

高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展

童立元 刘松玉 邱 钰 方 磊

(东南大学交通学院 南京 210096)

摘要 综述了国内外高速公路下伏采空区问题的研究现状,重点介绍了 4 个方面的问题:采空区探测、稳定性评价、治理及质量监控等技术,并提出了进一步研究的方向。

关键词 采矿工程,采空区,探测,稳定性,治理,质量监控

分类号 U 412.36⁺6

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)07-1198-05

CURRENT RESEARCH STATE OF PROBLEMS ASSOCIATED WITH MINED-OUT REGIONS UNDER EXPRESSWAY AND FUTURE DEVELOPMENT

Tong Liyuan, Liu Songyu, Qiu Yu, Fang Lei

(Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096 China)

Abstract The current research state of problems associated with mined-out regions is reviewed systematically, including the exploration technology, prediction of stability, treatment and inspecting techniques. Some important points needed to researched in future are also pointed out.

Key words mining engineering, mined-out region, exploration, stability, treating, quality inspecting

1 引言

采空区是指地下矿产被采出后留下的空洞区,按矿产被开采的时间,可分为老采区、现采区和未来采区。矿体被采出后,自顶板岩层向上形成“三带”——垮落带、导水裂隙带和弯曲带。地表沉降,产生连续或非连续变形,由此带来一系列环境岩土工程问题,如平地积水、道路裂缝、房屋倒塌、耕地减少、农田减产等,给矿区工程建设留下很大隐患。

有关采空区问题的研究,国内外主要是在煤炭、冶金、军事和交通等部门进行,如波兰、前苏联、英国和中国等主要产煤国家,从 20 世纪 50 年代开始就对“三下”采煤技术进行了详细研究;同时,对采空区地表构筑物保护和防治技术^[1~4]也进行了

大量试验研究,积累了宝贵的经验。但到目前为止,针对高速公路下伏采空区问题的研究报道甚少,且往往是经验介绍,尚未形成成熟的理论及工程设计体系,无规范、规程可循,国际上也鲜有此类工程报道。国内,目前仅在石家庄—太原、晋—焦、乌鲁木齐—奎屯及京—福高速公路徐州东西绕城段、河北保阜公路等^[5~8],国外,美国在科罗拉多州的某公路上进行了采空区问题的研究^[9]。

2 国内外研究现状

目前,采空区问题研究关键技术在于 4 个方面:地下采空区的探测技术、稳定性评价技术、治理技术及质量监控技术。

2.1 采空区的探测

采空区的探测,目前,国内外主要是以采矿情

2002 年 5 月 29 日收到初稿,2002 年 7 月 30 日收到修改稿。

* 教育部重点项目(01089)资助课题。

作者 童立元 简介:男,1975 年生,博士,1997 年毕业于中国地质大学(武汉)岩石矿物学专业,现任讲师,主要从事岩土工程及道路工程等方面的教学与科研工作。E-mail: liyton@tomcom

况调查、工程钻探、地球物理勘探为主,辅以变形观测、水文试验等。其中,美国等西方发达国家以物探方法为主,而我国目前以钻探为主,物探为辅。

在美国,采空区等地下空洞探测技术全面,电法、电磁法、微重力法、地震法等都有很高的水平^[9]。其中,高密度电阻率法、高分辨率地震勘探技术尤为突出,且近年来在地震 CT 技术方面也发展迅速。

日本的工程物探技术在国外同行业中处于领先地位^[10],应用最广泛的是地震波法,此外,电法、电磁法及地球物理测井等方法也应用得比较多,特别是日本 VIC 公司 80 年代开发研制的“GR-810”型佐藤式全自动地下勘察机,在采空区、岩溶等空洞探测中效果良好,且后续推出的一系列产品都处于国际领先水平。

