



“十三五”国家重点图书出版规划项目

中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

富水岩溶地层大断面公路隧道 施工关键技术

——以双碑隧道为例

方 勇 陈先国
孙立成 康海波

著

Construction
Technology for

Large - Scale Road Tunnels in Water - Rich Karst Stratum

A Case Study Shuangbei Tunnel



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

富水岩溶地层大断面公路隧道 施工关键技术

——以双碑隧道为例

方 勇 陈先国
孙立成 康海波

著

Construction
Technology for

Large-Scale Road Tunnels in Water-Rich Karst Stratum
A Case Study Shuangbei Tunnel



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统阐述了富水岩溶地层大断面公路隧道施工关键技术,共分8章内容。主要内容包括:双碑隧道概况及其施工技术研究重点,双碑岩溶隧道开挖模型试验,双碑隧道开挖稳定性数值分析,双碑隧道施工环境控制,双碑隧道衬砌结构受力特性试验,双碑隧道二次衬砌结构受力特性数值模拟,双碑隧道施工涌水量预测及预警,双碑隧道地层注浆堵水技术。

本书可供隧道及地下工程设计、施工、科研人员使用,也可作为隧道、岩土等专业大专院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

富水岩溶地层大断面公路隧道施工关键技术:以双碑隧道为例 / 方勇等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.6

ISBN 978-7-114-13800-3

I. ①富… II. ①方… III. ①公路隧道—隧道施工
IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 076092 号

书 名: 富水岩溶地层大断面公路隧道施工关键技术——以双碑隧道为例

著 作 者: 方 勇 陈先国 孙立成 康海波

责任编辑: 张江成 李 娜

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14

字 数: 323 千

版 次: 2017年8月 第1版

印 次: 2017年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13800-3

定 价: 78.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着交通事业的不断发展,山区环境下富水岩溶地层成为隧道工程中最具危害性的灾害之一,如锦屏水电站的辅助洞室,大瑶山隧道、军都山隧道、华蓥山隧道等这些高水压岩溶地层隧道都曾发生涌水甚至突泥的灾害。又如成昆铁路的415座隧道中,在施工期间有93.5%的隧道发生不同程度的涌水或突水灾害,其中涌水量超过 $10000\text{m}^3/\text{d}$ 的有8座,严重涌水者13座,不仅填塞坑道,淹埋设备,而且给隧道的工期、成本控制等带来了巨大的困难,甚至危及工程人员生命安全。

双碑隧道工程为重庆市2007—2020年城乡总体规划中的“五横、六纵、一环、七联络”快速路网中“三横线”的重要组成部分,为西部新城紧密联系江北区及北部新区的城市快速干道,是连接沙坪坝区西永副中心和双碑组团的重要通道。双碑隧道位于重庆市沙坪坝区双碑,为双向六车道公路隧道,隧道全长4373m,隧道路线中线间距为20m。2010年7月6日,双碑公路隧道工程开工建设,2014年四季度通车。

双碑隧道穿越中梁山山脉,隧道沿线的岩层以泥质岩和砂岩为主。隧址区域地下水分布广泛,岩溶构造发育且分布规模不均,隧道施工遇高压涌水、突泥风险性较高。可溶岩地段长2127m,占隧道总长的48.6%。可溶岩段的集中涌水、突水突泥将对隧道施工产生危害,岩溶段隧道洞顶水柱高150~200m,对洞顶围岩产生较大的静水压力。隧道预计平时涌水量 $10592\text{m}^3/\text{d}$,雨季涌水量 $26480\text{m}^3/\text{d}$ 。

在岩溶地层发育、水文地质复杂的条件下修建隧道的过程中,地下水处治是工程面临的重大挑战之一,处治不当将威胁隧道施工安全,恶化隧址区水环境。隧道穿越岩溶地层复杂特殊的地质、地貌和构造单元,处于不同应力场、渗流场环境,隧道施工中易出现坍塌、地表下沉、围岩变形甚至失稳破坏等各种地质灾害。隧道下穿城市居民区,隧道爆破开挖对洞周环境处治不当,必定影响隧道上方居民区及附属设施的生产生活。双碑隧道面临的施工难题复杂又相对集中,对隧道施工技术提出了更高要求。

本书结合双碑隧道工程施工案例,按照岩溶隧道的施工工序为顺序,结合现场施工情况,开展了大量的现场试验、室内模型试验、数值分析,研究了富水岩溶地层的处治措施及施工工艺,创新性地提出隧道洞口段优化后的爆破方案,并对传统的注浆堵水措施进行优化,探索大断面公路隧道施工力学行为,提出施工过程中的施工环境、水环境的控制、保护措施。

本书共8章,第1章为概述,主要介绍了富水岩溶公路隧道施工技术研究意义、双碑隧道概况及其施工技术重点研究内容,由陈先国、刘书斌、伍超编写。第2章为双碑岩溶隧道开挖

模型试验,开展室内模型试验,对富水岩溶地层承压溶腔对大断面隧道开挖稳定性做了系统性研究,由方勇、周超月、汪辉武编写。第3章为双碑隧道开挖稳定性数值分析,对现场施工工法、岩溶空洞影响下的隧道开挖稳定性进行了数值分析,由方勇、刘书斌、姚志刚编写。第4章为双碑隧道施工环境控制,系统介绍了隧道施工过程中对洞口环境、洞身环境及隧址区水环境的控制措施,由康海波、蒋雅君、南力辉编写。第5章为双碑隧道衬砌结构受力特性试验,对隧道衬砌结构受力特点、隧道结构破坏形态开展研究,由方勇、徐晨、崔戈编写。第6章为双碑隧道二次衬砌结构受力特性数值模拟,对特大断面隧道在岩溶空洞以及水压力的影响下结构的受力特性进行了探索,并提出类似结构承受水压设计值,由方勇、范建国、邓如勇编写。第7章为双碑隧道施工涌水量预测及预警,主要对运营阶段的涌水量进行预测,并建立了涌水预警措施,由孙立成、蒋雅君、南力辉编写。第8章为双碑隧道地层注浆堵水技术,主要介绍了隧道施工现场对涌突水所采取的注浆堵水措施,由陈先国、孙立成、康海波编写。全书由方勇、陈先国统稿和校核。

