

隧道二次衬砌混凝土强度无损检测技术探究

孙艳

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ERA.2026020009

摘 要 : 二次衬砌是高速公路隧道结构受力和安全防护的关键部分, 二次衬砌混凝土强度好坏直接影响隧道的使用寿命和通行安全。第三方检测单位在工地现场进行检测时, 会受到传统无损检测技术精度不够、适应性不强、数据解读主观性大的影响, 无法达到工程质量把控的实际需要。本文以监理单位试验检测工作为依托, 根据工地现场作业特点, 从检测方法优化、设备适配改进、数据处理规范三个方面, 提出适合现场操作的无损检测技术改进方案。通过改进检测流程、提高设备的适配性、规范数据处理方法来提高检测的精度和效率, 通过工地现场验证, 改进后的检测技术误差控制在 $\pm 5\%$ 内, 比传统的检测方法精度提高 25%, 为隧道工程质量现场检测提供技术支持。

关 键 词 : 高速公路隧道; 二次衬砌; 混凝土强度; 无损检测; 技术改进; 现场检测

Research on Nondestructive Testing Technology of Concrete Strength of Tunnel Secondary Lining

Sun Yan

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : As a critical component of highway tunnel structures, secondary lining serves as the structural and safety safeguard. The concrete strength of secondary lining directly impacts both the tunnel's service life and traffic safety. However, third-party testing units face limitations in traditional non-destructive testing (NDT) methods due to insufficient accuracy, poor adaptability, and subjective data interpretation, which fail to meet practical quality control requirements. This paper proposes an optimized NDT solution tailored for on-site operations, based on supervision unit testing practices and construction site characteristics. The improvement plan focuses on three key aspects: optimizing testing methods, enhancing equipment compatibility, and standardizing data processing protocols. By refining testing procedures, improving equipment adaptability, and standardizing data processing, the proposed approach achieves enhanced accuracy and efficiency. Field validation confirms that the improved testing method maintains error control within $\pm 5\%$, demonstrating 25% higher precision than traditional methods. This provides technical support for on-site quality assessment of tunnel engineering.

Keywords : highway tunnel; secondary lining; concrete strength; nondestructive testing; technical improvement; field testing

引言

高速公路隧道二次衬砌混凝土强度检测属于工程质量评价的重要部分, 对隧道结构安全评价以及运营维护决策具有直接影响。第三方检测单位是工程质量监督的重要力量, 需要在工地现场快速、准确地进行检测。由于无损检测技术具有非破坏性、高效便捷、成本低廉的特点, 在工地现场检测中被广泛使用。目前工地常用的回弹法、超声波法、电磁感应法等传统方法, 在实际使用中受到现场环境、衬砌表面、钢筋分布等众多因素的影响, 检测结果的离散性较大, 精度无法保证。

由于高速公路隧道向长距离、深埋方向发展, 工地现场检测的环境越来越复杂, 对检测技术实用、稳定、准确的要求越来越高。监理单位在日常试验检测工作过程中发现, 传统的无损检测技术在现场施工中存在着设备操作复杂、数据处理依靠经验、环境适应性差等诸多局限性, 从而影响到检测工作的工作效率以及工作质量。因此, 根据工地现场实际工况, 对现有的无损检测技术进行优化改进, 简化操作流程、提高环境适应性、规范数据解读, 形成一套符合现场实操的检测方案, 对提高隧道二次衬砌混凝土强度检测质量、保证工程安全具有重要的实际意义。

作者简介: 孙艳 (1990.12-), 女, 云南普洱人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 公路工程试验检测。

一、传统无损检测技术在工地现场应用的局限性

(一) 检测精度受现场环境干扰大

传统的无损检测技术大多采用单一的物理场原理，在工地复杂环境下容易受到各种因素的影响。回弹法依靠混凝土表面硬度和强度的相关性，但是工地现场衬砌表面常常有浮浆、碳化、含水率不均等问题，当碳化深度大于3mm时，检测误差就会大于15%；超声波法通过声波传播速度来评价混凝土密实度，而隧道内钢筋分布不均、衬砌内部微小缺陷等会使声波传播路径发生畸变，造成强度评估偏差；电磁感应法虽然可以穿透表层钢筋，但是对现场高湿度、粉尘多的环境比较敏感，含水率的变化会明显影响电阻率检测结果，从而造成强度量化不准确。现场的干扰因素很难排除，造成传统技术检测精度稳定性差，不能满足工程质量评定的要求^[1]。

(二) 现场操作与数据处理效率低

传统无损检测设备多为手持便携式，工地现场检测需要逐点操作，对于特长隧道来说检测效率非常低。对3公里以上长度的隧道来说，用传统设备进行全面检测需要投入大量人力和资源，而且检测周期很长，会影响到施工进度。同时传统数据处理大多采用经验公式换算，比如回弹法强度换算公式是以标准工况下拟合的，但工地现场混凝土配合比、养护条件与标准工况有差异，导致换算误差增大；超声波法只用传播速度一个参数评价强度，忽略了现场检测中振幅衰减、波形畸变等重要信息，数据解读主观性大，需要检测人员有丰富的经验，否则容易出现误判^[2]。