欧洲^[9]国家工程物探技术也较全面,在采空区的探测上,俄罗斯多采用电法、瞬变电磁法、地震反射波法、井间电磁波透射、射气测量技术等,英、法等国家以地质雷达方法应用较好,微重力法、浅层地震法也有使用。

国内近年来在利用地球物理勘探技术查明地下采空区方面作了大量的工作,发展了多种方法,有些技术甚至超过了国际水平,如瞬态瑞利波法、地质雷达、弹性波 CT、超声成像测井等^[11~14]。随着我国物探技术测量精度和信息处理速度的提高,工程物探越来越成为探明地下采空区的一项重要的有力勘探手段。

2.2 采空区稳定性分析评价

针对地基开采沉陷及“三下”采煤技术,国内外均进行了大量研究,形成了矿山开采沉陷学等学科,但关于采空区对高速公路路基的危害程度,研究甚少,在矿区高速公路建设中是一个亟待解决的新课题。

采空区地表可能产生连续性或非连续性位移变形,对高速公路的危害主要有如下几个方式:采空区的失稳冒落,使地表剧烈变形,产生陷坑、台阶等;路基沉陷,造成路基、路面局部开裂,使承载力下降,使用条件降低,或造成路面低洼积水破坏;倾斜使坡度发生变化,导致行驶车辆重心偏移,在弯道处最易发生事故;水平变形和曲率使路面受拉伸开裂、受压缩隆起,使路面发生波浪起伏及路面与路基间的局部离层。

从 80 年代开始,英国、波兰、德国等国的一些学者相继研究了采空区等地下空洞对公路的危害性

问题,如 Jones, Sargand, M. C. Wang 等,但成果零乱,未有系统的报道。近年,随着高速公路的大量兴建,我国在此方面的研究才开始起步,对石—太、晋—焦、乌—奎、京—福高速公路等的采空区问题进行了一定的研究,但理论基础、研究手段均不完善,只以工程经验积累为主。

稳定性分析方法包括预计法、解析法、半预测半解析法及数值模拟方法,评价主要是通过计算地基承载力、剩余地表变形量及残留空洞的稳定性、地表破坏范围等来进行。

矿山开采沉陷的预计理论及方法较多^[15, 16],主要有:(1) 基于实测资料的经验公式法,在我国广为使用的有负指数函数法、典型曲线法等。(2) 在波兰推广使用的 Budryk-Knothe 理论法。(3) 在我国广泛使用的概率积分法,以波兰学者李特威尼申(J. Litwiniszyn)提出的随机介质理论为基础,后来得到刘宝琛、廖国华等的发展。这些方法在高速公路下伏采空区的危害性评价中经适当改进后可应用,如文^[9]中介绍了一套高速公路受采空区及地下采动影响,地表覆岩沉陷变形破坏的预计评价软件包,包括了 Budryk-Knothe 理论法和概率积分法,且有计算柱式开采煤柱稳定性、岩梁强度的决策计算系统,并应用其对太—旧高速公路的采空区进行了分析评价。另外,还有一些其他预测方法,如灰色预测方法及稳健统计方法^[17]、采空区矢量法^[18]、模糊数学方法^[19]等,但这些方法尚需在实践中进一步验证。

解析法是对采空区进行简化,建立地质模型,再按一定的原则抽象为一个理想的数学物理力学模型,按照数值方法予以求解,如结构力学方法^[9, 17],就是计算采空区地下残留硐室和矿柱稳定性的一种常用方法,有单硐室或多硐室弹性地基上梁模型或拱模型等。半预测半解析方法是预测法和解析法的结合,如 B. Dzezli 教授在 Budryk-Knothe 理论上引入 Fourier 二维积分变换形成的方法。

