

富水富砂断层带隧道 施工技术

邓 勇 肖清华 吴应明 张旭辉 著

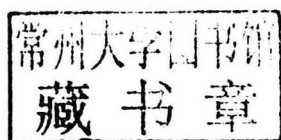


FUSHUI FUSHA DUANCENGDAI SUIDAO
SHIGONG JISHU

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

富水富砂断层带隧道施工技术

邓 勇 肖清华 吴应明 张旭辉 著



中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 提 要

随着我国经济社会的不断发展以及基础设施的快速修建,隧道已经成为我国高速铁路建设过程中一道靓丽的风景。同时,隧道修建过程中也遇到一系列难题,尤其是在进行隧道开挖时遇到空腔、涌水、极其破碎的断层带时往往会给隧道工程带来严重的安全隐患,工期难以保障,阻碍隧道工程的进一步发展。隧道工程技术的提升急需解决限制其发展实际遇到的工程难题,不断结合实际提出新工法、新理念,研发新的超前地质预报技术、改善机械性能、提高施工效率。

针对怀邵衡铁路岩鹰鞍隧道穿越高角度逆冲富水富砂 F₄ 破碎断层带的隧道施工难题,本课题组提出运用多种超前地质预报技术手段综合分析地质情况、“排水降压、迂回绕行”的断层带施工方法以及双层支护的新理念。

图书在版编目(CIP)数据

富水富砂断层带隧道施工技术 / 邓勇等著. —北京:
中国铁道出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-113-23907-7

I. ①富… II. ①邓… III. ①断裂带-隧道施工
IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 255195 号

书 名:富水富砂断层带隧道施工技术
作 者:邓 勇 肖清华 吴应明 张旭辉

策 划:江新锡
责任编辑:张卫晓 电话:010-51873193
编辑助理:梁 雪
封面设计:王镜夷
责任校对:苗 丹
责任印制:高春晓

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:中煤(北京)印务有限公司

版 次:2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14.5 字数:347 千

书 号:ISBN 978-7-113-23907-7

定 价:126.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

作者简介

邓勇，贵州黄平人，硕士研究生，教授级高工。工作二十多年来，先后参加了宝兰、洛湛、兰渝、青藏、云桂、贵广、渝利等铁路，锦屏水电站等水利水电工程及多条高速公路等国家重点工程建设，在钢结构、长大隧道施工、TBM



施工等方面取得突出成绩，曾主持数十项科研课题的研究，取得重大科研成果 10 多项，单独或作为主要参与者在国家中文核心期刊上发表论文 10 余篇。二十多年来，曾多次受到表彰奖励，先后被评为天津市“十大杰出青年岗位能手”、天津市“五一”劳动奖章、全国“五一”劳动奖章、“全国工程建设优秀项目经理”、“国家安全生产专家”等称号。

序

高速铁路是区域经济甚至是全国经济发展的大动脉,而高速铁路的发展与隧道工程建设密不可分,隧道建设技术水平对高铁建设水平以及今后的运营安全影响巨大。大力发展现代隧道技术是所有工程技术和管理人员的当务之急。

目前,中国是世界上隧道工程最多、发展最快但隧道水文地质及围岩结构形式最复杂的国家。高铁的发展带动隧道建设的同时,隧道工程建设的发展也为我国高铁技术奠定了坚实的基础。隧道施工常常是整条高铁线路建设过程的“硬骨头”,其地质条件复杂、施工环境恶劣等因素常困扰着铁路隧道施工人员,面对复杂的山体地质条件,如何进行地质调查、线路选择、施工设计、人员组织、应急预案等工作,都是摆在隧道工程师面前的一道道难题。

面对任何一条隧道开挖施工,我们都离不开对其进行地质调查以及相关的超前地质预报,但是怎样才能提高超前地质预报的精确度,当遇到涌水涌砂严重的隧道地质情况时,怎样才能在保证安全的同时保证工期,怎样对隧道进行支护的问题都亟待解决。

作为一名与隧道和地下工程打交道二十多年的建设者,也遇到过许多地质条件差、施工环境恶劣的隧道工程:在怀邵衡铁路建设中,又遇到了施工难度极大的鹰鞍隧道F₄高角度逆冲富水富砂断层破碎带,构造复杂且围岩稳定性极差,施工中可能发生突水突砂等灾害性事故。通过参与岩鹰鞍隧道的建设与管理,对岩鹰鞍隧道修建中遇到的问题有几点思考:

一、如何提高隧道超前地质预报精确度

在隧道工程中常用到超前地质预报技术有地质雷达超前预报技术、红外探水技术、TSP探测技术、隧道地震波超前预报技术等,在以往的隧道工程中通常只是采取一种或者是两种超前地质预报技术来对隧道工程地质进行描述,但是这并不能满足隧道施工过程中所遇到的极其复杂的地质条件,往往造成事先预测的地质条件与施工中实际遇到的地质条件大相径庭,对隧道施工安全以及保障工期都带来了极大的挑战。在岩鹰鞍隧道施工中,同时采取地质雷达超前预报技术、红外探水技术、TSP探测技术、隧道地震波超前预报技术对岩鹰鞍隧道进行了综合的超前地质预报,清楚明确的预报处隧道右侧空腔的具体位置、大小等详细信息,为后期制定相关开挖方案提供技术支撑,极大的增大超前地质预报技术的准确性。

