

隧道衬砌不密实地质雷达图像解析与工程应用研究

单 宇

(中国国家铁路集团有限公司工程质量监督管理局, 北京 100844)

摘 要 隧道衬砌不密实缺陷隐蔽性强, 难以检测发现并得到有效验证, 是工程检测的难点, 特别是不密实缺陷产生的施工冷缝, 对交通运营造成了较大的工程隐患, 威胁运营安全。随着近年来我国交通工程隧道建设比例大量增加, 隧道二衬的施工质量逐渐成为焦点, 不密实作为隧道二衬中的一种病害, 通常体现为二衬混凝土中存在离析、开裂、渗漏水等现象, 对后期的线路运营产生制约条件, 影响整个结构的使用年限和耐久性。本文对不密实的成因进行讨论, 结合工程实例对地质雷达检测图像进行解析, 对不密实图像与工程验证图进行对比, 针对验证中部分地质雷达不密实的单道波形进行分析, 旨在为提高地质雷达法检测不密实缺陷在铁路隧道中的检测精度和可靠性提供借鉴。

关键词 隧道; 不密实; 地质雷达; 图像解析

中图分类号: P631.3; U456

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.03.041

0 引言

截止到 2023 年底, 中国铁路运营里程约 15.9 万 km, 高铁运营里程近 4.5 万 km。其中共有 18 573 座运营铁路隧道, 长度约 23 508 km^[1], 隧道衬砌质量检测在工程建设中发挥着极其重要的作用, 有效保障运营安全。隧道衬砌不密实易产生积水冻融、衬砌开裂发展快等问题, 在施工过程中未检测出并得到及时彻底的整治, 可能会导致开通运营后一些区段会造成限速通行, 严重的情况下会造成中断行车等事故, 对隧道使用的年限及运营安全有着非常显著的影响。

1 不密实的研究工作

密实度一般指的是材料体积内被固体物质所充填的程度, 同时也是固体物质的体积占总体积的比例。固体物质的体积占总体积的比例越高, 说明该材料的密实性越好。目前已经有部分学者针对隧道不密实的缺陷进行相关研究, 魏加志^[2]、蒲俊吉^[3]提出通过新工艺、新方法从源头上控制隧道施工的质量, 减少不密实存在数量及比例, 从而减轻后期运营维护成本。刘杰等^[4]、肖建平等^[5]对不密实缺陷建立模型并结合探地雷达进行波形识别分析。地质雷达检测的优点在于无损, 可以进行连续测量, 效率高, 数据处理较便捷。本文主要侧重于针对地质雷达检测出的不密实波形进行验证分析, 将雷达检测与工程实际应用相结合。

2 不密实形成的原因

1. 在二衬施工过程中, 存在漏振或过振、混凝土施工配合比及比水灰比过大、骨料粒径太大等问题, 这些现象主要归结为施工队对混凝土的振捣不重视。混凝土振捣不到位时由于自重出现下沉, 发生收缩徐变产生离析从而造成不密实。

2. 混凝土塌落度过大时, 容易引起离析、分层, 和易性极差。施工难度大, 造成堵管、跑浆、麻面等问题。混凝土塌落度太小时流动性差, 不利于施工, 造成空洞、蜂窝。这两种情况下均易造成不密实, 同时也会影响混凝土自身的强度。

3. 二衬台车模板缝处加工精度存在一定的偏差, 模板拼接后存在缝隙导致混凝土浇筑的过程中产生漏浆, 尤其是曲线半径较小的路段更困难。同时由于二衬台车表面粗糙、黏附水泥浆渣等杂物未清理干净时混凝土表面也会出现蜂窝, 严重的情况下可能会出现孔洞、露筋, 从而导致二衬施工缝附近出现不密实现象。

4. 衬砌施工缝处背贴、中埋式止水带埋设空间有限, 在浇筑混凝土过程中很难固定止水带的位置, 易发生翻滚、扭结、偏移等现象, 施工缝处也可能出现不密实、脱空、开裂、掉块等现象。尤其是止水带附近必须充分进行振捣将气泡排出, 保证混凝土密实。如今一些竣工后的隧道渗漏水多数发生在施工缝附近, 主要形成的原因归结为混凝土不密实。

5. 隧道二衬施工缝附近钢筋及钢筋网片布置不符合设计和规范要求, 靠近施工缝处容易出现钢筋或钢筋网片缺失、钢筋保护层过薄等现象, 同时端头附近混凝土易振捣不充分且不容易被观察到, 振捣质量难以控制, 导致施工缝附近的混凝土不密实。

3 不密实缺陷的处理流程

1. 针对隧道不密实缺陷, 应首先使用物探手段确定其不密实的深度及范围, 并进行钻孔验证。为提高各检测单位水平, 建设单位应要求检测单位现场验证时全程盯控, 在雷达图像缺陷最明显处打1个孔, 验证孔的位置及深度由检测单位现场决定, 验证的全过程需使用内窥镜对验证孔内进行拍照录像, 同时建设、施工、监理、检测单位相关人员需现场见证并签字。

