



中国教师发展基金会教师出版专项基金资助

深埋长隧洞 勘测技术及超前预报

刘康和 段 伟 王光辉 王志豪 编著

學苑出版社

中国教师发展基金会教师出版专项基金资助

深埋长隧洞勘测技术及超前预报

刘康和 段 伟 王光辉 王志豪 编著

學苑出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深埋长隧洞勘测技术及超前预报 / 刘康和等编著.

—北京: 学苑出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5077 - 4431 - 6

I. ①深… II. ①刘… III. ①隧道工程 - 勘测

IV. ①U452. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 285069 号

责任编辑: 郑泽英

封面设计: 陈四雄

出版发行: 学苑出版社

社 址: 北京市丰台区南方庄 2 号院 1 号楼

邮政编码: 100079

网 址: www. book001. com

电子邮箱: xueyuan@ public. bta. net. cn

销售电话: 010 - 67675512、67678944、67601101 (邮购)

经 销: 全国新华书店

印 刷 厂: 北京长阳汇文印刷厂

开本尺寸: 880mm × 1230mm 1/32

印 张: 9. 25

字 数: 240 千字

版 次: 2013 年 12 月北京第 1 版

印 次: 2013 年 12 月北京第 1 次印刷

定 价: 35. 00 元

内容提要

本书详细介绍了深埋长隧洞的进展、含义、复杂性分类、勘测特点与难点、勘测技术思路和隧洞工程建设中所遇到的主要工程地质问题、勘测经验以及所采用的技术方法、超前预测预报技术特点等。

全书结合深埋长隧洞存在的工程地质问题及其勘测的特点和难点、主要勘测经验等给出了前期勘测的技术思路。主要针对深埋长隧洞勘测中的工程地质测绘、遥感遥测技术、工程钻探技术、工程坑探技术、信息模拟技术、物理勘测技术、超前预测预报技术和方法进行了详细的总结、分析和探讨，并就其基本原理、外业工作方法及成果解译等作了详细深入的研究，并提出了目前隧洞施工过程中超前预测预报所存在的关键问题以及做好TBM施工隧洞超前预测预报的技术措施。

本书内容丰富，资料翔实，实用性强。可供从事水利水电、铁路、公路、矿山开采等工程领域的勘测设计人员使用，也可供大专院校相关专业师生参考。

前言

近 30 年来,深埋长隧洞工程在我国水利、水电、铁路、公路和矿山等建设中蓬勃发展,取得了举世瞩目的成就。已建成的深埋长隧洞(单洞)最大长度已达 85.31km,最大埋深已达 2500m。长度大于 10km、埋深大于 600m 的隧洞数量很多。我国在深埋长隧洞的勘测、设计和施工已取得了丰富的成果和经验,深埋长隧洞工程勘测作为工程勘测学科的一个重要分支,正在悄然兴起,越来越引起人们的关注。

从我国各类隧洞工程由浅(埋)到深(埋)、从短(洞)到长(洞)、钻爆法和 TBM 法的发展历程表明,隧洞地区的工程地质条件日趋复杂,需穿过许多地质构造单元和具有活动性的区域性的大断层带,岩性多变、性质复杂,隧洞涌水、岩爆、围岩大变形、外水压力、高地温、放射性危害与有害气体等不良工程地质问题越来越突出,成为工程的制约因素。由于勘测条件的恶劣,人们对深部或超大埋深岩体地应力状况、岩体工程性质、深部岩体构造与岩溶发育规律、地下水的分布与补给、径流、排泄规律、岩体的渗透性与隧洞外水压力等等,了解得很不够,甚至存在很多未知领域和难以查明的问题。在我国深埋长隧洞工程已进入世界最高难度水平的今天,作为一项重要基础工作的工程地质勘测任重而道远。从我国深埋长隧洞实践情况来看,并非一帆风顺,困难与挑战、成功与挫折、认识与探索并存。深埋长隧洞属于高风险性的工程。

地质勘测技术是深埋长隧洞工程的基础性工作,通过工程地

质测绘、遥感遥测、工程钻探、工程坑探、信息数值模拟、物理勘测等技术方法的综合应用，可对深埋长隧洞线路的工程地质条件进行分析和论证，以取得隧洞沿线的工程地质特征，为深埋长隧洞的工程设计和安全施工提供可靠的科学依据。

