

文章编号: 0451-0712(2007)03-0182-06

中图分类号: U452.25

文献标识码: B

# 龙潭特长公路隧道的设计与技术创新

陈璋, 陈光明

(湖北省交通规划设计院 武汉市 430051)

**摘要:** 龙潭隧道长约 $2 \times 8.7$  km, 设置了2斜井+2竖井, 作为我国为数不多的特长公路隧道, 其建设规模大, 难点多, 技术要求高。在勘察设计过程中, 充分借鉴了国内外长大公路隧道建设的成功经验, 对隧道的关键技术, 如隧道平纵面设计、斜井与竖井的选型与布置、岩溶区长大隧道修筑技术、长大斜井与竖井的施工、隧道通风与防灾救援设计方案等都进行了大量的方案比选和技术创新, 并将其列入交通部西部科研项目, 进行分析研究, 以指导本项目的设计和施工。

**关键词:** 特长公路隧道; 设计; 关键技术; 方案比选; 技术创新

## 1 工程概况

龙潭特长公路隧道位于沪蓉国道主干线湖北宜昌~恩施公路, 隧道左洞长8 694 m, 右洞长8 599 m, 按山岭重丘区高速公路标准设计, 计算行车速度为80 km/h, 为上下行分离的双洞四车道隧道, 左右线纵坡均为1.50%的单向坡, 为全线控制性工程。

结合隧址区的地形地貌、工程地质和水文地质条件, 并综合考虑运营通风、防灾救援和施工组织的需要, 对斜井、竖井的类型和位置进行了技术、经济比较, 确定在宜昌端采用双斜井方案, 在恩施端采用双竖井方案, 将隧道左右洞分成3段, 均采用纵向分段送排式通风, 在斜井、竖井井口设置4处地面风机房。

隧道还设置了以通风、消防、照明、供配电为主项的机电系统, 以及为了合理进行通风、照明和消防而设置的各种监控、监测系统及防灾救援设施。

## 2 工程地质概况

龙潭隧道位于长阳背斜的北翼。长阳背斜属秦昆构造体系, 主体构造线走向近东西, 与路线基本平行展布。地层产状比较稳定, 总体显示为向北倾斜的单斜构造, 倾角 $50^\circ$ 左右, 无区域性断裂构造。局部存在2条规模不大的断层,  $F_1$ 走向北西, 倾向北东, 在距出口端2 630 m附近通过,  $F_2$ 走向北西, 倾向东, 在距出口端1 450 m附近通过。2条断层尤其是 $F_2$ 可能会造成深部灰岩地层岩溶发育, 尤其是南津关

组厚层质纯的灰岩。

隧道洞身通过的地层主要为:(1)志留系下统龙马溪组( $S_{11}$ )页岩、粉砂质页岩及奥陶系上统五峰组( $O_{3w}$ )页岩、硅质岩;(2)奥陶系上统临湘组( $O_{3l}$ )中厚层状泥质灰岩、瘤状灰岩;(3)奥陶系中统宝塔组( $O_{2b}$ )厚层状瘤状龟裂纹灰岩;(4)奥陶系下统牯牛潭组( $O_{2g}$ )瘤状灰岩;(5)奥陶系下统大湾组( $O_{1d}$ )中厚层状瘤状灰岩与页岩互层;(6)奥陶系下统红花园组( $O_{1h}$ )厚层块状生物屑亮晶灰岩;(7)奥陶系下统分乡组( $O_{1f}$ )厚层状生物屑灰岩与页岩互层;(8)奥陶系下统南津关组( $O_{1n}$ )厚层块状微晶灰岩、白云岩。隧道进口约4 580 m地段, 基岩皆属碎屑岩, 为隔水层地下基岩, 裂隙水极贫;但隧道出口约4 090 m地段, 南津关组灰岩中岩溶水可能发育。可能发生的地质灾害主要为断层破碎带、软岩大变形、硬岩岩爆、突水涌泥及围岩失稳。

