Nondestructive Testing Technology and Application of Road Tunnel Lining Structure Diseases

Min Tian　Xiaoping Wang　Ming Lei　Zhengzheng Tang　Yawei Wen

Zhongye Testing and Certification (Anhui) Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui, 243000, China

Abstract

Road tunnel lining structure defects refer to the collective term for various issues arising during construction or operation of the integrated system comprising "initial support + waterproofing layer + secondary lining", which bears structural load-bearing and waterproofing functions. These defects typically occur behind the tunnel's structural surface. Non-destructive testing (NDT) methods must be employed to identify and determine their location and extent, followed by verification through borehole testing to confirm the causes before implementing repair, sealing, or reinforcement measures. Based on literature review and practical experience, this paper first elucidates the necessity of applying NDT techniques to detect tunnel lining defects, then explores specific NDT application methods, aiming to provide scientific and effective guidance for the detection and treatment of such defects.

Keywords

highway tunnel; secondary lining; structural damage; non-destructive testing; ground-penetrating radar; impact elastic wave

公路隧道衬砌结构病害的无损检测技术及应用探析

田闽　王孝平　雷鸣　唐蒸蒸　文亚巍

中冶检测认证（安徽）有限公司，中国·安徽 马鞍山 243000

摘　要

公路隧道衬砌结构病害是指隧道"初期支护+防排水层+二次衬砌"这一整套承担结构受力和防水的组合体系，它是施工过程中或运营期间出现各种问题的总称。这些病害一般都发生在隧道结构面之后，必须采用无损检测方法发现、确定病害的位置及范围，经过钻孔验证病害成因后再对病害进行修补、封堵或者补强处理。有鉴于此，本文通过查阅相关文献以及结合自身工作实践背景下，首先就公路隧道衬砌结构病害实施无损检测技术的必要性进行阐述，随后针对具体无损检测技术应用展开探讨，以期给公路隧道衬砌结构病害的检测与处理提供科学、有效的指导。

关键词

公路隧道；二次衬砌；结构病害；无损检测；探地雷达；冲击弹性波

1 引言

当前，中国公路隧道处于建设运营并行阶段，二次衬砌既是承载和限界的关键结构构件，又是隧道防排水系统的最后一道屏障。然而，由施工工序、围岩变化和渗水环境等因素引起的衬砌背后脱空、衬砌厚度不均、施工缝脱粘、钢筋保护层偏小等问题，往往通过外观检查是"无迹可寻"的，在隧道使用一定时间后才集中爆发，比如衬砌背后的渗漏水、剥落或局部受力不均等，亟需对存在这些风险隐患区域的桩号和孔位进行分辨和测定[1]。为此本文强调了隧道工程现场无损检测工作的分区速度、复测定位、效果验证，并认真总结无损检测的应用要点。

2 公路隧道衬砌结构病害实施无损检测技术的必要性

衬砌结构病害的治理在"结构安全与运营条件"双重驱动下愈发完善。二次衬砌既是拱脚、内轮廓的稳定与安全储备，又是保障行车空间的前提条件，一旦二次衬砌出现拱顶背后脱空、局部厚度不足或产生受力性裂缝等问题，容易引发受力不均衡现象，加上车辆长期荷载，以及在温湿变化及渗水作用下，进一步扩大衬砌薄弱部位病害，当病害处于初期可见或早期时，可采取简易处理方法，但如果出现衬砌局部松动、掉块或错台等问题，不仅安全风险骤增，还会提高封道组织、检修费用、二次返工成本。

其次，衬砌病害存在隐蔽性强的特点，如衬砌背后欠填、钢筋保护层薄等，通常这类问题发生在衬砌背后或结构内侧，早期并没有明显的外部表征，在缺陷达到一定程度后才会表现出衬砌裂缝变宽、渗漏水严重、混凝土剥落等病害

【作者简介】田闽（1992–），中国安徽安庆人，硕士，从事材料化工与技术研究。

情况。从施工质量闭环角度出发，衬砌结构病害治理不能单纯的去“修补表面”问题，而要着重反思成因，在每个施工环节建立起可追溯的质量控制链条，通过无损检测确定可能存在问题的部位，以此触发复验、补注浆、止水或者补强工作，同时依据复检结果判断处治效果是否合格，这样才能形成“发现—复核—处置—复检”闭合路线，更重要的是，此路径还可以倒逼上部工序中的质量问题控制到位 [2]。

