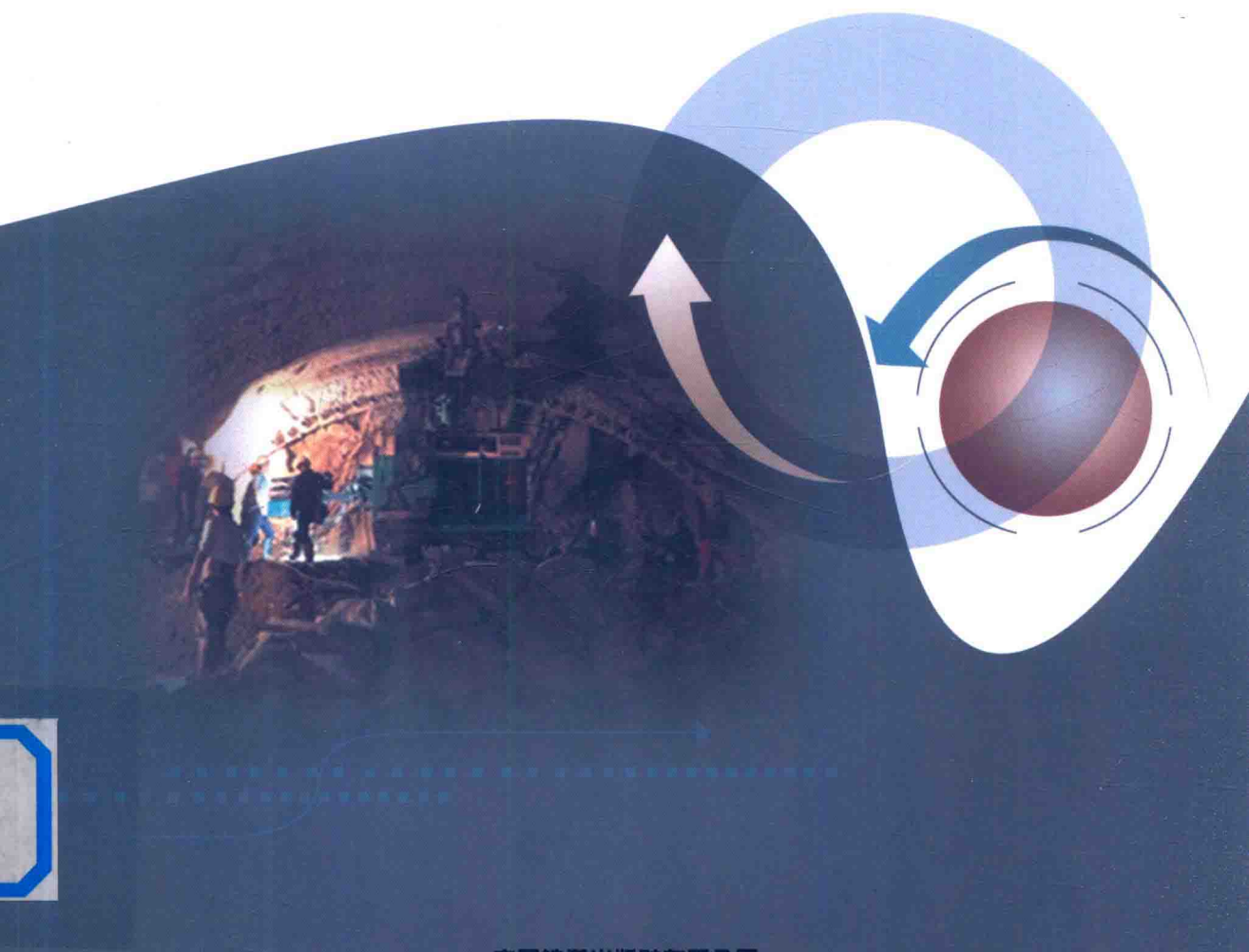


岩溶区高速铁路隧道 修建技术

YANRONGQU GAOSU TIELU SUIDAO XIUJIAN JISHU

邓 勇 孙星亮 吴应明 著
谭忠盛 陈耀华



中国铁道出版社有限公司
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO., LTD.

图书在版编目(CIP)数据

岩溶区高速铁路隧道修建技术/邓勇等著. —北京:
中国铁道出版社有限公司, 2019. 8

ISBN 978-7-113-25837-5

I. ①岩… II. ①邓… III. ①岩溶区-高速铁路-铁路
隧道-隧道施工 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 115153 号

书 名: 岩溶区高速铁路隧道修建技术
作 者: 邓 勇 孙星亮 吴应明 谭忠盛 陈耀华

责任编辑: 张卫晓 编辑部电话: (010)51873193

封面设计: 崔丽芳

责任校对: 孙 玫

责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社有限公司(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

版 次: 2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 16.5 字数: 410 千

书 号: ISBN 978-7-113-25837-5

定 价: 86.00 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

前 言

随着铁路建设的快速发展,铁路隧道数量大幅增加,尤其是近十几年来,高速铁路得到了迅猛发展。截至2017年年底,投入运营的铁路隧道总长达到15 326 km;投入运营高速铁路总长达2.5万 km,已经建成高速铁路隧道2 835座,总长达4 537 km;另外还有在建的高速铁路隧道总长超过3 000 km。由于我国岩溶分布相当广泛,一些高速铁路穿越岩溶区,出现了大量的岩溶隧道,如沪昆高铁贵州段出现了众多的富水岩溶地质隧道。岩溶隧道施工面临的重大风险就是突水突泥地质灾害,多数属于高风险隧道。高风险岩溶隧道的顺利建成,推动了我国高速铁路岩溶隧道工程的技术进步,也积累了宝贵的施工经验。本书主要内容是对沪昆高铁贵州段第九标段典型岩溶隧道工程经验的系统归纳、总结和提炼,以期对今后类似工程提供借鉴。

全书共九章,第1章主要介绍了我国高速铁路隧道的发展情况及岩溶隧道的施工技术现状及存在的问题。第2章主要介绍了隧道超前预报方法及在岩溶隧道工程中的应用,强调在高风险的岩溶隧道施工中应采用多措并举的综合地质超前预报方法。第3章介绍了岩溶发育的宏观规律、岩溶隧道施工中的突水突泥机理及隧道与溶洞间临界安全距离、隐伏溶洞岩墙中存在裂隙时对隧道施工安全的影响。第4章介绍了自进式管棚预支护在软弱围岩高铁隧道中的应用、施工效率分析、预支护参数设计及在塌方处理中的应用。第5章介绍了岩溶的分类、处理原则、大型岩溶溶洞及暗河的处理技术及工程案例。第6章介绍了大理深岩溶角砾岩隧道大变形机理、变形控制、支护受力特征及评价。第7章高速铁路隧道下穿明河施工控制技术。第8章介绍了将悬臂掘进机铣挖法和钻爆法结合,用以控制爆破振速的铣挖-爆破施工技术及减振规律。第9章介绍了将层次分析法与模糊综合评判相结合的方法在高风险隧道施工过程中的风险管理,并给出了使用案例。

本书主要内容由邓勇、孙星亮、吴应明、谭忠盛、陈耀华撰写,另外,中铁二十局集团公司的冯军武和谢齐兵、北京交通大学的白明洲、中铁二十局集团公司的杨小龙和冯振宁等也参加了部分编写工作,在此表示感谢!

