

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.034

# 凯里环城高速北段隧道衬砌检测及缺陷分析

段俊

(中电建黔东南州高速公路投资有限公司, 贵州 黔东南 556000)

**摘要:**对地质雷达应用于隧道检测的适应性进行分析,发现地质雷达除在有双层钢筋网遮挡时无法判断其背后情况外,对混凝土内部缺陷、衬砌内钢筋和型钢均具有较高的识别能力且满足工程需求;采用地质雷达对贵州凯里环城高速公路北段隧道衬砌进行检测,分析衬砌质量缺陷,发现衬砌脱空主要集中在拱顶处,厚度不足主要集中在拱腰处。

**关键词:**隧道;衬砌检测;缺陷分析;地质雷达

中图分类号:U456.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)04-0147-03

隧道因其“隐蔽性”,其中一些问题在表面无法及时发现,对隧道进行质量检测已成为工程建设全寿命周期内必不可少的环节。其中最重要的一环是采用地质雷达对衬砌缺陷进行检测。Robert A.、Whiteley R. J.等通过室内试验和现场应用对雷达技术在岩土工程中的应用进行了改进。史付生等通过建立衬砌模型,以相干波理论为基础,推导了计算衬砌中空隙大小的方法。孙洪星将电磁波介质中消耗理论应用于工程实例中,引入 Cole-Cole 公式,从理论上描述了电磁波衰减规律。杨珍等采用探地雷达对隧道引水洞的灌浆密实度进行了分析。苏兴矩等针对厦蓉(厦门—成都)高速公路在建隧道仰拱检测,采用后期处理技术提高金属的反射信号,降低富水反射信号,提高了仰拱钢支撑检测的准确率。上述研究均偏重于地质雷达原理的分析。该文通过对地质雷达检测隧道的适应性分析,采用地质雷达对贵州凯里环城高速公路北段隧道衬砌进行检测,分析衬砌质量缺陷。

## 1 工程概况

凯里环城高速公路北段全长 73.213 km,其中主线长 58.474 km,麻江联络线长 14.739 km。主线起于凯里市三棵树镇,设枢纽互通与已建沪昆(上海—昆明)高速公路衔接,经过九寨、翁稍、虎庄、万潮、炉山、凤山等主要城镇后,终于福泉市瓮马(瓮安—马岩)高速公路马场坪互通。麻江联络线起于炉碧互通,经碧波至隆昌与沪昆高速公路凯里至麻江段连接。采用双向四车道高速公路标准,设计速度 100 km/h。整体式路基宽 26 m,分离式路基宽

2×13 m。汽车荷载等级为公路—I 级。

该项目桥隧比为 54.48%,隧道共 17 座,长 17 745 m。其中:特长隧道 1 座,长 3 390 m;长隧道 5 座,长 8 437.5 m;中隧道 5 座,长 3 505 m;短隧道 6 座,长 2 412.5 m。

## 2 地质雷达适应性试验分析

### 2.1 适应性分析模型

根据凯里环城高速公路北段隧道实际情况和施工经验建立隧道二次衬砌模拟模型,模型长约 6 m,墙厚 1 m,墙高 1 m。从右至左,在模型 1 m 处埋设一根钢支撑,左右 0.4 m 处各放置一根钢支撑;在相同位置钢支撑沿宽度方向距混凝土外表面 10 cm 处布设双层钢筋网;在模型 2 m、高 0.5 m 处埋设厚度为 0.2 m、直径为 0.45 mm 的圆柱体模拟混凝土不密实,在 4~5 m 处埋设厚度为 0.2 m、高为 0.5 m、宽度为 0.42 m 的楔形体模拟脱空。隧道二次衬砌模型见图 1。



