

# 北京某公路沉陷变形地质灾害发育特征及成因分析

陈昌彦<sup>1</sup>, 岳中琦<sup>2</sup>, 陈爱新<sup>1</sup>, 陈义军<sup>1</sup>, 白朝旭<sup>1</sup>

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038; 2. 香港大学土木工程系, 香港)

**摘要:** 修建于 20 世纪 50 年代的某国道 k125~k129 路段是北京的主要产煤区, 地下发育数层可采煤层, 公路两侧分布有许多正在开采或废弃的煤矿。自 80 年代后期以来该公路不断发生沉陷变形, 其中 k125+600~800 路段变形最严重, 最大垂向累加沉降变形量约 4~4.5 m, 侧向位移达 2.0~2.5 m, 严重威胁到公路的正常运营。以该路段为例, 讨论采用地质调查、综合物探和适量地质钻探等综合方法探测和评价地下煤矿采空区对公路沉陷变形的影响, 建立有效的综合物探解释标志, 以推广应用与其它路段公路变形的探测和评价, 为地质灾害治理提供依据。

**关键词:** 公路沉陷变形; 煤矿采空影响区; 综合探测

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0356-06

**作者简介:** 陈昌彦(1968-), 男, 江苏连云港人, 博士, 教授级高工, 副总工程师, 从事地质灾害评估与治理设计、岩土体工程地质及岩土工程综合测试、检测和监测、计算机在岩土体工程中应用、构造地质等方面研究和技术管理。

E-mail: [chenchangyan@sina.com](mailto:chenchangyan@sina.com)。

## Geohazard characteristics and cause analysis of ground subsidence and deformation along national highway in Beijing

CHEN Chang-yan<sup>1</sup>, YUE Zhong-qi<sup>2</sup>, CHEN Ai-xin<sup>1</sup>, CHEN Yi-jun<sup>1</sup>, BAI Chao-xu<sup>1</sup>

(1. Beijing Geotechnical Institute, Ltd., Beijing 100038, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Hong Kong, Hongkong, China)

**Abstract:** The k125~129 section of a national highway, constructed in 1950's, is located above a major coal mining area in southwestern Beijing. There are several layers of mine coal beds in this area. Numerous working and abandoned underground coal mines are distributed at the two sides of the highway and even in the safety zone or underneath the highway. Consequently, this highway section has subsided and deformed owing to the coal mining. The k125+600~800 section is the worst damaged area. It has had the maximum accumulative subsidence of 4.0~4.5 m and displacement of 2.0~2.5 m respectively since the 1980s. Taking the k125 + 600~800 section as an example, the research aims to develop an integrated and effective reconnaissance technique to establish the predominant cause of ongoing subsidence of the highway and to affirm the existence of coal workings and other cavities beneath the damaged highway.

**Key words:** ground subsidence and deformation along the highway; working and abandoned coal mine; comprehensive reconnaissance technique

## 0 前 言

房山区蒲洼乡是北京市的重要煤产地, 煤层埋藏浅, 易于开采, 尤其 80 年代末期以后, 煤炭开发成为当地的重要经济产业, 但也对区域生态环境造成了很大破坏。在该区域的某国道 k125~k129 路段的路基出现了不同程度的沉陷变形, 公路两侧的农田地和山坡地上发育了规模各异的地面塌陷坑群、沉降带, 并造成房屋沉陷和山体开裂等灾害。近年来该区域公路沉陷现象愈加明显, 严重影响了公路的安全运营, 也造成了巨大的经济损失。

关于公路路基沉陷变形的原因争议很大, 公路管理部门认为当地煤矿开采活动已进入规定的公路安全红线范围内, 甚至可能在路基下部形成了采空区, 但

是当地煤矿经营者却认为煤矿开采活动并未超越公路安全范围, 公路沉陷变形是由于路基不良地质条件所致。为了对路基沉陷进行有效治理, 确保公路运营安全, 查明公路沉陷变形原因以及发展趋势是非常必要的, 本文以 k125+600~900 变形最严重路段为例, 通过工程地质调查、综合工程物探和地质钻探等综合手段详细研究和评价公路沉陷变形原因及机制, 为其他路段的类似路基沉陷灾害治理提供依据。

