王泽峰,钟世航.陆地声纳法在探测岩溶区高铁隧道基底隐患中的应用[J].中国岩溶,2019,38(4):573-577.
DOI:10.11932/karst20190415

# 陆地声纳法在探测岩溶区高铁隧道基底隐患中的应用

王泽峰[1],钟世航[1,2]
(1. 北京水工资环新技术开发有限公司, 北京 100044; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

**摘 要**:沪昆高铁的麻拉寨隧道和贵广高铁的高天隧道在联调联试阶段均发生不均匀沉降和底鼓现象,为了摸清隧道基底致灾原因并对注浆质量进行检测研究,采用陆地声纳法在隧道岩溶段进行了检测,在基底下方探测出较多中、小溶洞,多组中、小断层延伸到基底下方使溶洞之间互相连通,由于雨季隧道周边水压力强烈的变化,造成了隧道不均匀沉降与底鼓,根据数据图像的特殊反应确定了破碎区域和浆注入区,依据探测结果确定治理方案并在治理施工中得到验证。

**关键词**:陆地声纳法;隧道基底;岩溶洞穴;注浆检测;隧道底鼓
**中图分类号**:U452.11 **文献标识码**:A
**文章编号**:1001-4810(2019)04-0573-05 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

## 0 引 言

我国岩溶区总面积约363万km$^2$,占国土面积的1/3以上。而我国岩溶区高速铁路时程约0.36万km,占比高达72%;且随着我国西部铁路建设的加速,岩溶区高速铁路占比还将进一步增加。在岩溶区进行工程地质施工问题较多,尤其是高速铁路线路曲线半径大、速度目标值高,线路对地质条件的适应性差,对场地的稳定性要求高[1-3],而岩溶发育区溶洞、管道、裂隙多,特别是雨季降水多,地下水压力的变化对工程稳定性构成很大的威胁,可能会引起隧道高铁基底发生沉降或者底鼓、隧道边墙因压力聚增发生衬砌破坏,因此,对高铁隧道岩溶段的前期设计、施工加固和后期监测治理都是非常必要的。

目前,在岩溶区高铁基底探测中采用的方法有探地雷达,地震映像、跨孔CT或电阻率法等方法,但是在隧道现场,探地雷达受到基底钢筋干扰和多次反射的限制影响探测效果,且探深有限;地震映像法使用频率较低,易受到机械和施工人员的振动噪声干扰,且分辨率不够高;跨孔CT需要钻孔,由于岩溶地区钻孔存在涌水和漏水问题,很难布置钻孔,且成本高昂;相较而言,电阻率法因为混凝土接地电阻太大并受到地电干扰而实施困难[1-3,11-20]。

沪昆高铁的麻拉寨隧道和贵广高铁的高天隧道在联调联试阶段均发生沉降和底鼓现象,施工单位进行了一定的注浆治理工作。为了摸清隧道基底底鼓原因,采用陆地声纳法对单个溶洞分布及小断层分布情况及注浆治理质量进行精细检测研究。

## 1 探测方法原理与特性

陆地声纳法的实质是“极小震—检距超宽频带弹性波超短余震接收系统单点连续剖面法”,简称“陆地声纳法”。它的主要特点是[4-10]:

(1)采用近于零震—检距的排列方式,自激自收,采用锤击震源,实际上可以在激发点两侧各放1检波器,2道排列;

(2)抗干扰:由震源产生的波先后传到检波器的是直达纵波、直达横波、面波、声波、反射波、折射波,

第一作者简介:王泽峰(1984-),男,工程师,从事地球物理勘探。E-mail:wzfqter@foxmail.com。
收稿日期:2019-04-30

万方数据

为了避开干扰，采用极小震—检距，可以避开先至的直达纵波、直达横波、声波、折射波和面波等；

（3）反射信号能量强：陆地声纳法的波对反射面是近于垂直入射，主要能量不会消耗在转换波、折射波上。接收到的波能量集中，波形简单；

（4）采用超宽频带的锤击震源激震，可激发 10～10 000 Hz 的波，其检波器与仪器接收主机相配合，可接收 10～4 000 Hz 的波，并在此范围内无频率畸变（既不压制也不放大任何频率的波）；

