

山区高墩大跨连续刚构桥长期挠度影响因素与控制对策

燕可宇

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 300392

摘 要: 山区高墩大跨连续刚构桥受地形条件制约, 结构服役过程中长期挠度病害问题突出, 是工程领域重点关注的研究方向。本文围绕山区高墩大跨连续刚构桥展开研究, 阐述其墩梁固结、刚度特殊、环境敏感度高的结构特点。分析混凝土收缩徐变、预应力损失、温度变化、基础沉降四大核心因素对桥梁长期挠度的影响机理, 各类因素可单独或耦合加剧主梁下挠病害。针对各影响因素, 从材料优化、施工管控、监测防护等方面提出对应的长期挠度专项控制对策, 保障桥梁运营稳定。

关键词: 山区高墩大跨; 连续刚构桥; 长期挠度; 影响因素; 控制对策

引言

山区高墩大跨连续刚构桥是山区公路建设的重要桥型, 适配复杂地形与大跨度跨越需求, 应用范围广泛。但该桥型结构超静定特性突出, 长期运营中易出现主梁持续下挠的挠度病害, 影响桥梁线形、结构稳定性及运营安全。本文结合该桥型的结构特点, 系统分析混凝土收缩徐变、预应力损失、温度变化、基础沉降四类核心因素对桥梁长期挠度的影响机制, 针对性提出全方位、可落地的防控对策, 为同类桥梁的病害管控与长期安全运营提供技术参考。

1 山区高墩大跨连续刚构桥结构特点

山区高墩大跨连续刚构桥是适配山区复杂地形的
主流桥型, 整体结构体系以墩梁固结为核心, 取消了传统桥梁的支座构造, 使桥墩与主梁形成整体式超静定结构。该桥梁桥墩普遍采用双薄壁墩形式, 相较于实心墩, 双薄壁墩整体柔度更大, 竖向与水平向变形适应能力更强, 可有效适配山区桥梁高墩、大悬臂的受力特点, 同时自身结构阻尼特性良好, 能够有效缓冲地震荷载作用, 具备稳定的抗震能力。桥梁主梁统一采用箱形截面结构, 截面闭合性强, 抗扭刚度和整体抗弯刚度较高, 受力分布均匀, 可满足大跨径桥梁的承重与跨越需求, 能够适应山区深沟、峡谷等大跨度地形跨越场景。墩梁固结的超静定结构形式, 让桥梁整体受力整体性更强, 结构刚度分布均匀, 但也使桥梁对外部环境及基础变形因素敏感度较高。温度升降变化会使主梁、桥墩产生伸缩变形, 进而在结构内部产生附加内力, 影响桥梁整体受力状态。山区地质条件复杂, 桥梁基础易出现

不均匀沉降、位移等情况, 会直接改变结构原有受力体系, 引发构件内力重分布。此外, 该桥型结构受力传递路径清晰, 施工工序相对成熟, 适配山区高空、大跨度的施工环境, 是山区高墩大跨桥梁建设中适用性较强的结构形式。

2 山区高墩大跨连续刚构桥长期挠度影响因素分析

2.1 混凝土收缩徐变

(1) 混凝土收缩徐变主要分为收缩和徐变两种变形形式, 收缩包含干燥收缩和自收缩两种类型, 干燥收缩是混凝土内部水分蒸发导致的体积收缩现象, 自收缩是水泥水化反应消耗混凝土内部水分、降低内部湿度所产生的体积变形。徐变是混凝土在持续荷载作用下, 应变随时间不断增长的变形现象, 主要由水泥石黏性流动、骨料位置变动、结构内部微裂缝发展等多种因素共同作用形成^[1]。(2) 混凝土收缩徐变受多种参数制约, 混凝土强度等级、骨料弹性模量与收缩徐变程度呈负相关, 数值越高收缩徐变越小; 早强水泥会提升混凝土收缩徐变程度, 水灰比越大, 混凝土收缩徐变表现越显著; 构件加载龄期越早, 收缩徐变产生的结构效应越明显; 外界环境低湿度、高温度的工况, 会进一步加重混凝土的收缩徐变变形。(3) 对于山区高墩大跨连续刚构桥, 混凝土收缩徐变会使主梁产生附加变形, 导致桥梁跨中出现持续性下挠问题。该桥梁结构具备大跨度、高墩体的特征, 会放大收缩徐变的作用效果, 同时收缩徐变具备长期持续作用的特性, 变形量会随时间逐步累积, 是造成此类桥梁出现长期挠度病害的主要核心因素之一。

