

基于FLAC3D的煤矿开采诱发地表沉降研究

王林强

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年8月30日; 录用日期: 2025年9月20日; 发布日期: 2025年10月15日

摘要

煤矿开采会导致周边岩体的初始应力状态被打破, 从而诱发地表及其上覆岩层的沉降。基于FLAC3D对河南某煤矿开采过程进行模拟。分析了煤炭开采引起地表及上覆岩层的沉降变化规律。煤矿开采后, 初始应力状态发生变化, 在竖直方向上主要是压应力, 在开采区域顶部和底板出现应力降低区, 而在左右煤壁和后壁处出现压应力集中。沉降量始终关于模型中轴线即采空区中心呈对称分布, 沉降量最大值始终处于采空区中心以上, 距采空区中心距离越远, 沉降量越小。分步开挖的整个过程中, 随着开采长度的增加, 除了底部隆起之外, 其他部位的沉降量都在增大, 而底部隆起量也在增加。开采完成后, 区域内最大沉降量达到354.94 mm, 地表最大沉降量为42.1 mm。

关键词

FLAC3D, 地表沉降, 煤矿开采

Study on Surface Subsidence Induced by Coal Mining Based on FLAC3D

Linqiang Wang

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: August 30, 2025; accepted: September 20, 2025; published: October 15, 2025

Abstract

Coal mining disrupts the initial stress state of the surrounding rock mass, thereby inducing subsidence in the surface and overlying strata. Based on FLAC3D, the mining process of a coal mine in Henan Province was simulated. This study analyzes the patterns of surface and overlying strata subsidence caused by coal extraction. After mining, the initial stress field is redistributed, characterized primarily by compressive stress in the vertical direction. A stress reduction zone appears at

the roof and floor of the mined-out area, while stress concentration zones with high compressive stress emerge at the left/right coal walls and the rear wall. The subsidence profile is always symmetrically distributed about the central axis of the model, *i.e.*, the center of the goaf. The maximum subsidence value consistently occurs directly above the center of the goaf, and the magnitude of subsidence decreases with increasing distance from this center. Throughout the sequential excavation process, as the mining length increases, the subsidence values increase in all areas except for the heave (upward movement) at the base, although the magnitude of this basal heave also increases. Upon completion of mining, the maximum subsidence within the domain reached 354.94 mm, and the maximum surface subsidence was 42.1 mm.

Keywords

FLAC3D, Surface Subsidence, Coal Mining

Copyright © 2025 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

地下煤炭资源开采后, 会形成采空区, 在开采过程中, 采空区周边岩体的初始应力状态被打破, 导致岩体发生变形, 进而破坏岩体的整体结构。当采空区扩大到一定范围后, 将导致岩层移动, 并且这种移动和变形会逐步向上覆岩石表面延伸, 最终达到地表, 在地表呈现为: 地表断裂和塌陷。采矿区沉陷会对环境产生一定的影响, 具体表现为: 对生态环境的破坏、破坏地表建筑物、影响地下水和地表水, 给矿区人民的生产生活带来困扰。同时, 由于采煤沉陷的存在, 还会引起地震, 滑坡, 塌陷等地质灾害的发生。