## 1 公路沉陷变形的地质灾害发育特征

该公路主要依地形变化修建, 沿线地层岩性组合

及其工程特性变化较大, 但在 k125~129 路段发生沉陷变形的区段几乎分布于带状的煤系地层区内, 各变形段虽然彼此分离, 但在平面上又呈带状分布。

根据地质调查, k125+680~780 路段是变形最为严重区段, 路基发生了连续的沉陷变形活动, 从 80 年代开始至今最大垂向累加沉降变形量约 4.0~4.5 m, 侧向位移达 2.0~2.5 m, 在 1999 年 10 月~2000 年 7 月期间发生了 1.2~1.5 m 的垂向变形和约 0.3~0.5 m 的侧向变形, 造成公路西北侧的挡土墙开裂下沉, 严重变形处挡土墙顶部标高低于路面标高约 20~30 cm (图 1), 公路路面发育一系列环状裂缝, 整体倾向于最大沉降中心区。K125+700 路段为公路沉陷变形的中心, 其两侧路段都向此中心相对倾斜下沉变形, 变形带的总体走向为 100 °~130 °, 与公路下方农田中的塌陷坑群及沉陷盆地分布方向基本一致, 变形边界向公路上方的延伸则与其北侧的浅层滑坡体相连。由于沉陷牵引作用, 使 K125+700 附近两侧路面和公路挡墙上发育了一系列的张性或张扭性裂缝, 裂缝张开并向中心方向错动, 其两侧地面存在明显的高差。

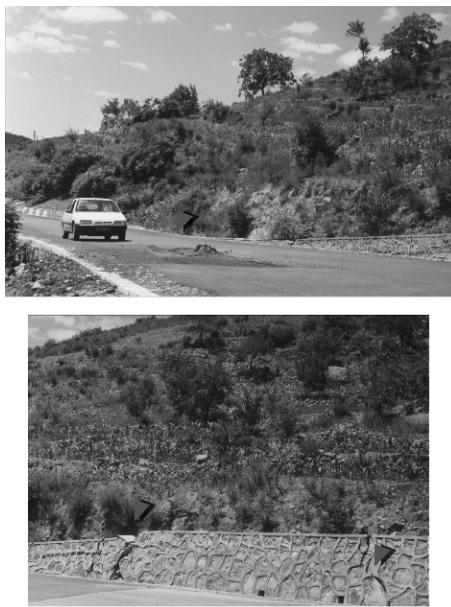


图 1 k125+680~780 路段路基沉陷变形

Fig. 1 Subsidence and deformation characteristics of roadbed in K125+680~780 highway section

在公路两侧发育的主要地质灾害类型可概括为连续的地表沉陷变形、不连续的塌陷坑、地面裂缝、(潜在) 滑坡等。

### (1) 地表沉陷凹地

地表沉陷凹地主要表现为连续的地面沉降变形, 多分布于公路南侧农田地, 其形状似碗状, 有的在坑缘发育了环形张裂缝, 坑内所有点均未达到最大下沉

值。表明目前大部分沉陷凹地的沉降变形活动仍在进行, 并在局部形成新的沉降凹地。

### (2) 塌陷坑

这类变形多表现为上大下小的漏斗状, 主要分布于公路下方农田中, 形状椭圆形至圆形, 长轴长 8.0~10.0 m, 短轴长 6.0~7.7 m, 最大塌陷深度可达 10.0 m。场区内塌陷坑常呈串珠状分布, 构成塌陷坑群, 与上述的地表沉陷凹地共同形成了较大范围的具有优势方向分布的地面沉陷变形区。

### (3) 地面裂缝及山体开裂

地面裂缝和山体开裂是本区典型的地质灾害现象。在公路 K125+650 路段附近路面上发育了一系列左旋张扭裂缝带, 并向沉降中心 k125+700 方向发生明显的下沉变形, 而在 K125+780 路段附近路面则发育了一组右旋张扭裂缝带, 也向 k125+700 方向发生明显的下沉变形, 裂缝带向公路两侧延伸发展, 并构成了公路下方田地中的塌陷坑群的影响边界, 区间路面还发育了一系列的楔形地面裂缝, 裂缝宽度上宽下窄, 其两侧地表往往有一定的落差, 并向地表沉陷方向下沉。