隧洞施工超前预测预报技术是随着隧洞工程的发展需要应运而生的，它是地质勘测技术在施工阶段的延续和补充。它的实施应用既可校验前期勘察设计结论，又能促进施工动态设计管理，并是安全施工的重要保证。

全书共分十章。第一章由刘康和教授级高工编写；第二章、第三章、第四章、第九章第六节～第八节由段伟高级工程师编写；第五章、第六章、第七章、第八章、第十章由王光辉高级工程师编写；第九章第一节～第五节由王志豪工程师编写。全书由中水北方勘测设计研究有限责任公司刘康和负责统稿。

编著者长期从事隧洞工程地质勘测技术的应用和研究工作，在总结和分析前人工作和研究成果的基础上编著本书，期望对从事本专业的技术人员有所裨益。

在本书编撰过程中，得到了全国高校教材学术著作出版审定委员会领导和专家的大力支持与帮助，同时书中参考和引用了前人大量的技术资料 and 成果，虽参考文献中已列出，但难免遗漏。中水北方勘测设计研究有限责任公司杨萍高级工程师为本书绘制了部分图件，在此一并表示衷心的感谢！

由于编著者水平有限，书中难免存在错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

作者

2013年9月于天津

目 录

第一章 概论	1
第一节 深埋长隧洞进展	1
第二节 深埋长隧洞含义	6
第三节 深埋长隧洞复杂性分类	8
第四节 深埋长隧洞勘测特点与难点	11
第五节 工程勘测技术思路	13
第二章 深埋长隧洞主要工程地质问题	16
第一节 大断层带围岩失稳及涌水问题	16
第二节 岩溶及突水突泥问题	17
第三节 高地应力条件下软质围岩变形	19
第四节 岩爆问题	20
第五节 隧洞高地温问题	20
第六节 有害气体问题	21
第七节 膨胀岩问题	22
第八节 放射性元素危害问题	22
第九节 隧洞高外水压力问题	25
第三章 深埋长隧洞主要勘测经验	30
第一节 各勘测设计阶段主要工作内容	30
第二节 区域地质构造与构造稳定性	31

第三节	地层岩性	32
第四节	地质构造	42
第五节	岩溶勘测	48
第六节	水文地质勘测	56
第七节	钻爆法隧洞与 TBM 隧洞勘测	57
第四章	工程地质测绘	59
第一节	概述	59
第二节	准备工作	59
第三节	野外工作方法	61
第四节	工程地质测绘内容	65
第五节	工程地质测绘资料整理	77
第五章	遥感遥测技术	80
第一节	概述	80
第二节	原理和特点	82
第三节	遥感影像工程地质解译	83
第四节	数码摄像地质编录技术	89
第五节	三维激光扫描技术	93
第六节	发展趋势	96
第六章	工程钻探	97
第一节	工程钻探的特点	97
第二节	工程钻探的目的与任务	98
第三节	钻孔观测与编录	100
第四节	钻探资料整理	102
第七章	工程坑探	104

第八章 信息模拟技术	106
第一节 概述	106
第二节 模拟研究现状与发展方向	106
第九章 物理勘测技术	111
第一节 概述	111
第二节 电磁测深法	116
第三节 高密度电阻率法	144
第四节 地震勘探	152
第五节 放射性勘探	193
第六节 综合测井	215
第七节 深埋长隧洞物理勘测原则	237
第八节 物理勘测技术小结	241
第十章 超前预测预报技术	244
第一节 综述	244
第二节 隧洞施工超前预报分类	248
第三节 超前预报方法及设备	252
第四节 超前探测中的问题	278
第五节 搞好 TBM 隧洞超前预报的措施	280
第六节 超前预测预报技术小结	282
参考文献	285