（5）采用很高的采样率，通常一个周期可有 50～100 个样点，可反映微小的波形畸变；采用超短余震的接收系统，对于子波仅 1 个周期的锤击震源激发的震波，检波系统接受到的每一反射面的反射波也仅 1 个周期，提高了分辨率；

（6）单点连续剖面，灵活处理地表障碍物的影响，能够在崎岖的山地和狭小空间内顺利工作；

（7）工作中不必固着检波器，工作效率高，只用凡士林和地面耦合，人手按压即可。

理论研究和实践证明，在零震-检距的情况下，溶洞的反射波同相轴是很易辨别的双曲线（图 1、图 2）。因此它不仅可探查断层等近似平面型的物体，还可探查溶洞等有限大小地质体。对于倾斜的断层会有断续的倾斜同相轴反映，不用校正。

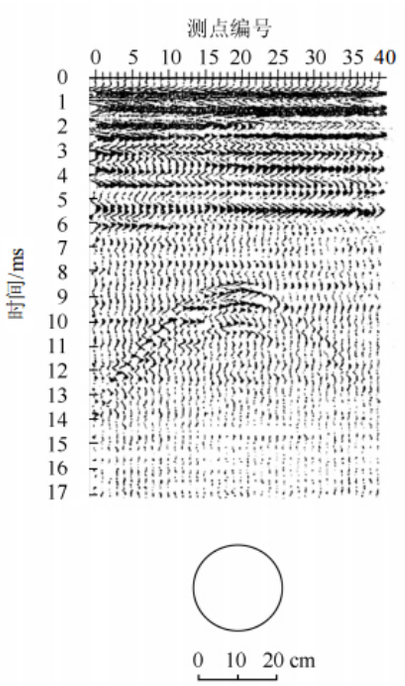


图 1　溶洞的物理模型试验

Fig. 1　Experiment on physical model of karst cave

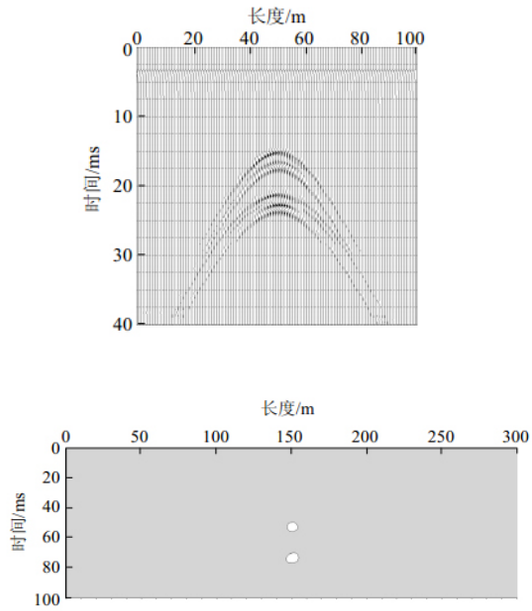


图 2　上下 2 溶洞数值模拟

Fig. 2　Numerical simulation of two karst caves at upper and lower positions

## 2　工程概况与物探解释

贵广高铁的高天隧道双线全长 3 694 m，位于贵州省东南部从江县境内。隧道围岩为沉积岩（砂页岩互层、石灰岩）、变质岩等。探测段穿过为岩溶强烈发育段，存在充填溶洞及溶蚀破碎带。岩体较破碎、断裂、裂隙发育、竖向节理（或小断层）及大角度斜节理（或小断层）密集。在联调联试阶段 D3K273+015～+075 里程段发生底鼓现象，是运营阶段的巨大风险。