通过隧道综合地质评价, 本隧道以Ⅳ类围岩为主, 约占82.3%, Ⅲ类围岩约占12.2%, Ⅴ类围岩和Ⅱ类围岩均较少。左洞隧道地质纵断面见图1所示。

## 3 勘察设计中的重难点与关键技术

在勘测设计阶段, 龙潭隧道为我国第三长公路隧道(第一为秦岭终南山隧道, 第二为台湾雪山隧道), 当时特长公路隧道无论是设计理论, 还是工程实践, 我国均缺乏必要的积累, 可借鉴的资料少, 缺乏经验, 存在如下重点与难点。

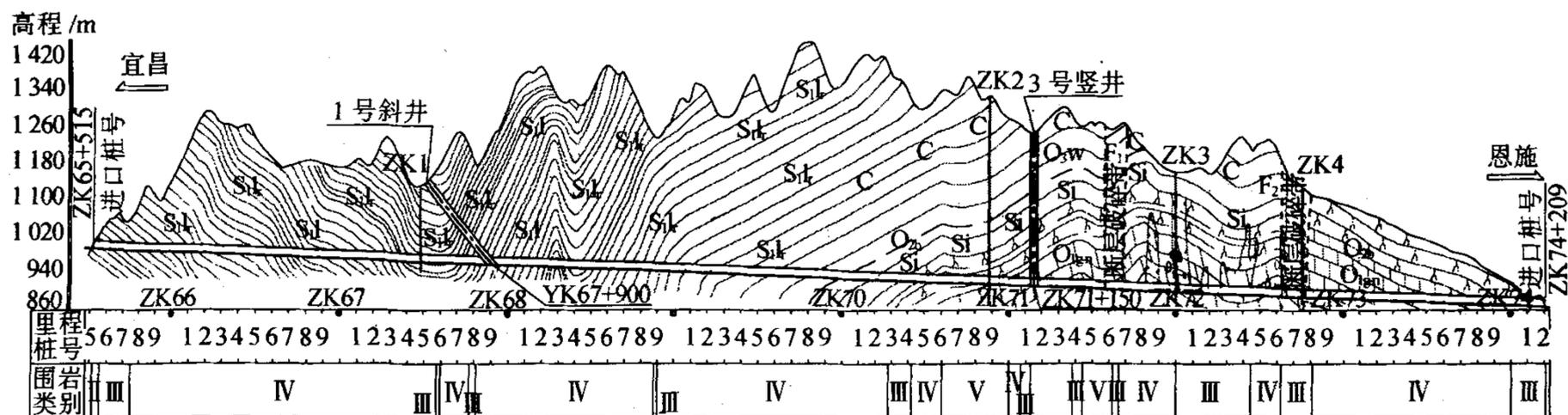


图1 隧道左洞地质纵断面

(1)隧址区地质条件复杂,且受现阶段地质勘察技术的限制。

目前隧道工程在设计阶段主要运用遥感、地理信息技术、地质测绘、物探以及地质钻探等勘察手段,通过综合分析上述勘测成果,获得隧道洞身及周围的地质资料。施工期间,依据地质勘察资料和揭露的掌子面,选用陆地声纳、地质雷达、TSP和红外探水等地球物理探测方法,并结合地质素描和超前钻探开展超前地质预报。然而现阶段地质勘察技术手段存在局限性,地球物理探测勘探精度不高,受干扰因素多,往往形成假的异常,成果的准确性受解译人员的经验限制,容易形成误判或漏报;地质钻孔随着隧道埋深的增加,洞身深埋段钻孔深度常达数百米,费用昂贵又费时,在某种意义上仅为局部地质资料,不能全面反映隧道地质状况;超前钻孔一次勘探距离短,操作极为费时,往往影响施工进度。而龙潭隧道地质复杂,出口段洞身在碳酸盐岩地层穿行,岩溶水文地质条件复杂,同时有 $F_1$ 和 $F_2$ 断层穿过洞身,因此,如何突破地质勘察技术,及时准确地探测隧道围岩地质,以指导设计和施工,实乃当务之急。