3 公路隧道衬砌结构病害的无损检测技术及应用探析

3.1 探地雷达扫描用于厚度与背后脱空的快速分区

洞内可视面无法确定衬砌外侧界面时，可用屏蔽天线探地雷达对称布置，从进出口左右两侧沿隧道横向中心线平行布设测线进行连续扫描，根据电磁波在不同介质界面的反射差异来识别厚度变化和空洞异常。以下对具体操作步骤进行详细说明：一是用探地雷达先给衬砌厚度及背后脱空快速分区，使得现场不再凭经验盲目钻孔，而是先圈出高风险带，然后打孔补浆。测线以纵向为主，需要测拱顶、拱腰、边墙。初排应间隔 20—30m 设置一个里程断面，并对整条断面线都进行粗测，一旦出现异常，先向前或者向后复测，再将测线的间距调整为 1—2m 精测，必要时采用同一条断面线做短距离的横向补测，旨在精准定位异常范围，将其压缩成可施工范围。另一方面，作业车或者手推车需减速匀速行走，里程轮校准后，丈量过桩号、分仓线及施工缝并同步报点，做好标记，把洞别、车道、测线编号等内容填入记录表，确保封道后仍然能够准确回到作业起点。其二，标定工作放在隧道外侧进行，否则将无法落到孔上，同时还要考虑洞内渗水或潮湿情况。在单车车头处的既定厚度范围内进行测定，标定时间零点和波速，就拿水分变化明显处来说，必须分段设定值，把渗水、潮湿的范围标出来，防止湿区误判为脱空、厚度突变现象 [3]。其三，判定要结合“现场构造”来分析，判断界面强反射、反射中断、局部能量突增等地质变化情况，注意对照已知分仓、钢筋网、钢拱架、线槽电缆沟位置，一旦现场出现疑点，在异常两侧布置平行复测线，再换不同的天线频率进行复测，必要时保证天线离壁间隙保持一致，以剔除人为因素影响。如果判定无法确定，则需安排抽条处置检查或安排人工清除查证。其四，成果服务于处治工作。针对各类异常开展“现场构造”验证点布置，根据补浆单元编号、孔位里程及环向位置清单进行治理。要求孔距宜 0.8—1.2m，先小量补浆，然后反复扫测，查看异常是否消除。孔位放样时，需要用钢筋探测仪规避钢筋，优先注浆拱顶和渗水区，并做好注浆过程的压力、注浆量以及返浆点拍照存档，为后期查看奠定基础。

3.2 超声波反射与透射检测用于内部不密实与层间脱粘识别

洞内怀疑二衬存在蜂窝、夹渣或者沿施工缝脱粘时，基于“看不见”无法判断其具体的密实情况，可通过超声检测把这种差异转变成具体的时间、波速及回波幅度数值，方便圈定可疑里程安排开孔复核，还能与其他手段（如回弹、钻孔等）相互印证，避免处置盲目性。第一，单面可测，采用反射法，按网格化布置测线，沿着裂缝、渗水点、回弹值低的区域由内往外扩散，网格大小根据衬砌厚度而定，以 0.3—0.5m 为宜；对于异常区域，则加密网格，每点至少测量 2—3 次，取较稳定值，并记录里程、环向位置和衬砌龄期，重点观察首波有无变长、波速是否呈片状降低等现象，防止单一量点值导致误判情况。第二，为了获得可靠测试数据，测前应使用砂轮将待测区域打磨平整，保证其表面清洁、干燥，同时使用统一型号、配比的耦合剂，并保持探头的压力与测距值相同。在隧洞内温度变化较大的情况下，遇到有湿气或滴水的情形要做好描述，尽可能同一点重复测量，避免把耦合不良或含水率差异当成缺陷衰减。另外，如果检修通道和边墙不能直接触及，那么可布置透射测线，助力发现不贯通、不密实的区域。具体而言，测线沿同一直线布设，起点和终点要做好标识，测量距离、线位要一致，至少留设两个正常地段作为与异常区段同条件比较的健康标段，以差值圈定异常边界，再对异常区段加密，进一步确定缺陷宽度和延伸方向。

3.3 冲击弹性波 / 冲击回波法用于厚度不足与注浆缺陷的频域判别

当隧道内只能单面接触检测时，冲击回波法的最大价值就是通过“频谱主峰 + 回波时间”来获取衬砌厚度和背后充盈状态。第一步，打好基础：在一条平稳的质量面中，选取不大于 ϕ4 的钻孔或者已知厚度的干拌无孔探，标定波速；其次相同测区的锤头重量、敲击点到拾振器的距离、拾振器固定方式要求一致，不允许换人换工具；第二步是布点和复测，以约 1 平方米网格推行，拱顶、拱腰等部位可采用软垫、胶等方式固定传感器，每个测点敲打三次取稳定值。当主峰相差较大时，首当其冲检查耦合、湿度、设备松动和洞内机械噪声，然后使用同里程的近距两点互校，避免将表面疏松误判成厚度偏小；第三步是现场判读和定位。薄厚不足会导致主峰变高、回波时长变短；当背后有空腔或是注浆不到位时，界面会产生较强的反射，并且能量衰减的表现不同于参照点 [4]。所以可通过沿纵向布置连续测点，根据异常段位与分仓、注浆孔所在位置情况进行查定，异常呈带状可圈定疑似未充盈里程区间，沿着两端分别设置对照点做截面测点，能够为检验注浆或钻孔验证提供条件。尽量在行车间歇时开展工作，用橡胶作为拾振底座减震；测点用粉笔标记里程然后拍摄照片，主要记录主峰频率和回波时间；对于可疑点加密到 0.5 米间距，进行“正常、关注、复核”等级评定，方便班组内部交接以及后期处治跟进。

