

Research on longitudinal stress performance and constraint system of railway continuous beam bridge

Wei Ji Li

China Railway Third Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

Railway continuous beam bridge is one of the key forms of modern transportation infrastructure. The longitudinal stress characteristics and the design of the constraint system are related to the safety and durability of the structure. This paper conducts a systematic exploration of the basic theory of longitudinal mechanical behavior of railway continuous beam bridges, finds the internal force distribution laws and instability criteria under the action of live loads, and provides improvement strategies from the three aspects of constraint system type, parameterized design, and failure mechanism. Through sensitivity analysis, a key control parameter library is created, and systematic improvement methods are given in terms of material performance, temporary constraints, and long-term monitoring, thereby shaping a technical architecture that includes the entire process of design, construction, and operation. These achievements can provide theoretical support and references in engineering practice for railway bridge engineering.

Keywords

railway continuous beam bridge; longitudinal stress characteristics; constraint system optimization; temporary constraint control; long-term performance monitoring

铁路连续梁桥纵向受力性能与约束体系研究

李卫基

中铁三局集团第三工程有限公司, 中国·山西太原 030006

摘要

铁路连续梁桥是现代交通基础设施的关键形式之一, 其纵向受力特性及其约束体系的设计关乎结构的安全性和耐久性, 本文对铁路连续梁桥纵向力学行为的基础理论展开系统探究, 找出活载作用下的内力分布规律以及失稳判据, 从约束体系类型, 参数化设计, 失效机理这三个方面给出改良策略, 通过敏感性分析创建起关键控制参数库, 就材料性能, 临时约束, 长久监测这些方面给出系统性改善方法, 从而塑造出包含设计, 施工, 运营全过程的技术架构, 这些成果能够给铁路桥梁工程给予理论支撑和工程实践方面的参考。

关键词

铁路连续梁桥; 纵向受力特性; 约束体系优化; 临时约束控制; 长期性能监测

1 引言

铁路连续梁桥属于现代交通基础设施的主要形式, 其纵向受力特性与约束体系设计影响结构的安全性和持久性, 本文深入探究铁路连续梁桥纵向力学行为的基础理论, 详细剖析活载作用下的内力分布情况以及失稳判据, 就约束体系的种类, 参数化设计以及失效机制这三个方面展开改进策略论述, 并且借助敏感性分析创建起关键控制参数库, 而且还在材料特性, 临时约束方式以及长时间监测等多个层面给出了改良手段, 创建起涵盖设计, 建造, 运作各个方面的技术架构, 给铁路桥梁工程给予理论与实际的参考。

【作者简介】李卫基(1986-), 男, 中国山西忻州人, 本科, 高级工程师, 从事铁路连续梁研究。

2 铁路连续梁桥纵向受力基础理论研究

2.1 纵向受力体系的基本构成

在我国铁路中广泛应用的预应力混凝土连续梁, 一般采用固定约束体系, 即设置一个纵向固定支座, 其余均为纵向活动支座。^[1] 铁路连续梁桥纵向受力体系由主梁结构、桥墩支座及连接构造构成, 主梁作为主要承力构件, 依靠纵向预应力筋、普通钢筋及混凝土三者协同来传递荷载, 桥墩刚性支承与柔性支承的协同配置影响结构刚度分布, 典型的有盆式支座与球型钢支座的组合应用, 约束体系通过设置水平约束装置, 在墩顶形成多点支撑系统, 以限制纵向位移。力学传递路径为“桥面荷载→纵梁→横梁→支承结构”, 温度应力及混凝土收缩徐变次内力可通过滑动支座释放, 但释放量不能超过规范限值, 伸缩装置的布置间距和伸缩量计算要联系气候分区及运营条件来动态改变, 预应力锚固体系设计

直接关联纵向抗裂性能,张拉顺序和超张拉控制是保证有效预应力的关键环节。现代桥梁参数化建模技术可以准确分析多荷载工况下内力重分布,有限元仿真显示,支座刚度改变对主梁弯矩分布有非线性影响,建议采用考虑温度场的三维模型综合评判,抗震设计时需加设铅芯橡胶支座,其非线性滞回特性可耗散能量,但要校核支座位移延性系数。

2.2 活载作用下纵向力学特性研究

重载列车通过时纵向冲击系数与速度平方成正比,规范规定取值应考虑轴重动态修正,牵引力突变工况下梁端约束反力瞬时峰值可达到稳态值的2-3倍,易产生局部应力集中,移动活载引起的纵向振动存在频散现象,车桥耦合振动分析显示列车长度增大时临界速度大幅下降。温度梯度效应造成纵向弯矩梯度变化,悬臂施工期间要执行临时固结控制纵向变形,混凝土弹性模量时效特性引发长期徐变影响很大,预应力损失要采用龄期调整换算系数法,支座脱空常常与纵向偏心受压并发,要设置防落梁装置并核算其抗剪承载能力。轮轨作用力通过轮对横向偏移转化为纵向分力,实测数据表明,曲线桥段附加纵向力可达静活载的15%-20%,临时荷载作用(施工设备荷载)时,需要建立全过程跟踪监测系统,采用应变增量法识别关键受力截面。多场耦合作用时,建立温度-湿度-活载联合作用疲劳寿命评估模型。纵向力学特性研究还要注意列车编组改变给纵向力带来的影响,不同车型混编的时候,制动力和牵引力分布不均就会加重梁体疲劳损伤,依靠健康监测数据,可以创建纵向力分布预估模型,改良重载列车编组规划,对于大跨度连续梁桥来说,可以用阻尼器和限位装置结合起来控制纵向位移,而且要考虑结构几何非线性效果,形成细致的有限元模型,用动力时程分析办法做长期服役安全评价,改进准确度。