沪昆高铁的麻拉寨隧道全长 2 640 m，位于贵州省麻江县大良田镇境内。隧道岩层主要为灰岩和灰岩夹泥灰岩，岩层呈弱风化；联调联试阶段在隧道进口 1 150～1 270 m 里程段发生沉降和底鼓现象，此段落穿过二叠系灰岩，中厚层状构造，断层、节理裂隙发育，岩溶发育，地下水发育，在联调联试阶段发生了底鼓，对后期的运营产生重大影响。

两个隧道的均位于贵州省岩溶发育区，发生病害情况基本一致。为了查明隧道底鼓段发生的原因，对两个隧道的检测主要是针对基底（基底厚约 1.7～2 m）及基底以下 4 m 深度范围，探测投影面积≥0.5 $m^2$ 的空洞及溶洞、延伸到基底的断层等，根据物探结果对基底的密实情况和注浆质量进行综合研判和解释（图 3）。

万方数据

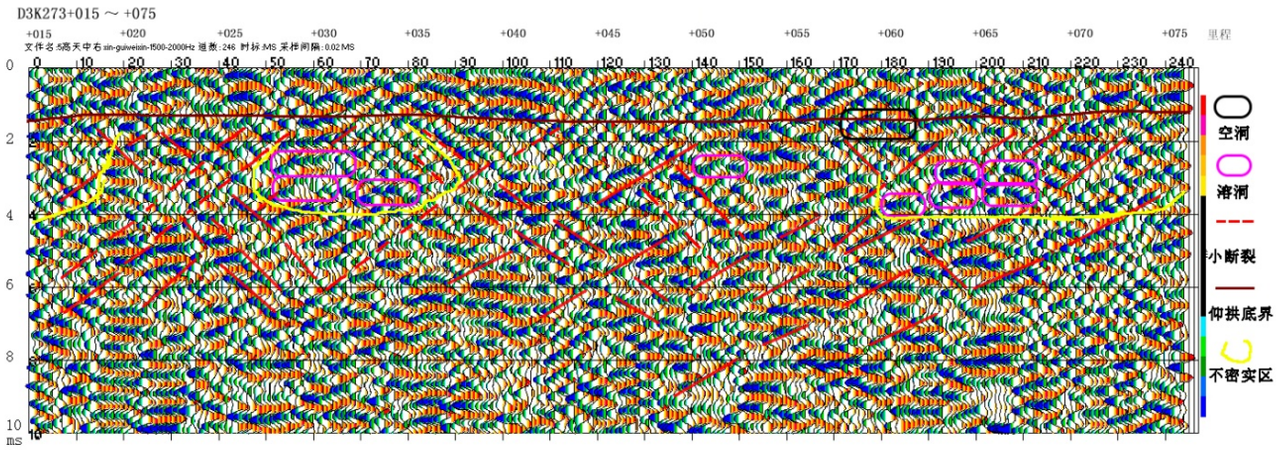


图 3　高天隧道左轨道中线陆地时间剖面图(1 000~1 500 Hz)

Fig. 3　Time section of Landsonar along central survey line in the left rail of Gaotian tunnel (1,000~1,500 Hz)

如图 3 所示,图像上部水平紫色线条标识的是仰拱底界;用椭圆形标示出反映溶洞或空洞的双曲线同相轴,用红色的虚线标识出一段一段很明显的断层面[7-10]。断层判释的标识的是层面的错动以及中、小断层的反射波同相轴。基本可以看到断层方向分两个方向且基本平行。陆地声纳法探查资料中断层面的反射同相轴比传统地震勘探多而且清晰。其原因是陆地声纳法使用的频率很高,通常高达 1 000~ 3 000 Hz,因此比较粗糙的断层面对波的反射和散射很明显,正是陆地声纳法探查断层的优势。图中用黄色线圈出注浆不密实段,不密实段反映为未注浆或注浆效果不好,这是因岩体中的层面、断层、节理反射较强,而注浆好的密实段由于水泥砂浆固结后它们的密度和波速接近石灰岩,因此岩层层面、断裂面的反射波振幅明显减小,与未注浆或注浆不好的情况有明显的区别。这与施工记录和注浆后的钻孔检测时相符的。

