

水泥试验检测数据分析在公路桥梁质量评定中的应用研究

严佐庆

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]水泥是公路桥梁混凝土结构的核心胶结材料,其力学性能直接影响着桥梁工程质量以及使用寿命。伴随着公路桥梁工程项目不断扩大及质量评价指标越来越严格的要求下,原先的经验型检验数据分析手段已经无法适应对精确分析的需求。文中通过对水泥试验检验结果同桥梁质量评价的相关理论进行归纳总结后,全面介绍了水泥试验检验数据采集规范以及预处理措施,并提出了包括强度参数、标养与试压情况等在内的若干应用途径。

[关键词]水泥试验检测;公路桥梁;质量评定;数据分析

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20234

中图分类号: U416.04

文献标识码: A

Research on the Application of Cement Testing Data Analysis in Quality Evaluation of Highway Bridges

YAN Zuoqing

Xinjiang Beixin Science and Technology Innovation Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Cement is the core bonding material for concrete structures of highway bridges, and its mechanical properties directly affect the quality and service life of bridge engineering. With the continuous expansion of highway and bridge engineering projects and increasingly strict requirements for quality evaluation indicators, the original empirical inspection data analysis methods are no longer able to meet the demand for precise analysis. After summarizing the relevant theories of cement test inspection results and bridge quality evaluation, this article comprehensively introduces the data collection standards and preprocessing measures for cement test inspection, and proposes several application paths including strength parameters, standard curing, and pressure testing.

Keywords: cement testing and inspection; highway bridges; quality assessment; data analysis

公路桥梁是交通运输基础设施的重要组成单元,直接影响着公众生命安全以及国家经济运转速度。水泥混凝土是公路桥梁应用最为普遍的建筑材料之一,在这之中,水泥是混凝土的黏结剂,它的品质直接决定了混凝土强度等力学特征以及耐久程度,所以对水泥的检验检测结果的合理解读对于桥梁工程的质量评估有着至关重要的作用地位。

1 水泥试验检测与桥梁质量评定的理论关系

水泥测试检验及桥梁工程质量评估二者之间具有从材料到构造的递进关系。水泥的理化性质是混凝土宏观性质的物质载体,而混凝土性质又直接影响着桥梁的安全程度、适用程度以及耐久程度等。从质量管理链条来看,水泥检测数据处理起着把检测室内微观数值转变为实际结构宏观质量指标的作用。

从安全性的角度来说,水泥胶砂强度作为衡量工程结

构的受力性能的基础点。公路工程水泥材料的检验检测的主要指标有凝结时间、安定性、胶砂强度、细度和比表面积等,其中强度大小以及上下浮动程度决定了混凝土的设计抗压等级和承压预备量大小,由此影响工程的安全性^[1]。在施工质量方面来说,凝结时间和安定性直接影响混凝土的拌制时间和体积稳定性,凝结时间过长会造成冷缝或者工期延误,安定性能差会产生裂缝,降低工程的整体性;耐久性方面来说,水泥成分决定着混凝土抵抗外部环境破坏的能力大小。桥梁在服役期间内,因为构件老化以及交通量增大还有环境的影响使得材料抗腐蚀性能逐渐下降。水泥中的氯离子含量、碱含量等因素影响混凝土的抗渗性、抗蚀性,一起决定了桥梁在一定环境中的服役年限。以上所述之间的关系可以通过质量评价指标系统进行联结,如下表1所示。

表 1 水泥试验检测指标与桥梁质量评定维度的对应关系

质量评定维度	核心水泥检测指标	主要关联结构性能	评定应用方向
结构安全性	胶砂强度（抗压、抗折）	混凝土承载力、荷载储备	承载能力检算
施工质量	凝结时间、安定性、标准稠度用水量	施工可操作性、体积稳定性	施工过程控制
结构耐久性	氯离子含量、碱含量、细度	抗渗性、抗化学侵蚀	桥梁寿命预判
材料均匀性	密度、比表面积、胶砂流动度	混凝土质量一致性	异常质量预警