第一章 概论

第一节 深埋长隧洞进展

目前,世界各国已经在水利、水电、铁路、公路和矿山等领域建成 200 多条长度接近或超过 10km 的深埋长隧洞。受到 20 世纪末及 21 世纪初通车的长度分别达到 53.9km 和 50.5km 的日本 Sei - kan 隧道及英法海底隧道的鼓舞。一些更加庞大的特长隧道计划已开始论证,部分已开始施工,如日本福冈韩国釜山之间的日韩海底隧道 (250km)、瑞士 Gotthard 铁路隧道 (56.9km)、奥地利意大利之间的 Basis Brenner 铁路隧道 (55km) 及挪威 Laerdal 公路隧道 (24.5km) 等。20 世纪 80 年代以来,我国铁路系统已经建成衡广复线大瑶山 (14.3km)、朔黄线长梁山 (12.8km) 及西康线秦岭 (18.4km) 三条特长隧道;长度分别达到 12.7km 和 11.1km 的西安南京铁路东秦岭特长隧道和重庆怀化铁路圆梁山特长隧道也已建成通车。成渝高速公路中梁山 (3.1km)、川藏公路二郎山 (4.2km) 等许多大断面公路隧道已经相继贯通或投入运营;我国大陆第一条符合国际隧协标准的公路特长隧道西安安康高速公路秦岭终南山隧道 (18km) 也已成功建设完成。此外,在甘肃“引大入秦”、贵州天生桥水电站、四川太平驿水电站、四川福堂水电站、云南曲靖及昆明跨流域调水等大型工程中,已建成一批长度超过 10km 的水工隧洞。可以预见,在地形、地貌及地质背景复杂、水能及矿产资源丰富、陆路交通网密度远低于全国平均水平的西部地区,在铁路、公路、水电、跨流域调水及矿产资源等领域将会修建更多的长大隧道工

程。“数量多、长度大、大断面、大埋深”将是 21 世纪我国隧道工程发展的总趋势。

近 30 余年来,深埋长隧洞工程在我国水利、水电、铁路、公路和矿山等建设中蓬勃发展,水利水电工程中的深埋长隧洞技术难度大,但发展迅速,并取得了举世瞩目的成就。

新中国成立以来我国水工隧洞向深长发展建设历程大致可分为以下几个阶段:

第 1 阶段—钻爆法短洞阶段:在 20 世纪 50—70 年代,隧洞的长度多为几百米至 2—3km,埋深多在 200m 以内。施工方法普遍采用钻爆法,遇到的多为浅埋隧洞工程地质问题。该时段可称为钻爆法短洞阶段。

第 2 阶段—钻爆法“长洞短打”阶段:在 20 世纪 70 年代后期至 80 年代,由于施工采用“长洞短打”的钻爆法,水工隧洞的长度和埋深都有所增大。代表性的工程有:20 世纪 70 年代末的四川岷江渔子溪一期引水发电隧洞和 20 世纪 80 年代的天津市引滦入津输水隧洞。渔子溪引水隧洞全长 8429m,埋深 200—650m,隧洞围岩全部为中到细粒花岗闪长岩和闪长岩,无区域性大断层通过,曾发生轻微至中等岩爆,为此进行了岩爆工程地质研究。天津市引滦入津隧洞工程全长 12.39km,其中隧洞总长 9669m,埋深为 10—160m。在洞线上布置了 15 个施工支洞,采用“长洞短打”、“新奥法”施工技术,仅用 1.5 年全线贯通。隧洞遇到了宽大的断层及断层交会带、浅埋风化岩带、隧洞涌水塌方、隧洞出口边坡滑动以及隧洞排水造成的环境地质问题等。引滦入津隧洞对浅埋长隧洞工程起到重要的借鉴作用。

第 3 阶段—TBM 深埋长隧洞发展阶段:在 20 世纪 80 年代末至 21 世纪初,我国许多地区需长距离、跨流域调水解决水资源优化配置和充分利用地形落差发展大水头水力发电问题,促进了深埋长隧洞的飞速发展。为了解决深埋长隧洞的施工问题,在改革开放的大好形势下,开始引进全断面岩石掘进机(TBM)和

勘测设计、施工及管理先进技术。采用 TBM 或 TBM 与钻爆法混合施工,使隧洞长度由小于 10km 陡增至数十千米,隧洞埋深由数百米增至 1000m 左右,进入了深埋长隧洞发展的新时期。这个时期代表性的工程主要如下。

