

Deformation and Stability Analysis of Open-Pit Mining High and Steep Slope Based on ADINA

Ye Tian¹, Baolong Zhang²

¹China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute, Xi'an Shaanxi

²China Railway Resource Group Haixi Coal Co., Ltd., Sining Qinghai

Email: yazmintian@163.com

Received: Apr. 13th, 2015; accepted: Apr. 25th, 2015; published: Apr. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to grasp the opencast coal mine high slope deformation law and stress distribution characteristics, through the analysis of the engineering geological investigation, the paper analyzes the stress distribution and the deformation failure mechanism of the slope of Baorixile open pit coal mine based on ADINA. Slope stability is analyzed based on the strength reduction theory. The results show that the slope may be sliding failure along the weak interlayer and that the failure mode is bedding-trailing edge wear layer sliding (fold line sliding).

Keywords

Open-Pit Mine, Slope, Stability Analysis, ADINA

基于ADINA的露天煤矿高边坡变形及稳定性分析

田 焯¹, 张宝龙²

¹中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安

²中铁资源集团海西煤业有限公司, 青海 西宁

Email: yazmintian@163.com

收稿日期：2015年4月13日；录用日期：2015年4月25日；发布日期：2015年4月29日

摘要

为掌握露天煤矿高边坡变形规律及应力分布特征，基于现场工程地质调绘分析，运用ADINA分析了宝日希勒露天煤矿边坡的应力分布及变形破坏机理，并根据强度折减法理论对边坡稳定性进行计算分析，结果表明：边坡可能沿软弱夹层滑动破坏，且破坏模式为顺层-后缘穿层滑动(折线滑动)。

关键词

露天矿，边坡，稳定性分析，ADINA

1. 引言

随着露天煤矿剥采工作的不断推进，边坡的规模、深度不断增大，这无疑增加了边坡失稳的风险。边坡能否安全运行直接关系到矿山生产、人员及设备的安全，因此边坡稳定性问题就显得尤为重要，而边坡安全问题的解决重点在边坡变形及稳定性的分析。本文以神华宝日希勒露天矿为例，对高边坡的变形及稳定性进行了系统的分析研究。

2. 边坡工程地质条件

2.1. 地形地貌

宝日希勒露天矿位于陈旗煤田宝日希勒矿区西南部，行政隶属陈巴尔虎旗。宝日希勒露天区位于海拉尔河以北，莫勒格尔河以南的楔型地带，其宏观地貌特征属缓波状起伏的高平原地貌，北部及东北部与低山丘陵相接，地势北东高而南西低。海拔+724.09 m~+601.88 m。

2.2. 地质构造

研究区位于一大型极其宽缓的向斜构造中，其轴向自西向东，由 98° 逐渐转为 75° ，平面呈一向南微突的弧形，西窄东宽，波幅宽约3000 m，起伏高差仅40 m，两翼倾角多在 2° 以下，仅个别倾角近 5° 。区内断裂构造不发育，构造相对简单。

2.3. 地层特征

根据二采区2012年补勘工作的揭露情况及以往煤田地质勘探资料显示，本区出露地层由老到新主要为白垩系下统大磨拐河组含煤段和第四系松散覆盖层如表1。

主含煤段地层南厚北薄，煤层向北缓慢变薄，几乎不分叉，不见有边缘相多往南则分叉变薄尖灭。其中， 1^2 (1^{2+3})、 2^1 、 3^1 煤层厚度最大，且较为稳定，是露天开采的主要煤层。煤层构造为顺倾，不利于边坡的稳定。

区内岩石颗粒间多为泥质胶结、极少数为钙胶结，岩石强度低，组成边坡稳定性差。煤层中的夹矸及泥岩中的蒙脱石、高岭土、伊利石等黏土矿物经差热分析显示，高岭石含量为6%~12%，伊利石4%~12%，蒙脱石含4%~14%，含量较高，遇水易膨胀、粘土矿物含水率为50%~55%，抗剪强度很低，内摩擦角小于 5° ，使岩石的工程地质性能弱化。