就方法论而言,水泥检测数据分析及其质量判断的综合运用就是信息由点到面再到体的过程,即“点状的数据-面状的评估-体状的处理”;合规判定确定是否合格,状态评估确定是否安全,而寿命期管理,则更进一步地解决什么时候需要进行维修以及采取什么方式进行维修的问题。这种结构也为接下来的分析方向提供了一个逻辑支点。

2 水泥试验检测数据的获取与处理方法

2.1 数据来源与采集规范

高质量的数据是精准分析的基础,标准化收集是最基本的保证,公路桥涵工程中对水泥测试数据主要来源于以下三个方面:一是出厂检验的数据,水泥生产厂以批出具强度等级、凝结时间、安定性、化学组成等质保资料,在运输储存过程中可能会有性能的变化;二是进场复检的数据,依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG3420-2020),水泥到达现场之后应当进行取样复检,检查内容包括细度、密度、比表面积、凝结时间、安定性、胶砂强度等,取样方式应当符合 T0501-2005 的规定,试验在标准温湿度环境下进行。三是在施工过程中监督检测数据,采用监理或者第三方在各环节随机抽查的方式对工程质量的稳定性和变化趋势进行关注。像中交路桥科技有限公司此类行业的检测项目就包括了烧失量、氯离子含量、碱含量等化学成分。采样的频率要根据工程大小以及重要程度来确定,同时压力试验机以及其他一些重要的仪器都要定期进行校验,人员素质也要保证标准流程化操作。

2.2 数据预处理与特征分析

原始数据需要经过系统的预处理。数据清洗通过均值±3 倍标准差来判断是否为异常值并且校核,对于缺失值根据具体情况填补或者标注,经验表明收集混凝土配合比以及力学、耐久性试验的数据,筛选数据、去掉异常值及归一化的处理,才能建立支持模型训练的高质量数据库。水泥数据建议分别使用 MinMax 归一化法和 Z-Score 标准化方法去除量纲的影响。特征选择包括选取统计特征和方差系数,方差系数过大说明材料品质不稳定,即便是单一样品合格也会造成弱环。应该考虑进去评价^[2]。已有许多工作利用机器学习方法来构造用于预测砼抗压强度、混凝土渗透性系数、氯离子扩散系数等相关性能指标。形成材

料成分和各种性能间的关系。

3 水泥试验检测数据分析在质量评定中的应用路径

3.1 基于强度指标的结构安全性评定

水泥胶砂强度是结构安全性的判断标准,传统的逐级推定法误差较大,为了提高准确度,有些研究针对快硬型胶乳改性混凝土应用于桥梁桥面铺装进行了研究,使用半破损及无损检测相结合的方法测定早期强度并基于随机森林建立了现场强度预测模型,其准确率为 $R^2=0.8709$,这种方法是利用数据分析来构建非线性映射关系从而减小了经验计算的偏差,在实际中可以采取三级递进的方式:一级根据出厂强度进行初筛;二级利用 28 天强度推定强度值并开展承载力验算分析;三级采用钻心或者回弹得到实测强度进行最终评定。《公路桥梁承载能力检测评定规程》明确提出了桥梁材料抗压强度检测评定的技术手段并规定实测强度同设计值之间的误差允许一定的范围。

3.2 基于凝结时间与安定性的施工质量关联分析

凝结时间和安定性与施工质量的关系须从具体工艺及条件考虑。初凝确定了合理的施工时机,终凝确定了拆模和开始湿养护的时间,在大型箱梁、高墩结构等复杂的工程部位,相适应很重要,如果初凝太短而施工不做相应调整,则会产生冷接缝问题,如果终凝太短会加大模板周转时间,提高费用,并且温差大的情况下容易产生早期裂缝,所以凝结时间分析不能仅仅停留在是否合格上,还要和施工方案中的时间参数进行匹配度校验,形成以时间为窗口期控制的质量预防手段。安定性是水泥质量的重要标志之一,安定性能差会导致浇筑完成后不规则变形,导致混凝土表面出现裂缝并且贯穿整个截面,极大地影响结构的承载能力和使用年限。通过对数据进行分析,在安定性检验方面如果出现不合格,则应该列为一票否决项目即一旦检验结果超出范围,则无论其它的检验项目是否合格都不能用于工程的主梁施工当中。