①天生桥二级(坝索)水力发电隧洞:该隧洞长 9.58km (3 条),TBM 开挖洞径 10.8m,最大埋深 810m。1983 年武警水电部队引进了 2 台罗宾斯开敞式掘进机(二手机),共掘进了 7.5km。受岩溶突水突泥、岩爆及使用 TBM 的经验不足等多方面的影响,掘进多次受阻,机械损坏严重,工期一再推迟。反映了当时 TBM 隧洞的勘测设计、施工及管理的综合水平还很低。在施工过程中,针对岩爆、岩溶和工程处理进行了研究,取得了一些经验。

②引大入秦输水工程:该工程隧洞总长 75km,其中 38 号隧洞(长 4.95km)和 30 号隧洞(长 11.65km),采用罗宾斯公司生产的 1811—256 型护盾式 TBM 施工,隧洞围岩主要为中等硬度的砂岩。TBM 创造了平均月进尺 1100m 令人震惊的好成绩,使我国深埋长隧洞工程的综合技术水平有了明显的提高。

③万家寨引黄入晋输水工程:是继引大入秦之后开工的大型水利工程项目。一期工程线路总长 317.45km,其中输水隧洞总长约 191km,在 20 多条隧洞中有 6 条长度超过 10km,最长的南干线 7 号隧洞为 42.5km,隧洞埋深大部分在 100—400m。采用 TBM 与钻爆混合施工方法,其中 5 台双护盾式和 1 台单护盾式 TBM 承担了共计约 125km 的施工任务,TBM 施工创造了平均月进尺 748—998m 的好成绩。隧洞工程地质条件复杂多样,遇到了岩溶、软岩土、膨胀性岩土、黄土、大断层带、围岩大变形、涌水、高外水压力、有害气体及有害水质等不良工程地质问题。引黄入晋工程地质勘察与研究,特别是 TBM 隧洞工程地质研究方面取得了许多创新性经验,同时为我国深埋长隧洞的勘测设计、施工及管理积累了许多宝贵的经验。

④辽宁大伙房输水隧洞：该工程是继万家寨引黄入晋工程后又一大型跨流域调水的深埋长隧洞工程。主洞长 85.31km，设计洞径 8.0m，最大埋深约 600m。隧洞穿过的地层岩性有混合岩、混合花岗岩、正长岩、火山熔岩、火山碎屑岩及大理岩等。隧洞前段长 24.58km，因地质条件差，采用“长洞短打”的钻爆法施工。后 60.73km 隧洞地质条件相对较好，无区域性大断层，地下水较少，故采用 3 台开敞式 TBM 施工，每台施工段长度在 20km 左右。该隧洞工程进展顺利，已于 2009 年竣工。可以说引大入秦、万家寨引黄入晋和大伙房引水工程的成功，标志着我国水利水电深埋长隧洞工程取得了突破性进展，并已发展到一个新的历史阶段。

第 4 阶段—世界高难度的 TBM 深埋长隧洞发展阶段：进入 21 世纪以来，我国相继有大量调水和水力发电的深埋长隧洞工程开始兴建或进入工程勘测设计阶段。隧洞长度达数十千米至百余千米，埋深在 1000m 以上者已屡见不鲜，最深约 2500m。由于这些工程多分布在我国西部地区，地形地质条件复杂，需穿过许多复杂地质单元或构造带，断层多且规模大，岩性复杂而多变；隧洞突涌水、岩爆、围岩大变形、高外水压力、高地温、放射性危害与有害气体等不良工程地质问题突出。而人们对深埋（或超埋深）岩体地应力状况、岩体工程性质、岩体渗透性、地下水分布、补给径流与排泄等规律了解得很不够，甚至存在着很多未知领域，这些都是工程地质亟待研究解决的。从工程实践情况来看，并非一帆风顺，困难与挑战、成功与挫折、认识与探索并存。可以说 21 世纪以来我国深埋长隧洞工程已进入世界最高难度的水平。

我国正在勘测设计的深埋长隧洞很多。例如南水北调西线工程，一期输水线路总长 260.3km，其中隧洞总长 244.1km；二期输水线路总长 304km，其中隧洞总长 287.8km，单洞最长 73km，最大埋深 1150m。隧洞位于高原山区，地面高程大于 3500m，气