Table 1. The main stratum characteristics

表 1. 主要地层特征

地层年代	主要岩性	特征
第四系(Q)	粘土、粉砂质粘土	厚度在 11.70~39.65 m 间, 棕褐色, 带泥裂、致密、且有塑性, 含少量的砾石和砖红色腐植土。
	煤	煤层分为 5 个煤组, 共 9 个煤层, 其中 B、1 ³ 、2 ² 、3 ²⁺³ 、4、5 煤层分布有限, 且煤层薄而不全。
白垩系大磨拐河组 (K ₁ d)	砂岩	主要为浅灰~白灰~灰白色的砂岩, 主要分布于煤层顶底板, 厚度较大, 质软且全区分布
	泥岩	主要分布在 1 ³ 、2 ¹ 、2 ² 底板及 3 ¹ 、3 ²⁺³ 顶、底板

3. 边坡变形破坏特征

3.1. 破坏特征

自 2001 年 8 月开始至 2013 年 5 月, 评价区内几乎每年都出现不同规模滑坡, 造成停工、增加清理费用, 给煤矿造成巨大的损失, 严重威胁到露天矿边坡的正常工作。

根据现场踏勘、调查统计, 边坡变形坡面裂缝滑塌, 沉陷主要由于帮坡滑塌、地表开裂、采空区等许多不良地质现象造成(表 2)。

采区各个帮坡上裂缝都较为发育, 主要分布在坡顶。拉裂缝、剪裂缝为主, 致使帮坡滑移或滑塌, 对生产、设备等都造成了一定损失。

南端帮坡顶外侧近两年出现塌陷频繁, 且大部分出现于废弃矿井与南端帮之间, 已严重威胁到二采区帮坡的正常运行。

二采区南侧分布大量采空区, 且分布不详, 目前正采取物理勘探手段进行勘察。通过统计, 近几年发生的滑坡大多发生在 2 月~5 月, 应重视冻融及水致使边坡破坏。

3.2. 变形失稳形式

根据已揭露的地层, 全区普遍分布发育软弱夹层, 位于煤层顶板以下 10~14 m, 厚度约 2~5 cm, 软弱层呈褐色、黑褐色, 软塑状, 根据室内试验, 其抗剪强度极低, 且随着剪应力作用的时间延长而降低。边坡发生蠕变滑动, 最终导致边坡变形失稳, 发生滑落。

3.3. 边坡变形破坏模式地质分析

一般来说, 岩体的变形破坏有两种方式: 一为岩块沿结构面或主要受结构面控制发生破坏; 二是岩块强度不足而产生破裂面追踪形成的滑动面延展的方式破坏[1]。研究区地层岩性以泥岩及泥质胶结的砂岩为主, 强度低, 且研究区断裂构造不发育。因此, 不易发生第一种方式破坏。有前面分析可知, 因岩石强度低因此极易产生破裂面进而沿软弱夹层追踪滑动面形成蠕变, 发生破坏。

4. 边坡 Adina 有限元软件计算分析

4.1. 模型建立

模型的建立过程中, 尽可能模拟各地质剖面的地质条件, 以符合客观存在, 本文选取典型剖面(图 1)遵循以下原则:

- 1) 将各帮坡煤层最薄, 边坡最高的断面作为典型计算断面;
- 2) 选取资料齐全的区域;

