

# 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

孙忠弟 主编



科学出版社

# 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

孙忠弟 主编

科学出版社

2000

## 内 容 简 介

本科研报告集全面系统地阐述了高等级公路下伏空洞的勘察、危害程度评价、处治及质量检验等一系列技术问题。报告中提出了一套合理的采空区勘察技术和工作程序；提出了评价采空区危害程度的三种方法，并给出了处理与否的界定标准；结合太-旧采空区提出了灌浆充填法及施工工艺，并提出了质量检测方法和相应的检测标准。

本书可供从事道路、建筑、岩土等专业的科研和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

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/孙忠弟主编. -北京:科学出版社, 2000

ISBN 7-03-007735-0

I. 高… II. 孙… III. ①路面洞穴-地质勘探-研究报告 ②路面洞穴-危害-研究报告 IV. U418.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 64130 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

2000 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1 / 16

2000 年 1 月第一次印刷 印张: 30 1 / 2 插页: 2

印数: 1—1 500 字数: 712 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)



## 前 言

本科研报告集是“高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究”课题科研成果的汇编。报告集共分为六篇。第一篇，课题总报告；第二篇，公路路基下伏空洞地质背景研究；第三篇，空洞勘察技术研究；第四篇，空洞对地基的危害程度研究；第五篇，高等级公路路基下伏空洞处治及质量检验技术研究；第六篇，附录。全书统一编目，各篇独立成章。

报告中结合太-旧高等级公路路基下伏空洞的具体情况，对空洞的形成、演化过程和最终状态分别从地质背景、自然变迁、人工活动等方面进行了详细的分析和研究，建立了相应的工程地质模型；详细地研究了各种物探技术和钻探技术在公路下伏空洞勘察中的应用，建立了包括工程地质测绘、工程物探、工程钻探及室内外试验的合理组合等一系列采空区勘察技术和工作程序；提出了以宏观预测方法、有限单元数值方法为主，结构力学方法为辅的成套的评价采空区稳定性的方法，并配合三种评价方法，针对不同情况，提出了相应的处治与否的界线标准；在分析研究的基础上，确定了采用灌浆充填法处治中小型煤矿采空区，并提出了水泥、黄土、粉煤灰等材料的配比及注浆工艺，同时提出了处治质量检验的方法和相应的检测标准。

本科研的主要创新在于综合不同的学科和技术，对于高等级公路路基下伏空洞的勘察技术、危害程度评价、处治方法及质量检验技术等提出了一套系统完整的可供工程单位具体操作的方法。本报告所提供的研究成果，对于今后我国高等级公路建设中跨越采空区的地基稳定性评价、处治方案设计以及在已建设的高等级公路下的采煤等均有很好的理论指导意义和巨大的经济价值。

本科研项目是在山西省交通厅、太-旧公路指挥部的大力支持下完成的。几年来他们在人力、物力及财力各个方面都给予了广泛的支持，使得本项目得以顺利完成。交通部公路管理司、科技司等也一直关注着此科研课题的进展，并给予支持。另外，在整个科研项目进行过程中，先后得到了交通部第一公路勘察设计院、西安交通大学、煤炭科学研究院西安分院、西安工程学院、西安矿业学院、陕西省综合勘察院、山西矿业大学、中国矿业大学、冶金部西安有色金属勘察院等单位的大力支持，对此一并表示衷心的感谢。

由于时间、经费及技术等方面的原因，本课题尚存在许多需改进和深入研究的地方。我们诚恳地希望相关单位及读者给予批评指正，我们也将结合其他工程进一步深化和完善此科研成果，力争尽快地编写出一套可供设计与施工单位实际操作的公路路基下伏空洞的地质勘察、危害程度评价、处治方案设计、施工工艺要求、质量检测方法和检验标准的具体方法，为编写相应的技术规范做好技术储备。

