

# 高速公路桥梁钢结构疲劳损伤分析与加固技术

郑朝航

(广西路建集团宏嘉钢结构工程有限公司, 广西 崇左 532112)

**摘要** 钢箱梁结构在承受持续不断的车辆荷载作用之下, 会导致桥梁结构中出现疲劳裂纹、应力集中等问题, 进而降低了桥梁承载能力。传统结构监测方法虽然可以发现已经形成的裂纹, 但对于裂纹的演化过程和加固方案的选择则存在一定的局限性。因此, 本文将着重探讨钢箱梁疲劳损伤分析与粘贴钢板加固技术。通过结合现代结构监测技术和工程力学原理, 对桥梁结构中的疲劳损伤进行全面分析, 同时运用粘贴钢板加固技术进行加固, 以期为促进钢箱梁稳定运行提供借鉴。

**关键词** 公路桥梁; 钢结构; 疲劳损伤; 有限元; 加固技术

**中图分类号**: U445

**文献标志码**: A

**文章编号**: 2097-3365(2024)06-0007-03

在高速公路桥梁中, 钢箱梁桥是一种常见的桥梁结构。对于钢箱梁桥而言, 由于长期受到车辆荷载和自然环境的作用, 钢箱梁桥往往容易出现疲劳损伤, 严重影响桥梁使用寿命。因此, 针对钢箱梁桥的疲劳损伤分析和加固技术研究显得尤为重要。

## 1 钢箱梁疲劳损伤原因

### 1.1 交通荷载作用

第一, 运输荷载的频繁作用, 造成了受力集中的桥梁结构周期性变形。桥体结构随着车辆的行驶, 承受着车辆自身重量的负荷, 承受着车辆的速度, 承受着车流的负荷。这些荷载的周期性施加, 在结构中造成微小的裂纹和变形, 最终导致疲劳损伤的发生, 从而使结构产生频繁的应力变化。特别是在车辆密集通过的区域, 如高速公路等, 这种周期性荷载效应的影响会加剧, 使结构的疲劳过程加快。第二, 交通荷载的作用也受到车辆类型的影响。不同的车辆对桥梁结构施加的荷载大小和频率差异很大。比如货车与客车的荷载大小不同, 行驶速度也不一样, 这些都会对结构产生不同程度的影响。尤其是高速公路上的重载车辆的频繁通行, 极易造成结构的疲劳损伤所施加的荷载更大。因此, 大型货车等重载车辆的频繁通行, 需要在结构设计上采取相应的对策来减轻结构的疲劳损伤<sup>[1]</sup>。第三, 交通荷载作用还受到桥梁结构自身特点和设计参数的影响, 如桥梁的跨度有支座类型横截面形状等都会影响荷载在结构中的传递和分布方式, 从而影响结构的受力状况和疲劳损伤的发展, 通过合理的结构设计和参数选择可减缓荷载作用对结构的影响,

降低疲劳损伤的风险。

### 1.2 自然环境因素影响

钢箱梁的疲劳损伤除了受包括气候变化、天气状况、环境湿度等自然环境因素的影响外, 还受到交通荷载的影响。第一, 由于温度的变化会造成结构的热胀冷缩, 使结构内部应力增大, 从而促使疲劳裂纹的形成和扩大, 气候变化引起的温度波动是一个重要因素。同时, 结构受到的热应力会更加显著, 加快了疲劳损伤的进程, 特别是在极端气候条件下, 如高温和低温交替出现的地区。第二, 造成疲劳伤害的重要因素之一也是湿度和腐蚀性。湿度会加速钢结构的腐蚀, 降低结构材料的强度和韧性, 从而使结构产生疲劳裂纹的可能性增大, 结构更易受湿度和腐蚀的影响, 特别是在沿海地区或湿度较大的地区需要加强防护措施。

### 1.3 设计和施工影响

疲劳损伤的重要原因之一就是钢箱梁的设计和施工质量直接影响它的抗疲劳性。第一, 结构设计不合理造成局部应力集中的可能性增大, 造成结构受力不均。如设计时忽视交通荷载的特性或考虑不周, 造成实际使用中桥梁所承受的荷载超出设计承受范围, 从而使结构的疲劳性破坏程度加重。第二, 若选择品质不佳或不达标的材质, 则造成结构抗疲劳性能降低, 加速疲劳损伤的发生与扩大, 材质的选择也是设计中的关键因素。第三, 建设期间的缺陷或在质量管控不到位的情况下会影响结构疲劳寿命。施工中存在焊接性差的问题, 连接不够牢固或者预应力的张力不均等都有可能造成结构的脆化。在这种情况下, 会加剧疲