Table 2. In recent years, the statistics information of landslide
表 2. 近年滑坡信息统计表

时间	滑坡位置	滑坡规模	影响范围	破坏模式	备注
2001.8	首采区东端帮	南北长 448.4 m, 东西宽 251.5 m 的范围整体滑移, 平均下沉 5.6 m, 岩土总移动量 59.3 万 m ³	105,838 m ²	滑塌	煤层中的炭质泥岩
2005.9	首采区东边帮	出现长约 465 m 长裂缝, 滑坡体积 60 万 m ³	30,905 m ²	—	
2006.10	首采区东边帮	出现 20 cm 宽的裂缝, 滑坡体积 150 万 m ³	54,101 m ²	—	现滑动体, 未滑动
2006	南帮	—	—	—	破碎站遭破坏
2007.7	首采区东边帮	出现长约 439 m 长裂缝	—	—	
2008.11	首采区西边帮	5 m 宽的裂缝距西端帮坡顶 60 m, 南北长 350 m, 地表下沉 14 m, 煤层水平错动 20 m, 滑坡体积 350 万 m ³	—	滑移	发生 3 次
2009.4	内排土场	出现南北长 750 m, 东西 630 m, 滑坡体积 1050 万 m ³ , 移动距离 200 m	450,000 m ²	滑移	09 年末滑体前缘又南移 100 m
2010.2	首采区西边帮地表	出现长 531.6 m, 宽 5~10 cm 裂缝, 煤层 562 底鼓胀, 水平长 100 m。7 月又出现煤层 570 底鼓胀水平长 531.6 m	—	错动底鼓	预应力锚索失效、滑面距顶板 12~14 m
2011.2	南端帮坡顶外侧	自 02~07 月出现 9 处塌陷	—	塌陷	
2011.5	南排土场东帮	—	—	沉陷	
2012.3	南端帮坡顶外侧偏东	自 03~11 月出现 9 处塌陷	—	塌陷	
2012.5 至今	南端帮西侧	煤层软弱层错动, 错动距离近 50 cm, 范围约 200 m	—	错动	
2013.5	西帮北侧	南北长 400 m	—	错动	

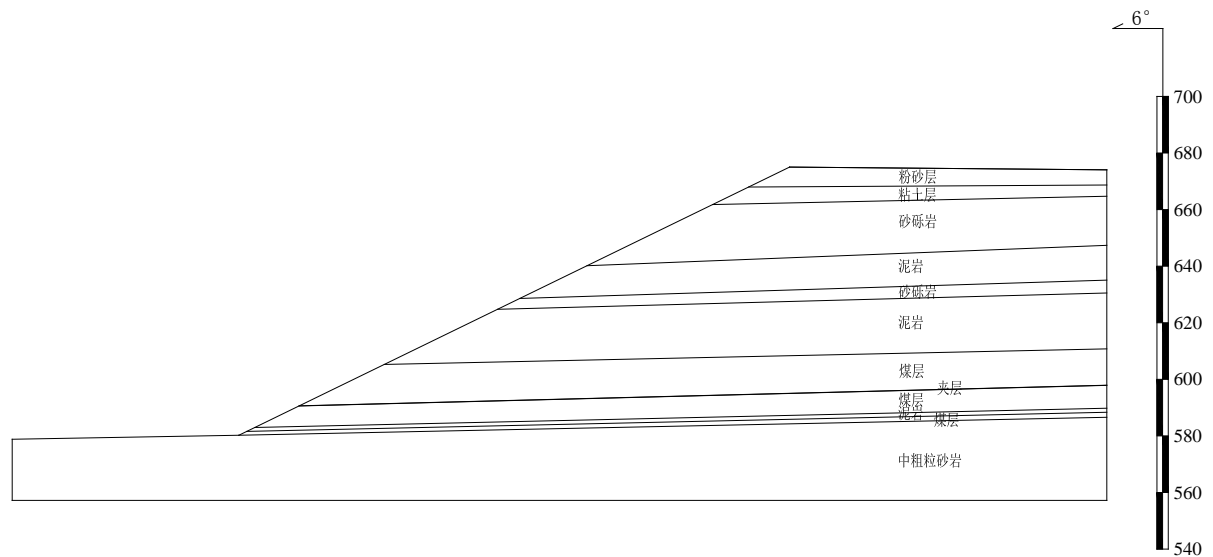


Figure 1. South of the studied area for engineering geological model figure of S1 section (h = 95 m)

图 1. 研究区南帮 S1 断面工程地质模型图(h = 95 m)

3) 地层顺倾且倾角最大处作为典型计算断面。

边坡组成岩体按岩性情况分为不同的材料，均是基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的理想弹塑性材料，流动法则采用相关流动法则，即剪胀角等于内摩擦角。最大迭代次数设定为 15，采用位移收敛准则，加载方式为自重加载。按平面应变问题处理，坡体底边界为固定约束，左右边界为水平约束，其它边界均为自由端[2] [3]。