感谢石家庄铁道大学的景诗庭教授认真地审阅了本书并提出了宝贵的意见!

由于作者水平有限,撰写时间仓促,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正!

作 者

2019年3月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 我国高速铁路隧道工程现状	1
1.2 岩溶隧道施工技术现状	3
1.3 岩溶区高速铁路隧道目前存在的问题	7
1.4 沪昆高铁贵州段隧道工程特征	10
第 2 章 岩溶区高速铁路隧道地质超前预报	11
2.1 隧道地质超前预报研究现状	11
2.2 岩溶隧道地质超前预报的内容	12
2.3 岩溶隧道地质超前预报的方法	13
2.4 隧道地质超前预报现场应用	24
2.5 岩溶隧道施工应采用综合地质超前预报方法	31
第 3 章 岩溶隧道突水突泥机理及隧道与溶洞间临界安全距离分析	33
3.1 沪昆高铁贵州段岩溶发育特征	33
3.2 岩溶隧道突水特征及规律性	36
3.3 隐伏岩溶对高铁隧道安全距离的影响分析	38
3.4 溶洞与隧道间岩墙中存在裂隙时的施工安全性分析	47
第 4 章 大断面软岩隧道自进式管棚预支护技术	55
4.1 概 述	55
4.2 自进式管棚的施工工艺与施工效率分析	60
4.3 自进式管棚的设计方案与支护作用分析	70
4.4 自进式管棚对深埋软岩隧道变形控制效果分析	85
4.5 自进式管棚在软岩地层隧道塌方处治中的应用	90
第 5 章 高速铁路隧道岩溶处理技术	97
5.1 岩溶溶洞分类	97
5.2 岩溶隧道处理原则	98
5.3 典型岩溶处置案例	101
5.4 岗乌隧道岩溶涌水处置技术	137
第 6 章 岗乌大埋深岩溶角砾岩隧道变形机理与变形控制	145
6.1 岗乌隧道概况	145

6.2	岩溶角砾岩隧道变形机理分析	146
6.3	大理深岩溶角砾岩隧道变形控制技术	158
6.4	隧道支护变形及受力监测分析	165
6.5	隧道支护结构受力评价	177
第7章	丫口寨隧道下穿河流施工技术	181
7.1	工程概况	181
7.2	下穿明河段施工风险	184
7.3	丫口寨隧道明河段河流整治方案	185
7.4	过明河段隧道支护力学特性的流固耦合分析	189
7.5	过明河段现场施工	196
第8章	铣挖-爆破法施工技术	199
8.1	工程概况	199
8.2	铣挖法的工艺与效果	201
8.3	铣挖-爆破施工技术在丫口寨隧道中的应用	204
8.4	铣挖-爆破法施工减振机理及效应分析	211
8.5	隧道爆破振动现场监测	221
第9章	高风险岩溶隧道施工风险评估技术	225
9.1	隧道施工安全风险等级划分	225
9.2	隧道施工过程中的风险评估方法	228
9.3	岩溶隧道施工过程中的施工风险判定过程	236
9.4	考虑误判造成损失的 Bayes 判别方法	248
9.5	隧道开挖验证	250
9.6	隧道施工风险处置对策	251
参考文献	255

第1章 绪论

1.1 我国高速铁路隧道工程现状

1.1.1 我国铁路隧道工程概况

截至2017年年底,我国铁路营业里程达12.7万km,比2016年增加2.4%。其中投入运营的铁路隧道14547座,总长15326km。在投入运营的铁路隧道中,西宁—格尔木铁路复线工程中的关角隧道,全长32.645km,是国内已运营的最长铁路隧道,于2014年12月25日建成通车。2017年新增开通运营线路铁路隧道465座,总长达1206km。其中,特长隧道(特长隧道指长度10km以上的铁路隧道)26座,总长368km;长度15km以上的特长隧道6座,见表1—1。

表1—1 2017年我国新增开通运营线路长度15km以上的铁路特长隧道

隧道名称	隧道长度(m)	线路	单洞/双洞	建成时间	速度目标值(km/h)
西秦岭隧道	28236	兰渝铁路	双线单洞	2015-12	200
木塞领隧道	19095	兰渝铁路	双线单洞	2017-07	200
哈达铺隧道	16590	兰渝铁路	双线单洞	2016-03	200
黑山隧道	15757	兰渝铁路	单洞双线	2017-08	200
秦岭天华山隧道	15988.6	西成客专	单洞双线	2016-07	250
老安山隧道	15161	西成客专	单洞双线	2015-09	250

在建铁路隧道3825座,总长8125km。其中在建的大理—瑞丽铁路上的高黎贡山隧道长34.54km,是我国最长的在建铁路隧道。在建的北京—张家口高速铁路八达岭地下车站,地下建筑面积3.6万m²,是迄今世界上最大的高铁地下车站。车站两端的渡线隧道开挖跨度达32.7m,是国内单拱跨度最大的暗挖铁路隧道。

我国已列入建设规划的铁路隧道5596座,总长13331km。规划的川藏铁路将建数十座10km以上的特长隧道,其中最长隧道易贡隧道长度可能达50km。

1.1.2 我国高速铁路隧道概况

截至2017年年底,我国已投入运营高速铁路总长2.5万km,共建成高速铁路隧道2835座,总长4537km。其中,特长隧道60座,总长775km,长度15km以上的特长隧道5座,见表1—2。

表1—2 我国已投入运营的长度15km以上的高速铁路特长隧道

隧道名称	隧道长度(m)	线路	单洞/双洞	设计速度(km/h)
太行山隧道	27839	石太客运	双洞单线	250
石林隧道	18208	云贵铁路	单洞双线	200(预留250)
秦岭天华山隧道	15988.6	西城客专	单洞双线	250
大坂山隧道	15897	兰新客专	单洞双线	350
老安山隧道	15161	西成客专	单洞双线	250

