

国家自然科学基金项目 (41672260) 资助

学基金重点项目 (2013CFA110) 资助

福建龙津溪引水隧洞穿越 富水风化花岗岩断层破碎带 施工关键技术

THE KEY CONSTRUCTION TECHNOLOGIES FOR FUJIAN LONGJINXI
WATER DIVERSION TUNNEL PASSING THROUGH WATER-RICH
WEATHERED GRANITE FAULT FRACTURE ZONES

王元清 吴立 吴义 等著

国家自然科学基金项目(41672260)资助

湖北省自然科学基金重点项目(2013CFA110)资助

福建龙津溪引水隧洞穿越富水风化 花岗岩断层破碎带施工关键技术

THE KEY CONSTRUCTION TECHNOLOGIES FOR FUJIAN LONGJINXI
WATER DIVERSION TUNNEL PASSING THROUGH WATER-RICH
WEATHERED GRANITE FAULT FRACTURE ZONES

王元清 吴立 吴义 等著



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

内容提要

本书结合福建龙津溪引水隧洞施工现场的富水风化花岗岩的物理力学特性,在系统阐述涌水突泥影响因素及演化机制的基础上,首先从富水风化花岗岩断层破碎带的特性入手,重点分析了断层破碎带倾角、组合方式及交叉点位置对涌水突泥的影响规律;然后针对涌水突泥现象,提出了防突层厚度控制技术、涌水量预测的方法和技术;最后结合现场采用的注浆加固工程的关键技术,形成了集勘察、室内试验、理论计算、数值模拟、现场测试于一体的穿越富水风化花岗岩断层破碎带的隧洞施工方法。

图书在版编目(CIP)数据

福建龙津溪引水隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带施工关键技术/王元清等著.
—武汉:中国地质大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5625-4277-3

- I. ①福…
- II. ①王…
- III. ①引水隧洞-隧道施工-福建
- IV. ①TV672

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 076564 号

福建龙津溪引水隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带施工关键技术		王元清 吴立 吴义 等著	
责任编辑:胡珞兰 谢媛华		选题策划:毕克成 唐然坤	
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮编:430074	
电 话:(027)67883511		E-mail:cbb@cug.edu.cn	
传 真:(027)67883580		http://cugp.cug.edu.cn	
经 销:全国新华书店			
开本:880 毫米×1230 毫米 1/16		字数:451 千字 印张:14.25	
版次:2018 年 6 月第 1 版		印次:2018 年 6 月第 1 次印刷	
印刷:武汉中远印务有限公司			
ISBN 978-7-5625-4277-3		定价:188.00 元	

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

编辑委员会

主 编:王元清 吴 立

副 主 编:吴 义 黄志鹏 汪宏兵 林彦君 康三月

单 位:浙江省隧道工程公司

福建枋洋水利投资发展有限公司

中国地质大学(武汉)

编 委:王铎明 谢云发 李巧龙 林 腓

张恩山 吕虎波 冉梦安 李源河

董道军 程 瑶 闫天俊 李丽平

朱爱山 陈春和 胡光进 林道烛

前 言

龙津溪引水隧洞全长 13.842km,位于福建省漳州市长泰县枋洋镇,是全国 172 个节水供水重大水利工程项目之一,隧洞在施工过程中穿越富水风化花岗岩断层破碎带,具有距离长、倾角陡、水位高、水量大、填充物复杂等特点,地质构造在国内外罕见,施工过程中发生了多次不同规模的涌水突泥事故,严重影响了工程进度,其施工难度在深埋山岭隧道中极为罕见。在此背景下,参建各方联合攻关,迎难而上,倾其心智,历时 6 年,使隧洞顺利通过了该富水风化花岗岩断层破碎带。作者将龙津溪引水隧洞修建过程中的关键技术进行归纳、总结并提炼形成本书,以供国内外同行参考。

本书结合福建龙津溪引水隧洞施工现场的富水风化花岗岩的物理力学特性,在系统阐述涌水突泥影响因素及演化机制的基础上,首先从富水风化花岗岩断层破碎带的特性入手,重点分析了断层破碎带倾角、组合方式及交叉点位置对涌水突泥的影响规律;然后针对涌水突泥现象,提出了防突层安全厚度控制技术和涌水量预测方法;最后结合现场采用的注浆加固工程的关键技术,形成了集勘察、室内试验、理论计算、数值模拟、现场测试于一体的穿越富水风化花岗岩断层破碎带的隧洞施工方法。

本书第一章由王元清、吴立编写;第二章由吴义、康三月、黄志鹏、汪宏兵、林彦君编写;第三章由王铎明、谢云发、李巧龙、林腓编写;第四章由董道军、吴立编写;第五章由程瑶、吴立编写;第六章由吴立、董道军、程瑶、闫天俊、李丽平编写;第七章由闫天俊、吴立编写;第八章由张恩山、吕虎波、冉梦安、李源河编写;第九章由朱爱山、陈春和、胡光进、林道烛编写;全书由吴立负责整理、统编、修改和校核。