2.2 预应力损失

一是预应力损失包含五类主要损失,分别为锚具变形与钢筋回缩损失、管道摩擦损失、温差损失、预应力筋松弛损失、混凝土收缩徐变损失。锚具变形和预应力筋回缩会造成预应力数值下降,预应力筋与管道管壁产生的摩擦会减小结构有效张拉力,张拉施工阶段的温度差会产生预应力损耗,预应力筋长期承受荷载会产生应力松弛现象,混凝土收缩徐变产生的结构变形会降低预应力筋工作应力。二是预应力损失受各类关键因素影响,预应力筋材质直接决定松弛损失的大小,张拉速度、张拉顺序等施工工艺不合理会增大整体预应力损失,管道摩擦系数越大,管道摩擦损失越显著,锚具性能不足会加重变形与回缩造成的预应力损失,混凝土强度等级越高,收缩徐变引发的预应力损失越小。三是预应力损失对桥梁长期挠度存在直接影响,预应力损失会降低主梁有效预应力,使桥梁结构发生内力重分布,主梁弯矩增大,进而产生主梁下挠现象。预应力损失存在时间累积特性,桥梁运营年限越久,预应力损失总量越高,主梁长期挠度变形持续增大,会进一步加重桥梁下挠病害。

2.3 温度变化

第一,桥梁所处环境温度变化主要分为季节性温度变化和日照温度变化两类。季节性温度变化由地球公转产生,属于年度温度波动,变化幅度大、持续周期长;日照温度变化由太阳辐射作用产生,属于日内温度波动,变化幅度小、作用时间短、温度升降速度快^[2]。第二,温度变化会直接引发桥梁结构热胀冷缩效应,对连续刚构桥结构受力和变形产生直接作用。温度变化会在主梁与墩身形成温度梯度,使结构内部产生温度应力。整体季节温差会造成桥梁整体伸缩变形,日照温差会造成主梁温度分布不均,引发主梁翘曲变形,各类温度变形均会直接改变主梁挠度状态。第三,温度变化是影响桥梁长期挠度的重要长期性因素。桥梁长期运营过程中,反复的温度升降会使结构产生疲劳损伤,引发混凝土开裂、预应力损失加剧等问题,降低桥梁整体刚度与承载能力,造成长期挠度持续增大。同时温度变化会与混凝土收缩徐变、预应力损失等因素形成耦合作用,相互叠加影响,进一步加重山区高墩大跨连续刚构桥的长期下挠病害。

2.4 基础沉降

(1) 山区桥梁地形与地质条件复杂,基础沉降主要由地质、地基处理及施工质量三类问题引发。不良地质中的软土、膨胀土等特殊土层,易造成桥梁基础不均匀沉降;地基施工压实度不足、排水措施不到位

等处理不当问题,会诱发基础沉降变形;桩基施工存在偏差、混凝土浇筑不密实等施工质量缺陷,也会直接导致桥梁基础出现沉降病害。(2) 基础沉降会对桥梁整体结构造成直接影响,墩身发生不均匀沉降后,桥梁结构会产生附加内力。连续刚构桥在基础沉降作用下会出现主梁内力重分布现象,主梁弯矩数值增大,进而出现主梁下挠问题,同时桥梁整体线形会发生改变,直接降低道路行车舒适性,影响桥梁运营安全。(3) 基础沉降属于持续性变形过程,桥梁投入运营后沉降会持续发展,致使结构长期挠度不断增加。山区高墩大跨连续刚构桥墩身高度大、主跨跨度大的结构特性,会放大基础沉降的挠度影响。同时基础沉降会与混凝土收缩徐变、预应力损失、温度变化等因素耦合作用,互相叠加影响,大幅提升桥梁长期挠度的变化幅度,让桥梁下挠问题更复杂、更突出。

3 山区高墩大跨连续刚构桥长期挠度控制对策

3.1 混凝土收缩徐变控制对策

一是优化混凝土配合比,依托原材料调整与组分改良降低收缩徐变变形,施工中可优选适配水泥品种,严格控制水灰比,适量掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料,优化混凝土内部微观结构,降低水泥孔隙率,同时搭配使用减水剂,进一步减小水灰比,提升混凝土整体密实度与弹性模量,增强结构强度,从材料层面抑制混凝土收缩徐变的产生与发展^[3]。二是强化混凝土养护作业,将规范养护作为管控收缩徐变的关键手段,混凝土浇筑施工结束后,需第一时间开展覆盖保湿养护作业,持续保持构件表面湿润,杜绝表面水分快速蒸发,常规工况下养护时长不得少于14天,具体时长结合混凝土强度等级与现场环境调整。针对大体积混凝土结构,需额外增设内部降温举措,精准把控混凝土内外温差,削弱温度应力对混凝土收缩徐变的负面影响。三是科学规划混凝土施工时间,规避高温、干燥、大风等恶劣施工环境,高温时段施工需搭设遮阳设施、喷洒冷水降温,控制混凝土入模温度;干燥环境施工需增加养护补水频次,保障养护效果;大风天气施工需设置防风设施,减少混凝土表面水分蒸发,稳定混凝土成型质量,有效控制收缩徐变变形。

3.2 预应力损失控制对策

(1) 优选预应力筋与锚具材料,材料性能是影响预应力损失的基础因素,施工中需选用松弛率低、性能达标的预应力筋以及质量稳定、合格可靠的锚具。工程中优先使用低松弛预应力钢绞线,可有效降低钢材自身松弛产生的预应力损失,同时合规优质的锚具能够有效减