图 1 隧道二次衬砌模型

### 2.2 适应性分析

对检测所用 SIR4000 型地质雷达、900 MHz 单极屏蔽天线进行适应性试验。将隧道二次衬砌模型从左至右依次编制桩号为 K0+000—006,将雷达天

线紧贴隧道模型立面进行一次扫描,然后在试验台的顶部进行一次扫描。预设结果和实测结果对比见表1。

表1 地质雷达目标探测预设结果与实测结果对比

目标体	预设结果	实测结果
初期支护 型钢支撑	1) 反射信号清楚; 2) 间距 40 cm 可判; 3) 型钢埋置深度 50 cm 可判	1) 立面扫描测线信号不清楚,顶部测线扫描钢支撑信号可判; 2) 信号不清晰,间距 40 cm 不可判; 3) 信号不清晰,型钢埋置深度 50 cm 不可判
混凝土 厚度	1) 信号清楚; 2) 混凝土厚度 50 cm 可判	1) 界面信号清楚; 2) 混凝土厚度 50 cm 可判
楔形 脱空	1) 脱空信号清楚; 2) 脱空形态可判; 3) 埋深 24~50 cm 可判; 4) 脱空范围可判	1) 典型脱空信号清楚; 2) 楔形脱空形态可判; 3) 埋深 24~50 cm 可判; 4) 横纵向脱空范围可判
混凝土 不密实	1) 不密实信号清楚; 2) 埋深 35 cm 可判; 3) 不密实区域范围可判	1) 不密实区域信号清楚; 2) 埋深 35 cm 可判; 3) 不密实区域可判
双层 钢筋网	1) 钢筋反射信号清楚; 2) 埋深 10 cm 可判; 3) 单向钢筋间距可判	1) 典型钢筋反射信号清楚; 2) 埋深 10 cm 可判; 3) 钢筋间距可判

由表1可知:1)对于隧道模型中的混凝土不密实、混凝土交界面(厚度)、钢筋,地质雷达可准确判断预设对象的大小与位置。2)由于双层钢筋网对雷达信号的阻断,双层钢筋网下型钢在立面扫描过程中无法判断,但在顶部扫描测线中可见钢支撑反射信号。总体而言,SIR4000型地质雷达、900 MHz 单屏屏蔽天线对混凝土内部缺陷、衬砌内钢筋和型钢具有较高的识别能力,但当有双层钢筋网遮挡时,雷达信号被阻断,无法判断其背后情况。

### 3 现场检测数据分析

对凯里环城高速公路北段17座隧道衬砌采用地质雷达进行检测,沿隧道拱部布置拱顶、左右拱腰3条测线,拱顶测线位于隧道中线或偏离50 cm左右位置,拱腰测线位于灯线电缆槽上方50 cm左右位置。

对现场采集的雷达数据进行分析,得到图2所示衬砌病害分布,其中衬砌脱空、衬砌厚度不足病害

分布情况分别见图3、图4,缺陷数量见表2。

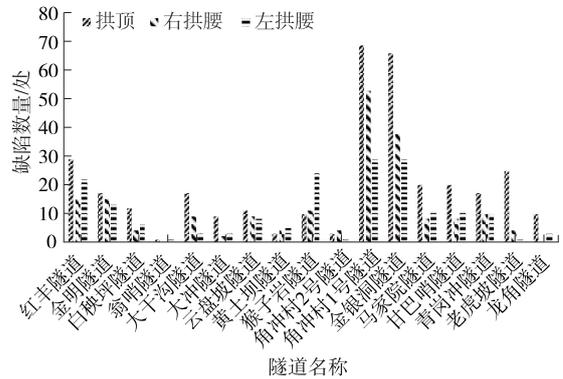


图2 凯里环城高速公路北段隧道衬砌缺陷分布

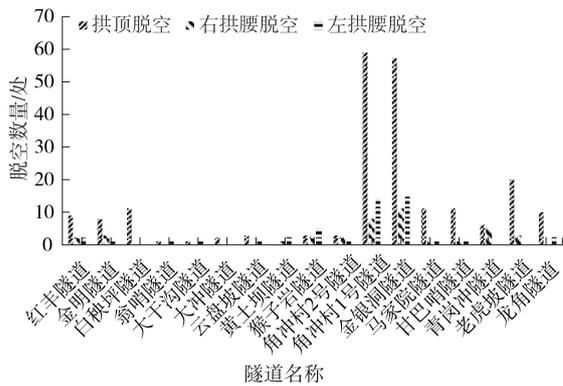


图3 凯里环城高速公路北段隧道衬砌脱空缺陷分布

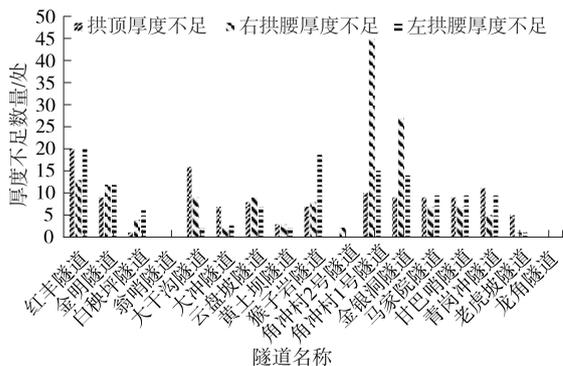


图4 凯里环城高速公路北段隧道衬砌厚度不足缺陷分布

表2 凯里环城高速公路北段隧道衬砌缺陷数量统计

缺陷类型	缺陷数量/处		
	拱顶	右拱腰	左拱腰
衬砌脱空	215	40	49
衬砌厚度不足	65	154	131
合计	280	194	180

由图2~4、表2可知:衬砌缺陷数量最多的是角冲村1号隧道和金银洞隧道;衬砌脱空主要集中在拱顶,其脱空数量约占脱空总量的70.7%;厚度不足主要集中在拱腰,左右拱腰厚度不足数量约占厚