### (4) 浅层滑坡

主要发育在公路上方的山坡上, 为表、浅层残坡积物的中、小型滑坡体, 对路基稳定性具有一定影响。

## 2 研究区场地工程地质条件及煤矿开采方式调查

### 2.1 研究区场地工程地质条件概述

研究区内出露的基岩地层主要为南部区中奥陶世马家沟组 ( $O_{2m}$ ) 灰岩、中部区晚石炭世灰峪组 ( $C_{3h}$ ) 的煤系地层和北部区早侏罗世南大岭组火山岩 ( $J_{1n}$ ) [1]。

其中灰峪组 ( $C_{3h}$ ) 煤系地层是公路路基的主要基岩地层, 发育了数层可煤层, 岩性以粉/细砂岩、泥岩和数层煤层互层为主, 煤层厚度变化较大, 偶尔夹薄层泥质灰岩。地层总体产状为倾向 340 °~360 ° $\angle$ 20~25 °, 局部因构造作用而变化。

场区内发育了一条区域性的芦子水逆冲挤压断裂构造带, 其产状为倾向 10~20 ° $\angle$ 35~40 °, 此外还发育小规模的层间挤压断裂和褶断带。受较强烈的区域挤压构造作用, 岩体中节理裂隙以及揉皱变形构造发育, 岩体破碎, 对煤矿顶板稳定性具有不利影响。

路基浅部的泥岩及煤层单轴饱和极限抗压强度为 0.20~0.24 MPa, 为极软岩, 软化系数为 0.10~0.17, 抗风化能力弱, 水理弱化作用显著, 且具有一定的膨胀性和相对隔水性质, 是本区潜在软弱层; 粉、细砂岩则较坚硬、性脆, 抗风化能力较强, 构成了相对能

干地层, 受区域较强烈的构造作用, 煤系地层中挤压揉皱、层间滑动等半塑性流变构造发育, 使煤层及泥岩等软弱地层呈鸡窝式赋存, 局部形成了较厚的煤层。岩体结构以层状碎裂结构为主, 岩体基本质量综合为V级, 煤矿顶板的自稳能力差~极差, 地下煤矿开采中必须进行支护。

## 2.2 煤矿开采状况调查

本区煤矿开采历史较久远, 在建国前就有煤窑开采, 在80年代以前, 以小规模开采, 满足当地居民生活为主; 在80年代后期开始了大规模的煤矿开采, 成为当地主要经济产业之一。但由于复杂的地质条件和煤层赋存状况, 无法采用机械化或半机械化大规模开采, 只能以人工式的小煤窑开采, 对较厚的煤窝子则采用分层开采, 利用放炮或掘凿等方法开采煤层, 以煤柱和矿木等形式进行临时支护, 对采空区没有系统的管理和维护, 大多采用垮落式管理, 采空区最终都将自然垮落并被充填。煤矿多以私人或集体形式经营, 目前对已开采完或废弃的地下巷道空间延伸和分布情况及其在地面位置等都没有详细的记录资料, 因此也无法查明地下煤层的开采状况。

由于本区煤系地层及煤层顶板岩体破碎, 强度低, 自稳能力差, 煤矿巷道深浅, 对于未经加固的废旧巷道及采空区必将因采空区顶板岩体塌落而形成显著的地面变形现象, 诸如在公路两侧农田地和山体发育了大量的地面塌陷坑群和山体开裂现象及其次生的浅层滑坡等灾害。

## 3 公路路基变形原因的综合探测

本文采用多种工程物探技术的优势并结合地质钻探方法研究公路地下采空区的存在及其分布。经对研究区地球物理场特征调查, 路基和地面塌陷变形区域与未变形区的地下介质的工程力学特征和电磁性特征等具有较明显的差异<sup>[2]</sup>, 因此选择探地雷达(GPR)技术和多道瞬态瑞雷波技术(MASW)对地质调查的重点区段进行探测, 根据物探的初步解释成果以确定地质钻探靶区, 再结合地质钻探和地质调查资料对物探解释成果进行修正, 建立采空区、采空塌落变形带、路基修补回填层等典型介质模型的物探解释标志层, 查明路基塌陷变形区的分布范围及可能引起变形的主导因素, 同时指导其他区段的综合物探探测。

