

文章编号:1673-9469(2015)03-0031-03

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.007

强度折减法在边坡稳定性分析中的应用

何欢,付成华,钟学梅,赵川

(西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039)

摘要:以一均质土坡为例,首先采用有限元整体强度折减法计算,在此基础上分别选取塑性剪切应变率大于 2.0e^{-5} 和塑性区为局部强度折减法的折减范围,通过局部强度折减得到边坡滑裂带分布和稳定安全系数,分析不同折减范围下边坡稳定安全系数、特征点位移以及滑裂带的变化规律。比较天然状况和稳定渗流状态下局部强度折减和整体强度折减的计算结果。结果显示:两种方法得到的稳定安全系数基本一致,但折减范围的选择对计算结果影响很大,折减塑性剪切应变率大于 2.0e^{-5} 的范围得到的稳定安全系数较小。

关键词:岩土工程;折减范围;强度折减法;边坡稳定性;特征点位移

中图分类号:TU 452

文献标识码:A

Application of slope stability based on local strength reduction method

HE Huan, FU Cheng-hua, ZHONG Xue-mei, ZHAO Chuan

(School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Sichuan Chengdu 610039, China)

Abstract: Stability analysis of the slope has been finished by global and local strength reduction method. For a homogeneous soil slope, calculation has been done firstly by global strength reduction method, so two reduction regions were adopted, one was greater plastic shear strain rate than 2.0e^{-5} and the other was plastic flowing region, the sliding surfaces and the safety factors of slope were achieved by local strength reduction method, and the changing rule of the safety factors and the displacement of key points and the slip zone under different reduction scopes were analyzed. The results from the global strength reduction and the local strength reduction under the condition of the natural condition and steady seepage condition were compared with each other. The results showed that safety factors were almost the same, but the reduction region effected calculation results were significant, the stability safety factor by the reduction range of greater plastic shear strain rate than 2.0e^{-5} was smaller. The results can provide reference for selecting the appropriate reduction regions with finite element strength reduction method.

Key words: geotechnical engineering; reduction regions; strength reduction method; safety factor; displacement of key points

边坡稳定性一直是岩土工程领域里的难点和热点研究课题,学者们提出了不同的边坡稳定性分析方法。常用的有限元强度折减法^[1-7]是通过不断折减边坡岩土体抗剪强度参数直至达到极限破坏状态,得到边坡滑动破坏面和稳定安全系数,一般是对岩土体的整体抗剪切强度参数进行折减,而边坡的实际破坏大部分是由局部土体降低强度所引起的。近年来在整体强度折减法的基础

上又提出用于分析边坡稳定性的局部强度折减法,它是针对特殊部位或对边坡稳定有重大影响的部位进行折减。杨光华等^[8]提出变模量弹塑性强度折减法进行边坡稳定性分析;钟志辉^[9]采用局部强度折减法进行边坡位移研究;陈国庆^[10]采用边坡渐进破坏局部强度折减法进行边坡稳定性分析。为了丰富局部强度折减法和验证局部强度折减法折减范围选择的重要性,本文采用有限元

收稿日期:2015-05-18

基金项目:教育部重点实验室学术成果培育项目(SBZDPY-11-9)

作者简介:何欢(1990-),女,四川内江人,硕士,主要从事岩土工程方面的研究。

整体和局部强度折减法进行边坡稳定分析,综合比较分析了不同折减范围下边坡稳定安全系数、特征点位移以及滑裂带的变化规律。

1 计算方法

算例分析计算方法为强度折减法,基本原理是基于显示有限差分法来求解运动方程和动力方程。显示有限差分法克服了由于岩土体不连续性和大变形所引起的计算难点,显示有限差分法求解速度较快。强度折减法是利使用式(1)和(2)对计算单元抗剪强度指标 c 、 φ 进行折减,通过计算过程不收敛获得边坡稳定安全系数 F_t 。局部强度折减法核心思想是针对某些状态的土体进行折减,这些土体处于一定的折减范围。获取折减范围内的土体利用式(1)和(2)进行折减,采用不同的边坡失稳判据得到边坡稳定安全系数 F_t 、滑裂带参数和特征点位移。

$$C_t = C/F_t \quad (1)$$

$$\varphi_t = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_t}\right) \quad (2)$$

2 算例

选用某均质土体边坡,土体重度 $r = 20 \text{ kN/m}^3$,

表 1 天然状况下计算的稳定安全系数

Tab.1 Stability factors under the natural condition

整体强度折减	局部(折减塑性区)		局部(折减塑性剪切应变率)	
	收敛性判据	特征点位移突变判据	收敛性判据	特征点位移突变判据
1.271	1.289	1.27 ~ 1.28	1.273	1.26 ~ 1.27