二、隧道大涌水涌砂情况下如何保证施工安全和进度

在《铁路隧道设计规范》中规定:新建和改建隧道防排水,应采取“防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理”的原则,采取切实可靠的设计、施工措施保障结构物和设备的正常使用和行车安全;对地表水和地下水应作妥善处理;洞内外应形成一个完整的防排水系统。在以往的隧道工程中我们可以发现,如果仅仅是先期对隧道进行排水作业,通常会延误工期,而且很难保证能够达到施工人员想要达到的效果。在岩鹰鞍隧道的修建中,采取了“分水降压、迂回绕行”的方案,通过高位泄水洞直接对正洞和迂回导洞进行排水,有效的降低了正洞掌子面的水压,为

进一步隧道施工提供安全保障。另一方面通过迂回导洞的修建,保障了施工工期,提高了生产效率。

三、隧道开挖采用双层初期支护的理念

目前国内外双层初支应用较少,未形成完整体系,针对双层初期支护的强弱关系及支护时机的研究对隧道整体安全具有重要意义。岩鹰鞍隧道受 F_4 断层影响区段约为210m,现场施工中在受断层影响区段部分出现围岩大变形现象,属于大变形高风险区域。通过岩鹰鞍隧道采用双层初期支护结构对围岩大变形进行控制技术进行了系统研究:考虑到双层初期支护结构目前的应用案例十分有限,且不同隧道的地质条件差异,尚无成熟的设计施工经验可供参考,工程技术人员从双层初期支护对围岩大变形控制的机理入手,重点对支护刚度、支护时机以及受力特点等多方面进行研究,为施工安全和控制成本提供强力保障,最终成功完成对 F_4 断层影响区段的支护。

四、为今后相关隧道工程建设提供一种参考

我国处在隧道工程建设的黄金时期,怎样解决现有的隧道施工问题,仁者见仁,智者见智,在技术管理问题上更是提倡百家争鸣。然而,隧道建设由于其地质条件极其复杂,不同的隧道往往有存在不同的施工难题,确实需要今后的工程人员进行进一步深入科学的研究。

本课题组对岩鹰鞍隧道施工中所遇到的困难进行深入的研究与分析,总结出一种关于穿越高角度逆冲富水富砂断层隧道施工方法。但是这些分析和总结是初步的,期望达到抛砖引玉的作用,并为今后相关类似工程所借鉴。

感谢课题组全体同志,不辞辛苦,牺牲大量工作之余的时间,通过讨论、分析、研究、求证,反复推敲,几易其稿。感谢出版社编辑同志认真负责,精心编辑。对于隧道施工技术的开发与研究,我们进行了长期、深入、广泛的研究,是基于我们对祖国基础建设事业的热爱以及我们对于未来美好生活的向往和我们专业人的一点匹夫之责。抛砖引玉,观点正确与否,欢迎各界专家批评指正,共同讨论。



2017年10月于西安

前言

中国是世界上隧道和地下工程最多、发展最快、水文地质及结构形式最复杂的国家。目前,我国铁路运输步入“高速时代”,高速铁路扩大了城市通勤范围,快速连接各大城市。高铁的发展带动了基础设施建设,既有铁路线难以满足高铁运行标准,需要修建大量的桥梁与隧道作为线路工程的基础。隧道施工常常是整条线路修筑过程的“硬骨头”,地质条件复杂、施工环境恶劣等因素常困扰着铁路隧道施工人员,面对复杂的山体地质条件,如何进行地质调查、线路选择、施工设计、人员组织、应急预案等工作,都是摆在人们面前的一道道难题。

新建怀邵衡铁路自怀化南编组站引出而止于衡阳市衡茶吉线颜家垄站,正线全长318 km,将连接京广和沪昆两条高铁,使湖南高铁网络实现闭环,形成高铁“金三角”,在铁路路网中具有非常重要的战略意义和作用。怀邵衡铁路全段共需开挖隧道41座,属典型的山区丘陵铁路。而岩鹰鞍隧道F₄断层为断裂密集破碎带,构造复杂且围岩稳定性极差,施工中可能发生突水突砂等灾害性事故,隧道施工及运营风险极高,是怀邵衡铁路控制性高风险工程。对高角度逆冲富水富砂断层带隧道施工,国内尚无成熟施工经验借鉴,如何安全、优质、按期完成隧道施工,并确保运营期间结构安全可靠,成为参建单位研究的重大课题。

中铁二十局集团有限公司联合西南交通大学组建课题组,就岩鹰鞍隧道建设技术,开展了大量的研究工作,进行了系统深入研究,本书的内容就是研究成果的综述,总结了本工程在地质勘察、排水降压、注浆加固、迂回绕行、支护结构、施工工法、应急救援逃生、信息化管理等方面所取得的成果。

