

露天矿山开采对下部既有巷道稳定性的影响分析

胡世兴^{1*}, 陈兴勇², 靳晓光¹

¹重庆大学土木工程学院, 重庆

²重庆助安科技有限公司, 重庆

Email: *hsxcqu@163.com

收稿日期: 2020年12月16日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

为了研究露天矿山开采对下部既有巷道的影响程度, 确定露天矿山拟开采的深度, 本文依托重庆某建筑石料用灰岩露天矿山拟开采过程, 采用三维有限元分析方法, 对露天矿山开采引起的下部不同高程的既有巷道围岩位移、应力及塑形发展过程进行了分析。当开采高程为+470 m时, +439、+425高程的巷道均较稳定; 当开采高程低于+470 m时, 矿山开采对+439、+425高程的巷道稳定性有较大影响, 据此确定了比较合理的露天矿山开采深度64 m (+470 m)。

关键词

露天矿山, 下部巷道, 变形, 应力, 塑形区

Study of the Influence of Open-Pit Mining on the Stability of Existing Tunnel under the Mine

Shixing Hu^{1*}, Xingyong Chen², Xiaoguang Jin¹

¹School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing

²Chongqing Zhu'an Technology Co., Ltd., Chongqing

Email: *hsxcqu@163.com

Received: Dec. 16th, 2020; accepted: Jan. 19th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

Abstract

In order to study the influence of open-pit mining on the existing tunnel below and determine the

*通讯作者。

proposed mining depth of open-pit mine, this paper, based on the proposed mining process of a limestone open pit mine for construction stone in Chongqing, use three-dimensional finite element analysis method to analyze displacement, stress and shaping of the surrounding rock of existing tunnel at different elevations caused by open pit mining. When the mining elevation is +470 m, the tunnel at +439 m and +425 m is stable. When the mining elevation is lower than +470 m, it has a great influence on the stability of tunnel at +439 m and +425 m. Therefore, a reasonable mining depth of 64 m (+470 m) is determined.

Keywords

Open-Pit Mine, Lower Tunnel, Deformation, Stress, Plastic Area

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

露天矿山开采必将打破原有岩体地应力的受力平衡,引起周围岩土体应力重分布,从而引起周边既有建构筑物的变形。目前已有较多学者对此类问题进行了诸多研究,文献[1] [2] [3]通过理论方法推导了计算上部基坑开挖引起既有隧道变形的的方法;潘强等[4]从露天矿山爆破扰动范围、振动速度以及数值模拟三方面综合分析了露天矿山爆破对拟建隧道的影响;吴亮等[5]通过有限元软件分析了露天矿边坡爆破对既有隧道的影响;王翠萍[6]使用 FLAC3D 分析了露天矿边坡开挖及回填对隧道结构应力场和应变场的影响规律;杜明礼等[7]通过 Midas GTS NX 有限元软件分析基坑开挖对侧方既有地铁车站区间的影响;高睿等[8]通过有限元软件分析了基坑开挖对下部隧道结构的影响,并提出了保护既有结构的施工方案。本文依托重庆某建筑石料用灰岩露天矿山开采,使用有限元软件 Midas GTS NX 分析露天矿山开采对下部既有巷道的影响,为露天矿山开采提供理论依据。

