

回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的应用研究

胡 进

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 隧道衬砌混凝土强度是决定隧道结构长期服役安全与耐久性的核心指标, 回弹法因无损、便捷、高效的特点, 已成为隧道工程现场混凝土强度检测的主流技术手段。本文结合隧道衬砌结构的工况特殊性, 系统阐述了回弹法检测的核心原理与应用优势, 梳理了检测全流程的关键实施要点, 深入分析了影响检测精度的核心因素, 并提出了针对性的精度优化与质量控制策略, 以期为回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的规范化应用提供技术参考, 助力隧道工程质量精细化管控。

关键词 回弹法; 隧道衬砌; 混凝土强度; 无损检测

中图分类号: TU528.07; U456.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.004

0 引言

在我国交通基础设施建设高速发展的背景下, 隧道工程已成为公路、铁路等线性工程的重要组成部分。二次衬砌作为隧道主体结构的核心受力与防护单元, 其混凝土抗压强度直接关系到隧道的结构安全、服役寿命与运营稳定性。在工程现场检测中, 钻芯法等破损检测手段存在破坏结构、效率低下、成本较高等局限, 难以满足隧道衬砌大面积、常态化的强度检测需求^[1]。回弹法作为成熟的无损检测技术, 适配隧道受限空间作业场景, 在工程中得到广泛应用。本文针对隧道衬砌的特殊工况, 系统研究回弹法检测的应用要点与精度控制策略, 为现场检测实践提供理论与技术支撑。

1 回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的核心原理与应用优势

1.1 回弹法检测的基本原理

回弹法检测是基于混凝土表面硬度与抗压强度之间的正相关统计关系。通过回弹仪内的弹性机构驱动弹击锤, 以恒定的冲击能量冲击混凝土表面, 弹击锤回弹的距离与混凝土表面硬度直接相关, 该比值即为回弹值。结合预先建立的回弹值—混凝土抗压强度测强曲线, 可通过实测回弹值、碳化深度等参数, 换算得到混凝土的抗压强度换算值。目前, 我国回弹法检测的核心技术依据为《回弹法检测混凝土抗压强度技

术规程》(JGJ/T 23-2011), 同时需适配公路、铁路行业隧道工程的专项检测规范要求。

1.2 隧道衬砌混凝土检测的工况特殊性

相较于房屋建筑等平面结构混凝土检测, 隧道衬砌混凝土检测存在显著的工况特殊性, 对回弹法的应用提出了更高要求。一是结构形态特殊, 隧道衬砌为弧形曲面结构, 拱顶、拱腰部位检测面曲率大, 回弹角度控制难度高, 易引入操作误差; 二是作业空间受限, 隧道内断面空间有限, 拱顶等部位操作平台搭设难度大, 检测作业的便捷性与规范性受到制约; 三是混凝土服役环境特殊, 隧道内相对湿度高、通风条件有限, 混凝土碳化发展规律与室外环境存在显著差异, 同时衬砌混凝土多采用泵送施工工艺, 常掺加大比例矿物掺合料, 表面硬度与内部强度的匹配性与普通混凝土不同; 四是检测面状态复杂, 衬砌混凝土受模板工艺、脱模剂、浮浆层等影响, 表面状态离散性大, 易对检测结果造成干扰。

1.3 回弹法在隧道衬砌检测中的应用优势

在隧道衬砌混凝土强度检测场景中, 回弹法相较于其他检测技术具备不可替代的应用优势。其一为无损性, 检测过程仅对混凝土表面进行轻微打磨与弹击, 不会对衬砌结构造成任何损伤, 完全适配隧道主体结构不允许随意破损的管控要求; 其二为便捷高效, 回弹仪设备便携易操作, 无需复杂配套设备, 可适配隧道内受限空间作业, 单测区检测耗时短, 可实现衬砌

作者简介: 胡进 (1976-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

结构大面积、多段落的批量检测；其三为经济性强，检测过程无耗材消耗，无需后续结构修补工序，检测成本远低于钻芯法等破损检测手段；其四为数据反馈及时，现场可快速完成回弹值采集与初步分析，能第一时间发现混凝土强度异常问题，适配工程现场质量管控的时效性要求。

2 回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的关键实施要点

2.1 检测前的准备工作

首先针对仪器设备管控，回弹仪必须经法定计量部门检定合格且在有效期内，现场检测前需在洛氏硬度 HRC 为 60±2 的钢砧上完成率定，率定回弹值应稳定在 80±2 范围内，同时需清理仪器机芯粉尘，保证弹击机构运行顺畅。其次是技术资料收集，需全面获取衬砌混凝土的设计强度等级、配合比参数、原材料种类、矿物掺合料掺量、养护方式、施工日期与实际龄期等核心信息，为测强曲线选择与数据修正提供依据。最后是现场检测面处理，需采用砂轮打磨清除检