从图 3 可见,陆地声纳法可分辨出上下不同深度的多组反射波同相轴。它们反映了溶洞的顶和底,也反映了不同深度的溶洞。同一深度上下相连或几乎相连的溶洞组合,也是易发生病害的地段。

图 4 和图 3 的解释方法基本一致,水泥砂浆注入岩体中的较破碎段,固结后使破碎岩体胶结,强度增高,密度加大,不同材质的界面对弹性波的反射减弱,反射波振幅减小,在图像上表现为颜色较淡,同相轴不明显,与其他区域形成明显区别。

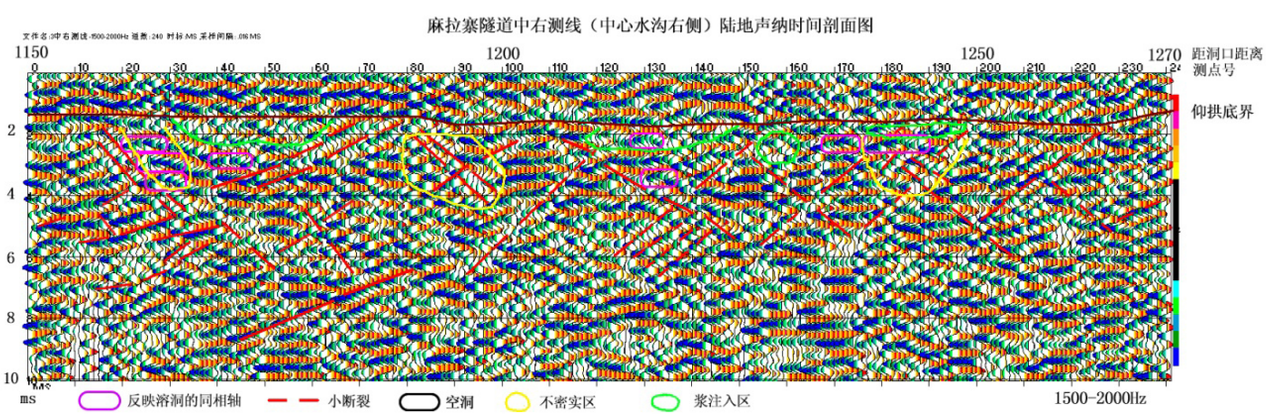


图 4　麻拉寨隧道轨道右边测线陆地声纳时间剖面图(1 000~1 500 Hz)

Fig. 4　Time section of Landsonar along right survey line in the rail of Malazhai tunnel (1,000~1,500 Hz)

