

基于重度增加法的大冶铁矿边坡稳定性分析

曾凯波,周春梅,吴燕玲,李先福

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

摘要:结合大冶铁矿东露天采场F₉断裂带内的边坡实际情况,借助大型有限元软件ANSYS,采用重度增加法对大冶典型地段的边坡进行了稳定性分析及评价,最后应用有限元强度折减法进行验证,并对两种方法进行分析 and 比较。结果表明,基于重度增加技术的ANSYS程序用于高陡岩质边坡稳定性分析是可行的,与实际情况较为吻合,能合理简便地确定边坡的稳定性系数,是进行高陡边坡稳定性评价的有效方法之一,对工程实践具有一定的指导意义。

关键词:重度增加法;有限元强度折减法;边坡稳定性;大冶铁矿;ANSYS

中图分类号:X45 **文献标识码:**A

0 引言

随着计算机技术及岩土材料的非线性弹塑性有限元计算技术的不断发展,有限元强度折减法由于可以自动根据弹塑性计算结果得到潜在滑动面,同时得到边坡的强度储备安全系数,受到国内外岩土工程界的青睐,并取得了较好的成果^[1]。与此同时,也出现了与强度折减法计算原理相反的重度增加法。引起滑坡的根本原因是滑动面上滑动力的增加与抗滑力的降低,如果说有限元强度折减是从导致滑坡的内因出发不断降低土体的强度指标,使其过渡到临界状态,从而求得边坡整体稳定性指标,那么本文采用的重度增加法则是从外因出发,通过不断增加岩土体的重度,使岩土体进入临界状态,获得边坡安全系数。目前,重度增加法更多的是应用于堤防工程中的边坡稳定分析,此类边坡大多由于水位骤升、骤降,土体自重荷载增加导致失稳,而在天然边坡或开挖边坡中应用较少,其在开挖高陡岩质边坡中的稳定性分析中的适用性及其精度有待进一步的研究。

1 有限元重度增加法基本原理

重度增加法的计算原理^[2]与强度折减法的原理正好相反,其保持岩土体的抗剪强度指标 c, ϕ 为常数,通过逐步增加重力加速度 G 的方式,反复进行有限元分析,直至边坡达到临界破坏状态,此时采

用的重力加速度 G_{limit} 与实际重力加速度 G_0 之比即为边坡的安全系数,即 $F_s = G_{\text{limit}}/G_0$ 。增大重力加速度实际上可以等同于增加岩土体的重度,因此称之为重度增加法,其中重度增加系数 $F_{\text{rel}} = g/g_0$, g_0 通常取值为 9.81 m/s^2 。可以看出,重度增加法是给岩土体一个外界扰动因素(超载)使其达到临界状态,因此重度增加法可以归到超载法中。

2 破坏标准定义

如何根据有限元计算结果来判别边坡是否处于整体破坏状态是采用重度增加法进行边坡稳定性分析的一个关键问题。目前尚无统一的边坡破坏标准。方庆军等^[3]认为大致有如下几种边坡破坏的标准:

- 以有限元静力平衡计算不收敛来作为边坡整体失稳的标志;
- 以塑性区(或者等效塑性应变)从坡脚到坡顶贯通作为边坡整体失稳的标志;
- 以滑动土体无限移动,此时土体滑移面上应变和位移发生突变且无限发展作为土体破坏的标志。

徐卫亚等^[4]认为边坡失稳破坏的标准主要有迭代求解的不收敛性、广义剪应变贯通、塑性区的范围及其连通状态、边坡内某点的位移与折减系数的关系曲线等。由此,取位于边坡内的接近坡顶处点的水平位移与重度增加系数系数的变化关系

收稿日期:2009-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目 No:50874080;武汉工程大学校青年基金项目 Q200805

作者简介:曾凯波(1984-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,研究方向:防灾减灾及防护工程。

指导老师:李先福,男,博士,教授,硕士生导师,研究方向:地质环境与灾害防治。*通信联系人

曲线作为标准亦是合理的.因此本文的计算工作采用坡顶水平位移随重度增加系数的变化的关系曲线上位移陡然增大作为边坡的破坏标准.当岩土体的重度增加到一定程度时,岩土体的位移会持续增大,重度增加系数与坡顶水平位移的关系曲线趋于陡峭.可以理解为此时即使重度不再增加,位移也将持续增加,岩土体处于塑性流动状态,而此时的重度增加系数可作为边坡超载概念的整体稳定安全系数.

