

SHULI SHUIDIAN GONGCHENG SHENMAI CHANG SUIDONG  
GONGCHENG DIZHI YANJIU

# 水利水电工程深埋长隧洞 工程地质研究

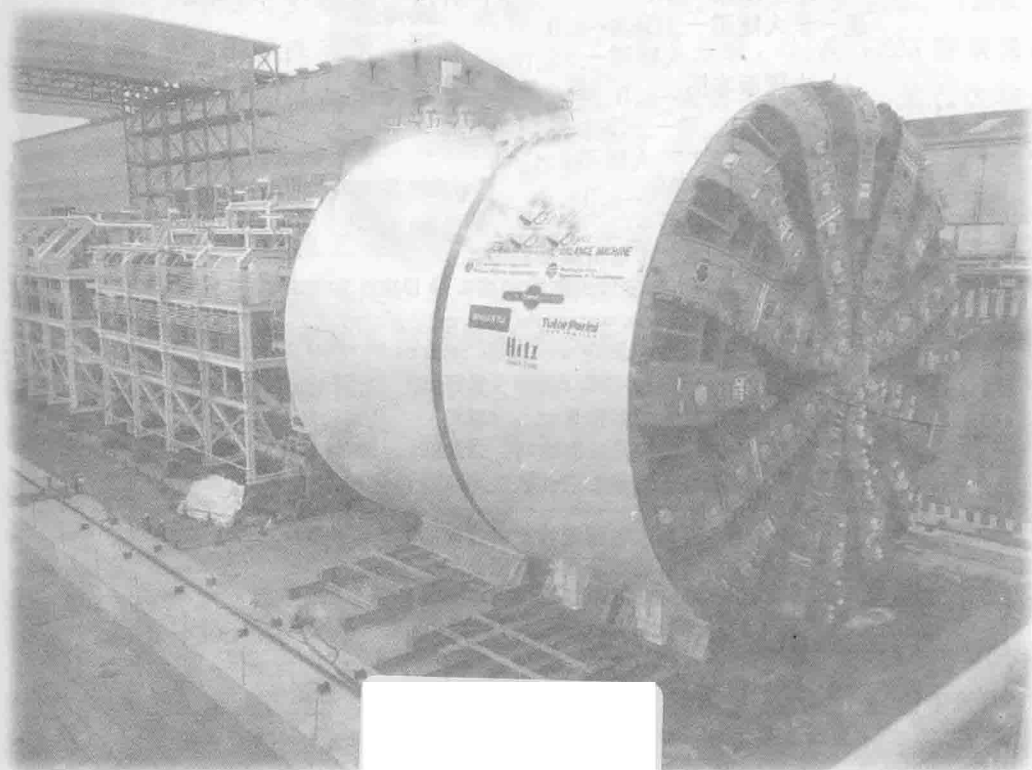
宋嶽 高玉生 贾国臣 滕杰 刘康和 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 水利水电工程深埋长隧洞 工程地质研究

宋嶽 高玉生 贾国臣 滕杰 刘康和 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

我国水利水电深埋长隧洞工程无论从长度、埋深以及地质条件的复杂性均已达到世界高难度的水平。本书通过总结深埋长隧洞工程地质勘察工作,对隧洞的涌水突泥、围岩大变形、大塌方、岩爆、超高地温、环境地质问题等进行了论述,对隧洞外水压力折减系数、深埋长隧洞水文地质条件垂直分带、TBM对地质条件的适用性、特殊不良地质洞段、隧洞高地温分级以及TBM隧洞围岩地质分类与快速鉴定方法等进行了探讨。

本书内容丰富,实用性强,可供勘察设计、施工管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程深埋长隧洞工程地质研究 / 宋嶽等编  
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014. 4  
ISBN 978-7-5170-1875-9

I. ①水… II. ①宋… III. ①水利水电工程—深埋隧  
道—长大隧道—工程地质—研究 IV. ①TV554

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第067817号

|      |                                                                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 水利水电工程深埋长隧洞工程地质研究                                                                                                             |
| 作 者  | 宋嶽 高玉生 贾国臣 滕杰 刘康和 编著                                                                                                          |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                  |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                               |
| 印 刷  | 北京瑞斯通印务发展有限公司                                                                                                                 |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字                                                                                                  |
| 版 次  | 2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷                                                                                                       |
| 印 数  | 0001—1000册                                                                                                                    |
| 定 价  | 48.00元                                                                                                                        |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 序