由于煤矿开采后产生的开采沉陷与经济的发展和人民安全生活是相互影响、相互矛盾的。为解决好这个矛盾, 世界各主要采煤国家的学者都对开采沉陷进行了深入的研究。国内外研究者在研究采空区上覆岩体及地表的移动和变形规律时, 主要采用了以下方法: 几何理论法、统计类比法、经验公式法、力学研究方法、模拟研究法[1]-[4]。近年来, 随着工程实践的发展, 采用了大量的数值计算方法, 并取得了较好的效果。邱贤德[5]等人利用 ANSYS 分析了采空区最不稳定的位置, 并在此基础上, 根据采空区稳定性评估的结果, 提出了对采空区进行治理的对策。韩森[6]和金爱兵[7]等人采用 MIDAS/GTS 软件, 对临近塌陷区域的矿道在地下施工时的沉陷规律和安全问题进行了数值模拟, 为有效地治理塌陷区域提供了理论依据。卢宏建[8]等人利用 MIDAS/GTS 软件建立了 3 期 15 个矿井的数值模拟模型, 得出了在动力扰动作用下, 硬岩矿柱的应力场及地面沉陷的变化规律。Liu Chongxian [9]采用 MIDAS/GTS 软件, 对露天矿井三种不同工作状态下的边坡稳定性进行了研究。研究发现, 该矿床的边坡在采矿初期是不稳定的, 经治理后, 该矿床的边坡已趋于稳定, 且不会因再次开挖而受到影响, 与实际情况相吻合。朱卫兵[10]等人利用离散元法, 对厚冲击层矿区进行了条带式采煤的数值模拟, 得出了合理的采煤方案。郑榕明等人应用离散元法, 对一座铁矿的地下开采过程进行数值模拟, 得出采空区的围岩与地面的变形规律, 为确定地面的移动与沉降范围奠定基础。Xu Nengxiong [11]等人运用有限差分法, 研究了煤矿开采造成的地面沉陷及其对周边水坝的影响。通过分析, 得到了采动影响区地面沉降的最大值, 并给出了采动影响区地面沉降的确切位置。李想[12]等人应用 FLAC3D 软件, 对采空区围岩的应力场进行了分析, 得出了采空区的稳定性, 并预测了其发展趋势。侯志鹰[13]等运用 FLAC3D 有限差分方法, 对大同矿区“三硬”

地质情况下的地面沉降过程进行了数值模拟，得出了造成采空区直接顶板大范围崩塌及地面整体塌陷的主要成因。P. R. Helm [14]等人对浅部废弃矿床的稳定性进行了数值模拟，发现地表水流和岩体结构对浅部废弃矿床的稳定性有很大的影响。

根据以上实例，证明运用 FLAC3D 来模拟采空区地表及上覆岩层沉降变形的方式是切实可行的。基于以上，本文针对河南某煤矿开采沉降规律研究采用数值模拟研究法，使用有限差分软件 FLAC3D 进行模拟煤矿开采过程中研究区地表及上覆岩层的沉降变化规律研究。

2. 工程背景

本次数值模拟以河南省某煤矿为例，在此基础上，根据实际地质条件，对该煤矿的地质条件作了一些概括。最终确定的数值模拟的原型地层为：煤层为水平煤层，且无复杂地质构造，煤层深度为 272 m，煤层厚度为 8 m，煤层上依次是冒落带、断裂带、弯沉带。其中冒落带主要以抗压强度在 18~60 MPa 范围的泥岩为主，其厚度为 120 m；断裂带主要以抗压强度在 50~150 MPa 范围的砂岩为主，其厚度为 112 m；第四纪覆盖层主要是 Q2 和 Q3，厚度为 40 m。即模型所模拟的地层原型从上到下依次是覆盖层的厚度为 40 m，砂岩层的厚度为 112 m，泥岩层的厚度为 120 m，煤层的厚度为 8 m，下伏岩层的厚度为 26 m。

3. 模拟方案

3.1. 模型网格划分

模拟的模型尺寸为 380 m × 232 m × 306 m (长 × 宽 × 高)。本次数值模拟计算模型选用六面体单元，因最主要研究 z 方向位移，所以 z 方向网格设置比较密，本次模型共划分 36,000 个网格单元，数值模型的网格划分的疏密程度会对计算结果产生一定大小的影响，如果网格划分不当，将会给数值模拟带来较大的误差，严重时还会导致数值模拟结果的不收敛。若网格密度过大，则离散点数过多，造成取舍的误差；若网格过密，则会增加离散误差。在对模型进行网格划分时，要考虑到在数值模型内部设置适当的沉降监测点，以便对岩层内部和地表的沉降变化进行监测，同时还要考虑到每一次开挖尺寸的大小。计算模型的网格划分如图 1：