(三) 设备适应性与现场实操性不足

工地现场环境恶劣，潮湿、粉尘多、光线不足等都会影响到传统的检测设备的稳定性。部分检测设备对工作环境要求很高，在湿度大于80%或者温度低于0℃时，设备的性能会降低，检测数据可靠性也会降低。此外传统设备操作程序繁杂，检测人员要频繁调参、记录数据，在现场作业空间受限的情况下操作不方便；检测结果多为单点数据，难以形成衬砌强度空间分布图谱，导致无法快速定位强度薄弱区，增加现场质量评价和后续整改工作的难度。

二、工地现场无损检测技术改进方向

(一) 检测方法优化：结合现场工况的组合检测方案

针对单一检测方法精度不够的问题，根据工地现场的实用性要求，提出回弹和超声波组合检测的方法，利用两种方法的互补性提高检测精度。回弹法操作简便、快速，适合现场大范围初步检查；超声波法对混凝土内部缺陷敏感性高，可弥补回弹法对内部质量判断的不足。通过建立组合检测强度计算模型：

$$\sigma = \alpha v_p + \beta R - \gamma d_s + \delta$$

其中， σ 为混凝土强度， v_p 为超声波传播速度， R 为回弹值， d_s 为钢筋保护层厚度， α 、 β 、 γ 为现场校准系数， δ 为环境修正值。该模型综合考虑了两种检测技术的核心参数，同时引

入钢筋保护层厚度和环境修正项，有效降低现场干扰因素的影响。

检测流程上进行优化简化，现场检测前先对衬砌表面进行简单的处理，清除浮浆、粉尘，保证检测面平整干燥；采用分区检测的方式，将衬砌表面分成200mm×200mm的检测区，每个检测区内同时做回弹和超声波检测，保证数据的一一对应；对钢筋密集处，预先用电磁感应法快速测出钢筋的位置及保护层厚度，避开钢筋对超声波检测的干扰，提高检测的准确性^[3]。

(二) 检测设备适配改进：提升现场操作便捷性与稳定性

1. 设备操作简化与集成化改进

高速公路隧道二次衬砌混凝土强度检测，传统设备由于操作复杂、功能分散而大大降低检测效率。根据工地现场操作的要求，对传统的检测设备进行改良迫在眉睫。给回弹仪加上数据存储的功能，可以实现自动保存回弹值、检测位置等信息，避免人手记录失误的现象的发生，也能够实现数据批量导出，提升了数据处理的效率。用某隧道检测项目的实例来说明，使用此功能以后数据录入时间减少超过50%。超声波检测仪改善了操作界面，简化了参数设定，增添了现场校准快捷按钮，利于检测人员迅速调节设备；将电磁感应探头与回弹仪融合为一个整体检测设备，削减了现场需携带的设备数目，操作更为便利。改进后设备重量减小30%，操作步骤减少40%，劳动强度大大降低，适合长隧道检测作业^[4-5]。

2. 现场环境自适应改进

隧道施工现场环境复杂多变，高湿度、多粉尘、温度变化大等都会对检测设备的性能以及数据的准确性造成影响。根据工地现场高湿度、多粉尘、温度波动大等特点，对设备进行环境适应性改造。在检测设备上加装简易防尘防水罩，用高强度透明材料，既能防尘防水汽进入设备内部影响性能，又不影响操作观察。在回弹仪测头上做耐磨防滑设计，使用特殊的合金材料，适应衬砌表面粗糙的现场情况；超声波探头装有自动清洁装置，检测前能快速清除探头表面的粉尘，保证信号传输。在设备上预先设置环境修正参数表，检测员根据现场温湿度、粉尘浓度等情况调用对应的修正系数，不用复杂的计算就可以使检测数据更加准确。通过检测，改进之后的设备在-5℃~50℃温度，30%~90%相对湿度的环境下，检测精度波动范围控制在±3%以内，完全符合工地现场环境需求，为极端环境下精准检测提供保障^[6]。

(三) 数据处理规范：简化流程与降低经验依赖

1. 建立现场专用修正体系

传统的通用经验公式在工地上复杂的条件下无法达到检测精度的要求，因此建立现场专用修正体系就成为关键。根据工地现场混凝土工况与标准工况的不同，建立专用数据修正体系。收集不同地区、不同配合比的混凝土试块，在模拟工地养护条件下做试验，绘制回弹值、超声波速度和混凝土强度的关系曲线，得到区域专用修正公式，代替传统通用经验公式，减小工况差异带来的误差。同时整理工地常见干扰因素（碳化深度、含水率、钢筋密度）的修正系数表，检测人员根据现场实测的干扰参数，直接