我国水利水电深埋长隧洞建设已取得举世瞩目的成就，工程地质勘察是确保深埋长隧洞工程建设顺利进行的一项重要关键性工作。现在的深埋长隧洞工程地质条件愈来愈复杂多样、勘察难度和工程难度日益增大，需要不断采用新的勘察技术，创建新的工作方法和运用多种学科技术，才能联合解决工作中出现的各种问题。可喜的是，《深埋长隧洞工程地质研究》一书的作者们勤奋工作，积极进取，不断总结经验，经过多年的努力终于完成了对深埋长隧洞地质工作的一次全面成功总结。

该书的作者在中水北方勘测设计研究有限责任公司（原水利部天津勘测设计研究院）的引滦入津、万家寨引黄入晋、齐热哈塔尔等工程的实践中，进行了卓有成效的工作。在深埋长隧洞工程地质勘察、黄土隧洞、上第三系隧洞、膨胀岩隧洞、灰岩隧洞、TBM工程地质等方面，取得了许多宝贵的经验。该书提出的隧洞外水压力折减系数、深埋长隧洞水文地质条件垂直分带、TBM对地质条件的适用性和特殊不良地质洞段、隧洞高地温分级，以及TBM隧洞围岩地质分类与快速鉴定方法等，都是在工程实践中遇到的实际问题。他们这种从工程中来回到工程中去的研究方法，推动了深埋长隧洞工程地质勘察的发展和进步，开拓了解决问题的思路，是很有理论意义和工程实用价值的。

我国水利水电深埋长隧洞工程建设，无论从长度、埋深以及地质条件的复杂性均已达到世界高难度的水平。隧洞的涌水突泥、围岩大变形、大塌方、岩爆、超高地温、环境地质问题等时有发生，TBM卡机的风险性仍然很大。深埋长隧洞工程建设的困难与挑战、成功与挫折、认识与探索并存，这必将推动深埋长隧洞工程地质研究的迅速发展。工程设计、施工、科研和工程地质相互配合，共同推进深埋长隧洞工程技术的发展将蔚然成风。

中国工程勘察设计大师

王宏斌

2013年10月

于天津

# 前言

近 30 年来,我国水利水电深埋长隧洞工程技术发展迅速,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技术等方面已取得了丰富的成果和经验,深埋长隧洞工程地质作为工程地质学的一个分支,正在悄然兴起,越来越引起人们的关注。

从我国水利水电工程隧洞由浅(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大断层带,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,有的已成为工程建设的制约因素。由于勘察条件的限制,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,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察任重而道远。从我国深埋长隧洞的建设实践来看,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。

本书是根据笔者多年的工程实践、工作成果、论文及对其他相关工程的审查、评估、咨询成果编写而成的,是对深埋长隧洞工程地质的初步总结,并提出了一些新的认识方法与研究思路。