本书由邓勇策划并与肖清华、吴应明、张旭辉共同主编,参加课题研究和本书编写工作的还有任少强、赵崇科、刘庭联、高雷州、周中财、张乃乐、郭朋超、薛琪、王克俭、赵志辉、杨文、李校珂、刘建国、邓川、赵伟、陈桥枫、孙振坤、艾健森、邱瑞成、朱洪江、丁猛、袁文。全书分为十二章,第一部分通过案例综述了断层带隧道施工灾害及控制的研究现状,重点介绍了国内外断层带隧道施工方法;第二部分为高角度逆冲富水富砂逆冲断层带构造特性及隧道施工致灾模式的研究;第三部分为综合超前地质预报技术;第四部分为高角度逆冲富水富砂隧道断层带“分水降压”与绕行技术。第五部分为富水富砂断层前向注浆及其效果检测技术;第六部分为高角度逆冲富水富砂断层带隧道开挖工法;第七部分为高角度逆冲富水富砂断层带隧道控制爆破技术;第八部分为高压涌水涌砂隧道双层初期支护机理及监测技术;第九部分为穿富水富砂断层带隧道施工稳定性分析;第十部分为全断面正向掘进爆破震动影响及其工程控制对策;第十一部分为断层带隧道施工综合信息技术研究;第十二部分为涌水涌砂断层隧道施工安全保证及应急逃生救援技术。

本书的撰写,一方面展示怀邵衡铁路修筑过程中的艰辛与不易,尽管困难重重,但最终都通过对问题的分析研究逐一解决;另一方面也期望本书能为类似地质条件下的隧道设计和施工提供示范和参考,拓宽行业应用范围,促进施工技术水平提升。

由于时间紧凑,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论	1
一、国内外研究现状及发展趋势	1
二、市场现状与需求分析	6
第二章 高角度逆冲富水富砂逆冲断层带构造特性及隧道施工致灾模式	7
一、高角度逆冲富水富砂赋存聚集机制	7
二、隧道施工高角度逆冲高压涌水及涌砂规律	9
三、高角度逆冲富水富砂隧道施工致灾模式	13
第三章 高角度逆冲富水富砂断层带隧道综合超前地质预报技术	15
一、岩鹰鞍工程概况	15
二、逆冲涌水涌砂地质超前预报现场施作及其问题分析	15
三、逆冲涌水涌砂地质超前预报方法	19
四、逆冲涌水涌砂地质超前预报分析	23
第四章 高角度逆冲富水隧道断层带“分水降压”与绕行技术	28
一、研究现状	28
二、岩鹰鞍高角度逆冲富水隧道断层带情况简介	30
三、岩鹰鞍隧道 F_4 断层水文地质条件检测结果分析	32
四、穿越 F_4 断层隧道施工总体方案	35
五、排水洞挖开对正洞的影响分析	35
第五章 富水富砂断层前向注浆及其效果检测技术	55
一、隧道前向超前帷幕注浆总体方案	55
二、浆液配比试验	60
三、注浆堵水施工参数	61
四、注浆施工方法与工艺	61
五、效果检测(孔内成像、取芯、钻孔、涌水量)	65
第六章 高角度逆冲富水富砂断层带隧道开挖工法	73
一、 F_4 断层性质与规模	73
二、 F_4 断层开挖施工方案	73

三、施工工艺及施工方法	73
四、洞身开挖	77
五、初期支护	78
六、洞身开挖模拟分析	80
第七章 高角度逆冲富水富砂断层带隧道控制爆破技术	110
一、隧道帷幕注浆段总体爆破方案	110
二、爆破控制参数	112
三、掏槽形式	113
四、光爆参数	113
五、炮孔布置与网路设计	114
六、爆破效果分析	116
七、安全控制技术	117
第八章 高压涌水涌砂隧道双层初期支护机理及监测技术	120
一、高压涌水涌砂隧道双层初期支护结构力学耦合试验研究	120
二、高压涌水涌砂隧道双层结构的力学耦合理论分析	124
三、高压涌水涌砂隧道双层初期支护强支护结构及其参数	129
四、高压涌水涌砂隧道双层初期支护结构监控量测	136
第九章 穿富水富砂断层带隧道施工稳定性分析	154
一、隧道开挖施工不同工况的设置与分析	154
二、计算模型设置	154
三、FLAC ^{3D} 空间效应模拟	156
四、计算模型与边界条件	157
五、数值模拟结果与分析	159
六、本章小结	166
第十章 全断面正向掘进爆破震动影响及其工程控制对策	168
一、国内外研究现状分析	168
二、爆破震动控制标准的确定	173
三、爆破计算中关键问题的处理	175
四、计算方案拟定	178
五、爆破震动动力特性研究	179
六、小 结	182
第十一章 断层带隧道施工综合信息技术研究	184
一、概 述	184
二、监控量测实施	185

