

铁路桥梁施工过程中结构变形监测与控制技术研究

冯瑞康

中国铁路西安局集团有限公司西安工务段 陕西 西安 710043

摘要: 铁路桥梁作为铁道建设的关键点,其施工质量直接影响铁路运营的安全性和稳定性。在施工过程中,结构变形是影响桥梁质量的重要因素,若不能及时监测和有效控制,可能引发严重的安全事故。本文围绕铁路桥梁施工过程中的结构变形监测与控制技术展开研究,分析了结构变形的常见类型及影响因素,探讨了常用的变形监测技术,包括传统监测技术和现代智能化监测技术,阐述了结构变形的控制技术与措施,通过结合实际案例分析了技术应用效果,并对未来发展趋势进行了展望,本文旨在铁路桥梁施工中的结构变形监测与控制提供技术参考,保障铁路桥梁的施工质量和运营安全。

关键词: 铁路桥梁; 施工过程; 结构变形; 监测技术; 控制技术

引言

铁路运输是我国综合交通运输体系重要部分,具大运量、高速度、低能耗等优势,在国民经济发展中作用重大。在施工过程中,受地质、工艺、环境、材料等因素影响,桥梁结构会产生变形,变形超限会影响使用功能,甚至引发安全事故。所以,对施工中结构变形进行实时精准监测和有效控制具有一定的研究价值。并且随着铁路建设发展,对结构变形监测与控制技术要求提高,传统监测技术难以满足需求,而研究现代智能化监测技术带来新思路。因此,本文研究铁路桥梁施工结构变形监测与控制技术,有重要理论和实践价值。

1 铁路桥梁施工中结构变形的常见类型及影响因素

1.1 常见变形类型

沉降变形: 桥梁结构垂直下沉,多发生在基础和下部结构,沉降过大或不均会致桥梁开裂、倾斜。

位移变形: 包括水平和竖向位移,水平位移多在桥梁上部结构,竖向位移受施工荷载、温度变化等影响。

挠度变形: 桥梁结构在荷载作用下的弯曲变形,主要在梁体,挠度超过设计值会影响梁体受力和寿命。

转角变形: 桥梁结构各部分相对转动角度超过允许范围,如桥墩与基础、梁体与桥墩间因受力不均产生,影响结构稳定性。

1.2 影响因素

地质条件: 地基承载能力、土层分布、地下水情况等影响桥梁结构变形,软弱、不均匀地基易产生沉降和不均变形。

施工工艺: 施工方法、顺序、荷载控制等对结构变形有直接影响,如悬臂施工挂篮移动和浇筑顺序、支架施工搭设质量和预压处理不当都会引发变形。

材料性能: 混凝土、钢筋等材料物理力学性能随时间和环境变化,如混凝土收缩、徐变,钢筋锈蚀会引发结构变形。

环境因素: 温度变化、风力、降水等会影响桥梁结构变形,如温度升降使梁体伸缩和挠度变化,强风引起水平位移和振动变形。

荷载因素: 施工临时荷载、后期恒载和活载会使桥梁结构变形,荷载过大或分布不均会加剧变形程度。

2 铁路桥梁施工过程中结构变形监测技术

2.1 传统监测技术

水准测量法: 是监测沉降变形和竖向位移常用方法。用水准仪等测桥梁不同测点高程变化,计算沉降和竖向位移量。精度高,但需人工操作、效率低,受地形、天气影响大。

全站仪测量法: 可监测水平位移、竖向位移、转角等变形。能同时测量测点的平面坐标和高程,多次测量对比得结构变形情况。精度高,也需人工操作,适用于小范围、单点监测。

百分表和位移计测量法: 用于监测结构微小位移和挠度变形。将其安装在监测部位,读示数变化获变形量。操作简单、成本低,但测量范围有限,适用于局部监测。

应力应变监测法: 在桥梁关键部位装应力应变传感器,如应变片、钢筋计等,监测施工中应力应变变化,推算结构变形情况。能反映结构内部受力状态,为变形分析提供依据。

2.2 现代智能化监测技术

全球导航卫星系统(GNSS)监测技术: 用GNSS接收机接收卫星信号,实时获取监测点三维坐标,实现桥

梁结构变形动态监测。此技术具全天候、自动化、高精度等优点，能监测大范围、远距离结构变形，适用于大型铁路桥梁施工监测，如在大跨度桥梁施工中可实时监测桥塔与梁体变形。