候条件恶劣,严重缺氧。隧洞存在区域性大断层(具现代活动性)、隧洞突涌水、岩爆、围岩变形、高地温等工程地质问题。

新疆天山、昆仑山区的深埋长隧洞,地质构造背景十分复杂,分别处于天山和帕米尔复杂构造带中,断裂规模巨大、岩性复杂多变,地应力量值高,预测存在大断层突涌水、围岩大变形、强岩爆、高外水压力、高地温、高放射性等重大工程地质问题,已达到世界高难度水平。例如新疆喀什叶尔羌河的齐热哈塔尔水电站引水发电隧洞,全长 15.66km,最大埋深 1720m,埋深大于 500m 的洞长约占 67%。位于新构造活跃、地质构造条件复杂的昆仑山区,地应力高,最大水平主应力达 43MPa 以上。施工中已发生轻-中等岩爆,在埋深大的洞段还有发生强岩爆的可能;洞内岩体温度最高已达 80℃;水气温度已超过 100℃。恶劣的工作环境造成工作人员晕厥、爆破哑炮,使工程的混凝土浇筑施工遇到严重的困难。

从我国水利水电工程隧洞由浅到深、从短到长、施工方法由钻爆法向 TBM 法的发展历程表明:

(1) TBM 施工显示了巨大的优越性,具有快速、安全、环保性好,解决不良地质条件的能力也逐步得到提高,使深埋长隧洞工程获得长足的发展,使过去难以实施的跨流域引、调水工程,如今得以实现。我国的深埋长隧洞工程已达到世界最高难度的水平。

(2) 由于深埋长隧洞穿过许多不同的地貌、地质构造单元、水文地质单元,隧洞工程地质条件日趋复杂多样,使工程地质勘察、工程设计、施工都遇到许多新问题和难点。岩溶发育洞段突水突泥,大断裂围岩塌方、涌水,软岩、蚀变岩、膨胀岩等特殊性质围岩大变形,高地应力围岩岩爆,高地温,放射性及有害气体、有害地下水等,给深埋长隧洞施工带来很大的困难,常造成 TBM 下沉、管片破损、卡机、埋机、受困等等, TBM 施工的风险性仍然较大, TBM 对地质条件的适用性与对策研究需要进一

步深化。

(3) 深埋长隧洞工程地质勘测, 虽然取得了很大的成绩, 但因受勘测的条件、手段、工作量、综合分析水平等诸多因素的限制, 使勘测成果多为定性水平, 甚至与实际发生较大的偏差。地质工作者对隧洞 TBM 工程地质、深埋长隧洞的工程地质条件还缺乏经验, TBM 隧洞超前预测预报, 因受多方面条件的制约, 实施困难, 效果并不理想; 以上问题均需要不断地总结、改进、提高。

(4) 我国一些省、地区, 初次实施 TBM 隧洞工程, 出现一些困难和问题是正常的, 在工程实施过程中无论是成功的经验还是挫折与教训都是宝贵的, 只有不断地总结、传承、创新, 深埋长隧洞工程才能继续发展。

(5) 由于隧洞工程地质条件与工程地质问题日趋复杂, 工程难度和风险性日益增大, 深埋长隧洞工程地质勘测日益显露出它特有的内涵, 对此在许多方面人们还认识不足或知之甚少。

第二节 深埋长隧洞含义

所谓深埋长隧洞就是指埋深大、单洞长的隧洞, 那么埋深到底多大, 单洞长多少, 算是深埋长隧洞呢? 经过多年隧洞勘测技术工作的经验积累与实践总结, 经研究, 作者认为: 深埋长隧洞的含义应包括工程地质条件 (即具有一般埋深隧洞所不具有的复杂条件) 以及施工方法与难度两大方面的内容。为此分析探讨如下:

1. 从隧洞长度方面来讲, 钻爆法施工隧洞, 通常在 3km 左右长度内布置 1 条施工支洞, 以有利于通风出渣等。超过此长度隧洞施工相对困难 (如通风、出渣等), 效率低, 也不经济。TBM 隧洞需在 10km 左右布置 1 条施工支洞, 以解决掘进机大修, 供电、通风及改善掘进效率等问题。同时, 一般小于 10km