4.2. 模拟分析

本研究利用强度折减法逐级对 c 、 φ 值进行折减，直到数值解出现不收敛或者形成塑性贯通区域为止，本文模型材料所取参数如表 3。

判据边坡失稳条件[4] [5]：

- 1) 在有限元计算过程中采用力和位移的不收敛作为边坡失稳的标志。
- 2) 以广义塑性应变或者等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为边坡破坏的标志。
- 3) 滑动面上的位移与应变将产生突变，产生很大的且无限制的塑性流动。

由图 2~4 可知，塑性区域主要分布在 c 、 φ 值相对较小的地层中，利用强度折减法对 c 、 φ 值同时折减，随着 F 值增加，塑性区域增大，上下塑性区出现连通，但整个塑性区域未完全贯通，因此边坡处于相对稳定状态。

进而对 c 、 φ 值进行折减，当 $F = 1.26$ 时，有限元静力平衡计算不收敛，说明边坡失稳破坏。

由图 5~7 可知，随着 c 、 φ 值同时折减，塑性区应变范围逐渐增大且向上有贯通趋势。塑性应变最大的部位在软弱岩层处，因此边坡失稳滑动延软弱岩层顺层滑动，上部岩层由于滑动受剪应力作用，发生穿层破坏。

应力云图图 8 表明，有效应力从下往上逐渐变小，且可以发现相对较软的岩层所受应力较大。

塑性应变矢量图如图 9 所示，从图中可以再次明显的观察到滑动面的位置。及塑性应变的区域。

4.3. 极限平衡法稳定性计算

基于极限平衡法原理的边坡稳定计算有多种方法，根据不同的适用条件，主要有摩根斯坦—普瑞斯 (Morgenstern-Price) 法、毕肖普 (Bishop) 法、简布 (Janbu) 法、推力法、萨尔玛 (Sarma) 法等[6]。

根据相关规范及经验[7] [8]，本次采场稳定性分析采用简布法 (Janbu) 并利用理正软件进行计算，计算结果如图 10。

图中 AB 段为事先假定的滑动面，BC 段为通过计算得到可能最危险滑动面，计算安全系数 $F_s = 1.17$ ，变形破坏为下部延假定软弱面滑动，上部穿层破坏。

4.4. 计算精度分析

工程上所用的方法如瑞典条分法和简布法需要对滑动面做出假定，再进行计算，最后得出最小解，以此作为稳定性安全系数和最危险滑动面，计算较为烦琐，而且在力平衡等方面需要作出一些假定。而基于有限元的强度折减法不需要对滑动面形状和位置做假定，通过强度折减使边坡达到不稳定状态时，边坡沿着“自然的”破坏面滑动，并可自行搜索其它可能的滑动面，这与实际情况更符合[9]。

因此，基于 ADINA 的强度折减法算出的稳定性安全系数为 1.25 与简布法所得的稳定性安全系数 1.17 相差 7%，说明强度折减法在进行边坡稳定性计算时有较高的精度，是可以应用于实际工程的，同时也说明使用岩土工程软件中的简布法算出的稳定性安全系数是偏于保守的。

Table 3. The model material parameters
表 3. 模型材料所取参数

岩性	弹性模量 E (Pa)	泊松比 λ	密度 ρ (kg/m ³)	内摩擦角 ψ (°)	凝聚力 C (Pa)
粉砂层	6.201E+6	0.2	1880	26	26,200
黏土层	7.767E+6	0.18	1880	20	67,800
砂砾岩	2.1E+8	0.21	1900	43	32,700
泥岩	1.567E+9	0.2	2160	17	60,000
煤层	1.79E+10	0.19	1130	39.6	289,500
细砂岩	9.6 E+8	0.2	1910	17.2	32,000
中砂岩	8.5E+8	0.23	1900	25	28,000
中粗粒砂岩	7.58 E+9	0.22	1900	30	22,500
软弱夹层	8.25E+8	0.2	1500	4.8	25,400