自动化全站仪监测技术：在传统全站仪的基础上，结合自动目标识别、跟踪和数据传输技术，实现监测点自动化测量，减少人工干预，提高效率与精度，可对桥梁结构连续、实时监测。

激光扫描技术：用激光扫描仪全方位扫描桥梁结构，获三维点云数据以分析变形。该技术能快速获取大量结构表面信息，适用于复杂结构变形监测，对比不同时期点云数据可预测变形量大小与趋势。

光纤传感监测技术：利用光纤传感器特性，将光纤埋入或粘贴在桥梁结构，实现对变形、应力、温度等参数实时监测。其优点在于灵敏度高、抗干扰、耐腐蚀、可分布式测量等优点，能长期、稳定监测桥梁结构，如在混凝土梁体中埋入可监测应变与挠度变化。

无线传感网络技术：由大量无线传感器节点组网，通过无线通信采集和传输数据监测桥梁结构变形。该技术布点灵活、成本低、易扩展，适用于大规模、分布式监测，传感器节点可安装在桥梁各部位，实时采集数据并传至监控中心分析。

3 铁路桥梁施工过程中结构变形控制技术与措施

3.1 设计阶段的控制措施

在桥梁设计阶段，应充分考虑各种可能影响结构变形的因素，采取合理的设计方案，从源头上控制变形。

合理选择桥型和基础形式：根据地质条件、跨度要求等因素，选择适合的桥型和基础形式。对于地质条件较差的地区，可采用桩基础、沉井基础等具有较强承载能力的基础形式，以减少沉降变形；对于大跨度桥梁，可选择斜拉桥、悬索桥等受力合理的桥型，降低结构的变形风险。

优化结构设计参数：通过对桥梁结构进行受力分析和变形计算，选择结构的尺寸、配筋等设计的最佳参数。例如，合理优化梁体的截面形状和尺寸，增强梁体的刚度，减少挠度变形；在结构薄弱部位增加加强筋，提高结构的抗变形能力。

考虑施工过程中的变形影响：在设计中应模拟施工过程，预测施工阶段可能产生的变形，并采取相应的预变形措施。例如，在悬臂施工的梁体设计中，预留一定的预拱度，以抵消施工和使用过程中产生的挠度变形。

3.2 施工阶段的控制技术

地基处理技术：对软弱地基进行有效的处理，提高

地基的承载能力和稳定性，是控制沉降变形的关键。常用的地基处理方法包括换填法、压实法、排水固结法、深层搅拌法等。通过地基处理，可减少地基土的压缩量，减少不均匀沉降的影响。

施工荷载控制：合理控制施工过程中的荷载大小和分布，避免荷载过大或集中导致结构变形。在支架施工中，应严格按照设计要求控制支架的承重能力，对支架进行预压处理，消除支架的非弹性变形；在悬臂施工中，控制挂篮的重量和移动速度，确保施工荷载均匀施加。

施工顺序优化：合理安排施工顺序，减少施工过程中结构的受力变形。例如，在连续梁施工中，采用对称、均衡的施工顺序，可减少梁体的不对称变形；在桥梁合龙施工中，选择合适的合龙时机和方法，控制合龙段的施工精度，避免因合龙不当产生较大的应力和变形。