3 工程应用

3.1 工程背景

大冶铁矿东露天采场自西向东由象鼻山、狮子山和尖山 3 个矿段组成.由于露天采场地质构造复杂,节理裂隙发育,构成边坡的岩体风化蚀变强烈,时常出现规模不等的塌滑变形破坏.其中最为严重的是东露天北帮受 F_9 断层及其分支断层控制发育形成的尖 F_9 滑坡,直接威胁到大冶铁矿东露天采场采坑底部开采人员及设备的安全,并影响了下一步矿山公园的建设.本文以大冶铁矿东露天采场的地质划分 VI 区(图 1)为例,该区风化闪长岩为弱富水裂隙含水层,闪长岩为极弱富水层可视为相对隔水层,尖 F_9 断层泥砾为隔水层,铁矿体为弱富水裂隙含水层.且区内边坡地质条件复杂,断层、节理发育,其中尖 F_9 断层对边坡的稳定起关键作用,其产状 $196^\circ \angle 67^\circ$,横贯边坡中上部,长达 600 m,主断面宽 0.3~2 m,破碎带宽 5~10 m,破碎带主要由深色断层泥、糜棱岩、碎裂岩、压碎岩、透镜体、石英团块、少许角砾岩组成.

3.2 重度增加法数值模拟分析

本文借助于大型有限元通用软件 ANSYS 进行模拟,ANSYS 中采用 D P(Drucker Prager)屈服准则,该准则是广义米塞斯的一种特殊情况,可以用来模拟岩土体的应力—应变关系.

3.2.1 剖面位置的选取

选取如图 III—III' 剖面,III—III' 剖面处于大冶铁矿东露天采场狮子山北帮 F_9 逆断层上盘,受 F_9 断层控制,经过地下采空区,并与 F_9 断层及两组大型节理 J_3 、 J_4 相交(图 1).

3.2.2 几何模型及边界条件

III—III' 剖面剖面的实际坡高 431.12 m,宽 566.5 m.为了减少计算时边界条件对坡体应力应变求解的影响,将计算范围取为高 700 m,宽 1 500 m.边界条件选取位移边界条件,左右方向位移 x 方向固定, y 方向自由,地表自由,底边 x 、 y 方向固定. III—III' 剖面的工程地质剖面图如图 2.

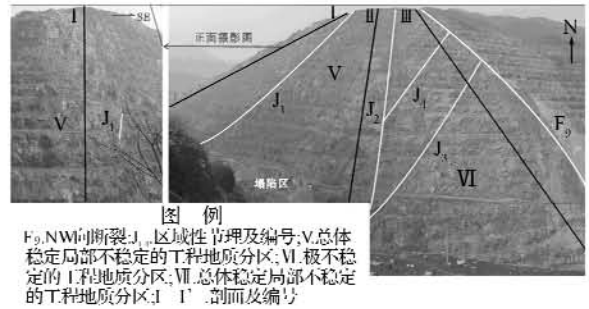


图 1 III—III' 剖面

Fig. 1 Location of section III—III'

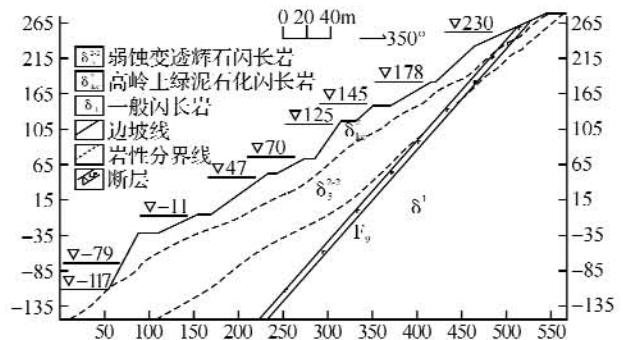


图 2 III—III' 工程地质图

Fig. 2 Engineering geology view of section III—III'

3.2.3 有限元网格划分及计算本构模型

对该边坡按照平面应变问题处理,岩土体采用 PLANE142 模拟,对 III—III' 剖面有限元网格划分,共 1 560 个单元,823 个节点(见图 3).