小锚具形变、预应力筋回缩带来的损失,从材料源头控制预应力损耗问题。(2)优化整体张拉施工工艺,张拉参数与施工流程直接决定预应力施加效果,施工阶段需科学确定张拉顺序、张拉速度、张拉控制应力等核心参数,全程严格遵循设计标准与施工规范作业。采用两端对称的张拉方式,可有效降低预应力筋与管道之间的摩擦损失,合理管控张拉速度,规避张拉速率过快引发的预应力筋大幅回缩问题,稳定张拉施工质量,减少工艺不当造成的预应力损失。(3)强化预应力管道施工质量管控,管道安装质量直接影响摩擦损耗大小,施工中需保证管道安装位置精准、内部通畅。通过定位钢筋固定管道,杜绝管道偏移、走位问题,管道接缝位置做好密封处理,避免混凝土漏浆造成管道堵塞,混凝土浇筑施工前,对所有预应力管道开展通水检查,排查管道堵塞、错位等问题,降低管道摩擦系数,减少管道摩擦引发的预应力损失。

3.3 温度变化控制对策

一是合理设置温度伸缩缝,以此释放桥梁结构内部的温度应力,削弱温度变化对桥梁整体结构的破坏作用,伸缩缝宽度需结合桥梁整体长度、区域温度变化幅度等核心条件确定,常规取值范围为 50-100mm,同时需在伸缩缝位置配套安装专用伸缩装置,保障桥梁结构在温度升降过程中可自由伸缩,避免结构形变受限产生病害^[4]。二是落实主梁温度梯度控制措施,缓解日照温差引发的主梁挠度变化问题,通过在主梁表层铺设隔热层,有效阻隔太阳辐射带来的热量输入,降低外部高温对主梁结构的直接影响,同时主梁内部布设通风管道,加速结构内部热量流通与散发,缩小主梁内外温差,减小温度梯度带来的结构受力偏差。三是强化桥梁结构温度监测工作,在主梁、墩身等桥梁关键受力、易受温度影响的部位布设温度传感器,实现温度数据的实时动态监测,精准掌握桥梁结构温度变化规律,依托实时监测数据,针对性调整桥梁施工工艺和后期养护方案,从设计、施工、养护全阶段规避温度变化带来的结构隐患,保障桥梁结构稳定性与使用安全性。

3.4 基础沉降控制对策

(1)强化地质勘察与地基处理。桥梁正式设计前,需全面开展桥址区域地质勘察工作,精准摸排掌握场区土层分布、土质特性、承载力等各项地质条件,为后

续地基处理方案制定提供真实、可靠的勘察依据。结合现场实际地质情况,针对性选用换填法、强夯法、桩基础等常规地基处理工艺,有效提升桥址地基整体承载力、结构稳定性,从源头抑制桥梁基础不均匀沉降问题。(2)严控基础施工整体质量。桥梁基础施工阶段,严格落实各项施工规范与设计标准,精准把控混凝土浇筑、桩基施工等关键工序的施工精度与施工质量,保障各施工环节符合设计要求。全程落实施工过程监测与质量检测工作,动态排查施工隐患,及时整改施工缺陷。针对桩基施工重点环节,需完成桩身完整性专项检测,全面保障桩基施工质量达标。(3)落实常态化基础沉降监测。桥梁投入运营后,持续开展基础沉降监测工作,动态掌握桥梁基础沉降变化情况^[5]。在桥墩、桥台等桥梁核心受力部位布设专用沉降观测点,定期开展沉降观测作业。依托长期观测数据,研判基础沉降发展趋势,针对异常沉降情况及时采取处置措施,保障桥梁整体结构长期安全稳定。

结语

综上所述,山区高墩大跨连续刚构桥结构特性特殊,长期挠度受混凝土收缩徐变、预应力损失、温度变化及基础沉降多重因素影响,各类因素可相互耦合叠加,加剧桥梁下挠病害,影响结构稳定性与运营安全。针对性从混凝土施工、预应力施工、温度管控及地基基础治理等方面落实防控措施,可有效抑制桥梁长期挠度发展。相关控制方法可为同类山区桥梁施工建设与运维管控提供参考,保障桥梁长期服役性能。

参考文献

- [1] 赵新宏,费维水,宋宁,等.大跨度连续刚构桥长期下挠影响参数敏感性分析[J].科技通报,2023,39(9):83-89.
- [2] 王军文,刘彦伟,张钊,等.高墩大跨连续刚构桥地震损伤及控制措施分析[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(4):720-726.
- [3] 黄宇,刘冠宇,易建波,等.多跨高墩组合连续刚构桥静力性能及稳定性研究[J].中外公路,2025,45(1):166-173.
- [4] 路俊.高墩大跨连续刚构桥施工监控参数敏感性分析[J].工程建设与设计,2025,(3):86-88.
- [5] 史隽健.高墩大跨连续刚构桥静力性能与稳定性分析[J].福建交通科技,2025,(10):127-133.