2. 设计单位须对隧道不密实缺陷的整治进行明确要求。如未对具体指标, 比如不密实的深度及范围进行明确要求, 设计单位应结合地质情况及时按照建设单位的需求进行补充明确, 必要时召开专家论证会进行方案评审。施工单位应严格按设计单位要求进行缺陷整治, 整治完成后报监理进行审批。现场监理应留存影像资料, 填写监理日志。

3. 隧道不密实缺陷经施工单位处理后须在满足龄期的条件下, 施工单位首先进行检测。施工单位自检检测合格后, 第三方检测单位再开展检测, 如均无问题, 该处缺陷可进行销号处理, 双方出具合格报告并进入下一道工序。

4. 为保证后期建设项目能够及时开通运营, 建议施工单位尽早整治缺陷。如已施工无砟轨道后再进行整治, 整治期间需搭设临时台架, 人工、运输等成本会大大增加, 不仅花费的价格为无砟轨道施工前的几十倍, 同时搭设的临时台架存在安全隐患, 需监理人员进行验收确认。

5. 建设单位应及时收集施工、第三方检测单位建立的不密实缺陷台账并进行汇总分析, 上传至铁路质量检测管理系统。主管试验检测人员应及时掌握现场缺陷销号动态, 督促检测单位及时总结经验, 保证验证的准确率, 必要时可依据铁路试验检测管理办法对检测单位进行考核评比。

4 不密实检测实例与验证情况对比

本次使用美国劳雷公司生产的SIR系列地质雷达和900 MHz天线, 对某西北地区铁路多个标段多座隧道进行二衬纵向雷达扫描。检测完成后使用专业分析软件进行背景去噪、增益以及滤波处理等步骤, 并对雷达图像显示疑似不密实的缺陷进行验证。现场检测工作开始之前, 由于每个隧道介质均不一致, 介电常数均存在一定的偏差, 所以检测人员均在各个隧道口或其他未破损工程实体的合适位置, 如下锚段、错台处进行雷达波速标定, 通过已知深度反推出各个隧道的介电常数。

隧道打孔验证是一种比较直观的手段, 验证二衬施工过程中造成的脱空、厚度不足和不密实缺陷。本次验证根据现场实际里程及雷达扫描痕迹, 对缺陷部位采用直径为 $\phi 22$ 冲击钻进行打孔, 使用 $\phi 8$ 带钩铁丝及内窥镜对验证孔进行检查。使用内窥镜观测能够直观地看到钻孔内部不密实的程度及该处不密实距离二衬表面的深度。首先将孔内的灰尘清洁干净以免影响内窥镜观测结果, 清孔处理后使用内窥镜进行孔内拍照录像, 经内窥镜影像发现二衬内部存在一定程度的不密实现象。

4.1 现场实测与验证情况

1. 实例1: 拱顶中线(K0+329-330)。实例1通过雷达图像可以发现距离衬砌表面5~10 cm范围内波形杂乱。内窥镜伸入验证孔内5 cm处拍摄图像出现明显的骨料分离, 同时在拱顶中线里程为K0+329.9处打孔, 打孔深度19 cm, 发现距离衬砌表面8~12 cm处混凝土不密实。同时现场发现该段落内工务段作业人员敲击后表面凿除3 cm, 混凝土表面也存在不密实情况。

2. 实例2: 拱顶中线(K0+453-456)。实例2通过雷达图像可得出距离衬砌表面25~31 cm波形异常。内窥镜伸入验证孔内32 cm处拍摄到骨料分离。

3. 实例3: 拱顶偏右2.5 m(K0+199-200)。实例3通过雷达图像可得出距离衬砌表面10~15 cm出现异常反射。内窥镜深入验证孔内12 cm处拍摄到骨料不均匀。

具体验证情况如表1所示。

表1 不密实验证具体情况

序号	里程	缺陷描述	验证情况
1	K0+329-330	距离衬砌表面5~10 cm不密实	内窥镜伸入孔内5 m处出现明显骨料分离
2	K0+453-456	距离衬砌表面25~31 cm不密实	内窥镜伸入孔内32 m处出现明显骨料分离
3	K0+199-200	距离衬砌表面10~15 cm不密实	内窥镜伸入孔内12 m处出现明显骨料分离

4.2 地质雷达与钻孔验证的对比分析

1. 本研究使用美国劳雷 SIR 系列地质雷达及 900 MHz 天线进行二衬扫描, 对 6 座隧道共 11 处不密实缺陷进行验证, 经验证后发现 10 处确实存在此类问题。隧道现场验证情况表明, 不密实缺陷的情况和位置与雷达剖面图中的图谱、异常点基本匹配。验证的不密实区域多数位于拱部测线及施工缝附近, 所以需要对接部施工缝附近的施工工艺加以重视。