本报告集由孙忠弟主编，夏永旭负责全书文字的统编修改工作。

太-旧高等级公路采空区地基勘察处治科研课题组

1998年7月13日

# 目 录

## 第 1 篇 课题总报告

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 导言                         | 3  |
| 0.1 课题的立项                  | 3  |
| 0.2 课题组的组织机构               | 3  |
| 0.3 课程分工                   | 3  |
| 0.4 课题研究的进展简况及所完成的工作       | 4  |
| 第 1 章 引论                   | 5  |
| 1.1 路基下伏空洞对路基场地稳定性的影响      | 5  |
| 1.2 研究和治理地下空洞涉及到的工程技术学科    | 5  |
| 1.3 国内外有关地下空洞的勘察、治理工作的基本情况 | 5  |
| 1.4 本课题的研究目的与计划            | 7  |
| 1.5 本课题研究的技术路线             | 7  |
| 第 2 章 路基下伏空洞的成因与地质背景研究     | 9  |
| 2.1 概述                     | 9  |
| 2.2 地下溶洞的发育规律及其稳定性         | 9  |
| 2.3 地下采空区的形成及其对路基场地稳定性的影响  | 12 |
| 第 3 章 路基下伏空洞的勘察技术研究        | 18 |
| 3.1 地下空洞工程地质勘察工作阶段的划分      | 18 |
| 3.2 地下空洞勘察中的工程地质测绘         | 22 |
| 3.3 工程物探方法                 | 23 |
| 3.4 工程地质钻探                 | 28 |
| 3.5 室内试验及原位测试              | 30 |
| 3.6 工程岩体基本质量的分级            | 31 |
| 3.7 地下空洞工程地质勘察技术途径和工作模式    | 33 |
| 第 4 章 地下空洞对路基危害程度研究        | 34 |
| 4.1 概述                     | 34 |
| 4.2 有限单元法                  | 35 |
| 4.3 结构力学方法                 | 37 |
| 4.4 地表连续变形的预计方法            | 38 |
| 4.5 地下空洞危害程度的评价及处治原则       | 39 |
| 第 5 章 地下空洞的处治及质量检验技术研究     | 42 |
| 5.1 概述                     | 42 |
| 5.2 地下空洞加固方法的研究            | 42 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 5.3 对充填材料的要求 .....                | 44 |
| 5.4 太旧路采空区灌浆处理实施概况 .....          | 45 |
| 5.5 地下空洞灌浆处理的质量检验内容与方法 .....      | 48 |
| 第6章 太旧高速公路中段南线方案的实施所带来的综合效益 ..... | 50 |
| 第7章 结论与建议 .....                   | 51 |
| 参考文献 .....                        | 52 |

## 第2篇 公路下伏空洞地质背景研究

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 导 言 .....                      | 55  |
| 第1章 概述 .....                   | 56  |
| 1.1 公路下伏空洞的分类 .....            | 56  |
| 1.2 各类空洞对公路建设的影响程度 .....       | 57  |
| 第2章 空洞形成赋存的地质背景 .....          | 60  |
| 2.1 黄土喀斯特形成、赋存的地质背景 .....      | 60  |
| 2.2 地下溶洞形成、赋存的地质背景 .....       | 60  |
| 2.3 地下采空区形成、赋存的地质背景 .....      | 60  |
| 第3章 矿山采空区形成、演化特征及其对地表的影响 ..... | 78  |
| 3.1 矿层的开采方式及顶板管理 .....         | 78  |
| 3.2 采空区冒落组成部分及其地质特征 .....      | 79  |
| 3.3 影响冒落因素分析 .....             | 81  |
| 3.4 采空区地表破坏形式及其特征 .....        | 85  |
| 3.5 影响地表变形的主要因素 .....          | 88  |
| 第4章 小型矿山采空区特征 .....            | 94  |
| 4.1 小型矿山的概念和分类 .....           | 94  |
| 4.2 小型矿山一般特征 .....             | 94  |
| 4.3 小型矿山采空区三带特征 .....          | 96  |
| 4.4 小型矿山采空区其他特征 .....          | 98  |
| 4.5 小型矿山采空区地表变形、破坏特征 .....     | 99  |
| 第5章 采空区工程地质模式 .....            | 101 |
| 5.1 工程地质模式的概念 .....            | 101 |
| 5.2 采空区工程地质条件模式 .....          | 101 |
| 5.3 采空区工程地质作用模式 .....          | 102 |
| 5.4 采空区工程地质现象模式 .....          | 102 |
| 5.5 采空区工程地质模式 .....            | 103 |
| 第6章 结论 .....                   | 106 |
| 参考文献 .....                     | 107 |