长的隧洞工程,使用一台进口的 TBM 已不够经济合理。从隧洞长度与地质条件的关系来讲,3km 长的隧洞相对比长度大于 10km 的隧洞工程地质条件要单一。因此笔者认为所谓的长隧洞,用 TBM 法施工的宜以 10km 为界限标准,钻爆法施工的宜以 3km 为界限标准。

2. 从隧洞埋藏深度方面来讲,随着埋深不断增大,工程地质条件与施工条件将会发生一些明显的变化,主要有:

①岩体深风化带、深卸荷带、透水性和富水性较强的地下水流带、地应力的松弛区等,大多在埋深 300m 范围内。在此深度内工程的勘测条件相对较好,超过该深度后,施工斜洞和竖井往往长度较大,钻爆法施工相对不够经济合理。因此《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99)以埋深 300m 作为深埋隧洞的界限标准。

②埋深 300—3000m,这是地下工程已经达到或接近的深度。工程实践显示,随着埋深的不断增大,地应力总体呈逐渐增高的趋势,地温增温梯度也逐渐增大,深层地下水网络系统与浅层地下水网络系统有着明显的不同,深埋隧洞特有的工程地质问题越来越突出。当隧洞埋深 $< 600\text{m}$ 时,多在勘测能力的范围内,适于采用 TBM 施工。因此,常把 600m 作为深埋隧洞的标准。当隧洞埋深 $> 600\text{m}$ 时,高地应力工程地质问题逐渐趋于复杂,总体上工程的勘测难度愈来愈大。

③埋深 $\geq 3000\text{m}$,这是地下工程尚未到达的深度。根据地球物理勘测和极少量深钻孔勘察资料推测,地球内部构造由外向里可分为地壳、地幔、地核三个圈层。地壳由坚硬的岩石组成,平均厚度约 33km。地壳又分为地壳表层、地壳上层和地壳下层三个部分。地壳表层一般厚度为 5km 左右,主要是沉积盖层;地壳上层一般位于 5—20km 的深度范围,主要由花岗岩类岩石组成;地壳下层一般位于 20—35km 的深度范围,主要由辉长岩类岩石组成。这些层面和界面通常是起伏凹凸不平的,上下的物质

成分和物理性质存在较大差异,都可以视为地质构造脆弱带,地震的敏感区和温床。

④根据地球内部构造,地下工程多分布在地壳的上表层,但是越向深部,地应力、地温、岩体状态等将会更为复杂,其工程地质条件也更加恶劣,甚至到一定深度后地下工程的可行性就值得怀疑。 $\geq 3000\text{m}$ 埋深,是目前地下工程所未达到、地质情况了解得极少。

3.《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)规定埋深大于 600m 的隧洞为深埋隧洞,是基于目前常规的地质钻探和孔内测试可以达到的深度,超过这一深度勘测相对逐渐困难和成本较高,并造成深部的地质条件与问题多为推测。

4.深埋长隧洞在《水工隧洞设计规范》(SL279—2002)中没有赋予明确的含义。而《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287—99)则认为,长度大于 2km 的隧洞为长大隧洞,埋深大于 300m 的地下洞室为深埋洞室,这显然是根据钻爆法施工的困难程度与能力而确定的。对于采用TBM施工,长度已达数十公里,埋深达 2000 多米的深埋长隧洞工程来讲,上述定义所针对工程的规模、范围、难度等已经显得不够全面。为此,《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008)已将长隧洞定义为钻爆法施工长度大于 3km 、而TBM法施工长度大于 10km 的隧洞;将深埋隧洞定义为埋深大于 600m 的隧洞。

5.基于上述情况,笔者经综合分析后认为:TBM施工隧洞的埋深 $\geq 600\text{m}$ 、单洞长度 $\geq 10\text{km}$ 为深埋长隧洞较为合适;钻爆法施工隧洞的埋深 $\geq 300\text{m}$ 、单洞长度 $\geq 3\text{km}$ 较为合理。

第三节 深埋长隧洞复杂性分类

一、深埋长隧洞工程地质条件复杂性分级

深埋长隧洞工程地质条件复杂性分级,就是在勘测设计研究