

岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究

李术才¹, 李树忱¹, 张庆松¹, 薛翊国¹, 丁万涛¹, 钟世航¹, 何发亮², 林玉山³

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250012; 2. 中铁西南科学研究院, 四川 成都 610031;

3. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 在岩溶地区隧道施工过程中, 经常遇到突水、突泥等无法预料的地质灾害, 给施工安全带来了重大灾难和无法估计的经济损失。为了保证岩溶隧道施工安全, 对岩溶裂隙水与不良地质体的发育情况进行准确及时的超前预报, 是当前岩溶地区隧道设计与施工中亟待研究与解决的关键问题。首先, 对隧道建设过程中岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报和综合预报体系的研究现状进行详细的介绍, 指出岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报中存在的主要问题, 总结隧道建设过程中地质缺陷超前勘探方法和高压大流量岩溶裂隙水超前预报方法; 然后, 重点介绍 TSP 超前地质预报系统探测溶洞、陆地声纳法探测断层、地质雷达探测地下水和红外探水法探测岩溶裂隙水等工程实例。最后, 总结预报各种不同地质体的有效方法和将要开展的研究热点和难点, 并对下一步所要开展的工作进行深入探讨, 对我国在岩溶裂隙水和不良地质体探查的理论和技术创新方面给予一定的帮助和指导。

关键词: 工程地质; 岩溶裂隙水; 不良地质体; 隧道地震预报; 陆地声纳; 地质雷达; 红外探水法

中图分类号: P 642; U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)02 - 0217 - 09

FORECAST OF KARST-FRACTURED GROUNDWATER AND DEFECTIVE GEOLOGICAL CONDITIONS

LI Shucui¹, LI Shuchen¹, ZHANG Qingsong¹, XUE Yiguo¹, DING Wantao¹,
ZHONG Shihang¹, HE Faliang², LIN Yushan³

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250012, China;

2. Southwest Research Institute, China Railway Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The unknown geological disasters such as water and slurry often gush in karst area during construction of tunnel, which brings momentous disaster and unestimated economic loss to construction safety. The precise and immediate advance forecast to the development of karst is the key problem to be researched and solved currently in tunnel design and construction in the karst areas, which brings important theoretical significance and practical value. A recent development of the forecast and the integration system of the forecast about the karst-fractured groundwater and the defective geological conditions are first introduced in detail. The key issues of karst-fractured groundwater and the defective geological condition in prediction are derived, then the method of forecasting defective geological condition and the karst-fractured groundwater with high pressure and large flow discharge are summarized. The engineering examples such as tunnel seismic prediction(TSP) prospecting karst cave, landsonar prospecting fault, geological radar prospecting underground water and infrared water detecting method prospecting karst-fractured groundwater are introduced emphatically. At last, the effective methods of forecasting all kinds of

收稿日期: 2006 - 02 - 15; **修回日期:** 2006 - 03 - 26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539080)

作者简介: 李术才(1965 -), 男, 博士, 1987年毕业于山东矿业学院土木工程系矿井建设专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事裂隙岩体断裂损伤与地质灾害超前预报及防治方面的教学与研究工作。E-mail: lishucui@sdu.edu.cn

the defective geological conditions and some study ideas and difficult technology are given; and the next stage of work to be undertaken is discussed deeply. The theory and technology initiative has help and positive guides in the fields of the forecast of the karst-fractured groundwater and the defective geological condition.

Key words: engineering geology; karst-fractured groundwater; defective geology; tunnel seismic prediction(TSP); landsonar; geological radar; infrared water detecting method

1 引言

近年来,随着我国西部大开发战略的深入开展,在地形、地貌及地质背景复杂、水能及矿产资源丰富、陆路交通网密度远低于全国平均水平的西部地区,在铁路、公路、水电、跨流域调水及矿产资源等领域将会修建更多的长大隧道工程。纵观隧道的修建历史,制约长大隧道发展的因素可以分为两大类,一类是施工技术方面的,如掘进技术、通风技术及支护衬砌技术等;另一类则是开挖可能遭遇的施工地质灾害的超前预报及其控制技术。在隧道岩溶施工中经常出现预料不到的地质灾害,如岩爆、塌方、软弱破碎带、节理发育围岩、断层、高地应力、冒顶、涌水、涌泥(砂)、泥石流、高瓦斯、强地震带和高地温等问题。长大隧道由于埋深大(有的甚至超过 2 000 m 以上)、洞线长(有的长大几十千米),往往施工前期的勘查工作十分困难,难以全部查清隧洞沿线有无大的断裂带、有无高地应力及岩爆、有无大量涌水等地质灾害和施工过程中所需要的水文、地质条件,在施工过程中经常出现突水、突泥、坍塌、岩爆等事件,给施工带来极大困难,造成人身伤亡事故。回顾成昆线、大秦线、衡广复线建设过程,因水文、地质问题引起的施工地质灾害造成停工的时间,约占施工总工期的 1/3~1/4,其中圆梁山施工中涌砂、涌水达数十次之多,造成重大伤亡,损失惨重。为了保证施工安全,减轻地质灾害损失,急需开展超前预报研究工作^[1]。