2. 工程概况

依托矿山开采范围如图 1 所示,开采区长 357 m,台阶高度 10 m。原方案拟开采的最深深度为 74 m,

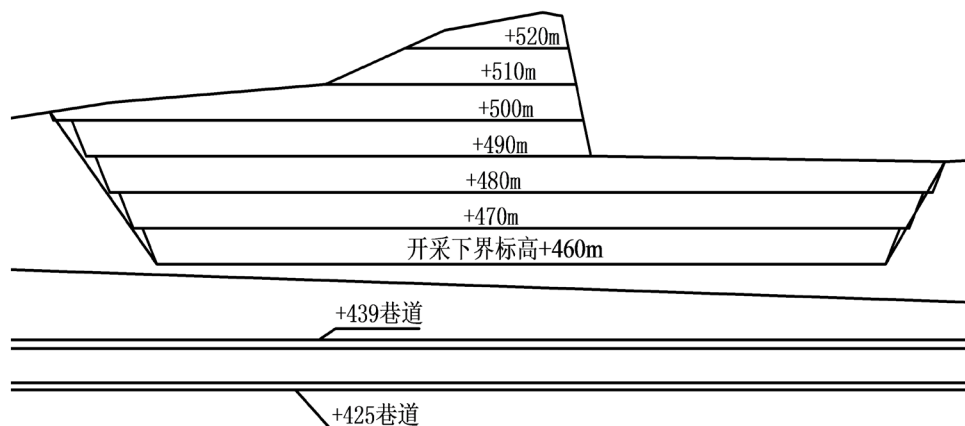


Figure 1. Schematic diagram of excavation scope
图 1. 开采范围示意图

即底部标高为+460 m。开采区域下部有其他地下矿山的巷道，高程分别为+425 m 和+439 m，与上部灰岩开采区底部距离分别为 32.1 m 和 18.5 m，相对关系如图 2 所示(右为+439 巷道，左为+425 巷道)。开采区底部标高 460 m 水平以上为三叠系下统嘉陵江组第三段 T_{1j}^3 石灰岩，以下为三叠系下统嘉陵江组第四段 T_{1j}^4 白云质灰岩，场地岩体整体性较好。



Figure 2. Tunnel location
图 2. 巷道位置图

3. 数值分析模型

3.1. 模型建立

为了减小边界效应对计算结果的影响，常取分析场地左、右两侧的计算边界为隧道跨度的 3~5 倍以上，巷道下部计算边界为巷道总高的 2 倍以上。有限元模型固定前、后、左、右边界的法向位移，固定底面 Z 方向的位移，模型顶面为自由面。建立的数值模型范围为：前边界取 425 巷道侧方 40 m，后边界取 439 巷道侧方 40 m，左边界取拟定采矿区左侧 50 m，右边界取拟定采矿区右侧 50 m，下边界取 425 巷道下边缘 50 m，上边界为地表面，如图 3 所示。

巷道轮廓大致为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的正方形，由于原巷道采用爆破方式掘进，考虑爆破作用对巷道周围 2.5 m 的围岩有一定的损伤。

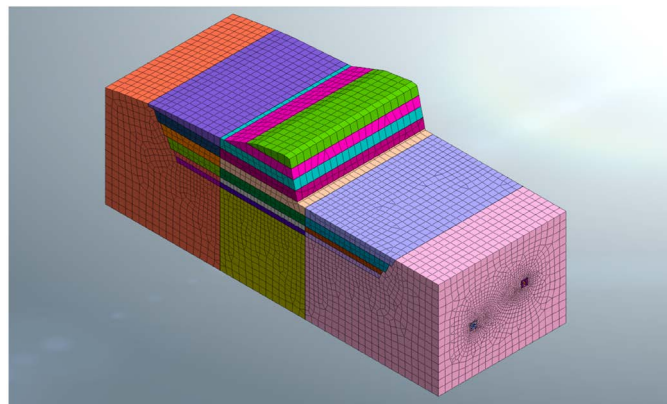


Figure 3. Calculation model
图 3. 计算模型

3.2. 参数选取

依据矿山开发资料, 考虑原巷道爆破开采对围岩的劣化作用(影响范围设定为 2.5 m), 数值模拟采用的岩土体材料物理力学参数如表 1 所示, 石灰岩材料采用莫尔 - 库伦本构模型。

Table 1. Material parameters of rock and soil

表 1. 岩土体材料参数

材料	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$	τ/kPa
石灰岩/白云质灰岩	4500	0.25	26.7	1100	36	500
爆破损伤的围岩	3600	0.26	26.7	880	34	400

3.3. 开采步序

在对模型进行试算时, 发现由于开采卸荷作用, +439 巷道有较多塑性区域, 存在一定的安全隐患, 所以在分析时将最底层开采区域分步开采, 即分成两步开采, 一次开采 5 m。

模拟过程如下:

1) 进行初始场地自重应力平衡;

2) 对巷道 439、425 进行开采, 并考虑爆破对围岩的损伤;

3) 对模型进行位移清零, 保留应力历史;