撰写《富水岩溶地层大断面公路隧道施工关键技术——以双碑隧道为例》历时四年,经过反复修改,对施工现场大量资料逐一总结、提炼,并开展了大量的室内模型试验、数值分析。本书主要阐述了富水岩溶地层的处治措施及施工工艺、大断面公路隧道施工力学行为、施工环境控制技术。期望能够为从事富水岩溶地层隧道施工的设计、技术人员提供参考,促进富水岩溶地层大断面隧道施工技术的发展。

本书在编著过程中得到了许多基层技术人员的支持与帮助,在此一并向他们致以诚挚的感谢!

鉴于作者水平有限,且书中篇幅较大,参与编写人员较多,书中难免有不妥及疏漏之处,恳请同行及读者批评指正。

作 者
2017年5月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 富水岩溶公路隧道施工关键技术研究意义	1
1.2 双碑隧道概况	2
1.3 国内外研究现状	9
第 2 章 双碑岩溶隧道开挖模型试验	16
2.1 室内模型试验相似原理	16
2.2 试验原型及相似材料	16
2.3 施工全过程相似模拟试验	19
2.4 承压溶腔对隧道开挖稳定性影响	24
2.5 临近溶腔内压对隧道初期支护稳定性影响分析	28
第 3 章 双碑隧道开挖稳定性数值分析	36
3.1 基本假定及计算参数	36
3.2 三车道开挖数值模拟	38
3.3 紧急停车带开挖数值模拟	41
3.4 隧道背后空洞对隧道开挖稳定性的影响分析	44
第 4 章 双碑隧道施工环境控制	61
4.1 洞口环境概况	61
4.2 洞口爆破环境保护措施	62
4.3 洞身爆破环境保护	66
4.4 试爆破及振动监测	82
4.5 水环境控制	95
第 5 章 双碑隧道衬砌结构受力特性试验	96
5.1 相似理论及相似关系	96
5.2 试验模型相似材料	97
5.3 试验加载装置	101
5.4 试验系列设置及量测系统	104
5.5 试验步骤和加载方案	105
5.6 三车道断面试验结果	106
5.7 紧急停车带断面试验结果	116

5.8 衬砌结构内力现场测试	126
第6章 双碑隧道二次衬砌结构受力特性数值模拟	132
6.1 FLAC3D 流固耦合计算机理	132
6.2 数值计算模型	132
6.3 衬砌背后空洞位置对隧道结构的影响	136
6.4 拱顶空洞大小对隧道结构的影响	151
6.5 边墙空洞大小对隧道结构的影响	155
第7章 双碑隧道施工涌水量预测及预警	159
7.1 隧址区水文连通性调查与水质分析	159
7.2 施工过程中涌水量预测	165
7.3 双碑隧道涌水量监测	173
7.4 双碑隧道运营涌水预警措施	175
第8章 双碑隧道地层注浆堵水技术	184
8.1 概述	184
8.2 局部超前预注浆	185
8.3 全断面超前深孔预注浆	186
8.4 开挖后注浆	200
8.5 边墙涌水处理	204
8.6 底板涌水治理	207
参考文献	214

第1章

概 述

1.1 富水岩溶公路隧道施工关键技术研究意义

随着交通事业的不断发展,山区环境下特长隧道越来越多。这些特长隧道往往是工程建设的重要组成部分,穿越各种复杂特殊的地质、地貌和构造单元,并处于不同应力场、渗流场和温度场环境,山区特长隧道施工往往会面临各种地质灾害,其中富水岩溶地层中的突水突泥就是隧道工程中最具危害性的灾害之一。如我国锦屏水电站的辅助洞室、大瑶山隧道、军都山隧道、华蓥山隧道等这些高水压岩溶地层洞室、隧道曾发生涌水甚至突泥的灾害。又如成昆铁路的415座隧道中,在施工期间有93.5%的隧道发生不同程度的涌水或突水灾害,其中涌水量超过 $10000\text{m}^3/\text{d}$ 的有8座,而严重涌水者13座,不仅堵塞坑道,淹埋设备,给隧道施工带来了巨大的困难,严重影响工期,而且可能造成人员伤亡。

岩溶及岩溶水的超前探测是双碑隧道施工中迫切需要解决的问题。施工中不但需要知道前方岩溶的形状、大小、与隧道轴线的关系,还需要确定是否充填、充填物的性质、是否有突水(突泥)危险。隧址区岩溶管道复杂,有的与隧道有直接联系,有的与隧道有间接联系;有些地段隧道与地面水库、渠、江河通过复杂的岩溶管道与相联系,隧道未开挖时,地面水库、沟渠、江河的水与隧道没有联系,一旦开挖至某些地段,通过复杂的岩溶管道,将地面水、江河水系与隧道相通,造成大的涌水及高水压,给隧道施工造成巨大危险。

涌水处理是双碑隧道施工中的又一个困难。双碑隧道施工期涌水量为每小时 $800 \sim 5000\text{m}^3$,涌水压力高达 $2 \sim 7\text{MPa}$ 。岩溶隧道如果处理不当,将严重影响隧道正常运行。