由于作者能力和水平的局限,仅能对深埋长隧洞工程建设中的部分问题进行研究探讨,不成熟、偏颇和错误在所难免,诚望读者和同行专家批评指正。

作者

2013 年 10 月

于天津

# 目录

序

前言

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1 综述 .....                 | 1  |
| 1.1 深埋长隧洞的定义 .....         | 1  |
| 1.2 深埋长隧洞的发展概况 .....       | 2  |
| 1.3 深埋长隧洞工程地质特点 .....      | 5  |
| 2 深埋长隧洞工程地质勘察主要经验 .....    | 7  |
| 2.1 各勘察设计阶段的主要工作内容 .....   | 7  |
| 2.2 区域地质构造与构造稳定性 .....     | 8  |
| 2.3 地层岩性 .....             | 8  |
| 2.3.1 沉积岩 .....            | 8  |
| 2.3.2 变质岩 .....            | 10 |
| 2.3.3 侵入岩体 .....           | 11 |
| 2.3.4 第三系 .....            | 12 |
| 2.3.5 第四系 .....            | 12 |
| 2.3.6 隧洞工程特殊性岩土 .....      | 14 |
| 2.4 地质构造 .....             | 15 |
| 2.4.1 褶皱 .....             | 15 |
| 2.4.2 断裂 .....             | 15 |
| 2.5 岩溶勘察 .....             | 21 |
| 2.5.1 万家寨引黄入晋工程 .....      | 21 |
| 2.5.2 辽宁大伙房输水隧洞 .....      | 22 |
| 2.5.3 云南牛栏江—滇池输水工程 .....   | 23 |
| 2.6 水文地质勘察 .....           | 25 |
| 2.7 钻爆法隧洞与 TBM 隧洞勘察 .....  | 26 |
| 3 深埋隧洞主要工程地质条件研究 .....     | 27 |
| 3.1 深部原始地应力特征与预测方法 .....   | 27 |
| 3.1.1 研究目的 .....           | 27 |
| 3.1.2 水利水电工程地应力勘察的现状 ..... | 27 |
| 3.1.3 深部地应力的推测方法 .....     | 28 |
| 3.1.4 深部地应力推测方法的评价 .....   | 30 |



|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 3.1.5 小结 .....                           | 32 |
| 3.2 水文地质条件垂直分带 .....                     | 32 |
| 3.2.1 分带的工程意义 .....                      | 32 |
| 3.2.2 垂直分带的类型 .....                      | 32 |
| 3.3 隧洞外水压力折减系数地质研究 .....                 | 34 |
| 3.3.1 隧洞外水压力与外水压力折减系数概述 .....            | 34 |
| 3.3.2 岩体渗透性、透水率及隧洞涌水量与隧洞地下水活动状态的关系 ..... | 35 |
| 3.3.3 根据岩体渗透性确定外水压力折减系数 .....            | 36 |
| 3.3.4 地下水活动状态与外水压力折减系数的相关关系 .....        | 38 |
| 3.3.5 深埋长隧洞外水压力推测实例 .....                | 39 |
| 3.3.6 小结 .....                           | 40 |
| 3.4 深部岩体工程地质性质研究 .....                   | 41 |
| 3.4.1 隧洞围岩状态变化过程 .....                   | 41 |
| 3.4.2 深部岩体地质参数运用 .....                   | 41 |
| 4 深埋长隧洞主要工程地质问题 .....                    | 43 |
| 4.1 岩爆 .....                             | 43 |
| 4.1.1 水利水电工程隧洞岩爆及勘察研究概况 .....            | 43 |
| 4.1.2 岩爆发生机理 .....                       | 47 |
| 4.1.3 岩爆分级 .....                         | 50 |
| 4.1.4 岩爆类型 .....                         | 50 |
| 4.1.5 岩爆发生的条件 .....                      | 51 |
| 4.1.6 岩爆的预测方法 .....                      | 53 |
| 4.1.7 岩爆的主要防治措施 .....                    | 54 |
| 4.2 隧洞突水、涌水问题 .....                      | 55 |
| 4.2.1 引言 .....                           | 55 |
| 4.2.2 隧洞地下水出溢状态与涌水量分级 .....              | 56 |
| 4.3 隧洞长期排水对环境地质影响 .....                  | 76 |
| 4.3.1 隧洞长期排水对环境的影响分析 .....               | 76 |
| 4.3.2 隧洞长期排水对环境影响的分类与分级 .....            | 78 |
| 4.3.3 隧洞长期排水对环境影响的工程地质勘察要点 .....         | 79 |
| 4.4 隧洞软弱围岩变形问题 .....                     | 79 |
| 4.4.1 隧洞软弱围岩的变形 .....                    | 79 |
| 4.4.2 软岩及软弱围岩变形的含义 .....                 | 80 |
| 4.4.3 软岩的类型 .....                        | 80 |
| 4.4.4 围岩大变形的原因分析 .....                   | 81 |
| 4.4.5 围岩变形的等级划分 .....                    | 82 |
| 4.4.6 前期勘察期间隧洞围岩变形的地质判别方法 .....          | 84 |
| 4.4.7 围岩变形的工程对策措施 .....                  | 85 |