2. 此次检测与验证均在有钢筋、钢筋网的二衬施工段落内, 二衬不密实发生在不同部位及不同测线上, 这些分析后的图像较为直观、钻孔验证基本反映出工程中的实际情况。需要注意的是, 现场检测时存在一些干扰因素, 应在检测的过程中调整合适的参数, 将钢筋及钢筋网片的干扰降至最低从而避免出现漏判。

3. 检测过程中使用美国劳雷 400 MHz 天线进行检测时发现, 使用 400 MHz 天线检测并用专业软件分析后的图像中未见任何异常情况, 从而说明 900 MHz 天线对于识别浅部不密实缺陷的能力和分辨率明显好于 400 MHz 天线。

4. 通过一系列验证发现不密实区域主要表现形式为二衬骨料离析、夹杂石子、局部松散等。使用带钩铁丝伸入验证孔内, 松散的石子或离析的骨料会随着钩子的作用从验证孔中被掏出, 不密实区域形成局部空腔致使钩子不在任何外力的作用下挂在混凝土与空腔交界处, 同时测量带钩铁丝的长度得到不密实区域所在的深度。

5. 实例 1 中不密实的缺陷分布在注浆孔附近, 经查阅现场注浆记录后发现该处注浆孔现场正常使用。初步分析: 一是注浆孔附近施工振捣效果较差; 二是施工单位注浆完成后拔管速度较快。需在今后加强注浆孔附近的振捣效果, 执行隧道关键工序卡控要求。

5 雷达检测不密实的图像分析

以实例 1 为例, 该隧道位于我国西北山区, 设计采用 C35 钢筋混凝土, 围岩级别为 IV a, 二次衬砌设计厚度为 45 cm, 钢筋间距纵向 * 环向 = 1.2m * 1.0 m, 钢架为型钢钢架, 间距为 0.6m, 防水层设置在初支与二衬之间。使用美国劳雷公司生产的 SIR 系列雷达进行检测并选取 900 MHz 天线。

分别提取检测的不密实、密实的单道波形, 横坐标为时间 (ns), 纵坐标为振幅 (V)。其中横坐标时间 t 与二衬距离表面的深度 h 之间的关系如式(1)所示:

$$h = \frac{c \times t}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中, c 为光速 (0.3m/ns); t 为横坐标时间的

数值 (单位 ns); ϵ_r 为现场标定的介电常数。介电常数经现场标定后得出数值为 8.93, 所以可以通过式(1)换算出二衬距离表面的深度 h 的数值。

根据雷达检测中提取的单道波形可见, 不密实区域波形与密实区域相比较杂乱, 多次反射比较明显, 能量异常增强且相比密实区域能量较分散。与不密实区域的波形完全不同的是, 密实区域波形平稳, 信号具有良好的一致性, 电磁波衰减呈现有规律的态势且雷达剖面图中并无明显强反射现象。

6 结论

1. 衬砌内部的不密实缺陷一般含有其他杂质, 随着时间的推移可能会引发诸如渗漏水以及其他安全层面的问题。不密实区域与密实区域相比较前后介电性质发生改变, 其他介质与混凝土的介电性质的差异越大, 反射波越明显, 这一点可以从单道波形中反映出来。

2. 不密实区域往往发生在局部, 当不密实区域纵向或者环向分布的范围较小时, 由于使用雷达天线进行检测时每条测线覆盖的范围很小, 在实际应用中加密测线、有必要的情况下对施工缝前后进行环向检测。在建设期发现并杜绝全部问题, 为后期运营安全提供保障。

3. 相比脱空, 不密实缺陷往往不受重视。根据现场调研的情况来看, 设计单位出具针对不密实的整治方案中, 多数为表层打磨, 对于二衬内部不密实缺陷以观察或注浆为主, 少数为开窗处理。通过验证情况可以看出, 不密实区域验证时可以轻松被外力破坏形成局部空腔。局部空腔可能会堆积形成积水, 空腔越大、水压力越大, 在列车动力学作用下隧道状态会发生改变, 随时可能成为安全隐患, 影响使用年限。现场验证时需明确不密实缺陷的范围, 后期针对不密实的范围及深度严格按照方案进行缺陷整治。

参考文献:

- [1] 巩江峰, 王伟, 王芳, 等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍 [J]. 隧道建设: 中英文, 2024, 44(02): 377-392.
- [2] 魏加志. 隧道二衬边墙混凝土分层逐窗浇筑系统设计及应用研究 [J]. 铁道建筑技术, 2019(02): 14-17.
- [3] 蒲俊吉. 铁路隧道施工技术常见缺陷及改进措施分析 [J]. 智能城市, 2021, 07(16): 87-88.
- [4] 刘杰, 张千里, 杜翠, 等. 含缺陷高铁隧道衬砌探地雷达检测模型试验 [J]. 中国铁道科学, 2021, 42(05): 103-111.
- [5] 肖建平, 吴旭东, 柳建新, 等. 探地雷达隧道衬砌病害检测正演模拟及应用 [J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(04): 425-429.