岩溶裂隙水在隧道施工中经常遇到,它容易导致掌子面涌水、突泥,围岩及支护结构变形、开裂及坍塌,影响施工进度,危及施工安全,破坏周围环境。我国岩溶不良地质发育分布广泛,特别是西南地区岩溶极为发育,随着西部大开发的进一步实施和国民经济的快速发展,岩溶地区地下工程日益增多,施工中遭遇岩溶裂隙水灾害的机率大大增加。锦屏二级引水隧洞将穿越锦屏山主体分水岭,所在地层断裂构造较为发育,岩体完整性不一,存在有

高压岩溶裂隙涌水、高地应力和岩爆等主要工程地质问题。据初步推测,最大水压达 10 MPa。高地应力、高外水压力引起的结构安全、高压涌水和不良地质的超前预报等问题是锦屏二级急待解决的关键技术问题。鉴于目前在大断面隧道施工中缺乏岩溶及裂隙水有效预报和治理方法研究,因此有必要开展建设过程中高压大流量岩溶裂隙水的超前预报和综合治理研究,特别是大范围充填溶洞、暗河、特大涌水的预报和整治施工技术和措施。此项研究将大大推进我国岩溶地区不良地质条件下的综合预报和治理的技术和方法^[2]。

因此,开展高压大流量岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报和综合治理技术研究具有重要的理论意义和现实意义。

2 建设过程中地质缺陷超前勘探方法

由于隧道深埋地下,工程地质和水文地质条件复杂、多变,期望在勘测设计阶段完全查明隧洞工程的岩体构造、状态、特性,特别是不良地质体的确切位置、规模等是十分困难的。因此人们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提供超前预报,隧道预测预报的主要内容包括:

(1) 断层及其影响带和节理密集带的位置、规模及其性质;

(2) 软弱夹层(含煤层)的位置、规模及其性质;

(3) 岩溶发育位置、规模及其性质;

(4) 不同岩类间接接触界面位置;

(5) 在采、废弃矿巷分布及其与隧道的关系;

(6) 工程地质灾害可能发生的位置和规模;

(7) 隧道围岩级别变化及其分界位置;

(8) 不同风化程度的分界位置;

(9) 不良地质体(带)的成灾可能性;

(10) 隧道涌水位置、水压及水量;

(11) 隧道围岩级别变化及其分布。

在此基础上,提出隧道施工方法、地质灾害预防处理措施建议。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经济损失和人员伤亡。

隧道施工开挖掌子面前方的不良地质情况的预报是国内外工程地质和隧道工程界十分关注而又没有得到很好解决的难题, 隧道地质超前预报由来已久。国内从 20 世纪 50 年代开始, 先后采用超前地质导坑, 水平超前钻探等方法进行超前地质预报。超前导坑掘进时, 同样存在地质预报的问题, 而且由于该方法代价高, 在实际工程中除非有其他用途如运输、通风等, 该方法在实际工作中很少采用。水平超前钻探法在钻深孔时, 钻孔无法保持水平, 同时需要大量占用掌子面的工作时间, 严重影响施工进度。

由于上述方法预报距离近、对隧道掘进施工干扰大, 不能满足隧道快速、科学施工的需要。为了开发出预报距离远、施工干扰小、预报准确的科学预报方法, 人们开始探索用物探方法开展隧道中地质预报的工作。20 世纪 80 年代初, 我国首先提出用物探方法对隧道进行超前地质预报, 针对大瑶山隧道上崩塘竖井——滑石排 2 号斜井可能出现岩溶水问题, 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。1986 年, 铁道部隧道工程局在南岭隧道探查和处理岩溶过程中, 曾用雷达和瑞利面波法对掌子面前方地质开展探查试验。20 世纪 80 年代后期, 在大秦铁路隧道施工过程中, 铁道部隧道工程局与中国科学院地质所王思敬院士等合作, 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。

1992 年, 重庆煤炭研究所用自制探地雷达, 在开滦煤矿井下巷道对工作面前方不良地质情况进行超前预报研究。1992~1993 年, 水电部贵阳勘测设计院物探队用美国产地质雷达在锦屏二级电站 5 km 勘探洞施工时, 对不良地质进行超前预报工作(以探查大裂隙和断层为主)。铁道部科学研究院铁道建筑研究所经过对多种物探方法进行现场试验和生产使用, 于 1995 年确定了以“地震反射负视速度法(隧道 VSP)”和“陆地声纳法”为主、探地雷达和水平声波剖面法(HSP 法)为辅的综合物探方法, 对隧道前方不良地质缺陷进行超前预报, 取得了较好的效果。