变形监测与反馈控制：建立完善的变形监测体系，实时监测结构的变形情况，并将监测数据及时反馈给施工管理部门。根据监测数据，分析结构的变形趋势，及时调整施工参数和工艺，实现动态控制。例如，在悬臂浇筑施工中，根据梁体的挠度监测数据，调整挂篮的高度和浇筑量，确保梁体的线形符合设计要求。

材料质量控制：严格控制桥梁施工所用材料的质量，确保材料的性能符合设计标准。在混凝土施工中，合理选择配合比，加强混凝土的搅拌、浇筑、养护等环节的质量控制，减少混凝土的收缩、徐变；对钢筋等材料进行严格的检验和验收，防止使用不合格材料。

3.3 运营阶段的维护与控制

桥梁建成运营后，仍需对结构变形进行长期监测和维护，确保结构的安全稳定。

定期监测：建立长期的变形监测制度，定期对桥梁结构进行沉降、位移、挠度等变形监测，及时发现结构的异常变形。

维护加固：根据监测结果和结构的实际状况，对出现变形问题的部位进行及时的维护和加固。例如，对沉降过大的基础进行注浆加固；对出现裂缝的梁体进行修补和加固处理，提高结构的承载能力和抗变形能力。

荷载管理：在运营过程中，严格控制车辆荷载，避免超载车辆通行，减少荷载对桥梁结构的不利影响，防止结构产生过大变形。

4 工程案例分析

以某高速铁路特大桥为例，该桥为连续梁桥，跨度为(48+80+48)m，采用悬臂浇筑法施工。在施工过程中，对该桥的结构变形进行了全面监测与控制。

4.1 监测方案

采用全站仪和光纤传感技术相结合的监测方法。在梁体的关键截面布置全站仪监测点,监测梁体的挠度和位移变形;在梁体内部埋入光纤传感器,监测梁体的应变变化量,进而分析结构的变形情况。监测频率为每浇筑一段梁体后进行一次监测,并在挂篮移动前后增加监测次数。

4.2 监测结果与分析

在施工过程中,通过监测发现,梁体在悬臂浇筑过程中产生了一定的挠度变形,且随着施工阶段的推进,挠度逐渐增大。通过对监测数据的分析,发现挠度变形主要受施工荷载和混凝土徐变的影响。在施工至最大悬臂阶段时,梁体的最大挠度为25mm,未超出设计允许值(30mm)。

4.3 控制措施及效果

根据监测结果,采取了以下控制措施:一是合理选择挂篮的移动速度和调整浇筑顺序,减少施工荷载对梁体的冲击;二是加强混凝土的养护,减少混凝土的徐变;三是根据挠度监测数据,及时调整挂篮的高程,设置合理的预拱度。通过这些措施,有效控制了梁体的挠度变形,确保了梁体的线形符合设计要求。在桥梁合龙后,经检测,结构的各项变形指标均满足规范要求,施工质量良好。

5 铁路桥梁结构变形监测与控制技术的发展趋势

5.1 智能化、自动化水平不断提高

随着人工智能、物联网、大数据等技术的不断发展,铁路桥梁结构变形监测与控制技术将向更加智能化、自动化的方向发展。未来的监测系统将能够实现数据的自动采集、传输、分析和预警,减少人工干预,提高监测效率和精度。例如,结合机器学习算法,监测系统可以对大量的历史监测数据进行分析,建立变形预测模型,提前预测结构的变形趋势,为控制措施的制定提供更准确的依据。

5.2 监测技术的集成与融合

单一的监测技术往往存在一定的局限性,未来将更加注重多种监测技术的集成与融合。将GNSS技术、激光扫描技术、光纤传感技术、无线传感网络技术相结合,形成多源数据融合的监测体系,能够全方位、多角度地获取桥梁结构的变形信息,提高监测的可靠性和准确性。同时,监测数据与BIM(建筑信息模型)技术的融合,可实现桥梁结构变形的可视化展示和动态模拟,为施工管理和决策提供更直观的支持。