(1) 新增运营隧道

2017 年我国新增运营有隧道工程项目的高速铁路共 6 条, 总长 1 206 km, 共有隧道 198 座, 累计长度约 604 km。其中, 特长隧道 16 座, 总长 210 km, 见表 1—3。

表 1—3 2017 年我国新增运营的高速铁路特长隧道

隧道名称	隧道长度(m)	线别	单洞/双洞	建成时间	速度目标值(km/h)
笔架山隧道	14 751	宝兰客专	单洞双线	2016-04	250
麦积山隧道	13 947	宝兰客专	单洞双线	2016-06	250
吴家岔隧道	10 456	宝兰客专	单洞双线	2015-09	250
古城岭隧道	10 350	宝兰客专	单洞双线	2015-12	250
渭河隧道	10 016	宝兰客专	单洞双线	2016-12	250
朱家山隧道	14 950	宝兰客专	单洞双线	2016-08	250
秦岭天华山隧道	15 989	西成客专	双洞单线	2015-07	250
老安山隧道	15 161	西成客专	单洞双线	2016-09	250
大秦岭隧道	14 846	西成客专	单洞双线	2016-09	250
得利隧道	14 167	西成客专	单洞双线	2016-01	250
福仁山隧道	13 102	西成客专	单洞双线	2016-04	250
清凉山隧道	12 553	西成客专	单洞双线	2016-05	250
何家梁隧道	12 406	西成客专	单洞双线	2016-04	250
小安隧道	13 430	西成客专	双洞单线	2016-10	250
黄家梁隧道	11 619	西成客专	双洞单线	2016-02	250
金家岩隧道	12 029	西成客专	双洞单线	2016-01	250

(2) 在建隧道

到 2017 年年底, 我国正在建设的有隧道工程项目的高速铁路共 40 条, 总长 9 956 km, 共有隧道 1 456 座, 累计长度 3 057 km。其中, 特长隧道 54 座, 累计长度 683 km; 长度 15 km 以上的特长隧道 8 座见表 1—4。另外, 设计速度目标值 300~350 km/h 的高速铁路隧道共 920 座, 累计长度约 2 179 km; 设计速度目标值为 250 km/h 的高速铁路隧道共 536 座, 累计长度约为 878 km。

表 1—4 我国在建长度 15 km 以上的高速铁路特长隧道

隧道名称	隧道长度(m)	线别	单洞/双洞	速度目标值(km/h)
小三峡隧道	18 954	郑万高铁	单洞双线	350
新华隧道	18 770	郑万高铁	单洞双线	350
东茗隧道	18 226	杭绍台高铁	单洞双线	350
九万山一号隧道	17 012	贵南高铁	单洞双线	350
巫山隧道	16 570.5	郑万高铁	单洞双线	350
九万山四号隧道	15 485	贵南高铁	单洞双线	350
香炉坪隧道	15 154	郑万高铁	单洞双线	350
都安隧道	151 521	贵南高铁	单洞双线	350

截至2017年年底,我国规划的有隧道工程项目的高速铁路共72条,总长15 051 km,共有隧道2 687座,累计长度约5 482 km。其中,特长隧道83座,总长1 128 km;长度15 km以上的特长隧道17座。另外,设计速度目标值为300~350 km/h的高速铁路隧道共1 720座,累计长度约3 654 km;设计速度目标值为250 km/h的高速铁路隧道共967座,累计长度约为1 828 km。

川藏线未开工建设的雅安—康定段、康定—林芝段可能出现的更多更长的长大隧道方案,包括:泸定—康定段郭达山隧道(39 km)、康定—新都桥段折多山隧道(40 km)、雅江—理塘段沙鲁里山隧道(69 km)、理塘—巴塘段海子山隧道(37 km)、八宿—波密段伯舒拉岭隧道(59 km)、然乌—通麦段易贡隧道(50 km)。以上可能出现的长隧方案均是在初步研究的基础上进行比选的结果,方案的可行性仍在持续研究中。

1.2 岩溶隧道施工技术现状

我国岩溶分布相当广泛,仅裸露于地表的碳酸盐类岩石就有203万 km^2 ,加上被覆盖和埋藏于地下的碳酸盐类岩石,全国岩溶总面积达363万 km^2 ,占国土面积的1/3以上。西南的贵州、云南、广西、四川、重庆,以及中南的湖南、湖北、广东则是我国岩溶最为发育的地区,构成了世界上最大的连片裸露型岩溶区。

随着我国经济的迅速而充分地发展,西部交通建设也得到了快速发展。高速公路、铁路等必然要穿越岩溶广泛分布的西部山区,由于线形及线路坡度的限制,在这些岩溶发育的地区必然出现大量的岩溶隧道。

1.2.1 已建成岩溶隧道情况

在岩溶发育地区修建隧道面临最重要的问题就是施工风险高。近十多年来,在岩溶发育区修建的岩溶隧道数量剧增,已建成的宜万铁路有隧道159座。其中,洞身穿越溶岩地层的隧道达95座,总长度占全线隧道总长度的70%以上,隧道洞身位于溶岩地层中的长度约占全线隧道总长度的58%。宜万铁路长度大于3 000 m的岩溶隧道共计27座,在施工开挖过程中均遇到对隧道工程产生不同影响程度的岩溶灾害,揭示出岩溶管道、暗河,产生突水、突泥的隧道有15座;瞬间突出物(突泥突水总量)超过10万 m^3 的3次,突出物超过1万 m^3 的10余次,突出物超过1 000 m^3 的达60余次。

湖北沪蓉西高速公路全长约320 km,分为宜恩段和恩利段两个项目建设,于2004年8月20日正式开工建设。它是国家公路主骨架沪蓉国道主干线的重要组成部分,也是湖北省高等级公路网“五纵三横一环”的重要组成部分,是我国东中部地区连接重庆、成都等大城市通往大西南的重要快速通道。全线共有隧道44座,总长155 712 m。其中,中短隧道20座,总长25 992 m;长隧道14座37 586 m;特长隧道10座92 134 m。隧道净宽9.75 m(恩利段加宽0.5 m),净高5 m。该区属南方的典型岩溶地区之一,在碳酸盐岩地区修筑特长隧道和隧道群成为突出技术难题,其中的龙潭隧道(左洞长8 693 m,右洞长8 620 m,是当时国内在建的第二长公路隧道,纵向坡度为-1.504%的单向坡,最大埋深约800 m)。乌池坝隧道(左洞长6 708 m,右洞长6 693 m,属特长隧道,最大埋深约488 m)、野三关隧道(其左洞长3 690 m,纵坡2.43%,右洞长3 665 m,纵坡2.38%,最大埋深247 m)以其长度和地质条件的复杂性列