采空区数值模拟^[9, 17, 20~25]可使用有限单元法、边界单元法、离散单元法及有限差分法等。如 SAP^{2D},是加拿大学者在 SAP4 的基础上研究出的一种较好的应用于二维情况下开采沉陷计算的有限元程序系统。P. L. Meyer 给出了适用于求解岩石力学平面问题的非线性分析程序 NCP-1。但目前所见报道,多为采用平面有限元对采空区进行模拟,如文^[9]对太—旧高速公路采空区危害性的有限元评价。边界单元法与有限单元法类似,目前,可用于

沉陷分析的有 S. L. Crouch 等提出的 TWOFS, TWODD, TWODI 程序及 E. Hoek 等完成的二维非线性程序, 而且有应用边界元法进行三维非线性分析、蠕变岩体、裂隙及断层研究的报道。而离散单元法特别适用于节理岩体的分析, 模拟采动破碎岩体有明显的优点, 在采矿工程中得到了重要的应用, 目前, 二维离散单元程序已很成熟, 三维问题的研究也进展很快。FLAC^{2D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 和 FLAC^{3D} 是由美国 ITASCA 公司开发的显式有限差分程序, 特别适用于模拟大变形。其他数值计算方法还有灰箱方法、表面元法等。

2.3 采空区治理技术

文[1, 2, 4~9, 17]提出的构筑物下伏采空区处治方案主要有 3 类:

(1) 地面构筑物抗变形结构设计措施, 采用柔性设计原则、刚性设计原则或综合措施, 以吸收和抵抗变形。

(2) 采空区地基处理措施, 预防和控制地表残余沉陷的发生。此类方法可细分为 4 种:

① 全部充填采空区支撑覆岩, 以彻底消除地基沉陷隐患, 采用注浆充填、水力充填和风力充填等, 其中, 以注浆法应用最广泛、效果最好;

② 局部支撑覆岩或地面构筑物, 减小采空区空间跨度, 防止顶板的垮落, 常用的方法有注浆柱、井下砌墩柱和大直径钻孔桩柱或直接采用桩基法等;

③ 注浆加固和强化采空区围岩结构, 充填采动覆岩断裂带和弯曲带岩土体离层、裂缝, 使之形成一个刚度大、整体性好的岩板结构, 有效抵抗老采空区塌陷的向上发展, 使地表只产生相对均衡的沉陷, 以保证地表构筑物的安全;

④ 采取措施释放老采空区的沉降潜力法, 在采空区地表未利用前, 采取强制措施加速老采空区活化和覆岩沉陷过程, 消除对地表安全有较大威胁的地下空洞, 在沉陷基本稳定后再开发利用地表土地, 常用方法有堆载预压法、高能级强夯法和水诱导沉降法等。

(3) 对公路, 也可采取绕避方案或修筑过渡路段或营运后的维修方案。

结合高速公路工程自身特点与要求, 如公路工程为线性工程; 路堤属于柔性基础承受路面结构; 不均匀沉降量容易造成路基、路面结构开裂等, 其下伏采空区的治理, 理论上可以采取上述各种方法, 但基于技术及经济原因, 某些方法应用较少或缺少

试验, 国内目前已处理公路下伏采空区治理情况见表 1。

表 1 国内公路下伏采空区治理情况一览表^[5~9]

Table 1 Summarization of treating engineering for mined-out region under highway^[5~9]

工程名称	采空区规模/m		分层情况	治理方法	材料选择
	采深	采厚			
晋—焦高速公路山西段	20~100	2.0~6.0	1 层, 局部 2 层	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
乌—奎高速公路乌鲁木齐市西四道岔段	30~50	0.7~3.0	1 层	注浆充填	水泥黄土浆液
包—西线神木北至延安段	20~30	0.7~1.5	1 层	注浆充填	水泥黄土砂浆
石—太公路柏井、治西采空区	60~140	4~8	1 层	洞内干砌或浆砌片石, 注浆充填	水泥粘土浆液, 水泥粉煤灰浆液
河北保阜公路	25~48	3.8	2 层	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
京—福高速公路徐州东段	33~89	1.0~2.0	多层	注浆充填	水泥粉煤灰浆液