对于大跨度公路隧道,富水岩溶地层围岩的应力场分布与普通地层有很大区别,在溶洞附近有较强的应力集中区,当隧道开挖后,这种应力不均匀分布还会加剧。另外,地下水的存在还会影响围岩、支护以及衬砌的相互作用关系。这种相互作用关系与溶洞的大小、形状、位置、地下涌水量、地下水压等密切相关。此外,在富水岩溶地层条件下,隧道的施工极有可能引起地下水流动的改变,进而影响地表水的赋存。研究地下水流动场的分布特点及与地表水系的相关关系,有利于减少隧道施工对地表水环境的影响。综上所述,对于双碑隧道施工中所面临的关键技术问题,需采用理论分析、数值模拟、模型试验、现场测试相结合的手段进行研究,探明

隧道施工过程中地下水压、围岩、支护、衬砌的相互作用关系及力学行为特征,对于隧道的施工安全具有积极意义。

1.2 双碑隧道概况

双碑隧道工程为重庆市 2007—2020 年城乡总体规划、重庆市“五横、六纵、一环、七联络”快速路网中“三横线”的重要组成部分,为西部新城紧密联系江北区及北部新区的城市快速干道,是连接沙坪坝区西永副中心和双碑组团的重要通道,位于重庆市沙坪坝区双碑。其中双碑隧道全长 4373m,隧道路线中线间距为 20m,双向六车道,Ⅴ级围岩开挖宽度约 16m(不同级别的围岩稍有差别),紧急停车带开挖宽度为 19.3m。隧道平面线形为直线,纵断面采用 0.3%/1630m 及 -2.794%/3500m 的人字坡,路面标高 220.18 ~ 306.06m。隧道预计平时涌水量 10592m³/d,雨季涌水量 26480m³/d,静水压力达 1.80 ~ 2.00MPa。由于双碑隧道富水、岩溶及大跨特点,积极开展相关技术内容的研究,有利于双碑隧道工程的顺利开展、保障施工过程中的安全性及减少对周围环境的影响。

1.2.1 自然地理条件

1) 地形地貌

双碑隧道位于川东平行岭谷区的中梁山南延部分,为构造剥蚀条带状低山地貌,山脉沿北东—南南西方向延伸,海拔高程一般在 300 ~ 600m,隧道穿越的地段附近最高点海拔 581.4m,出洞口附近海拔 210.26m。首先地层受构造应力影响背斜轴部隆起形成山体骨架,随后在漫长的地质演变过程中,轴部出漏的可溶性碳酸盐岩被溶蚀,而两侧硬、厚的砂岩抗风化能力强,被保留下来,在山体两侧形成侧岭,构成“一山二岭一槽”的高位槽谷地形。在“一槽”中部发育了浑圆状溶蚀丘陵,溶蚀丘陵大致沿背斜轴分布,又把槽谷分为东西两槽,从而形成“一山两槽双岭”的地貌景观。

隧道穿越区按微地貌特征可划分为 3 个微地貌单元:

(1) 西侧低山斜坡区:隧道里程 K2 + 298 ~ K3 + 100 段,长 802m,位于中梁山西侧斜坡,属构造剥蚀低山地貌,地面高程 290 ~ 540m,地势陡峻。

(2) 低山岩溶槽谷区:隧道里程 K3 + 100 ~ K5 + 460,长度 2300m,为岩溶槽谷区,地形平缓开阔,地面高程 470 ~ 530m,地面岩溶不发育,槽谷区发育岩溶漏斗,岩溶漏斗大致沿构造线成串珠状排列,形成地面负地形直径一般 10 ~ 20m,个别超过 30m。

(3) 东侧低山斜坡区:隧道里程 K5 + 460 ~ K6 + 673,长 1213m,位于中梁山东侧斜坡,属构造剥蚀低山地貌,地面高程 210 ~ 552m,地势一般为缓坡,局部较陡。

2) 气象水文

(1) 气象

双碑隧道沿线属亚热带温湿季风气候区,具雨量充沛、夜雨多、空气湿度大、云雾多,日照偏少等特点。根据重庆市气象局的气象观测资料,调查区内的气象特征具有空气湿润,春早夏长、冬暖多雾、秋雨连绵的特点,年无霜期 349 天左右。

气温:多年平均气温 18.3℃,月平均最高气温是 8 月为 28.1℃,月平均最低气温在 1 月为

5.7℃,极端最高气温43℃,极端最低气温为-1.8℃(1975年12月15日)。

降水量:多年平均降水量1082.62mm左右,降雨多集中在5~9月,其降雨最高达746.1mm左右,日降雨量大于25mm以上的大暴雨日数占全年的降雨日数的62%,小时最大降雨量可达62.1mm。1998年降水量最多年,年降水量1615.80mm,2001年为降水量少,年降水量813.90mm。多年平均最大日降雨量约90mm。2007年7月17日,遇百年不遇的特大暴雨,日降雨量达266.7mm。各月及年平均降水量见表1-1。

各月及年平均降水量(单位:0.1mm)

表1-1

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
平均降水量	193	204	380	914	1583	1650	1530	1369	1329	965	461	248	10826

湿度:多年平均相对湿度79%左右,最热月份相对湿度70%左右,最冷月份相对湿度81%左右。

风:全年主导风向为北,频率13%左右,夏季主导风向为北西,频率10%左右,年平均风速为1.3m/s左右,最大风速为26.7m/s。

(2) 水文

区内水系以过境河流长江及其支流嘉陵江为骨干,分别自西南、西北两侧流入,至重庆市朝天门回合后向东出境;次级支流有小安溪河、璧山河、梁滩河、御临河等,大体上沿北东~南西向发育,多在岩性相对软弱之丘陵区蜿蜒;更次一级的溪流在区内发育普遍,其特点一般是发源于各低山区,横切低山斜坡流向丘陵区,源近流短、沟窄坡陡。从1:20万水文地质图可知,本区地面分水岭在双碑隧道以南13km的白市驿一带,地下水分水岭与地表分水岭基本一致,地下水呈条带状分布于背斜轴部,本隧址区地下水由南向北作纵向径流和排泄。区内地下水主要排泄到嘉陵江。