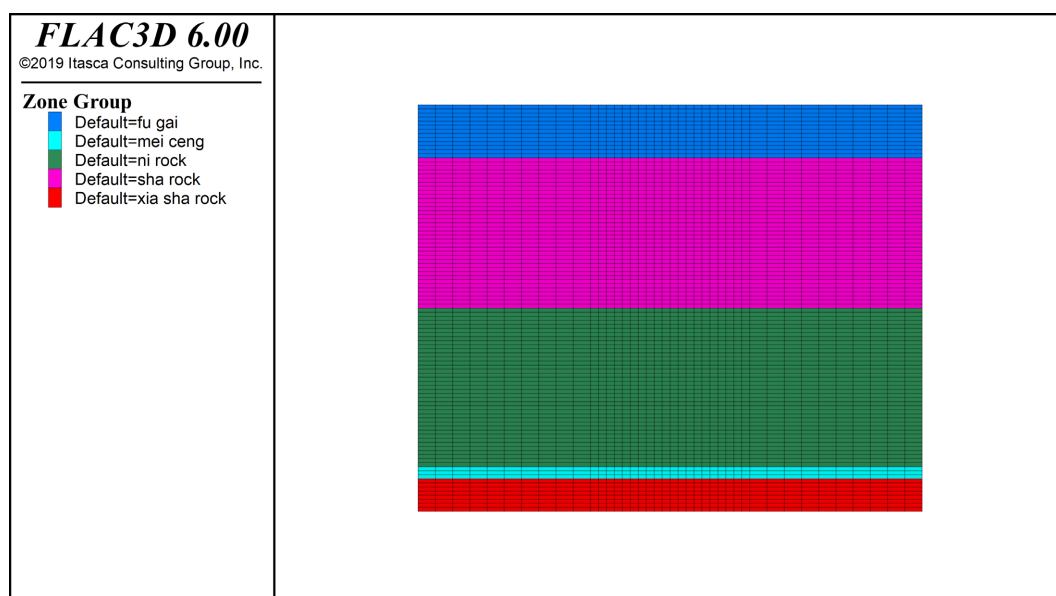


Figure 1. Initial model

图 1. 初始模型

3.2. 边界条件

在进行计算前需要对模型的边界进行相应的约束，本次模拟沉降，最主要研究模型竖直方向位移，所以，在模型的前后左右四个面上，施加了各个方向位移均为零的约束。与此同时，模型的底部基本不会受到煤矿开采的影响，所以对模型的底部也施加了各方向位移为零的约束。模型顶部为地表，不施加任何约束，并设置为自由边界。

3.3. 本构模型和模拟参数选择

数值计算模型建成后，需要对其中岩土材料进行参数赋值，同时还需要确定其遵循的本构关系。由于煤矿开采区域附近围岩破碎的抗剪强度一般情况下都遵循 Mohr-Coulomb 准则，因此本次数值模拟，采空区内各个不同分组的所有材料都选用摩尔 - 库伦(Mohr-Coulomb)模型。数值模拟所需参数如表 1。

Table 1. Parameters of numerical simulation

表 1. 数值模拟参数

地层	密度 $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	杨氏模量 $E (MPa)$	泊松比 ν	粘聚力 $C (kPa)$
覆盖层	2080	60	0.32	25
砂岩	2451	5000	0.30	4200
泥岩	2318	1750	0.30	2400
煤层	2023	468	0.26	1300

3.4. 开挖方案

根据研究区地层概况和实际煤矿开采情况分析，本次数值模拟建立模型尺寸为：380 m × 232 m × 306 m (长 × 宽 × 高)，为模拟实际开挖情况，开挖方案最终确定为：沿着一侧进行开挖，边开挖边进行衬砌，开采煤层采全高 8 m。每次开挖 20 m，分 12 步进行开挖。为研究不同开挖情况下地表沉降规律以得出精确的地表沉降规律，本次模拟开采选用采宽分别为 48 m。主要以分析煤矿开采引起的上覆岩体和地表的下沉变形为主。为了更好地反映出煤层开采的实际情况，本文采用了分段开挖的方法，每次开挖 20 m，分为 12 个阶段。这样可以使每个阶段的开挖都建立在前一阶段所产生的应力场和应变场上，从而更好地反映了采空区的实际形成过程

