

# 公路隧道下伏采空区施工影响数值模拟分析

崔志盛<sup>1</sup>, 赵凯<sup>1</sup>, 龚建伍<sup>2</sup>

(1. 山西平阳高速公路建设管理处, 山西 阳泉 045100; 2. 武汉科技大学, 湖北 武汉 430065)

**摘要:**随着公路隧道的不断兴建,一些工程不可避免地要穿越采空区,相应地会给隧道的施工带来风险与潜在危害。从下伏采空区与隧道的空间相对位置建立有限元数值模型,分析不同距离条件下采空区对隧道结构之间的影响。计算结果表明,下伏采空区的存在对公路隧道结构和围岩稳定性的影响是显著的,当采空区与隧道的距离小于10 m时,其不利影响非常明显,施工中必须采取较强的预加固措施;下伏采空区对隧道结构影响的临界距离约为40 m,当此距离小于40 m时,必须考虑采空区对隧道结构和围岩稳定性的不利影响。

**关键词:**公路隧道;下伏采空区;施工影响;距离;数值分析

**中图分类号:**U45 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)07-0076-04

**Numerical Simulation Analysis on Effect of Underlying Goaf in Road Tunnel Construction/CUI Zhi-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Kai<sup>1</sup>, GONG Jian-wu<sup>2</sup>** (1. Office of Pingyang Highway Construction and Management, Yangquan Shanxi 045100, China; 2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430065, China)

**Abstract:** Some road tunnel construction projects inevitably pass through goaf area with risk and potential danger. A finite element numerical model was established to simulate the situation between tunnel and underlying goaf and analyze the influence of underlying goaf on tunneling safety under the conditions of different distance from the underlying goaf to the tunnel. The result shows that the influence of underlying goaf on road tunnels is obvious, when the distance between tunnel and goaf is less than 10 m, the effect is dramatically significant, and some pre-reinforcement methods must be taken for safety. The critical distance that underlying goaf will affect tunneling safety is about 40m, and when the distance is less than 40 m, the adverse effect must be taken into consideration in the design and construction.

**Key words:** road tunnel; underlying goaf; construction effect; distance; numerical analysis

## 0 引言

随着我国西部开发战略的实施和大力推进交通基础设施建设,越来越多的高等级公路穿越崇山峻岭,相应公路隧道的修建工作日益突出<sup>[1]</sup>。而在矿产资源开采过程中,应用房柱法、全面法及留矿法等空场类方法采矿,通常会形成大量地下采空区<sup>[2]</sup>。特别是自20世纪80年代以来,我国矿业开采秩序较为混乱,非法、无规划的乱采滥挖在一些国有矿山周边留下了大量空区,如广西大厂矿区、甘肃厂坝铅锌矿、安徽铜陵狮子山铜矿、河南栾川钼矿、云南兰坪铅锌矿、广东大宝山矿等<sup>[3]</sup>。

由于隧道与采空区的相互影响给采空区隧道建设带来了特殊的困难,在工程建设中一般应尽量避免,但矿区采空区星罗棋布,再加之用地等原因,一些公路隧道建设不可避免地要穿越采空区,相应地会给隧道的施工带来风险与潜在危害。如福建永武高速公路龙井隧道<sup>[4]</sup>、山西大运公路灵石隧道<sup>[5]</sup>、广东梅河高速公路葵岗隧道<sup>[6]</sup>,以及国道212线重

庆至合川高速公路的西山坪隧道<sup>[7]</sup>,武广铁路客运专线新南岭隧道<sup>[8]</sup>等,均为典型的穿越采空区的隧道工程。

由于采空区覆岩的不均匀沉降变形,很容易造成公路隧道路面错落起伏、衬砌结构变形、开裂等破坏现象,对高速公路隧道的正常运营以及破坏后的补救修复,构成了严重的安全隐患和潜在危害。尽管高速公路建设对采空区的研究已有多年的历史,在采空区的勘察、稳定性评价和治理方面积累了宝贵的经验,但尚未形成成熟的理论及工程设计体系,尤其是下伏采空区隧道工程的受力特点,无规范、规程可循<sup>[9-11]</sup>。因此,开展下伏采空区隧道工程力学特征分析,具有重要的理论指导意义和工程实用价值。

