

国家自然科学基金项目 (51578447)
渭南市科技计划项目 (2015KYJ-3-17)

西部

复杂地质富水隧道 施工关键技术 及工程应用研究

宋战平 崔玉明 梁建军 张学刚 著



陕西新华出版传媒集团



陕西科学技术出版社
Shaanxi Science and Technology Press

国家自然科学基金项目 (51578447)
渭南市科技计划项目 (2015KYJ-3-17)

西部复杂地质富水隧道施工 关键技术及工程应用研究

Research on the key tunnel construction
technology and engineering application
under the western complex rich water
geological environment

宋战平 崔玉明 梁建军 张学刚 著

陕西新华出版传媒集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

西部复杂地质富水隧道施工关键技术及工程应用研究 / 宋战平, 崔玉明, 梁建军, 张学刚著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5369 - 6960 - 5

I. ①西… II. ①宋… ②崔… ③梁… ④张… III. ①富水性 - 复杂地层 - 道施工 - 工程技术 - 研究 IV. ①U455.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 074217 号

西部复杂地质富水隧道施工关键技术及工程应用研究

出版者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236
[http: //www. snstp. com](http://www.snstp.com)

发行者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社
电话(029) 87212206 87260001

印刷 陕西天地印刷有限公司

规格 880mm × 1230mm 开本 32

印张 3.5

字数 88 千字

版次 2017 年 5 月第 1 版
2017 年 5 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978 - 7 - 5369 - 6960 - 5

定价 15.00 元

版权所有 翻印必究

内 容 摘 要

针对我国西部富水复杂地质条件下的隧道工程建设中存在的地质预测、预报问题,西部敏感、脆弱环境下的地下水处置问题,以及复杂富水隧道的快速施工问题等进行研究和工程实践。根据我国西部山区的特点,提出了“地表地貌控水成灾”的工程地质灾害观点;建立了西部富水隧道建设中的地质超前预测、预报的工作程序;提出并实施了“隧道洞口浅埋段采用径向注浆法封堵地下裂隙水,配合围岩加固和衬砌组成综合堵水系统”的综合水治理技术;对构造性地下水采用了“帷幕注浆加固围岩,降渗承压,初期支护径向补充注浆隔断水路,其后施做全环防水层补充隔水,二次衬砌混凝土防水确保效果”的地下水处治技术;提出并实施的“两台阶五步短封闭距离的大断面隧道施工技术”,解决了大断面软弱围岩采用分块开挖存在的施工效率低,掌子面全环封闭时间、距离长,隧道围岩流变变形大的问题;提出并实施的“下侧导坑排水增稳短台阶”的施工技术,实现了西部富水复杂地质条件下的隧道大断面安全、快速施工。

本书可作为水利、土建、岩土、地质等专业的科研和工程技术人员以及相关专业教师、研究者参考用书。

Abstract

Aiming at the existing geological prediction and forecast issue of tunnel engineering construction under the water-rich complex geological condition in our western area, the groundwater disposal issue under the western sensitive and fragile environment, and the rapid tunnel construction issue under the complex water-rich condition, research and engineering practice have been conducted and the main results and research conclusions obtained will be shown as follows:

1. According to the characteristics of our western mountainous area, an engineering geological disaster viewpoint of “control of water disaster based on geomorphological changes” has been proposed.

2. An advance geological prediction and forecast working procedure for tunnel construction in western water-rich area has been established.

3. “A comprehensive water treatment technology combining both a radial grouting method used in shallow-buried tunnel section to plug underground fissure water and an integrated water-plugging system formed by surrounding-rock reinforcement and lining” has been proposed and implemented.

4. As regards the constructive groundwater, a groundwater treatment technology has been adopted including “a curtain grouting method

to reinforce surrounding rock , reduce seepage and sustain pressure , a radial supplementary grouting method to partition waterway in the initial support stage , a subsequent full-ring waterproof layer to replenish isolation water , and finally two linings of concrete waterproof to ensure the desired effect ”.

5. “A tunnel construction technology employed in large faults consisting of two stages , five steps and a short closure distance ” has been proposed and implemented , thereby solving the problems of the low construction efficiency , the long full-ring closure time and distance of tunnel face , and the great rheological deformation of tunnel surrounding rock resulting from block excavation employed in fragile surrounding rock of large faults.

6. A construction technology of “lower side heading , drainage , stability-augmentation within a short distance ” has been proposed and implemented , thereby achieving a safe and rapid tunnel construction under the water-rich complex geological condition in the West.