(2)山区自然生态环境脆弱,环保要求高。

隧址区生态环境脆弱,地质灾害多发。隧道建设容易破坏原有地形地貌,改变了地下水、地表水的原有条件,导致地下水位下降和地表塌陷,地表泉、井、塘水枯竭,植被减少,造成山顶居民无水可用的窘境,影响居民正常生活、生产,造成经济损失和不良社会影响。隧道弃渣量大,若弃渣不当可能阻塞河道造成水土流失或占用农田,引发泥石流、滑坡等灾害,加大水土流失。施工和运营期间污水的排放可能会使地表水质变差,甚至造成地表水出现功能的改变,引起水质和土质污染。施工、车辆行进以及射流风机和大型轴流风机运转产生的噪音、振动,排放到

大气中的废气,对隧道周围的声环境和大气均有一定污染。因此需做好地下水环境保护、水土保持和环境保护工作。

(3)岩溶地质条件下可靠合理的修筑技术,且受现阶段施工技术的限制。

虽然我们在隧道洞口浅埋段、洞身断层破碎带、软岩大变形、硬岩岩爆的处理措施上,通过工程实践,积累了一定的经验,有了比较成熟的处理方案,形成了相应的工法,减少了隧道穿越不良地质地层的施工难度。但以往隧道施工在遇到断层破碎带、砂页岩互层、岩溶发育区、洞口浅埋段、强风化的围岩等不良地质时,塌方几乎是难以避免,岩溶地区突水涌泥、挤压性围岩大变形事故经常见诸报端,严重影响了施工安全和工程质量,施工进度指标难以提高。

隧道进口段砂页岩地层较为软弱,出口段灰岩地层岩溶十分发育。在施工过程中 $F_2$ 断层进度缓慢,平均月进度不到40m,处治极其困难,结构设计、土建工程难度增大,需要加强如下三个方面的研究:

①确定合理有效的涌水突泥灾害的预测预报技术;

②在岩溶富水段落,采取切实合理的防排水措施;

③针对溶洞、地下暗河等岩溶不良地质,提出安全可靠的处治技术。

(4)长斜井、深竖井。

为解决特长隧道施工组织及运营期间通风、防灾救援等主要技术难题,常需设置斜井或竖井等辅助坑道,以增加隧道工作面、改善施工条件、提高施工进度。利用斜井、竖井作为通风井,将隧道分成数段,充分地利用了分段纵向式通风无需增加隧道断面,又能充分利用车辆的活塞作用,是一种节能型通

风方式的优点。在发生火灾等紧急情况时,可利用斜井、竖井及时地从最捷径的路径向隧道外强制排烟,增加防灾分区,缩短单个防灾分区长度,减少火灾时隧道烧失长度,增强隧道防灾救援能力。

龙潭隧道1号、2号斜井长度分别为417.518 m和465.849 m(考虑斜向增长),是倾角为25°的陡坡斜井。3号、4号竖井长度分别为332 m和355 m,斜井、竖井井身通过地层地质构造差异大,施工期间遇到的地下水处理极端困难,且施工过程开挖土渣、衬砌材料、施工机具、人员的运输均为高难度作业。需根据深斜(竖)井井筒技术特征、地质条件和工期要求,对钻眼深度与掘进段高度、一次爆破岩石量与装岩能力、提升与装岩能力、吊桶与抓斗容器、地面排渣能力与提升能力、井壁支护能力与掘进速度等机械化配套设备,进行匹配研究。

(5)特长隧道通风系统、安全运营技术及安全设施。

为确保隧道内的良好卫生条件和行车视距,隧道通风是长大隧道建设面临的首要问题。通风系统具有工程造价高,运营能耗高的特点。需综合考虑通风、防灾救援和施工组织等因素,进行技术经济比较,营运通风方式要求技术相对可靠、经济较省,满足隧道的使用功能和防灾救援功能。龙潭隧道左、右洞最终均采用2座竖(斜)井三段两单元送排式通风方式,是国内第一座双洞均采用此种通风方式的隧道。由于两斜(竖)井通风方式的气流组织、动力配置、运营调节等都要比一座斜(竖)井通风方式复杂得多,如压力、风量平衡、气流短路、回流等相对难以控制,并且我国特长公路隧道运营通风方面的经验仍很少,尤其在多单元送排式纵向通风方面的研究还缺少实验和实测数据,需要开展专项攻关。