从表 1 知, 公路下伏采空区的治理, 主要以注浆全充填法为主, 注浆材料以水泥粉煤灰为主, 也有水泥粘土或水泥黄土浆材, 因地制宜。也有人提出改变路基路面结构, 应用新型路面材料的方法, 如在基底层下加铺一层土工织物, 沥青中应用 BSB 技术^[26]等, 但尚未见工程实例报道。

2.4 采空区治理质量监控技术

高速公路采空区治理工程属于隐蔽工程, 其质量监控包括 2 方面的工作: (1) 施工过程的监控, 主要是监理工作。(2) 施工结束后的质量检测工作。对于注浆充填法来说, 施工控制主要采取流量和压力控制法, 但由于流量和压力往往随时间而波动, 单纯靠总注浆量或终孔压力来控制注浆过程是不科学的。近年来, 国内外在注浆的自动控制方面有了很大发展, 如法国一家公司开发了一种用于灌浆和配料厂的控制和采集系统(Cinault 系统), 包括测量、自动控制和记录灌浆过程, 即从灌浆生产到泵出调节全过程; 长江科学院研制的自动灌浆记录仪也达到了国际先进水平。这些装置在采空区注浆中的应用可以实现全过程的动态跟踪监测, 根据流量和压力的变化实时指导施工。采空区注浆治理的监理工作主要从钻孔、制浆、注浆 3 个环节进行控制, 质量检测内容及方法见表 2。为确保治理效果的可靠性, 有必要对治理效果的时效性进行监测, 如京—福高速公路徐州东段采空区治理工程就采用高密度电法结合钻探从施工前、施工中、施工后不同时段对注浆的效果进行了探测, 得到了注浆效果发展变化的趋势。文[27]介绍了一种注浆效果监测的新方

法,即在注浆不同阶段的浆液中加入不同颜色的荧光粉,用带有紫外灯的钻孔电视系统对注浆机制及效果进行分析,效果良好。

表 2 采空区注浆工程质量检测内容及方法^[5~9]

Table 2 Quality inspecting contents and methods of grouting engineering for mined-out region^[5~9]

检测种类	检测内容	检测方法
取样试验	结石体强度	开挖或钻探取样,室内试验
	结石体密度	孔内波速测试
现场检测	采空区充填率	钻探,测井、孔内电视弹性波
	充填体厚度	CT,孔内超声成像
	地层渗透性变化	压水试验
	注浆范围	高密度电法,瞬变电磁法,浅层地震波法,瑞利波法等
	地表变形	沉降观测

3 存在问题

高速公路下伏采空区问题的研究是一个涉及到采矿学、岩土力学等众多学科的综合性课题,目前研究的深度还远远不够,在采空区的探测、稳定性评价、治理及质量监控 4 个方面的研究都存在一些问题。

(1) 采空区的探测虽然方法很多,但往往只能提供定性的资料,而采空区三维空间范围的准确确定直接关系到相关问题的研究,如稳定性预测、治理工程的设计计算等。因此,有必要从理论上和实践上来优选最佳的探测技术组合,提高勘测精度。如京—福高速公路徐州东段采空区^[8]在施工钻孔时,发现采空区范围比勘察时物探确定的要小很多,有相当一部分煤层未开采,后来及时调整了设计,节约了大量费用。

(2) 由于高速公路涉及范围大,服务年限长,对路基的稳定性和变形要求较高。因此,关于采空区的危害性研究最主要的是预测采空区地表在使用年限内的剩余位移变形量或发生突然坍塌的可能性。评价方法虽然很多,但尚需解决一些关键问题,主要包括地质力学模型和预测模型的合理建立、公路工程动态施工过程的模拟,路线与采空区空间相对位置的影响、时间效应的考虑,采空区稳定性和容许变形界限值的确定(即处治与否的界限),采空区治理的原则和要达到的标准,工后可能变形值的预测等。

