

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.02.22

浅埋采空区对路基稳定性影响的数值模拟

孙琦¹, 张向东¹, 杜东宁¹, 卫星², 母倩雯²

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省化工地质勘查院, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 为分析浅埋采空区对路基稳定性的影响, 针对某新建公路穿越浅埋采空区的实际情况, 采用FLAC^{3D}建立三维模型进行了数值模拟, 得出了浅埋采空区影响下公路路基的沉降规律, 探讨了浅埋采空区对道路行车安全的影响, 并在此基础上进一步分析了交通荷载、地下水与采空区耦合作用对路基稳定性的影响。研究表明, 该采空区的移动和变形仍未结束, 受浅埋采空区的影响, 地表将出现不均匀的沉降和横向、纵向裂缝以及道路中心线的偏移, 进而在公路路面形成塌陷坑, 对路基稳定性造成较大威胁; 当采深较浅时, 交通荷载、地下水渗流作用会导致采空区活化, 进一步增加路基沉降, 宜采取注浆措施进行加固。

关键词: 浅埋采空区; 路基稳定性; 数值模拟; 交通荷载; 地下水

中图分类号: TU478

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)02-0127-05

Numerical simulation of the impact of shallow seam goaf on highway safety

SUN Qi¹, ZHANG Xiangdong¹, DU Dongning¹, WEI Xing², MU Qianwen²

(1. College of Civil & Transportation Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;
2. Chemical Geological Exploration Institute of Liaoning Province, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract: Numerical simulation analysis of the highway traffic safety of shallow goaf for a new highway across the Inner Mongolia mining area in shallow goaf proceeded using FLAC^{3D}, and acquired the highway subgrade settlement law of the influence of the shallow goaf on it, and further analysis of the traffic load, the groundwater and goaf burial depth on the highway roadbed stability. The study showed that the goaf movements has not ended, and has a larger impact on the highway roadbed stability, surface appears obvious uneven subsidence and lateral, longitudinal cracks, it should be grouted and reinforced; compared to deeply buried goaf, shallow goaf has its own characteristics, its surface uneven settlement is becoming increasingly clear that traffic loads has greater impact, groundwater will increase subgrade settlement. It must take measures of the grouting reinforcement.

Keywords: shallow goaf; roadbed stability; numerical simulation; the traffic load; groundwater

0 引言

采空区稳定性及其对建(构)筑物的使用安全的影响一直是研究热点问题之一^[1-7]。随着我国公路网建设的不断发展,越来越多的新建公路穿越采空区,因此

研究采空区对路基稳定性的影响具有重要的现实意义。

在采空区对路基稳定性的影响方面,学者们从探测、加固等多个角度进行了深入研究。陈昌彦^[8]等采用地质调查、物探和钻探相结合的方法研究了采空区对公路的影响;童立元,等^[9-10]采用数值模拟手段详

收稿日期: 2014-07-01; 修订日期: 2014-07-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51274111); 国家自然科学基金煤炭联合基金(51174268)

第一作者: 孙琦(1981-),男,博士,讲师,主要从事开采沉陷研究。E-mail: bird_milan@163.com

细分析了采动对公路的影响特征、采空区活化的机理和公路与采空区相互作用的规律;陈晓斌,等^[11]基于随机介质理论编制了采空区对路基变形影响的计算程序;王玉标^[12]研究了采空区活化对断层地区公路路堤稳定性的影响;王生俊,等^[13]采用 FLAC^{3D}进行了公路下伏采空区残余沉陷变形的数值模拟;范洪冬,等^[14]利用 D-InSAR 技术对采空区上方的高速公路进行变形监测,建立了采空区上方沉陷预测模型;芮勇勤,等^[15]采用 InSAR 与 GPS 融合技术进行公路下伏采空区变形监测,对工程实践具有重要的指导意义。这些研究从采空区探测、路基变形监测、理论分析、模型试验和数值模拟等多角度对采空区路基的稳定性进行了研究,但这些研究对应的采空区采深均在 200 m 以上,而很多矿区存在大量小煤窑无序开采,采深小于 100 m,对这些浅埋煤层采空区对公路路基的影响研究很少,而浅埋煤层采空区有其自身的特点,浅埋煤层采空区距离地表更近,因而其影响更加直接,有必要对其特点进行进一步地研究。