4) 对上部采矿区进行开采。将上部 1、2 层, 3、4 层, 5、6 层分三步进行开采, 将第 7 层开采区分成两层分别进行开采, 一共 5 步开采完成, 如图 4 所示。

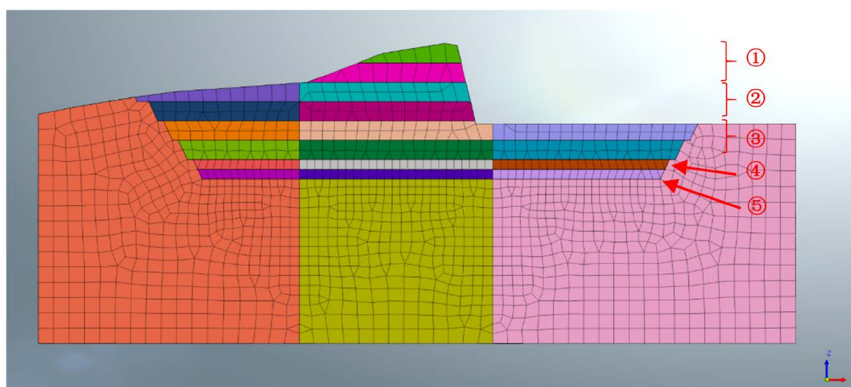


Figure 4. Excavation simulation steps

图 4. 开采模拟步骤

4. 模拟结果及分析

4.1. 围岩位移

露天开采至+460 m 高程, 巷道+439 的位移云图如图 5 所示, 巷道+425 的位移云图如图 6 所示, 图 7 给出了巷道顶部沿巷道纵向竖向位移变化曲线图(左为巷道+439, 右为巷道+425); 巷道+439 最终位移最大截面处, 上下壁竖向位移随开采步的变化如表 2 所示, 巷道+425 最终位移最大截面处, 上下壁竖向位移随开采步的变化如表 3 所示。