为全线最有代表性的难点工程。由于隧道处于岩溶发育区,地下暗河、各种形态及不同程度及类型的充填溶洞极其普遍,隧道施工风险高。

通过大量岩溶区隧道的工程实践,虽然在工程施工中出现了一些安全事故,也取得了很多的技术进步,积累较为丰富的岩溶隧道的勘察、设计及施工经验。

1.2.2 超前地质预报技术

岩溶区大量隧道施工经验表明,隧道涌水突泥灾害预测预报不但是基础性技术研究工作,也是灾害防治的基础。目前,已有多种预测技术在应用,但地质体是一个复杂的综合体,岩溶的成因与发育规模以及与隧道的空间组合形态及溶腔充填情况存在差异,所以必须根据不同预测方法的适用条件和优缺点,结合工程的实际地质特征,进行综合预测预报。

施工时综合运用两种或两种以上方法和手段进行预报,以达到取长补短、相互印证、提高预报效果的目的,并基本遵循以下步骤开展综合超前地质预报工作:

(1)进行现场地质踏勘及隧道内掌子面地质素描。

地质专业工程师在隧道现场查勘隧道山体地表岩溶出露情况(如石峰、落水洞、溶槽、岩溶泉等)及可溶岩的类型、出露岩层的产状及构造情况,在洞内对掌子面开挖出露的岩层产状信息、构造及地下水发育情况进行地质素描,从宏观上把握岩溶发育规律、其他不良地质体信息及对隧道的影响。

(2)隧道施工过程中的物探方法。

首先运用地震仪(如 TSP203)探测出掌子面前方 100~150 m 范围内的不良地质体的属性、较准确位置与空间分布规模,结合地质学的地质构造分析法,进行长期预报。

(3)在上述基础上,利用地质雷达进一步探测掌子面前方 30 m 范围内及隧道断面周边岩体中的不良地质体的属性、位置与空间分布规模,以近距离印证 TSP 地震仪的反演分析结果,提高探测预报精度,结合掌子面的地质素描,进行短期预报。

(4)对掌子面前方 30 m 实施超前钻孔进行探测,钻孔数量一般可根据隧道断面面积的大小钻 3~5 个孔。

(5)根据以上预报分析结构,并结合断面的监控量测信息,得出综合地质超前预报的结论。

1.2.3 地下暗河处理

渝怀铁路武隆隧道全长 9 418 m,属中山乌江峡谷地貌,最大埋深约 800 m,为傍山隧道,隧道中部穿过溶岩地层长度约 3 800 m。隧道施工中先后揭示多处岩溶暗河,雨洪期岩溶水涌入隧道,最大瞬时涌水量达 718 万 m^3/d ,给施工造成极大损失和危害。因多次涌水、毁坏,前后处理时间近 3 年之久,变更设计费达 4 431 万元。武隆隧道在施工过程中先后揭穿出 5 处特大溶洞暗河的分布情况如图 1—1 所示。

隧道揭穿溶洞暗河后,处理流程为:揭穿溶洞暗河→测绘横纵断面、地质勘探→变

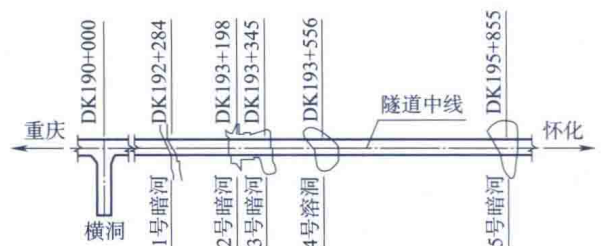


图 1—1 武隆隧道溶洞暗河分布

更和完善设计→制订方案、进行整治→监控量测。

对于充填类型的岩溶段落,除了衬砌进行适当加强外,对隧底部充填物进行钢花管注浆加固,局部采用桩基+托梁通过。

对岩溶水的整治应采取“截、堵、排、防”综合措施,以排为主。由于隧道历次涌水主要来源于2号、3号暗河,突发性强,水量大,且两条暗河存在水力联系,在其底部还有多层暗河系统,因此对2号、3号暗河需要统一整治,采取以集中排水为主、防水为辅的方案,如图1—2所示。1号暗河位于隧道仰拱以下,但距隧底较近,采取设置迂回引水通道的措施,对暗河进行引排。4号溶洞为充填型,无岩溶水,隧道采用复合型防水措施。5号暗河位于隧底较深部位,对少量岩溶水采用集水井、盲沟等形式引入隧道排水沟。由于岩溶水均具有侵蚀性,混凝土采用抗渗耐腐蚀混凝土,同时,增设附加防水层,拒地下水于结构之外。

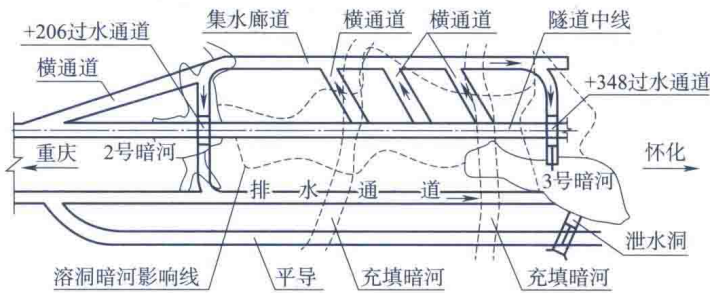


图1—2 2号和3号暗河段排水系统平面图

1.2.4 大型溶洞处理

(1) 大型无充填溶洞

对于大型溶洞,当拱顶溶腔发育高度很高时,应采取针对性的拱部处理方案,以防止拱顶落石对隧道结构产生不利影响。宜万线龙鳞宫隧道施工至DK231+796里程,揭示出一大型溶腔,溶腔呈水平发育,纵向发育100 m,横向发育150 m,溶腔顶板在轨面以上10~20 m,溶腔底板在轨面以下12~20 m,如图1—3所示。该溶腔的处理方案如图1—4所示。

溶腔周边出露岩层岩性为灰岩、白云质灰岩,中厚~厚层,节理发育。溶腔顶板岩层接近水平,发育有软弱夹层,受爆破振动等因素影响,极不稳定,查勘溶腔底部发现已有大块岩石沿软弱面脱落。隧底以下局部为坍塌或沉积物,发育充填型溶腔,充填黏土夹碎石、块石土,黏土呈软塑状。根据溶腔内沉积特征及溶腔壁面特征判断,该溶腔为古暗河通道,雨季时承接部分过路水。