万方数据

图5可看出，在基底下方存在数量不少的空洞或者溶洞，并有多条中小断层切入到基底下方，且断层之间有交叉，断层错动或者交叉处岩石较破碎，在水的作用的易发育成溶洞。

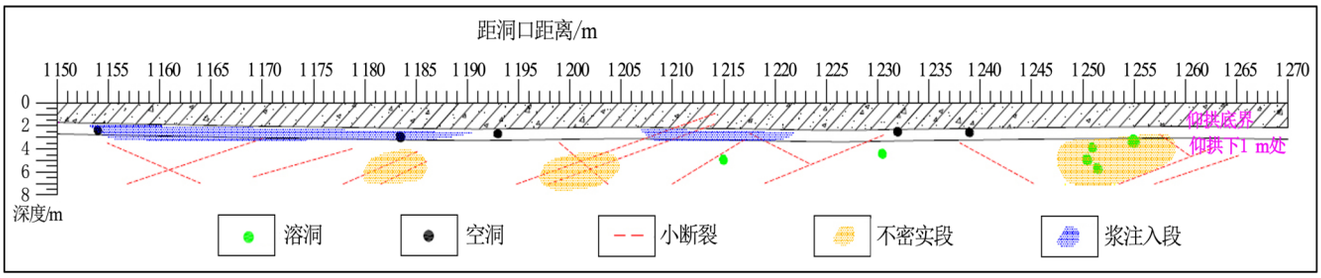


**图5 麻拉寨隧道右边线空洞、溶洞、不密实段、浆注入段分布剖面图**

Fig. 5 Profile showing distribution of empty holes, karst caves, unconsolidated section and grouting section along the right line in Malazhai tunnel

## 3 成果与分析

探测工作对反映溶洞的双曲线同相轴，做了标示，并根据经验公式对溶洞的大小进行了计算，得出较准确的溶洞位置和深度，并绘制了分布剖面图。重点关注紧靠隧道墙脚下方的溶洞，特别是连续发育的几个溶洞，他们是使隧道墙脚下沉、内挤，从而引起隧道底鼓的原因。大部分溶洞（空洞）的投影直径<1 m，但有些段落有多个小溶洞呈上下或左右紧邻，或在仰拱下方的2 m的深度范围内有2～3个中小溶洞相连通的，会对轨道的运营安全造成很大影响。

由于溶洞之间通过裂隙连通，降雨季节山上的雨水通过断层、裂隙渗入山体中的破碎与溶蚀的区域，造成隧道两侧受到向隧道内侧的水压力，隧道基底受到向上的水压力，此压力与山体含水的高度成正比，如果降雨量大边墙和基底在溶洞发育区附近会受到相当强大的水压，两侧边墙向内侧挤压，基底上浮，会产生不均衡沉降与底鼓，所以底鼓与沉降发生的原因都是和岩溶发育密切相关的。

探测工作对不密实段和浆注入段的圈定增加了对隧道内薄弱段落的清晰的认识，并对后期针对性的治理提供科学依据。

根据实测情况设计了治理方案：根据探测结果在墙脚打泄水孔，减小水压，设置锁脚锚杆；基底根据断层和溶洞位置有目的地进行注浆，堵住岩溶水通道，并在溶洞连续发育位置布置锚杆，加固基底。

## 4 结 论

（1）采用陆地声纳法在已建成的高铁路基向下探测应用效果良好，能够避开各种干扰。陆地声纳法对中、小溶洞（小于4~5 m直径）的反映（反射波同相轴）是典型的易分辨的双曲线。根据形成断层面的同相轴，能够清晰的识别中、小断层；

（2）仰拱下方5 m的深度范围内，常常发育2~3个相连通的小溶洞，垂直深度可达1~3 m，这对施工及后期运营安全都是非常严重的隐患，需要及时处理；

（3）本次实际探测证实，陆地声纳法数据中反射波的振幅变化和同相轴断续情况圈定的不密实段和水泥浆注入区是可靠的；

（4）由于是抢险工作，时间要求紧，采集数据有限，未能做更详细的频率谱分析，对于不密实段、水泥浆注入区在频率域直观地反映还有待进一步研究。

## 参考文献

[1] 李坚．在建铁路隧道和路基基底岩溶物探技术探讨[J]．铁道工程学报，2017，34(12)：9-12，39.

[2] 宋章，王科，蒋良文，等．岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势[J]．高速铁路技术，2018，9(5)：38-43.