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 4.5   | 高地温问题                | 85  |
| 4.5.1 | 高地温的标准及危害            | 85  |
| 4.5.2 | 影响隧洞地温的地质因素          | 86  |
| 4.5.3 | 地温的分级                | 88  |
| 4.5.4 | 深埋长隧洞的高地温勘察          | 88  |
| 4.5.5 | 高地温的工程应对措施           | 89  |
| 4.6   | 放射性危害问题              | 89  |
| 4.7   | 有害气体                 | 89  |
| 4.7.1 | 天然的有害气体              | 90  |
| 4.7.2 | 施工爆破和施工机械的废气         | 90  |
| 5     | 掘进机(TBM)隧洞工程地质       | 92  |
| 5.1   | TBM 简介               | 92  |
| 5.1.1 | TBM 机型               | 92  |
| 5.1.2 | TBM 的优缺点及发展趋势        | 93  |
| 5.2   | TBM 隧洞工程地质发展简况       | 94  |
| 5.2.1 | TBM 隧洞工程地质初步实践       | 94  |
| 5.2.2 | TBM 隧洞工程地质发展现状       | 97  |
| 5.3   | 掘进机对地质条件的适用性分析       | 103 |
| 5.3.1 | 掘进机对地质条件的适用性研究       | 103 |
| 5.3.2 | 掘进机对地质条件适用性研究的主要内容   | 104 |
| 5.3.3 | TBM 对地质条件适用性的工程地质分析  | 104 |
| 5.3.4 | TBM 掘进困难程度的分级        | 108 |
| 6     | 特殊不良地质洞段的探讨          | 109 |
| 6.1   | 问题的提出                | 109 |
| 6.2   | 特殊不良地质洞段工程实例         | 109 |
| 6.2.1 | 强岩溶发育隧洞              | 109 |
| 6.2.2 | 特殊性岩土隧洞              | 110 |
| 6.2.3 | 高地应力的强岩爆隧洞段和围岩大变形隧洞段 | 110 |
| 6.2.4 | 区域活动性大断裂隧洞段          | 111 |
| 6.2.5 | 特殊高地温隧洞段             | 111 |
| 6.3   | 小结                   | 111 |
| 7     | 超前地质预报               | 112 |
| 7.1   | 综述                   | 112 |
| 7.1.1 | 超前预报目的               | 112 |
| 7.1.2 | 超前预报内容               | 112 |
| 7.1.3 | 对超前预报的要求             | 112 |
| 7.1.4 | 超前预报的基本程序            | 113 |



|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 7.1.5 | 隧洞施工超前预报的分类            | 113 |
| 7.2   | 超前预报方法及设备              | 114 |
| 7.2.1 | 直接预报法                  | 115 |
| 7.2.2 | 间接预报法——物探法             | 115 |
| 7.2.3 | 地质物探综合分析法              | 127 |
| 7.3   | 超前探测中的问题               | 128 |
| 7.3.1 | 技术方面的原因                | 128 |
| 7.3.2 | 管理方面的原因                | 128 |
| 7.4   | 搞好 TBM 隧洞地质预报的措施       | 129 |
| 8     | 工程实践                   | 130 |
| 8.1   | 大坂 TBM 隧洞              | 130 |
| 8.1.1 | 工程地质概况                 | 130 |
| 8.1.2 | 隧洞主要工程地质问题及对工程的影响      | 131 |
| 8.1.3 | TBM 隧洞围岩地质类别的鉴定问题      | 134 |
| 8.1.4 | 小结                     | 135 |
| 8.2   | 齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩爆与高地温简介   | 135 |
| 8.2.1 | 隧洞工程地质概况               | 135 |
| 8.2.2 | 岩爆现象与特征                | 136 |
| 8.2.3 | 引水隧洞高地温现象及特征           | 140 |
| 8.2.4 | 施工阶段岩爆及高地温隧洞工程地质补充勘察研究 | 143 |
|       | 参考文献                   | 144 |

# 1 综 述

## 1.1 深埋长隧洞的定义

深埋长隧洞在《水工隧洞设计规范》(SL 279—2002)中没有赋予明确的定义。《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—99)认为,长度大于 2km 的隧洞为长隧洞,埋藏深度大于 300m 的地下洞室为深埋洞室。这是根据钻爆法施工的能力而确定的。这对于现在采用掘进机(TBM)施工,长度已达数十公里、埋深已达 2000 多米的深埋长隧洞工程来讲,已经不合适了。