2.3 静力平衡与失稳判别准则

静力平衡条件需要满足力系叠加和变形协调条件,采用力法或者位移法建立基本方程,支承条件对临界荷载起着决定性的作用,固定支座使得结构周期显著减小,线性屈曲分析表明长细比大于25时需增加横向加劲肋,非线性全过程分析表明材料弹塑性阶段临界荷载将会降低40%以上。弹塑性稳定理论中,等效弯矩系数要按照实测应力分布来确定,失稳形态的判别最好用能量准则,比较屈曲前后总势能的变化,三维有限元非线性分析显示,支座沉降差别会改变结构抗弯刚度分布,要校核局部稳定性,大跨度桥梁要考虑初始几何缺陷,用放大系数法修正理论计算值。

动态失稳判别引入阻尼比修正系数,实测数据表明,环境激励下阻尼比一般在0.01-0.03之间,稳定性储备系数是临界荷载与设计荷载之比,现行规范要求不低于1.5,智能化监测系统可以实时追踪关键截面应力状态,利用机器学习算法构建失稳预警指标体系,抗震设计时要做滞回耗能分析和位移延性验算,保证大震不倒。

3 约束体系设计与优化策略

3.1 约束体系的类型与功能分析

通过研究约束体系的力学性能,展开对梁桥合理约束体系设计的研究,^[1]固定支座提供三维约束,适合连续梁固定端,要校核基底应力分布,活动支座依照位移方向分成单向,双向和多向支座,滑移量要符合地震作用下的位移需求,抗震支座采用高阻尼橡胶,滞回曲线性能影响地震响应,球型支座依靠转动中心偏移应对大转角变形,合适温度变形较大的区段。临时约束体系在施工阶段发挥重要作用,常见的形式有型钢支撑、锚固钢筋、可调式千斤顶系统。预应力约束要校核锚固区局部承压强度,张拉过程应分级加载以控制应力均匀性,刚性约束和柔性约束协同布置,使体系刚度可调,适应施工和运营的不同阶段,支座更换维修时,临时固结方案应保证结构整体性和施工安全。智能支座集成传感器和执行器,做到位移的实时监测并加以主动控制,物联网技术赋予它自诊断的能力,出现异常状况就会启动预警机制,磁流变支座依靠外加磁场来调整阻尼特性,以适应不同的工况需求。

3.2 参数化设计与敏感性分析

约束刚度对结构频率的影响呈非线性,灵敏度分析表明支座刚度变化10%可引起基频变化5%-8%,遗传算法优化结果表明支墩高度与纵桥向间距的最优比值为1:1.5。参数化模型中温度梯度系数对纵向应力分布影响较大,建议采用季节性分区修正。从敏感性排序来看,约束体系几何参数影响的权重是40%,材料参数权重是30%,外部荷载的权重也是30%,通过响应面法得到的性能预测模型能帮助设计参数寻优的速度加快60%,用拓扑优化技术对支座布局方案进行操作能将材料用量节省15%,刚度分布也更加均匀一些,综合考虑经济效益和使用功能来实现多目标优化,利用Pareto前沿的解集来进行最终的选择。机器学习算法在参数识别上存在优势,随机森林模型对于位移预测准确度可以达到95%以上,模型更新机制能够完成实时参数校准,从而降低设计偏差的风险。

3.3 约束失效机理与风险防控

长期监测显示,支座磨损使摩擦系数增大20%-30%,建议设立定期保养周期。锚固螺栓疲劳断裂大多发生在应力集中处,建议采用变截面螺纹或者增加抗震螺母。混凝土碳化深度超出保护层厚度的时候,约束节点容易出现胀裂裂缝,要提升耐久性设计,疲劳试验表明,球型钢支座在 10^6 次循环之后,刚度衰减率不大于5%。振动台试验表明,支座橡胶层剪切失效存在突发性特点,应设置冗余约束系统,防落梁装置失效大多由预埋钢板脱焊造成,激光熔覆焊接工艺被建议用来改进连接的可靠性,长期监测系统检测到支座出现异常位移时,应急处理方案要在30分钟之内开始,临时支撑架设和荷载转移措施也要包含在其中。通过风险矩