由于溶腔跨度大,岩体稳定性差,为了保证溶腔的稳定及隧道主体结构施工安全,在溶腔内搭设碗扣支架,对洞顶挂网进行锚喷支护;然后,以隧道两边距外侧3 m处,沿着隧道线路方向施工圆柱形支墩,间距5 m,直径1.4 m,对溶腔顶部进行支顶。

(2) 大型充填溶洞

大型充填型溶腔的处理应根据溶腔洞穴范围大小、溶腔内充填物的物理力学特性及溶腔洞穴与隧道断面的相互位置关系,遵循“因势利导、因地制宜,技术可靠、经济可行”的原则,对大型充填型溶腔的处理采用安全可靠的技术措施,保障隧道施工及线路运营后的长期安全。

云雾山隧道在隧道出口工区DK247+562处揭示出一个大型充填型溶腔。溶腔内充填物

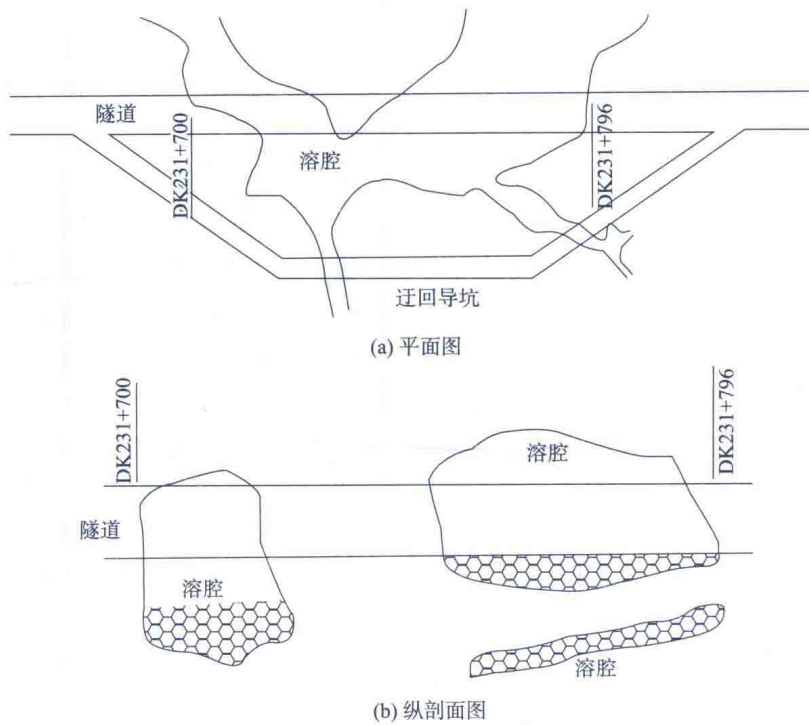


图 1—3 龙鳞宫隧道 DK231+796 溶腔形态图

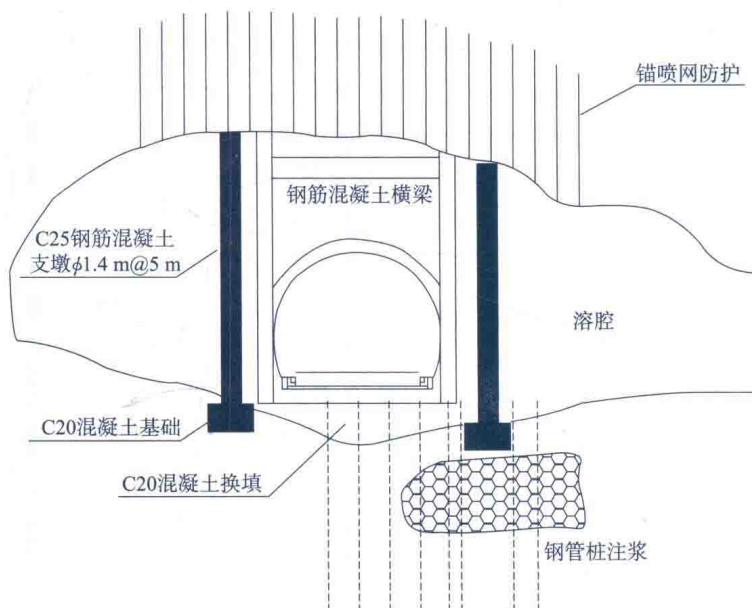


图 1—4 龙鳞宫隧道 DK231+796 溶腔处理方案示意图

主要为块石土、黏土，局部有较大孤石。溶腔在隧道纵向发育范围在Ⅰ线方向上长 118 m，在Ⅱ线方向上长 138 m，向线路左侧方向发育宽约 60 m，基底以下发育最大深度超过 80 m。其轨顶标高平面形态如图 1—5 所示。

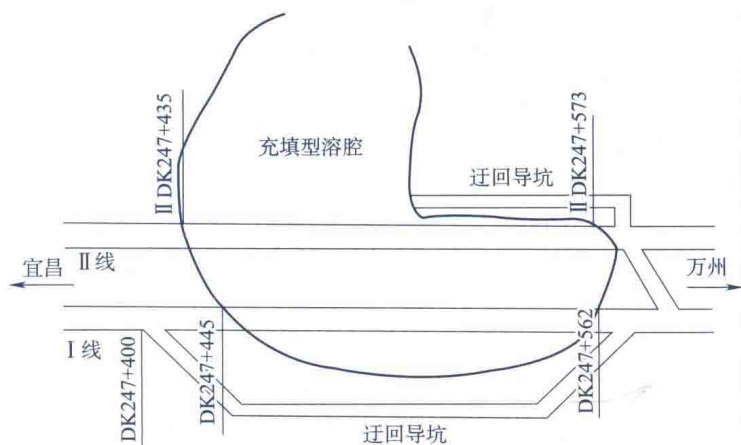


图 1—5 云雾山隧道 DK247+562 溶腔平面图

该段围岩为寒武系上统耗子沱群灰岩与白云岩互层,局部含灰质白云岩,节理裂隙发育。DK247+473~+485 段右边墙拱腰处发育有一较大溶腔,宽约 8.8 m,高约 6 m,主要存在于隧道开挖轮廓线以外。DK247+445~+563 隧道仰拱以下填充物深度 40 m,局部深达 80 m。迂回导坑处发育有岩溶竖井,为地表水汇集排泄的主要通道之一,有一定的淤积。该岩溶竖井与 DK247+562 处充填溶洞为相对独立的溶腔,但局部通过张开裂隙连通,存在一定的水力联系。在水量较大排水不及时导致充填溶腔内向上返水。