本书涉及的理论分析、数值模拟、室内试验、现场试验、研究论文等,得到了以下科研项目经费的支持:国家自然科学基金(41672260);湖北省自然科学基金重点项目(2013CFA110);中国地质大学(武汉)教学实验开放基金(SKJ2014061);中国地质大学(武汉)教学实验开放基金(SKJ2016091)。

中国地质大学(武汉)研究生马晨阳博士、周玉纯博士、汪煜烽博士、钟涵硕士、袁青博士、李波博士、彭亚雄博士、朱彬彬硕士、孙苗硕士、吴丹红硕士、贾钦基硕士、李源硕士、李嘉龙硕士、张晓强硕士、刘凯硕士参与了本书的资料整理、图件绘制和文字校对工作,郝勇博士、吴静博士、周蔚文硕士、付宇德硕士、于超硕士、郭晓亮硕士、赵靖硕士、苏莹硕士、刘思忆硕士、徐志杰硕士、陈子威硕士、从朋硕士等参与了室内试验和现场试验,书中引用了部分国内外公开出版的专著、论文、规范等成果,在此对本书的写作和出版工作做出贡献的所有人员一并表示感谢。

限于时间仓促和作者的水平,书中疏漏及不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2018 年 3 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 工程概况	(1)
第二节 施工面临的主要问题	(6)
第三节 总体构思与主要内容	(8)
第二章 风化花岗岩的物理力学特性	(10)
第一节 花岗岩的风化作用及风化产物	(10)
第二节 花岗岩垂直风化带及选择性风化带的划分	(11)
第三节 风化花岗岩的水理化特性	(14)
第四节 风化花岗岩物质成分及微观结构	(16)
第五节 风化花岗岩物理力学性质	(26)
第六节 风化花岗岩断层破碎带残积土物理力学性质	(35)
第七节 花岗岩风化程度及岩体完整性声波测试	(46)
第八节 风化花岗岩断层破碎带分区及渗流特性	(53)
第三章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带涌水突泥影响因素及孕育演化机制	(58)
第一节 涌水突泥影响因素	(58)
第二节 涌水突泥孕育演化机制	(66)
第三节 涌水突泥模式	(68)
第四章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带渗透变形特性	(72)
第一节 单断层	(72)
第二节 组合断层	(83)
第三节 断层倾角及组合断层交叉点位置的影响	(95)
第五章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带围岩塌落及裂纹演化过程	(113)
第一节 概述	(113)
第二节 数值模拟方案	(113)
第三节 围岩塌落及裂纹演化	(116)
第六章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带防突层安全厚度	(124)
第一节 隧洞防突层安全厚度理论计算	(124)
第二节 隧洞防突层安全厚度影响因素	(131)
第三节 隧洞防突层安全厚度数值模拟	(138)

第七章 涌水量预测 (160)

第一节 隧洞涌水量计算方法概述 (160)

第二节 龙津溪引水隧洞涌水量预测 (163)

第八章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带注浆加固关键技术 (171)

第一节 注浆材料 (171)

第二节 注浆加固范围及注浆段长度 (175)

第三节 注浆扩散半径及注浆管设置 (194)

第四节 注浆压力及单孔注浆量 (196)

第五节 注浆工艺 (197)

第六节 注浆支护设计 (199)

第七节 注浆过程控制 (200)

第九章 隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带施工方法 (203)

第一节 方法特点 (203)

第二节 适用范围 (204)

第三节 工艺原理 (204)

第四节 施工工艺流程及操作要点 (205)

第五节 注浆材料与设备 (214)

第六节 质量控制措施 (214)

第七节 安全措施 (215)

第八节 环保措施 (216)

第九节 节能降耗措施 (217)

主要参考文献 (218)

第一章 绪 论

近年,伴随着我国水利水电以及其他地下工程建设的迅猛发展,隧洞、隧道等地下工程面临着构造复杂、地质环境多变、灾害频发的严峻考验。据统计,地下工程建设中近 80% 的重大安全事故由涌水突泥地质灾害及处置不当造成,教训异常深刻^[1]。涌水突泥已成为隧洞建设的主要地质灾害之一,各种不良地质构造和工程扰动作用所诱发的涌水突泥事故逐渐成为制约我国地下空间建设发展的瓶颈问题。

大规模的涌水突泥首先严重危害施工人员的生命安全,其次处理不当将为日后工程运营管理留下隐患,诱发地表次生地质灾害,打破原有地下水的动态平衡等。随着我国近年来开展的一系列复杂地质条件下的长大、深埋隧洞工程建设,所面临的更为复杂多变的涌水突泥风险也将前所未有。隧洞工程中涌水突泥事故频发,首先在于工程技术人员对涌水突泥的机理研究不够,存在认知局限,未能掌握有效的分析以及预测预报、防治涌水突泥事故的系统方法^[2-3]。显然,富水隧洞涌水突泥机制研究对保护当地水资源、维护生态平衡、防止工程伤亡事故、实现社会效益和施工技术进步相统一皆具有重大意义,属于地下工程进一步发展必须面对的科技难题。