笔者拟从下伏采空区与隧道之间的不同距离方面进行分析,通过有限元数值方法的动态模拟,研究下伏采空区对隧道结构的影响程度和规律,提出隧道保护范围和下伏采空区的临界距离,确保隧道结

收稿日期:2011-01-24

作者简介:崔志盛(1962-),男(汉族),山西孟县人,山西平阳高速公路建设管理处总工程师、高级工程师,公路与桥梁工程专业,从事高速公路建设的工程技术和管理工作,山西省阳泉市盂县南娄镇西小坪耐火材料招待所,fzhzk@163.com。

构安全,为设计和施工提供参考。

### 1 数值计算模型

鉴于分析目的,本文采用同济曙光有限元分析软件(GeoFBA@2D)进行计算,数值模拟采用平面应变弹塑性本构模型、Druker-Prager 屈服准则,通过设置不同的采空区与隧道相对空间位置,模拟下伏采空区对公路隧道结构的影响。

#### 1.1 计算模型与工况

根据隧道开挖影响范围的大小,模型边界到隧洞边界的距离均超过 5 倍洞径<sup>[12]</sup>。计算模型中,围岩采用三角形实体单元模拟,初衬采用杆单元模拟,二衬采用梁单元模拟。两侧边界节点采用水平方向约束,底部边界节点采用竖直方向约束,采空区大小取 3 m × 9 m,以其与隧道垂直距离 20 m 为例,基本网格划分如图 1 所示。

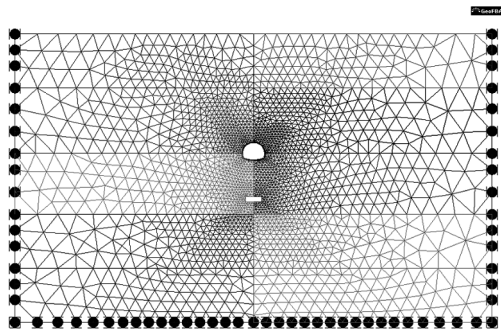


图 1 计算模型有限元网格划分图

根据研究目的,数值计算通过设置不同的采空区与隧道相对空间位置,模拟采空区对公路隧道结构的影响,主要选取无采空区和下伏采空区距隧道底部距离分别为 5、10、20、30、40 和 60 m 等 6 种工况下对隧道结构的影响程度和规律。

#### 1.2 计算参数

数值模拟计算涉及到计算域内岩体介质类型的简化和选取适当的力学参数,由于在工程建设中公路隧道常常需穿过较软弱的岩体。因此,参考相关工程实践<sup>[12,13]</sup>,并结合公路隧道设计规范提供的围岩力学参数,本文主要选取 V 级围岩进行计算分析,其力学参数如表 1 所示。

表 1 V 级围岩力学计算参数

名称	弹模 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )
V 级围岩	1.2	0.38	20	80	27

## 2 计算结果及分析

### 2.1 隧道洞周位移分析

洞周特征位移选取隧道拱顶、拱底竖向变形,以及隧道边墙水平收敛进行分析。从计算结果看出,当无采空区时,隧道拱顶、拱底位移和水平收敛分别为 -11.5、18.3 和 1.3 mm。表 2 为不同工况情况下有采空区时对应洞周特征位移计算值及与无采空区时的变化差值,图 2 为隧道洞周特征位移变化差值与对应工况下的变形曲线。

表 2 不同距离采空区引起隧道洞周特征位移值

采空区与隧道的距离/m	拱顶下沉/mm		拱底变形/mm		水平收敛/mm	
	有采空区	位移差值	有采空区	位移差值	有采空区	位移差值
5	-16.0	-4.5	1.2	-17.1	8.6	7.3
10	-16.3	-4.8	4.7	-13.6	6.8	5.5
20	-17.1	-5.6	6.4	-11.9	5.0	3.7
30	-17.8	-6.3	7.8	-10.5	3.9	2.6
40	-18.5	-7.0	8.8	-9.5	3.1	1.8
60	-19.2	-7.7	8.8	-9.5	2.7	1.4