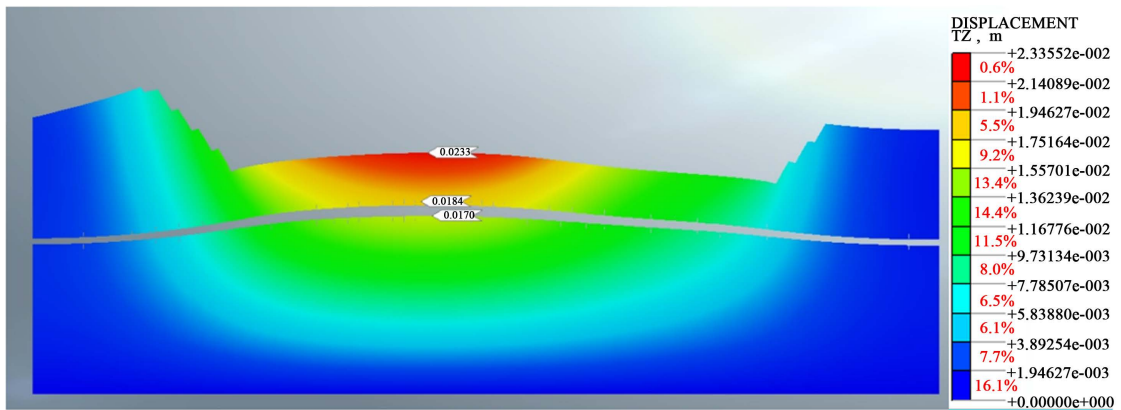


Figure 5. Cloud map of the vertical displacement of tunnel +439

图 5. 巷道+439 位移图

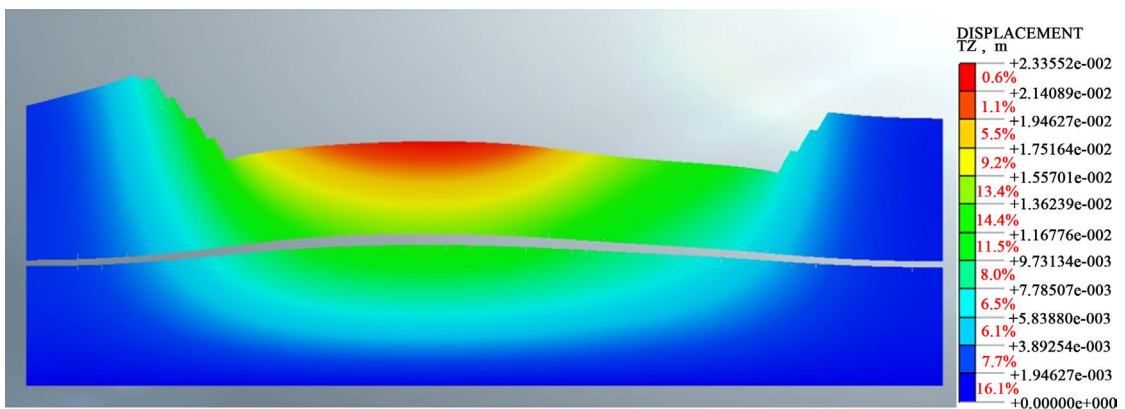


Figure 6. Cloud map of the vertical displacement of tunnel +425

图 6. 巷道+425 位移云图

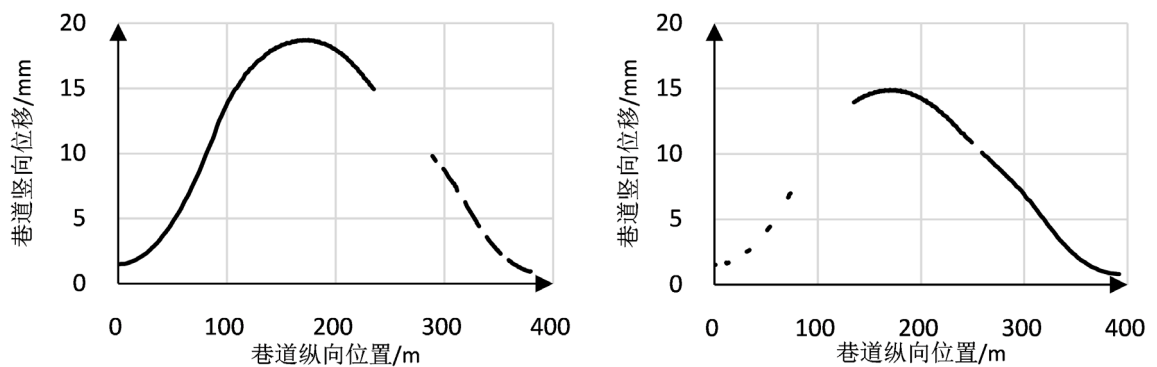


Figure 7. Cloud map of the vertical displacement of tunnel 439 (right) and 425 (left)

图 7. 巷道+439 (左)与+425 (右)位移云图

Table 2. Vertical displacement of the maximum final displacement section at top and bottom of the tunnel 439

表 2. +439 巷道最终位移最大截面上、下壁竖向位移变化

施工步	巷道开采	1、2层开采	3、4层开采	5、6层开采	7层开采 5 m	7层开采 10 m
上壁	-1.44	2.72	7.68	14.56	16.29	18.00
下壁	1.00	2.28	6.50	12.43	13.93	15.42

Table 3. Vertical displacement of the maximum final displacement section at top and bottom of the tunnel 425
表 3. +425 巷道最终位移最大截面上、下壁竖向位移变化

施工步	1、2层开采	3、4层开采	5、6层开采	7层开采 5 m	7层开采 10 m	1、2层开采
上壁	-1.65	1.62	6.40	11.93	13.31	14.71
下壁	1.33	1.31	5.22	9.76	10.90	12.05

可以看出，+439 巷道最终竖向位移约为 18.00 mm，原始场地最高截面处竖向隆起最大，竖向位移沿纵向变化较为均匀，且随着露天矿区的开采，竖向位移逐渐增大。+425 巷道最终竖向位移约为 14.70 mm，原始场地最高截面处竖向隆起最大，竖向位移沿纵向变化较为均匀；且随着露天矿区的开采，竖向位移逐渐增大。+439 巷道与+425 巷道的位移值均在允许范围内。