笔者认为,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)及施工难度与方法两大方面的内容。为此本文提出如下探讨性意见。

(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,使用一台进口的掘进机(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 法施工的宜以大于等于 10km 为界限标准,钻爆法施工的宜以小于等于 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径流带、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察条件相对较好,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》(GB 50287—99)以埋深不小于 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。工程实践表明,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。当隧洞埋深小于 600m 时,多在勘察能力的范围内,适于采用 TBM 施工。因此,常把 600m 作为深埋隧洞的标准。当隧洞埋深大于 600m 时,高地应力工程地质问题逐渐趋于复杂,总体上工程的勘察难度越来越大。

3)埋深大于等于 3000m,这是地下工程尚未到达的深度。根据地球物理勘探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。

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、岩体状态等越复杂,其工程地质条件也越恶劣,甚至到一定深度后地下工程的可行性就值得怀疑。大于等于3000m埋深,是目前地下工程所未达到、地质情况也了解得极少。

4)《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—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,超过这一深度勘察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的结果。

基于上述情况笔者认为:TBM隧洞的单洞长度大于等于10km、埋深大于等于600m为深埋长隧洞较为合适。钻爆法施工的单洞长度大于等于3km、埋深大于等于300m较为合理。

## 1.2 深埋长隧洞的发展概况

1949年新中国建立以来,我国水利水电工程隧洞由浅短向深长发展的历程,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,隧洞的长度多小于1000m,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。这个阶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年代初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~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—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10~110m。在隧洞线上布置了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、隧洞出口滑坡体以及隧洞长期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建设高水头水力发电站,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800m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有:

(1)广西壮族自治区天生桥二级(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。因遇到岩溶突水突泥、岩爆,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,取得了宝贵的经验。

(2) 甘肃省引大入秦输水工程: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型双护盾式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,标志着我国深埋长隧洞工程的综合技术水平有了明显的提高。

(3) 山西省万家寨引黄入晋输水工程:是继引大入秦之后兴建的大型水利工程项目。一期工程线路总长317.45km,其中隧洞总长约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之间。采用TBM与钻爆混合法施工,其中5台双护盾式和1台单护盾式TBM承担了约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,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) 辽宁省大伙房输水隧洞:该工程是继万家寨引黄入晋工程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60.72km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,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。单洞长度达数十千米,埋深在1000m以上者已屡见不鲜,最大约2500m。由于这些工程多分布在我国中西部地区,地形地质条件更加复杂,需穿过许多复杂地质单元或构造带,断层多、规模大、且活动性强,地层岩性复杂;隧洞突涌水、岩爆、围岩大变形、高外水压力、高地温、放射性元素与有害气体等不良工程地质问题更加突出。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;同时TBM对地质条件的适用性人们还缺乏经验,TBM受困事故屡有发生。这些都是工程地质勘察研究的重要课题。

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。

21世纪以来我国正在兴建的(或竣工)代表性工程有:

(1) 云南掌鸠河引水工程:输水线路总长97.258km,其中隧洞16座,总长约85.6km,采用双护盾式TBM施工的国标1标洞段,长21.5km,TBM开挖洞径3.67m,

设计直径 3.00m, 隧洞埋深 100~368m。由于宽大的断层带塌方涌水、软岩大变形、岩溶突水突泥等, 使 TBM 掘进多次受困, 效率很低, 并被迫将 TBM 施工洞段改为钻爆法施工。再次深刻认识到不良地质条件对 TBM 的危害, TBM 工程地质越来越引起重视。

(2) 青海引大济湟大坂山输水隧洞: 长 24.3km, 隧洞内径 5.5m, 采用一台双护盾式 TBM 施工, 控制段长 21.18km。工程位于中纬度高寒少氧的高原地区, 区域地质构造复杂, 最大埋深 1100m。预测存在岩爆、区域性大断层、隧洞涌水、高外水压力等工程地质问题。该工程于 2006 年开始施工, TBM 在区域性大断层带、蚀变岩带掘进时遇到围岩大变形, TBM 掘进受阻。