## 第3篇 公路下伏空洞勘察技术研究

|           |     |
|-----------|-----|
| 导 言 ..... | 111 |
|-----------|-----|

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第1章 国内外空洞探测技术研究现状             | 112 |
| 1.1 国外研究现状                    | 112 |
| 1.2 国内主要方法                    | 115 |
| 1.3 国内外研究现状对比及发展趋势            | 117 |
| 第2章 工程地质测绘方法                  | 119 |
| 2.1 工程地质测绘的目的和重要性             | 119 |
| 2.2 工程地质测绘的主要内容和方法            | 119 |
| 2.3 下伏空洞区地表变形监测               | 124 |
| 2.4 下伏空洞稳定性初步评价               | 125 |
| 2.5 工程地质测绘在公路勘察各阶段中的地位 and 作用 | 127 |
| 2.6 工程地质测绘的主要参数与工程地质模型的建立     | 129 |
| 第3章 工程物探技术                    | 132 |
| 3.1 电法勘探                      | 132 |
| 3.2 电磁勘探                      | 151 |
| 3.3 浅层地震勘探法                   | 163 |
| 3.4 微重力勘探方法                   | 170 |
| 3.5 氦射气勘探                     | 175 |
| 3.6 几种物探方法组合类型探测效果            | 181 |
| 第4章 工程钻探技术                    | 182 |
| 4.1 钻探目的及钻孔布置原则               | 182 |
| 4.2 钻探施工及地质描述                 | 195 |
| 4.3 岩土室内试验及原位测试               | 202 |
| 4.4 钻探与物探结果对比                 | 205 |
| 第5章 空洞勘察技术评述                  | 213 |
| 5.1 各类勘察技术方法评述                | 213 |
| 5.2 空洞勘察技术途径和工作模式             | 214 |
| 5.3 各种物探方法质量经济综合评述            | 215 |
| 5.4 空洞勘测物探方法组合                | 218 |
| 5.5 公路勘察各阶段空洞采空区勘察方法综述        | 218 |
| 5.6 初步认识和结论                   | 219 |
| 参考文献                          | 221 |

## 第4篇 空洞对地基的危害程度研究

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第1章 引论             | 225 |
| 1.1 路基的稳定性         | 225 |
| 1.2 空洞对路基危害程度研究的意义 | 225 |
| 1.3 国内外的研究现状       | 226 |
| 1.4 空洞的类型及性质       | 226 |
| 第2章 研究的内容及有关技术问题   | 228 |

|      |                                     |     |
|------|-------------------------------------|-----|
| 2.1  | 研究的目的和内容                            | 228 |
| 2.2  | 技术路线                                | 228 |
| 2.3  | 技术关键                                | 228 |
| 2.4  | 技术要求                                | 229 |
| 第3章  | 预计方法                                | 232 |
| 3.1  | 概述                                  | 232 |
| 3.2  | Budryk-Knothe 理论及 Fourier 二维积分变换近似解 | 233 |
| 3.3  | 概率积方法                               | 236 |
| 3.4  | 柱式开采决策系统                            | 238 |
| 3.5  | 地表破坏的一般规律及图表                        | 242 |
| 3.6  | 影响地表沉陷的主要因素及有关参数的确定                 | 253 |
| 3.7  | 结论                                  | 268 |
| 第4章  | 有限单元法                               | 269 |
| 4.1  | 概述                                  | 269 |
| 4.2  | 材料本构模型及屈服准则                         | 270 |
| 4.3  | 单元类型及单元特征                           | 276 |
| 4.4  | 地基沉降及承载力                            | 281 |
| 4.5  | 工程问题的应用                             | 282 |
| 4.6  | 岩石参数取值研究                            | 285 |
| 4.7  | 结论                                  | 286 |
| 第5章  | 结构力学方法                              | 287 |
| 5.1  | 概述                                  | 287 |
| 5.2  | 计算参数及其赋值                            | 288 |
| 5.3  | 单一洞室的模型分析                           | 289 |
| 5.4  | 复合洞室的模型分析                           | 294 |
| 5.5  | 煤柱的强度分析                             | 296 |
| 5.6  | 结论                                  | 297 |
| 第6章  | 危害程度的评价及处治原则                        | 299 |
| 6.1  | 危害程度的评价                             | 299 |
| 6.2  | 处治的原则和标准                            | 299 |
| 第7章  | 工程实例                                | 301 |
| 7.1  | 工程概况                                | 301 |
| 7.2  | 采空区的现状                              | 302 |
| 7.3  | 采空区的岩石力学参数                          | 302 |
| 7.4  | 危害程度研究                              | 306 |
| 7.5  | 综合评价                                | 315 |
| 第8章  | 结论与建议                               | 316 |
| 参考文献 |                                     | 317 |