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^[3]。国内也有不少学者提出和采用了地质方法预测隧道

前方地质缺陷, 如刘志刚和刘秀峰^[4]提出用断层参数来推测预报其他不良地质体位置和规模的方法。

近年来多家大专院校、科研院所和工程单位应用 TSP202 和 TSP203、地质雷达和陆地声纳等设备结合工程地质方法对国内秦岭隧道、圆梁山隧道、乌鞘岭隧道和龙潭隧道、八字岭隧道、庙埡隧道、漆树槽隧道、宜万铁路沿线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, 但也经常出现预报失败的情况, 尤其是岩溶、溶洞的预报。国外曾尝试运用地质雷达进行潜在岩溶危害的超前地质预报研究工作, 如 1984 年美国学者 Benson 等在北卡罗来州 Wilmington 西南部的一条军用铁路里用地质雷达进行了超前预报工作; 1992 年瑞士 Amberg 公司推出用于隧道超前预报的 TSP 方法, 近年又推出 TSP203; 1995 年日本推出 HSP(后又称隧道 HSP 或 TSP)。2000 年随着隧道反射地震波 CT 技术进一步发展, 美国 NST 工程公司发展了 TRT 技术^[5]。

由于物探的多解性, 单一预报方法对地质预报的准确度并不十分可靠, 同时不同方法对不同的地质缺陷预报效果也不尽相同。国内外都在试图发展准确预报不良地质的三维可视化物探设备, 从目前状况看, 还没有哪种设备能对各种地质缺陷做出准确预报^[6]。王梦恕院士根据多年的工程实践经验, 总结出隧道超前预报“洞内外结合, 以洞内为主; 长短结合, 以短为主”的原则。

TSP 地震反射波预报法, 对于预报隧道工作面前方的地质变化, 如断层和其他不良地质带, 预报范围可达 100~150 m, 不需要占用隧道工作面, 对隧道的施工影响较小, 是目前隧道地质缺陷超前预报中较多采用的方法^[7]。TSP 对工作面前方遇到与隧道轴线近垂直的不连续体(节理、裂隙、断层破碎带等)的界面, 其结果将是相当准确可靠的, 如果不连续体的界面形状不规则, 准确预报的难度较大^[8]。由于喀斯特岩溶地区溶洞发育复杂多变、大小不定、形态各异, 几何形状变化大, 因此 TSP 对溶洞的探测效果较差; 对于溶洞体的尺寸较大, 且呈近平面状, TSP 有可能探测到, 但信号反映的效果较差, 需要结合具有丰富地质经验的专家来分析^[9, 10]。“地震反射负视速度法(隧道 VSP)”、HSP 方法与 TSP 方法原理相同, 仅工作方法(现场采集)和处理软件不同。

钟世航等^[11, 12]发明的“陆地声纳法(极小偏移

距超宽频带弹性波反射单点反射连续剖面法)”采用在掌子面上设水平和铅垂两条测线,点距为25~30 cm,用锤击作震源,在靠近激震点处设检波器接收反射波。它近于自激自收的方式,对面状界面、小溶洞和溶槽、溶管等有较好的反映;利用互相垂直的两条测线的资料可得到更丰富的信息,同时对前方不良地质体进行空间定位^[11]。该方法、仪器及资料处理软件均为我国有自主知识产权的技术,探查距离距达100 m甚至更远。目前,该方法软件处理和解释还需进一步改进^[12]。

隧道反射地震波CT技术开始应用于地质超前预报,其中有美国NSA工程公司开发的TRT技术(真正反射层析成像)和铁道部科学研究院西南分院的声波CT技术。铁道部科学研究院西南分院从20世纪70年代初就已开展声波探测技术的应用与研究,经过几十年的艰苦努力,在声波探测岩体内缺陷如构造断裂、岩溶洞穴、软弱夹层位置及规模的探测确定等方面积累了丰富的经验^[13]。

上述TSP等弹性波反射类方法可探查隧道掌子面前方地质缺陷(如断层、大的节理、裂隙、破碎带等),由于目前对不平行于掌子面的不良地质体的反射面,现场仅能测准第一层反射面的岩体波速 V_1 ,后面各层的波速 V_2 , V_3 等的准确测量仍是需要突破的问题,因此该类方法对反射面空间准确定位比较困难。同时,由于所测到的反射波均是反射面垂直的,空间定位时仅能将反射面沿产状延伸到隧道的正前方。因此,预报距离越远,误差越大,错误率越高。所以该类方法预报距离应尽量控制在100 m以内^[14]。

地质雷达是应用电磁波的探测技术,它根据电磁波双程走时的长短差别,确定探测目标的形态和属性,结合理论分析达到对前方目标的探测与判断^[15, 16];主要用于对掌子面前方短距离(20~30 m)的特殊地质问题(如破碎带、岩溶地区发育的溶洞、裂隙水等)进行预测、预报,缺点是预报距离短,对工程施工干扰较大^[17~19]。

综上所述,对查找掌子面前方的断层、破碎带、溶洞等地质缺陷已有了较为可用的物探方法和仪器。但是这些方法仍有许多亟待解决问题和改进的地方,尤其是对反射类物探方法(TSP、陆地声纳及探地雷达)对探查对象空间定位的改进和测定掌子面前各层岩体波速的理论、方法、技术及解释软件并未实现完全的突破。同时,也缺少对地质方法和