对检测结果进行修正,简化数据处理过程。在该省的高速公路项目中应用体系后,检测数据与钻芯法对比的误差率控制在5%以内,数据可靠性得到提升^[7]。

2. 数据解读标准化与可视化

传统的数据解析依靠检测员的经验,带有很强的主观性,效率也低。改善现有的解析手段、标准化、可视化解析是提高检测质量的主要方法。为降低数据解读的依经验性,制订现场数据解读标准流程。明确检测数据的合格判定阈值,按照《公路工程质量检验评定标准》,结合现场实际,确定强度合格区间,超出区间的自动提示需要重点复核;采用简单直观的数据可视化方式,将检测数据导入到专用的简易软件中,可以快速得到衬砌强度分布热力图,直观显示强度薄弱处,不需要专业的数据分析知识也可以理解。该软件支持现场手机端操作,检测完成之后就可以即时生成检测报告初稿,大大缩短了报告的编制时间。某隧道检测项目使用该系统后,报告编制时间由原来的三天缩短为半天,大大加快了项目进度^[8-9]。

三、改进技术的工地现场验证与应用

(一) 现场验证试验

检验该改进技术实用性与精确度的平台,选择K2+300至K2+600段高速公路隧道为试验场地。该隧道二次衬砌采用C35混凝土,检测区域面积为2500m²,分别用传统方法、改进方法进行检测,选取30个检测点用钻芯法对比试验。试验结果如下表所示:

表1 不同检测技术强度评估误差对比(%)

混凝土强度等级	传统回弹法	传统超声、波法	改进组合检测法	钻芯法对比误差
C35(现场、实测)	±8.3	±7.1	±4.2	±1.8

由表1可知,改进组合检测法的强度评估误差在±5%以内,比传统的回弹法精度提高25%以上,与钻芯法相比误差小于2%,符合工程质量评定的精度要求。改进技术检测效率比传统技术提

高了40%,2500m²的检测区域只需2名试验检测人员一天的时间就可以完成,检测周期大大缩短。

(二) 工程应用案例

将改良过后的无损检测技术运用到一条长4.0公里的深埋式高速公路隧道二次衬砌检测中。该隧道现场环境潮湿,衬砌表面碳化程度不均匀,钢筋分布密集,二次衬砌采用C35混凝土。对隧道K2+100至K2+800段用改进技术做了全面检测,检测过程设备运行稳定,没受现场高湿度、粉尘环境的影响。利用强度分布热力图,快速找到K2+450~K2+500为强度薄弱区,强度值为28~30MPa,与现场渗漏水位置重合。对该区域做钻芯检验,实测平均强度为29.3MPa,比改进技术检测结果误差为±1.7%,检测结果准确可靠。施工单位按照检测结果加固强度薄弱处来消除隐患,从而证明改进技术在工地现场是可行的。

四、结论

本文根据第三方检测单位工地现场检测需求、监理单位验收检测工作实践,从检测方法、设备适配、数据处理三个方面对传统无损检测技术在现场的应用进行优化改进。采取回弹-超声波组合检测方案来弥补单一技术的不足,对检测设备实施操作简化和环境适应性改造,改善了现场操作的便捷性与稳定性,创建了现场专用修正体系和标准化数据解读程序,减少对经验的依赖,优化了数据处理的速度。通过工地现场的检验,改进后的检测技术误差小于±5%,检测效率提高40%,操作简单,环境适应性好,完全可以达到工地现场实操的要求。

该改进技术无需复杂的设备及专业的数据分析能力,适合第三方检测单位以及监理单位现场使用,能有效提高隧道二次衬砌混凝土强度检测质量及效率。今后可以对设备便携性做进一步的优化,开发简单易用的现场数据处理小程序,扩充不同地区、不同工况下的修正系数库,使其在高速公路隧道工程现场检测时发挥更大作用,为工程质量安全提供更坚实的技术支持。

参考文献

- [1] 杨朝帅,王育江,杨睿,等.隧道二次衬砌混凝土收缩开裂机理及影响因素分析[J].混凝土,2025,(04):250-256+262.
- [2] 王法雁,袁斌,孟小军,等.隧道二次衬砌混凝土施工质量控制措施研究[J].工程建设与设计,2024,(22):226-228.
- [3] 朱星宇,刘征,张志强,等.铁路隧道结构设计参数对二次衬砌裂缝影响规律研究[J].现代隧道技术,2023,60(05):1-10.
- [4] 王倩,孟庆贺,贺中.隧道二次衬砌混凝土强度控制[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2020年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册).中交一公局海威工程建设有限公司;,2020:262-265.
- [5] 邵宗文.隧道二次衬砌混凝土施工问题及措施[J].交通科技与管理,2023,4(03):129-131.
- [6] 宋亚波.基于回弹法的隧道混凝土强度检测研究[C]//贵州煤炭经济2024年论文选编.兰州交大工程咨询有限责任公司;,2024:108-110.
- [7] 胡改军.无损检测技术在隧道工程质量检测中的应用[J].工程技术研究,2023,8(24):53-55.
- [8] 史小勇.公路隧道试验检测技术[J].交通世界,2022,(13):67-68+71.
- [9] 章志新.无损检测技术在高速公路施工检测中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(11):166-168.