在布设测线时首先在公路南侧农田地中已知的地下采煤塌陷坑群附近布设了综合物探测线和一个钻孔, 然后在公路路基变形区及其两侧未变形区的路面上布设了多条物探测线, 根据物探初步解释成果在变形中心处设计了一个钻孔, 有关探测工作的布设情况

见图2。限于篇幅, 本文只分析了公路路面上的综合探测结果。

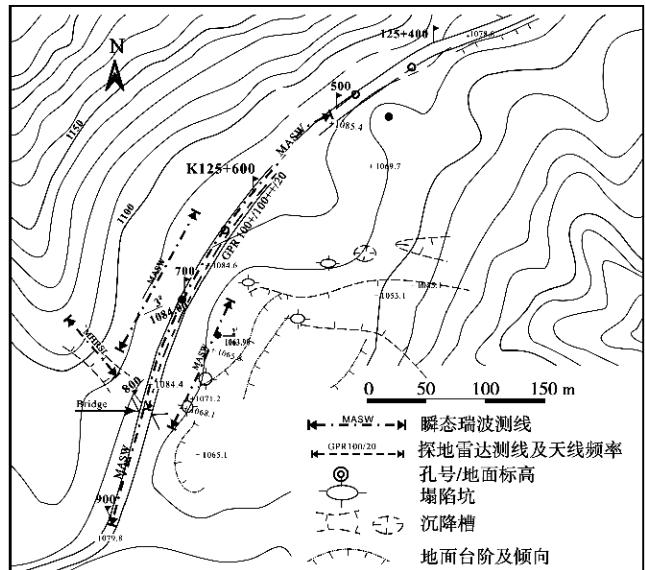


图2 研究区综合探测工作布置图及场地地质灾害分布

Fig. 2 Distribution of geophysical surveys, boreholes and geological hazards in the study area

### 3.1 综合工程物探测试和成果解释

#### (1) 探地雷达测试

本项目采用SIR-2型雷达系统并分别应用中心频率为100M双天线和20M棍状天线进行综合测试, 图3是采用20M天线测试的探地雷达影像解释图。

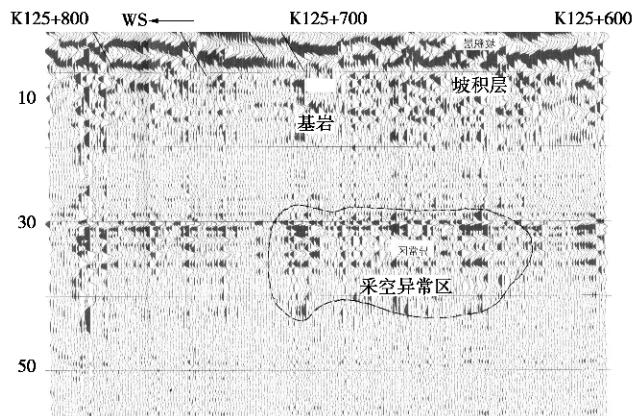


图3 K125+600~800路段的探地雷达影像及工程地质解释图

Fig. 3 Map of GPR imaging and interpretation in k125+600~800 highway section

综合不同频率天线的探地雷达影像和雷达波组特征变化表明在公路变形区内, 公路沉陷中心区浅部约2~4 m深度发育多层强反射波组信号且不规则, 而在轻微变形和正常路段则无异常波形, 其与公路每年回填修补路面层密切相关, 由其厚度和平面变化可大致推测公路连续沉降变形的程度及严重变形的范围。而在较严重变形路面下20 m深度范围内的坡积层及煤

系地层均表示较强的反射信号, 波形不连续性和无规则, 反映了地下介质结构受到较强烈的变形扰动作用。自路面下 28~40 m 范围内有较强烈的不规则反射, 30 m 深度附近的雷达影像表现为不连续、杂乱和异常反射等特征, 反映了地下介质被错断现象。同时在 K125+720~780 m 路段多处发育地面裂缝, 使连续的雷达影像被错断, 其变化趋势与地表变形相似。

这些雷达影像波组变化特征经后期钻探验证在约 20 m 和 30 m 深度范围分别发育了#3 和#4 煤层, 且公路下部的#3 和#4 煤层具有开采迹象, 采空区顶板岩体相对破碎。