4.2. 围岩应力

+439 巷道竖向应力云图如图 8 所示，左右壁竖向应力及水平应力变化如表 4 所示；+425 巷道竖向应力云图如图 9 所示，左右壁竖向应力及水平应力变化如表 5 所示；460 m 矿层开采完成后，埋深最大截面处主应力分布图如图 10 所示。

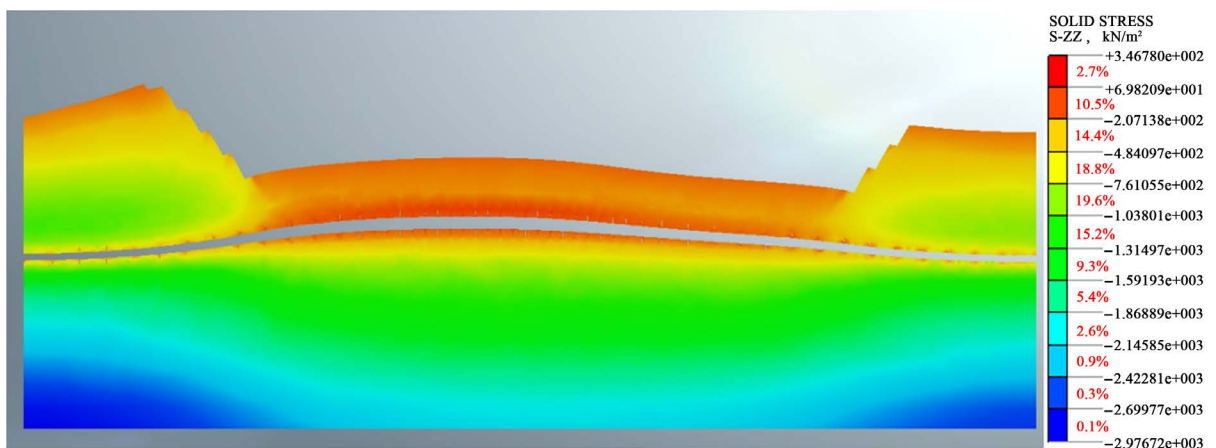


Figure 8. Cloud map of the vertical stress of tunnel 439
图 8. 巷道+439 竖向应力云图

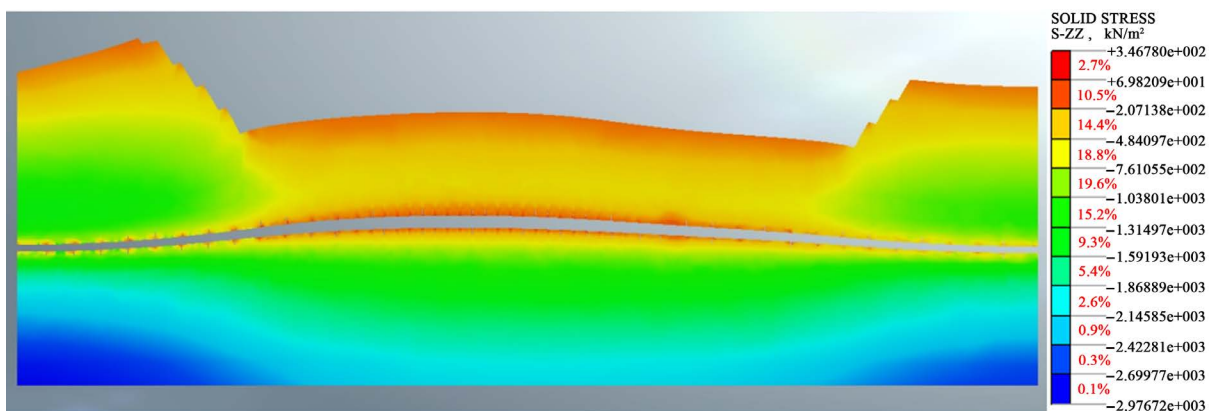


Figure 9. Cloud map of the vertical stress of tunnel 425
图 9. 巷道+425 竖向应力云图

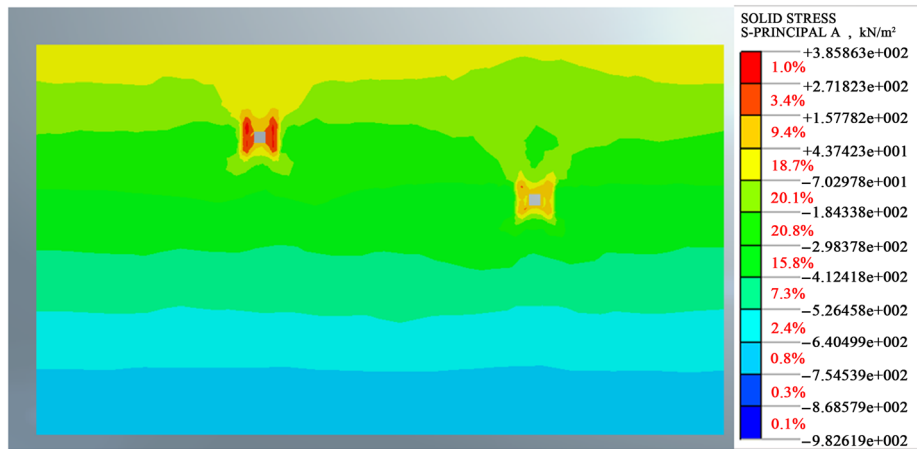


Figure 10. Nephogram of principal stress at the maximum section of buried depth
图 10. 埋深最大截面处主应力分布图

Table 4. Stress change of the left and right surface of tunnel 439
表 4. +439 巷道左右壁应力变化

施工步	巷道开采	1、2层开采	3、4层开采	5、6层开采	7层开采 5 m	7层开采 10 m	
竖向应力	左壁	-1626.92	-1314.13	-810.04	-143.72	19.89	176.86
	右壁	-1640.33	-1327.27	-822.16	-149.77	15.57	175.22