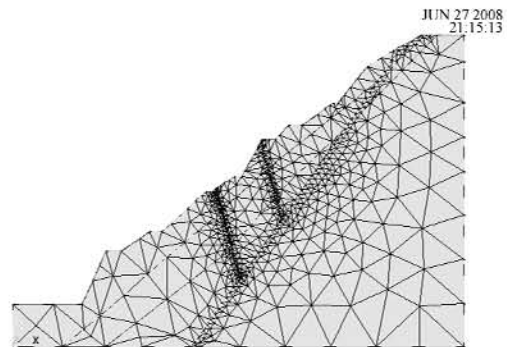


图 3 网格划分模型图

Fig. 3 Meshing model of section III—III'

岩土体材料本构模型采用非线性弹塑性德拉克—普拉格(Drucker-Prager)模型,Drucker-Prager 模型是在 Mohr-Coulomb 模型和塑性力学中著名的 Mises 模型基础上扩展和推广而得^[5]:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0, \text{ 其中, } I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \text{ 为应力第一不变量;}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} s_i s_i =$$

$$\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] =$$

$$\frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] =$$

$$6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$$

为应力偏量第二不变量; α, K 为与岩土体内摩擦角 ϕ 和粘结力 c 有关实验常数: $\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}$,

$$K = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}.$$

3.2.4 力学参数的取值

参考中国科学院岩土力学研究所 1995 年编写的《大冶铁矿狮子山北邦 A 区尖 F₉ 断层上盘—60 m~—96 m 边坡稳定性和滑坡防治研究》报告中提供的岩体参数,见表 1。

表 1 天然/饱和水状态下岩体力学参数

Table 1 Rock mechanical parameter in saturation water/nature

岩性名称	一般闪长岩	弱蚀变高岭土绿泥石闪长岩	弱蚀变高岭土绿泥石闪长岩	断层 (天然/饱和)
岩性符号	δ_1	δ_{2-2}	$\delta_{K\Gamma}$	
容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	24	24	24	24
c/MPa	0.3	0.1	0.06	0.03/0.01
$\phi/(\circ)$	30	30	30	18/15
泊松比	0.28	0.28	0.28	0.28
弹性模量/MPa	2×10^4	2×10^4	2×10^4	0.7×10^4

3.2.5 计算过程及数据处理

从重度增加法的原理可知,有两种途径可以增大重度:一是保持重度不变,在 ANSYS 中输入增大的重力加速度,二是保持重力加速度不变,输入增大的重度。当岩土体的自重增大到一定程度时,边坡将发生破坏,而此时的增加系数可以作为该边坡的安全系数^[6-7]。计算时可以先计算一些控制点,看两点之间坡顶位移有无突变,在有突变的区间需要减小重度增加系数的步长,重新进行有限元计算^[8]。本文以重度增加系数为 1.0 作为起点,然后计算控制点 1.1, 1.2, 1.3 和 1.4, 从计算的数据可以看出,1.33 和 1.37 之间坡顶位移发生突变,需要细分区间,重新进行计算,具体数据如表 2 所示。

表 2 坡顶水平位移

Table 2 Horizontal displacement of slope top mm

F^{trial}	UX	F^{trial}	UX
1.00	-11.77	1.30	-24.68
1.10	-13.30	1.31	-25.49
1.20	-14.81	1.32	-28.13
1.22	16.44	1.33	90.21
1.23	18.05	1.34	202.37
1.24	-19.69	1.35	-116.80
1.26	-21.34	1.36	-323.59
1.28	-22.90	1.37	-23.28

(负号表示位移方向与坐标轴方向相反)

在平面坐标系中以重度增加系数为 X 轴,以坡顶的水平位移为 Y 轴,绘制二者的关系曲线如图 4。

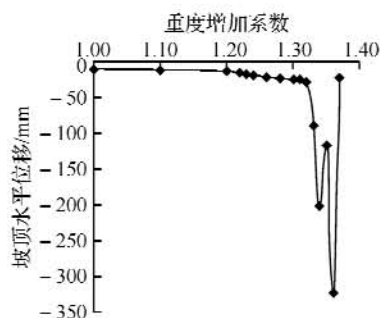


图 4 坡顶水平位移与重度增加系数曲线

Fig. 4 Horizontal displacement of slope top against the gravity increase factor

从图 4 可以看出,当重度增加系数达到 1.34 以前,坡顶水平位移呈缓慢上升趋势,边坡变形随重度增加系数增加的变化趋势不明显。从 1.00 增加到 1.33 的过程中,边坡处于稳定状态;到 1.33 和 1.34 后(见图 5, 6),位移随 F^{trial} 的增加而急剧增加,此时的重度增加系数就是该边坡超载概念的安全系数。到 1.37 时,边坡发生位移回弹变化,说明边坡正在或已经发生了滑动破坏。