## 第5篇 高等级公路下伏空洞处治及质量检验技术研究

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 导言                        | 321 |
| 第1章 高等级公路下伏空洞处治方法的研究      | 322 |
| 1.1 空洞处治方法分类及其适用条件        | 322 |
| 1.2 选择空洞处理方法的原则           | 323 |
| 1.3 选择空洞处理方法的程序及应考虑的条件    | 323 |
| 1.4 煤矿采空区的处治方法            | 326 |
| 第2章 高等级公路下伏空洞处理的质量检验内容与方法 | 354 |
| 2.1 选择质量检验方法的原则及程序        | 354 |
| 2.2 选择质量检验方法应考虑的因素        | 354 |
| 2.3 质量检验                  | 355 |
| 2.4 质量检验方法                | 356 |
| 第3章 试验工程的空洞类型及其特征         | 359 |
| 3.1 按成因划分处治的空洞类型          | 359 |
| 3.2 按埋藏深度划分处治的空洞类型        | 360 |
| 3.3 按公路部位划分处治的空洞类型        | 361 |
| 3.4 试验工程的实施概况             | 362 |
| 第4章 空洞处治及质量检验方法的研究结论      | 366 |
| 参考文献                      | 368 |

## 第6篇 附 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 附录A 空洞对地基的危害程度研究——预计分析方法 | 371 |
| A.1 课题研究意义与概况            | 371 |
| A.2 预计评价理论与方法            | 372 |
| A.3 计算机预计模拟程序            | 378 |
| A.4 地表破坏的一般规律及图表         | 381 |
| A.5 柱式开采决策系统             | 383 |
| A.6 影响地表沉陷的主要因素及有关参数的确定  | 386 |
| A.7 工程实例                 | 390 |
| A.8 结论                   | 406 |
| 参考文献                     | 407 |
| 附录B 空洞对地基的危害程度研究——有限单元方法 | 408 |
| B.1 引言                   | 408 |
| B.2 有限单元法的基本原理           | 408 |
| B.3 单元类型及单元特征            | 409 |
| B.4 材料本构模型及屈服准则          | 413 |
| B.5 地基沉降及承载力             | 419 |
| B.6 FINITE 程序功能及特点       | 419 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| B.7 工程实例 .....                                          | 422 |
| B.8 结论 .....                                            | 446 |
| 参考文献 .....                                              | 446 |
| 附录 C 空洞对地基的危害程度研究——结构力学方法 .....                         | 447 |
| C.1 理论分析 .....                                          | 447 |
| C.2 洞室稳定性分析程序及使用说明 .....                                | 460 |
| C.3 工程实例——冶西采空区的计算结果及分析 .....                           | 465 |
| C.4 结论 .....                                            | 470 |
| 参考文献 .....                                              | 471 |
| 附录 D “高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究”<br>课题成果鉴定意见 ..... | 472 |
| 附录 E 课题组人员名单 .....                                      | 474 |
| 附 记 .....                                               | 475 |