4. 模拟结果

本次数值模拟目的是地下煤层的开采对地表和地下岩层变形的影响，所以需要去除地层在自重应力条件下的初始形变的影响，因此在模型开挖前需要对模型进行初始地应力影响下的位移和应力计算，并将所得应力和位移全部清零之后进行下一步开挖。通过对开挖过程中位移和应力云图变化以及监测点所得数据的分析得出煤层开采过程中地表和矿区顶板的沉降变化规律。

4.1. 应力分析

为了研究煤层开采引起地表沉陷的破坏机理，选取开挖 120 m 后的剖面 and 开采完成后正面 z 方向应力云图进行分析，如图 2 所示。FLAC3D 中对应力符号的规定为：拉应力为正，压应力为负。煤矿开挖后，模型的初始应力平衡状态遭到破坏，在竖直方向上在整个区域内都是压应力，没有拉应力存在。开

采后最大压应力达到了 10.295 Mpa。其中应力变化的整体趋势为：由地表向下压应力逐渐增大，但在煤矿开采区域顶板和底部出现了应力降低区域，同时在开采左右煤壁处和后壁出现明显的增压区。增压区形成的原因是：由于煤层的采出，使顶板岩层出现裸露，其压力会转移到侧壁和后壁处，使其承受的压力增加。符合开采沉陷引起岩层移动的一般规律。