目前,隧洞涌水突泥防治主要围绕两个方面^[4]:其一,探究岩溶或断层带等涌水突泥诱导体的发育规律与涌水突泥产生、发展规律,以及灾变破坏模式;其二,探索适用于生产实践的各类探测方法以及防治对策,致力于构建理论联系实际的、有效的预警系统和防治体系^[5-7]。当前,涌水突泥的研究成果以煤矿采掘领域居多^[8],主要针对岩溶隧道^[9],而对于断层控制下的深埋花岗岩风化带(因受构造影响,岩体破碎带风化剧烈,多呈现全风化、残积土状)涌水突泥致灾机理研究成果尚处于初步研究阶段,特别是花岗岩风化带特殊的组成结构对于围岩劣化、对地下水渗流通道及渗流场改变的综合影响研究较少。在涌水突泥演化过程的研究中,现有研究多集中于岩溶隧道防突层的静力学分析及围岩的渗流损伤致灾^[9],而对于破碎松散岩体段由于塌落拱的动态变化以及裂纹开展效应对涌水突泥影响的研究较少。因此,现有研究无法完全解释深埋隧洞穿越花岗岩断层带中涌水突泥的滞后效应和多次涌水突泥现象,故而对于花岗岩断层带隧洞涌水突泥与拱顶塌方、地下水渗流之间交互影响机理的研究鲜有报道^[10-16]。

因此,本书依托福建龙津溪引水隧洞工程的特殊情况,系统研究了龙津溪引水隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带施工关键技术,为实际施工制定相应的指导对策,并为类似工程提供一定的参考价值。

第一节 工程概况

福建龙津溪引水工程是长泰枋洋水利枢纽工程的组成部分,是厦门市第二水源工程。本工程位于漳州市长泰县枋洋镇,是厦漳两市依托九龙江流域,实现跨区域、跨流域水资源配置的重要工程,是全国 172 个节水供水重大水利工程项目之一。工程完工后,年均可向厦门供水约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

福建龙津溪引水工程主要由溪口闸坝和溪口许庄引水隧洞组成,引水隧洞全长 13.842km。浙江省隧道工程公司承担其中 10.131km(含支洞)的建设任务,引水隧洞开挖洞径为底宽 3.0m,直径 3.9m 的扩底圆

形断面,部分地质较差段采用钢筋混凝土衬砌和喷锚支护。下设 2 条施工支洞,分别为 2#、3# 施工支洞(图 1-1)。两条施工支洞均采用 5.0m×5.0m 城门型断面,2# 施工支洞长 1 239m,3# 施工支洞长 1 343m。



图 1-1 项目平面布置图

2011 年 5 月 26 日,浙江省隧道工程公司中标福建龙津溪引水工程 C1 标,2011 年 6 月 28 日签订施工合同,合同工期 40 个月。在施工过程中,隧洞涌水突泥、不良地质、异常地热、岩爆等不利因素严重影响工程进度,合同工期顺延至 2017 年 6 月 5 日,在 2017 年 6 月 7 日顺利完工并通过验收。该工程经福建省质监站核备质量等级为优良。

一、隧址区工程地质及水文地质条件

1. 地形地貌

工程区位于福建省东南部长泰县及同安区境内,区内地貌受地质构造和岩性控制,属于中低山剥蚀地貌。山顶多呈浑圆状或尖顶状,山坡较陡,一般山峰高程在 100~500m 之间,河谷深切,植被发育良好。工程区属于福建省Ⅱ级构造单元周宁-华安断隆带和福鼎-云霄断拗带的南端,处于较稳定的上升区,没有大的区域性断裂从工程区通过,区域构造较稳定。

溪口水库库区四周山体雄厚,两岸无低于蓄水位(70m)的鞍部和垭口地形。组成库盆的岩体坚硬致密,透水率小,没有大的断裂通过库区,水库无永久渗漏问题。库岸大部分为岩质边坡,岩体较完整,库岸基本稳定。水库仅淹没少量农田和房屋。

地区受地壳板块运动、印支-燕山-喜马拉雅期造山运动、火山喷发、风化、侵蚀、沉积及人类活动等诸多因素影响,形成不同景观的地貌。

隧洞沿线地形波状起伏,地表高程一般 60~650m。在圳古头村附近,地表高程为 140~200m,其低处为一小河,最低高程为 140m。沿线山间沟谷、溪流发育,没有低于洞底高程的低洼地形,进出口段地形平缓,坡度为 10°~20°。

2. 地层岩性

区内出露的地层有二叠系、三叠系、侏罗系、第四系及燕山期侵入岩,由老至新分述如下。

1) 上二叠统大隆组(P₂d)

该组出露于钟魏等地,呈西北向带状展布,由一套浅海相沉积的粉砂岩、泥岩、泥质细砂岩、钙硅质细砂岩等组成,厚大于 148m,与上覆溪口组地层整合接触。

2) 下三叠统溪口组(T_1x)