本文采用 FLAC^{3D} 建立三维模型进行了数值模拟,分析浅埋采空区影响下公路路基的沉降规律,探讨浅埋采空区对公路路基稳定性的影响,并在此基础上进一步分析交通荷载、地下水与采空区耦合作用对路基稳定性的影响。

1 工程概况

某新建公路位于呼伦贝尔矿区,开采时间为 2001—2006 年。21 世纪初,由于煤炭价格上涨较快,附近存在大量的小煤窑无序开采,采空区分布面积相对较小但数量较多,新建公路无法绕避,开采煤层为近水平煤层,煤层平均埋深为 60 m,煤层顶板以粉砂岩、中砂岩为主,上覆岩层主要为砂岩和页岩,岩层为中硬岩层,采厚为 2.5 m,钻孔探测的结果显示,煤层顶板冒落后岩块松散地堆积在采空区内,采空区为松散充填状态。通过现场取样和室内试验,岩石的物理力学参数如表 1。

表 1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

岩层名称	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	重度 γ/ kN·m ⁻³	内摩擦 角 φ/(°)	黏聚力 c/MPa	抗拉强度/MPa	厚度/m
土	0.14	0.09	18.9	16	0.23	0.002	3.2
页岩	12.77	6.56	23.2	27	1.17	1.11	25.6
砂岩	12.59	7.55	28.9	30	1.26	1.23	34.3
煤层	1.44	0.95	20.3	20	1.03	1.06	2.1
砂岩	13.10	7.48	28.2	31	1.23	1.22	18.9

2 残余变形的数值模拟

2.1 几何模型的建立

几何模型尺寸为 200 m×100 m×100 m,煤层走向方向与道路纵断面方向一致,煤层倾向方向与道路横断面方向一致,地表为自由边界,没有约束,模型底部为固定约束,模型周围为法向约束,其几何模型如图 1。采用 Drucker-Prager 本构模型,初始应力场仅考虑岩层的自重应力,对交通荷载、地下水渗流作用等忽略不计。各岩层的物理力学参数与表 1 的物理力学参数保持一致,由于煤炭开采后煤层顶板冒落松散地充填在采空区内,因此在煤层单元开采完成后,将冒落带视为充填入松散的介质,根据相关研究经验,将冒落带视为弹塑性材料,其物理力学性质如表 2。

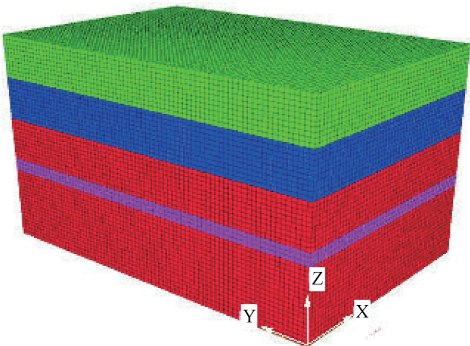


图 1 几何模型
Fig.1 Geometric model

表 2 冒落带的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of caving zone

岩层名称	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	重度 γ/ (kN·m ⁻³)	内摩擦 角 φ/(°)	内聚力 c/MPa	抗拉强度/MPa
冒落带	0.05	0.20	19.2	17	0.28	0.05

岩层的屈服准则为 D-P 屈服准则,其表达式为:

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{1}$$

式中: I_1 为应力张量的第一不变量, J_2 为应力偏量的第二不变量。

其中:
$$a = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \tag{2}$$

$$k = \frac{\sqrt{3}C\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \tag{3}$$

式中: C ——粘聚力;
 φ ——内摩擦角。

2.2 数值模拟的结果分析

根据数值模拟计算的结果,绘制地表的主断面的下沉和水平移动曲线,如图2~图5:

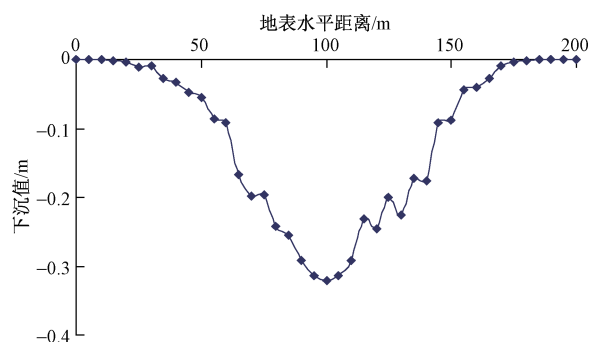


图2 走向主断面上的下沉曲线

Fig.2 Settlements curve along strike direction on the main section

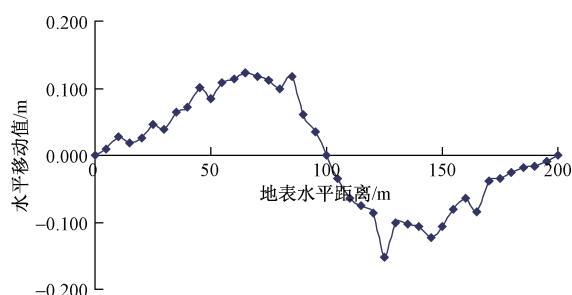


图3 走向主断面上的水平移动曲线

Fig.3 Horizontal movements curve along strike direction on the main section

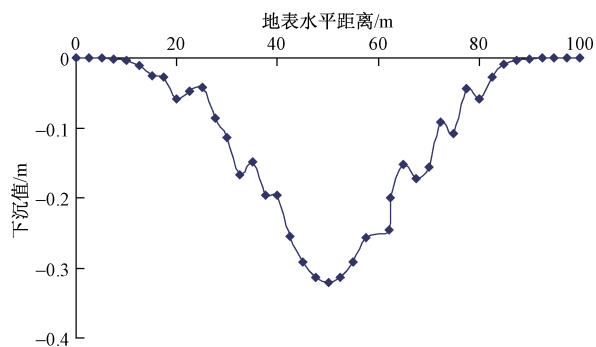


图4 倾向主断面上的下沉曲线

Fig.4 Settlements curve along inclination direction on the main section

从走向和倾向主断面的下沉曲线可以看出,该采空区的移动和变形仍未停止,其残余变形对于公路路基的稳定性仍然有较大的影响,其最大下沉值超过了0.3 m,且沉降是不均匀的,在很多地方存在小的塌陷坑,影响道路的稳定性和正常使用。

从走向和倾向主断面上的水平移动可以看出,

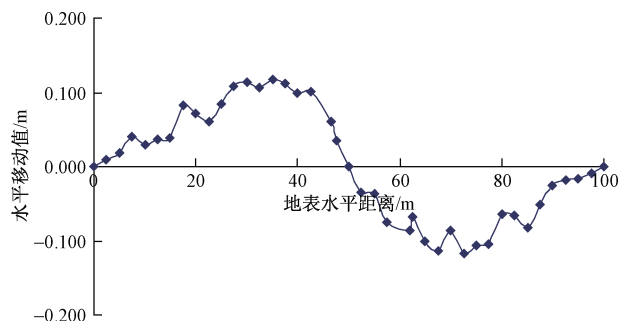


图5 倾向主断面上的水平移动曲线

Fig.5 Horizontal movements curve along inclination direction on the main section

水平移动也是不均匀的,由于地表土的抗拉强度较低,在不均匀的水平移动极易导致裂缝的出现,走向方向的不均匀水平移动会导致道路出现横向裂缝,倾向方向的不均匀移动会导致道路出现纵向裂缝,同时出现道路中心线偏移的现象,对道路的使用会造成较大影响。

从图2~图5可以看出,其下沉和水平移动曲线上存在不规则点,这是由于采空区埋深较浅且形状不规则,一些部分塑性区接近地表,导致地表出现了不均匀的变形,甚至是塌陷坑,这也是浅埋煤层采空区与深埋煤层采空区影响的一个重要区别,当采深较大时,地表的变形一般都是均匀渐变的,而浅埋煤层采空区所带来的下沉是不均匀的,因此其破坏性更强,对路基稳定性的影响更大,宜采取必要的措施进行注浆补强,控制地表的沉降和水平移动。

3 浅埋煤层采空区路基沉降的影响因素分析

3.1 交通荷载的影响分析

图2~图5的数值模拟结果是在未考虑交通荷载影响下所做的数值模拟,传统的研究认为,当采动深厚比大于30的时候,地面的交通荷载对采空区的影响微乎其微,基本上不会导致采空区的二次活化,也不会导致路基沉降的明显增加,但对于浅埋煤层采空区来说,由于其采深较浅,深厚比小于30,因此有必要对交通荷载对路基的影响进行研究。