1.2.2 地层岩性

双碑隧道沿线出露地层主要为第四系残坡积粉质黏土、红黏土,沿线的岩层以泥质岩和砂岩为主。可溶岩地段长2127m,占隧道总长的48.6%,可溶岩段的集中涌水、突水突泥将对隧道施工产生危害,岩溶段隧道洞顶水柱高150~200m,对洞顶围岩产生较大的静水压力。各地层及岩性现由新到老分述如下:

(1) 第四系地层(Q₄)

残坡积层包括黏土和红黏土。黏土:黄褐色、紫褐色,可塑性,一般分布在丘陵区,厚度1~3m。红黏土:黄色,可塑~硬塑状,分布在岩溶槽谷区,属液限大于50的原生红黏土,厚度5~10m。

(2) 侏罗系中统新田沟组(J_{2x})

主要以泥质岩类为主,上部为灰绿色、黄绿色泥岩夹粉砂岩、岩屑长石砂岩、紫红色泥岩,下部为紫红色泥岩夹黄绿色泥岩、深灰色页岩、石英粉砂岩,底为灰黄色孔洞状细粒石英砂岩,厚度100~150m,分布于隧道进、出洞口附近。

(3) 侏罗系中、下统自流井组(J_{1-2z})

以泥岩为主,中、上部主要为紫红色泥岩、钙质泥岩,偶夹石英砂岩及粉砂岩,靠上部夹灰

色生物碎屑灰岩和泥质灰岩,下部黄灰色、灰绿色泥岩夹黄灰色介壳粉砂岩、介壳灰岩,厚度 150 ~ 190m。

(4) 侏罗系下统珍珠冲组(J_1z)

浅灰色、灰色、紫红色、灰绿色泥岩,黄灰色薄~中厚层状细粒石英砂岩、粉砂质泥岩夹薄层石英砂岩,不等粒岩屑石英砂岩,与下伏须家河地层呈平行不整合接触,厚度 200 ~ 250m。

(5) 三叠系上统须家河组(T_3xj)

分布于背斜两翼陡坡地带,为内陆湖泊沼泽相~河流沼泽相碎屑岩含煤建造,含煤岩段不稳定,往南有减少变薄的趋势,所夹煤层一般较薄,煤层厚度 0.20 ~ 0.30m,以薄煤层或煤线产出,与下伏雷口坡组呈平行不整合接触。据 1:50000 区域水文地质调查报告,中梁山背斜须家河组地层北部可进行六分,中部可进行四分,南部不易区分。此处沿用六分法,但把二、三、四段进行合并(因为三段不发育)。

①六段:灰白色、黄褐色厚层块状中~粗粒长石石英砂岩、长石岩屑砂岩、岩层石英砂岩,夹砂质页岩、粉砂岩薄层;本次勘察在 SD12 钻孔中揭露到 1 层软砂岩,岩质极软,钻探岩心呈沙状、偶见碎块手捏易散,其铅直厚度约 10m,真厚度约 1m,位于中部,地层厚度 90 ~ 100m。

②五段:灰色、深灰色薄~中厚层细~中粒长石石英砂岩、泥岩、砂岩泥岩夹薄层粉砂岩、泥质页岩、薄煤层或煤线,含菱铁矿结核、植物碎屑,偶见泥晶灰岩透镜体;厚度 20 ~ 40m。

③二段、三段、四段:浅灰、灰黄色厚层块状中粒长石石英砂岩、长石砂岩、岩屑石英砂岩,局部夹粉砂岩、砂质泥岩、页岩、灰质页岩;厚度 200 ~ 260m。

④一段:灰深灰色砂质泥岩、页岩,下部夹炭质页岩、薄煤层及煤层,可采煤层 1 ~ 2 层;厚度 80 ~ 120m。

(6) 三叠系中统雷口坡组(T_2l)

灰色,黄灰色厚层块状白云岩、白云质灰岩、角砾灰岩、岩溶角砾岩,底为黄绿色水云母黏土岩,厚度 60 ~ 80m。

(7) 三叠系下统嘉陵江组(T_1j)

分布于背斜近轴部,原则上可进行四分:一、三段以灰岩为主,二、四段以白云质灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩为主。

①四段:黄灰色,中厚层块状白云岩、泥灰岩。

②三段:灰~灰白色,中厚层块状灰岩、生物碎屑灰岩。

③二段:灰~黄灰色,中厚层状灰岩夹 3 层 1.40 ~ 5.40m 厚的石膏岩。

④一段:灰色,薄层~中厚层灰岩、生物碎屑灰岩,灰岩含泥质不均匀,常显层纹状、条带状或蠕虫状,缝合线构造发育,厚 250 ~ 300m。

(8) 三叠系下统飞仙关组(T_1f)

本组右侧在地面上未出露,根据钻探揭露在本隧址区的背斜轴部区出现飞仙关组的第四段和第三段地层。

①四段:紫红色、棕红色泥岩、泥灰岩、页岩;厚度约 40m。

②三段:灰色,深灰色中厚层状灰岩,泥质灰岩;厚度大于 40m,本次钻探未完全揭露。

1.2.3 地质构造

双碑隧道位于川东弧形构造带,华蓥山帚状褶皱束东南部,构造骨架形成燕山期晚期构造

运动。隧道穿越华蓥山帚状褶皱束的观音峡背斜,观音峡背斜为不对称梳状扭转背斜,背斜轴在走向上呈波状起伏,且背斜轴线有南东偏转现象,隧道通过段背斜轴线近南北向。背斜两翼岩层倾角差异大,西翼陡东翼相对较缓,背斜东翼产状 $90^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 左右,西翼产状 $270^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,嘉陵江组下段灰岩组成背斜轴,须家河组砂岩组成背斜两翼,地势陡峭,未见断层,节理发生与构造运动密切相关,主要走向 NEE—SWW 和走向 NW—SE 两组较发育。