隧道内一旦发生火灾等紧急事故时,常伴随严重的交通阻塞,车辆、人员和物资疏散极其困难,如果施救不及时或方法不当,会造成严重的人员伤亡和财产损失,社会影响大。随着特长隧道的增多,隧道营运安全技术及安全设施越来越受到人们的重视。需根据隧道规模和交通量,选定适当的安全设施。加强研究火灾和交通异常时的控制方法,着重解决异常时的交通组织和减少异常发生,将火灾危害降到最小。控制模式受异常情况的危害程度、发生位置,交通量、方向不均匀系数等众多因素影响,控制模式繁杂,需结合本隧道的实际工况进行深入研究,制定有效的消防救援方案。

#### 4 技术创新

龙潭隧道工程地质、水文地质条件复杂,且建设规模大、难点多、技术要求高。从开展工作开始,思想上早重视,工作上早准备,采用先进的勘测技术,精心勘测,系统研究设计、施工和运营中的关键技术,科学比选、科技创新。

(1)加强隧道地质工作,开展岩溶水文地质问题的专题研究。

准确查明隧道岩溶、水文地质条件是确定岩溶整治方案的基础和前提。然而由于岩溶发育的特殊性和复杂性,现阶段探测技术手段的局限性,对于隐伏岩溶国内尚无适用可靠的探测手段。需提高地质勘探精度,为设计、施工创造良好条件。

为准确评价龙潭隧道灰岩分布区岩溶及岩溶水对隧道施工的影响,在勘察阶段进行了大量地质工作,采用了地质遥感宏观指导下的大面积地质测绘及综合物理勘探等多种勘探手段,进行了大量钻探工作,并专门委托中科院桂林岩溶研究所对岩溶水文地质问题进行了专题研究,委托长江水利委员会长江科学院开展地应力测试及评价工作。

龙潭隧道除采用常规的隧道围岩稳定性分析与评价外,还运用岩溶调查的专门手段和方法,重视岩溶发育基本规律的研究。加强地质勘探手段,结合物探、钻探,综合判断,大力发展综合勘探手段。特别是不断提高物探技术水平,使其满足工程地质工作的要求,达到规范化应用的成熟程度。一方面在勘测设计阶段,确定隧道所处岩溶水系统及岩溶水动力分布,对岩溶水的可能性、涌水状态、涌水量进行评价,重点查明隐伏岩溶的分布形态,以确定岩溶整治的设计规模,为设计提供依据,使设计准确可靠;另外在施工过程中,加强超前地质预报,在开挖面前用TSP、红外线并结合超前钻孔查明隧道周围和开挖面前方15~200 m范围内的地质情况,及时预报隧道岩溶地质灾害,避免重大事故,作为确定施工方案、调整支护参数和衬砌结构类型的重要依据,及时提出处理预案。以弥补隐伏岩溶难以探测的不足。

(2)选择受岩溶灾害影响最小的隧道轴线。

隧道穿越堡镇~碑坳分水岭,该分水岭是丹水水系的青岩沟与四渡河水系的沟谷之间的区域分水岭。初步设计在《工程可行性研究》论证的路线走廊带和主要控制点的基础上,从不同海拔高度、不同越岭位置、不同接线方案等方面,进行了多方案比选,提出了高、中、低三个路线方案。高线方案隧道左右

洞长度分别为5 810 m、5 822 m,纵坡1.8%,中线方案隧道左右洞长度分别为8 674 m、8 670 m,纵坡1.504%,低线方案隧道左右洞长度分别为9 970 m、9 820 m,纵坡1.0%。在野外实地勘察中,调查发现高线方案基本与现有318国道平行,与318国道工程的干扰非常大,且两端接线标高大部分在冰冻积雪线之上,不利于行车安全,在初勘阶段就否定了该方案;后对中线和低线两方案进行了集中比选,进行了