本书的研究工作是第一作者在中铁十三局集团有限公司和中国铁建大桥工程局集团有限公司博士后流动站工作期间,同合作者们从事隧道和地下工程科研和实践的总结。

感谢中国铁建大桥工程局集团有限公司领导、集团公司人力资源部和科技部对作者工作所给予的热情帮助和大力支持!感谢中国铁建大桥工程局集团第四工程有限公司同仁们在工作中给予作者的热情帮助和大力支持!感谢中国路桥工程有限责任公司、中国路桥工程有限责任公司塔吉克斯坦办事处和中国路桥工程有限责任公司吉尔吉斯斯坦办事处对作者在塔国和吉国工作期间的帮助和支持,塔国和吉国隧道项目的工程实践为本书的完成奠定了良好的基础。

感谢合作者中交隧道工程局有限公司崔玉明高级工程师、梁建军高级工程师和陕西铁路职业技术学院张学刚副教授的辛勤付出。感谢参与工程的参建单位的支持,感谢作者课题合作者程建铝、曲守财、韩日美、池春生、崔玉明、曲珀、谷金富、胡广周、门金锁、刘立春、张生学、穆秀明、栾桂涛、胡钊光等的支持、关照;感谢合作者们的现场实践和智慧贡献。

感谢所有关心、支持、帮助作者的老师、专家、领导、朋友和亲人!

宋战平

| | | |
|-------|-----------------------------|------|
| 1 | 复杂地质条件长大隧道施工技术研究概述 | (1) |
| 1.1 | 前言 | (1) |
| 1.2 | 国内外长大隧道建设现状 | (3) |
| 1.3 | 隧道施工中不良地质条件的探测技术研究现状 | (5) |
| 1.4 | 长大隧道防排水施工技术研究现状 | (8) |
| 1.4.1 | 隧道防排水施工理念的发展 | (8) |
| 1.4.2 | 限制排放的主要技术措施 | (9) |
| 1.4.3 | 隧道防排水施工理念发展趋势 | (10) |
| 1.5 | 不良地质条件下的隧道施工技术研究现状 | (11) |
| 1.5.1 | 山岭隧道矿山法施工方法 | (11) |
| 1.5.2 | 长大隧道开挖方式的选择 | (12) |
| 1.6 | 本研究的主要工作 | (16) |
| 2 | 隧道综合立体式超前地质预报技术及应用 | (18) |
| 2.1 | 前言 | (18) |
| 2.2 | 隧道超前地质预报技术的选择 | (19) |
| 2.2.1 | 目前常用的地质探测技术及存在的问题 | (20) |
| 2.2.2 | 各种超前地质预报方法的主要特点和优缺点对比 | (25) |
| 2.2.3 | 穿越复杂地质隧道地质预报技术的选择原 | |

| | | |
|-------|---------------------------------|-------|
| | 则 | (28) |
| 2.3 | 复杂地质隧道施工综合超前地质预报技术 | (28) |
| 2.3.1 | 基于地形地貌控水成灾思想的隧道不良地质调查和踏勘 | (30) |
| 2.3.2 | 施工中的综合立体式地质预报及基于预报信息的围岩分级 | (31) |
| 2.3.3 | 基于地质预报和多元信息分析的施工动态设计 | (32) |
| 2.3.4 | 隧道工后的检测、验证和资料的整理与完善 | (32) |
| 2.4 | 基于超前地质预报信息的隧道围岩分级技术 | (33) |
| 2.5 | 讨论及结论 | (35) |
| 3 | 穿越含水层隧道施工综合处置技术及应用 | (38) |
| 3.1 | 前言 | (38) |
| 3.2 | 穿越含水层隧道施工综合治水技术 | (39) |
| 3.2.1 | 穿越含水层隧道施工综合治水技术的处置原则 | (39) |
| 3.2.2 | 隧道穿越环境敏感地带隧道堵水限排施工技术 | (40) |
| 3.2.3 | 穿越高压富水平导先行通过加快进度技术 | (41) |
| 3.2.4 | 隧道洞口浅埋卸荷段堵排结合技术 | (42) |
| 3.2.5 | 隧道洞身深埋段一般基岩裂隙水的防、排水技术 | (42) |
| 3.3 | 超高渗透压力及超大流量条件下堵水施工技术 | (44) |
| 3.3.1 | 地下水揭露后的帷幕注浆封堵思路 | (44) |
| 3.3.2 | 地下水揭露后的封堵施工技术 | (45) |