根据溶腔内的充填物力学特性,DK247+445~+475、DK247+482~+526 段进行帷幕注浆,帷幕厚度 5 m;DK247+526~+556 段进行帷幕厚度为 8 m 的帷幕注浆,并对掌子面前方地层进行注浆加固,并进行大管棚超前支护。对于隧道仰拱下方的溶腔较大范围的充填物进行注浆加固或钢花管注浆加固。对于注浆加固仍无法满足无砟轨道运营安全的软塑状充填物,采用桩基础跨越。

为了确保铁路运营期间隧道结构安全,避免暴雨期间岩溶竖井向外涌水影响运营安全,在迂回导坑岩溶竖井口处向既有排水洞增加排水支洞,以更好宣泄地下水流。

1.3 岩溶区高速铁路隧道目前存在的问题

1.3.1 高速铁路隧道特征

(1) 投资大,工期短

由于高速铁路的运行速度快,对铁路线路的纵坡和平面曲线半径均有严格的要求,建造技术标准高,投资巨大。为了尽快建成投入运营,尽早产生经济效益,建设工期往往都比较紧张。地质复杂的长大隧道往往是整条线路工期的控制工程,因而对于高速铁路隧道必须认真做好施工组织,精心组织,精心施工,认真应对高风险段落的施工技术措施,控制施工风险,高质量按期完成土建工程。

(2) 隧道断面跨度大

高速铁路列车最大设计运行速度一般达到 350 km/h,隧道多采用双线单洞方案,考虑到列车在隧道内高速运行产生的空气阻力效应及设置救援通道,隧道断面内部净空面积达到

100 m², 软弱围岩地段隧道最大开挖跨度超过 16 m, 最大开挖高度大于 13 m。由于隧道断面面积大, 在岩溶区修建高速铁路隧道更加容易揭露各种类型的溶洞, 发生突水突泥的施工风险将更为突出。

(3) 隧道质量要求高

由于高速铁路主要建筑物的基准寿命均为 100 年, 为保证乘客乘坐列车有较好的舒适度, 对高速铁路隧道的各种建筑物的质量提出了更高的要求。如防水要求高速铁路隧道衬砌的内表面不允许出现湿渍, 轨道工后沉降控制更加严格, 不超过 15 mm。

(4) 软岩地段施工速度慢

我国在硬岩地层中进行隧道施工一般采用钻爆法施工, 而且在硬岩地层中进行隧道爆破开挖也积累了丰富的经验, 但在松散软弱地层的大断面隧道施工中还缺少相应的高效率的成套施工机械设备, 因而多采用效率较低的多分部施工工法(如三台阶法、CD 法和 CRD 法等)。多分部工法的工序较多、工序之间的相互干扰较大, 支护闭合时间较长, 隧道变形较大, 因而隧道施工效率较低, 施工速度慢。针对我国高速铁路快速发展的关键时期, 研制适应于软弱围岩大断面隧道快速施工的相应成套机械设备是当务之急。

1.3.2 岩溶区隧道施工中风险突出

1. 突水突泥

虽然近十多年来在岩溶区成功修建的隧道数量众多, 但岩溶隧道施工中的风险仍很突出, 施工中出现突水突泥的工程地质事故仍然层出不穷。据公开文献报道, 在岩溶区修建的岩溶隧道中有 160 多座隧道发生过不同类型的岩溶灾害。如最近的一起岩溶隧道突水灾害是 2018 年 6 月 10 日上午, 贵州至南宁高铁 12 734 m 长的朝阳隧道发生岩溶突水事故, 该突水事故造成 3 位作业人员死亡。表 1—5 列出了十多座隧道典型的岩溶灾害案例。

表 1—5 典型岩溶隧道灾害统计

序号	线路	隧道名称	灾害类型	灾害后果
1	渝怀铁路	圆梁山隧道	突水突泥	多名人员遇难, 部分施工机械掩埋损毁, 影响施工一年之久, 蒙受巨大的经济报失
2	渝怀铁路	武隆隧道	暗河突水	属于揭露暗河, 暗河水涌入隧道, 最大涌水量 718 万 m ³ /d, 洞内施工机械被冲入乌江, 无人员伤亡
3	宜万铁路	马鹿箐隧道	突水突泥	19 次突水突泥, 2006 年遭遇 5 次罕见特大突水灾害, 4 人遇难, 1 人失踪, 11 人遇难, 2 人冲出洞口
4	宜万铁路	野三关隧道	突水突泥	52 人被淹, 10 人遇难
5	宜万铁路	大支坪隧道	突水突泥	溶腔 82 处, 其中大规模突水、突泥 30 次, 最大涌水量达 36.3 万 m ³ /d, 瞬间泥沙 4 000 m ³
6	渝遂高速	云雾山隧道	突水突泥	突泥掩埋钻孔台车及卡车各一辆, 隧道 100 m 洞体充填, 地表出现 5 个的陷穴
7	宜万铁路	云雾山隧道	突水突泥	瞬间泥沙 1 000 m ³ , 最大涌水量 780 m ³ /h, 造成 1 线淹井 1 035 m, 2 线淹井 710 m
8	厦深铁路	梁山隧道	突水突泥	地表塌陷面积 900 m ² , 深 20 m, 总涌泥量约 5 500 m ³ , 坑底再次发生坍塌, 成漏斗形加深约 15 m
9	成贵铁路	高山隧道	突水突泥	涌水量一般 130~415 m ³ /h, 流量随洞外降雨量直接相关

续上表

序号	线路	隧道名称	灾害类型	灾害后果
10	广渝高速	华登山隧道	突涌水	施工时遇到特大规模的涌突水,其最大涌突水达 $7.95 \text{ m}^3/\text{s}$
11	玉蒙铁路	通海隧道	突水突泥	施工中先后发生 10 多次涌水涌泥(砂),最大涌水量超过 $12 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,突石超过千方,石块最大达 2 m
12	京广铁路	大瑶山隧道	突水突泥	大瑶山隧道班古坳竖井平导施工至 $1994+213$ 时,突发携带大量泥砂的岩溶水,造成竖井被淹,洞内设备被淹没,中断施工达一年之久
13	成昆铁路	沙木拉达隧道	突水突泥	沙木拉达隧道总涌水量最大达 $19\ 550 \text{ m}^3/\text{d}$,突水量最大达 $36.11 \text{ m}^3/\text{min}$,曾造成停工达 32 天之久
14	京广铁路	南岭隧道	突水突泥	南岭隧道曾发生三次较大突泥共 $11\ 738 \text{ m}^3$,突水量最大达 $11\ 143 \text{ m}^3/\text{d}$,总涌水量达 $16\ 885 \text{ m}^3/\text{d}$
15	贵昆铁路	梅花山隧道	突水	梅花山隧道 1991 年 7 月雨季因地下水猛涨,洞内边墙高压射水,边墙衬砌开裂倒塌 12 m ,中断行车 7 天之久