综合 k125+600~900 区段的多种频率天线的探地雷达测试结果表明, 雷达影像异常区范围主要位于 k125+630~790 区段, 其他区段探地雷达影像无明显异常现象, 这与目前公路明显变形区段基本一致, 尤其在变形最为严重区段的 K125+650~720 的雷达影像异常最为强烈, 且表现为深部多层异常, 但无明显的弧形反射信号, 反映了地下可能存在多层采空区并且由于顶板岩体塌落被充填, 公路路基下部的明显扰动范围约 160 m。

上述表明, 采用多种频率天线进行探地雷达探测, 可以查明公路下部地下采空区的存在及其顶板岩体塌落影响范围。

## (2) 多道瞬态瑞雷波测试

多道瞬态瑞雷波技术主要根据瑞雷波在不均匀介质传播过程中的频散曲线特征、模态特征、频谱结构等信息变化综合评价介质结构的均匀性、分层性、力学特性等以及相对软弱层的分布, 该方法可以弥补探地雷达方法仅能反映介质电磁性质变化的特点, 两种方法的组合可以有效查明地下介质的物理力学信息的变化<sup>[3-6]</sup>。为了综合评价地下介质结构信息的空间连续变化情况, 本文采用连续滚动方式进行数据采集, 以

获得高密度的瑞雷波波形以及频散曲线剖面, 主要的采集参数为滚动激发震源的间距为 2 m, 道间距 2 m 和 24 道检波器, 测线范围为 k125+600~k125+820, 长度约 220 m。图 4 为根据瑞雷波频散曲线的相速度变化情况, 绘制的瑞雷波相速度-深度等值线图。

瑞雷波相速度等值线整体变化趋势表明, 以 k125+690~740 路段为中心形成了一个近似的槽形“相速度沉降带”, 其两侧路段的瑞雷波相速度等值线分别倾向该中心, 在深度 28~40 m 和 50~55 m 深度范围内分别发育了剪切波速度为 250 m/s 和 500 m/s 的超低波速异常带, 等值线结构变化复杂(图 5)。这个低速度异常带的范围和深度与探地雷达探测的异常区的范围及钻孔中揭露的无原生构造结构的煤层分布深度和范围基本一致。而相对高速等值线向其两侧方向逐渐变浅而且相对稳定, 尤其向西南方向(k125+800)更加稳定。这些现象表明 k125+690~740 路段路基下部地层发生了较强的扰动作用且地层结构较周围松散, 应当是废弃煤矿采空区或巷道及其顶板岩体塌落带, 该“相速度沉降带”范围与公路最大变形中心区段基本相当。浅部地层中的多个孤立相速度等值线带主要与路面多次回填的碎石土及沥青层有关。而在该区段两侧由于地层结构稳定, 受采空区塌落影响逐渐减弱, 岩体结构逐渐稳定, 因此其相速度等值线结构逐渐稳定。

但瑞雷波相速度等值线于 K125+746~760 路段的公路下部 15~35 m 深度范围内出现了第二个“相速度沉降带”, 其异常中心位置为 k125+750 附近, 但浅部(路基下部 10 m 深度内)路基地层的瑞雷波相速度等值线变化稳定。根据地质调查表明 K125+746~778 区段公路上部(北西侧)存在一条向公路方向延伸的煤矿巷道, 但该矿于近期已被关闭, 此异常带应

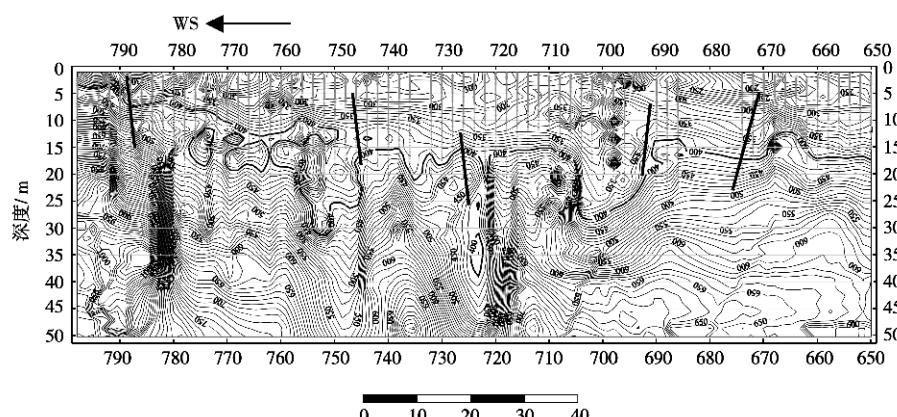


图 4 研究区公路瑞雷波相速度-深度等值线图

Fig. 4 Phase velocity - depth contours of Rayleigh wave in the study area

表 1 k125+600~900 路段钻孔揭露的煤层结构特征

Table 1 Structural characteristics of coal with roof/floor rock underneath k125+600~900 section based on boreholes