## 录 附 录

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 附录 A 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| A.1 理论分析 .....                     | 476 |
| A.2 工程实例 .....                     | 476 |
| A.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 B 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| B.1 理论分析 .....                     | 476 |
| B.2 工程实例 .....                     | 476 |
| B.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 C 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| C.1 理论分析 .....                     | 476 |
| C.2 工程实例 .....                     | 476 |
| C.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 D 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| D.1 理论分析 .....                     | 476 |
| D.2 工程实例 .....                     | 476 |
| D.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 E 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| E.1 理论分析 .....                     | 476 |
| E.2 工程实例 .....                     | 476 |
| E.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 F 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| F.1 理论分析 .....                     | 476 |
| F.2 工程实例 .....                     | 476 |
| F.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 G 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| G.1 理论分析 .....                     | 476 |
| G.2 工程实例 .....                     | 476 |
| G.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 H 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| H.1 理论分析 .....                     | 476 |
| H.2 工程实例 .....                     | 476 |
| H.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 I 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| I.1 理论分析 .....                     | 476 |
| I.2 工程实例 .....                     | 476 |
| I.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 J 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| J.1 理论分析 .....                     | 476 |
| J.2 工程实例 .....                     | 476 |
| J.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 K 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| K.1 理论分析 .....                     | 476 |
| K.2 工程实例 .....                     | 476 |
| K.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 L 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| L.1 理论分析 .....                     | 476 |
| L.2 工程实例 .....                     | 476 |
| L.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 M 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| M.1 理论分析 .....                     | 476 |
| M.2 工程实例 .....                     | 476 |
| M.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 N 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| N.1 理论分析 .....                     | 476 |
| N.2 工程实例 .....                     | 476 |
| N.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 O 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| O.1 理论分析 .....                     | 476 |
| O.2 工程实例 .....                     | 476 |
| O.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 P 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| P.1 理论分析 .....                     | 476 |
| P.2 工程实例 .....                     | 476 |
| P.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 Q 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| Q.1 理论分析 .....                     | 476 |
| Q.2 工程实例 .....                     | 476 |
| Q.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 R 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| R.1 理论分析 .....                     | 476 |
| R.2 工程实例 .....                     | 476 |
| R.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 S 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| S.1 理论分析 .....                     | 476 |
| S.2 工程实例 .....                     | 476 |
| S.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 T 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| T.1 理论分析 .....                     | 476 |
| T.2 工程实例 .....                     | 476 |
| T.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 U 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| U.1 理论分析 .....                     | 476 |
| U.2 工程实例 .....                     | 476 |
| U.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 V 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| V.1 理论分析 .....                     | 476 |
| V.2 工程实例 .....                     | 476 |
| V.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 W 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| W.1 理论分析 .....                     | 476 |
| W.2 工程实例 .....                     | 476 |
| W.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 X 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| X.1 理论分析 .....                     | 476 |
| X.2 工程实例 .....                     | 476 |
| X.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 Y 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| Y.1 理论分析 .....                     | 476 |
| Y.2 工程实例 .....                     | 476 |
| Y.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |
| 附录 Z 公路路基下伏空洞的危害程度研究——工程地质方法 ..... | 476 |
| Z.1 理论分析 .....                     | 476 |
| Z.2 工程实例 .....                     | 476 |
| Z.3 结论 .....                       | 476 |
| 参考文献 .....                         | 476 |



课题负责人：杨金全 鄂俊泰 孙忠弟

主要参加人：孟繁荣 夏永旭 高选政 韩许恒 余定成

策上篇

新题总研告

## 导 言

### 0.1 课题的立项

“高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究”课题是山西省交通厅结合石(家庄)-太(原)公路太(原)-旧(关)段的《工程可行性研究报告》及《初步设计文件》中提出的建议,计划针对该地区的场地特点开展专项工程技术课题研究。1992年,国家计委及交通部在对石(家庄)-太(原)公路的《工程可行性研究报告》和《初步设计文件》审议过程中,对该研究计划作了肯定性的批复。于是,山西省交通厅决定成立“太-旧高速公路采空区勘察处治科研课题组”,开展该课题的研究工作及太旧高速公路西郊-旧关段的采空区处治工作。

1993年6月,课题组上报了“高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究”计划任务书。1993年7月,课题组又提交了“高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究”项目实施计划。1993年8月15日,山西省交通厅批准了科研组的计划任务书,并下发了晋交便字第57号文件——《关于高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术研究项目的批复》。至此,太旧高速公路采空区勘察处治科研课题组正式成立,随即全面展开这项课题的科学研究工作。