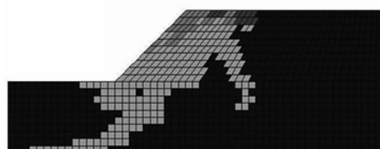


图1 塑性剪切应变屈服图

Fig.1 The plastic shear strain rate yield figure

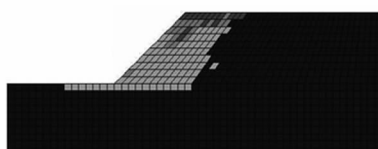


图2 塑性区屈服图

Fig.2 The plastic region yield figure

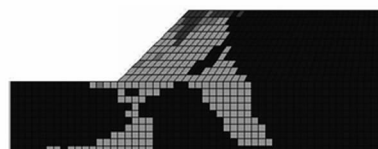


图3 整体局部屈服图

Fig.3 Yield figure of the global method

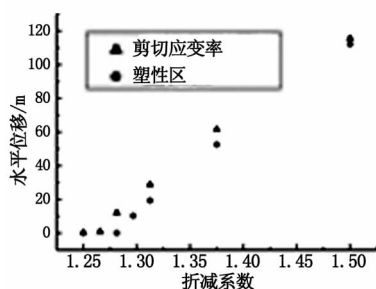


图4 水平位移与折减系数图

Fig.4 X-displacement vs the reduction coefficient

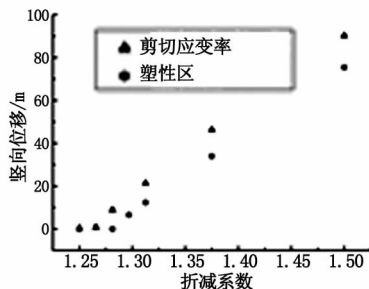


图5 竖向位移与折减系数图

Fig.5 Z-displacement vs the reduction coefficient

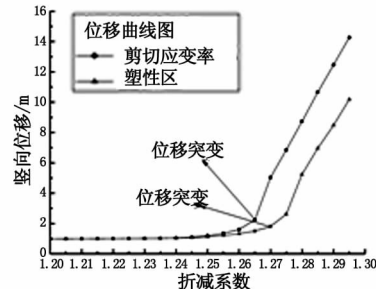


图6 位移突变图

Fig.6 Displacement mutation figure

凝聚力 $c = 42 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi = 17^\circ$, 弹性模量 $E = 10 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 坡角为 45° , 坡高为 20 m 。坡脚到左侧边界距离为 30 m , 坡顶到右侧距离为 55 m , 坡脚向下延伸距离为 20 m 。

采用有限元整体强度折减法进行计算,得到边坡塑性流动区和剪切应变率大于 2.0×10^{-5} 的分布范围,并将这两种范围作为有限元局部强度折减法的折减范围,通过局部强度折减进行进一步的计算分析。

3 天然状况下的计算结果分析

天然状况下采用有限元整体强度折减法和局部强度折减法得到的边坡稳定安全系数见表 1。稳定安全系数计算结果基本相近,且与传统极限平衡法计算所得安全系数 1.266 较为一致。

图 1 ~ 图 3 为三种折减范围下破坏时屈服区分布图。可见,三种折减范围下均在边坡临空面的部分范围出现塑性流动状态,在坡顶处都有抗拉破坏情况的出现,与边坡实际破坏现象相同。但三种折减范围下处于塑性流动范围相差比较大,折减塑性流动区时,范围最小,折减塑性剪切应变率时,边坡方向的流动范围减小,但是地基处

表 2 稳定渗流条件下稳定安全系数
Tab. 2 Stability factors under the steady seepage

地下水位	整体强度折减	局部(折减塑性区)		局部(折减塑性剪切应变率)	
		收敛性判据	特征点位移突变判据	收敛性判据	特征点位移突变判据
10 m	1.271	1.289	1.27 ~ 1.28	1.273	1.26 ~ 1.27
20 m	1.264	1.289	1.275 ~ 1.285	1.258	1.25 ~ 1.26

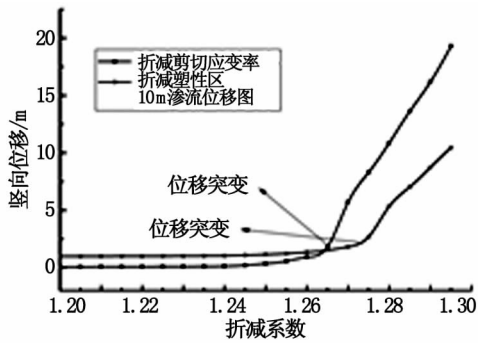


图7 地下水位10 m工况下位移突变图

Fig. 7 Displacement mutation figure under 10m seepage

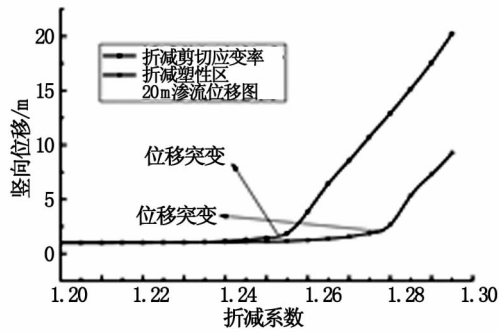


图8 地下水位20 m工况下位移突变图

Fig. 8 Displacement mutation figure under 20m seepage

范围增大,出现该问题的原因可能是模型边界尺寸的选取以及内摩擦角 φ 和泊松比 ν 没有满足(3)式导致。

$$\sin\varphi > 1 - 2\nu \tag{3}$$

文献[7]认为塑性区在边坡体贯通,内摩擦角与泊松比需要满足上式。

图 4 和图 5 分别为塑性区和塑性剪切应变率折减范围下水平位移和竖向位移与折减系数的变化趋势。由图可见,随着折减系数的增大,两种不同的折减范围计算的水平位移差距越来越小,而竖向位移差距越来越大,说明不同的折减范围对水平位移影响较小,对竖向位移影响很大。