劳裂纹的产生和蔓延风险。除此之外,建设过程中技能不高等因素也可能造成结构出现隐患,从而加速疲劳损伤的产生<sup>[2]</sup>。

## 2 钢箱梁疲劳损伤有限元分析方法

### 2.1 建立模型

在钢箱梁疲劳损伤分析过程中,有限元方法在建立模型时是通过将桥梁结构细分为有限数量的小单元来模拟其复杂的力学行为。第一,使用计算机辅助设计软件根据实际桥梁的几何形状和材料参数建立初始模型。这个模型需要包括桥梁的主体结构、支座、连续梁、悬臂梁等关键部位,并需要考虑到桥梁在实际运行中所受到的各种交通荷载,如车辆行驶时的动态荷载、静载和变载等。第二,桥梁结构会被细分为数以千计的小单元,如四边形单元或六面体单元,以便进行数值计算。在这个过程中,需要注意网格划分的密度,特别是在桥梁的关键部位,如支座和连接节点处,需要更密集的网格来准确捕捉局部应力的变化。

### 2.2 网格划分

钢箱梁疲劳损伤分析阶段,有限元方法在网格划分时是根据桥梁结构的复杂性和分析精度的要求,将结构细分为合适数量的小单元,以便准确模拟结构的力学行为。首先,根据桥梁的几何形状和材料参数确定初始的有限元模型。然后,桥梁结构会被分割成数以千计的小单元,如四边形单元或六面体单元,以便进行数值计算。在进行网格划分时,需要考虑到结构的关键部位和受力情况,通常在这些位置采用更密集的网格,以捕捉局部应力的变化。此外,网格划分的密度还受到计算资源和时间的限制,需要在保证分析精度的前提下尽量减少计算成本<sup>[3]</sup>。

### 2.3 施加荷载

对钢箱梁疲劳损伤进行分析时,根据实际情况选择适当的荷载类型,例如:静载有动载变载分析。由于动态车辆荷载在高速公路桥梁中最为普遍,所以模拟过程中一般考虑车辆通过时的动态效应。同时,确定荷载的大小作用位置和作用方向,一般结合实际情况和设计标准加以确定。而后,在有限元模型中确定荷载作用点的方向和大小,并根据实际情况对荷载的变化规律加以考虑,如车辆通过速度的改变等。施加荷载后,要进行数值计算,用有限元分析来求解结构的响应,分析应力应变变形等参数内容。最后,施加荷载阶段根据计算结果对结构的安全性和疲劳性进行分

析,对引起疲劳损伤的问题提出相应的改进方案。

### 2.4 求解应力场

在求解应力场时,有限元方法先建立几何形状、材料性质、桥梁结构边界条件等在内的精确的有限元模型。而后,有限元软件在施加适当的荷载后,利用模型的几何性质和物理属性进行计算,同时也利用施加的荷载信息进行计算。有限元软件在计算过程中,将结构内部各点的应力分布,通过数值方法根据结构的离散化模型和材料本构关系求解。这一过程通常涉及考虑材料的弹性、塑性或损伤等非线性作用,以求解结构的刚度矩阵。考虑到高速公路桥梁的特性,动态载重对结构的影响通常是需要考虑到的,所以载重的变化和传递规律也是需要在求解应力场时考虑到的。

### 2.5 疲劳分析

钢结构在长时间运输荷载作用下,疲劳性能的评估和寿命的评估是疲劳分析的一项重点工作。疲劳分析要获取包括几何形状、材料力学性质、运输荷载频率大小等桥梁结构的详细资料。再根据实际使用条件和设计标准,包括对车辆类型、车速、密度等因素的考虑,以及振动特性和桥体结构的频响等因素,确定适当的载重过程。然后,再结合材料的疲劳本构关系和损伤累积理论,考虑载荷过程对结构的动态影响,并对结构在不同位置和部件上的疲劳寿命进行预测,用有限元方法建立结构的疲劳分析模型。在做疲劳性分析时考虑结构中可能出现的疲劳热点和应力集中区域,负荷频率和幅度对疲劳寿命的影响。

## 3 高速公路桥梁钢结构加固技术

### 3.1 工程概况

某钢箱梁桥梁建设长度700 m,由于该区域经济与社会发展速度加快,尤其是通行的重载车辆逐步增多,对桥梁产生严重的碾压和损坏影响,导致桥梁结构病害问题严重,且通行效率无法满足需求。该桥梁项目曾于几年前进行加宽设计,加宽部位与原桥梁结构保持协调性。新建设桥梁和原桥梁一致,并且两侧的人行道改建为中央分隔带。经过多年运营发现,加宽部位的承载力无法满足要求,车辆持续碾压下表面风化、碳化、剥落、钢筋锈蚀等问题较为严重。支撑结构体系开裂问题严重,也出现了不同程度的裂缝缺陷。

由于该桥梁是当地重要的通行基础设施,是省市重点建设项目,交通流量比较大。且该桥梁项目修复的环节如果采用封闭交通的方式,对整个道路交通的

通行带来一定的危害。因此,施工单位决定采用不中断交通或者尽量缩短中断交通时间的方式进行原桥梁结构的加固,使其结构荷载等级从汽车-15级提升至公路-I级。组织相关专家进入现场全面论证分析,最终选择使用粘贴钢板法进行桥梁的加固处理。