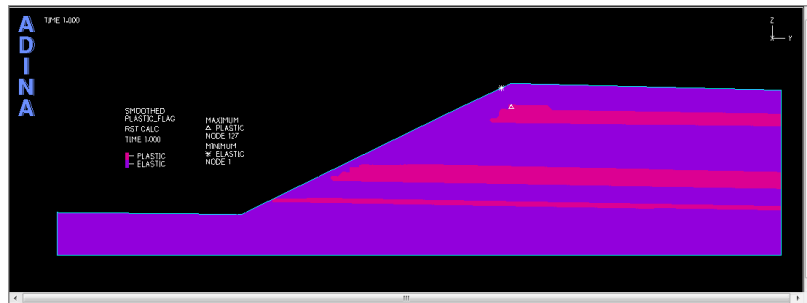


Figure 2. F = 1.06, distribution of plastic zone of slope
图 2. F = 1.06 时, 边坡塑性区分布图

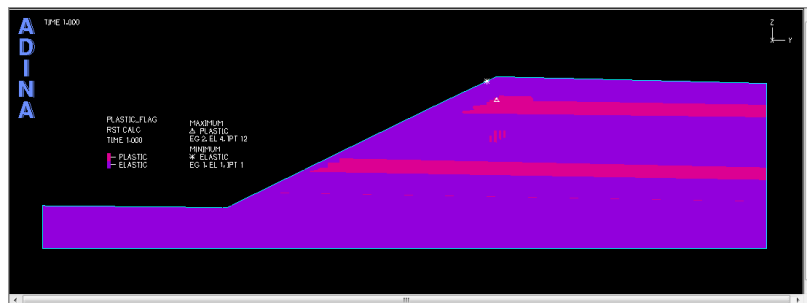


Figure 3. F = 1.18, distribution of plastic zone of slope
图 3. F = 1.18 时, 边坡塑性区分布图

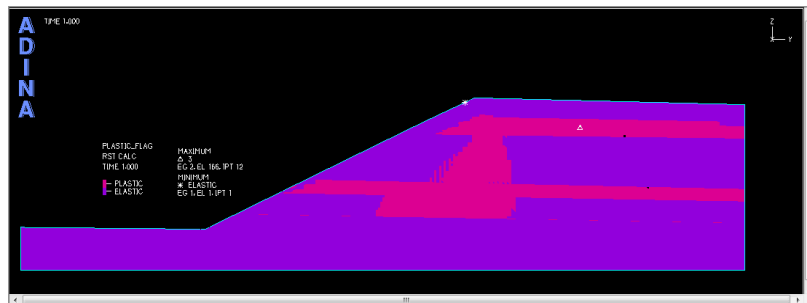


Figure 4. F = 1.25, distribution of plastic zone of slope
图 4. F = 1.25 时, 边坡塑性区分布图

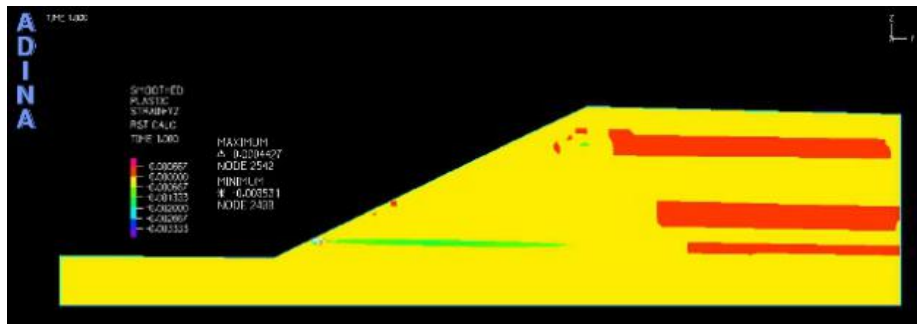


Figure 5. $F = 1.06$, the slope of the plastic zone and strain
图 5. $F = 1.06$ 时, 边坡塑性应变云图