物探方法综合集成方法。因此,急需对超前地质预报理论、方法和技术进行深入研究,建立一套软硬件相结合的综合地质和物探手段最佳组合的工程地质预报方法。

3 建设过程中高压大流量岩溶裂隙水超前预报方法

目前国内外对隧道施工前方含水情况十分重视,已有许多探测岩溶和裂隙水的方法:水文地质法、地质雷达技术、红外线技术(岩体温度法)、瞬变电磁法等。

水文地质法从地质角度分析研究岩溶地下水的储水、径流通道,认为向斜盆地、背斜轴部、断层破碎带、地层不整合面以及已发育岩溶管道等地质条件下易发生涌水^[20]。中国地质科学院岩溶地质研究所利用水文地质法和其他手段对我国岩溶地区地形地貌、地质、岩溶、地下水的基本类型和发育规律等进行了深入研究^[21, 22],先后参与过一批大型建设工程项目的超前地质预报工作,如大巴山隧道、锦屏二级电站隧洞岩溶涌水预报、锦屏水电站输水隧洞岩溶涌水预报、锦屏水电站(二级)输水隧洞西雅蓉江段岩溶水文地质调查、襄渝铁路大巴山隧道岩溶涌水施工预报,近年开展了沪蓉高速公路湖北恩施段大型隧道群、渝怀铁路园梁山等4座隧道地质勘探、涌水预测与超前预报工作,积累了较为丰富的工作经验^[23]。

地质雷达对水敏感,是查找地下水的有效工具,是目前预报掌子面前方水体的较好方法。该方法在隧道衬砌背后含水裂隙检测中,取得了较好的效果。另外,该方法在锦屏试验洞和锦屏二级电站辅助洞预报水时,也取得了比较理想的效果。但地质雷达探查的距离较短(<30 m),数据处理和资料解释难点较多,需要专家级的人员凭经验作正确判断,一般工作人员难以准确掌握^[24]。同时地质雷达易受隧道中金属物等干扰,影响掌子面前方水体的预报位置和精度^[25]。

红外线技术是一种辅助探水方法,根据掌子面温度受前方水体影响,其温度变化来探查15 m以内的水体。但由于该方法受施工环境等各种因素的影响,掌子面的温度受到干扰很多,以至影响其探查效果^[26]。岩体温度法试图探测更远的范围,此方法认为隧洞内施工期涌水往往与隧道施工揭穿含水构

造(充水岩溶如溶洞、溶管、地下岩溶暗河等, 断层破碎带和含水地层)密切相关。由于隧道前方含水体的深部循环及其向周围岩体的渗透, 造成岩体温度随距含水体距离的变化而变化。该方法就是根据这一原理对隧道前方是否含水进行探测, 为避免洞内施工对岩体温度的影响, 它要求采用一定深度的钻孔测试岩体内部温度。目前何发亮等^[27]已对该方法实现了信号采集系统的计算机控制和信号储存计算机化, 改变了早期探测原始波形、波谱照相储存、数据现场判读、记录的状况。其专用软件的开发, 更大大加快了探测数据分析处理的速度和精确度, 实现了探测结果的平面展示到立体展示, 同时波反射成像软件的成功开发, 使探测结果显示更加形象化。虽然与实际有效应用还有很多理论和技术问题需要研究, 但其对岩溶裂隙水的预报不失为一种很有发展前途的方法。

瞬变电磁法(TEM)和电磁剖面法(MT)都是利用阶跃波形电磁脉冲激发, 利用不接地回线向地下发射一次场, 测量由地下介质产生的感应二次场随时间的变化^[28]。日本试验了 MT 法, 根据含水层为低电阻率的特征, 可探寻掌子面前方低电阻层。但 MT 为剖面型方法, 定量精度差。在地面上探查地下水的的方法很多, 大多数方法需要探查深度相近的场地, 而 TEM 法则可利用“烟圈”效应, 用较小的场地探测大于发射场地 10 倍以上的深度, 适用于在狭小的掌子面上探测较远深度, 可能达到掌子面前方 40~60 m 或更远。李貅和钟世航利用该方法在锦屏二级电站 5 km 探洞及其 A, B 辅洞、宜万线八字岭隧道等现场试验, 证明了该方法可作为远距离探水的主要手段, 但目前尚未解决精确定位的计算问题。TEM 法在隧道中探查掌子面前方地下水还处于试验阶段, 缺乏大量的试验研究。同时在理论、技术方法和资料处理软件等方面还需进一步改进, 各种地质超前预报方法详见表 1。

大量的隧道工程实践表明, 由于目前现有的隧道地质超前预报方法无法对较长距离的岩溶、岩溶地下水体进行准确探测定位, 往往造成岩溶突水、突泥、涌砂等灾害, 在矿山工程中往往造成重大事故。随着西部水电工程的开发, 不可避免地会遇到大量的深埋水工隧洞岩溶水害和不良地质问题。因此, 需要发展一种综合有效的方法, 开展高压大流量岩溶裂隙水与不良地质情况的超前预报, 对确保大型水电工程开发的顺利进行, 无疑具有重要的现

表 1 地质超前预报方法

Table 1 Geological prediction methods

预报方法	预报手段
直接预报法	水平钻孔; 超前导坑
地质分析法	断层参数预测法; 地质体投射法; 正洞地质编录与预报
物探法	TSP 超前预报技术; 地震负视速度法; TST 超前预报技术; 水平声波剖面法; TRT 真地震反射成像技术; 陆地声纳法; 面波法; 地质雷达技术; 红外探水法; 瞬变电磁法; BEAM 法
地质物探综合分析法	收集、整理地质资料; 施工地质编录; 围岩特性测试; 地球物理探测; 地质物探综合分析