根据调查,背斜轴部平缓,石盘湾—团山堡—青杠林一带为背斜轴部,轴部宽度大约 200m,形成轴部的嘉陵江组 1 段地层内褶皱比较发育,轴部岩层产状变化大,常发育小型褶皱,岩石较破碎。根据钻探揭露,勘探范围内背斜轴部无明显增厚和脱空现象。区内裂隙统计表明:

①背斜轴部: $J_1(45^{\circ} \angle 69^{\circ})$ 、 $J_2(247^{\circ} \angle 75^{\circ})$,间距条/0.5m,隙面平直; $J_3(340^{\circ} \angle 70^{\circ})$,间距条/1m,隙面平直。 J_2 、 J_3 为共轭“X”节理。浅表面裂隙发育程度为较发育,钻探揭露深部不发育。

②背斜东翼须家河组: $J_4(250^{\circ} \sim 270^{\circ} \angle 25^{\circ} \sim 35^{\circ})$ 、 $J_5(175^{\circ} \angle 41^{\circ})$ 、 $J_6(10^{\circ} \angle 70^{\circ})$,隙面平直,间距 2 条/3m,裂隙发育程度为不发育。

③背斜西翼珍珠冲组地层: $J_7(180^{\circ} \angle 78^{\circ})$ 、 $J_8(240^{\circ} \angle 30^{\circ})$,裂隙发育程度为较发育。

经整理得出,背斜东翼主要发育有 3 组节理 J_4 、 J_5 、 J_6 ;背斜轴部主要发育 3 组 J_1 、 J_2 、 J_3 ,其中 J_2 和 J_3 为共轭节理;背斜两翼在珍珠冲组地层内测得 2 组节理 J_7 和 J_8 。地勘调查显示,观音峡背斜地层产状西陡东缓,在西翼的自流井组、珍珠冲组内部分地段出现倒转现象,而东翼相对较缓。当燕山晚期北西南东向的区域应力作用于本区留下构造形迹即形成观音峡背斜,在应力的持续作用下,致使背斜东翼产状缓而西翼产状陡,甚至倒转,形成不对称的背斜,同时在轴部因褶曲而形成张性裂隙,在翼部则表现为压扭性质,特别在柔性含泥岩类、泥灰岩和软硬相间地层内表现出较为强烈的层间挤压、揉碎特征。

1.2.4 岩溶特征

研究区的岩溶水岩组主要为 $T_2l + T_{1j}$ 及 T_1f_3 、 T_1f_1 地层, $T_2l + T_{1j}$ 岩溶含水岩组分布于中梁山的東西槽谷中,地貌上为两个槽。岩溶槽谷是最大的岩溶景观,其次是地表岩溶形态有落水洞、天窗、溶沟、溶槽等。在东槽谷的北段,发育有一系列的串珠状落水洞、暗河天窗、溶蚀洼地;西槽谷的横向开放边界附近,也有水平溶洞分布。中梁山观音峡背斜是个波状扭曲的不对称背斜,不同的构造部位,岩溶发育强度存在显著的差异。在背斜北段,由于西翼倾角陡、东翼缓,造成可溶岩出露面积差别较大,进而导致东翼岩溶发育程度比西翼强。本区溶洞均呈 NNE 向展布,明显受控于 NNE 向构造。背斜鞍部,地势较低,为地下水汇集提供了条件,成为局部排泄区。另外,在背斜两翼均出露有 T_3x 相对隔水层,可溶岩的岩溶作用局限于狭长的地带内进行。但是,由于某些地段的开放性,形成局部侵蚀基准面,造成岩溶发育程度的差异,如西槽谷有流水岩、大水沟等横向开发边界,为浅层岩溶水提供了排泄条件,使岩溶作用的水动力条件减弱,所以西槽谷岩溶水以溶隙、裂隙流为主;东槽谷无侧向开放边界,加上汇水面积大,水动力条件较强,所以东槽谷岩溶水以管道流为主。虽然东、西槽谷岩性组合和地质构造条件基本相同,但由于东翼槽谷可溶岩出露面积大,使其岩溶发育程度高于西槽谷。

1.2.5 地下含水层组及岩体渗透特征

1) 地下水质特征

双碑隧道水文地质条件由其独特的地形、构造和岩性条件控制。双碑隧道所穿越的中梁山山脉大致呈南北延伸,北部在北碚被嘉陵江切割,南部在小南海被长江切割,两翼陡倾的含水层与隔水层相间分布,决定了背斜核部的地下水径流方向总体为沿岩层走向运动向嘉陵江和长江排泄,地下水横向运动不明显。由于背斜两翼三叠系煤层不同程度的开采和其他已建隧道的开凿,地下水大量被疏排,地表溪沟多干涸,泉点出露少。井泉点主要分布在嘉陵江组灰岩中,岩溶泉一般被当作居民生活用水或筑坝成库供农田灌溉,如余家湾水库、凌云水库等。

沿线的岩层以泥质岩和砂岩为主,可溶岩地段长 2127m,占隧道总长的 48.6%,可溶岩段的集中涌水、突水突泥将对隧道施工产生危害,岩溶段隧道洞顶水柱高 150~200m,对洞顶围岩产生较大的静水压力。隧道预计平时涌水量 $10592\text{m}^3/\text{d}$,雨季涌水量 $26480\text{m}^3/\text{d}$ 。静水压力达 1.80~2.00MPa,属于静水压力较大的隧道。为保证施工及结构安全,降低施工的风险性,富水地段采用动态施工。

(1) 地下水类型及富水性

根据隧道区地下水的赋存条件、水理性质及水动力特征,可将地下水划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水。地下水受大气降雨和地面池塘水体渗漏补给,隧址区沿线大气降水充沛,地下水补给条件良好,一般情况下,第四系松散层含孔隙水,砂岩含孔隙裂隙水,碳酸盐岩含裂隙岩溶水,泥岩为相对隔水层。