该组出露于钟魏等地,呈近南北向带状分布,为一套浅海相沉积的砂泥岩、钙硅质岩等,厚 504~511m。可分为 3 个岩性段:

下段 T_1x^1 ,厚 135~189m,下部为褐黄色中薄层变质细砂岩、粉砂岩、泥岩;上部为深灰绿色条带状粉砂质钙硅角岩,褐黄色变质粉砂岩,本段整合于上二叠统大隆组之上。

中段 T_1x^2 ,厚 133~278m,下部为青灰色、灰绿色条纹状角闪绿帘钙硅质角岩,其底部为褐黄色薄—中层状含铁泥质粉砂岩、细砂岩;上部为灰白色厚层状条带明显的钙硅角岩。本段整合于下段之上。

上段 T_1x^3 ,厚 43~235m,下部为浅褐色、黄色变质泥质粉砂岩夹泥钙质和钙硅质粉砂岩;上部为浅褐黄色、灰白色含钙硅质细砂岩,绿帘透辉钙硅角岩。本段整合于中段之上。

3) 上三叠统文宾山组(T_3w)

该组出露于钟魏、溪口、内枋等地,以陆相碎屑沉积为主,厚约 831m,与溪口组为不整合接触。可分为上、下两个岩性段:

下段 T_3w^1 ,厚 153~455m,主要岩性为灰白色、灰紫色中薄层状石英细砂岩,夹褐黄色泥岩、粉砂岩。本段与溪口组呈断层接触,二者为不整合接触关系。

上段 T_3w^2 ,厚 106~597m,上部为灰白色和土黄色砂质页岩、泥岩,下部为黄白色中薄层状石英细砂岩与灰白色粉砂岩互层,本段整合于下段之上。

4) 下侏罗统梨山组(J_1l)

该组零星出露于活盘水库东南,主要岩性为浅灰色厚层状中粗粒石英砂岩,灰白色、灰褐色复成分砂砾岩,灰色粉砂质泥岩。

5) 上侏罗统长林组(J_3c)

该组出露于内枋、青阳等地,厚 343m,下部为复成分砾岩夹钙质中粒砂岩,上部为深灰色硅质泥岩,灰色硅质胶结粉砂岩。在下加美洲还可见流纹岩夹层。

6) 上侏罗统南园组(J_3n)

该组出露范围广,为一套陆相中性、中酸性、酸性火山岩—深成岩系组成,厚度大于 3 600m,可分为 4 个岩性段,从下到上分述如下:

第一段 J_3n^1 ,厚 72~375m,出露于青阳、吴田山北西侧。其岩性由下而上为灰色、深灰色安山岩,气孔—杏仁状安山岩,中部夹英安岩、泥岩、长石石英砂岩。在百交祠见本段安山岩不整合于文宾山组上段之上。

第二段 J_3n^2 ,厚 138~1 304m,为本组火山活动的鼎盛阶段,出露较广,分布于竹园、下加美洲、上存等地。下部为浅灰色流纹质含角砾晶屑凝灰岩、流纹质晶屑凝灰岩、流纹质晶屑熔结凝灰岩,夹流纹质火山尘凝灰岩、含集块火山角砾岩及凝灰质含砾砂岩;中部为灰白色流纹斑岩;上部为浅灰色、白色流纹质晶屑熔结凝灰岩,流纹质凝灰岩夹火山凝灰岩,流纹英安质晶屑凝灰岩和流纹英安岩。本段喷发不整合于 J_3n^1 或 J_3c 之上。

第三段 J_3n^3 ,厚 82~1 167m,分布于竹园、林东、格平头等地,主要岩性为灰色、深灰色流纹英安质晶屑熔结凝灰岩,英安流纹质晶屑凝灰岩,夹流纹英安质熔结角砾岩和流纹质凝灰岩。

第四段 J_3n^4 ,厚 754m,为晚侏罗世火山活动之尾声,大多沿北东向展布,以中心式喷发为特点,分布于火山口附近或直接构成火山构造。下部为灰白色流纹岩与灰绿色流纹质玻屑凝灰岩互层,凝灰岩、含砾熔结凝灰岩;中部为灰色、灰白色流纹质含角砾凝灰岩、熔结凝灰岩、含角砾熔岩;上部为灰色和灰紫色流纹质熔结凝灰岩、流纹岩、流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩、含角砾凝灰岩,局部夹英安流纹质含角砾凝灰岩。

7) 第四系

第四纪冲洪积堆积分布于山间盆地或河床两侧,构成河漫滩及 I、II 级阶地,具二元结构,主要岩性

为卵石、砂、黏土。

第四纪坡残积堆积沿山坡分布,主要成分为含碎石砂质黏土。

8) 侵入岩

侵入岩主要有燕山早期侵入的黑云母花岗岩($\gamma_5^{2(3)c}$)、花岗斑岩($\gamma_5^{2(3)d}$);燕山晚期侵入的辉石英闪长岩($V\delta O_5^{3(1)a}$)、石英闪长岩($\delta O_5^{3(1)a}$)。