实意义。这对其他类似工程也有相当大的指导意义和推动作用。

4 工程实例

4.1 齐岳山隧道大型溶洞超前预报

齐岳山隧道是沪蓉(上海—成都)西高速公路宜昌—恩施段的重要控制性工程之一。隧址区位于上扬子台坪恩施褶皱带和利川褶皱带与四川台坳川东褶皱带接触部位, 地貌单元属构造侵蚀中低山区, 主要表现为古夷平面的岩溶地貌特征。隧道主要穿越齐岳山脉, 峰丛和槽谷相间排列, 槽谷中发育落水洞、溶蚀洼地等。主要构造有齐岳山背斜、齐岳山断层(F3)以及康家大槽断层(F4), 地质构造复杂。隧道处于岩溶发育区, 存在溶洞、暗河等地质灾害。

本次预报采用 TSP203plus 系统, 预报的范围为 ZK326+140~+280。图 1~3 为探测分析图。据 TSP 探测分析结果, 在 ZK326+240~+258 内, 纵、横波波速均大幅降低(V_p 由 2 950 m/s 降为 2 550 m/s, V_s 由 1 850 m/s 降为 1 350 m/s), 泊松比明显增加(ν 由 0.15 增大到 0.34), 密度显著降低(由 2.12 g/cm³ 降

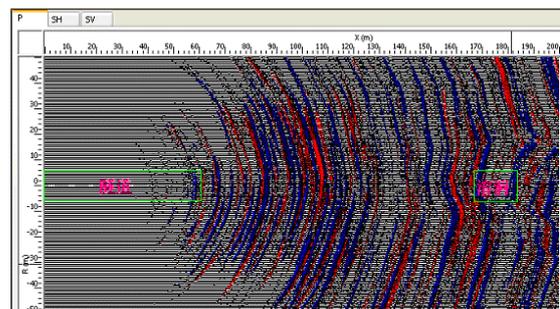


图 1 深度偏移图

Fig.1 Map of depth migration

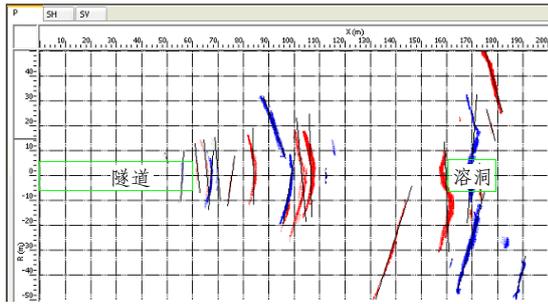


图2 反射层提取图
Fig.2 Map of reflector extraction

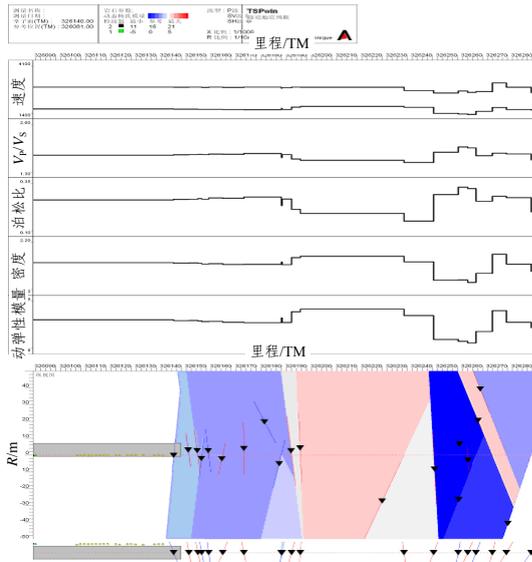


图3 预报结果2D视图
Fig.3 2D view of prediction result

为 1.95 g/cm^3)和弹性模量显著降低(由 17 GPa 降为 9 GPa),因此,推断该段有较大溶洞出现。在隧道实际开挖过程中,当 $\text{ZK326}+250$ 掌子面爆破出渣时,左侧底板出现一直径约 70 cm 的向下孔洞。经过扩大洞口勘测探明,该溶洞为隧道底板下伏壶状溶洞(见图4),沿隧道线路方向长 40.0 m ,宽 53.0 m ,最大空间高度 24.0 m ,溶腔体积约 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。已掘进隧道有 15.0 m 长在溶腔空洞上方,隧道底板厚



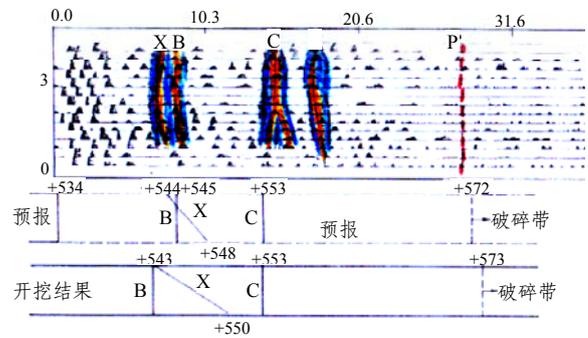
图4 溶洞出露照片
Fig.4 Photograph of displaying karst cave