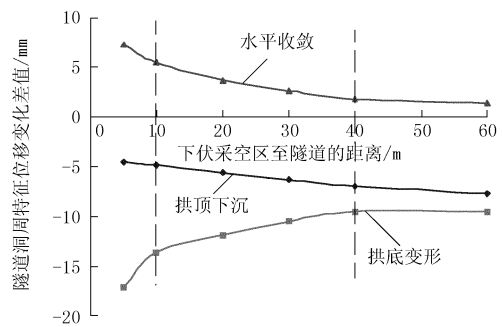


图 2 不同距离下伏采空区引起隧道特征位移变化曲线

从表 2 可以看出,在一定深度范围内,随着下伏采空区与隧道的距离逐渐增大,隧道拱顶下沉和拱底位移值均逐渐增长,而水平收敛则逐渐减小,表明采空区的存在使得隧道周边位移发生了一定的变化,整体上,隧道竖向相对位移有所减小,而水平相对位移则对应增大。尤其是隧道拱底,相对变形较大,在衬砌结构中产生的内力变化差值也较大,对隧道结构安全较为不利。

从图 2 可见,当下伏采空区与隧道的距离小于 10 m 时,距离的变化对隧道洞周特征位移影响较大。当下伏采空区与隧道的距离从 10 m 增加到 40 m 过程中,隧道洞周特征位移与二者之间的距离基本呈线性增长关系,而当下伏采空区与隧道的距离超过 40 m 后,采空区对隧道洞周特征位移的影响显著减小,表明在当前采空区尺寸条件下,下伏采空区与隧道结构影响的安全距离可取 40 m。

## 2.2 隧道支护结构受力分析

对应下伏采空区至隧道的不同距离,计算得到隧道初衬轴力、二衬轴力和二衬弯矩特征值如表3所示,图3、图4分别为对应工况下隧道初衬轴力、二衬弯矩特征值变化曲线。

表3 不同距离采空区引起隧道支护结构内力值

采空区与隧道的距离/m	初衬轴力/kN		二衬轴力/kN		二衬弯矩/(kN·m)	
	拱顶	拱底	拱顶	拱脚	拱顶	拱底
5	2089	2922	938	1402	-1	431
10	2040	2232	965	1396	-8	511
20	1961	1715	982	1387	-19	595
30	1904	1492	1010	1381	-27	668
40	1857	1354	1049	1378	-33	718
60	1830	1304	1064	1376	-38	746

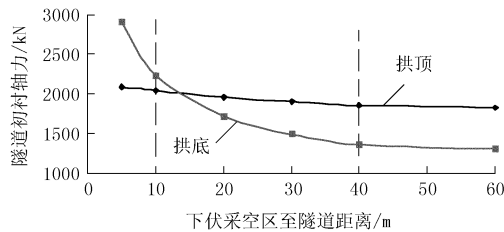


图3 隧道初衬轴力特征值随下伏采空区距离变化曲线

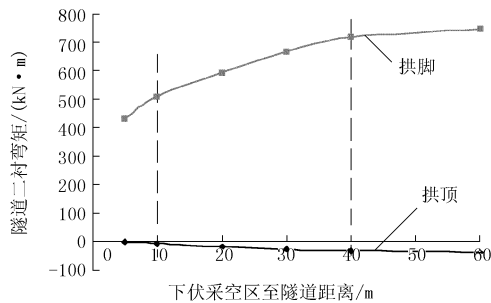


图4 隧道二衬弯矩特征值随下伏采空区距离变化曲线

从表3和图3、图4可以看出,在一定深度范围内,随着下伏采空区与隧道的距离逐渐增大,隧道支护结构的内力发生了规律性变化,同样表明下伏采空区的存在对隧道结构产生的影响,当下伏采空区与隧道的距离小于10 m时,距离的变化对隧道支护内力影响相对较大,随距离增长,隧道支护内力基本呈线性变化,但变化趋势逐渐变缓,当下伏采空区与隧道的距离超过40 m后,隧道支护内力特征值基本达到稳定,这亦说明在当前采空区尺寸条件下,下伏采空区与隧道结构的主要影响范围大约为40 m。