3.4 红外热成像用于浅表脱粘与渗漏通道的温差追踪

第一，利用红外热成像在检修封闭窗口内对疑似渗漏、

空鼓带做短时均匀加热或冷却，并在一定恒速下纵向扫拍，抓取异常区温差响应出现时刻、峰值和衰减速度。由于脱粘和空鼓因受力传导路径发生改变，会呈现出温差滞后的现象或局部冷斑、热点，对纵断面连续异常进行两侧横向复扫，并注明桩号位置、拱部区间，有助于形成用于验证钻孔以及封堵注浆的布孔草图。激励可使用热风机或者冷喷雾，防止出现局部烘烤产生的开裂[5]。第二，工作前做好发射率和反射温度设置，以防出现灯具、车辆热源及金属反光造成的假热点，选择哑光或黑胶带为基准点参考，并且固定好拍摄距离，入射角度接近于垂直。同一路段尽量保证行驶速度和采样频率一致，在通风状态发生变化前后分别再采样一次做对照，影像处理可采用灰度提升、阈值分割等方法强化渗漏区域对比度，而后按照班组、复测人每日台账复标、留存备查。第三，多证据闭环应用，针对热像对浅层灵敏性更高的特点，以及较难穿透深层缺陷，需要结合渗水痕迹、白华分布、声学敲击结果，共同锁定“温差异常 + 水迹连续”区段，并优先安排封堵注浆或者排水疏导。与此同时，保存当日检测过程所记录的数据（包含风速、风向、风力、湿度、通风状况、布孔方式及原始热图等），方便复查、复测及养护移交。

3.5 电磁感应与电化学联合评估用于钢筋分布与锈蚀风险判别

电磁感应配合电化学测量在公路隧道衬砌结构病害检测的重要价值在于“找得到、说得清”。公路隧道衬砌由于渗水、挂灰多，且钢筋在混凝土内，以往只能靠目视开展检测。为此，我们先用电磁感应仪在校核已知保护层位置上，然后在掌子面根据里程和断面拉线做网格，同时在拱顶、拱腰及边墙分别找点，记录保护层偏薄、钢筋偏位的点位并落到桩号，供后续复测、放样[6]。再用半电池电位测量固定“施工条件”，例如：钻孔前清除测区表面浮浆；渗水段适当浸润，不得积水；参比电极和导线要密贴，测点尽可能置于钢筋上方；出于洞内照明电缆和接地件考虑，建议在负载较小的时间段采集，禁止金属构件近距离平等布线，减少读数跳动；为保证数据对比准确度，每个测点必须连续采集 2 次以上，如果读数差较大需要同步相机拍摄位置并在画面中标注测点编号；对于施工缝、变形缝、排水孔周围加密到 20 ~30 cm 点阵，确认连续异常带范围。解释结果不要只看单个值，例如，依托电位等值线图，对照保护层统计图、裂缝锈迹情况图、渗水部位图，如果呈现成片低电位且有明显界限变化，说明该段落发生锈蚀风险率大。最后，整理出有实质性意义的结果，直接作用于现场钢筋分布图、保护层厚度表、电位分区图及异常桩号表，用于班组交底与验收复核，方便把对应的剔凿修补范围、补浆点、封闭长度位置都标示清楚。

4 结语

综上所述，公路隧道衬砌病害具有隐蔽性，为此我们采用探地雷达、超声、冲击回波、红外热成像以及电磁感应—电化学等技术手段，结合现场条件进行试验，旨在提升病害精准度。即先分区、再复测、后钻孔（取芯）核实，将异常桩号、范围及处治落到实处。同时无损检测过程要把标定、布点、记录、复检作为一项重要的工作来完成，做到“发现—复核—处置—复检”的闭合循环，只有把最终检测结果对接到补浆、止水、补强等施工环节，才能从根本上提升公路隧道衬砌结构质量。

参考文献

[1] 李艳阁.基于地质雷达无损探测技术的高速公路隧道衬砌检测[J].四川建材, 2025(6).

[2] 田海阳.高铁隧道二次衬砌拱顶脱空处理技术及工程应用[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术, 2024(003):000.

[3] 包小华,袁槐岑,陈湘生,等.水下盾构隧道建造与运维技术研究现状与展望[J].现代隧道技术, 2024, 61(1):16-35.

[4] 钟 强.地下隧道工程中探地雷达在衬砌结构检测中的实践应用分析与性能评估[J].工程建设与发展, 2025(8).

[5] 路宜驰.基于无损检测的隧道衬砌缺陷及整治方法研究[J].安徽建筑, 2025, 32(3):179-183.

[6] 吴文丰.无损检测方法在单壳隧道衬砌中的实际应用[J].建筑机械, 2023(4):139-143.