三、监测管理值	189
第十二章 涌水涌砂断层隧道施工安全保证及应急逃生救援技术	192
一、事故类型和危害程度分析	192
二、应急处置工作原则	192
三、预防及预警	192
四、信息报告程序	202
五、应急处置	203
六、应急物资与装备保障	213
七、资金保障	215
八、事后处理	215
参考文献	217
后 记	219

第一章 绪 论

新建怀化至邵阳至衡阳铁路正线全长 39.714 km,正在施工的岩鹰鞍隧道地处地质条件极其恶劣的雪峰山区,隧道全长 5 302 m,隧道平面布置与工区划分如图 1-1 所示。



图 1-1 隧道平面布置与工区划分

2016 年 1 月 4 日掌子面推进至 DK87+998 处时,线路左侧起拱线突然开始涌水涌砂,涌水口面积约 0.8 m^2 ,至 2016 年 4 月 16 日期间涌水始终未间断,平均每天涌水量约 $3\,500\text{ m}^3$,累计涌水量 31.2 万 m^3 ,涌砂时断时续,含砂量时大时小,累计涌砂量约 1.73 万,导致全面停止施工。 F_4 断层带 DK88+050~DK87+840 段落为断层密集破碎带,岩性以石英砂岩为主,节理、裂隙发育,岩体较破碎。在此基础上 2016 年 4 月 19 日、2016 年 5 月 25 日由怀邵衡铁路公司组织两次专家会研究,确定该 F_4 断层为高角度逆冲富水断层,破碎带呈强风化和疏松的砂、石混杂结构且富含地下水,初步分析系由构造压力与风化槽谷深切等综合作用所致,在高压水作用下易形成涌水涌砂等地质灾害,施工风险极高。

对高角度逆冲富水富砂断层带隧道施工,国内无成熟施工经验借鉴,故须结合施工及试验困难条件,对高角度逆冲富水富砂断层带长大隧道施工关键技术展开研究,为有效保证施工安全和控制成本提供强力保障,并为今后类似工程提供有力参考。

一、国内外研究现状及发展趋势

(一)断层带隧道施工灾害及控制

断层破碎带由于具有岩体碎裂,孔隙比大等特点,一直是隧道建设面临的复杂有害地质问题,对隧道的不利影响主要体现在两方面:一方面断层破碎带是地下水的良好渗流通道,设置地下河流的河道,导致隧道施工时面临大量涌水的情况,对施工安全和结构造成不利影响;另一方面则是由于断层破碎带岩性碎裂,此种地质条件下隧道施工时围岩稳定性差,支护时机和支护强度难以准确把握,常因此出现各种工程事故。

段会岳(2016)结合实际的隧道施工工程情况,分析高压富水岩溶地层隧道施工的基本情况、高压富水岩溶地层隧道施工问题的相关处理方式以及高风险岩溶隧道综合超前地质预报的体会。武森(2015)通过分析渗流的特点以及其致灾的力学机制,找到渗流发生的各种原因,

加强对渗流引起的隧道施工地质灾害的研究,找到防治办法,提高隧道施工的质量,可以有效保证人们正常出行与交流的同时,也可以保证隧道和人们的安全,增加隧道的使用寿命。王忠双(2015)首先采用摩尔库伦准则和新意法原理,对含水砂层掌子面的失稳机理进行解释,接着针对掌子面的失稳机理,在隧道施工前实施降水和集水明排等方案,使得隧道开挖在无水状态下进行,然后对掌子面前方土体进行深孔注浆加固,提高地层的强度和刚度,在施工过程中,综合采用双层临时仰拱和临时插板的方式,对隧道轮廓和掌子面地层施加人为约束,提高隧道的稳定性。帅文斌(2015)进行了基于 FLUENT 的隧道突涌水仿真模拟计算,得到了涌水的流通特点,参照模拟计算结论,并结合现场实际,设计了逃生路线,在隧道突涌水应急演练中取得较好效果,可为制定隧道突涌水应急预案与临灾处理提供依据。耿萍等(2015)利用离散元方法,通过颗粒体与流体耦合,模拟了富水断层在不同倾角时,隧道开挖所引起的突水突泥全过程。模拟过程中对隧道周围岩体的裂隙发育、隧道内的突水量和突泥量进行追踪和统计,分析了突水突泥通道的形成过程,揭示了断层倾角对隧道突水突泥的影响。结果表明,富水断层倾角越小,隧道与断层的垂直距离越小,越易发生突水突泥破坏,且突水突泥越易集中在掌子面底部位置。该研究结果可为富水断层区域隧道开挖的方案设计及突水突泥事故的预测和防治提供参考。左昌群等(2014)阐述了断裂群区岩溶突水灾害灾变机制。在此基础上建立断裂群区地层岩性、构造形迹、隧道埋深、水文环境、施工工法等 6 种致灾因子的风险评价模型,模糊优选出最适宜断裂群隧道岩溶风险物探方案。