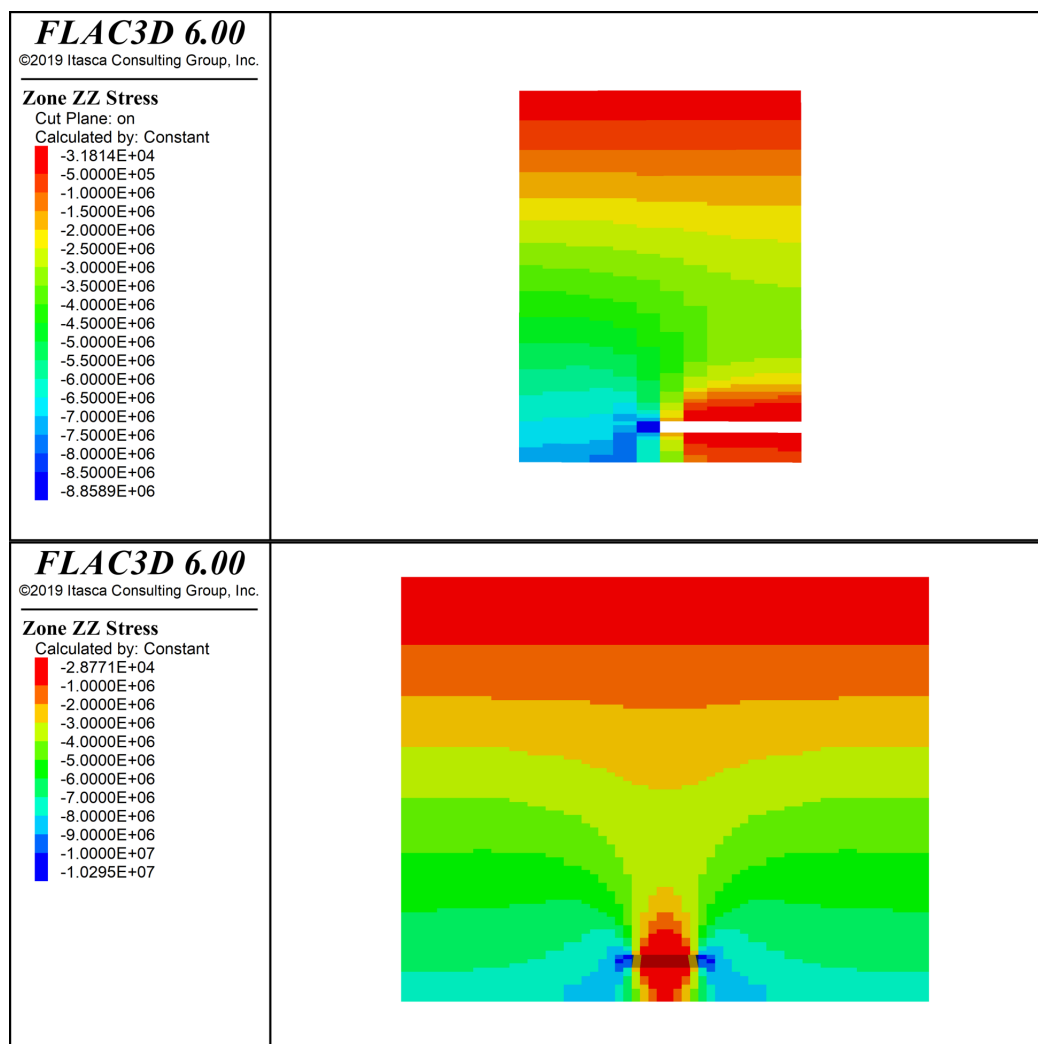


Figure 2. Z-direction stress nephogram of the profile after 120 m excavation and the front view after mining completion

图 2. 开挖 120 m 后的剖面 and 开采完成后正面 z 方向应力云图

4.2. 位移分析

4.2.1. 位移云图

矿区开采后，初始应力状态遭到破坏后矿区的正面竖向位移变化云图如图 3 所示。煤矿开采区域顶板中心处沉降量最大，两侧沉降基本呈对称分布，且距开挖中心越远沉降量越小，煤矿开采中轴线上覆岩层及地表的沉降量最大。上覆岩层和地表的下沉是因为煤矿采空后，上覆岩层在自重应力的作用下产生向下的垂直位移。在煤矿开采区域的底板出现了向上的位移，即出现了底板隆起现象，这是由于煤层开挖后，原有煤层区域消失，导致原有的地应力平衡状态遭到破坏，底板上部没有向下的作用力，底板