3.3 基于耐久性指标的桥梁寿命预判

耐久性是最为核心的技术问题,水泥化学成分才是影响长久耐久性的根本原因。对一建于 50 年役龄的嘉陵江大桥混凝土梁进行检测发现:在内陆温润潮湿环境中,碳

化导致钢筋锈蚀是主要诱因,近乎为零的游离氯离子含量也排除了氯离子侵蚀造成锈蚀的可能性,因此,耐久性评估一定要考虑服役环境条件的影响。对于寿命估算来说,我国的研究人员提出的灰色关联度以及组合赋权法下桥梁剩余寿命估计方法就是利用关联度及组合权重来判断桥梁受损的程度;针对寒冷区桥梁的情况,国内相关研究小组开展足尺组件试验建立了一种预应力损失模型,可以准确计算出冻融条件下结构物的使用寿命;采用低收缩高性能混凝土的百年服役寿命预测模型已经建立起来并且已经被应用到桥面结构上,预测寿命可以达到一百年以上。耐久性因素的影响是持续积累的过程,要持续跟踪观察修正趋势。

3.4 多源数据融合的综合质量评定模型

单一来源的数据很难反映整体的质量状况,多种来源的数据整合成一个重要手段。已经有一些学者提出了一种结合了改进的 PCA, k-means 聚类以及 kaplan-meier 生存分析混合算法模型来进行桥梁性能评价与预测的方法,选择重要的指标进行划分,并分层分类,创建多个变量之间的回归模型来升级结构的状态,在空心板梁桥的服务性能评价方面,通过对有限元建模及检测数据分析特征相结合作出的一种多源整合的数据集合,用基于多态 t-s 故障树模型的评价方法可以较好地量化其健康状态并且能给保养提供帮助。整合模型需要克服时间对齐问题,加权问题以及解释的问题这三大难题。

4 提升数据分析在质量评定中应用效能的措施

4.1 检测指标体系的结构优化

目前公路桥梁水泥试验检测指标体系已经基本完善,在指标的层次化方面还有进一步的改进之处。“基础指标-扩展指标-专项指标”三级分层体系就是其中一种改进方向,基础指标包括胶砂强度、凝结时间、安定性等必要检测指标,这些指标适用于所有的桥梁工程;扩展指标根据桥梁结构类型及施工工艺进行补充设置,例如对大体积混凝土桥梁要增加水化热测定,对预应力结构要重视水泥中的碱含量控制等等。专项指标就是对于特殊的服役工况定制的,如在海洋环境中使用的桥梁就要增加抗硫酸盐耐久性的测定。另外还有一种思路是采用体现材料本身固有特性的间接指标。比如比表面积、颗粒级配既决定了水泥的水化进程以及初期强度的发展程度的同时还影响着混凝土的收缩变形特性,加入质量评价标准里可以提前对结构耐久寿命进行预测。

4.2 数据分析方法的规范化与智能化

数据分析方式的标准化乃是保障评定成果可以对比

性与权威性的基础条件。需要研发出台关于水泥实验室检验测试数据分析的技术标准来规定数据清洗的过程步骤、偏离值的标准设定、数据分析所选的统计测试手段,以及分析结论表述的形式标准等,以降低由于人为的不同而导致的各种误差。在标准化基础上,人工智能分析技术就是提高效率的关键点。数字混凝土设计方法的应用显示出了利用机器学习训练出来的性能预测模型已经可以完成对混凝土抗压强度及耐久性能的精准预报;其预测数值同实际测量结果之间的差距均保持在一个合理的区间内;整体成本较之以往下降了约 30%。未来通过数据量的增长和机器学习的发展有望形成一个包含水泥性能、混凝土配比、施工技术以及服役环境等多种因素在内的桥梁工程质量智能评判体系^[3]。值得指出的是,人工智能技术的发展并不是要抛弃物理原理的限制,单纯地基于数据的模型会在模型边界以外发生过拟合的问题,所以应该把物理理论模型和数据驱动的方法结合起来,用物理理论来确定模型的大致结构框架,用数据驱动的方式对模型进行标定,从而做到一种介于黑盒白箱之间的灰色模型,具有较高的准确性和可解释度。