综上所述,目前对富水富砂断层结构的灾变机理研究主要是基于计算机数值模拟以探求隧道结构可能出现的破坏情况,并重点关注了开挖方法和支护措施的效果,而对于灾变模式没有进行深入研究。其难点在于,灾变模式是复杂物理系统在多因素作用下出现的突变型系统状态重大改变,其中的力学机理十分复杂,是数值模拟难以考虑的。

(二)断层带隧道施工超前地质预报技术研究

在富水含砂断层地质条件下进行隧道施工是一项极大的挑战,岩体中大量的水分依靠着水压顺着围岩裂隙不断进入隧道断面,对隧道施工以及围岩稳定性都是极大威胁,断层带的存在使得隧道掘进更加不安全,破碎岩体地质条件时常能遇见,若在施工工程中工法不当或是支护偏离都容易引起围岩脱落、剥离的情况,威胁施工安全。为此,业内人士做了大量研究。

周建春等(2016)针对复杂环境和大断面山岭隧道施工,提出采用地震散射波场和瞬变电磁波场进行超前地质综合探测的技术关键点和现场工作流程,在利用正演数值模拟验证相关解译技术的基础上,通过多源信息融合技术获取超前预报成果。史玉洁(2015)采用地震波预报 TSP 技术,预报了隧道内断层构造及断层破碎带、节理、裂隙较发育段情况,同时分析了 TSP 技术在地质探测中的不足,最后提出了适用于中部引黄隧道的地质预报方法,对类似工程具有一定的借鉴意义。吴德胜等(2014)认为单一的地质超前预报方法造成漏判、误判严重,难以确保隧道施工安全,从而提出采用综合地质超前预报技术对铜锣山隧道施工涌水进行地质超前预报,充分发挥 TRT 法、瞬变电磁法和超前水平钻法技术的各自优势。孔刚等(2014)采用“平导超前,物探先行,钻探验证,综合分析,反馈施工”的综合超前地质预报方法,及时、准确地监测熊洞湾隧道的地质状况,弥补了勘察设计对地质资料的遗漏。

(三)富水断层带隧道防排水技术研究

赵健(2015)以超前地质预报为依据,建立防涌突预案,综合采取了超前帷幕注浆、超前局部注浆、超长钻孔排水降压、迂回导坑等措施,保证了隧道施工安全。李治国(2015)探讨了两

方面的内容:通过分析地下水的渗流规律,从地层加固和止水、限排降压、抗水压衬砌等方面介绍了隧道涌水量和水压力;对隧道排水量分级、水中泥砂含量及粒径控制问题,提出了一些控制参数和标准。李守刚(2015)提出了“泄水降压、排堵结合、超前支护、帷幕注浆、长期量测、确保安全”的原则。张玉龙(2013)认为“以堵为主”的帷幕注浆法处治,历时长,收效一般,施工风险高。释能降压技术“以排为主、排堵结合、因地制宜、综合治理”的隧道施工原则和坚持“物探先行、钻探验证”的预报程序,与传统的帷幕注浆工法相比,成本更低、工期更短、安全可靠。释能降压处治高压富水溶腔,通过溶腔查找、近溶腔、定溶腔范围、开溶腔、治溶腔等几个阶段,将高压富水溶腔的处理问题化暗为明,大大降低了施工风险,并加快了穿越岩溶强烈发育段的进度。

(四)涌水涌砂隧道施工超前支护技术

张永军(2012)证明了在北京地区砂卵石地层条件下,做好暗挖施工风险的分析,制定有效的应对措施,按照“先加固、后穿越”原则,遵循“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测”的方针,对施工及设计方案进行动态管理、针对性优化,保证注浆加固效果,可以有效控制施工风险,确保暗挖施工安全、顺利地进行。杨益波等(2014)以天大高速大梁山隧道左线大背沟沟谷段为背景,对富水砂卵石层沟谷段隧道施工技术进行总结,引入了桶式多节双液帷幕注浆技术,通过超前地质预报、复拱加强、钢桁架临时支撑、弱爆破、短进尺、强支护、早封闭等措施,成功预防了隧道沟谷冒顶塌方,确保工程质量和安全,节约施工成本,缩短工期。张建强(2015)提出大管棚施工及小导管超前注浆施工作为浅埋暗挖作业的超前支护措施,CD法暗挖施工作为暗挖作业强支护措施,使洞口及隧洞顶部覆土更稳定,避免了大面积塌方,降低施工风险,确保施工的安全。王赞(2014)分析了铜锣山隧道工程概况,制定具体的施工原则,包括超前预报、短进尺开挖、强支护和及时监控量测,详细阐述了特殊地质条件(包括不同类型溶洞、过岩溶破碎饱水区涌水、断层和石膏岩段)的处理措施。实际施工效果表明,根据制定的施工原则和相应措施进行施工的效果良好,可以为后续工程施工提供重要参考。彭阳等(2015)针对重庆分界梁隧道煤系地层分布有软质岩、涌水、有害气体、煤矿采空区等不良地质,介绍了针对这些不良地质采取的超前地质预报、堵水、排水、弱爆破、强支护、快衬砌、勤量测、强通风、现场严管理的有效施工措施,稳妥通过煤系地层,效果较好。