同等深度的技术经济比较。考虑到低线方案工程规模大、投资高,隧道通风与防灾救援都较困难,运营费用高,且对两端接线行车条件的改善程度也非常有限。中线方案标高在冰冻积雪线之下,隧道纵坡为1.504%,行车条件好。从满足高速公路通行能力,节省工程投资的角度出发,推荐采用中线方案,隧道路线方案见图2所示。

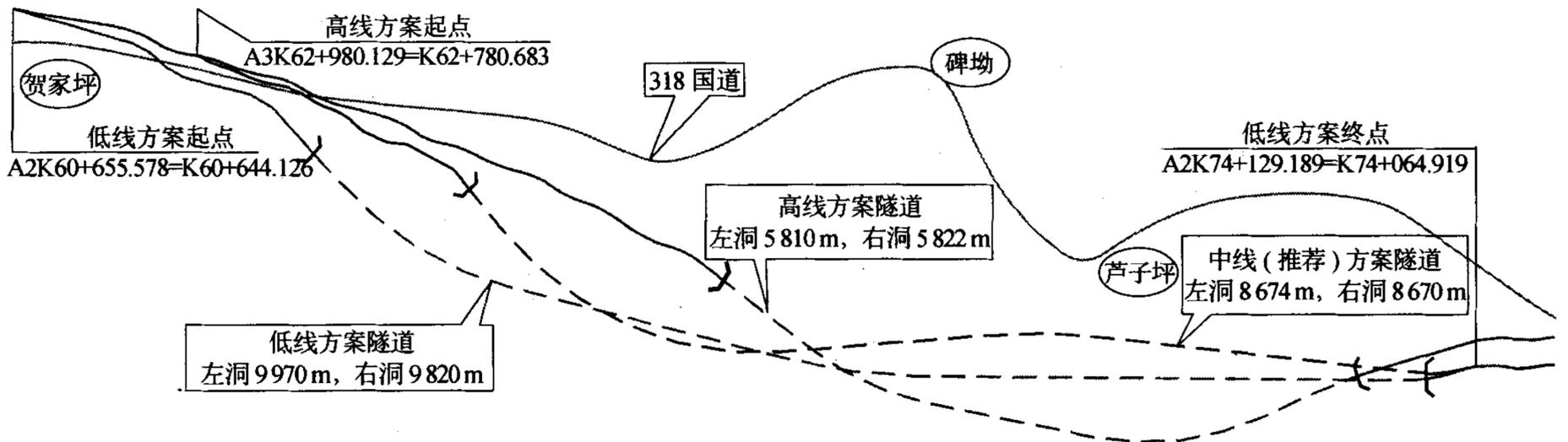


图2 龙潭隧道路线方案示意

技术设计和施工图阶段,根据地质勘察报告、岩溶水文专题研究报告、地应力测试报告,遵循地质选线、地形选线、环保选线,确定既要避开强岩溶带和地下水的威胁,又不能过多伸入志留系页岩高地应力地层核部的原则,同时兼顾斜井、竖井轴线和地面风机房的布置,以有利于行车安全和通风效果为出发点,对隧道轴线进行了调整。充分的地质资料和准确的判断,使隧道找到了理想的岩层,从开工到目前,隧道施工较为顺利,尚未遇到强岩溶发育和大规模涌水的情况,也未遇到高地应力现象,而位于轴线北侧的某隧道因高地应力影响,施工异常困难。

### (3) 注重环保和景观要求。

隧道建设超前考虑环保水保问题,了解工程对环境的影响并制定减轻对策。隧道设计坚持减少对环境破坏的影响,并尽可能地使工程与环境相协调。

隧道轴线避开了地下水的水平流动带,避免对地表植被、人文及自然景观、居民生活用水产生大的影响。针对地下水流失对隧道周边环境的影响情况,隧道地下水贫瘠地段采用“以排为主,防排结合,因地制宜,综合治理”的原则设计;对于岩溶发育、地下水丰富地段如采用“以排为主”的防排水原则会引起地表生态环境恶化的地段,则采用“以堵为主、限量排放”的原则并实施各项工程措施,根据超前地质预