(3) 由于矿区地质及采矿条件复杂,采空区的危害性的定量评价较为困难,特别是关于采空区的形状、尺寸、地质构造(断层等)、空洞的坍塌和充

填及密实状况、风化、水软等条件,在现有的勘测技术水平下,很难弄清楚。因此,预测评价应选择合理的方法,且应使用多种方法进行综合评价,如有限单元法、边界单元法和离散单元法 3 种数值方法的耦合分析,将采动区破碎岩体划分为离散元,较远处完整度较好的岩体视为连续体,用边界单元法或有限单元法来模拟,这样效果更好。

(4) 采空区危害性预测关键之一是力学模型的选择,采前和采后的力学模型有很大差别。采动破碎岩体为损伤岩体,应深入研究其流变特性,建立采空区及破裂覆岩稳定性和力学分析损伤模型,合理地确定采动破裂岩体物理力学参数,进行动态预测。

(5) 目前,公路下伏采空区的治理方法较单一,以注浆全充填法为主(表 1),往往根据经验进行设计和布置注浆工作,盲目性很大,有时造成较大的浪费,也带有一定的风险度。因此,对采空区的注浆治理理论应进一步加强研究,比如注浆加固采空区围岩、注浆局部支撑加固等,有很重要的经济意义。且处治方法的研究,应该不仅仅局限于注浆法,改变路基路面结构、使用新型路面材料等都有很高的研究价值。

(6) 目前,国内外在采空区治理效果检测方面,方法手段甚多,但尚没有成熟可靠的技术方法,且现行规范、规程无公路工程采空区治理检测标准可循,表现为各个工程往往自行其事,标准混乱,无可靠的方法体系。如太—旧高速公路柏井、冶西采空区^[9]将灌浆治理层平均剪切波速 $V_{sm} \geq 160$ m/s 作为注浆质量合格的建议值,是参照《建筑抗震设计规范(GBJ11-89)》中场地土类型划分的标准,而受注层主要为基岩层,其合理性值得商榷;又如将注浆硬化体强度指标定为 0.2~0.3 MPa,龄期定为 90 d,都缺乏足够依据。检测方法方面,各工程也不尽相同,如保—阜公路以钻探和高密度电法、瞬变电磁法进行检测;太—旧高速公路柏井、冶西采空区使用钻探、瑞利波法、注水试验等进行检测。

4 展 望

目前,国内外虽然在几条高速公路上进行了采空区问题的研究,积累了一定工程经验,但理论研究还比较落后,不能满足工程建设的发展,应在以下几个方面加强研究:

(1) 高速公路下伏采空区地质背景的研究是一

项基础性研究工作,对采空区探测及检测方法的选择和优化、采空区危害性的评价及治理技术的选择至关重要。有必要对不同采空区进行类别划分,研究不同类别采空区地质背景、形成演化特征、对公路及其他工程建设的影响程度等,进行工程危险性分区,为城乡规划建设提供基础性的背景资料。

(2) 采空区问题的研究是一项系统工程,涉及学科众多,影响因素复杂,忽略了某一方面的影响,都可能导致工程问题解决的失败。而专家系统可以吸取各领域内相关专业各专家的智能知识,把专业模型转化为知识模型,从而能对工程问题进行更全面、客观、准确地分析研究。采空区治理专家系统包括采空区工程地质评价、采空区探测、稳定性评价、工程设计、工程监理及检测子系统的建立,针对不同类别采空区的特点,提出相应可靠的治理技术,把治理技术智能化,对采空区治理技术的发展大有裨益。

(3) 评价采空区对公路工程的危害程度,必须紧密结合公路工程的特点,除了预测评价一体化方法、有限单元法等数值计算方法外,更要充分重视采空区地表建筑物变形破坏情况及矿区开采沉陷预测的经验方法,建立地表残余沉降观测站和重要建筑物观测站,监测地表残余沉降和建筑物沉降动态过程,及时了解地表变形情况。