度 $1.5 \sim 10 \text{ m}$ 。所以溶洞在地板下实际位置为 $\text{ZK326}+235$ 。掌子面前方 100 m 溶洞预报的结果与实际基本一致。

4.2 云台山隧道“关门断层”超前预报

云台山隧道穿过多条断层及其影响破碎带,“关门(地名)断层”是其中之一。山顶断层出露因隧道埋深较大,但两个钻孔均未能钻到它,随隧道掘进进行超前预报工作。利用陆地声纳法对 $\text{DK86}+534$ 和 $\text{DK86}+551$ 进行了超前探测,在掌子面上分别设了长 4 m 的水平测线和长 2 m 的铅垂向测线各一条,现场采集用时各约 40 min 。预报中给出了主干断层在隧道中出露的里程和产状、厚度,并查出了宽约 20 m 的断层影响破碎带的大致出露里程。

探查预报结果经开挖证实,预报的大节理、小断层及“关门断层”在隧道中出露的里程与开挖相差 1 m 左右,但“关门断层”的断层泥厚度预报比开挖实际厚度厚了 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 。图5所示为云台山隧道 $\text{DK86}+534$ 掌子面预报前方资料及开挖后实际情况对比。从图5中P的两边可清晰地看到反映的图像不同,右边高频成分明显增多,频谱分析更定量地反映了这规律。这是岩体节理裂隙发育、切割的岩块小,致使高频的波反射而致,此结果已通过开挖得到证实。



B, C—大节理,隧道拱部小方; X—小断层,隧道拱部小坍方;
P—断层影响破碎带

图5 云台山隧道 $\text{DK86}+534$ 掌子面预报前方资料及开挖后实际情况对比

Fig.5 Time-profile of landsonar for forecasting geology ahead of $\text{DK86}+534$ working face in Yuntaishan tunnel and contrast with real situation

4.3 北京地铁奥运支线地下水超前预报(地质雷达)

北京地铁奥运支线全部为地下线,全长共为 4398 m ,矿山法施工区间约 3140 m (双线)。由于施工期受地下水影响,为保证隧道暗挖施工安全,确保工期和质量,开展了地下水超前地质预报研究,

图 6 所示为探地雷达探查掌子面前方地下水的覆存状态,其探测距离在 15 m 左右,其预报结果在实际施工中得到认证。白色椭圆标示者为地下水的反映。但由于隧道中的金属物件等对雷达波的干扰及排除还需要进一步研究。目前还无法实测掌子面前方岩体的雷达波速,因此雷达探测的定量解释也还存在问题。

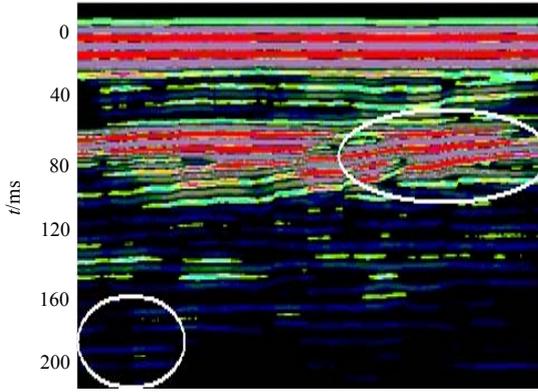


图 6 探地雷达探查掌子面前方地下水

Fig.6 Exploring groundwater ahead of working face by georadar

目前遇到掌子面前方有地下水时,人们希望对被探到的低电阻体是否是含水需要做出正确的判断。由此开展了对地质条件的分析判断,通过综合物探,运用探地雷达以及瞬变电磁法采集到的资料的进一步分析来解决。

4.4 龙潭隧道地下水超前预报(红外探水法)

龙潭隧道是新建高速公路沪蓉西中宜昌一恩施段的重要控制性工程之一。左洞全长 8 694 m,右洞全长 8 620 m,最大埋深 530 m,属深埋特长隧道,是全国第二长的公路隧道。该隧道所属地段位于构造溶蚀,侵蚀低中山沟谷地貌区,地形条件复杂。本区地层的岩性主要是志留系砂页岩和奥陶系碳酸盐岩地层,地下水以岩溶水为主。隧道从 ZK70+420(YK70+880)到出口段位于灰岩分部区,该段地表水一部分深入洪积沙砾石层中成为伏流,另一部分经岩溶裂隙、管网流入地下;而龙潭沟北侧岩溶水应顺层向西侧侵蚀基准面,在低洼处排泄,但是由于受地层可溶性差异,构造等因素影响,使地下水的径流条件更加复杂。鉴于隧址区复杂的地质情况,对本隧道用红外探水进行了超前预报。

由于所有物体都发射出不可见的红外线能量,这能量的大小与物体的发射率成正比。而发射率的大小取决于物体的物质和它的表面状况。当隧道掌子面前方及周边介质单一时,所测得的红外场为正