4.3 评定结果与养护决策的闭环联动

水泥检验检测分析数据对于桥梁的质量评价的意义不能仅仅局限于“做出一个判断”,还要延伸到“指引下一步工作”。目前工程中评定的结果和养护措施之间有割裂的问题——质量评价报告出来之后,接下来的养护依旧是以固定的频率、预定的方式进行,并未考虑不同养护等级差异化的策略。“闭合”的重要性在于把从水泥检验检测分析出的质量评价结果变成可以操作、可以衡量的养护分级顺序以及维护建议等具体措施。如水泥氯离子含量检测结果较高,同时与环境耐久性指标相结合判断桥梁存在较大的腐蚀风险,则应即时生成减少检测频率的通知指令并纳入养护计划里加入防腐层修补或者阴极保护等措施。而该闭环互动流程就是建立在通过桥梁养护管理系统集成的根据检测信息做出判断的辅助决策系统基础上,使其检测评定的结果可自动产生对应的警示信息以及维护建议,从而构成从“检测-分析-评估-决策-再次检测校正”的闭合回路。

4.4 质量评定信息平台的集成化管理

伴随着公路桥梁工程项目的不断增大及采集数据数量的日益增多,构建集约化的质量评价信息系统势在必行,信息化系统必须具有整合存储、计算分析、图形展示以及辅助判断等功能;一方面,信息系统需要有整合水泥出厂试验数据、进场复试数据、施工期试验数据、第三方监管

抽检数据和桥梁结构健康监测系统实时数据流,并形成统一数据库的能力;另一方面,信息化系统需要具备对于上述数据预处理、特征提取、趋势分析以及寿命预测的算法子系统,可以一气呵成完成整个从输入到出结果的自动化过程^[4]。对于数据可视化方面,在系统上应该针对不同的角色开发不同的数据视图,对现场检测人员进行数据采集、质量问题告警界面的设计;对于项目经理进行全盘的质量状况仪表盘的设计;对于上级单位进行跨项目的质量问题统计及趋势分析的功能。信息系统的一体化管理也能够帮助不同桥梁工程项目的质量相关数据进行横向比较以及区域性的质量问题总体把控,从而可以为区域内的材料采购方案以及质量标准调整提供总体数据参考依据。

5 结束语

水泥检验检测分析属于公路桥梁工程质控体系的基本技术节点之一,文章针对理论联系、数据来源及分析、应用场景以及优化途径四个方面进行分析研究,发现了水泥检测指标同桥梁安全性能、施工质量及使用寿命间的关系,提出强度评估、施工质量相关性、寿命预测以及多维集成的综合性应用模式。而未来,水泥检测数据分析只有

在标准制定机构健全技术规程,研究机构加强方法探索,工程单位注重数据积累的共同努力之下,才能完成由单一指标向复合指标转变、由事后评估转向事前监控、由依赖人的经验转为依靠人机结合进行智能化决策的跨越,在公路桥梁质量评价中真正体现出它作为技术服务的价值作用。

【参考文献】

- [1]汪晓蕾,路洋洋,索子瑞,等.数据驱动的水泥基材料性能分析方法综述[J].硅酸盐通报,2024,43(8):2753-2770.
- [2]王亚琼,高闻靖,李嘉璐,等.基于回弹法及钻芯法的混凝土抗压强度检测方法比选分析[J].公路,2024,69(7):360-367.
- [3]孙召昭,朱英杰,高文超,等.盐碱环境下桥梁混凝土碳化及离子扩散研究[J].水利规划与设计,2024(4):101-106.
- [4]张东旭,王成飞,李宁.冻融循环对寒区桥梁混凝土性能的影响分析[J].交通世界,2024(9):127-129.

作者简介:严佐庆(1986—),毕业于西北农业科技大学土木工程专业,中级工程师,现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。