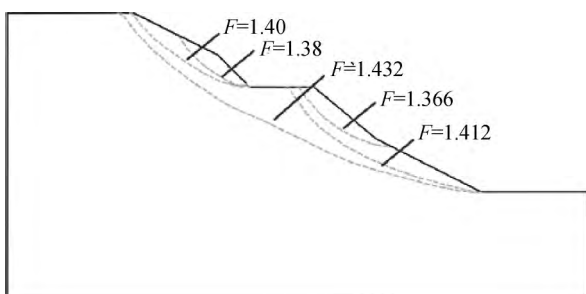


图 8 最危险滑面及局部潜在滑面^[20]

体滑面,通过双台阶边坡和复杂边坡算例说明了该方法的可行性,且指出台阶宽度对潜在滑面的搜索有一定的影响。本文提出的方法可为边坡工程治理提供潜在滑面,具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 程祖煜. 土质边坡稳定性分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[2] Chen W F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. Amsterdam; Elsevier Science, 1975.

[3] 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.

[4] 关力军. 基于强度折减的土坡稳定分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

[5] 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.

[6] 唐芬, 郑颖人. 边坡稳定安全储备的双折减系数推导[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4): 95—100.

[7] 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(2): 243—256.

[8] 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.

[9] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座——II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.

[10] Cheng Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(3): 255—267.

[11] Kim J Y, Lee S R. An improved search strategy for the critical slip surface using finite element stress fields[J]. Computers and Geotechnics, 1997, 21(4): 295—313.

[12] Cala M, Flisiak J. Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction[C]//FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds). A A Balkema Publishers, 2003: 99—102.

[13] 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.

[14] Lin H, Cao P, Gong F. Directly searching method for slip plane and its influential factors based on criti-

- cal state of slope[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(1): 131-135.
- [15] 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.
- [16] 肖锐铨,王思敬,贺小黑,等. 非均质边坡多级稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1062-1068.
- [17] 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.
- [18] 宋二祥,高翔,邱玥. 基坑土钉支护安全系数的强度参数折减有限元方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 258-263.
- [19] Cheng Y M, Lansivaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(3): 137-50.
- [20] Liu S Y, Shao L T, Li H J. Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 291-298.

Analysis of Multi-stage Slope Potential Sliding Surface Based on Local Strength Reduction Method

YANG Jian-cheng¹, DENG Qin²

(1. Construction Group of Yunnan Highway Development and Investment Co. Ltd., Kunming 650032, China;

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

Abstract: There are a lot of multi-stage slopes existing among the mountainous highways. The traditional global strength reduction method can only get the most dangerous sliding surface, while the secondary slide surfaces are usually missed. To solve this problem, a new local strength reduction method has been proposed, which makes the elastic region instead of the plastic zone and the zones not considering destruction, other regions use the real material parameters to be analyzed by strength reduction method until the calculation does not converge, and more potential sliding surfaces can be obtained. The feasibility of this approach is verified through the double-stage slope and the multi-stage slope, and the potential surfaces can indicate the suggestion for the slop reinforcement.

Key words: multi-stage slope; local strength reduction method; plastic zone; potential surfaces