| | | |
|-------|------------------------------------|------|
| 3.3.3 | 揭露高压水的平导绕行思想 | (49) |
| 3.4 | 高寒富水隧道永临结合的防冻排水技术 | (49) |
| 3.4.1 | 永临结合的防排水技术的原则 | (49) |
| 3.4.2 | 永临结合的防排水技术实质 | (50) |
| 3.4.3 | 永临结合的防排水技术要点 | (50) |
| 3.5 | 兰渝铁路化马隧道进口穿越承压含水地层施工实例 | (54) |
| 3.5.1 | 兰渝铁路化马隧道工程概况 | (54) |
| 3.5.2 | 兰渝铁路化马隧道进口涌水情况分析 | (55) |
| 3.5.3 | 进口灰岩段涌水量监测 | (57) |
| 3.5.4 | 穿越高承压水地层隧道的处置措施 | (59) |
| 3.6 | 新建玉希莫勒盖隧道穿越含水层施工实例 | (62) |
| 3.6.1 | 乔尔玛至那拉提段公路玉希莫勒盖隧道概 况 | (62) |
| 3.6.2 | 穿越高压富水平导先行通过加快进度技术 | (63) |
| 3.7 | 讨论和结论 | (65) |
| 4 | 软弱富水地层隧道的大断面快速施工技术 | (67) |
| 4.1 | 前言 | (67) |
| 4.2 | 隧道“两台阶五步”短封闭距离的大断面隧道施工 技术 | (67) |
| 4.2.1 | 大断面软弱围岩隧道施工中存在问题及应 对措施 | (68) |
| 4.2.2 | 现场试验段施工存在问题及对施工方法的 改进 | (70) |
| 4.3 | 穿越富水段“下侧导坑排水增稳短台阶”施工技术 | (77) |

| | | |
|-------|--------------------------------|------|
| 4.3.1 | 隧道穿越富水段“下侧导坑排水增稳短台阶”技术原理 | (78) |
| 4.3.2 | 施工工艺流程及操作要点 | (80) |
| 4.3.3 | 工法的应用实例 | (84) |
| 4.4 | 讨论和结论 | (87) |
| 5 | 结论 | (88) |
| | 参考文献 | (90) |

1 复杂地质条件长大隧道施工技术研究概述

1.1 前言

隧道是一种修建在地下,两端有出入口,供车辆、行人、水流及管线等通行的工程建筑物^[1]。OECD(国际经济合作与发展组织)1970年隧道会议综合各种因素对隧道所下的定义^[2]:“以某种用途、在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面积大于 2m^2 的洞室”,均称之为隧道。

近代隧道兴起于17世纪的运河时代,从这一时期起,欧洲陆续修建了许多运河隧道。1820年前后,随着铁路运输的兴起,英国、法国等欧洲国家,以及之后的美国和明治维新后的日本先后开始修建铁路隧道。到目前为止(2000年的统计数据),世界各国铁路网上的隧道近10000座,总长超过12000 km(约占世界铁路总长的10%)。目前隧道主要分布在中国、日本、意大利、法国、美国、英国、挪威、瑞士、德国、奥地利和加拿大等国,其中,有超过总长1/3的隧道是20世纪50年代后在中国和日本的铁路线上建成的^[3]。我国第一条铁路隧道是1890年建成的台湾狮球岭隧道,1903年建成第一座长度超过3 km的兴安岭隧道。

截止 2003 年年底的统计资料表明,中国大陆上已建成的铁路隧道有 7400 余座,总长约 4200 km;公路隧道 1970 余座,总长度近 1000 km;已建成运营的城市地铁总长近 200 km。据初步统计,“十五”计划期间铁路、公路、水利、城市地铁轻轨等领域合计约有总长 3000 km 隧道工程需要修建^[4-5],每年新增铁路、公路隧道 350 km 以上,其中长度大于 10 km/座的隧道约占 10%。因此,中国是世界上隧道和地下工程最多、最复杂、今后发展最快的国家^[3-6]。

长期以来,我国根据隧道所在的位置的不同将隧道分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道三大类。对山岭隧道的建设,根据隧道长度将隧道区分为特长隧道、长隧道、中长隧道和短隧道,划分标准如下^[2]:

- (1) 全长 10000 m 以上为特长隧道;
- (2) 全长大于 3000 m 小于 10000 m 为长隧道;
- (3) 全长大于 500 m 小于 3000 m 为中长隧道;
- (3) 小于 500 m 为短隧道。