[3] 刘杰，杜翠，程远水．综合物探技术在隧道基底岩溶探测中的应用[J]．铁道建筑，2016(1)：33-37

[4] 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

万方数据

中的应用[J]. 中国铁道科学,2005,16(4):48-55.
[5] 钟世航,孙宏志,王荣. 陆地声纳法在隧道施工时预报断层、溶洞的效果[J]. 隧道建设,2007,27(S2):21-25.
[6] 钟世航,孙宏志,王荣. 陆地声纳法[M]. 北京:中国科学技术出版社,2012.
[7] 钟世航,王荣. 陆地声纳法探查中小溶洞、溶管效果好的原因[A]. 中国地球物理2006(中国地球物理学会第二十二届年会论文集)[C]. 成都:四川科学技术大学出版社, 2006:213.
[8] 钟世航,王荣. 城市闹市区物探技术和岩溶探查的进展及隧道施工时岩爆预报技术的突破 [J]. 物探与化探,2012,36(3):511-516.
[9] 钟世航,孙宏志,王荣,等. 陆地声纳法在探查单个溶洞方面的优势[J]. 物探与化探,2007,31(supp):111-115.
[10] 钟世航,孙宏志,王荣,等隧道及地下工程施工中岩溶裂隙水及断层、溶洞等隐患的探查、预报[J]. 岩石力学与工程学报,2012, 31(S1):3298-3327.
[11] 谢国文,杨平恒,卢丙清,等. 基于高分辨率示踪技术的岩溶隧道涌水来源识别及含水介质研究[J]. 中国岩溶,2018,37(6):892-899.
[12] 李俊杰,朱红雷,赵国军,等. 地质雷达电磁干扰分析及在隧洞岩溶探测中的应用[J]. 中国岩溶,2018,37(2):286-293.
[13] 贾龙,蒙彦,潘宗源,等. 钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用[J]. 中国岩溶,2019,(1):124-129.
[14] 郭 芳,姜光辉,王文科,等. 岩溶洞穴交互带概念的提出及其在水资源管理中的意义[J]. 中国岩溶,2019,38(1):1-9.
[15] 罗润林,邓海鹏,李亚南,等. 随机岩溶介质的电阻率正演模拟[J]. 中国岩溶,2019,38(1):117-123.
[16] 陈贻祥,邬健强,黄奇波,等. 水中自然电场法探测病态水库岩溶渗漏通道:以金鸡河水库一级水电站为例[J]. 中国岩溶,2018,37(6):883-891.
[17] 谢国文,杨平恒,卢丙清,等. 基于高分辨率示踪技术的岩溶隧道涌水来源识别及含水介质研究[J]. 中国岩溶,2018,37(6):892-899.
[18] 邬健强,甘伏平,张 伟,等. 音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J]. 中国岩溶,2018,37(6):918-924.
[19] 蒋小珍,雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J]. 中国岩溶,2018,37(5):786-791.
[20] 赵 军,刘彦斌,王菲菲,等. 碳酸盐岩缝洞型储层类型识别与分类预测[J]. 中国岩溶,2018,37(4):584-591.

# Application of the landsonar to detecting hidden hazards of tunnel base on high-speed railway in karst areas

WANG Zefeng[1], ZHONG Shihang[1,2]

(1. *Beijing HEME New—tech Development Co.*, *Ltd*, *Beijing* 100044, *China*; 2. *China Academy of Railway Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

**Abstract** It is reported that uneven subsidence and floor bulge occurred in the joint test stages of the Malazhai tunnel of the Shanghai—Kunming railway and Gaotian tunnel of the Guiyang—Guangzhou railway, implying potential geologic hazards there. In order to find out the cause of this phenomenon and the quality of grouting, landsonar method was used to detect the karst sections of these tunnels. Results show that there are many medium and small karst caves below the tunnel foundation, which are interconnected by several sets of medium to small faults extending below the tunnel foundation. During rainy seasons, intense change of water pressure surrounding the tunnel caused uneven subsidence and floor bulge. To remove such a hidden hazard, the fractured zone and grouting zone were identified according to landsonar data and a treatment plan was determined, which has been verified by its implementation.

**Key words** landsonar, tunnel foundation, karst caves, checking grouting quality, floor bulge

(编辑　张 玲)

万方数据