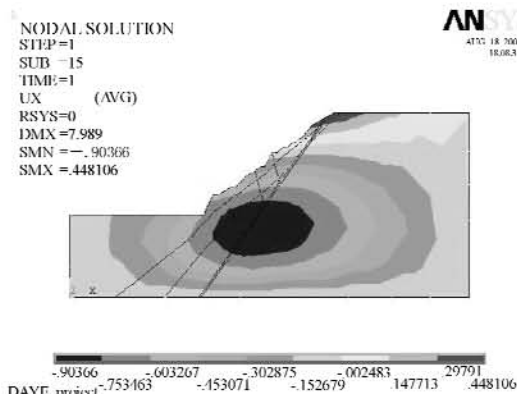


图 5 $F_s=1.33$ 时 x 方向位移云图

Fig. 5 The horizontal displacement field when $F_s=1.33$

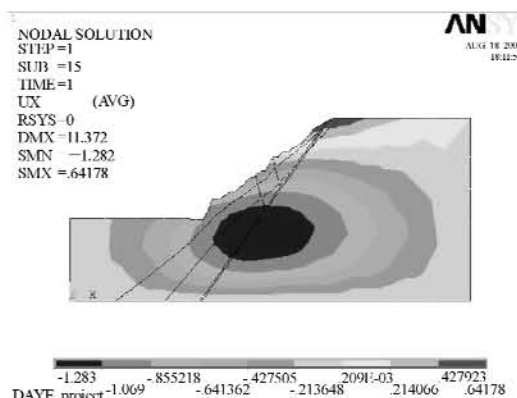


图 6 $F_s=1.34$ 时 x 方向位移云图

Fig. 6 The horizontal displacement field when $F_s=1.34$

4 有限元强度折减法进行验证

对天然状态下坡体的岩体力学参数进行折减,以有限元计算不收敛和塑性区贯通作为破坏标准^[9,10],具体如下:当折减系数 $F_s \geq 1.23$ 时,有限元计算不收敛,即天然状态下边坡的稳定性系数为 1.23。图 7 是 III—III' 剖面天然状态下,有限元边坡处于极限平衡状态时塑性应变有限元计算结果,可见 xy 方向的塑性剪应变沿断层及节理面基本已经贯通,滑移的可能性较大,可见整个坡体处于极限平衡状态。此时对应的稳定系数为 1.23。

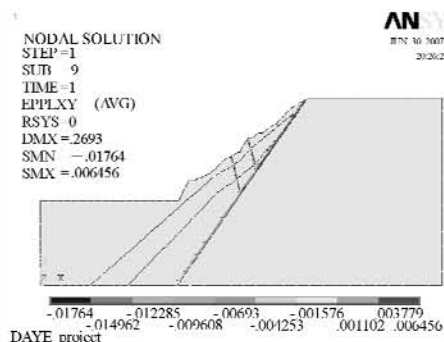


图 7 $F_s=1.23$ 时 xy 方向塑性剪应变云图

Fig. 7 Nephogram of shear strain in xy when $F_s=1.23$

5 两种数值计算方法的讨论与分析

a. 文中采用重度增加法得到的安全系数位于 1.34 至 1.37 之间,而用强度折减法得到的安全系数是 1.23。用重度增加法得到的安全系数比强度折减法得到的安全系数要偏大。其原因主要是:自重产生下滑力的同时,也产生抗滑力。由于重力的方向与剪切面的方向不重合,从岩土体抗剪强度公式 $\tau=c+\sigma \tan \phi$ 可以看出,随着自重的增加,剪切面上的法向应力也在增加,从而使岩土体的抗剪强度也略有增加,这样就使得安全系数偏大。因此对于那些平缓、抗剪强度指标又比较高的边坡,抗剪强度增加的幅度比其剪应力本身还要大,这样即使增加重度也不会发生滑坡,重度增加法就会不再适用。而本文采用的强度折减法在验证时,从引起滑坡的内因出发对岩土体的强度指标进行折减,其稳定性分析结果受到抗剪强度 c 值和 ϕ 值、计算网格、屈服准则等因素的影响较大。

b. 文中采用重度增加法是从外因出发,通过不断增加岩土体的重度,最终获得稳定性评价指标,所以内部参数的参数精度直接影响到计算的结果,其中以粘聚力和内摩擦角的精度影响较大。

c. 本文采用重度增加法进行计算时,从重度

增加系数与坡顶位移曲线上很难确定位移是从哪个点开始突然增大的,故安全系数通常只能用一个区间去描述,而文中采用的强度折减法,其主要以静力计算是否收敛作为边坡失稳标准,在进行折减计算不收敛时,其对应的折减系数是一个确切的数值,故获得的安全系数是常数。