(2) 地下水水质类型及腐蚀性

本隧址区地下水水质较好,质多为 $\text{CO}_3^{2-}-\text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{CO}_3^{2-}-\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}$ 型水,矿化度 $\leq 1.0\text{g/L}$,均为淡水,pH 值 7.33~8.48。其中,珍珠冲组、雷口坡组地层,以及嘉陵江组灰岩内夹石膏岩段的地下水具有 C 级腐蚀性,须家河地层的地下水具有 D 级腐蚀性。

2) 主要含水岩组及其特征

根据隧址区地下水的赋存条件、水理性质及水动力特征,可将地下水划为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐类裂隙溶洞水三大类。

(1) 松散岩类孔隙水

双碑隧道进、出口附近、背斜轴部槽谷内第四系残坡积、坡积松散块石土、碎石土、黏性土中赋存该类松散岩类孔隙水,富水程度受控于松散堆积物的岩性、厚度、分布位置和地形切割破坏等条件,一般含水性差,水量匮乏,受大气降水影响明显。该类水对隧道涌水影响小。

(2) 碎屑岩类孔隙裂隙水

①基岩风化带网状孔隙、裂隙水:赋存于新田沟组、自流井组合珍珠冲组砂岩和泥岩中的浅层地下水,分布于隧道进出口附近,其富水性受岩性及裂隙发育程度控制。地表偶见泉水出露,属于弱含水层。此类地下水对隧道影响小,在隧道施工中可能呈现滴状水出现。

②基岩孔隙裂隙水:赋存于中、微风化砂岩、泥岩中的地下水。以砂岩裂隙水为主,其赋存状况除受岩性控制外,还与所处的地形地貌和构造关系密切。砂岩、泥岩主要分布于背斜两

翼,局部张性裂隙较发育,有一定数量的裂隙水,预计隧道通过此层虽无大的地下水涌出,但在裂隙较发育的地段,仍可能有滴状水或小股水涌出。

(3) 碳酸盐类裂隙溶洞水

含水岩组为三叠系中统雷口坡组、下统嘉陵江组及飞仙关组灰岩。其中,雷口坡组与嘉陵江组为测区主要岩溶含水岩组,顶部和底部均为页岩所隔,地表呈狭长槽谷,地下水有南向北运动,地下岩溶水丰富,区域资料显示隧址区下隐伏的飞仙关灰岩岩溶发育。预计隧道通过此地层,在岩溶发育段可能存在突水、突泥现象。

地下水受大气降水和地下池塘水体渗漏补给,隧址区沿线大气降水丰沛,地下水补给条件良好。一般情况下,第四系松散层含孔隙水,砂岩含孔隙裂隙水,碳酸盐类含裂隙岩溶水,泥岩为相对隔水层。

3) 岩体渗透性特征

根据工程地质资料得出,双碑隧道隧址区的岩体渗透系数见表 1-2。

隧址区岩体渗透系数

表 1-2

里程	$K(m/d)$	地层	地质条件
K2 + 298 ~ K2 + 368	0.002	J_2x	主要以泥质岩为主。上部为灰绿色、黄绿色泥岩夹粉砂岩、岩屑长石砂岩、紫红色泥岩;下部为紫红色泥岩夹黄绿色泥岩、深灰色页岩、石英粉砂岩;底部为灰黄色空洞状细粒石英砂岩
K2 + 368 ~ K2 + 557	0.002	$J_{1-2}z$	以泥岩为主。中上部主要为紫红色泥岩、钙质泥岩,偶夹石英砂岩及粉砂岩;下部为黄灰色、灰绿色泥岩夹黄灰色介壳砂岩、介壳灰岩
K2 + 557 ~ K2 + 777	0.005	J_1z	浅灰色、灰色、紫红色,灰绿色泥岩、黄灰色~中厚层状细粒石英砂岩、粉砂质泥岩夹薄层石英砂岩,不等粒岩屑石英砂岩
K2 + 777 ~ K3 + 345	0.05	T_3xj	以砂岩、页岩为主,块状~粗粒~中粒长石石英砂岩,夹页岩、薄煤层及煤线
K3 + 345 ~ K4 + 023	0.9	T_2l/T_{1j}	以灰岩、白云质灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩为主。灰岩占的长度比较大,形成岩溶槽谷
K4 + 023 ~ K4 + 678	0.04	T_1f	以灰岩为主。紫红色、棕红色泥岩、泥灰岩,夹泥质灰岩、页岩
K4 + 678 ~ K5 + 472	0.9	T_2l/T_{1j}	以灰岩、白云质灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩为主。灰岩所占长度比较大,形成岩溶槽谷
K5 + 472 ~ K6 + 075	0.05	T_3xj	以灰岩、白云质灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩为主。灰岩所占长度比较大,形成岩溶槽谷
K6 + 075 ~ K6 + 350	0.005	J_1z	浅灰色、灰色、紫红色,灰绿色泥岩、黄灰色~中厚层状细粒石英砂岩、粉砂质泥岩夹薄层石英砂岩,不等粒岩屑石英砂岩
K6 + 350 ~ K6 + 553	0.002	$J_{1-2}z$	以泥岩为主。中上部主要为紫红色泥岩、钙质泥岩,偶夹石英砂岩及粉砂岩;下部为黄灰色、灰绿色泥岩夹黄灰色砂岩、灰岩
K6 + 553 ~ K6 + 673	0.002	J_2x	主要以泥质岩为主,上部为灰绿色、黄绿色泥岩夹粉砂岩、岩屑长石砂岩、紫红色泥岩;下部为紫红色泥岩夹黄绿色泥岩、深灰色页岩、石英粉砂岩。底部为灰黄色空洞状细粒石英砂岩