(4) 采空区治理方法及标准、检测标准的进一步研究。加强新方法的研究,并提出相应的标准,且标准的提出不能仅仅局限于某一具体工程,应该具有一定的通用性,这就需要综合国内外各类采空区治理工程经验,提出具有规范性质的一系列标准,供工程采用。

(5) 鉴于目前国内外关于采空区治理尚无规范、规程可循,各相关部门有必要协同合作,以期公路下伏采空区治理技术规范、规程的提出积累理论知识及实践经验,做好技术储备工作。

参 考 文 献

- 1 中国科学技术情报研究所. 出国参观考察报告——波兰采空区地面建筑[M]. 北京:科学技术文献出版社,1979
- 2 [苏]尤申. 采空区建筑物基础设计要点[M]. 郭福君,刘树滋译. 北京:煤炭工业出版社,1985
- 3 原煤炭工业部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京:煤炭工业出版社,1985
- 4 颜荣贵. 地基开采沉陷及其地表建筑[M]. 北京:冶金工业出版社,1995
- 5 哈密提. 乌—奎高速公路煤层采空区治理试验工程实录[J]. 西部

- 探矿工程,1997,9(6):31~32
- 6 张志沛. 高速公路煤矿采空区地基注浆加固治理技术[J]. 中南公路工程,1996,(1):23~25
- 7 赵树森,侯 军. 晋—焦高速公路煤矿采空区处治施工工艺和质量监控[J]. 山西交通科技,1999,(1):17~21
- 8 杜广印,童立元,刘松玉. 高速公路下伏多层煤矿采空区处治方法研究[J]. 东南大学学报,2001,31(3):115~118
- 9 孙宗第. 高等级公路下伏空洞勘探、危害程度评价及处治研究报告集[R]. 北京:科学出版社,2000
- 10 地矿部物化探研究所情报室. 日本工程物探技术译文集[M]. 北京:地矿部物化探研究所情报室,1984
- 11 刘建华,彭向峰,孙智峰. 高分辨率地震技术探测采空区研究——以贾汪煤矿区为例[J]. 高校地质学报,1996,2(4):454~457
- 12 寇绳武,李克祥,郭 舜等. 高密度电阻率法探测洞穴、采空区的效果分析[J]. 工程勘察,1994,(6):61~65
- 13 王超凡,赵永贵,靳洪晓等. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用[J]. 地球物理学报,1998,41(增):367~375
- 14 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京:地质出版社,1996
- 15 吴 侃,葛家新,王铃丁等. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998
- 16 何国清,杨 伦,凌康娣等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994
- 17 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001
- 18 戴华阳. 地表移动预计的新设想——采空区矢量法[J]. 矿山测量,1995,(4):30~34
- 19 傅鹤林. 用模糊数学方法综合评价采场稳定性[J]. 有色矿山,1994,(1):53~57
- 20 隋旺华,沈 文. 浅部采空区岩层移动的工程地质分析及有限元模拟[J]. 煤炭学报,1991,15(3):72~82
- 21 邓喀中,马伟民. 开采沉陷中的岩体节理效应[J]. 岩石力学与工程学报,1996,15(4):345~352
- 22 Cui Ximin. Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(4):615~627
- 23 Donnelly L J. The monitoring and prediction of mining subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia[J]. Engineering Geology,2001,59(1/2):103~114
- 24 成 枢. 岩层与地表移动数值分析新方法[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1998
- 25 谢和平,周宏伟,王金安等. FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(4):397~401
- 26 余学义. 高等级公路下伏采空区危害程度分析[J]. 西安公路交通大学学报,2000,20(4):43~45
- 27 Chen Youqing. A fluorescent approach to the identification of grout injected into fissures and pore spaces[J]. Engineering Geology, 2000,56(3/4):395~401