阵分析,可以得出约束体系的风险等级与桥梁的重要性系数是正相关的,建立健康监测指标体系包括位移速率、应力幅值等 7 个重要的参数,大数据平台综合多种信息,可以对失效的概率进行动态的评价,预防性维护策略利用 RCM 方法划分出不同的重要度等级,关键部件的更换周期由原来的 25 年缩短到 15 年,引入韧性设计理念之后,约束体系在极端荷载下的失效影响范围降低了 40%。

4 纵向力学性能提升方法

4.1 材料性能与构造优化

工程材料的革新是推动土木工程结构发展的重要驱动力,工程结构的发展又将促进工程材料不断突破。超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是一种具备超高强度、高韧、高耐久、高抗爆等优异性能的新型超级混凝土,能较好地适应下一代桥梁工程大跨化、轻型化、高性能化的发展趋势。^[1]UHPC 材料用在桥面板上,纵向刚度提高 60%,疲劳寿命达到 200 万次,FRP 筋代替部分钢筋,自重降低 15%,但是弹性模量低,要搭配型钢一起用,高性能混凝土配合比改进之后,早期收缩率降到 0.03% 以内,钢管混凝土组合结构在节点区使用,压弯承载力增大 80%,焊缝数量减少。构造优化方面,空腹式横隔板代替实腹式,减轻重量 20%,并且满足通风需求,预应力管道用塑料波纹管,摩擦系数降到 0.18 以下,节点区用蜂窝式配筋,让应力传递路径变得更为合理,设置体外预应力束的时候,转向块的倾角误差要控制在 2° 以内,这样才能保证有效预应力得到发挥。耐久性设计时,加入纳米材料让混凝土抗渗等级做到 P20,表面涂层防护寿命达到 15 年,维持时间由 3 年变成 5 年,自感知混凝土装配光纤传感器,随时观测内部应变状况,智能张拉体系让有效预应力偏差控制在正负百分之五以内,保障设计意图准确达成,3D 打印技术用于制造异形节点,材料利用率提升百分之三十。

4.2 施工中临时约束的控制措施

顶推施工时,临时墩间距取 1.5 倍主梁跨度,纵向约束采用可调式钢绞线体系,悬臂施工时,临时固结力按施工荷载的 1.3 倍设计,并设应力释放阀,支架现浇法预压荷载按 120% 设计值施加消除非弹性变形,转体施工时,要校核转动过程中的支座反力变化,保证同步性误差在 5mm 以内。施工监测数据表明,千斤顶偏心造成支座反力偏差达 25%,提出位移同步控制算法,合龙段施工时,临时劲性骨架刚度要符合收缩徐变补偿需求,高空吊装时,设置防风约束装置,风速大于 8m/s 时停止施工,用 BIM 技术做施工模

拟,预先识别出 5 处碰撞危险,混凝土养护用智能温控系统,把温度梯度控制在 15°C /m 以内。

4.3 长期性能监测与维护体系

传感器布置按照关键截面全覆盖原则,布置密度依照结构重要程度来定,光纤光栅传感网络做到应变场全分布测量,数据精确度达 $\mu\epsilon$ 级,北斗定位系统用来监测支座位移,精确度达亚毫米级,创建起多源数据融合平台,消除不同传感器数据之间的冗余和冲突,利用深度学习算法自动识别异常模式,准确率超越 90% 以上。维护决策支持系统兼顾结构状态,环境因素以及运营需求,创建健康指数评定模型,分层拟定维护策略,预防性维修周期依照监测数据动态改变,削减 30% 的维护成本,研制自修护材料用于混凝土保护层,裂缝宽度超越 200 μm 就自动激起修护反应,无人机巡检系统融合图像识别技术,取代人工检测 60% 的工作量。桥梁在长期服役期间受到环境侵蚀、材料劣化、地基沉降、日常交通荷载等作用,导致其结构性能逐渐退化,因此,如何维护和管理数量庞大的桥梁设施成为迫切需要解决的难题。^[4]长期性能退化模型包含材料老化、疲劳累积和环境影响这三要素,预测桥梁剩余寿命的时候,把交通量增长态势也考虑进去,大概每隔 10 年就要做一次复核评判,开发数字孪生模型做到即时同步更新状态消息,给养护决策给予动态支撑,创建全生命周期成本分析架构,达成效益最大化和风险最小化。

5 结语

本文形成了关于铁路连续梁桥纵向力学性能的研究体系,从基础理论到约束设计再到性能改善,构成了系统的解决方案,约束体系的刚度适配以及材料更新能够有效提升承载能力,施工期监测和智能运维技术给安全性给予保障,以后的研究重点会放在新型智能材料,多灾害耦合影响以及数字孪生技术全面融合上,促使铁路桥梁工程朝着智慧化方向不断发展。

参考文献

- [1] 王德志,严爱国,文望青,等.铁路大跨连续梁桥弹性约束体系力学性能研究[J].铁道工程学报,2023,40(06):46-50.
- [2] 吴刚.地震作用下曲线梁桥合理约束体系研究[D].东南大学,2018.
- [3] 崔冰,王景全,刘加平.UHPC桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J].中国公路学报,2023,36(09):1-19.
- [4] 夏琪.基于冲击振动的桥梁快速测试方法与理论创新[D].东南大学,2017.