### 0.2 课题组的组织机构

课题组是由交通部第一公路勘察设计院通力勘察设计工程公司、山西省阳泉市交通局、太旧高速公路阳泉指挥部、山西省公路局第一公司、煤炭科学研究总院西安分院、西安矿业学院、西安公路交通大学、陕西省地震局等单位组成,并聘请中国矿业大学、山西矿业大学、西安公路交通大学、西安工程学院、交通部第一勘察设计院、煤炭科学研究总院西安分院、陕西建筑科学研究所、陕西省地震局等单位的多位专家为技术顾问。

### 0.3 课题分工

本课题共分五个子项。分别为:

- (1)公路路基下伏空洞的地质背景研究;
- (2)公路路基下伏空洞的勘察技术研究;
- (3)公路路基下伏空洞危害程度研究;
- (4)公路路基下伏空洞处治及质量检验技术研究;
- (5)综合研究报告。

#### 0.4 课题研究的进展简况及所完成的工作

从1993年7月开始,科研组组织大量的人力、物力及财力全面开展各子项的研究工作,至1995年10月,先后历时两年多。完成的工作量有:

(1)开展大范围的资料收集和信息查询工作。组织十余人先后奔赴中国矿业大学、煤炭科学研究总院开采研究所、煤炭科学研究总院西安分院、太原分院、唐山分院、山西矿业大学、西安公路交通大学、西安矿业学院、西安工程学院、西北大学地质系、阳泉矿务局、焦作矿务局、邢台矿务局、峰峰矿务局、龙口矿务局、淮南矿务局、靖远矿务局、乌鲁木齐矿务局、哈密矿务局、甘肃窑街矿务局、甘肃煤田地质研究所、交通部第一公路勘察设计院、山丹煤矿、陕西省科技情报研究所、北京国际情报资料咨询中心、中国科学院情报中心、北京中国科技信息研究所、北京图书馆、陕西省图书馆等单位取得大量的科研资料,为课题研究奠定了坚实的基础。

(2)完成了公路路基下伏空洞地质背景研究工作,并撰写了相应的书面专题报告。

(3)完成了公路路基下伏空洞的勘察技术研究工作。这项研究是结合太旧高速公路的西郊至旧关段及冶西联营煤矿采空区的勘察工作进行的,并编写出了相应的专题报告。

(4)完成了公路路基下伏空洞对路基危害程度的研究工作。开发研制了采空区地面变形预计方法、弹塑性理论有限单元法、结构力学法等三套微机计算软件。其中,采空区地面变形预计方法、弹塑性理论有限单元法的计算软件已于1995年3月通过了山西省交通厅组织的鉴定,被专家组分别评为达到国内领先水平 and 国内先进水平。并且撰写出科研报告和软件使用说明书等相应的书面报告。

(5)完成了公路路基下伏空洞处治及质量检验技术研究工作。这项研究是结合西郊至旧关段及冶西联营煤矿采空区的处置和检验工作进行的。并已写了专门报告。

通过结合山西太旧高速公路的建设过程中的各个实际问题进行的研究,不仅配合与保证了太旧高速公路采空区地段的公路工程的建设工作,而且这些研究成果(后面将分别阐述)对今后的高等级公路通过地下空洞区时的勘察、评价、处治、检验等工作提供了实践和理论分析方面的新鲜材料。有些较为成熟的研究成果可作为以后编制特殊地区公路建设方面的规程或规则的基础。

# 第1章 引 论

## 1.1 路基下伏空洞对路基场地稳定性的影响

公路路基下伏空洞是指在修路前,位于公路工程范围内地面以下存在的空洞,亦称地下空洞。这是一种不良地质现象。这些空洞往往削弱或破坏了其上覆岩土层的稳定性。在这类场地上建造工程必须首先对空洞的稳定性,亦即空洞围岩或空洞上覆岩层的稳定性进行全面的勘察与评价,以免建造工程之后,出现地基陷落,工程毁坏的情况。

公路交通属于国家的基础设施。随着国家经济建设的发展,公路交通网将越来越密,无论在岩溶发育地区还是在地下矿产开采业发达地区,修建公路都将遇到地下空洞区。开展地下空洞区的工程场地稳定性研究是十分必要的,对公路工程建设有重要现实意义。