就隧道开挖断面面积而言,根据国际隧协划分建议标准^[2],开挖面积大于 100 m² 以上的为特大断面隧道;开挖面积 50 ~ 100 m² 为大断面隧道;10 ~ 50 m² 为中等断面隧道;3 ~ 10 m² 为小断面隧道;小于 3 m² 为极小断面隧道。

根据以上概念,我国当前在建的长度大于 3 km 的铁路、公路双线隧道均属于长大隧道。这类隧道不但长度大,而且一般埋深也较大,且常常要穿越断层、涌水、高温、瓦斯、溶洞、暗河、岩爆、泥石流等水文地质及工程地质条件十分复杂而多变的地层^[1]。

随着我国经济建设的迅猛发展,我国西部地区的交通、水电和能源等各类大型隧道和地下工程日渐增加。在未来 10 ~ 20 年,大型水利水电工程和清洁能源工程、交通网络和快速交通工程、资源开发工程等将是我国工程建设的重点。我国水电重点开发的西

部,特别是西南高山峡谷地区的金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江和红水河、澜沧江等流域的水电开发,将会建设更多的复杂富水隧洞(道)和地下工程;正在逐步推进的南水北调工程,其西线工程全长 260 km 的规划线路上,93.8% 为隧洞工程,其中,单洞最大长度达 73 km,最大埋深 1100 m^[4]。铁路方面,根据国务院 2004 年批复的《中长期铁路网规划》,到 2020 年,我国将修建 1200 km 的客运专线隧道,这些隧道中的半数以上分布在川、陕、云、贵等西部地区。公路方面,到 2020 年我国将基本建成“7981”高速公路网,西部地区公路建设将实现“内引外联、通江达海”的目标,西部复杂地质条件下的隧道建设将日益增多^[5]。伴随而来的在复杂地质情况中隧道修建技术问题也急需解决。为此,结合我国西部富水隧道的特点,就隧道建设中需要解决的技术问题进行研究和工程实践,意义重大。

1.2 国内外长大隧道建设现状

法国、英国、瑞士、奥地利、挪威、日本等发达国家,在 20 世纪已建成了一批特长隧道;21 世纪的前 10 年中,我国将有总长 155 km 以上的公路隧道要投入建设,其中 3 km 以上的特长隧道有数十座之多^[6-7];而在建和拟建的铁路特长隧道的数量就更多。

就当前国内外长大隧道施工技术而言,隧道施工方法,除钻爆法与掘进机法外,在一些特殊条件下,还可采用其他一些施工方法,常见隧道施工方法见图 1-1 所示^[2]。

从 1889 年在台湾用明挖法修建的第一座铁路隧道起,一百多年后的今天,中国已经掌握了所有的现代隧道修建方法及主要相关技术。1970 年上海隧道公司采用挤压式盾构法修建了长 1332 m、直径 10 m 的黄浦江第一条水下隧道^[4],实现了我国盾构

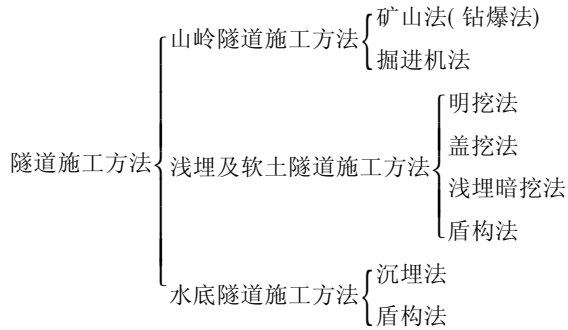


图 1-1 隧道施工方法

法施工“零的突破”；随后水力机械盾构和泥水平衡盾构的成功应用，将我国盾构施工技术提高到了国际先进水平。在水下隧道方面，在 1994 年前后自行设计并成功采用管段沉管法修建了穿越珠江的广州黄沙隧道和宁波雨江隧道。在掘进机(TBM)方面，继天生桥水工隧洞和引大入秦隧道以后，以 18.4 km 长秦岭隧道 I 号线成功建设为标志，我国隧道建设技术达到了国际先进水平。而广州地铁的修建更是采用了包括明挖法、盾构法、浅埋矿山法和沉放管段法等几乎所有的现代隧道修建的主要方法。