煤层	煤层顶/底标高厚度/m		煤层结构、构造	
	#2 钻孔	#3 钻孔	#2 钻孔	#3 钻孔
#1~#2	已剥蚀	厚 1.5~2.1 m	已剥蚀	煤层原生挤压、层滑构造现象清楚，全风化~强风化。
#3	已剥蚀	1055.5/1053.0 (2.50)	已剥蚀	顶部 10 cm 煤层具原生挤压构造现象，为构造煤。
#4	1044.1/1043.5 (0.6)	1046.8/1042.7 (4.10)	厚度较薄，煤层原生结构不清楚，主要为粉末状次生结构，含小碎块石。	下部煤层以煤粉、煤屑为主，稍松散，非原生结构。
	1041.8/1036.9 (4.9)	1041.9/1037.7 (4.20)	煤层原生沉积、构造变形结构明显。	顶部煤层具原生构造煤结构，下部煤层原生结构不清楚。
#5 钻孔未穿透煤层底板	1036.9/1032.9 (4.0)	1037.7/1033.8 (3.90)	煤层原生沉积及构造结构不清楚，主要为煤粉与煤屑混合组成次生结构。	煤层原生结构及变形构造清晰
	1032.9/1027.8 (5.1)	1033.8/1032.2 (1.60)	煤层原生结构清晰，层间构造变形结构明显。	煤层原生沉积层理结构和层间挤压变形构造清晰。

为该煤矿巷道或采空区的及其塌落带形成的瑞雷波相速度低值异常带，但是由于煤矿停采时间较晚，还没有造成巷道顶板岩体大面积塌落，故目前道路处于初步变形阶段。

值得注意的是，在瑞雷波相速度等值线图上分别在 k125+668、+690、+710、+744、+766、+790 路段附近都发育相速度突变带，它们分布在公路沉降变形中心的两侧并向公路沉降变形中心方向倾斜，而且它们的位置和倾斜方向与公路路面上发育的地面错动位置和方向基本一致，说明瑞雷波相速度—深度等值线的变化可以敏感地反映地层结构的变化及变形情况。

综合探地雷达和瞬态瑞雷波测试结果表明，该区段公路下部的低速异常带与公路两侧的煤矿开采活动密切相关，在路基下部存在多层次的煤矿开采活动，由于煤矿顶板岩体的塌落造成了公路路基的沉陷变形。但由于物探探测结果的间接性和多解性特点，尤其获得的地下介质的分层都是物性分层，有时可能与岩性分层有一定的差别，因此建议在公路沉降中心部位布设深度约 50~60 m 左右的钻孔，以验证综合物探测试结果及建立有效的解释标志。

### 3.2 钻探结果分析

根据上述综合物探探测的结果分别在公路上及南侧农田地的变形中心区布设了 2 个钻孔以验证物探解释标志和确定公路路基沉降变形机制（图 3），结果表明在 K125+700 路段的路基以下 50 m 深度范围内发育 4~5 层煤层，各煤层厚度变化较大，有关钻孔揭露的煤层情况如表 1。

综合表明，公路路基下部的#1、#2 煤层厚度较薄，其顶底板围岩主要为泥岩和泥质砂岩，一般全风化~强风化，极软岩，煤层及泥岩地层具有膨胀

趋势，构成了路基下部的相对软弱层。这两层煤主要赋存在公路及其北侧，而在公路南侧已被风化剥蚀。中部的#3 煤层大约在路面下 30.0 m 深左右，厚约 3~4 m，是早期煤矿开采的主要层位，近期也有局部开采。第#4、#5 煤层则分布于路面下 40 m 深度以下，有时二者合并为一层煤，是近期煤矿开采的主要煤层，累计厚度最大可达十几米，本次钻探的累计铅垂厚度达 15.0 m，但未钻透此层。煤层顶板以破碎的泥质粉砂岩、细砂岩为主，岩体极破碎，强度低，岩体基本质量为 IV~V 类，顶板自稳时间短，在煤矿开采过程中必须进行支护，否则很容易发生冒顶塌落现象。