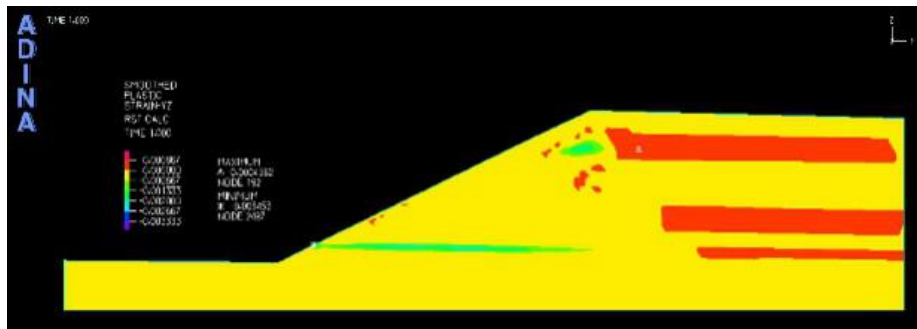


Figure 6. $F = 1.18$, the slope of the plastic zone and strain
图 6. $F = 1.18$ 时, 边坡塑性区应变云图

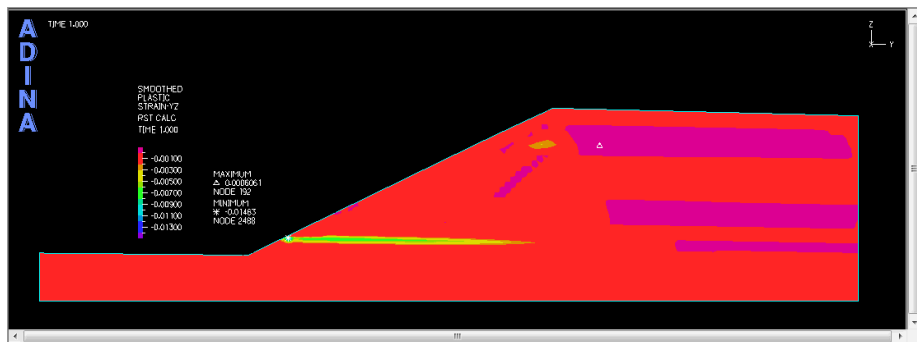


Figure 7. $F = 1.25$, the slope of the plastic zone and strain
图 7. $F = 1.25$ 时, 边坡塑性区应变云图