测面的浮浆、脱模剂、油污、抹灰层与松散表层，露出混凝土密实原生面，保证检测面平整清洁^[2]。

2.2 测区布置与测点布设要求

测区与测点的规范布设是检测工作的核心环节，需严格贴合隧道衬砌的结构特点执行。隧道衬砌检测应按施工段、结构部位划分检测单元，单个构件的测区数量应符合规范要求，对于长度小于 10 m 的构件，测区数量不应少于 5 个；对于长度大于 10 m 的构件，测区间距不宜大于 2 m。单个测区应布置在衬砌混凝土浇筑侧面，面积控制为 0.04 m²（200 mm×200 mm），测区应避免蜂窝、麻面、裂缝与预埋件部位，保证测区范围内混凝土均匀密实。每个测区内均匀布设 16 个测点，测点间距不应小于 20 mm，测点距构件边缘不应小于 30 mm，避免测点集中或临近边界造成数据失真（见表 1）。

2.3 回弹值的规范采集与数据处理

现场回弹法检测数据的采集必须严格遵循规范化的操作流程。在实际操作中，回弹仪的轴线应始终与

表 1 隧道衬砌回弹法检测技术参数控制要求

控制项目	规范技术要求	隧道工况特殊管控要点
回弹仪率定	钢砧率定回弹值应为 80±2，检定有效期不超过 6 个月	隧道多粉尘环境下，每日检测前后均需进行率定校验，机芯定期清理维护
测区设置	单个测区面积宜为 200 mm×200 mm，常规构件测区数量不少于 10 个	弧形衬砌测区应优先选在边墙、拱腰部位，保证测区平整度，拱顶部位测区需加密操作质控
测点布设	单测区布设 16 个测点，测点间距 ≥ 20 mm，距构件边缘 ≥ 30 mm	避开衬砌表面气泡、模板拼缝、振捣不密实区域，测点需落在混凝土密实基体上
回弹操作	回弹仪轴线始终垂直于检测面，匀速施压、平稳复位	弧形面需精准控制回弹角度，按规范要求 进行角度修正，杜绝斜向弹击
碳化深度测量	单测区碳化测点不少于 3 个，读数精度 ≥ 0.25 mm	隧道高湿环境下需保证孔洞干燥，酚酞溶液显色 稳定后再读数，碳化值离散性大时需逐点修正
数据修正	根据回弹角度、浇筑面、含水率等情况完成规范修正	优先采用地区或专用测强曲线，全国统一 曲线需验证适配性

被测表面保持垂直关系；当检测对象位于隧道拱部、侧墙或其他非水平位置时，还需准确记录倾斜角度，并按相关规定执行相应的角度修正计算。为确保测试结果的准确性，在加载过程中要求施加力的速度均匀且稳定，同时复位动作需平稳进行，以防外力冲击引发设备震动或偏移现象。每次测量仅限进行一次回弹试验，不得重复施加载荷。数据分析阶段，首先应对单个测区内获得的 16 个回弹值进行异常值剔除处理，随后结合碳化深度均值，通过适用的测强关系曲线推算测区混凝土的实际抗压强度^[3]。

2.4 碳化深度测量的关键控制

碳化深度作为核心参数直接影响检测结果的准确性，为确保数据的真实可靠，建议在同一测区内设置

不少于三个典型观测点同时开展回弹值与碳化深度测试。当单个测区各点间的碳化深度差异超过 2.0 mm 时，应对相应的回弹测点分别按照实际测定的碳化深度进行独立修正处理。具体操作步骤如下：一是采用冲击钻在拟测部位随机制备直径约为 15 mm 的标准圆形孔洞，其深度需超出预计的混凝土碳化层厚度；二是钻孔完成后不得使用清水冲洗内壁以防变色现象消失，从而可能干扰后续判断；三是向孔腔滴注浓度为 1% 的酚酞指示剂溶液，并静置直至颜色变化趋于稳定；四是借助专业工具精确量取从混凝土表面至新鲜显色界面的实际垂直距离，确保读数精度达到 0.25 mm；五是基于所有有效记录计算平均值作为该测区的统一碳化深度参考指标。