由地下开采所形成的空洞区,我们称为采空区。为了研究方便,采空区还可分为老采空区、现采空区和未来采空区。

山西省太原至旧关段高速公路路线上遇到的采空区属于老采空区。在老采空区修公路要首先解决地下空洞上覆岩土层的稳定性问题。这要用到多方面的工程技术方法。

## 1.2 研究和治理地下空洞涉及到的工程技术学科

研究和治理地下空洞问题,涉及许多学科的知识和技术。研究地下空洞的成因和赋存条件等问题,首先要有地质理论与实践方面的修养。采空区的空洞特点与采矿的方式方法有直接关系,这需要研究人员具有采矿工程方面的知识。为了查清老采空区和溶洞的现状,单靠地质工作者的地面工作进行推断是不够的,还要采取工程地球物理勘探方法和工程地质勘探方法。为了取得岩土的工程特性参数提供设计依据,需要进行必要的室内或现场的实验或试验。为了对地下空洞上覆岩土层的稳定程度作出结论,必须采用地质分析与数学力学分析相结合的方法,这将涉及到数学力学计算。对安全度(稳定程度)不足的工程场地,必须进行工程加固处理,同时还要有保证处理质量的技术措施和检验手段,实质上这已经进入了工程施工及质量检验的范畴。所以,这是一个多学科综合性的研究课题。

由此可见,这个综合性课题研究涉及到地质、勘探、实验、数学力学、工程设计与施工,直到施工质量监督与检验等众多技术学科。这是一个多种学科协同攻关的大课题。

## 1.3 国内外有关地下空洞的勘察、治理工作的基本情况

在研究和治理地下空洞的工作中,技术性最强的部分是勘察技术方法和加固工程的处理方法。美国、俄罗斯、日本等国在军事、交通等工程项目中,对地下空洞的勘察,主要是采用地球物理勘探技术。

美国习惯用电法(电阻率法)探测煤矿采空区,认为效果较好。在电阻率法中,又认为自动电阻率系统法(高密度电法)最好。日本也常用这种方法在山区中进行勘探。

地震法也是国外探测地下空洞时常用的方法。美国堪萨斯州地质研究所对该地区做了大量的浅层地震法方面的工作,查明匹兹堡城下是煤矿采空区。用地震反射法探出的地下空洞的埋深、分布范围与钻探资料相一致。美国还用折射法在科罗拉多的一条公路上测到 8 个可疑的空洞地段,经钻探验证,确定出四个隐伏空洞。日本 VIC 公司利用瑞利波技术探测浅层范围空洞,所开发的物探设备“GR-810”除了勘察浅层范围的空洞,也可以给出岩土工程特性参数。国外的研究概况见表 1.1.1。

表 1.1.1 国外部分国家空洞探测研究现状

| 技<br>术<br>方<br>法<br><br>国<br>家<br>和<br>地<br>区 | 电 法    |      | 电磁法   |      |      | 地震波      |       |      | 声波    | 重力   | 射气              |
|-----------------------------------------------|--------|------|-------|------|------|----------|-------|------|-------|------|-----------------|
|                                               | 自动电阻率法 | 电阻测井 | 瞬变电磁法 | 地面雷达 | 跨孔雷达 | 高分辨率反射波法 | 弹性波层析 | 瑞利波法 | 声波谐振法 | 微重力法 | $\alpha$ 卡钋 218 |
| 美 国                                           | ☆      | ✓    | ✓     | ✓    | ✓    | ☆        | ✓     | ✓    | ✓     | ✓    | ✓               |
| 日 本                                           | ✓      | ✓    | ✓     | ✓    | ✓    | ✓        | ✓     | ☆    | ✓     | ✓    |                 |
| 俄 罗 斯                                         | ✓      | ✓    | ☆     | ✓    | ☆    | ✓        | ✓     |      | ✓     | ✓    | ✓               |
| 欧 洲                                           | ✓      | ✓    | ✓     | ☆    | ✓    | ✓        | ✓     |      | ✓     |      |                 |

