

重载交通对公路桥梁疲劳性能的影响及对策研究

李永胜

苍溪县公路养护中心 四川 广元 628499

摘要：随着我国经济的快速发展和物流运输需求的持续增长，公路交通中重载车辆的比例显著上升。重载交通对既有公路桥梁结构的安全性与耐久性构成了严峻挑战，尤其是对桥梁构件的疲劳性能产生了显著不利影响。本文系统分析了重载交通对公路桥梁疲劳损伤的作用机理，结合国内外研究成果，从荷载特性、材料响应、结构细节等多个维度探讨了其对桥梁疲劳寿命的影响规律；在此基础上，提出了包括优化设计标准、加强监测评估、实施预防性养护及采用新型加固技术等在内的综合应对策略。研究表明，科学识别重载交通特征、精准评估疲劳损伤演化过程，并采取针对性措施，是保障桥梁长期安全服役的关键路径。

关键词：重载交通；公路桥梁；疲劳性能；疲劳寿命；结构健康监测；加固对策

引言

近年来，我国公路运输在“交通强国”战略下快速发展，但超限超载运输现象频发，部分干线公路重载车辆占比超30%。这些车辆轴重远超设计标准，如《公路桥涵设计通用规范》规定的100kN，对桥梁结构造成反复高幅值荷载，易诱发疲劳裂纹，威胁桥梁安全。疲劳破坏是交变应力下，应力低于材料静力强度极限时，因微观裂纹萌生、扩展导致的渐进性破坏。桥梁关键部位如焊接钢构件等，疲劳问题突出。全球约80%的钢桥破坏与疲劳相关，我国部分早期中小跨径桥梁已现明显疲劳损伤。因此，深入研究重载交通对桥梁疲劳性能的影响，提出有效防控对策，对提升基础设施韧性、延长桥梁寿命、降低成本意义重大。

1 重载交通的荷载特征及其对桥梁的作用模式

1.1 重载交通的定义与统计特征

重载车辆通常指总质量超49吨或单轴载重超14吨的货运车辆。大宗物资运输通道上，部分车辆轴重可达20

至30吨，远超规范限值。其轴重高、速度低、通行频次密集，特定走廊形成集中重载交通流。车辆启动、制动或过不平整桥面时，动态冲击效应显著，实际作用于桥梁的荷载远高于理论值，这种荷载模式对桥梁疲劳敏感部位考验严峻。

1.2 重载荷载对桥梁的力学响应

重载车辆过桥，结构内部弯矩、剪力及局部应力集中效应增强。如轴重25吨的六轴货车，跨中弯矩可达标准车队荷载2.5倍以上，日均通行数百次，累积损伤效应呈非线性加速。桥面不平整等因素会引发动态放大效应，DAF在重载条件下可达1.1至1.3，加剧桥梁疲劳损伤风险。

1.3 疲劳荷载谱的构建

准确评估桥梁疲劳性能，关键在于构建真实反映交通状况的疲劳荷载谱。传统简化方法在重载环境下易低估实际损伤程度。现代工程依托WIM获取数据，结合雨流计数法提取循环，获得真实荷载谱，为疲劳寿命预测和结构健康评估提供可靠输入。

表1：典型重载车辆荷载特征及其对桥梁疲劳影响参数对比

车辆类型	总质量 (t)	单轴最大轴重 (kN)	日均通行频次 (辆/日)	动态放大系数 (DAF)	相当于标准 BZZ-100车队荷载倍数	疲劳敏感部位示例
六轴重型货车 (合规)	49	140	50-100	1.10-1.15	1.8-2.0	支座锚固区、横隔板连接
超限六轴货车 (常见)	70-100	180-250	200-500	1.20-1.30	2.5-3.2	U肋-顶板焊缝、伸缩缝附近
矿用自卸车 (短途)	80+	280-300	100-300	1.25-1.35	3.5-4.0	钢梁腹板、桥面铺装层下缘

注：数据综合自交通运输部WIM监测报告（2022-2024）、四川省交通科学研究院实测数据及JTGD60-2015规范。

2 重载交通对桥梁疲劳性能的影响机理

2.1 疲劳基本理论

金属与混凝土材料在循环荷载作用下，即使应力低

于静力强度极限,也会因微观裂纹萌生与扩展而最终断裂,此即疲劳破坏。S-N曲线(应力幅-寿命曲线)是评估疲劳性能的核心工具。对于焊接钢结构,国际焊接学会(IIW)及Eurocode 3提供了详细的疲劳分类与设计曲线。疲劳损伤累积通常采用Miner线性累积损伤法则:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