常场,当前面存在隐伏含水构造或有水时,他们所产生的场强要叠加到正常场上,从而使正常场产生畸变。据此判断掌子面前方一定范围内有无含水构造。现场测试有两种方法:一是在掌子面上,分上、中、下及左、中、右等 6 条测线的交点测取 9 个数据,根据这 9 个数据之间的最大差值来判断是否有水;二是由掌子面向掘进后方(或洞口)按左边墙、拱部、右边墙的顺序进行测试,每 5 或 3 m 测取一组数据,共测取 50 或 30 m,并绘制相应的红外辐射曲线,根据曲线的趋势判断前方有无含水。

掌子面上 9 个数据的最大差值大于 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,就可以判定有水;红外辐射曲线上升或下降均可以判定有水,其他情况判定无水。红外探测的特点是可以实现对隧道全空间、全方位的探测,仪器操作简单,能预测到隧道外围空间及掘进前方 30 m 范围内是否存在隐伏水体或含水构造,而且可利用施工间歇期测试,基本不占用施工时间。但这种方法只能确定有无水,至于水量大小、水体宽度、具体的位置没有定量的解释。

根据红外线场强值与距掌子面距离的关系曲线分析,靠近掌子面左拱底区域附近温度场强曲线趋势变化不大,表明掌子面 ZK72+210 附近,靠近左拱顶区域的含水情况和目前围岩的含水情况基本相同,而右边墙中部、拱顶、右拱底以及左边墙中部曲线趋势急剧下降(见图 7),证明存在异常场,可以推测:掌子面前方 20 m 范围内这些区域可能有含水构造存在。在隧道施工过程中,在该处果然遇到了水,验证了本次红外探水的有效性和准确性。

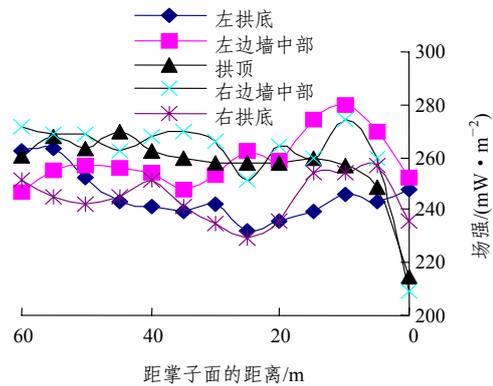


图 7 红外探水成果图

Fig.7 Infrared water detecting results

5 结论与展望

针对高压大流量岩溶裂隙水与不良地质情况超

前预报应以现场地质调查、钻孔资料和理论分析为手段重点研究岩溶裂隙发育特征、规律及可能含大流量高压地下水的构造、裂隙发育规律,建立岩溶地下水流域单元识别,给出在隧洞涌水情况下潜在的流域袭夺或越流补给规律,预测潜在涌水点的分布与隧洞施工期和运营期涌水量及其动态变化。

在此基础上,本文利用物探的方法对隧道建设过程中地质缺陷进行进一步探测,研究相关方法的优缺点,并加以改进。其中,对于 TSP、陆地声纳、探地雷达等在探查裂隙、断层等方面已证明为有效的方法,以强调加强与地质的结合、加强正反演问题的研究和改进现场最佳工作方式手段,提高其预报成功率;以研究现场准确测定岩体波速为切入口,特别是研究并突破陆地声纳法为基础的现场实测倾斜各层岩体波速的理论、技术和软件,提高确定被探测物体空间位置的精度。

同时,进一步研究和重点突破地质缺陷是否含水的物探技术方法。通过对各种方法的理论研究和工程实用中发现的问题,对反映地下水灵敏的电磁类方法进行改进和试验,并开发相关的应用软件。

参考文献(References):