## 3.2 加固施工工艺

### 3.2.1 施工准备及粘贴面处理

由于原桥梁结构出现了露筋、结构承载力下降病害,钢箱梁结构承载力无法达到要求。因此,在加固作业前准备工作阶段要先将松动的保护层清理掉,保证表面没有锈蚀的部分,再应用合格的材料修复处理,使其达到加固的效果。该项目粘贴加固前要对现场存在裂缝的问题全面检查,使用钉锤将裂缝两侧的结构物清理掉,并在该位置制作成为宽深均为 4 cm 的 V 型槽,使用空压机、钢刷辅助完成现场的清理作业。上述清理工作结束后使用丙酮溶液通过棉布擦拭 V 型槽,表面干燥结束后再使用改性砂浆填充 V 型槽,使结构性能恢复到最佳状态。粘贴钢板加固作业前,将混凝土结构表层的粉饰层凿除掉,并保证内部没有油垢以及污染物,使用角磨机将表面 1~2 mm 厚度结构层磨除,再使用找平胶修补处理。然后应用空压机将该位置的浮尘吹净,使用丙酮作为擦拭溶剂,将粘贴表面擦拭干净,干燥后再进行现场的加固作业。角磨机清理的环节加固钢板表面没有任何锈蚀问题,且表面粗糙度达到要求,打磨到金属光泽后使用丙酮擦拭干净,再将钢板粘贴到桥梁结构表面<sup>[4]</sup>。

### 3.2.2 加压固定系统

本桥梁加固的环节采用加压固定措施,使用千斤顶、垫板、顶杆等结构部件组成,保证加压固定系统提供足够的压力。加固的过程中操控千斤顶加固处理,确保钢板加固具备紧固性,使钢板与原桥梁结构共同组合形成整体。加压固定的环节应用膨胀螺栓、垫板、角钢等作为连接部件,并在加工位置开出螺栓孔,达到精准定位的要求。为了确保钢板连接具备稳定性,使用螺栓抗剪力使得钢板和副梁梁体形成整体,达到共同受力的效果。然后应用高强度黏结剂植入螺栓,达到结构补强的作用,提高结构加固效果。

### 3.2.3 黏结剂配置

本工程应用的环氧树脂黏结剂,按照配合比参数制作,质量配比为环氧树脂:二丁酯:乙二胺:水泥=100:10:6:300~400,并加入一定量的丙酮,保证配比的精度合格。材料配比环节先将环氧树脂和二丁酯

根据设计要求搅拌制作,达到均匀性后再加入丙酮溶液。上述混合料搅拌达到无粘连的状态后即可加入水泥材料,再搅拌制作成为糊状加入乙二胺,持续搅拌均匀后完成黏结剂的制作。

### 3.2.4 钢板粘贴

改性环氧树脂胶浆配置完成之后,且各项指标检测符合要求,将其均匀涂抹到桥梁的主副梁结构表面,然后将处理完成的钢板表面涂抹厚度 20 mm 的改性环氧树脂黏结剂,保证各位置涂抹均匀,且厚度符合标准要求。现场涂抹结束后将钢板直接粘贴在主副梁结构表面,达到加固的效果,并且钢板周边有环氧树脂胶浆挤出以保证连接达到密实度的要求。上述粘贴环节应用螺栓拧紧的方式提供足够的压力,确保钢板和桥梁结构粘贴达到紧密贴合的效果。粘贴达到密实度标准后,粘贴完成的钢板表面涂抹厚度 20 mm 的环氧树脂砂浆,再进行第二层厚度 6 mm 的钢板粘贴作业,并采用相同方式加压处理。为了确保粘贴钢板加固效果合格,现场采取防护处理措施,应用钢丝刷将螺栓表面清理干净,没有锈蚀问题再涂抹环氧树脂砂浆,最后涂抹两层防锈漆<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

高速公路桥梁钢结构疲劳损伤分析和加固技术是一个复杂而又关键工程,本文分析中采用有限元进行高速公路桥梁钢结构疲劳损伤分析,通过有限元方法能掌握桥梁的疲劳损伤情况。在这种背景下对公路桥梁钢结构加固工程开展起到的作用很大,而由于高速公路桥梁钢结构加固作为一项系统性的工程,因此无论是在疲劳损伤分析或是加固技术运用时,均需要做好每一个环节的控制,如此才能圆满地完成设计任务。

## 参考文献:

- [1] 王兵见,史耀中,陈可.公路钢箱梁疲劳安全分析方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):226-229.
- [2] 徐方圆,张征文.重载与氯盐环境下混凝土桥梁疲劳损伤当量分析研究[J].工业建筑,2019,49(03):174-179.
- [3] 周虎,肖勇刚,谭斌.基于断裂力学的混凝土桥梁疲劳损伤及寿命评估分析[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2018,27(04):6-10.
- [4] 张君.钢箱梁U肋桥面系与板肋桥面系疲劳分析[J].科学技术创新,2019(07):126-127.
- [5] 芦凯捷.独柱桥梁钢结构支撑加固改造施工技术研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(07):119-121.