

文章编号:1673-9469(2010)03-0032-03

开挖边坡变形和稳定性有限元分析

孟庆银

(齐齐哈尔市市政设施管理处,黑龙江 齐齐哈尔,161005)

摘要:采用有限元方法对边坡开挖进行数值计算,得到开挖后边坡的变形情况,并通过抗剪强度折减技术对开挖后的边坡材料进行强度折减,得到边坡破坏时的临界滑面和安全系数。有限元方法的计算结果不但能评价边坡的稳定性,还可得到潜在的危险区域,对边坡开挖施工有一定指导意义。

关键词:边坡稳定性;开挖边坡;有限元;强度折减;变形

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Deformation and stability analysis of excavated slope by FEM

MENG Qing-yin

(Department of urban facilities management of Qiqihar city, Heilongjiang Qiqihar 161005, China)

Abstract: The Finite Elements Method (FEM) is implored to simulate excavation of slope. The deformation of the excavated slope is computed. The factor of safety of the slope is solved by using shear strength reduction technique and the critical slip surface can be easily obtained through the max shear strain contours of the slope at failure. The FEM results are able to evaluate the slope stability and the dangerous zone of the excavated slope can be obtained, which is valuable for slope excavation.

Key words: slope stability; slope excavation; finite elements method; strength reduction; deformation

用有限元方法分析边坡稳定问题克服了极限平衡方法中将土条假设为刚体的缺点,考虑了土体的非线性本构关系,而且能够模拟边坡开挖及施工过程,可适用于任意复杂的边界条件,是比较理想的分析边坡应力、变形和稳定性的手段^[1]。

强度折减的概念由来已久,该方法近年来获得较广的应用,很多学者对强度折减计算中涉及到的具体问题进行了有意义的探索和研究^[2-7]。连镇营等^[8]研究了强度折减技术在开挖边坡稳定性分析中的应用,显示了有限元方法和强度折减技术相结合是分析开挖边坡稳定性的较好方法。

本文采用弹塑性有限元方法对边坡开挖进行模拟,得到边坡开挖后的应力分布和变形情况,然后应用强度折减方法计算安全系数,并通过一个实际工程边坡介绍了该方法的具体应用,结合边坡的实际地质情况可对边坡变形和稳定性作出较好评价。

1 有限元分析方法

有限元方法可获得边坡开挖前较为准确的应力分布,边坡开挖后,应力释放,边坡发生变形,通过有限元计算可得到由于边坡开挖引起的变形情况,并能获得开挖后边坡的塑性区分布范围(拉破坏或剪切破坏区)。

边坡稳定的安全系数 F 通常定义为沿整个滑面的抗剪强度与实际抗剪强度之比,工程中广为应用的各种条分法便是以此来定义坡体稳定安全系数,有限元强度折减法的基本思想与此一致^[5]。因后者无法直接用公式计算安全系数,需根据某种破坏判据来判定系统是否进入极限平衡状态,这样不可避免地会带来一定的人为误差。很多学者对有限元强度折减法的破坏判据进行过讨论,总体上看,大多数学者普遍倾向于将计算不收敛

作为破坏判据^[3,5,6,9,10],因此本文强度折减计算中也以此作为判据。

有限元强度折减法的基本原理是将土体强度参数 $C, \tan\varphi$ 值同时除以一个折减系数 F ,得到一组新的 $C', \tan\varphi'$ 值,然后进行有限元计算,当计算不收敛时,对应的折减倍数 F 就是边坡的安全系数,同时可得到临界滑面。有限元强度折减计算不仅可获得临界滑面,还能获知边坡的渐进破坏发展过程,较之极限平衡分析方法是一个较大的改进。

$$C' = \frac{C}{F} \quad (1)$$

$$\tan\varphi' = \frac{\tan\varphi}{F} \quad (2)$$

本文采用有限元强度折减方法来计算边坡开挖后的稳定性安全系数。具体方法是:首先用所给的岩土参数进行边坡的初始应力计算,然后进行开挖模拟,得到边坡开挖后的应力状态。再按上面介绍的方法对土体的抗剪强度参数进行折减,直至开挖后的边坡进入破坏状态,计算不再收敛,此时强度参数的折减倍数 F 就是边坡开挖后的安全系数。

2 边坡变形和稳定性分析

2.1 边坡的工程概况

某水电站枢纽区坝肩岩质边坡,边坡大部分为微风化—新鲜的层状结构岩体,仅浅表部为弱、强风化岩体,岩层走向与开挖坡面近垂直。开挖边坡及影响范围内断层不发育,断层对边坡稳定影响较小,另外现场勘察未揭示有由规模较大的特定软弱结构面构成的潜在滑块。这些条件均对边坡的整体稳定较为有利,总体上看边坡的稳定性较好。

边坡开挖设计方案为:马道间开挖坡比主要为 1:0.5,局部切割微新岩体较深部位的开挖坡比采用 1:0.3,边坡开口线附近的强—弱风化岩体开挖坡比采用 1:0.75 ~ 1:1,边坡按 15m ~ 20m 高差设置 3m 宽马道,具体的开挖设计见图 2。

上述定性分析表明,该边坡整体稳定条件较好,边坡的主要失稳破坏形式可能有:

(1)由于开挖边坡高度近 300m,高边坡下部水平开挖深度较大时,岩体应力释放导致的大变形破坏。

(2)局部顺层坡的顺层转移失稳破坏或顺层

斜交坡的楔形体转移失稳破坏。

(3)边坡开口线附近覆盖层或强风化岩体的局部崩塌转移破坏。

2.2 变形和稳定性计算分析

对该边坡进行有限元弹塑性计算,得到边坡开挖后引起的变形、塑性区和应力分布情况,同时通过有限元强度折减得到了最危险滑动面和边坡的安全系数。

计算采用的物理力学参数主要参考工程地质报告提供的边坡岩体力学指标,并依据工程经验类比得到如表 1 所示计算参数。

表 1 边坡岩体参数

Tab.1 Properties of rock slope

岩体类型	变形模量 /GPa	泊松比 μ	容重 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/MPa	Φ
强风化岩体	2	0.35	23.4	0.3	31°
弱风化岩体	3	0.35	24.7	0.5	35°
微风化岩体	8	0.25	26.1	1.0	47.7°

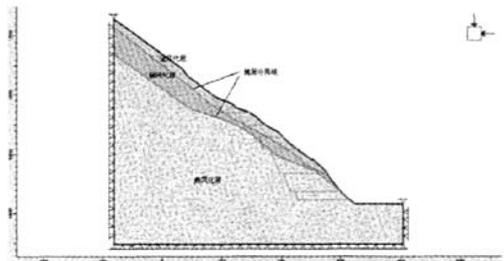


图1 原始边坡计算模型

Fig.1 Computation model of original slope

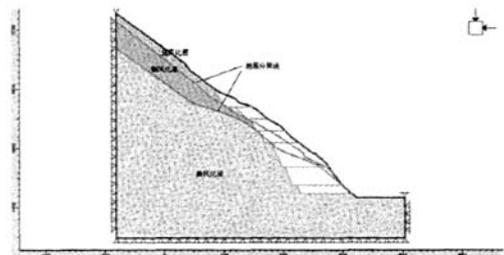


图2 边坡计算开挖模型

Fig.2 Computation model of excavated slope

首先建立边坡的有限元计算初始模型和开挖模型(图 1、图 2)。开挖模拟 7 步开挖,采用理想弹塑性本构关系进行计算,莫尔—库伦强度准则,非关联流动准则(剪胀角取值为 0)。开挖载荷只考

考虑岩体自重。有限元计算软件选择 Phase2, 有限元网格采用三角形六节点单元, 网格剖分见图 1 和图 2。

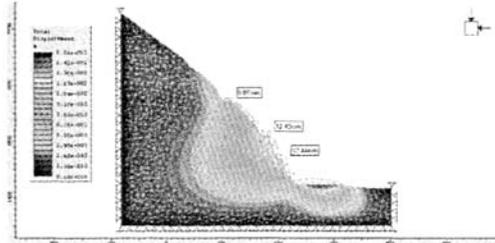


图3 边坡开挖引起的变形

Fig. 3 Deformation caused by excavation

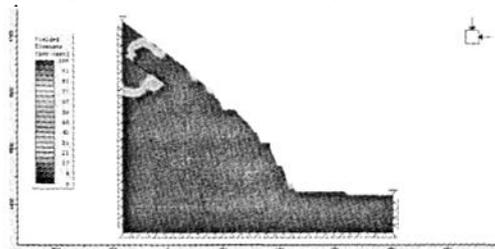


图4 边坡的塑性区分布

Fig. 4 Plastic zone of the slope

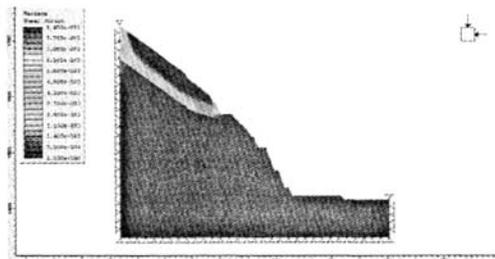


图5 边坡破坏时的最大剪应变等值线

Fig. 5 Max shear strain of slope at failure

计算结果表明:(1)边坡开挖后的变形网格见图 3, 开挖结束时边坡开挖面最大位移为 12.44 mm, 发生坡脚以上第三级台阶处, 并非坡脚附近, 由于变形并不大, 因此不会因变形过大引起边坡失稳。另外开挖后坡底表现出回弹变形, 但量值较小。

(2)边坡的塑性区分布见图 4, 由图可知, 塑性区在开挖坡面附近分布范围很小, 主要分布在强风化岩层表面(拉破坏)和坡脚处(剪切破坏), 其中坡脚处的塑性区由局部应力集中引起。另外在边界附近有一定范围的塑性区分布, 这主要是由边界约束引起的拉破坏形成; 在强风化与弱风化的交界面因强度参数的变化有突变, 这也与边界约束效应有关。

(3)强度折减到边坡破坏时的最大剪应变分布(见图 5)表明最有可能形成的滑面是沿弱风化层底面, 在第 7 级台阶处剪出, 但安全系数为 2.33, 稳定性很好。由于该边坡岩体质量较好, 岩体结构对边坡较为有利, 最危险滑面的安全系数远大于安全控制标准, 边坡发生整体滑移破坏的可能性不大。

本文计算中没考虑开挖爆破造成的不利影响, 由于爆破震动可能会造成坡面处的岩体强度下降, 坡面附近的实际塑性区可能会多于计算结果, 因此开挖后应及时做好坡面保护工作。

3 结语

算例结果表明, 该岩质高边坡的最大变形发生在边坡的中下部, 并非坡脚附近; 坡脚和部分坡面开挖后形成一定的塑性区, 因此边坡开挖施工中应注意坡面防护; 边坡的整体稳定性较好, 但应注意局部小范围的破碎块体塌落。

参考文献:

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析 - 原理方法程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique [J]. Soils and Found, 1992, 32(1): 59 - 70.
- [3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 连镇营, 韩国城, 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.
- [9] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345 - 1348.
- [10] 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. (责任编辑 刘存英)