图例:☆ 先进    ✓ 较好

国内对空洞探测是以钻探为主,物探配合工作。把物探作为钻探的先行手段、钻探的辅助手段和现场原位测试手段。

中国有色金属总公司黑龙江省地质勘探公司采用电法勘探中的联合剖面法进行采空塌陷区探测,取得良好效果。铁道部第三勘察设计院、河北地质学院、西安地质学院等单位应用自动电阻率法(高密度电法)在军都山隧道、港泉煤矿、西安地区开展了活断层、地裂缝方面的探测,证明该方法能有效地解决这些问题。山东煤田地质队勘探采空区是采用地震勘探先行,引导钻探布孔施工,配合地球物理测井等多种手段综合勘探,明显地取得了勘探精度高,节省钻探工作量,加快勘探进度的效果。1988 年,国家地震局地震研究所和兰州铁路局合作,采用了微重力勘探法查明了青藏铁路察尔汗盐湖区的地下溶洞。陕西省地震局在探测西安市区地下隐伏地裂缝的工作中也采用了微重力法,得到了较好的效果。中科院测地所在贵州探测溶洞时,也用微重力法。

近年来物探技术的测量精度和信息处理的速度都大为提高,在岩土工程和工程地质工作中,工程物探已经成为一项重要的有力的勘察、测试手段。只是由于地质问题的复杂性,使物探结果往往具有多解性,还只能作为工程勘探的配合手段。但是由有经验的人员的判读实测资料,物探的结果将可以发挥重要作用。在有适当的钻孔资料对比之后,物探结果也同样可作为设计依据。

地下空洞围岩(空洞周围的岩体)加固方面,美国宾夕法尼亚州西部城市的几座建筑物下的采空区,采用灌浆充填法及灌注柱(桩)支撑法,控制住了地面建筑物的下沉

(1988)。美国怀俄明州为控制大片的地下采空区的地表沉降,用灌浆法进行了处理。前苏联地质注浆专业公司用灌浆法封填了瓦赫鲁舍夫矿一个锅炉房下面的浅井和别利科夫矿井口大楼下部的空洞。波兰在第二次世界大战后,为了保护地面建筑物,对地下采空区的治理方法,主要是采用水砂充填法。二战后到1955年有81个矿井采用了水砂充填法。以后地面沉降观测证明,经过水砂充填处理,地面下沉量大为减小,可见充填物对上覆岩层的支承作用很大。

## 1.4 本课题的研究目的与计划

本课题是一项综合性的工程技术应用课题。按照不同学科和公路工程建设的先后顺序,课题组1993年8月15日上报的课题计划任务书确定的主要任务如下:

### 1.4.1 研究目标

- (1) 通过有关工程实例,从理论上阐明不同条件的空洞对公路工程的危害程度;
- (2) 从理论上提出适用于不同类型空洞的先进的勘察、处理方法及配套的技术理论体系,填补国内在这方面研究的空白;
- (3) 从实际应用上优选出技术上先进、经济上合理的勘察方法和处理技术;
- (4) 通过较长时间的观测,论证地下空洞处理技术的可靠性。

### 1.4.2 主要经济技术指标

- (1) 通过对地下空洞的研究,定出需要做加固处理和不需要做加固处理的技术界限;
- (2) 通过对多种探测技术的研究,使以后对地下空洞区勘察手段的选择,既能保证有效又能最大限度地降低勘察费用;
- (3) 通过对加固处理方法的研究,提出最经济合理的处理方法及质量检验措施。

### 1.4.3 预期达到的技术水平,经济、社会效益及推广应用的前景

- (1) 达到国内该领域领先水平;
- (2) 通过研究,形成一套有效的工作方法,对地下空洞区的公路工程场地稳定性,能较快地作出判断,为路线方案论证提供决策依据;在地下空洞勘察和处理过程中,所提出的一些工作方法和工程技术都是能够保证勘察精度、保证工程安全、保证工程质量、保证节约人力物力的优良技术和措施;
- (3) 研究成果对以后在地下空洞区的高等级公路建设中可以得到迅速推广,具有广泛应用的前景。

## 1.5 本课题研究的技术路线

通过详细的分析讨论,所拟定的本课题的研究技术路线如图1.1.1所示。