(3) 四川雅砻江锦屏二级发电隧洞: 单洞长约 16.6km (4 条), 最大埋深约 2500m, 采用钻爆法与开敞式 TBM 法施工。隧洞横穿锦屏山, 大理岩高压涌水及强岩爆问题十分突出, 强岩爆破坏了一期支护, 使 TBM 和人员受到伤害。

(4) 甘肃引洮 (一期) 工程: 隧洞总长约 93.52km, 最大单洞长 18.24km 的 7 号隧洞和 17.24km 长的 9 号隧洞采用 TBM 施工, 隧洞最大埋深为 1100m。隧洞位于秦岭东西构造带中, 地层岩性复杂, 需穿过秦岭北缘大断裂等多条宽大断层。该工程于 2007 年开始施工。7 号隧洞 TBM 施工中, 上第三系疏松砂岩含水层围岩的变形与塌方, 使 TBM 多次严重受困, TBM 被迫由 7 号隧洞的出口工作面撤出, 移至该隧洞进口施工。

我国正在勘测设计的深埋长隧洞也很多。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。预测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。又如陕西省引汉济渭隧洞, 长 77km, 洞径 6.0m, 最大埋深近 2000m。采用 TBM 与钻爆法联合施工。

新疆天山、昆仑山区的深埋长隧洞。地质构造背景十分复杂, 分别处于北天山和帕米尔复杂构造带中, 断裂规模巨大、岩性复杂, 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 的洞段长度约占总长度的 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, 洞内岩体温度最高已达 80℃; 水气温度已达 172℃。恶劣的工作环境造成工作人员晕厥、爆破哑炮, 并影响混凝土浇筑的质量等。

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与新难点。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, 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察,虽然取得了很大的成绩,但因受勘察的条件、手段、工作量、综合分析水平等的限制,使勘察成果多为定性水平,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、长大深埋隧洞的工程地质条件还缺乏经验, TBM 隧洞超前地质预测预报,因受多方面条件的限制,实施困难,效果并不理想。以上问题均需要不断地总结、改进和提高。

(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。

### 1.3 深埋长隧洞工程地质特点

(1) 深埋长隧洞线路长,线路比较方案多,勘察研究的范围大。隧洞线路跨越的地质构造单元、地形地貌单元、水文地质单元多。穿过不同时代的地层岩性种类和断裂多、工程地质条件复杂多样,可以说不同的深埋长隧洞工程的地质条件差异是明显的。

(2) 深埋长隧洞区多位于山区、高山区、高原区;人烟稀少、地形复杂、交通不便、气候恶劣、地质勘探外业工作时间短,工作条件困难。同时由于隧洞埋深大,现有的仪器、设备的勘察精度受到影响。因此、大埋深洞段的地质条件推测成分较多。

(3) 深埋长隧洞是引调水工程的重要组成部分,在我国的东、中、西部均有分布,各地的工程地质条件差异较大,存在的工程地质问题也不尽相同。我国东、中、西部的分布与三个巨型地形地貌单元的分布基本吻合。

我国东部和中部地区划分的地质界线大致为:大兴安岭—太行山—河南、湖北、湖南西部山地—桂林一线;中部和西部地区的地质划分界线大致为:贺兰山—四川成都西—昆明一线,两者均与李四光先生提出的南北构造带分布位置相一致。

东部地区的长隧洞埋深多为 100~400m,最大埋深小于 1000m,高地应力的地区较少,发生岩爆的几率低;浅部地质条件对隧洞影响大;断层、隧洞涌水、特殊岩土、岩溶等问题较为突出。

中部地区地形地貌条件较为复杂,深埋长隧洞线路经过高山和高原地区埋深可达 1000 多米,岩爆、围岩变形、岩溶、软岩土、膨胀性岩土、煤矿及采空区等问题多有显现,特别是灰岩岩溶及涌水水泥问题对隧洞工程影响大。