9) 次火山岩

区内晚侏罗世次火山岩极为发育。其岩性有次花岗岩($J_3\gamma\pi$)、次流纹斑岩($J_3\gamma\pi$)、次流纹岩($J_3\gamma$)、次石英二长斑岩($J_3\eta O\pi$),以及燕山晚期的花岗闪长岩($\gamma\delta^{3(1)a}$)、二长花岗岩($\eta r_5^{3(1)b}$)、晶洞花岗岩($V\delta^{3(1)c}$)、花岗斑岩($\gamma\pi^{3(1)a}$)等。次火山岩体的分布受火山构造的控制,围绕中心式火山机体呈半环状分布,沿裂隙式火山机体呈带状分布。

隧洞沿线出露的地层主要是燕山期侵入的粗粒花岗岩、花岗闪长岩及三叠纪石英细砂岩夹泥质粉细砂岩。其中,项目依托标段以花岗岩类岩石为主,主要分布燕山晚期花岗闪长岩及燕山晚期第三次侵入粗粒花岗岩,分布范围达 5.2km 以上。

3. 地质构造

隧址区的基本格架是燕山期形成的。本区位于闽东火山断拗带内的周宁-华安断隆带和福鼎-云霄断陷带的南段。其演变特征是:晚三叠世晚期的印支运动以褶皱造山运动为主,并结束工作区的海相沉积环境;晚三叠世至白垩纪的燕山运动以褶皱造山、强烈的火山喷发和规模巨大的岩浆侵入为特征;喜马拉雅运动以继承性断裂复活和断块隆升活动为主。测区断裂构造发育,褶皱构造次之。隧洞沿线发育大量张性断层。隧洞区发育的主要断层达 20 条以上,其中北北东向断层有 7 条,北东东向 4 条,北北西向 7 条。断层宽 1~6m,一般充填松散土夹石、断层泥等,断层两侧受断层影响的裂隙发育带、破碎带宽可达数十米至数百米。

1) 断裂构造

断裂发育方向有北东向、北西向、南北向、东西向 4 组,其中以北东向和北西向断裂最为发育,是本区最主要的断裂构造。有些断裂对侵入火山岩和火山构造的展布具有控制作用,自北西向南东划分为后林、小仓、大坪 3 个断裂带。沿断裂常常有辉绿岩脉、花岗斑岩脉侵入。

北西向断裂是本区另一组主要断裂构造,本组断裂往往错断北东向断裂,有些断裂与火山成因断裂复合,主要有大坪、南林尖两个断裂带。

2) 褶皱构造

根据出露地层、接触关系和构造形态特征可将褶皱构造分为两个构造层。

(1)海西-印支构造层,包括上二叠统大隆组、下三叠统溪口组,形成了钟魏复式背斜,并使上三叠统文宾山组不整合于溪口组之上。

(2)燕山期构造层,包括上三叠统文宾山组、下侏罗统梨山组、上侏罗统南园组和规模巨大的燕山期侵入岩。燕山运动表现为强烈的断块活动,造成晚侏罗世火山岩与早侏罗世、晚三叠世地层不整合接触。燕山运动形成了百交祠-钟魏背斜。

4. 岩体风化特征

隧址区岩体风化程度主要受地形和构造的影响。上闸坝河床及两岸岸边有弱风化基岩出露。下闸坝左岸为坡残积覆盖。一般岩体随着高程的增加,风化也逐步加剧,全强风化带下限埋深 2~40m,弱风化带下限埋深 30~75m。花岗岩断层带区域易形成风化深槽,全强风化带埋深可达数百米。

5. 气象及水文地质

龙津河流域属亚热带海洋性季风气候区,温暖湿润,日照充足,雨量充沛。流域受锋面雨和台风雨

影响,降雨集中在4—10月,年平均雨量为1500~1900mm,从上游向下游递减。根据长泰县气象站统计,多年平均气温21℃,极端最高气温38℃,极端最低气温-1.7℃,多年平均风速1.7m/s,多年平均相对湿度80%,水面蒸发量1478.2mm。

隧洞沿线场地地下水主要为孔隙潜水和裂隙潜水两种,孔隙潜水主要赋存于第四系中,裂隙潜水主要赋存于节理裂隙、断层带中,地下水主要接受大气降水补给,地下水向河流、冲沟排泄。

6. 工程地质评价

测区沿线出露的地层主要是燕山期侵入的粗粒花岗岩、花岗闪长岩及三叠纪石英细砂岩夹泥质粉细砂岩。砂岩与火成岩接触较差。地下水位埋深一般5~15m。进、出口段引水隧洞上覆岩体厚10~40m,岩性为火成岩,岩石坚硬致密,进、出口具备成洞条件。其他洞段,上覆弱风化岩体厚40~115m,岩体呈弱—微风化状。