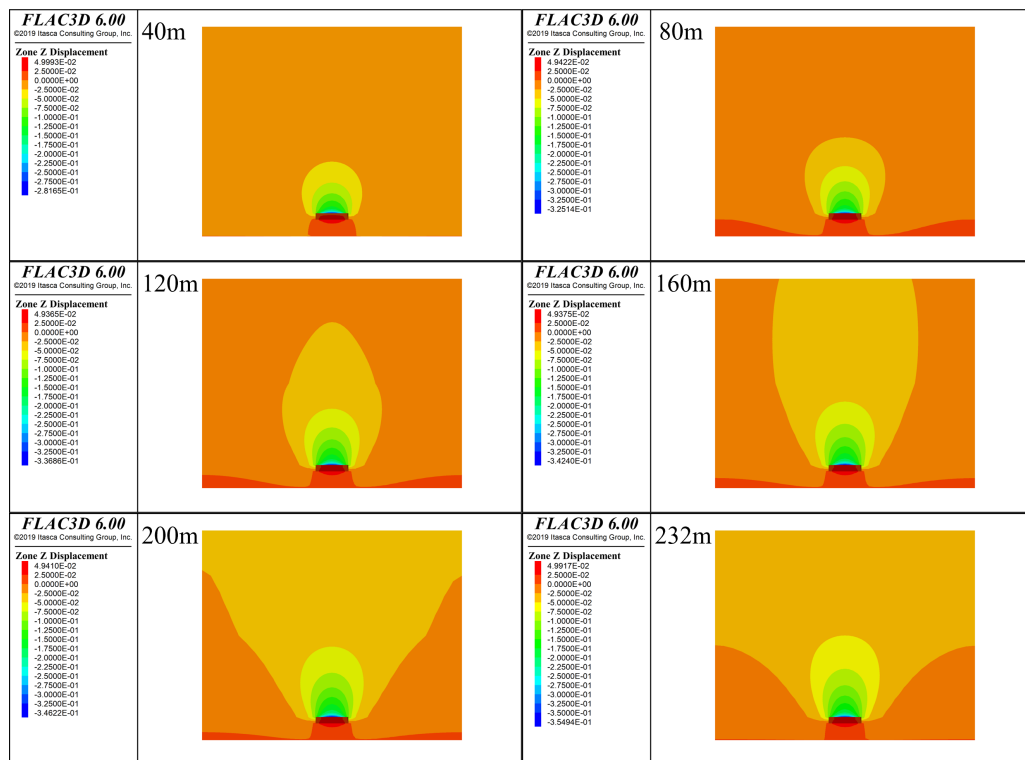


Figure 3. Nephogram of vertical displacement changes in the front view during excavation
图 3. 开挖过程中的正面竖向位移变化云图

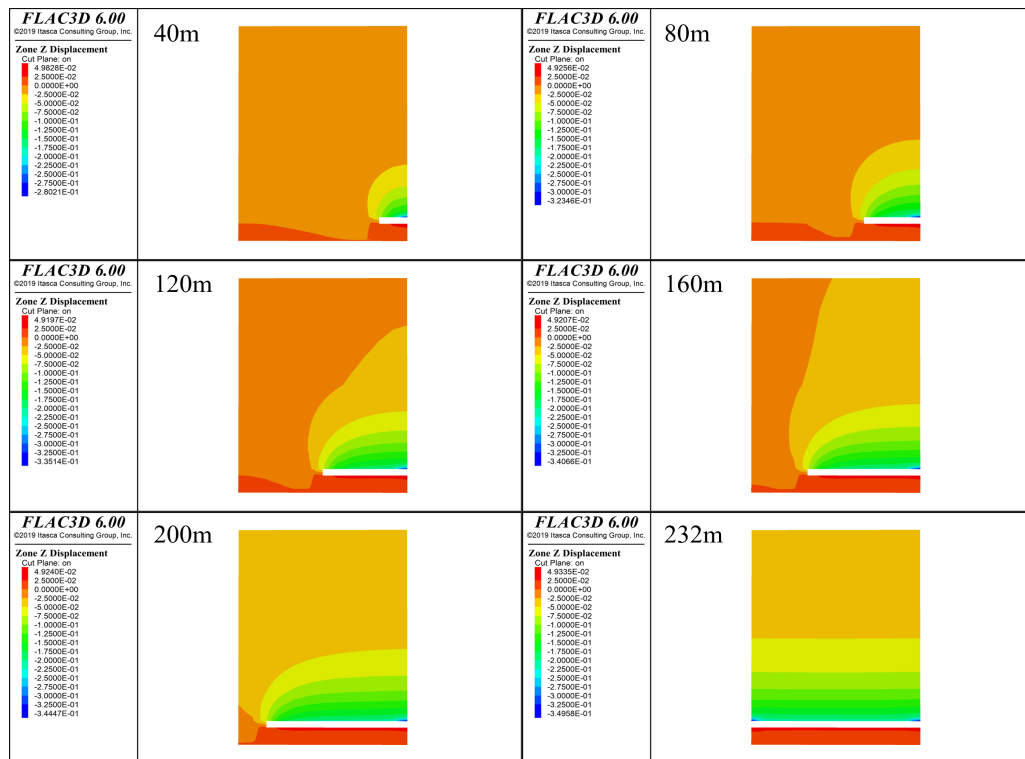


Figure 4. Nephogram of vertical displacement changes in the profile during excavation
图 4. 开挖过程中的剖面竖向位移变化云图