6 结 语

a. 本文结合大冶铁矿东露天采场 F₉ 断层带边坡,采用重度增加法对该边坡稳定性进行分析,得到了较满意的结果,其得到的稳定性系数与有限元强度折减法的误差在 9% 左右,与边坡的实际稳定性现状符合。

b. 重度增加法继承了有限单元法的所有优点,考虑了岩土体非线性应力—应变关系,能更好地模拟边坡的破坏,揭示边坡的破坏机理。其结果不仅对工程实践具有指导作用,而且对研究岩土体的破坏机理有积极的意义。同时该方法思路清晰,原理简单,容易掌握和应用工程实际,且随着坡度和坡高的增大,边坡的极限平衡状态将更加容易达到,因此尤其适用于高陡边坡、深基坑的稳定分析中。

参考文献:

- [1] 郑颖人,赵尚毅. 用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 中国科学工程, 2002(11): 57-61.
- [2] 金哲. 重度增加法在砂黄土边坡稳定性分析中的应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(10): 83-85.
- [3] 方庆军,米海珍,银晓鹏. 浅析重度增加法在边坡工程中的应用[J]. 甘肃科学学报, 2008, 20(3): 131-133.
- [4] 徐卫亚,肖武. 基于强度折减和重度增加边坡破坏判据研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 505-511.
- [5] 肖云,周春梅,吴燕玲,等. 露天采场高陡岩质边坡典型地段稳定性分析[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(3): 34-37.
- [6] 康亚明,胡艳香. 重度增加法在某公路边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 23-26.
- [7] 杨明成. 基于重度增加法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006(4): 33-38.
- [8] 方庆军. 基于 ADINA 的边坡稳定性分析[D]. 河海大学学报, 2007, 13(2): 27-28.
- [9] 荣茂田,武亚军,年廷凯. 强度折减有限元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.
- [10] 周健,周春梅,肖云,等. 大冶铁矿东露天采场边坡破坏判据的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(3): 30-33.

(下转第 39 页)

c. 最优方案的选定在很大程度上取决于指标和权系数的选取,选取的恰当与否直接影响方案的选择结果,应用时需进行认真研究。

参考文献:

- [1] 江跃宏. 开拓方案选择中的优先数法[J]. 化工矿山技术, 1989, 18(3): 17-19.
- [2] 马良臣, 陈立文. 矿井设计方案选优的等效系数法[J]. 煤炭学报, 1995, 20(2): 211-213.
- [3] 银开州. 地下矿山开拓方式选择的数值方法及应用[C]. 第六届全国采矿学术会议文集, 1999, 10:

546-549.

- [4] 陈立文, 孙宝铮. 一种新的矿井设计综合评价模型[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 47-50.
- [5] 刘开第, 姚立根, 刘武皓, 等. 矿井设计选优决策模型[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 10-14.
- [6] 李奕楠, 周锡德, 郁钟铭. 等效优先系数法确定矿井设计方案的探讨[J]. 贵州工业大学学报, 2004, 33(1): 40-43.
- [7] 田昌贵, 徐立, 李元松, 等. 艾格佐尔铜钼矿全无轨地下开采方案设计[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(7): 52-56.

Application of equivalent rank coefficient method on optimal selection of mine opening up schemes

LI Yuan-song¹, TIAN Chang-gui¹, CHEN Qing-yun¹, HU Qiao², XU Li¹

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Xinjiang Xinyan Industrial and Trading Co. Ltd. Urumqi 830011, China)

Abstract: In this paper, a new concept that equivalent rank coefficient method is set up base on integrating the research results of application of equivalent coefficient method. The basic principle, implement method and process are introduced in detail. The equivalent rank coefficient method is applied on optimal selecting of mine opening up scheme of Aigedzor Copper molybdenum deposit and the effects are good. In the end, the standardization of characteristic matrix, structure estimate matrix is discussed and the suggestion is put forward for further study.

Key words: equivalent rank coefficient method; mine opening up; optimal selection of schemes

本文编辑: 萧 宁



(上接第 32 页)

Stability analysis of Daye iron mine slope based on gravity increase method

ZENG Kai-bo, ZHOU Chun-mei, WU Yan-ling, LI Xian-fu

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper takes an example of the actual situation in F₉ in eastern open pit of Daye iron mine, and applies gravity increase method in the stability analysis and evaluation about slopes of the typical lot by adopting large finite element software ANSYS. Finally this paper adopts strength reduction method to demonstrate the previous approach, and two methods are compared. The results show that ANSYS programs based on gravity increase method are feasible for stability analysis of the high and steep slopes, which match the actual situation well, and can reasonably determine stability coefficient of slopes easily. This method is one of the effective methods for evaluation of slope stability, and it is significant to guide project practice to some extent.

Key words: gravity increase method; strength reduction FEM; slope stability; daye iron mine; ANSYS

本文编辑: 萧 宁