图 6 为塑性区和塑性剪切应变率折减范围下竖向位移变化图。可以看出,当坡体未达到临界破坏状态之前,边坡位移变形都是缓慢增加,当坡体达到临界破坏状态时,出现位移突变,而出现突变时对应的那个折减系数即可认为是边坡的安全系数,折减剪切应变率区时为 1.26 ~ 1.27;折减塑性区时为 1.27 ~ 1.28。结果表明用位移突变法折减以上两种区域时,获得的边坡安全系数与整体强度折减法计算得到的系数相近。

4 稳定渗流作用下计算结果分析

边坡稳定数值分析时,水的孔压可以假设保持不变。在弹性分析中,土骨架相当于没有流体的影响,而在弹塑性分析中,孔压的出现会导致单

元的屈服,即土体的稳定是由土的有效应力分析计算。由土力学知识得,土的有效应力等于土的总应力扣除孔隙水应力。分别考虑地下水位为 10 m 和 20 m 两种工况。

稳定渗流条件下,采用有限元整体强度折减法和局部强度折减法得到的边坡稳定安全系数见表 2。特征点竖向位移随折减系数的变化如图 7 和图 8 所示。

由以上计算结果可以看出,稳定渗流条件下计算结果所反映出的特征与天然工况相近,局部折减剪切应变率获得的位移比折减塑性区大,而对不同的地下水位局部折减塑性区得到的稳定安全系数一样。

5 结论

在分析边坡稳定时,有限元整体强度折减法和局部强度折减法可以互补,且可以相互验证;当局部强度折减法的折减范围选取塑性剪切应变率大于 $2.0e^{-5}$ 和处于塑性区土体,计算得到的稳定安全系数相差不大,均在合理范围内;折减范围的选择对于某些数值结果的求解影响很大,局部折减塑性区获得的稳定安全系数均大于局部折减塑性剪切应变率获得的稳定安全系数。因此,分析不同的折减范围下边坡稳定安全系数、位移、滑裂带的分布,对于合理选择有限元强度折减法的折减范围具有一定的参考价值。 (下转第 46 页)

向上抬升;随着开挖的继续逐渐转为沉降,并在开挖至坑底时地下连续墙竖向位移趋于稳定。

3)随着基坑开挖深度增的加,地表沉降不断增大,而当底板浇筑完成后,地表沉降趋于稳定;坑外地表沉降形态呈“凹”字型;围护结构暴露的时间越长,坑外地表沉降变化越大;车辆荷载会加大地表沉降。

4)支撑系统的轴力随着基坑逐步开挖的进行与开挖深度的加大而逐渐增加,当支撑架设完成后会对上一道支撑轴力产生很大影响。

参考文献:

- [1] 张雪松. 建筑基坑支护工程安全的影响因素分析[J]. 黑龙江科技信息, 2007(27): 262.
- [2] 刘冬, 曹雪山, 刘兴. 深基坑围护结构侧向位移变化规律分析研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(3): 31-34.
- [3] 徐浩峰. 软土深基坑工程时间效应研究[D]. 杭州: 浙

江大学, 2003.

- [4] 李文峰. 对地铁基坑混凝土支撑轴力监测精准性的探讨[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 424-426.
- [5] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
- [7] 乔亚飞, 丁文其, 王军, 等. 无锡地区地铁车站深基坑变形特性[J]. 岩土工程报, 2012(21): 761-766.
- [8] 李淑, 张顶立, 房倩. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2344-2353.
- [9] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [10] JANBU J. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests[J]. ECSMFE Wiesbaden, 1963(1): 19-25.

(责任编辑 王利君)

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元讲座 II: 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩石力学, 2005, 26(2): 332-336.
- [2] 李红, 宫必宁, 陈琰. 有限元强度折减法边坡失稳判据[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 78-82.
- [3] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- [4] 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.
- [5] 连镇营, 韩围城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-411.
- [6] 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.

- [7] 魏翠玲, 吕博. 含硬性贯通结构面的岩质边坡稳定性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 9-12.
- [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性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1506-1512.
- [9] 钟志辉, 杨光华, 张玉成, 等. 基于局部强度折减法的土质边坡位移研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Z): 196-201.
- [10] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1140-1146.
- [11] 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(Z2): 53-58.

(责任编辑 王利君)