(五)富水断层隧道安全施工技术研究

刘伟等(2012)采用了大气降水入渗法、地下水径流模数法、地下水动力学法等多种方法对隧道涌水量分别进行计算,综合预测隧道正常涌水量及最大涌水量。综合分析认为地下水动力学的计算更能反映隧道涌水的情况。阳跃朋(2012)对岩溶处治技术注浆加固法、灌浆压浆法、填充黏土和片石法、浇灌混凝土法和钢护筒跟进法进行了分析总结。通过监测其岩溶处治前后的围岩变形值,分析出岩溶处治后的处治效果。刘成明(2013)在国内外大量工程实例的基础上,以重庆轨道交通六号线二期中梁山隧道为依托,采用弹形薄板理论及剪切破坏理论,对隧道水砂突涌灾害发生的机理及灾害处置措施进行了研究。提出了用全断面帷幕注浆及掌子面后方径向注浆加固的综合方法来处置长大山岭隧道工程中常见的水砂突涌灾害。论文采用 ANSYS 有限元软件对隧道穿越高水压的软弱断层的各种工况进行开挖支护模拟,对比分析了相应工况条件下隧道的位移和受力情况。韩焜(2014)进行多水灰比条件下的水泥浆液黏度时变性研究,得到宾汉姆水泥浆液的黏度时变性公式;结合流体力学、渗流力学、土力学,在考虑黏度时变性的基础上,对注浆公式进行改进,得到了均匀多孔介质中黏度时变流体

扩散半径和压力的计算公式,讨论了多种因素对浆液扩散的影响;以流体扩散的连续性方程和动量方程为基础,推导了宾汉姆流体在裂隙中的流动扩散方程,总结了其压力的衰减规律,讨论多种因素对浆液扩散的影响;应用有限元分析软件 FLAC^{3D}进行了土体数值模拟分析,总结了黏度变化流体的渗透规律,与定黏度时进行了比较。同时还与理论公式的计算结果进行比较。王辉(2014)为加快施工进度,保证施工安全,采用双层长管棚加超前小导管注浆的方案先行开挖左洞通过断层区,然后在前方通过横向通道同时向后向前开挖右洞,右洞断层区采用全断面帷幕注浆加长管棚的反向施工方案。实践证明,该方案充分利用了双线隧道的优势,既安全顺利地通过了断层破碎带,又将断层施工对工程进度的影响降至最低程度,对类似工程施工有一定的参考价值。郝亭宇(2015)研究了不良地质水害注浆治理中各参数的设计方法,通过数值模拟、室内试验及现场试验确定了注浆参数选择方法,证实了注浆设计方法及治理技术的可行性与先进性。刘伟正等(2015)提出无支护时拱部易产生坍塌,侧壁易产生掉块或失稳,按照大变形产生的机理可将大变形分为高地应力下软弱围岩中的大变形、膨胀性围岩大变形、断层破碎带松弛变形等几种,为典型大变形隧道。段会岳(2016)结合实际的隧道施工工程情况,分析高压富水岩溶地层隧道施工的基本情况、高压富水岩溶地层隧道施工问题的相关处理方式以及高风险岩溶隧道综合超前地质预报的体会。

(六)隧道施工信息与反馈技术研究

李艳青(2012)结合某高速公路隧道,从钻爆设计、爆破工艺流程、爆破质量检验等方面详细阐述了预裂微震控制爆破技术在隧道断层施工中的应用,为今后断层爆破和破碎隧道围岩开挖积累了经验。罗嵩等(2012)结合成功快速穿越 F_{4-3} 断层的工程实例,具体介绍了针对胶州湾海底隧道含水断层的施工方案,同时在施工过程中根据实际揭露的地质反馈信息,随时进行动态设计、动态施工,这种信息化的工作方法既保证了施工安全,又加快了工程进度,对顺利穿越含水断层起到了至关重要的作用。舒磊等(2013)通过现场试验和三维各向异性非线性流固耦合模型,研究了富水断层隧道支护体系受力特征、空隙水压、能量积聚、变形特性和力学响应。吴敌(2013)基于某些岩溶地区需要设置较多的隧道,高压富水断层作为隧道工程中较为关键的部分成为隧道工程建设过程的阻碍之一,对隧道工程中高压富水断层的施工技术作探讨。袁智勇(2013)介绍了胶州湾海底隧道通过断层时的施工方法,指出了施工中应注意的事项,避免塌方事故的发生。陈明(2014)以在建铁路双线隧道通过可溶岩与非可溶岩触带及断层施工为例,简述隧道通过该段的施工方案。黄乔森(2014)通过分析广乐高速公路长基岭隧道的围岩地质情况及贯通施工的重点与难点,重点介绍了隧道贯通总体安排与贯通点的确定,特别是穿越 WF113 断层施工难点进行的施工组织安排,从而使长基岭隧道施工安全高效、顺利贯通。李春林(2014)探讨了隧道施工中方案的分类、编制、审核、批准、执行及全过程管理方法,提出了隧道工程重大技术方案对隧道施工的相应建议。陈鲤辉(2015)结合广西阳鹿高速公路第 2 合同段闸门坳隧道工程实例,具体介绍了隧道穿越断层的施工方法和施工控制,总结该类环境下隧道施工的成功经验,可为类似环境下的隧道施工提供很好的借鉴。冉万云(2015)指出断层破碎带影响范围内,该施工方案较好的控制了隧道变形,后期变形不明显;断层破碎带影响范围外,因未采用该施工方案,受断层破碎带围岩质量、进口斜井双重施工等因素的影响,隧道短期变形和长期变形均较大,在远离贯通断面 80 m 左右范围内,应加强监测,适时辅以相应的施工控制措施。