5.3 精细化、实时化监测成为主流

随着对桥梁施工质量和安全要求的不断提高,精细

化、实时化监测将成为未来的发展主流。监测系统将能够对桥梁结构的微小变形进行精准捕捉,实现毫米级甚至微米级的监测精度。同时,通过实时数据传输和处理,能够及时发现结构的异常变形,并快速响应,采取控制措施,将变形风险降到最低。

5.4 全生命周期监测与管理

未来的铁路桥梁结构变形监测与控制将贯穿于桥梁的全生命周期,从设计、施工到运营维护阶段,实现全过程的监测与管理。通过建立全生命周期的变形数据库,对桥梁结构的变形进行长期跟踪和分析,为桥梁的维护、加固和改造提供依据,提高桥梁的使用寿命和安全性。

结语

在铁路桥梁施工过程中,结构变形监测与控制技术的研究至关重要。随着科技的进步,现代智能检测技术与传统检测技术相比,展现出了显著的优势。传统检测技术主要依赖于人工测量和简单的机械设备,如水准仪、全站仪等。这些方法虽然在一定程度上能够满足监测需求,但存在诸多不足。例如,人工测量易受人为因素影响,导致数据误差较大;同时,传统设备的操作复杂,对操作人员的技术要求较高,且监测效率低下。相比之下,现代智能检测技术则采用了先进的传感器、物联网、大数据等技术手段。通过安装在桥梁结构上的各类传感器,可以实时监测桥梁的变形情况,并将数据传输至云端进行分析处理。这种方法不仅大大提高了监测的精度和效率,还能够实现远程监控和预警,为施工过程中的安全管理提供了有力保障。此外,现代智能检测技术还具有数据可视化、智能化分析等优势。通过对监测数据的深入挖掘和分析,可以及时发现潜在的安全隐患,为施工方案的调整和优化提供科学依据。同时,智能化的预警系统能够在桥梁结构变形达到临界值时自动触发警报,有效避免事故的发生。现代智能检测技术在铁路桥梁施工过程中的结构变形监测与控制方面展现出了显著的优势。未来,随着技术的不断发展,相信这些技术将在铁路桥梁建设中发挥更加重要的作用。

铁路桥梁施工过程中的结构变形监测与控制是确保桥梁施工质量和运营安全的关键环节。本文通过对结构变形的常见类型及影响因素、监测技术、控制措施的研究,结合实际案例分析,阐述了铁路桥梁施工中结构变形监测与控制的重要性和实践方法。传统监测技术在精度和效率上存在一定局限,而现代智能化监测技术的应用为结构变形监测提供了更先进、更可靠的手段。在控制方面,应从设计、施工、运营等多个阶段采取综合措

施,通过合理设计、优化施工工艺、加强监测反馈等方式,有效控制结构变形。随着科技的不断进步,铁路桥梁结构变形监测与控制技术将朝着智能化、自动化、精细化、全生命周期管理的方向发展。在未来的铁路桥梁建设中,应不断推广和应用先进的监测与控制技术,提高桥梁施工质量,保障铁路运输的安全稳定,为我国铁路事业的发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]董伟.复杂条件上跨既有铁路桥梁施工方案研究[J].交通科技,2025,(03):57-60.
- [2]那明望,董向南,王礼武,等.天然气管线下穿施工对市域铁路桥梁的安全影响评估与建议[J].价值工程,2025,44(16):22-25.
- [3]刘伏龙.BIM技术在“铁路桥梁施工”课程教学改革中的应用研究[J].现代职业教育,2025,(14):173-176.
- [4]马健.高速铁路桥梁施工中大跨径钢箱梁拼装技术与关键工艺研究[J].中国住宅设施,2025,(04):184-186.
- [5]张原铭.应对复杂环境的铁路桥梁大体积混凝土结构施工与温控技术分析[J].建材发展导向,2025,23(08):85-87.DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2025.0335.