西部地区受印度板块向欧亚板块俯冲和青藏高原隆起的影响,山高谷深,构造复杂,断层规模大,地震活动强烈。中生代~古生代的构造带,构造活动和地震活动强烈,横断山脉、天山、昆仑山、祁连山和阿尔泰山褶皱带都是构造活动和地震活动相对强烈的地带,并有区域活动性断层发育。近年来新疆、西藏、青海、云南、川西多次发生 6~8 级地震,说明西部地区构造活动和地震活动强烈。西部地区火成岩和变质岩类岩石分布相对较多,隧洞中坚硬岩的比例较大,软岩、含盐岩、放射性岩、有色金属矿藏等特殊岩亦有



分布;受多期强烈构造活动的影响,褶皱、断裂及叠瓦构造发育;灰岩岩溶形态复杂,发育深度大。深部岩体的富水性相对较弱,但承压水头高。隧洞埋深大,高地应力造成的岩爆、围岩变形更加突出;大断层带围岩稳定、涌水、高外水压力问题对工程影响很大;地温异常带、放射性岩体等的分布也十分复杂。总之,西部地区深埋隧洞的工程地质条件和问题更加复杂多样,工程的勘察难度、施工难度和风险性增大,许多深埋长隧洞工程已属于世界高难度的水平。

(4) 深埋长隧洞多采用 TBM 施工,地质勘察除了满足钻爆法施工隧洞的要求外,还需满足 TBM 隧洞的特殊要求。其主要有:

1) 查明隧洞工程地质条件和主要工程地质问题为合理确定 TBM 隧洞线路、TBM 施工洞段和钻爆法洞段提供重要的依据,同时也是规避 TBM 地质风险、确定处理方案等不可或缺的资料。

2) 为 TBM 隧洞设计、TBM 选型和 TBM 制造提供合理的地质参数与资料。因为地质资料是 TBM 隧洞的开挖断面、衬砌厚度、管片厚度等设计的重要依据,TBM 制造和辅助设备的配置同样需要详尽的地质资料。

凡是深埋长隧洞工程施工顺利的必然是地质勘察工作充分、线路选择合理、TBM 选型合适、设备配套齐全、对不良地质问题的处理方案得当,生产管理有序。否则工程就会陷入被动,甚至遭受巨大的损失。

TBM 隧洞勘察要求高于一般钻爆法隧洞已成为共识,深埋长隧洞地质勘察任重而道远。

## 2 深埋长隧洞工程地质勘察主要经验

### 2.1 各勘察设计阶段的主要工作内容

引调水工程的勘察设计阶段有：规划、可行性研究及项目建议书、初步设计、标书设计、技施设计等 5 个阶段，各阶段的勘察均有各自的工作内容和特点。

(1) 规划阶段：在了解区域地质的基础上，阐明不同线路方案的基本地质条件和存在的主要工程地质问题，为线路比选提供地质依据。

(2) 可行性研究及项目建议书阶段：主要是进一步深化研究区域地质与地震的基础上，进行线路方案比选工程地质勘察，对重要的工程地质问题进行勘察研究。

(3) 初步设计阶段：主要是对可行性研究阶段推荐的基本线路方案进行勘察，对隧洞重要工程地质问题进行深入的勘察研究。

(4) 标书设计阶段：主要工作是为标书设计提供地质资料。

(5) 技施设计阶段的工作包括：施工地质、对初步设计阶段遗留的和施工中发现的地质问题进行补充勘察以及隧洞施工超前预测预报等。

在复杂的大型工程实践中，由于勘察工作受政治经济、规划设计方案、地质条件、勘察工期、勘察条件及经费等诸多因素的影响，有些深埋长隧洞工程在上述各阶段的工作中，有时会发生反复和交叉。如山西省万家寨引黄入晋工程勘察设计 20 多年中，在晋西北地区进行了多种输水线路的比选勘察工作，由规划到初设勘察阶段曾经发生多次反复。万家寨引黄入晋工程南干线 7 号隧洞在施工单位中标后还进行隧洞线路的优化调整勘察，北干线和南干线在初设阶段随着勘察工作的进展，发现许多制约工程的地质问题，隧洞线路还发生了多次大的变化。这些工作均可视为可行性研究阶段线路比选工作的补充。应该说，凡是对工程有利的就要及时进行勘察设计优化，对重大工程地质问题及时进行专题研究，尽量不要放到施工中去解决。