当 $D \geq 1$ 时,结构发生疲劳破坏。其中, n_i 为第*i*级应力幅作用次数, N_i 为对应疲劳寿命。

2.2 材料层面的影响

钢材作为桥梁主结构的主要材料,在重载反复荷载作用下表现出明显的疲劳敏感性。高幅值应力促使位错滑移和晶界滑动加剧,加速微观裂纹的形成。尤其在焊接区域,残余拉应力与工作应力叠加后,易使局部进入塑性状态,大幅削弱疲劳强度。大量研究表明,在重载交通密集路段,钢桥面板关键焊缝的疲劳寿命可能仅为规范设计值的三分之一至二分之一。对于混凝土结构,虽然其抗压性能优异,但抗拉能力薄弱,在反复荷载作用下,预应力筋锚固区、横隔板连接处等部位易产生微裂缝^[2]。这些裂缝为水分、氯离子等侵蚀介质提供了通道,进而引发钢筋锈蚀,形成“疲劳-腐蚀”耦合劣化机制,进一步降低结构承载力和耐久性。

2.3 结构细节的敏感性

正交异性钢桥面板中的U肋与顶板角焊缝是公认的疲劳薄弱环节,其几何不连续性导致应力集中系数显著升高;支座与墩台连接区域在重载作用下承受较大的转角和剪切变形,易产生局部开裂;伸缩缝附近的桥面铺装,在车辆冲击下频繁破损,暴露出的钢筋和混凝土界面成为新的疲劳源。重载交通不仅提高了这些细节部位的应力幅值,还因其低速通行延长了荷载作用时间,使得应力集中效应更加显著。因此,即便整体结构受力满足静力安全要求,局部细节的疲劳失效仍可能引发连锁反应,威胁全桥安全。

2.4 环境与荷载耦合作用

在实际服役环境中,桥梁疲劳损伤往往并非单纯由机械荷载引起,而是与气候、化学侵蚀等环境因素共同作用的结果。在寒冷地区,冻融循环会扩大混凝土微裂缝,重载荷载则进一步撕裂这些已有损伤,形成恶性循环;在沿海或工业污染区域,盐雾或酸性气体加速钢结构表面腐蚀,腐蚀坑成为新的应力集中点,显著降低疲劳裂纹萌生门槛。这种多物理场耦合作用使得疲劳损伤演化过程更加复杂,传统的单一荷载疲劳模型难以准确预测实际寿命,亟需发展考虑环境-荷载协同效应的综

合评估方法。

3 应对重载交通影响的综合对策

3.1 设计阶段的优化措施

首先,应在规范层面建立“重载敏感区”分类机制,对煤炭运输通道、港口集疏运干线、工业园区联络线等重载高频路段,明确采用更高疲劳荷载等级进行验算,例如在S-N曲线选取上采用更保守的细节类别,或在Miner累积损伤计算中引入重载修正系数。其次,结构构造细节应作为设计重点予以优化。大量工程实践表明,疲劳裂纹多源于几何不连续区域,因此应尽可能采用平滑过渡、大半径圆角、避免焊缝交叉等措施降低应力集中系数;对于正交异性钢桥面板,可推广U肋嵌入式焊接、双面焊或激光熔覆等先进工艺,显著提升焊缝疲劳强度。此外,材料创新为抗疲劳设计提供了新路径。超高性能混凝土(UHPC)因其致密微观结构和高抗拉韧性,已被广泛用于桥面铺装或局部加固,不仅能有效分散轮载、降低钢梁应力幅,还可大幅减少铺装层开裂导致的水损害;耐候钢的应用则可在免除防腐涂装的同时,通过稳定锈层形成自我保护机制,降低后期维护对疲劳细节的扰动^[3]。未来,随着数字孪生与参数化设计技术的发展,有望实现基于实测交通数据的“定制化”疲劳优化设计,使桥梁从诞生之初即具备抵御重载冲击的内在韧性。

3.2 运营阶段的监测与评估

必须建立动态、精准的监测与评估体系。结构健康监测系统(SHM)作为现代桥梁运维的核心工具,应针对疲劳热点布设高精度光纤光栅或电阻应变传感器,长期采集关键部位的应力时程数据,并结合车辆动态称重(WIM)信息,实时反演实际荷载谱。在此基础上,可利用机器学习算法(如长短期记忆网络LSTM或图神经网络GNN)识别异常应力模式,实现疲劳损伤的早期预警。例如,港珠澳大桥通过部署数千个传感器节点,已构建起覆盖全桥的疲劳风险智能评估平台。与此同时,定期开展专项检测不可或缺。应制定以疲劳为导向的巡检制度,重点聚焦焊缝、螺栓连接、支座锚固区等高风险部位,采用超声相控阵、涡流成像等先进无损检测技术,精准定位微米级裂纹。更为重要的是,应摒弃“设计寿命即服役终点”的静态观念,转向基于实测数据的动态寿命更新机制。通过融合贝叶斯理论与随机过程模型,将历年交通量、轴载分布、环境温湿度等实测数据作为先验信息,不断修正剩余疲劳寿命的概率分布,从而为养护决策提供科学依据,避免“过度维修”或“带病运行”两种极端。