## 2.3 围岩塑性区分析

对应下伏采空区至隧道不同距离,可计算得到不同工况下隧道和采空区周边围岩塑性区范围。限于篇幅并不失规律性,此处仅列出下伏采空区与隧

道距离分别为5、10、20和40 m共4种工况下的围岩塑性区分布范围,如图5所示。

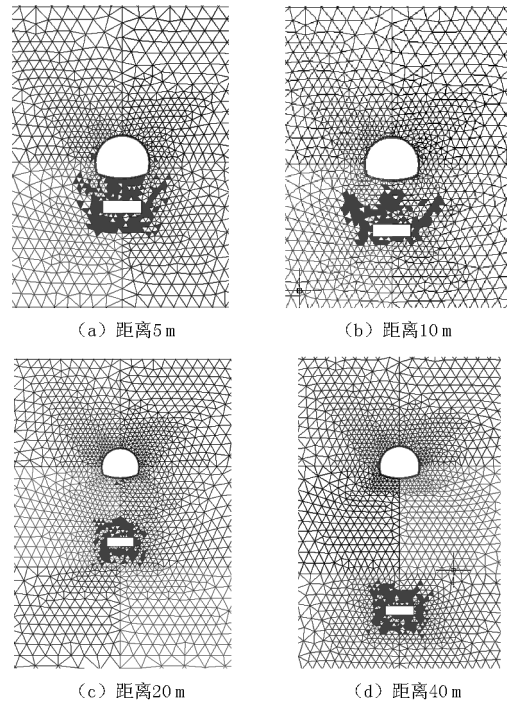


图5 下伏采空区与隧道距离变化时围岩塑性区范围

从图5可以看出,下伏采空区与隧道之间的距离对围岩塑性区大小及分布有较大的影响,当二者距离较小,如距离为5 m时,围岩塑性区的范围贯通隧道与采空区之间的区域,且塑性区范围也相对较大,对隧道及围岩整体稳定非常不利;当采空区与隧道距离增大到10 m时,围岩塑性区有所减小,但隧道与采空区之间仍有大部分区域围岩屈服,对隧道结构较为不利;而当距离增大到20 m左右时,采空区周边围岩塑性区范围有所减小,且隧道与采空区之间的影响逐渐减弱,表明采空区的存在对隧道整体稳定性影响不大;当采空区与隧道之间的距离继续增大到40 m左右时,采空区周边围岩塑性区范围基本不变,其对隧道安全的影响进一步减弱。因此,单从围岩塑性区范围看,下伏采空区对隧道结构的主要影响范围大约为20 m。

结合上述隧道洞周特征位移、隧道支护结构内力及围岩塑性区范围分布,整体上可以看出,下伏采空区的存在对隧道结构的影响是明显的,在当前设定采空区大小状况下,其主要影响范围可取40 m,约4倍的隧道开挖跨度。

## 3 结论

通过公路隧道下伏采空区施工过程有限元模

拟,分析了采空区与隧道不同距离状态下施工的影响规律,可为采空区公路隧道的设计和施工提供相关参考。

下伏采空区的存在对公路隧道结构和围岩稳定性的影响是显著的,当采空区与隧道的距离小于10 m,约1倍洞径时,其不利影响非常明显,施工中必须采取较强的预加固措施;在一定深度范围内,随着下伏采空区与隧道的距离逐渐增大,其对隧道结构的影响逐渐减小,当采空区与隧道的距离超过40 m,约4倍洞径时,采空区对隧道结构位移和内力的影响显著减小,围岩塑性区范围也相对较小;当此距离小于40 m时,必须考虑采空区对隧道结构和围岩稳定性的不利影响。

当然,这种影响与采空区大小、性质、围岩状况和施工技术等因素也是密切相关的,不同条件下其影响程度和范围也有所不同,在实际工程中宜结合具体条件综合分析和考虑。

#### 参考文献:

[1] 张顶立,王梦恕,高军,等.复杂围岩条件下大跨隧道修建技术

研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):290-296.