报的结果和隧道开挖后的地质情况,通过向围岩注浆,形成围岩注浆固结堵水圈,减少围岩渗透系数,以限制排水量,实现控制排放的目的。

洞门设计坚持“早进晚出”,因地制宜地设计新型的环保洞门结构型式,尽量减少边仰坡的开挖高度,减少对山体的切割和对原状地表的破坏,并对开挖创面进行绿化,尽可能地与自然保持一致。

结合环评,隧道弃渣要求进行了综合处治,部分移作其他公路工程填方使用,优质石渣作为防护用片石或混凝土集料等。在弃渣场的位置选择上,尽量利用荒山、空地和劣地,不占耕地和良田,且不挤占河道过水断面,避免诱发泥石流,尽量选择在河流、凸岸边滩或阶地及山间洼地,并做好弃渣场的防护排水和绿化设计。弃渣层层压实,弃渣完成后整平场地,弃渣场周围设置排水沟,场地及坡面植草、灌木或植树,以绿化环境保护水土。弃渣场临河一侧设浆砌或干砌片石挡墙,确保弃渣不被河水冲走。靠山坡一侧,设置排水沟避免引起水土流失,石质弃渣场表面覆土予以绿化或还耕,防止水土流失。有条件时也可利用荒沟,在其中筑坝填入废渣,变荒沟成良田,增加耕地,变废为宝,化害为利。

### (4) 坚持“以人为本,建设和谐社会”的设计理念。

随着“以人为本,建设和谐社会”设计理念的逐

步深入,越来越重视运营维修期间隧道内的卫生条件和灾害情况下人员的安全逃生。

#### ①隧道通风方案,斜井、竖井的选型与布置。

龙潭隧道设计的每个阶段都面对着选择两段式通风和三段式通风的不同意见与分歧,三段式通风虽增加了一处斜井或竖井,增加了初期土建工程费用,但可减少后期运营费用,确保各通风段分段均匀,降低隧道内风速,提高隧道卫生标准,改善隧道行车条件和养护、维修人员的工作环境,特别是提高隧道抵抗各类灾害的能力,缩短了每个防火分区的长度,减少了火灾发生时的烧失长度,增强了隧道防灾与救援的能力,将人、车的安全和舒适放在第一位。最终推荐宜昌端采用双斜井方案,恩施端采用双竖井方案,采用三段式通风,该方案有如下优势。

龙潭隧道长度长,工作面少,工期较紧张,需要设置辅助坑道以辅助正洞施工,而宜昌端建井处隧道埋深为175 m,斜井长度约为424 m,设置2个斜井更有利于施工组织,可为主洞施工提供便利,大幅度提高施工效率,缩短工期。

恩施端建井处隧道埋深较大,超过330 m,若在该处设斜井辅助主洞施工效率会很低,成本也高,提高施工效率作用有限,而设置竖井可以大大减少通风阻力,从而降低通风运营费用。

设置2个斜井可提高斜井的提升能力,由于采用2套各自独立的提升系统,管理方便、安全可靠,有利于快速施工,加快隧道主洞施工。

设置2斜井+2竖井可大大简化地下联络风道的布置,减少通风阻力,更有利于提高通风效率,同时隧道需风量较大,采用该方案可减少单个通风井的面积,有利于降低工程难度。

设置2斜井+2竖井可使地表通风建筑物大大简化,并可减少井口污染空气和新鲜空气的串流。

将正常运营和火灾时的通风看作是整个通风系统的两种不同工况。为防止隧道火灾时产生的烟雾快速弥漫而引起能见度的降低及减轻烟气对人体的毒害作用,对火灾时的风机控制、烟流的排出路径、横通道的开启与关闭、逃生通道的空气补给、避难洞的新风需求等,都进行了仔细考虑。