1.2.6 地下水补给、径流、排泄特征

根据1:20万区域水文地质调查报告(重庆幅)和实地调查,本区碳酸盐类岩溶水集中出现于背斜轴线与核心地带,碎屑岩孔隙裂隙水分布于背斜两翼斜坡区。歌乐山为本区最高山,南北向延伸,分别在小南海及北碚附近为长江及嘉陵江横切,成为本区地下水的出水口。中梁山地下水分水岭位于本隧道南12.5km左右,分水岭以北向嘉陵江排泄,分水岭以南向长江排泄。该隧道位于分水岭以北,所以地下水由南向北排泄。根据地表分水岭脊线圈定,隧址区的汇水面积约20km²,主要由大气降雨对地下水进行补给。

根据调查,本隧址区历史上曾有岩溶发育,溶洞以燕儿洞为代表。燕儿洞位于拟建隧道北侧,洞口高程520m,洞高20m~25m,长约200m,石钟乳和泉发育。溶洞明显分为两层,上层无水,下层有长年流水。上、下两层溶洞高差约20m。这一现象说明隧址区早期岩溶较发育,并有一定规模,随着地质历史的演变,岩溶管道变迁,侵蚀基准面下降,目前地下水位约470m,侵蚀基准面在高程460m左右。因岩溶发育的继承性,地下水仍局部保留了前期的径流的特点。由于含水层与隔水层相间分布决定了本区地下水主要沿岩层走向(南北向)分别向两江排泄,而东西方向径流条件差,含水层间水力联系不明显。隧址区属径流区,地下水主体流向由南向北。

拟建隧道通过的槽谷区地形地貌可分为东槽谷和西槽谷两个微地貌。建渝怀铁路井口隧道(2003年竣工)时,东槽谷内的井泉水、岩溶水等被疏干。据当地居民介绍,东槽谷的凌云水库也曾被短时间内疏干,后隧道采取了封堵措施,井泉水又逐步有所恢复,而西槽谷在修建渝怀铁路井口隧道的过程中,未出现岩溶地下水漏失情况,另外在调查附件已竣工隧道地下水排泄情况时了解到,暴雨期间西侧洞口排水量增加不明显,东侧洞口排水量增加明显(2~3倍)。上述情况也说明东、西槽谷存在各自相对独立的地下水体系,东槽谷地下水浅部与深部联系密切,西槽谷地下水深部与浅部联系相对较差。

根据本次调查,结合区域地质资料分析,拟建隧道位于岩溶地下水垂直分带的深部循环带上,主要为溶缝及管道流,在隧道施工可能遇到的主要工程地质问题是岩溶突水,其特点是流量大、压力高,有流沙的可能,危害大。

双碑隧道为在富水岩溶地层条件下修建的三车道特长公路隧道,其施工过程主要面临的技术难点包括:富水地层处治措施及施工工艺、大断面富水岩溶地层隧道施工力学行为、水环境控制技术等,为此急需开展以下内容的研究:

(1) 富水岩溶地层的处治措施及施工工艺

富水岩溶隧道施工时,根据设计文件有关地质资料和现场超前地质预报成果,首先应尽量查明岩溶地下水流情况,然后可按照岩溶水对隧道的影响程度和现有的施工条件,制定出切实可行的施工防水处理措施。对于无充填型溶洞,应根据溶洞的规模、与隧道的位置关系、富水情况、基岩情况等综合判断,提出相应的处治措施,如采用跨越式或封堵式。对于充填型溶洞,则应根据溶洞的水压、水量等情况综合确定处治措施,如采用换填还是注浆加固等。溶洞充填物的特点是松软、含水量高、下沉量大、强度低、稳定性差,大多由泥砂及其混合物组成。当隧道必须穿越时,应结合具体情况采取相应的隧道基底加固措施,如换填、注浆加固、钢管桩加固等。

(2) 富水岩溶地层大断面公路隧道施工力学行为

① 富水岩溶地层大断面公路隧道开挖稳定性分析:

岩溶地层隧道施工难点主要有两个方面:一方面是岩溶空腔与隧道交汇地段,地应力场的分布异常复杂,隧道开挖稳定性难以保证。另一方面,隧道洞口段埋深较浅、围岩难以成拱,导致进洞困难。隧道穿越岩溶地层开挖,保证隧道开挖稳定至关重要,而选择合理的施工工法是保证隧道穿越岩溶地层开挖稳定性的前提。建立岩溶地层数值模型,对设计文件提出的隧道洞口段施工工法进行比选,并对洞身段不同围岩条件下的开挖工法进行论证,确定合理的施工工法,以确保施工安全。

② 富水岩溶地层大断面公路隧道衬砌受荷载力学特性及破坏特征分析:

岩溶地层衬砌背后岩溶空洞的存在将导致隧道衬砌结构所承受的荷载与非岩溶区有很大差异,隧道衬砌结构所受的荷载分布极为不均匀。这些差异的存在导致隧道在岩溶区衬砌结构的受力特征也不同。同时岩溶地层的富水特点也对衬砌结构承载能力提出更高的要求。探究设计衬砌结构所能承受的荷载大小、衬砌结构过载后的破坏特征、衬砌背后空洞存在对于衬砌受力的影响,对保证隧道衬砌结构安全必不可少。采用室内模型试验,对设计衬砌结构进行加载直至破坏,得出衬砌结构所能承受的极限荷载、破坏特征,经设计衬砌结构的安全性论证,得出空洞对于衬砌受力的影响,为衬砌结构设计提供依据。