- [2] 冯长根,李俊平,于文远,等.东桐峪金矿空场处理机制研究[J].黄金,2002,23(10):11-15.
- [3] 张耀平,曹平,袁海平,等.复杂采空区稳定性数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):233-238.
- [4] 邱礼球,王彦虎.高速公路隧道通过煤矿采空区施工技术[J].隧道建设,2008,28(5):616-619,627.
- [5] 姜杰,常明.灵石隧道之石膏矿采空区设计研究[J].山西交通科技,2009,(4):37-38,63.
- [6] 侯浙学.葵岗隧道煤层采空区段的处治技术[J].建筑科学,2008,24(3):116-117.
- [7] 王联.西山坪隧道隧底煤层采空区的整治[J].现代隧道技术,2007,44(6):74-76.
- [8] 赵庚亮,文富源.隧道通过岩溶和采空区施工方案探讨[J].隧道建设,2008,28(6):716-719.
- [9] 王树仁,慎乃齐,张海清,等.下伏采空区高速公路隧道变形特征数值分析[J].中国矿业,2008,17(3):76-79,81.
- [10] 王树仁,何满潮,等.复杂条件下边坡工程稳定性研究[M].北京:科学出版社,2007.
- [11] 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].江苏南京:东南大学出版社,2006.
- [12] 龚建伍,夏才初,朱合华,等.鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J].岩土力学,2009,30(1):236-240.
- [13] 宋南涛,陈炜韬,王明年,等.煤系地层采空区对隧道施工安全性的影响[J].铁道建筑技术,2007,(3):48-51.

## 超深井钻探技术方案及通井洗井技术研讨会在江苏连云港召开

7月11~15日,中国地质科学院勘探技术研究所江苏东海县组织召开了“超深井钻探技术方案及通井洗井技术研讨会”。国内钻探工程领域资深专家及有关科研院所、生产协作单位共计60余位代表参加了会议。

会议由勘探所所长助理兼办公室主任冉恒谦主持。中国地质调查局原副局长王达教授作了主题发言,勘探所张金昌所长就组织本次研讨会的目的、意义进行了说明,并对勘探所正在组织实施的《科学超深井钻探技术方案预研究》及《超深井地球物理测量》项目进展情况进行了介绍。中国地质科学院地质所副所长高锦曦、北京探矿工程研究所副所长贾军和中国地质科学院探矿工艺研究所所长助理张伟教授到会并致贺词。

会议期间,为总结科学超深井钻探技术方案预研究项目的阶段性成果,加强子课题间的沟通与协作,各子课题负责人对各自承担的研究内容的进展情况及存在的问题分别进行了专题汇报,并和与会专家进行了深度的探讨,并达成了以下共识:

《科学超深井钻探技术方案预研究》及《超深井地球物理测量》两个项目的开展与实施,对我国钻探科学技术的发展具有深远影响,并为将来科学超深井组织实施进行技术储备和人才培养。

《科学超深井钻探技术方案预研究》项目因地质因素的不确定性,还需各子课题组在后续研究工作中,充分考虑超

深井实施中可能遇到的各种困难,积极拓宽研究思路,进一步开展相关理论技术研究,并对存在(现有技术条件下未能解决)的问题与难点提出解决的办法和思路,制定出多种备选解决方案,提高项目研究成果的科学性和可行性,为我国开展超深井工程做好技术准备。

会议期间,还特邀国内钻探工程领域资深专家进行了汶川科学钻探施工工艺技术、深部探测超深井钻探设备及松辽盆地科学钻探二井技术方案准备、松辽盆地一井施工技术、中国大陆科学钻探科钻一井通井洗井方案等钻探技术的专题介绍。促进与会人员对相互从事的钻探研究工作进行沟通与探讨,拓宽项目参与人员的视野,为深入开展超深井钻探技术方案预研究提供参考。

为加强对我国钻探技术及装备发展情况的了解,会议组织与会人员参观了科钻一井通井施工现场,对通井洗井工作进行指导。同时,还组织了部分专家参观考察了连云港黄海机械厂有限公司、江苏连云港天明机械有限公司等钻探装备生产企业,并与企业进行座谈,促进了研究单位与生产企业的沟通,为钻探行业的整体协调发展奠定了基础。

会议结束时,王达教授作了总结发言,张金昌所长对《科学超深井钻探技术方案预研究》、《超深井地球物理测量》项目的下一步工作进行了部署和安排。

(中国地质科学院勘探技术研究所 谢文卫 供稿)