水平应力	左壁	-0.17	0.41	-0.74	-4.55	-5.62	-6.39
	右壁	-49.70	-42.15	-30.93	-16.20	-12.61	-8.90

Table 5. Stress change of the left and right surface of tunnel 425
表 5. +425 巷道左右壁应力变化

施工步	巷道开采	1、2层开采	3、4层开采	5、6层开采	7层开采 5m	7层开采 10 m	
竖向应力	左壁	-1940.90	-1656.07	-1165.68	-475.60	-302.26	-130.92
	右壁	-1905.23	-1621.64	-1136.11	-454.76	-283.75	-114.75
水平应力	左壁	-72.19	-63.14	-47.97	-26.46	-21.04	-15.65
	右壁	-15.43	-12.90	-10.06	-8.08	-7.66	-7.33

对比图 8 与图 9 可以看出，相对于+425 巷道，+439 巷道由于埋深较浅，开采后顶部区域竖向应力较大。从图 10 可以看出，露天矿区 460 标高开采后，巷道+439 左右壁应力较为集中，+425 巷道周围应力集中现象不明显。

从表 3 可以看出，+439 巷道随着地表采矿区的开采，左右侧壁竖向应力逐渐变小，从受压状态逐渐变成受拉状态，+439 巷道左右侧壁水平应力自始至终都较小。从表 4 可以看出，+425 巷道随着地表采矿区的开采，左右侧壁竖向应力逐渐变小，未形成受拉应力，应力值相对较小，+425 巷道左右侧壁水平应力自始至终都较小。