度不足总量的 81.4%。可见,拱顶处衬砌缺陷多为脱空,拱腰处衬砌缺陷多为厚度不足。

### 4 结论

(1) SIR4000 型地质雷达、900 MHz 单体屏蔽天线对混凝土内部缺陷、衬砌内钢筋和型钢具有较高的识别能力。但在有钢筋网遮挡时,雷达信号被阻断,无法判断其背后情况,现场检测时应辅以钻孔进行验证,提高检测准确率。

(2) 衬砌脱空主要集中在拱顶,其脱空数量约占脱空总量的 70.7%;衬砌厚度不足主要集中在拱腰,左右拱腰厚度不足数量约占厚度不足总量的 81.4%。拱顶处衬砌缺陷多为脱空,拱腰处衬砌缺陷多为厚度不足,混凝土衬砌施工时应采取预防措施及时消除质量隐患。

### 参考文献:

[1] ROBERT A, BOSSET C. Application of ground-probing radar to the detection of cavities, gravel pockets and karstic zones[J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 31(4): 197-204.

[2] WHITELEY R J, SIGGINS A F. Geotechnical and NDT

applications of ground penetrating radar in Australia[J]. Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2000, 40(11): 792-797.

[3] 史付生, 张宇, 催刚. 相干波理论在地质雷达隧道衬砌检测中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 57-59.

[4] 孙洪星. 有耗介质高频脉冲电磁波传播衰减理论与应用的实践研究[J]. 煤炭科学, 2001, 26(6): 267-271.

[5] 杨珍, 程琛, 张俊杰, 等. 探地雷达检测引水隧洞灌浆密实度可行性分析[J]. 甘肃科技, 2020, 36(19): 66-69.

[6] 苏兴矩, 陈礼彪, 卢兴利, 等. 基于谱能分析法的隧道仰拱质量检测技术[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊 1): 232-235+246.

[7] 王平让, 陈波, 李柄成. 渗水条件下裂缝对隧道衬砌稳定性的影响分析[J]. 公路与汽运, 2021(6): 152-157+161.

[8] 李毅, 程宝平, 何学春, 等. 涪天河渠道土质边坡失稳分析与对策研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 53-63.

[9] 陈赞, 陈玉斌. 基于 HHM-RFRM 的地铁隧道施工安全风险情景识别[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 7-15.

收稿日期: 2021-09-24

\*\*\*\*\*

(上接第 146 页)

已施工完毕, 位移已稳定。监测结果和有限元分析结果较吻合, 验证了半明半暗工法在洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等复杂条件下的适用性。

### 6 结论

(1) 针对洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等不利因素叠加的情况, 通过总结工程实践经验, 采用“半明洞+半护拱”的半明半暗隧道结构形式。采用有限元分析软件对各施工步骤进行数值模拟计算, 计算结果与现场监测结果吻合, 验证了半明半暗连拱隧道施工方法在洞口地表偏斜、超浅埋、临近重要构筑物等因素叠加情况下的可行性。

(2) 半明半暗连拱隧道施工过程中, 右侧隧道拱顶处的水平位移和竖向位移大于左侧隧道, 左侧隧道拱脚的竖向位移大于右侧隧道。

(3) 暗洞隧道施工过程中的最大弯矩为 54 kN·m, 位于右侧拱腰处; 最大轴力为 742 kN, 位于右侧拱脚处; 最大剪力为 171 kN, 位于右侧拱腰处。隧道受力以轴力为主。

(4) 隧道施工过程中中电塔基础最大水平、竖向和总位移分别约 4.7 mm、1.4 mm、4.9 mm, 半明半暗工法可较好地控制临近建(构)筑物的变形。

### 参考文献:

[1] 贾艳领, 周绍文, 王刚, 等. 既有隧道扩建为双连拱隧道中隔墙受力特征研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 130-138.

[2] 李竹有, 孙洪稳, 浦瑞, 等. 大偏压厚覆盖层双连拱隧道半明半暗进洞施工技术[J]. 云南水力发电, 2019, 35(4): 130-133.

[3] 刘义虎, 易震宇, 熊建军. 半明半暗连拱隧道设计施工技术研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 123-125.

[4] 王云震. 某浅埋隧道半明半暗施工技术 with 数值模拟分析[J]. 施工技术, 2019, 48(19): 110-113.

[5] 张忠. 大跨度半明半暗连拱隧道施工技术与力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

[6] 施成华, 彭立敏. 半明半暗连拱隧道合理施工方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2809-2814.

收稿日期: 2021-09-09