根据勘察报告结论及隧洞区地形地质条件和水文地质条件,参照《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)附录N,对引水隧洞围岩进行初步围岩分类:Ⅱ类围岩6848m,占48.3%;Ⅲ类围岩4729m,占33.4%;Ⅳ类围岩2600m,占18.3%。隧洞过冲沟和遇断层带处地下水较大,估算隧洞的涌水量平均为2060m³/d·km,应及时做好施工支护和排水措施。

二、隧址区断层带分布情况及其工程特征

由于隧址区受区域构造的影响,本标段隧洞沿线断层构造非常发育,断层一般宽1~6m,部分充填碎裂岩、角砾岩,大部分已经风化呈土状、土夹石状,富水地段则多见断层泥。长大断层深切岩体,从深部延伸至地表,并在地表形成冲沟、溪流,形成良好聚汇地表水的地形特点,导致区内断层富水。单个断层的破碎带及裂隙发育带影响范围少则数十米,宽者可达数百米不等。据野外地质调绘及区域地质资料、工程地质剖面图,对引水隧洞沿线进行工程地质评价如下。

(1)距离0~933m,地表高程60~180m,地形坡度约23°。沿线出露有燕山早期侵入的粗粒花岗岩、燕山晚期侵入的花岗闪长岩及三叠系文宾山组下段灰紫色中薄层石英细砂岩夹泥质粉细砂岩。本段地质结构简单,未发现大的断裂构造。地下水位埋深5~15m,工程地质条件较好。

(2)距离933~1023m,地表为林墩溪,河底高程约66m。该段地形较低,据钻探资料,河底弱风化岩体埋深约12.5m。

(3)距离1023~5550m,地表高程90~620m,地形坡度约25°。沿线出露的地层有燕山晚期侵入的花岗闪长岩,三叠系文宾山组下段灰紫色中薄层石英细砂岩夹泥质粉细砂岩及溪口组变质泥质粉砂岩、钙硅质粉砂岩、绿帘透辉钙硅角岩、细砂岩等。沿线发育有F₅₁、F₅₂、F₄₈、F₅₅、F₄₄、F₄₆共6条断层,充填碎裂岩、角砾岩、断层泥等。地下水位埋深5~50m。

(4)距离5550~7800m,地表上为圳古头村后的山头,地表高程180~290m。出露的岩性为燕山早期侵入的粗粒花岗岩和燕山晚期侵入的花岗闪长岩。沿线发育断层F₄₅、F₅₆,充填碎裂岩、角砾岩、断层泥等。地下水位埋深5~50m。

(5)距离7800~13842m,地表高程100~750m。出露岩性为燕山早期侵入的粗粒花岗岩,隧洞沿线发育有F₅₇、F₁₉、F₂₁、F₃₄、F₆₂、F₆₁共6条断层,宽度一般1~3m,充填碎裂岩、角砾岩、断层泥等。地下水位埋深10~50m。

引水隧洞主要长大断层概况见表1-1。

表 1-1 引水隧洞沿线主要长大断层概况一览表

标段桩号	断层编号		断层影响范围(m)	断层宽度(m)	断层产状
1+560.95~1+714.6	F ₅₁ +F ₄₈	F ₅₁	153.65	1~3	15°∠60°
		F ₄₈		1~2	295°∠65°
2+177.15~2+338.1	F ₅₂		160.95	1~2	35°∠72°
2+388.95~2+955	F ₅₅		566.05	2	280°∠65°
4+646.15~4+686.75	F ₄₆		40.6	1~3	80°∠80°
5+515~5+772.8	F ₄₅		257.8	1~3	30°∠60°
5+890~5+926	F ₆₃		36	2~3	70°∠82°
7+366.75~7+604.95	F ₁₉		238.2	2~3	70°∠45°
7+366.75~7+910.25	F ₁₉ +F ₅₆	F ₁₉	543.5	2~3	70°∠55°
		F ₅₆		3~6	350°∠77°
9+753.05~10+137.7	F ₆₄		384.65	1~2	340°∠70°
10+376.85~10+673	F ₂₁		796.05	2~5	330°∠65°

三、施工方法简介

隧洞开挖以“新奥法”指导施工,采用导洞超前 10~15m,预留光爆层进行光面爆破施工。其中以隧洞掘进施工为重点,始终保持连续紧凑的循环作业,即钻爆、通风、出渣、支护循环进行,实现隧洞快速掘进施工。支护包括钢支撑、锚喷网等复合支护,与隧洞开挖平行交叉作业。喷混凝土采用湿喷法施工^[17-20]。

引水隧洞对局部围岩不稳定地段,采取边开挖边进行初期支护,如锚杆、喷射混凝土等,特殊地段必要时可采用超前锚杆、超前灌浆、工字钢拱架、钢筋网加混凝土等初期支护手段施工作临时支护。

为确保工程施工安全,复杂断层地段施工采取特殊支护,封闭引水隧洞周边围岩,形成型钢拱架+喷射混凝土防护层,确保工程后续施工安全。塌空区喷 C25 混凝土回填,塌空较高处无法喷混凝土填满,需预先设置 $\phi 50$ 钢管,待后期二衬完成后,采取回填灌浆的方法将塌空区填满。为克服超前砂浆锚杆在富水地层施工的局限性,超前支护拟采用超前注浆小导管取代超前砂浆锚杆,临时支护采用 I12 型钢拱架+锚喷网联合支护。