- [1] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, (1): 7 - 9, 18.(WANG Mengshu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004, (1): 7 - 9, 18.(in Chinese))
- [2] 傅鹤林, 韩汝才. 隧道衬砌荷载计算理论及岩溶处治技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.(FU Helin, HAN Rucai. Computational theory of the lining load and the treating technique of the karst for the tunnel[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.(in Chinese))
- [3] 陈成宗, 何发亮. 隧道工程地质与声波探测技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.(CHEN Chengzong, HE Faliang. The engineering geological and the sonic detection technique of the tunnel[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2005.(in Chinese))
- [4] 刘志刚, 刘秀峰. TSP 在隧道隧洞超前预报中的应用与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 399 - 1 402.(LIU Zhigang, LIU Xiufeng. TSP application and development in tunnel forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 399 - 1 402.(in Chinese))
- [5] BUTTON E, BRETTEREBNER H, SCHWAB P. The application of TRT-true reflection tomography at the Unterwald tunnel in Felsbau[J]. Geophysics, 2002, 20(2): 51 - 56.
- [6] 李苍松, 何发亮, 丁建芳. 武隆隧道岩溶地质超前预报综合技术[J]. 水文地质工程地质, 2005, (2): 96 - 100.(LI Cangsong, HE Faliang, DING Jianfang. Synthesis prediction technology of karst geology in Wulong tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (2): 96 - 100.(in Chinese))
- [7] 肖书安, 吴世林. 复杂地质条件下的隧道地质超前探测技术[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 159 - 165.(XIAO Shu'an, WU Shilin. Geological prediction technique for tunnel construction under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(2): 159 - 165.(in Chinese))
- [8] CHRISTIAN D. Klose fuzzy rule-based expert system for short-range seismic prediction[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(3): 377 - 386.
- [9] INAZAKI T, ISAHAI H. Stepwise application of horizontal seismic profiling for tunnel prediction ahead of the face[J]. The Leading Edge, 1999, 18(12): 1 429 - 1 431.
- [10] SHIMIZU N, KATO T. Development and application of seismic reflection survey in a tunnel using hydraulic impactor or vibrator[C]// The 7th SEGJ International Symposium on Imaging Technology. Sendai, Japan: [s. n.], 2004: 236 - 246.
- [11] 钟世航, 曹大明. 隧道中用陆地声纳法在开挖的岩面或衬砌表面测围岩松弛带深度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 722 - 1 727.(ZHONG Shihang, CAO Daming. Detecting depth of relaxation zone of tunnel surrounding rock by using landsonar on surface of rock or lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 722 - 1 727.(in Chinese))
- [12] 钟世航. 陆地声纳法的原理及其在铁路地质勘测和隧道施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 1995, 16(4): 48 - 55.(ZHONG Shihang. The principle and application of landsonar method in railway geological survey and tunnel construction[J]. China Railway Science, 1995, 16(4): 48 - 55.(in Chinese))
- [13] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12 - 15.(HE Faliang, LI Cangsong. The development of geological forecast in tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(3): 12 - 15.(in Chinese))
- [14] 钟世航. 用陆地声纳法和微分电测深结合探查岩溶、洞穴[J]. 物探与化探, 2003, 27(3): 240 - 243.(ZHONG Shihang. The combination of landsonar and differential electrical sounding for the exploration of karst and underground caves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(3): 240 - 243.(in Chinese))

- [15] CREMER F, JONG de W, SCHUTTE K. Fusion of polarimetric infrared features and GPR features for landmine detection[C]// The 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Delft, Netherlands: [s. n.], 2003: 1 - 6
- [16] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251.(QU Haifeng, LIU Zhigang, ZHU Hehua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 246 - 1 251.(in Chinese))
- [17] 夏照华. 地质雷达在探测地下溶洞中的应用[J]. 西部探矿工程, 2005, (1): 91 - 92.(XIA Zhaohua. Application of GPR to a detecting karst cave[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, (1): 91 - 92.(in Chinese))
- [18] CASAS A, LAZARO R, VILAS M, et al. Detecting karstic cavities with ground penetrating radar at different geological environments in Spain[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. Sendai, Japan: [s. n.], 1996: 455 - 460.
- [19] FOESSEL A, APOSTOLOPOULOS D, WHITTAKER W L. Radar sensor for an autonomous Antarctic explorer[C]// Proc. Spie, Mobile Robots XIII and Intelligent Transportation Systems. [S. l.]: [s. n.], 1999: 117 - 124.
- [20] 陈伟海, 张之淦. 峰林平原区岩溶含水层特征与调蓄功能[J]. 中国岩溶, 1999, 18(1): 19 - 27.(CHEN Weihai, ZHANG Zhigan. Characterizes and regulative capacity of karst aquifers in peak forest-plain area[J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(1): 19 - 27.(in Chinese))
- [21] 张 卫, 覃小群, 易连兴, 等. 以控制地面沉降为约束的地下水资源评价[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 196 - 205.(ZHANG Wei, QIN Xiaoqun, YI Lianxing, et al. Ground water resources assessment under the conditions to control ground subsidence[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(3): 196 - 205.(in Chinese))
- [22] 张 卫, 覃小群, 易连兴, 等. 上海地区地下水系统及地下水资源特征[J]. 中国岩溶, 1999, 18(4): 343 - 351.(ZHANG Wei, QIN Xiaoqun, YI Lianxing, et al. Groundwater system and its characteristics in Shanghai Region[J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(4): 343 - 351.(in Chinese))
- [23] 张 卫, 覃小群, 易连兴, 等. 西南岩溶区岩溶水有效开发利用规划分区[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 27 - 34.(ZHANG Wei, QIN Xiaoqun, YI Lianxing, et al. Karst water effective development planning division in the karst area in Southwest China[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(1): 27 - 34.(in Chinese))
- [24] BROOKS J W. Applications of GPR technology to humanitarian demising operations in Cambodia: some lessons learned[R]. [S. l.]: Brooks Enterprises International, Inc., 1996: 1 - 9.
- [25] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(LI Daxin. Ground penetrating radar method and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [26] 王 鹰, 陈 强, 魏有仪, 等. 红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 855 - 857.(WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Application of infrared acquisition technology in prediction of water gushing in Yuanliangshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 855 - 857.(in Chinese))
- [27] 何发亮, 李苍松, 粟 健, 等. 声波探测技术的新发展及其应用[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(4): 83 - 87.(HE Faliang, LI Cangsong, SU Jian, et al. Recent development and application of acoustic sounding[J]. China Railway Science, 1999, 20(4): 83 - 87.(in Chinese))
- [28] 李 貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35 - 38.(LI Xiu, GUO Wenbo, LI Yumao. Application of TEM to exploration of water gushing channel way in coal field[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2000, 22(3): 35 - 38.(in Chinese))