3 回弹法检测精度的主要影响因素与优化控制策略

3.1 原材料与配合比的影响及控制

混凝土原材料与配合比参数,是决定回弹值与抗压强度相关性的核心内在因素。隧道衬砌混凝土普遍采用泵送配合比,掺加大量粉煤灰、矿粉等矿物掺合料,会改变混凝土的水化产物与表面硬度发展规律,若直接采用全国统一测强曲线,易出现强度换算偏差。同时,水泥品种、骨料种类与级配、外加剂类型等,也会对测强曲线的适配性造成影响。针对该问题,核心控制策略为优先采用专用测强曲线,工程开工前应结合本项目所用的原材料、配合比,制作同条件试块,建立适配项目的专用测强曲线;无专用曲线时,应优先选用工程所在地区的地方测强曲线,减少全国统一曲线的适配性误差。对于矿物掺合料掺量超出规范适用范围的混凝土,应通过钻芯对比试验完成强度修正,保障检测结果的可靠性^[4]。

3.2 施工与养护工况的影响及控制

隧道衬砌混凝土的施工工艺与养护条件,会显著影响混凝土表面与内部的强度均匀性,进而造成回弹检测偏差。在泵送混凝土浇筑过程中,若振捣不密实、模板漏浆,易导致混凝土表面出现浮浆层、蜂窝麻面,回弹值无法反映混凝土真实强度;隧道内养护环境湿度大,但部分工程存在养护不及时、养护周期不足的问题,会导致混凝土表面强度发展滞后,与内部强度形成差异。此外,混凝土检测龄期过早或过长,也会超出测强曲线的适用范围,引入换算误差。对应的控制策略为:检测前必须对检测面进行彻底打磨,完全去除表面浮浆层与不密实表层,确保回弹测点落在混凝土密实基体上;严格把控检测龄期,优先选择混凝土龄期28 d~60 d的阶段开展检测,早龄期检测需确认混凝土强度已达到规范适用要求,超长龄期混凝土应结合钻芯法进行结果验证^[5]。

3.3 检测操作不规范的误差及控制

人为操作的规范性是影响检测数据精度的关键可控因素,也是隧道现场检测中最易出现偏差的环节。常见的不规范操作包括:回弹仪未垂直于检测面、角度修正错误、检测面打磨不到位、测点选在石子或气孔上、碳化深度测量读数偏差、仪器未按要求率定等。同时,隧道内粉尘、光线不足等环境因素,也会加剧操作误差的产生。针对该问题,需建立全流程的操作质控体系:检测人员必须持证上岗,定期开展规范培训与技能考核,强化隧道特殊工况下的操作能力;严格执行仪器设备的日常管控流程,每日检测前后完成

率定校验,定期维护保养仪器;现场检测实行双人复核制度,一人操作、一人记录,对检测面处理、回弹操作、碳化深度测量等关键环节全程监督,杜绝不规范操作,最大限度降低人为误差。

3.4 隧道特殊结构与环境的影响及控制

隧道衬砌的弧形曲面结构、受限作业空间与特殊服役环境,是回弹法应用中特有的影响因素。弧形检测面易导致回弹仪与混凝土表面接触不充分、弹击角度偏差,进而造成回弹值偏低;拱顶部位作业空间狭小,人员操作稳定性差,易引入随机误差;隧道内高湿环境导致混凝土表面含水率高,会降低混凝土表面硬度,造成回弹值系统性偏低。对应的优化控制策略为:弧形衬砌部位的测区应尽量选择曲率平缓的区域,通过精细打磨保证测区平整度,操作时严格控制回弹仪与检测面的垂直度,精准执行角度修正;拱顶等操作难度大的部位,应搭设稳定的操作平台,保证人员操作姿态稳定,避免悬空作业带来的操作偏差;对于表面潮湿的混凝土,应提前进行通风晾干,待检测面处于自然干燥状态后再开展检测,避免含水率对回弹值的干扰。

4 结束语

本文系统梳理了回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的应用原理、全流程实施要点,深入剖析了原材料、施工工艺、操作规范、隧道特殊工况四大类核心影响因素,并提出了针对性的精度控制策略,明确了规范化、精细化管理是保障回弹检测结果可靠的核心。当前回弹法在隧道高掺量矿物掺合料混凝土适配、早龄期衬砌精准检测、曲面结构自动化检测等方面仍有优化空间,后续应加强专用测强曲线与智能化检测技术的研究,进一步提升检测精度与效率,为隧道结构质量安全管控提供更坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 饶雪兰.基于回弹法的隧道混凝土强度检测研究[J].价值工程,2024,43(19):125-127.
- [2] 于婷婷.某高速公路隧道专项病害检测与加固处治分析[J].四川水泥,2024(02):264-267.
- [3] 吴铭芳,曾仲毅,黄义雄,等.运营高速公路隧道衬砌裂损处治方案研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(S2):942-954.
- [4] 张敬雷.钻芯法和回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的相关性[J].铁道建筑,2022,62(09):108-110.
- [5] 安先国.隧道衬砌混凝土振动性能及二衬振动特性分析[D].西安:长安大学,2021.