## 4 公路路基沉陷变形原因及发展趋势分析

综合地质调查和物探测试结果表明本区地下发育数层可采煤层，在公路 k125+680~740 路段深部大约 28~40 m 和 50~60 m 左右以及 k125+740~760 路段下部的 15~35 m 深度段存在地下采空区或采煤工作面，穿越公路下部以及公路的安全红线之内的地下煤矿开采活动以及形成的采空区是导致公路不断沉陷变形的直接原因，而公路下方不良的岩土体性质或地层结构加剧了地表变形。

根据本区煤矿床的分布及开采方式和已有地面塌陷变形现象，表明本区煤矿开采基本上属于非充分采动，目前地面沉陷变形并未达到地质采矿条件下的临界状态，公路沉陷变形仍将继续，但公路的沉陷中心不会大范围迁移，而 k125+740~760 路段由于煤矿关闭时间较晚，可能会有短期的加剧变形趋势。

因此采取有效措施严格控制公路两侧的煤矿开采活动，严禁越线开采是控制公路交通工程安全运营

重要保证

## 5 结 论

(1) 本文采用地质调查、综合物探探测和适量钻探的方法可以经济有效地查明公路沉陷变形的主导因素以及变形范围和发展趋势。

(2) 采空塌陷区与正常区公路路基岩体结构、工程力学特征和电磁性特征等物理场具有明显的差异,因此充分利用探地雷达(GPR)和多道瞬态瑞雷波技术(MASW)的优势互补特点,可以有效探测该区域的采空区及其影响带的发育特征及其空间影响范围。

(3) 超越公路安全范围及公路路基下进行煤矿开采及其引起的上覆岩土体塌落是导致公路沉陷、变形以及两侧地面塌陷、浅层滑坡等地质灾害发育的直接原因,因此严禁越线采煤是控制该区公路交通工程安全运营的重要保证。

## 参考文献:

- [1] 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991. (Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing Municipality. Regional geology of Beijing Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [2] 钟 和, 陈昌彦, 谢朝晖, 等. 瑞雷波及高频电磁波技术在北京地区基础工程及工程勘察中的应用研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院, 2002. (ZHONG He, CHEN Chang-yan, XIE Zhao-hui, et al. Application and research of Rayleigh wave and high frequency electromagnetic wave method on geotechnical investigation and testing in Beijing area[R]. Beijing: Beijing Geotechnical Institute, 2002. (in Chinese))
- [3] OLHOEFT G R. Electrical properties of rocks[M]// TOULOUKIAN Y S, JUDD W R, ROY R F, editors. Physical Properties of Rocks and Minerals. New York: McGraw-Hill, 1981: 257 - 330.
- [4] 陈昌彦, 白朝旭, 陈义军, 等. 多道瞬态瑞雷波测试技术问题讨论[J]. 勘察科学技术, 2007(6): 22 - 25. (CHEN Chang-yan, BAI Chao-xu, CHEN Yi-jun, et al. Discussion on some problems of multi-channel transient Rayleigh wave prospecting[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(6): 22 - 25. (in Chinese)).
- [5] 常锁亮, 张淑婷, 李贵山, 等. 多道瞬态瑞雷波法在探测煤矿采空区中的应用[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(3): 69 - 72. (CHANG Suo-liang, ZHANG Shu-ting, LI Gui-shan, et al. Application of multi-channel transient Rayleigh wave method on survey of goaf in coal mine[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(3): 69 - 72. (in Chinese))
- [6] 闫长斌, 徐国元. 综合物探方法及其在复杂群采空区探测中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(3): 10 - 14. (YAN Chang-bin, XU Guo-yuan. Research of composite geophysical methods and its application in detection complicated group mined-out areas[J]. Journal of Hunan university of Science & Technology (Natural Science Edition), 2005, 20(3): 10 - 14. (in Chinese))