(3) 富水岩溶地层隧道施工环境控制技术

在富水岩溶地层条件下,隧道施工将引起地下水流场的改变,进而影响地表水环境。研究地下水流场的分布特点及与地表水系的相关关系,有利于减少隧道施工对地表水环境的影响。基于地下水流场的研究结果,根据隧道开挖后地下水的涌出情况、地表水环境的改变,综合得出隧道内为水环境的相关关系,并提出相应的控制技术。同时,根据地表气象及水文监测、洞内涌水量监测、衬砌结构内力监测数据,建立双碑隧道岩溶涌水预测及预警系统,保障隧道施工及后期营运安全。

双碑隧道为城市市政公路隧道,洞口位于居民住宅区,隧道上方有高压电塔、铁路及其他工业与民用建筑。其中,洞口进洞爆破需做好洞口飞石防护及噪声控制,进洞后下穿重要构筑物时,还需对上方重要构筑物进行振动监测,根据现场振动监测结果,实时调整爆破方案。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 富水岩溶地层的处治措施

岩溶是水对可溶岩的化学溶解作用与机械破坏作用,以及由于这些作用所引起的各种现象与形态的总称。我国的岩溶区域分布较广,地质条件也较为复杂,在国际岩溶的研究中具有地域上的优势。岩溶隧道灾害主要有岩溶涌突水、岩溶地表塌陷等,其中岩溶涌突水对隧道施工的危害最大,也是最难于治理的。针对岩溶隧道涌突水的研究,主要结合工程实践进行,岩溶涌突水治理的实例散见于众多文献中,归纳起来主要有岩溶涌突水治理原则和不同岩溶的治理方法的研究。

关于岩溶隧道涌突水原则方面,主要认为在施工中应尽量地对可能产生涌突水的地段采

取合理的措施进行预处理,尽可能地避免在揭露岩溶水后进行再处理,因为一旦岩溶区段发生涌水和突泥,岩溶水的转移路径将发生一定的变化,岩溶管道会进一步的被疏通,水量和水压都将增大,从而进一步增加了治理的难度。同时由于涌水的出现,隧道的现场施工环境和安全状况也会随之变差,治理的风险和费用也会相应地增大。因此,岩溶灾害方面的处理应遵循重视疏导、堵排结合、因地制宜、综合治理这一原则。

关于不同岩溶的治理方法方面,主要应依据岩溶的表现形式、特征及环境条件而定,岩溶的治理主要有疏、堵、排、绕等多种方法。总结国内外岩溶处理的经验,岩溶主要处理方法见表 1-3。

岩溶主要处理方法

表 1-3

岩溶类别	岩 溶 特 征	处 理 方 案	主要施工措施
溶隙	溶隙宽度很小,水量和水压很小,清水	完全封堵或直接引排	径向、局部或补充注浆;排水盲管和排水沟引排
溶管	1. 基本无充填物,清水 2. 充填物较少,溶管直径较小,水量和水压较小 3. 充填泥沙,出水浑浊 4. 溶管发育方向明确	1. 直接引排 2. 直接封堵 3. 完全封堵或堵排结合,限量排放 4. 连通岩溶管路,保证水流畅通	1. 安装排水盲管和修排水沟直接引排 2. 通过注浆,进行完全封堵 3. 大堵小排,堵泥排水,限量排放 4. 通过连通岩溶管路引排
溶洞	1. 规模不大,溶洞内充填物松软,水量、水压加强支护很小,自稳能力较好 2. 规模大、充填物复杂、水量大水压高 3. 已停止发育的干溶洞 4. 隧道底部溶洞充填物片石等,并进行补充注浆	1. 注浆封堵、基底加固 2. 以堵为主,限量排放 3. 回填空腔,完全封闭 4. 注浆加固、换填、桩基础等	1. 小导管或大管棚注浆,锚、网、钢拱架、钢筋混凝土、径向注浆、换填、桩基等 2. 超前、径向、局部和补充注浆,泄水洞排水减压 3. 喷混凝土、泵混凝土、浆砌 4. 底板注浆加固;混凝土、浆砌片石等换填;采用粉喷、旋喷、钢管桩等加固
溶洞暗河	充填物很少或基本无充填物,岩溶水量较大,水量稳	桥、涵跨越;暗管引水;如环境允许,用泄水洞排水;远处截水	修建桥梁、涵洞进行跨越;修建涵管疏通过水通道;修建泄水洞排水;修建排水洞或注浆截水
溶洞涌水突泥	1. 溶洞规模大,水量小、水压小、突泥量小,涌出物呈软塑状态; 2. 溶洞规模大,水量大、水压大、突泥量大,涌出物呈流动状态; 3. 溶洞规模大,水压不大,突泥量也不太大,但地层应力很大,涌出物呈干硬状态 4. 局部发育小溶洞、水压力和土压力均较小,涌泥量也较小	1. 直接封堵,加强支护 2. 观察判断溶洞压力,防止爆喷型涌水、突泥;注浆堵水和加固围岩;如条件允许,应采用排水降压的方式或采用迂回导坑法进行处理 3. 观察、判断溶洞发生爆喷型涌水、突泥的可能;超前钻探,进一步探明地质;进行压力释放后封堵 4. 对周边或局部围岩进行注浆,然后开挖;局部进行回填	1. 超前、局部注浆,超前小导管或大管棚支护,喷、锚、网、钢拱架联合支护 2. 进行水压力变化测试;全断面注浆,超前小导管或大管棚支护,径向注浆、局部和补充注浆;条件允许时,修建排水洞进行排水降压,先迂回后处理 3. 溶洞压力较大时应先观察和待避,钻孔或爆破释放内压;注浆堵水加固围岩 4. 周边注浆,小导管、大管棚加固围岩;回填混凝土、浆砌片石或局部注浆封堵

在岩溶灾害的防治技术方面,已总结出针对不同类型岩溶的常规处理方法,这些方法在现场隧道设计施工中发挥了一定作用。但是存在着岩溶分类模糊,处治对策针对性不强、需要多种方法反复尝试等问题,目前岩溶的处治技术方面尚没有形成一套系统的原则和规则性的指