就世界范围内的隧道建设总体而言，当前量大面广的仍然是采用矿山法。中国大陆矿山法隧道施工在施工机械化程度、修建速度、长大隧道的修建能力(包括独头通风深度)等方面均同国际先进水平相差无几^[3]。中国大陆山岭隧道施工大致经历了 20 世纪 50 年代以前的以钢钎、铁锤和人力斗车为代表的“人力开挖时代”，六七十年代以手持风钻、风动装岩机和电瓶车、斗式矿车为代表的“小型机械化施工时代^[2,3,7]”，80 年代后以进口液压凿岩台车、履带或轮式装载机、轨行式扒装机和大型运输汽车、组合列车为代表的“大型机械化作业时代”，以及以西安至安康铁路秦岭隧道使用大型全断面隧道掘进机(TBM)为代表的“现代隧道修建技术时代^[8]”。

(1) 宝成铁路 2 km 长秦岭隧道施工中首次使用风动凿岩机和轨行式矿车,使得宝成铁路秦岭隧道的修建成为从“人力开挖”过渡到“机械开挖”的标志^[9]。

(2) 以成昆铁路 6 km 以上的关村坝、沙马拉达长大隧道施工中采用的轻型机具,分部开挖的“小型机械化”施工创造的“百米成洞”(平均每月单口成洞 100 m)为标志^[9],中国隧道建设进入了“机械化时代”。

(3) 80 年代以修建 14.295 km 长的双线隧道——大瑶山隧道为标志,中国隧道施工开始了“大型机械化作业时代”。大瑶山隧道是我国山岭隧道采用重型机具综合机械化施工的开端,大瑶山隧道的成功修建将中国长大隧道的修建技术提高到了一个新的阶段,缩短了同国际隧道先进施工水平的差距。在此以后修建的长大隧道基本上都是按照“大瑶山模式”进行施工,且在南昆铁路长 9388 m 的花岭隧道施工中创造了单口月成洞 502.2 m 的山岭隧道施工记录^[9]。

(4) 以 90 年代西康铁路秦岭 1 号线隧道采用大型全断面隧道掘进机(TBM)为代表,我国隧道建设步入了现代隧道修建技术阶段^[8-9]。秦岭隧道 1 号线采用 8.8 m 直径的全断面掘进机创造了单口平均月进度 312 m,最高月进度 528 m,单口最高日进度 40.5 m 的掘进记录。秦岭 1 号隧道的成功,改变了中国大陆长大山岭隧道施工中采用钻爆法为唯一手段的施工现状。

1.3 隧道施工中不良地质条件的探测技术研究现状

复杂地质条件下的隧道和地下工程的安全快速修建技术是当前交通建设急需解决的关键问题之一,是当前隧道建设研究的热点和重、难点。隧道和地下工程安全快速施工的关键是在施工前

对隧道施工前方一定范围内的地质体情况的准确预测和分析^[10],在此基础上制定切实可行的施工方案,因此,复杂条件下的隧道和地下工程的超前地质预测预报技术就显得尤为重要^[11]。复杂岩溶隧道施工中的超前地质预测预报就是要在隧道施工前采用物探、钻探等探测手段和方法,结合地质分析,对隧道前方一定距离和范围内的不良地质进行综合分析和预测,提前发现隧道施工前方岩土体的变化,得到可信的地质信息,并以此为基础进行隧道开挖方式、支护方案和施工组织的设计、安排,规避风险,确保隧道施工安全^[10-13]。

目前,国内外针对不同隧道的工程地质及水文地质条件,采用针对性的技术来完成隧道施工期的超前地质预报工作。依托渝怀铁路圆梁山富水隧道,齐传生和王洪勇结合各预报手段的特点及预报工序特征,阐述了富水隧道地质超前预报方法的筛选过程,提出了采用包括 TSP202、红外探测、地质雷达、HSP、常规地质分析和超前水平钻孔多种方法相互印证和补充的综合地质预报技术^[14];根据鹤鸽山隧道工程地质的特点,李天斌提出了以地质综合分析为核心的、将直接的探测与间接的探测相结合和将现场的量测与室内的分析计算相结合的隧道地质预测、预报的学术思路^[15];根据武隆隧道存在的断层破碎带岩溶暗河发育的特点,李苍松以地质分析法为基础,以声波反射法(HSP)为主要手段,并结合 TSP 系统以及超前钻探技术,进行了岩溶地质的综合超前地质预报,取得了较好的效果^[16]。闫红江针对牛岭界隧道的特点,采用以地质分析法为基础、以声波反射法(HSP)为手段,并以 TSP 系统为补充的综合地质超前预报技术^[17];针对当前隧道超前地质预报中主要存在的问题,在分析目前常用的几种预报方法优缺点和局限性的基础上,曲海锋、刘志刚和朱合华基于系统论的观点,以地面的地质调查和洞内的地质雷达、TSP 为手段,提出并建立了定性分析和定量