3.3 养护与加固技术

及时、有效的养护与加固是保障安全运营的关键手段。预防性养护应贯穿桥梁全生命周期,尤其注重桥面系统的完整性管理。及时修复坑槽、裂缝等铺装病害,可显著降低车辆通过时的冲击荷载,减轻对下部结构的疲劳激励;保持排水系统畅通,防止积水渗入混凝土或钢结构缝隙,有助于延缓腐蚀—疲劳耦合劣化进程。对于已形成可见裂纹的结构,需根据损伤程度采取分级干预策略。对于初期微裂纹,可采用低黏度环氧树脂压力注浆封闭,阻断水分和氧气侵入,抑制裂纹扩展;对于发展中的疲劳裂纹,可在裂纹尖端钻设直径6–12mm的止裂孔,通过几何钝化降低应力强度因子,为后续加固争取时间;对于承载力明显下降的构件,则需实施主动加固^[4]。粘贴碳纤维增强复合材料(CFRP)是一种高效轻质的加固方式,通过提高受拉区刚度,可有效降低工作应力幅达20%以上;在钢梁腹板或翼缘增设加劲肋,能改善局部屈曲稳定性,分散集中应力;对于疲劳问题突出的正交异性桥面板,可考虑局部更换为整体式钢-UHPC组合桥面板,从根本上消除传统焊缝疲劳隐患。值得注意的是,技术措施需与交通管理协同发力。在重载密集路段设置动态称重与自动抓拍系统,实施非现场执法;对特定桥梁实行重载车辆限行、分时段通行或引导至专用通道;鼓励发展多式联运与甩挂运输,从源头减少单车轴重,形成“工程+管理”双轮驱动的综合治理格局。

4 案例:四川G213线岷江特大桥疲劳裂纹治理工程

位于四川省阿坝藏族羌族自治州的G213线岷江特大桥(全长860m,主跨为5×40m预应力混凝土简支T梁桥),是川西北通往甘肃的重要煤炭与矿产运输通道。自2015年起,随着周边矿区产能扩大,日均重载车辆(总重 $\geq 70t$)通行量由不足50辆增至300余辆,远超原设计交通量(A级,日均重车 < 50 辆)。2020年例行检测中,技术人员在第3跨T梁横隔板连接焊缝处发现多条长度5–15mm的疲劳裂纹,同时桥面铺装出现严重碎裂。经结构健康监测回溯分析,该桥关键截面

实测应力幅值达85MPa,远超IIW Detail Category FAT 63对应的容许值(63MPa),Miner累积损伤D已达0.87。2021年,四川省公路局联合中交二公院实施综合治理:短期措施:设置动态称重与抓拍系统,限制总重 $> 55t$ 车辆通行;结构加固:对开裂横隔板采用CFRP布粘贴+环氧注浆封闭,并在U型连接处增设加劲钢板;长期优化:2022年将该桥纳入“重载敏感桥梁”名录,启动基于WIM数据的疲劳寿命动态更新机制。截至2024年底,监测数据显示关键部位应力幅下降22%,未见新裂纹扩展,验证了“工程加固+交通管控”协同策略的有效性。该案例为西南山区重载通道桥梁的疲劳防控提供了可复制的实践范式。

5 结语

重载交通已成为影响我国公路桥梁疲劳性能的关键外部因素。其通过高幅值、高频率的交变荷载作用,显著加速桥梁关键部位的疲劳损伤进程,缩短结构服役寿命。本文研究表明:重载车辆的轴重、通行频次及动态特性共同决定了桥梁的疲劳荷载谱,需基于实测数据构建精准模型;疲劳损伤集中于构造细节区域,材料性能退化与环境耦合效应进一步加剧风险;应采取“设计优化—智能监测—精准养护—源头治理”四位一体的综合防控策略,提升桥梁抗疲劳韧性。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的发展,桥梁疲劳管理将向智能化、预测性方向演进。唯有坚持科学评估与主动干预,方能保障国家交通基础设施的长治久安。

参考文献

- [1]陈锐.高速公路车流荷载预测模型与桥梁疲劳损伤分析[D].湘潭大学,2023.
- [2]徐敏.基于多尺度建模的重载交通公路桥梁疲劳寿命预测方法[J].工程机械与维修,2023,(03):38–40.
- [3]聂磊.公路钢-混组合梁桥疲劳分析与限载研究[D].湖南大学,2023.
- [4]史小川.基于疲劳腐蚀与重载耦合作用下的钢-混凝土组合桥梁时变可靠度研究[D].长安大学,2022.