由此可见,富水岩溶区修建隧道过程中的突水突泥仍是隧道施工中的最大风险。特别是隧道周边存在隐伏压力溶腔时,在施工过程中进行的超前地质预报工作也没有发现隐伏溶洞,当隧道与溶腔之间的岩墙不足以抵抗溶腔内压力时,就极易发生突水突泥的地质灾害,对施工人员及施工设备形成严重的安全威胁。因而,在岩溶隧道施工中对掌子面前方进行超前地质预测预报及对隧道周边进行隐伏溶洞的探测成为一个重要的降低施工风险的工作。

2. 隧道失稳

隧道断面周边若存在隐伏有压溶腔,将会改变隧道受力特征,使隧道承受非对称荷载,从而降低支护结构的承载能力;另外溶腔与隧道间岩墙的节理裂隙往往比较发育,围岩岩墙的自稳能力较差,因而存在在隧道施工过程中容易发生隧道失稳的风险。

当隧道穿越大型充填型溶腔的时候,特别是含水量较大时,往往需要采用帷幕注浆的方式对溶腔内的充填物先进行注浆加固之后,再进行超前支护,然后开挖及支护。帷幕注浆效果的好坏,直接关系到隧道支护结构的变形和受力大小。如果注浆加固区没有形成完整的帷幕,或局部注浆加固效果较差,都有可能出现上述情况,不能及时补充注浆或加强支护,就有可能使隧道产生过大变形,甚至使隧道失稳坍塌。

1.3.3 岩溶隧道施工风险预测问题

虽然复杂地质隧道地质超前探测预报技术已经历 10 多年的工程实践,但岩溶隧道施工超前预测预报总体可靠性不高,预测精度难以保证。传统的岩溶涌突水灾害发生概率的宏观判断主要基于地质分析和隧道施工涌突水量及水压的超前预测预报结果。由于地质岩体的复杂性及不确定性、探测设备本身的局限性和受工期、深部勘探资料缺乏等条件限制,对隧道开挖掌子面前方围岩特征、地下水富集程度、水量及水压的预测预报精度始终是隧道工程建设中的技术攻关难题,施工期的岩溶地质预报基本还处于“挖开来看”的状况。根据前人对我国部分铁路隧道预测涌水量与实际涌水量的统计,预测值与实测值相差 20% 的仅占统计总数的 15%;误差超过 50% 的占 75% 以上。从理论上说,涌突水量预测结果无论偏大还是偏小,都将给隧道工程的可行性论证、设计以及施工安全和经济带来隐患。

因而,针对岩溶隧道施工过程中的超前地质预测预报仍然需要进一步的研究和改进,以期

发现隧道周边隐伏岩溶,并采用一定方法预测涌水量,从而制定针对性的技术措施,保证隧道施工人员与施工设备的安全。

1.4 沪昆高铁贵州段隧道工程特征

新建沪昆高速铁路东起上海虹桥站,途径杭州、长沙、贵阳等地,西至昆明站,线路全长 2 264 km。沪昆高铁贵州段东起贵州省的玉屏县,向西经贵州省三穗、凯里、贵定、贵阳、平坝、安顺、关岭、普安、盘县后,至滇黔省界的壁板坡隧道,贵州省境内正线长度 559.5 km。本书内容是以沪昆高铁九标段长大岩溶隧道为主要依托形成的研究成果。

1. 地形特征

沪昆高铁贵州段地处云贵高原腹地,属云贵高原剥蚀—溶蚀,低中山、低山,丘陵和高原盆地地貌,总体地势北西高东南低,地形起伏较大。工程区具有山高、坡陡、谷深、水急等地形特征。西部受罗殃河切割形成陡斜坡河流沟谷地貌,地面高程均在 1 000~1 400 m,坡麓自然斜坡陡峻。属岩溶强烈发育区,岩溶洼地、岩溶漏斗、地表岩溶塌陷、地下暗河、岩溶管道及溶蚀裂隙普遍发育,岩溶地貌类型齐全。由于高速铁路技术标准高,线形及纵坡坡度的限制,隧道数量众多。如九标段线路全长 63.745 km,隧道 19 座,隧道总长度 43 587 m,其中大独山隧道长度达 11 912 m,岗乌隧道全长达 13 174 m。

2. 气象特征

沪昆高铁贵州段所处地区属亚热带湿润季风气候,气温及降雨等各地虽有差异,但变幅不大。总的特点是:冬无严寒,夏无酷暑,气候温和,雨量充沛,阴雨天多,四季不甚分明。年平均气温 14~16℃,极端最高气温一般为 34~37℃,黔东玉屏局部高达 39℃,极端最低气温一般为 -7~-10℃。年平均降雨量 1 200~1 500 mm,5~10 月份为雨季,占年降雨量的 80%。

3. 地层岩性

铁路沿线地层出露较为完全,自前震旦系至第四系地层皆有分布。岩性以灰岩、白云岩类可溶岩为主,相间分布板岩、泥岩、砂岩、页岩及煤系地层,局部地段有玄武岩分布。岩溶地貌显著。

工程区域内基岩大多裸露,为三叠系中统杨柳井、关岭组一段、关岭组二段、下统永宁镇组三、四段、下统永宁组二段、下统永宁组一段、下统夜郎组地层,隧道进出口及缓坡地带带有少量覆土。

4. 地质构造

区域范围内地质构造运动强烈,构造复杂,构造线密集,断层发育,以近 SN 和 NE 向断层为主。

区域构造上位于扬子准地台黔北台隆六盘水断层普安旋扭构造变形区,区域上为法郎向斜北东翼和新场—九头坡向斜南西翼,受褶曲挤压作用,工程区断裂发育,受断层影响,节理裂隙发育。

5. 水文地质

沪昆高铁贵州段主要通过长江和珠江两大水系上游交错地带,位于安顺以西,属珠江流域。线路通过的主要河流有雨窝河、白沙河、洛溪河、白岩河、坝陵河、北盘江等。

大独山和岗乌隧道区域地表水通过地表沟谷和地下暗河直接汇入北盘江,地下水类型主要为第四系松散土层孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水。

由于铁路沿线广布石灰岩、白云岩等可溶岩,且工程区内气候湿润,雨水充沛,岩溶发育强烈。受上述复杂水文地质和工程地质条件的影响,线路隧道工程施工期岩溶突水灾害以及地质灾害预警防治等问题十分突出。