由于开采卸荷引起巷道周边应力重分配，+439 巷道受到的影响明显大于+425 巷道。

4.3. 围岩塑形状态

各施工步完成后，单元塑形区分布如图 11 所示。

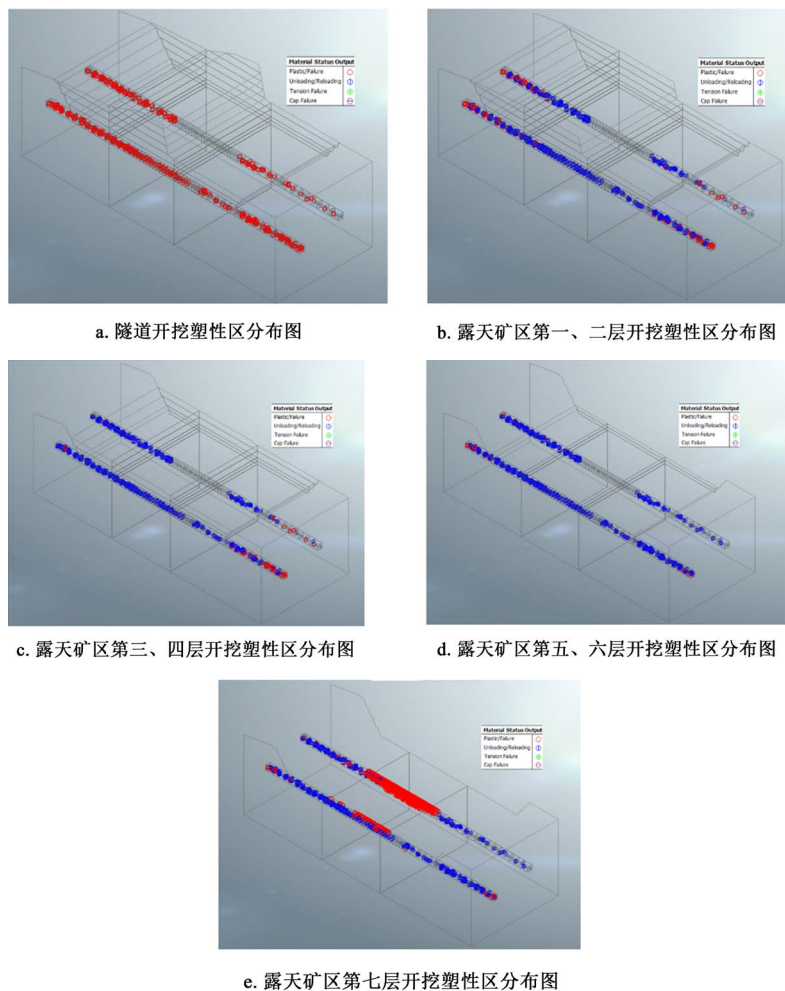


Figure 11. Development map of shaping area
图 11. 塑性区发展图

从图 11(a)可以看出, 巷道开采之初, 在巷道周围有较少塑性区出现, 但并未连成片, 且巷道已经修建多年, 变形基本稳定。

从图 11(b)~(e)可以看出, 在第六层(底部标高 470 m)开采后, 几乎无塑性区, 标高+460 m 矿区全部开采完成后, +439 巷道有较多塑性区出现, 且主要集中在开采区正下方的围岩松动区边缘, +425 巷道围岩弱化区有部分塑性区, 但未形成大片贯通, 如图 12 所示。因此+439 巷道存在一定的安全隐患。

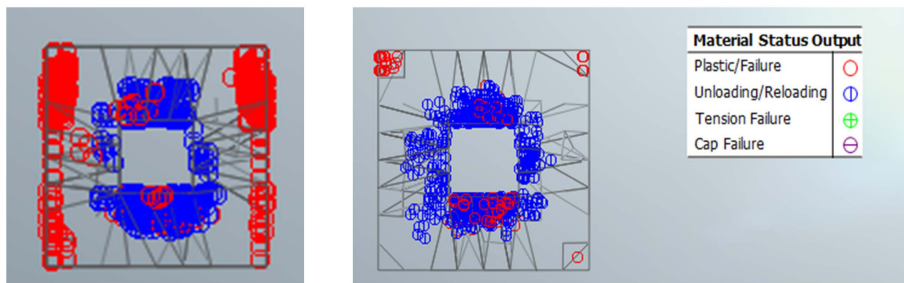


Figure 12. Shaping area of tunnel 439 (left) and 425 (right) after excavation
图 12. 开采完成后 439 巷道(左)与 425 巷道(右)塑形区