(七)不良地质隧道施工安全保证技术研究

王鹏(2012)借鉴前期调查、分析结果及数值计算结果,就乌鞘岭隧道施工中的地下涌水问题,提出了“以堵为主,排堵结合”的处理方案,根据本隧道的涌水特征进行了水泥—水玻璃双液浆注浆方案的设计,依据注浆处理前后隧道排水量的对比,对双液注浆的效果进行了评价。李儒挺(2013)以广西壮族自治区岑溪大隧道为依托,结合现场勘探及实测资料,对岑溪大隧道涌水的成因机理及基本特点进行分析;依据地下水运动规律,结合岑溪大隧道隧址的水文地质情况、围岩结构特征、隧道形式和现行的涌水情况的调查,采用 ADINA 有限元软件模拟岑溪大隧道地下水的渗流特征,根据模拟的结果和实际的调查资料,就岑溪大隧道涌水问题提出“以堵为主、排堵结合、综合治理”的处治措施;根据隧道涌水段的具体特点,提出水泥—水玻璃双液浆的帷幕注浆堵水处治方案,并比对了注浆前后的效果及对涌水段施工方法进行了探讨。郑永娟(2014)以大直径顶管隧道穿越浑河这段工程为背景,首先结合隧道工程施工的特点,系统地阐述了隧道风险管理的基本理论。通过分析顶管法穿越浑河施工的风险特征和施工的重点难点,运用专家调查法和预先危险性分析法辨识出浅覆土引起隧道塌方涌水、工作面失稳等风险,建立了大直径顶管隧道穿越浑河的安全风险评估体系。得出突遇难以逾越的障碍物等为极高风险,需高度重视并规避。管理风险等为高度风险,需采取措施并加强监测。工作井塌方等风险为中度风险,需采取风险处理措施。杨晓东(2015)依托岑溪大隧道,通过实地踏勘,现场利用高密度电阻率法、可控源音频大地电磁法、地质预报探测仪等多种物探方法,结合地质钻探取样分析,对断层破碎带的范围、断层破碎带及其围岩的工程特性进行了调查研究,分析了隧道涌水成因机制,并提出处治措施,同时利用有限元软件进行相关模拟分析。得出了通过物探和钻探相结合的方法,确定了断层破碎带是呈开口向上的抛物线式分布发育的,其具有控水、导水的工程特性;钻探取样的结果分析表明,断层破碎带围岩具有易扰动、遇水软化等工程特性的结论。方振华等(2016)针对西南地区某铁路隧道施工期间发生的涌突水事故,结合隧道工程地质及水文地质特征,分析了此次涌突水事故的机理,对隧道继续掘进的涌突水风险进行了预测,同时对后续的施工提出了相应措施,确保隧道的安全掘进。

(八)长大隧道施工工期研究

章清涛(2013)指出有必要对隧道的塌方机理及处理措施进行系统的研究总结,为以后的工程积累经验教训。本文结合解家河隧道塌方实例,对于诱发塌方的因素、塌方预测、塌方治理等问题进行了深入的研究,主要通过对解家河隧道实际塌方的分析研究,对造成塌方的原因进行了深入的探讨,同时结合地质雷达探测成果图,将引发解家河隧道塌方的原因归结为:破碎带、节理裂隙发育、浅埋偏压以及施工方法不当四个方面。在隧道塌方的治理措施方面,主要研究了管棚支护、超前小导管注浆加固以及地表砂浆锚杆等三种处理措施,并利用 FLAC^{3D} 软件模拟计算了其支护作用,分析了各支护措施的优缺点,为塌方事故的处理提供了一定的参考成果。韩秀娟等(2015)提出了临江富水砂层干坞基坑防渗墙施工中三轴搅拌桩槽壁加固、配合比试配验证、“两钻两抓”成槽工艺、超声波仪成槽检验、高密度电法墙体检测以及膨润土泥浆性能指标、加强混凝土过程控制等主要施工方法和技术措施。通过在南昌红谷隧道临江富水砂层干坞基坑中的应用,证明塑性混凝土防渗墙止水防水效果非常好,为基底处理及沉管预制施工创造了良好的条件。师建飞(2014)以天大(天镇—大同)高速公路大梁山隧道左线大背沟沟谷段为背景,对富水砂卵石层沟谷段隧道施工技术进行总结,引入桶式多节双液帷幕注浆技术,通过超前地质预报、复拱加强、钢桁架临时支撑、弱爆破、短进尺、强支护、早封闭等措