第2章 岩溶区高速铁路隧道地质超前预报

隧道及其他地下工程的设计和施工的主要依据就是地质勘察资料,而隧道施工方案的制定则是主要依据设计文件。在工程施工图设计时已经完成了初勘和详勘工作。虽然详勘的工作重点就是查清隧道穿越的主要工程地质和水文地质情况,然而由于铁路线路是线条型的建筑物,要想把线路沿线所有的地质情况在开工前完全勘察清楚要花费的代价是极其高昂的,限于目前的技术条件也几乎是不可能的,因而隧道工程也就有了“动态设计,动态施工”理念。实际上,一些局部的、分散的、随机的不良地质地段往往是在隧道施工中对施工安全形成较大的安全隐患。这些安全隐患主要表现为在隧道施工过程中出现岩爆、坍塌、突水、突泥、有害气体逸出等地质灾害。由于这些灾害有时是在施工人员无防备的条件下出现的,具有突发性,给隧道施工带来难以预料的危害和困难,轻者影响工期,使工程投资增加,严重者可能会造成施工人员的伤亡和施工技术设备的损毁。

2.1 隧道地质超前预报研究现状

隧道施工过程中的地质超前预报关系到工程的安全、质量和进度,因而备受关注,特别是在地质条件复杂的隧道工程,很有必要进行地质超前预报工作。隧道施工期地质灾害超前预报由来已久,英、法、日、德等国家均将此列为隧道工程建设的重要研究内容。在我国隧道施工期超前地质预报研究始于20世纪50年代末,但真正应用于隧道工程建设是20世纪80年代。在我国西部山区隧道建设过程中,岩溶涌水、涌泥、断层破碎带、坍塌冒顶等地质灾害频繁,因而随着公路隧道、铁路隧道和水电隧道的修建,逐步开始了超前地质预报工作。

隧道建设中对工程地质条件的认识和掌握程度是确保隧道快速、安全修建的决定性因素之一。因此,世界各国的隧道设计者、工程师和专家都十分重视在隧道施工中能及时地对掌子面前方的地质情况做出预报,以便制定出相应的施工方案和施工措施,避免或减少突发性地质灾害造成的工程损失和人员伤亡,解决施工地质灾害问题和保证隧道施工安全。在隧道勘察设计阶段主要采用钻探和大量的地球物理勘察方法,在隧道施工期采用水平超前钻探、TSP(地震波反射法)地质超前预报仪、TRT(地震反射层析成像)地质超前预报仪、高精度地震折射法等来实施地质超前预报工作。在我国,隧道工程超前预测预报研究始于20世纪50年代末期,首先由时任铁二院川黔铁路凉风垭隧道施工设计配合组地质工程师的陈成宗教授,根据平行导坑开挖揭露地质情况,采用地质分析法对渝黔线凉风垭隧道掌子面前方地质情况的预测预报,预报距离亦可达到10~30 m。20世纪80年代初,我国开始研究用物探方法对隧道进行超前地质预报,针对大瑶山隧道,铁道部攻关项目中列出用物探方法进行超前地质预报的研究内容。80年代中期,衡广复线大瑶山隧道开展地质法和声波透射法地质超前预报技术。80年代后期,铁道部开始正式立项研究隧道工程地质超前预测预报技术;之后,在南昆、内昆、渝

怀等线均开展了隧道工程超前预测预报技术方面的研究与工程应用工作。在大秦铁路隧道施工过程中,研究用施工钻孔台车在掌子面钻 15 m 深孔,探查前方不良地质情况。2000 年后,铁道部科学研究院西南分院将水平声波法(HSP)进一步完善并开发了 CT 成像技术。近年来多家大专院校、科研院所和工程单位应用 TSP202 和 TSP203、地质雷达和陆地声呐等设备结合工程地质方法对多处隧道进行了超前预报工作,其中不少隧道取得了较好的效果,当然也经常会出现预报失败的情况,尤其是对岩溶溶洞的预报。

在铁路隧道超前地质预报中,20 世纪 80 年代,中科院地质研究所与中铁隧道局开始在大秦铁路军都山隧道开展隧道地质灾害预测预报的研究,开始使用地质素描法、地质调查、超前钻以及声波法等手段预测预报隧道地质灾害。20 世纪 90 年代,铁一院在秦岭隧道开展超前地质预报及地质综合测试技术研究,并取得了一些成果。21 世纪初,石家庄铁道学院与中铁十四局合作,在株六复线全面开展隧道超前地质预报工作。与此同时,中铁隧道局、中铁二局等多家单位开始使用 TSP、地质雷达、红外线等设备开展隧道超前预报工作,并取得了众多的成果。

2005 年以来,铁道部、交通部、水利部等开始在全国主要新建铁路、高速公路、大型引水水工隧道普遍开展 TSP、地质雷达等为主的地质超前预报工作,并制定了相关的工作指南,这些都为隧道开展超前预报预测工作创造了有利的条件。

对于隧道工程施工期的地质灾害,尽管国内外对地质超前预报方法已有较多研究,但现有的隧道超前预报方法仍存在一些问题,如物探结果具有多解性及预报结果过多地依赖于经验。此外,由于对隧道工程突水、突泥地质灾害影响的环境因素复杂,形成岩溶突水突泥地质灾害涉及的因素较多,隧道工程突水突泥地质灾害的特征规律的定量分析存在一定的困难。

根据研究资料可知,探测溶腔内水量和富水溶腔的位置是岩溶探水的主要内容。宜万铁路建设初期,通过各种超前地质预测预报方法进行综合分析评价来查找溶腔,制定了地质素描、TSP203、地质雷达、红外线探水、超前深孔钻探和风钻加深 5 m 浅孔钻探共 5 种探测方法。长期的实践检验证明:地质素描为确定前方宏观地质条件起到了很大作用,起宏观指导作用;TSP203 对岩溶探测准确率约 50%;地质雷达和红外线探水对岩溶及岩溶水难以起到应有的超前探测预报定量分析作用;超前深孔钻探和风钻钻设炮眼时加深 5 m 浅孔钻探预报准确率较高。

新建沪昆客专隧道探水工作主要采用地质雷达、TRT、瞬变电磁等方法,进行对岩溶探测与超前地质预报,其中瞬变电磁方法以前应用较少。

2.2 岩溶隧道地质超前预报的内容

对于岩溶区的隧道,地质超前预报的内容主要有:

1. 掌子面前方地层的岩性预报

主要预报掌子面前方地层的岩性,根据岩体反射波的纵波波速预报岩体的围岩级别,及其变化范围。

2. 地质构造的预报

地质构造对隧道的结构设计、施工方案及工程造价等都有显著影响,因而隧道施工中的地