将向上隆起。随着煤矿开采的进行,整个区域的沉降量都在增大。剖面竖向位移变化云图如图4所示,已开采部位上部沉降量最大,而未开采部位也会因为采空而产生微量沉降。

4.2.2. 监测点位移

通过对距模型中轴线不同距离观测点沉降数据对比,容易看出距模型中轴线即开挖区域越远沉降量越小。对比四种不同部位的监测点的沉降量变化,如图5所示,距离开采区域中心附近,深度越大,沉降量越大,而采空区顶板沉降量明显相对较大。在距离开采中心区域较远处转变为,随深度的增加沉降量减小。其中此变化的转折点大概为采空区域的宽度附近。如图6所示,随着煤矿开采距离的增大地表最大沉降量和区域内最大沉降都呈增大的趋势,但地表最大沉降量基本随开采缓慢增大。而区域内最大沉降量在开采初期剧烈增大,随后缓慢增大。开采完成后,区域内最大沉降量达到354.94 mm,地表最大沉降量为42.1 mm。

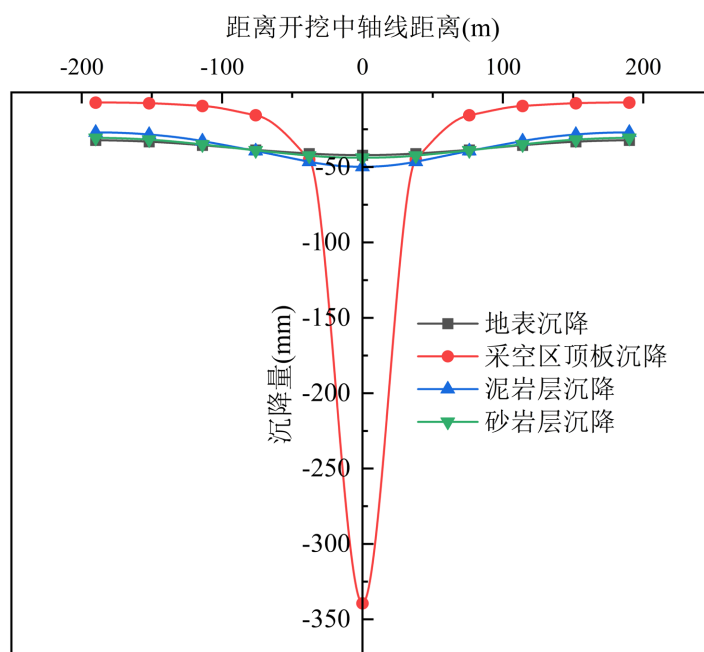


Figure 5. Subsidence amount at monitoring points of various locations

图5. 各个部位监测点的沉降量

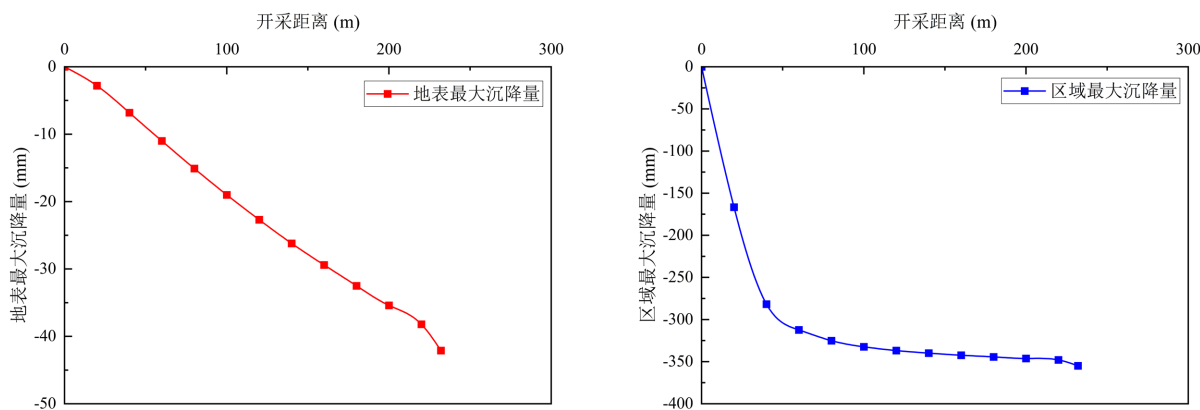


Figure 6. Settlement variation at the surface and regional maximum subsidence monitoring points