施,成功预防了隧道沟谷冒顶塌方,确保工程质量和安全,节约施工成本,缩短工期。唐国志(2015)指出隧道是在铁路建设过程中经常会遇到的建设工程,而在富水粉细砂地层的隧道施工中,由于开挖面经常出现涌水、涌泥、涌砂等现象,存在着塌方的风险,严重影响施工安全、进度、工期,在这种地质条件下做好降水成为工程施工的关键。

随着我国交通及铁路事业的发展,隧道穿越高风险地段的情况也越来越多,我国对各类围岩隧道安全施工技术展开了卓有成效的研究,在重难点隧道施工过程中,积累了很多经验,但对于该高角度逆冲富水断层,其内部呈强风化和疏松的砂、石混杂结构,施工中无规律可循,在国内外隧道施工中极其罕见,尚没有成熟施工经验可以借鉴。因此,必须对高角度逆冲富水富砂断层带长大隧道施工关键技术进行深入研究,据此才能确保施工难度极大、安全风险高的工程顺利完工。

二、市场现状与需求分析

随着我国政府从战略层面提出“一带一路”战略,其影响波及沿线几十个国家,高铁“走出去”及加快中西部交通枢纽的建设成为必然选择。隧道工程所占的比例越来越高,可能遇到各类复杂地质,普通断层施工的工艺已较成熟,但对于高角度逆冲富水富砂断层还比较少见,且没有成熟工艺技术,急需通过研究实践出该地质断层的施工技术,为以后类似地质提供可借鉴的施工技术经验,降低施工安全风险,同时节约投资。因此,形成完整的施工技术具有极大的推广应用价值。

第二章 高角度逆冲富水富砂逆冲断层带构造特性及隧道施工致灾模式

一、高角度逆冲富水富砂赋存聚集机制

(一)逆冲断层

1. 简介

在中国很多人把断面倾角大于 45° 或 30° 的高角度逆冲断层称为逆冲断层,而国际上一般是指断面倾角等于或小于 45° 或 30° 的逆冲断层。

逆冲断层本身产状变化,特别是遭受褶皱的地方,其断面倾角可以发生很大的变化。此外,在实际工作中,逆冲断层的位移数值也是很难获得的。所以,有学者不同意对逆冲断层和断面倾角的大小加以限定。

逆冲断层常常显示出强烈的挤压破碎现象,形成角砾岩、碎粒岩和超碎裂岩等逆冲断层岩,沿逆冲断层还常常出现劈理化、节理化、剪切带等各种复杂震皱,这些构造带呈带状排列,或呈交织穿插状。

直冲逆冲断层的组合形式包括:(1)叠瓦式逆冲断层,一系列产状相近的逆冲断层,其上盘依次向上直冲,剖面上成叠瓦式;(2)对冲式逆冲断层、由两条相反倾斜,相向直冲的逆冲断层组成;(3)背冲式直冲逆冲断层,由两条或两组相向倾斜的逆冲断层组成,表现为自一个中心分别向两个相反方向速冲,一股自背部向外散开逆冲;(4)楔冲式逆冲断层,在基底断裂活动中,基底定岩系被迫上冲,随着上冲围压降低而向侧方扩展。

逆掩逆冲断层为逆冲断层的近义词,是指稍大规模的,以公里计的,断面倾角在 30° 左右或更小的逆冲断层。也有人认为逆冲断层与逆掩逆冲断层是同义词,趋向废弃 overthrust 一词。当规模巨大且上盘冲断席沿低角度波状起伏的断面(滑脱面)远距离推移数公里至数十公里时,则称为推覆构造。

2. 逆冲断层系统

逆冲断层系统是指几何学、运动学和动力学机制上密切相关的,由两个以上的逆冲断层及相关的冲断席组成的逆冲断层带,包括双重逆冲构造、叠瓦状障断系和三角带等构造样式。

(1)双重逆冲构造

双重逆冲构造是由底部的底板逆冲断层和顶部的顶板逆冲断层及此于其间的次级叠瓦式直冲逆冲断层和断片组合而成的逆冲断层系统,简称双重构造(duplex)。顶板逆冲断层和底板逆冲断层在前锋和后缘汇合,构成一个封闭体系。如果各处瓦状次级逆冲断层在上部没有连成顶板逆冲断层,则构成叠瓦扇。双重构造的叠瓦断片形态可以呈膝折式挠曲,也可形成拉长的背斜一向斜对。根据断片产状、次级差冲逆冲断层倾向及其排列关系,可将双重构造分为倾向腹陆式(后倾式)、倾向前陆式(前倾式)和背形势发式(叠瓦堆垛)三种形式。三种类型中以倾向腹陆式最常见,在走向上双重构造断交块可以变成分支断层或者是叠瓦扇。双重构造