第二节 施工面临的主要问题

根据现场施工记录,洞内多次发生涌水突泥事故,给生产安全带来严重影响,多次淹没、冲毁机具设备,并延误工期。规模最大的一次涌水突泥导致停工达半年之久,给工程造成巨大的损失。截至本项目研究工作立项,各类涌水突泥事故已接近 30 起。主要监控记录如下:

2012 年 1 月 8 日—2 月 7 日,3#支洞桩号 0+580 处进行钻底眼工作时突发涌水,致使掌子面积水很快深达 2m,3#支洞至 2012 年 2 月 7 日仍未将水抽排完成。

2012 年 5 月 22 日,3#支洞桩号 0+950 处,凿岩时发生涌水事件,工作面随即被淹没。洞口三角围

堰实测流量约 $140\text{m}^3/\text{h}$ ，已超过设计预计流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的 360% 左右，原有的排水系统已严重不能满足要求，被迫停工。

2012 年 12 月 16 日，引水主洞下游 2# 支洞工区引 3+551 处出现涌水，由于出水量大（洞口实测流量 $135\sim 175\text{m}^3/\text{h}$ ），2012 年 12 月 19 日开始因涌水而导致下平洞积水过深停工，2# 支洞工区由于地质情况较差，坍塌严重，洞身成型质量不好，项目部及时采取了喷混凝土支护措施。掌子面漏水严重，左侧拱部在开挖后即坍塌，后采取钢拱架支护，水量达 $165\text{m}^3/\text{h}$ 以上。

2013 年 4 月 10 日，3# 施工支洞工区在引水主洞下游引 7+925 处，涌水量达到 $438.54\text{m}^3/\text{h}$ ，整个隧洞积水深约 1.7m，主洞及下平洞全被淹没，如图 1-2 所示。

2013 年 5 月 20 日，3# 施工支洞隧洞下游涌水点（引 7+927.5），当时隧洞左侧底板处有大量地下水涌出，出水量 $300\text{m}^3/\text{h}$ 左右。

2013 年 8 月 9 日—8 月 15 日，3# 工区下游引 8+060~8+075 段，工作面 100m 内全洞雨状漏水，钻孔孔眼中高压喷水，出水量约 $60\text{m}^3/\text{h}$ 。

2013 年 8 月 16 日—11 月 7 日，在长达 3 至 4 个月的时间段里，3# 工区下游引 8+075~8+260 段，围岩裂隙发育，破碎，雨状漏水较大，造成隧洞成型较差，塌方突泥，施工机械被冲毁（图 1-3），影响了施工安全。

2013 年 10 月 18 日，2# 工区上游原 2+946 附近（改线后 3+062）突发涌水并塌方。初始 5h 异常平均涌水量达 $675\text{m}^3/\text{h}$ ，整个 2# 工区主洞被涌水淹没，淹没水深约 1m，大量施工设备被水浸泡，工程停工，如图 1-4 所示。

2014 年 4 月 1 日，2# 工区上游从 3+062 开始，在完成管棚注浆工作后发生涌水突泥。水流裹挟残积土及风化残留岩块，形成泥石流冲出，淹没洞身，一台挖装机、一台套梭矿车等设备材料被埋。泥石流冲出近 100m 远，突泥方量根据淹没距离测算接近 $1\,000\text{m}^3$ ，如图 1-5 所示。

2014 年 5 月 4 日，2# 工区 4+100 段附近钻孔时发生有压涌水，水柱喷出工作面约 7~8m 远，漏水影响桩号范围约 15m。



图 1-2 3# 支洞引 7+925 处涌水



图 1-3 洞内突泥（损毁机具）



图 1-4 洞内涌水（主洞淹没）



图 1-5 泥石流（冲毁扒渣机）

第三节 总体构思与主要内容

一、总体构思

龙津溪隧洞穿越花岗岩富水破碎带在隧道工程中极为罕见。其总体的解决思路是先从该区域特殊的岩石物理特性入手,结合地质构造,在其形成原因、空间分布、宽度、物理成分、水文地质条件等认识的基础上,通过分析坍塌机理及围岩压力范围、孔隙水压力分布、注浆参数后,提出“全断面帷幕注浆+超前小导管注浆”的地层改良措施,针对安全穿越花岗岩富水破碎带的施工要求,提出了防突层厚度控制技术、涌水量预测的方法和技术、注浆加固关键技术,并形成整体穿越施工方法。总体解决思路可按“认知自然”“为什么这么干”“具体怎么干”的顺序进行。

二、主要内容简介

龙津溪引水隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带施工关键技术研究是一个系统工程,子系统内容包括勘察技术、现场及室内试验系统、涌水预测系统、注浆加固体系、施工方法等。在研究中把自然科学和社会科学中的基础思想、理论、策略和方法等联系起来,应用数学、力学和计算机等手段,对构成系统的各子系统进行深入细致的分析,最终形成一套完整的体系,服务于工程建设并为今后类似工程的修建提供借鉴。本书主要包括以下内容:

(1)富水风化花岗岩断层破碎带工程特性研究。通过现场地质调绘,分析区域地质资料并结合勘察报告,查明了隧址区工程地质和水文地质条件,查明了沿线地形地貌、地质构造、岩层分布、地下水类型、断层分布特点、岩石风化特征、围岩初步分类等。隧址区的张性断层花岗岩断层带极易形成数百米以上的风化深槽,是良好的富水构造,为隧洞涌水突泥提供了大量的泥质来源。

(2)风化花岗岩物理特性研究。通过对断层构造特点、花岗岩风化特点和水理化特点的分析,采取物性分析及微观结构试验(X射线衍射矿物分析、环境扫描电子显微镜试验)、物理性质试验(含水率、密度、孔隙比/空隙率、界限含水率)、水理试验(吸水率、软化系数)、力学试验(抗剪强度及压缩性指标、各种含水状态的单轴压缩试验)、岩体声波测试(波速比、完整性指数)等试验方法获取了断层带内花岗岩风化残留物(残积土)及断层两侧强风化—微风化花岗岩的物质成分、微观结构、形貌特征、基本物理力学特性及破坏特征,对测试数据进行了统计与分析。

(3)涌水突泥孕育演化过程及断层破碎带对其的影响分析。通过工程实例,结合理论分析及数值模拟结果,对隧洞穿越富水风化花岗岩断层破碎带时涌水突泥的孕育机理、不同阶段的演化机理、各种涌水突泥致灾模式机理进行了分析。并提出孔隙水压力越高,围岩类别越差,涌水突泥风险越大,断层倾角越缓则影响范围越大,影响时间越早,组合断层的交叉点下伏于隧洞时更容易引发涌水突泥事故等观点。

(4)断层防突岩盘安全厚度控制技术研究。将隧洞与断层系统简化成合理的结构理论模型,推导出理论模型中岩体安全厚度的解析表达式,再通过数值模拟计算研究岩体安全厚度与相关因子的关系,得到安全厚度的预测模型。最后以实际工程为背景,建立实例模型研究安全厚度对孔隙水压及渗流速度的影响规律,通过与现场实际采用的安全厚度进行对比,验证计算模型和预测模型的可靠性。

(5)涌水量预测技术研究。采用随机数学与理论计算结合的方法,预测本工程现场涌水量,与传统计算方法和数值模拟涌水量对比研究,得出基于 AHP-Fuzzy 的涌水量预测方法真实可靠。

(6)断层带注浆加固关键技术及穿越涌水突泥灾害段施工方法研究。根据本工程实际情况,结合研究结论,断层破碎带的注浆加固必须采用全断面高压注浆模式,选取普通水泥-水玻璃双液浆,外加速凝剂的方案。根据前述研究成果,注浆加固圈的厚度以 3m 左右为宜,注浆加固段长度以掌子面前方 9~12m 为宜,高压注浆压力以 12~15MPa 为宜,注浆分段以 3m 一段为宜。

第二章 风化花岗岩的物理力学特性

第一节 花岗岩的风化作用及风化产物

一、主要造岩矿物和岩石的抗风化稳定性

各种造岩矿物在风化时的稳定性不同,其风化习性和风化产物也不同,具体区别如下。

(1)长石类中钾长石比斜长石稳定,斜长石中的酸性斜长石又较基性斜长石稳定。

(2)铁镁矿物主要是 Fe、Mg、Ca 的硅酸盐产物,如橄榄石、辉石、角闪石等,它们的稳定性比长石要低得多。其中以橄榄石最易风化,辉石次之,角闪石再次之。

(3)石英是地表最稳定的造岩矿物,在风化作用过程中基本上只有机械破碎。母岩风化愈彻底,风化产物中石英的相对含量愈高。

(4)云母类中白云母稳定性最大,可经常在残积土或沉积岩中看到,黑云母不稳定,常经过水黑云母、绿泥石,最终变为细分散的氧化铁、氢氧化铁或高岭石等黏土矿物。

二、花岗岩风化作用及产物

花岗岩风化作用及产物见表 2-1。

表 2-1 花岗岩的风化作用及产物

矿物成分	化学组分	所发生的变化	风化产物
石英	SiO ₂	残留不变	砂粒
正长石	K ₂ O	成为碳酸盐、氯化物进入溶液	溶解物质
	Al ₂ O ₃	水化后成为含水铝硅酸盐	黏土
	6SiO ₂	少部分 SiO ₂ 游离出来,溶于水中	溶解物质
更长石	3Na ₂ O	成为碳酸盐、氯化物进入溶液	溶解物质
	CaO	成为碳酸盐,溶于含 CO ₂ 的水中	溶解物质
	4Al ₂ O ₃	水化后成为含水铝硅酸盐	黏土
	20SiO ₂	少部分 SiO ₂ 游离出来,溶于水中	溶解物质