在前面数值模型上施加交通荷载,将交通荷载简化为半正弦荷载进行施加,将考虑交通荷载和不考虑交通荷载的走向主断面上的下沉曲线对比(图6)。

从图6可以看出,考虑交通荷载作用下,地表的沉降值进一步增大,这说明交通荷载对浅埋煤层采空区路基的影响较大,这也是浅埋煤层采空区的特点之一。

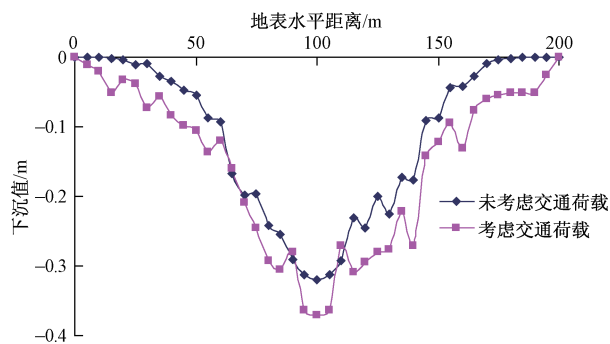


图6 考虑交通荷载作用下的走向主断面下沉曲线对比

Fig.6 Comparison of settlements curve along strike direction on the main section considering of the traffic load

3.2 地下水作用的影响分析

在原有模型的基础上建立流固耦合模型,将岩体等效为饱和的多空隙材料,模型底部和周围边界为不透水边界,模型顶部为定水头边界,进行数值模拟,将考虑地下水和不考虑地下水的走向主断面上的下沉曲线对比(图7)。

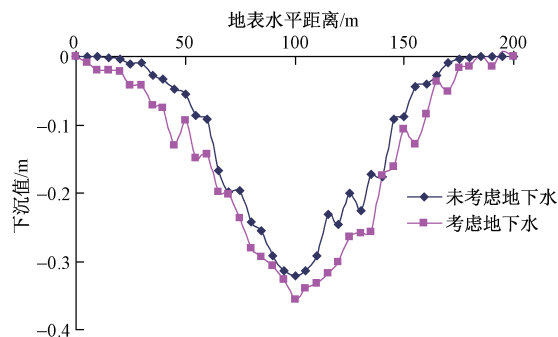


图7 考虑地下水作用下的走向主断面下沉曲线对比

Fig.7 Comparison of settlements curve along strike direction on the main section considering of the underwater

从图7可以看出,在地下水的作用下,地表产生的下沉值会进一步增加,这反映出地下水的作用对采空区路基的稳定性有较大的影响,应引起重视,必要时可采取注浆堵水等措施对其进行加固。

3.3 采深的影响分析

分别取采深为40 m、60 m、80 m三种情况进行数值模拟,可得到走向主断面上的下沉曲线对比形式如图8所示。

从图8可以看出,采深越浅,沉降量越大,且地表的下沉曲线越不均匀,规律性越差,这反映出采深越浅,对公路路基的稳定性影响越大。

4 结论

通过数值模拟研究,可以得出如下结论:

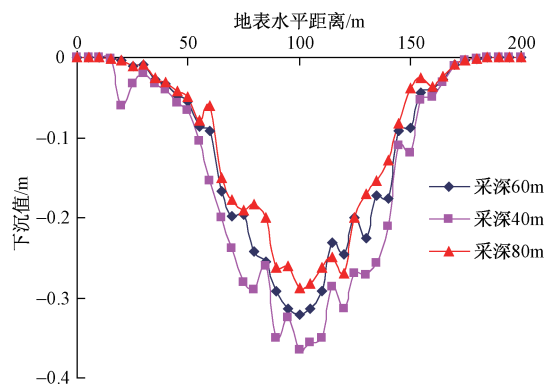


图8 不同采深的走向主断面下沉曲线对比

Fig.8 Comparison of settlements curve along strike direction on the main section of different mining depth

(1) 该浅埋煤层采空区的移动和变形仍未结束,且地表下沉曲线存在不均匀的沉降,这说明地表会出现一些小的塌陷坑,地表的水平移动曲线存在不均匀的水平移动,会导致公路的横向和纵向裂缝以及道路中心线的偏移,该采空区对公路路基的稳定性仍会造成一定程度的影响,宜采取注浆措施进行加固;

(2) 交通荷载会加剧地表的下沉,影响公路路基的稳定性,在浅埋煤层采空区范围内,交通荷载的影响较大,这是浅埋煤层采空区与深埋煤层采空区的一个重要区别,应引起重视;

(3) 地下水作用会导致地表下沉的增加,必要时应采取注浆措施进行堵水和采空区加固;