图6. 地表和区域最大沉降监测点沉降变化

5. 结论

煤矿开挖后,在竖直方向上在整个区域内都是压应力,没有拉应力存在。应力变化的整体趋势为:由地表向下压应力逐渐增大,但在煤矿开采区域顶板和底部出现了应力降低区域,同时在开采左右煤壁处出现明显的增压区。增压区形成的原因是:由于煤层的采出,使顶板岩层出现裸露,其压力会转移到侧壁处,使其承受的压力增加。符合开采沉陷引起岩层移动的一般规律。

煤矿开采区域顶板中心处沉降量最大,两侧沉降基本呈对称分布,且距开挖中心越远沉降量越小,煤矿开采中轴线上覆岩层及地表的沉降量最大。上覆岩层和地表的下沉是因为煤矿采空后,上覆岩层在自重应力的作用下产生向下的垂直位移。在煤矿开采区域的底板出现了向上的位移,即出现了底板隆起现象,这是由于煤层开挖后,原有煤层区域消失,导致原有的地应力平衡状态遭到破坏,底板上面没有向下的作用力,底板将向上隆起。

分步开挖的整个过程中,随着开采长度的增加,除了底部隆起之外,其他部位的沉降量都在增大,地表沉降量最大处在开采中轴线上。整个区域最大沉降量在开采顶部中轴线上。随着开采的进行,底部隆起量也在增加。开采完成后,区域内最大沉降量达到 354.94 mm,地表最大沉降量为 42.1 mm。

参考文献

- [1] 王汉斌. 急倾斜多煤层开采诱发覆岩及地表移动规律研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [2] 陆玉根, 汪为平, 江权. 大规模深部开采诱发上覆岩体变形规律研究[J]. 金属矿山, 2019(9): 45-51.
- [3] 段素真. 河南某煤矿采空区室内模型试验及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [4] 彭帅英. 高速公路下伏多层采空区地表沉陷数值模拟及预测研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [5] 邱贤德, 黄木坤, 王心飞, 等. 数值计算在采空区稳定性评价中的应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002(4): 105-107, 110-118.
- [6] 韩森, 张钦礼, 刘泽洲, 等. 近塌陷区矿山公路开采沉降规律及安全性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(8): 126-131.
- [7] 金爱兵, 明世祥, 孙金海. 采空区地表沉陷及移动规律的数值模拟[J]. 采矿技术, 2008(4): 70-72.
- [8] 卢宏建, 梁鹏, 李嘉惠. 动态扰动下硬岩矿柱应力演化与地表沉降规律[J]. 金属矿山, 2015(7): 6-10.
- [9] Liu, C.X. and Gao, Y.T. (2012) Numerical Simulation of Slope Stability Analysis of Open Pit Coal Mine Based on MIDAS/GTS. *Applied Mechanics and Materials*, **256**, 193-197.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.256-259.193>
- [10] 朱卫兵, 张邦仕, 许家林. 村庄下压煤条带开采的离散元模拟[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(4): 89-90, 94.
- [11] Xu, N., Kulatilake, P.H.S.W., Tian, H., Wu, X., Nan, Y. and Wei, T. (2013) Surface Subsidence Prediction for the WUTONG Mine Using a 3-D Finite Difference Method. *Computers and Geotechnics*, **48**, 134-145.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.09.014>
- [12] 李想, 朱为民, 谢晓斌. FLAC3D 在某铁矿采空区稳定性分析中的应用[J]. 中国矿山工程, 2012, 41(1): 25-29.
- [13] 侯志鹰, 王家臣. 大同矿区“三硬”条件地表沉陷数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007(3): 235-238.
- [14] Helm, P.R., Davie, C.T. and Glendinning, S. (2013) Numerical Modelling of Shallow Abandoned Mine Working Subsidence Affecting Transport Infrastructure. *Engineering Geology*, **154**, 6-19.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.003>