将 460 m~470 m 开采层分成 5 m + 5 m 的两层分别进行开采，得到的结果如图 13 所示。

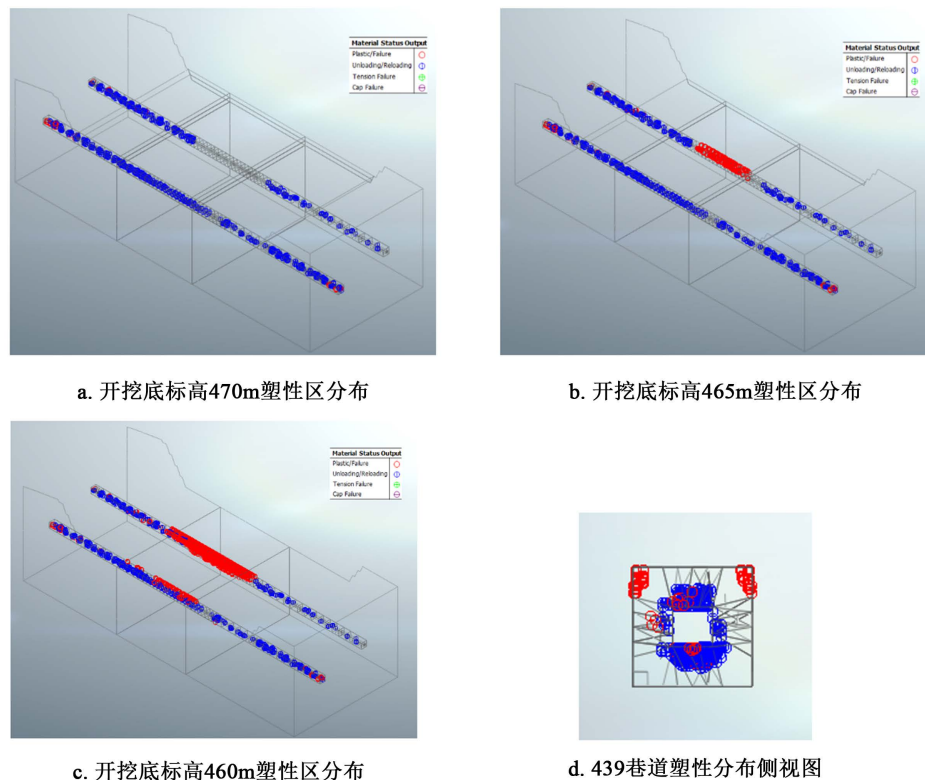


Figure 13. Influence of excavation depth on tunnel 439

图 13. 露天开采深度对+439 巷道影响图

从图 13 可以看出，开采至+460 m 标高时，+439 巷道含有较多塑性区，巷道顶部出现大面积破坏，危险系数较大。开采至+465 m 标高时，+425 巷道几乎无塑性区，安全；+439 巷道围岩松动区边缘有较少塑性区，但未贯通成片，未出现整体破坏，出现局部破坏，有一定的危险。

开采至+470 m 标高时，+439 巷道、+425 巷道几乎均无塑性区出现，此方案较为安全。

5. 结论

露天矿山开采过程的三维有限元分析表明，露天矿山开采引起的下部巷道位移较小，但会产生较大塑性区。当开采高程为+470 m 时，+439、+425 高程的巷道均较稳定；当开采高程低于+470 m 时，矿山开采对+439、+425 高程的巷道稳定性有较大影响；当开采高程为+465 m 时，+439 巷道可能出现局部破坏现象，+425 巷道较为稳定；当开采深度达到+460 m 时，+439 巷道出现大面积破坏，+425 巷道出现局部破坏。建议露天矿山开采的高程不应低于+470 m，以保证下部既有巷道的安全。

参考文献

- [1] 陈郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91-94.
- [2] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [3] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 531-535.
- [4] 潘强, 张继春. 露天矿山爆破对拟建隧道的影响分析[J]. 化工矿物与加工, 2012, 41(1): 27-30.

- [5] 吴亮, 金沐, 李雷斌, 等. 露天矿边坡爆破对既有隧道的影响分析[J]. 金属矿山, 2015(5): 7-11.
- [6] 王翠萍. 露天矿边坡开挖对邻近铁路隧道的影响分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(6): 78-81.
- [7] 杜明礼, 余建河. 基坑开挖对侧方既有地铁车站区间影响的数值分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(24): 49-51.
- [8] 高睿, 卢新建, 王为民, 等. 基坑开挖对既有隧道结构影响分析[J]. 福建建筑, 2020(11): 74-79.