#### ②消防与防灾救援系统设计。

隧道的防灾救援工作从项目立项就开始给予充分的考虑,除隧道结构采用耐火材料等防灾措施外,还配置了报警设施、警报设施,设置了合理完善的避

难场所和疏散通道,配备完善的消防设施、紧急疏散诱导标志和合理的防灾排烟系统,做好隧道监控管理和应急预案处理,救援组织计划充分考虑隧道的通风、报警设备和信号的配置,紧急救援可能遇到的问题和困难,事先编制有关控制程序,并根据演习和实际事件予以修正。防火区段的划分、消防措施的选用、逃生路线的预留、避难洞的位置、防灾风机的配置、防火救灾预案的制定等都经过仔细研究。防患于未然,为公众提供一个舒适、安全的交通通道。

#### (5)动态反馈设计和信息化施工。

众所周知,隧道施工是以自然为对象,故隧道施工的“风险”远比其他工程的“风险”为大,施工中会遇到断层、突泥、涌水、溶洞、软弱破碎带、瓦斯、硬岩岩爆和软岩大变形等不良地质条件。尽管在设计之前进行了地质调查、物探、钻探,甚至专门的岩溶水文调查和地应力测试工作,但要完全掌握隧道所在地的地质条件和地质灾害,实际上是很困难的,也是不现实和不经济的,设计选择的支护参数和采用施工措施不一定能适应复杂的地质条件。但如在隧道建设过程中能采取综合超前地质预报技术,进行掌子面观察及地质素描,予以预测,实施监控量测,对信息进行整理、分析、评价,并进一步进行反演分析和稳定分析,推求围岩—结构物的稳定和安全,用以指导设计和施工,确定支护施作方式和时间,调整支护参数,进行动态反馈设计和信息化施工,采取积极的技术措施,尚可“化险为夷”。反之,就可能形成灾害,给施工带来不可估量的影响。

龙潭隧道工程地质条件复杂多变,为确保隧道安全、顺利建设,实施“动态反馈设计和信息化施工”,工程建设按照“设计导向—超前地质预报—现场观测和监控量测—理论计算—修正设计—指导施工”的流程进行。工程建设可分调查、设计、施工、量测、再设计、再施工6个环节,从设计和施工各个环节允许有交叉和重复,隧道动态反馈设计和信息化施工以超前地质预报和现场监控量测为基础,借助计算机技术和有限元分析程序,进行反演分析和稳定分析,并结合实际施工经验,对施工方案进行分析评价,以指导施工。实施流程如图3所示。

#### (6)加大科技投入,进行技术攻关。

龙潭隧道建设过程中重视质量,依托科技提高隧道建设和营运管理水平,实现设计创新和推动科技进步。为了给这座处于岩溶条件下的国内第三长公路隧道的修筑和后期运营提供充分的科学依据,