辽宁大伙房输水工程、万家寨引黄入晋工程等，各个勘察阶段的地质工作比较充分，较好地完成各勘察阶段的工作。因此，工程施工揭露的与勘察的地质条件基本一致，没有遗漏大的工程地质问题，工程进展比较顺利。但是，有的工程勘察工期过短，各个勘察阶段的地质工作不充分，而后再也没有进行必要的补充勘察设计研究，施工中出现了预想不到的情况，遇到困难和挫折是必然的。

在勘察设计的过程中，工程地质专业与其他专业的相互了解、相互配合、相互支持是十分重要的。工程地质人员要及时了解工程设计意图，在勘察过程中，发现重大工程地质问题时应及时相互沟通，尽量使各专业人员能够全面理解和合理地使用地质资料。在业主的领导下，通过地质、设计、施工、科研等专业之间的有力配合与协作，才能较好地完成深埋长隧洞工程任务。

## 2.2 区域地质构造与构造稳定性

区域地质构造与构造稳定性条件决定深埋长隧洞工程地质条件的优劣,区域地质构造与构造稳定性条件复杂地区的隧洞工程地质问题多,而且复杂。因此,区域地质和区域构造稳定性的勘察越来越引起重视。

对位于区域构造较为简单且稳定性较好(基本稳定~稳定)的地区的工程(如地台区、基本地震烈度小于或等于Ⅵ度地区等),可以通过区域地质资料收集、地质调查、工程地质测绘、遥感地质解译等,了解与评价区域构造和稳定性。

对位于区域构造复杂且稳定性较差~差的工程(如隧洞线路穿过优地槽、冒地槽、基本地震烈度Ⅶ~Ⅷ度地区等),应委托有关部门进行区域构造稳定性和地震危险性分析等工作,对工程区主要建筑物进行稳定性评价,并提出地震动参数等。由于我国中西部地区区域构造复杂、工程的勘察面积大(大者可达数万平方公里)、有的地区区域地质资料较少,需要进行地质遥感、工程地质测绘复核、水文地质普查、地质灾害调查等。

对具新构造活动迹象的区域性大断裂应进行扩大范围的勘察(如遥感、地质测绘、山地工作、绝对年龄测试等),了解其活动特征、活动时期及强度等。这些断裂往往控制区域地形、地貌和地层的分布,是自然地质灾害的多发区,致使深埋长隧洞的工程地质条件复杂。因此,隧洞线路尽可能避开区域性的大断裂,特别是要避开具有新构造活动迹象的深大断裂。有时因受多种条件的限制,工程区活动断层的判别取证困难,对断裂活动性强度及可能发生的地震震级难以预测准确,需要随勘察阶段深入逐步加深认识。

## 2.3 地层岩性

### 2.3.1 沉积岩

隧洞工程区的地层应划分到系、统、组、段,按工程地质性质的不同进行岩组划分(亦即划分到段)。对重要的岩组均应进行勘探试验工作,提供物理力学参数建议值。对于具有特殊性质的岩层分布需勘察清楚,并对其工程地质性质进行测试、试验研究。

万家寨引黄入晋工程的主要经验如下:

(1) 对隧洞围岩稳定影响大的膨胀岩、蚀变岩、泥岩、煤层等,在1:2000~1:1000比例尺的地质勘察时,精度已详细到层,并在图件中標示其分布情况,同时进行了膨胀岩和蚀变岩的试验研究、煤层分布及塌陷区勘察研究等。

(2) 万家寨引黄入晋工程南干线7号隧洞的二叠系上石合子组( $P_2s$ )~侏罗系大同组( $J_1d$ )的泥质岩具有不同程度的膨胀性。进行了室内和现场原位试验,主要内容有:岩石黏土矿物含量(蒙脱石等含量)、化学活性(岩块干燥饱和吸水率)、成岩胶结强度(胶结系数)、膨胀性力学试验及膨胀势的判定等。并且进行了工程地质评价与建议。这对隧洞设计、施工,特别是TBM顺利施工具有重要意义。

(3) 万家寨引黄入晋工程膨胀岩专题研究的主要成果如下。

1) 影响泥质岩膨胀性的主要因素。