(4) 采空区采深对公路路基的稳定性有着重要的影响,采深越小,下沉值越大,不均匀沉降越明显,对公路的影响越明显。

参考文献:

- [1] Prakash Amar, Kumar Ajay, Singh, Kalendra Bahadur. Dynamic Subsidence Characteristics in Jharia Coalfield, India [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(2): 627-635.
- [2] Kumar Reddy S, Sastry V R. Gallery monitoring in blasting gallery panel during depillaring-A case study [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2013, 61(7): 257-260.
- [3] Lu Hongjian, Yan Shuhu, Pan Guihao. Stability comprehensive analysis model of iron deposit retained goaf [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 256(1): 2688-2691.
- [4] 杨逾, 梁鹏飞. 基于EH-4电磁成像系统的采空区

- 覆岩破坏高度探测技术[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 68–71, +77.
- YANG Yu, LIANG Pengfei. The detection technology of goaf overburden rock damage of based on EH4 electromagnetic imaging system [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 68–71, +77.
- [5] 张永利, 庞清良, 马玉林. 上行开采缓倾斜煤层群围岩稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 53–60.
- ZHANG Yongli, PANG Qingliang, MA Yulin. Stability analysis of surrounding rock of gently inclined coal seams in the ascending mining [J]. The Chinese Journal of Geolog Icod Hazard and Control, 2013, 24(2): 53–60.
- [6] 张向东, 孙琦, 杜东宁, 等. 沈丹客运专线本溪段下伏采空区的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 104–107.
- ZHANG Xiangdong, SUN Qi, DU Dongning, et al. Numerical simulate research on the Benxi section of Shenyang to Dandong railway passenger dedicated line [J]. Journal of Safety and Tecnology, 2011, 22(2): 104–107.
- [7] 郭果, 陈筠, 叶永青. 贵州威宁房屋裂缝与地质灾害的关系探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报 2013, 24(1): 79–82.
- GUO Guo, CHEN Jun, YE Yongqing. Discussion on the relationship between cracks and geological hazard in Weining country of Guizhou province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): 79–82.
- [8] 陈昌彦, 岳中琦, 陈爱新, 等. 北京某公路沉陷变形地质灾害发育特征及成因分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 356–361.
- CHEN Changyan, YUE Zhongqi, CHEN Aixin, et al. Geohazard characteristics and cause analysis of ground subsidence and deformation along national highway in Beijing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 356–361.
- [9] 童立元, 刘松玉, 邱钰. 高速公路下伏采空区危害性评价与处治技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.
- DONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, et al. Goaf under expressway safety evalation and treatment technology [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006.
- [10] 童立元, 邱钰, 刘松玉, 等. 高速公路与下伏煤矿采空区相互作用规律探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2271–2276.
- TONG Liyuan, QIU Yu, LIU Songyu, et al. Discussion of interaction law of expressway and underlying mine goafs [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2271–2276.
- [11] 陈晓斌, 张家生, 安国峰, 等. 高速公路采空区地面变形计算方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 191–197.
- CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, AN Guofeng, et al. Ground deformation computation method for goafs of highways [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 191–197.
- [12] 王玉标. 采空区“活化”引起断层构造区高路堤变形失稳演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3784–3789.
- WANG Yubiao. Deformation and instability evolution analysis of high embankment caused by waste area activation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3784–3789.
- [13] 王生俊, 贾学民, 韩文峰, 等. 高速公路下伏采空区剩余沉降量 FLAC^{3D} 计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3545–3550.
- WANG Shengjun, JIA Xuemin, HAN Wenfeng, et al. A FLAC^{3D} method for calculation of residual subsidence in a mining aera beneath an express way [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3545–3550.
- [14] 范洪冬, 邓喀中, 祝传广, 等. 基于时序 SAR 技术的采空区上方高速公路变形监测及预测方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1841–1846.
- FAN Hongdong, DENG Kazhong, ZHU Chuanguang, et al. Deformation monitoring and prediction methods for expressway above goaf based on time series SAR technique [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1841–1846.
- [15] 芮勇勤, 陈佳艺, 丁晓利. 基于 InSAR 与 GPS 技术的公路采空区变形监测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(12): 1773–1776.
- RUI Yongqin, CHEN Jiayi, DING Xiaoli. On the deformation monitoringbased on integrating InSAR with GPS for expressway goaf [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31 (12): 1773–1776.