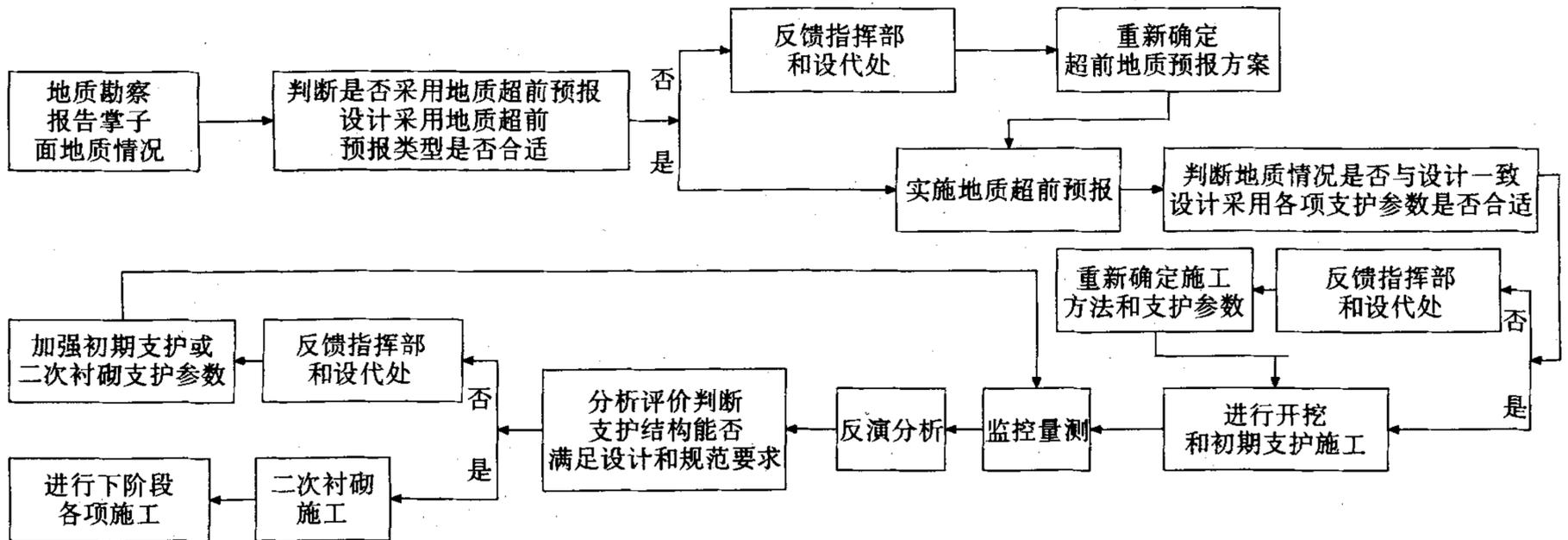


图3 动态反馈设计和信息化施工实施流程

避免或减少重大安全事故,为隧道工程建设保驾护航,针对该隧道进行如下9个关键技术的系统研究,将其纳入西部交通科研项目。

①特长隧道区域特殊地质环境与重大地质问题研究,主要包括围岩岩体力学参数的研究、地应力场特征的研究、场区地下水渗流场的研究等等。

②岩溶涌(突)水量预测的研究。

③施工阶段超前岩溶地质探测与目标识别的研究。

④基于隧道围岩与衬砌应力变形监控量测技术的反分析和信息化隧道建造技术研究。

⑤考虑地下水渗流场与围岩应力场的耦合作用下的围岩稳定性分析的研究。

⑥不同岩溶分布形态对隧道围岩稳定性的影响研究。

⑦复杂岩溶条件下的不同防排水措施的研究。

⑧溶洞、地下暗河等岩溶不良地质处治技术的研究。

⑨通风系统与防灾救灾研究,包括通风道主要设计参数及通风方式的研究、通风系统的物理模型试验与计算机模拟的研究、消防救援技术的研究等等。

在勘测、设计和施工过程中,将科研成果应用到实际生产中,用以指导设计和施工,确保隧道施工的安全。

## 5 结语

龙潭隧道充分借鉴了国内外长大公路隧道建设的成功经验,认真研究,精心设计,各分项设计界面合理,同时注意各分项的协调,目前工程进展顺利,希望能为相关类似工程积累一定的经验。

在勘察设计中既要采纳新技术、新方法、新材料,进行技术创新,又要兼顾传统技术。将技术可靠、经验成熟的技术在复杂的工程中成功地加以综合应用,这本身就是一种创造,也降低了工程风险。对我国没有实践经验或不够成熟的技术,需认真分析对比,在做好试验研究的基础上,确有需要时可合理采用。

## 参考文献:

- [1] JTJ026-90,公路隧道设计规范[S].
- [2] JTJ 026.1-1999,公路隧道通风照明设计规范[S].
- [3] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程技术手册—隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [4] 关宝树. 隧道施工中的灾害与防治. 铁路工程建设科技动态报告文集—铁路隧道及地下工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.
- [5] 白山云,蒋树屏,等. 岩溶地质特长隧道的关键技术问题及对策[C]. 山区高速公路、桥梁、隧道、关键技术研讨会论文集,2006.
- [6] 赵玉光,申玉生. 高速公路双连拱隧道信息化管理技术[J]. 岩石力学与工程学报,2004,(增2-5).