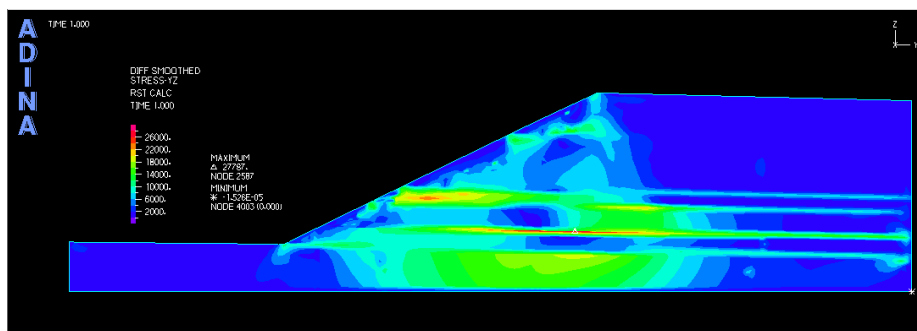


Figure 8. $F = 1.25$, the stress nephogram
图 8. $F = 1.25$ 时, 应力云图

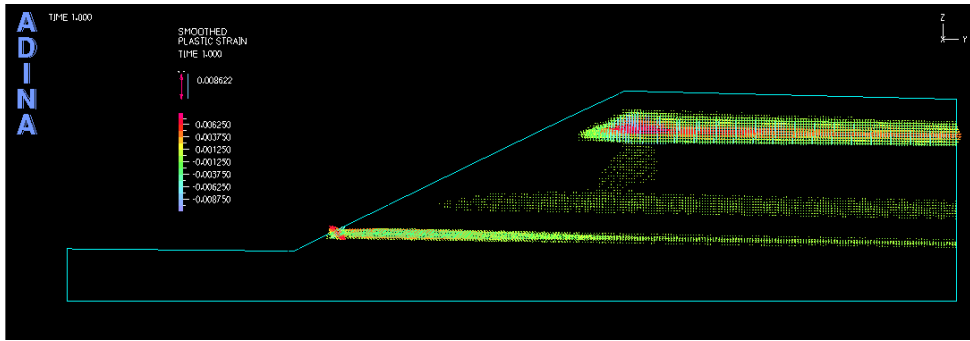


Figure 9. $F = 1.25$, plastic strain vector
图 9. $F = 1.25$ 时，塑性应变矢量图

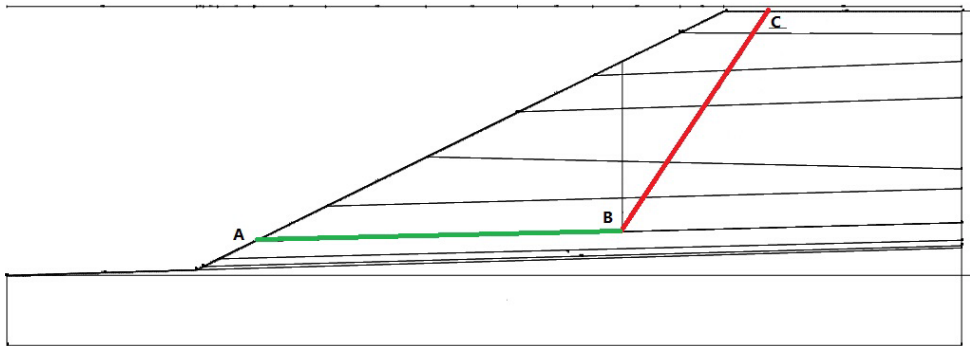


Figure 10. The calculation results of Janbu method
图 10. 简布法计算结果

5. 结论

1) 通过 ADINA 有限元分析得出边坡的塑性区均分布在软弱夹层及强度较低的岩层与土层中；通过两种方法计算结果表明边坡的变形方式是上部为切层圆弧滑动，下部为沿强度较低的岩层顺层滑动，变形破坏模式为顺层 - 后缘穿层滑动(折线滑动) [10]。

2) 通过强度折减法与极限平衡法分析对比，折减系数为 1.25 时边坡处于临界平衡状态，因此该边坡安全系数为 1.25，且边坡处于稳定状态。

基金项目

中铁资源集团有限公司科技开发计划项目(2012-重点-61)；中煤科工集团西安研究院有限公司创新基金(2012XAYCX020)；中科院冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201311)。

参考文献 (References)

- [1] 孙广忠 (1983) 岩体力学基础. 科学出版社, 北京.
- [2] 岳戈, 陈权 (2008) ADINA 应用基础与实例详解. 人民交通出版社, 北京.
- [3] 马野, 袁志丹, 曹金凤 (2011) ADINA 有限元经典实例分析. 机械工业出版社, 北京, 10.
- [4] 袁宝远 (2012) 基于 Adina 软件的大型边坡变形与稳定性分析. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2, 7-11.
- [5] 方庆军 (2008) 基于 ADINA 的边坡稳定性分析. 硕士论文, 兰州理工大学, 兰州.
- [6] 赵成刚, 白冰 (2004) 土力学原理. 清华大学出版社/北京交通大学出版社, 北京.
- [7] 陈祖煌 (2003) 土质边坡稳定分析. 中国水利水电出版社, 北京.

- [8] 姜德义, 朱合华, 杜云贵 (2005) 边坡稳定性分析与滑坡防治. 重庆大学出版社, 重庆.
- [9] 孙常玉, 等 (2006) 基于 ADINA 接触算法的岩质边坡稳定分析. *水利建筑工程学报*, 4, 26, 27, 63.
- [10] 孙玉科, 等 (1999) 中国露天矿边坡稳定性研究. 中国科学技术出版社, 北京.