

道路桥梁荷载计算与设计方法

李宗霖

安徽省建筑科学研究设计院 安徽 合肥 230031

摘要：道路桥梁荷载计算需综合考虑永久荷载、可变荷载及偶然荷载。永久荷载涵盖结构自重与附属设施重量，通过材料密度与截面尺寸精确计算。可变荷载包含车辆、人群及温度作用，需结合规范确定荷载标准值与组合系数。偶然荷载如地震与船舶撞击，需通过动力分析评估影响。设计时采用极限状态法，确保承载能力与正常使用极限状态满足要求，同时运用有限元模拟复杂荷载工况。

关键词：道路桥梁；荷载计算；设计方法

引言：道路桥梁是交通网络的关键节点，其荷载计算与设计方法的科学性直接决定了结构的安全性与耐久性。面对日益增长的交通荷载、复杂多变的自然环境以及超限运输等新挑战，传统设计方法需结合现代计算理论与技术手段进行优化。本文围绕荷载分类、作用机理及极限状态设计展开探讨，旨在为道路桥梁工程提供精准化、适应性强的设计策略。

1 道路桥梁荷载分类与作用机理

1.1 永久荷载

(1) 结构自重计算以材料密度和截面尺寸为核心，先按材料特性确定密度，如混凝土取 25kN/m^3 、钢材取 78.5kN/m^3 ，再结合构件截面尺寸（如梁高、腹板厚度）计算体积，两者相乘得自重；截面尺寸偏差会直接影响计算结果，需按设计图纸精确取值，避免误差超5%。(2) 附属设施荷载取值需符合规范，桥面铺装按厚度计算，沥青铺装取 2.3kN/m^3 、水泥铺装取 24kN/m^3 ；护栏按线性分布取值，防撞护栏取 10kN/m ，人行道栏杆取 5kN/m ，均需纳入整体荷载组合。

1.2 可变荷载

(1) 车辆荷载采用标准车列模型，公路桥梁分公路-I/II级；冲击系数依结构基频算，基频 $\leq 1.5\text{Hz}$ 取0.3、 $\geq 14\text{Hz}$ 取0.05；多车道折减系数，2车道取1.0、3车道取0.85、4车道及以上取0.65。(2) 人群荷载按均匀分布假设，人行道取 3kN/m^2 ，人行天桥密集人群取 5kN/m^2 ，同时考虑 0.7kN 单个集中荷载。(3) 温度作用含整体与梯度效应，整体温差按当地气候取 $\pm 20^\circ\text{C}$ ；梯度效应按非线性分布，桥面与梁底温差，沥青铺装层取 14°C 、水泥铺装层取 10°C 。(4) 收缩徐变使混凝土连续梁产生变形，1年收缩完成70%，徐变系数1年约2.0，会引发支座不均匀沉降，需通过预应力调整^[1]。

1.3 偶然荷载

(1) 地震作用用反应谱法与动力时程分析，反应谱法按设防烈度取地震影响系数，6度区0.04、7度区0.16；动力时程分析选3条以上地脉动波算最大位移与内力。

(2) 船舶撞击荷载依吨位定，1000吨级取 10MN 、5000吨级取 30MN ，作用时间0.1-0.3s；洪水冲刷按水流速度算深度，计入局部冲刷与推移力。

2 道路桥梁荷载计算规范与理论方法

2.1 国内外设计规范对比

(1) 我国JTGD60与欧洲Eurocode荷载组合差异显著：JTGD60采用“永久荷载+可变荷载+偶然荷载”基本组合，永久荷载分项系数取1.2（有利）或1.35（不利），可变荷载分项系数取1.4；Eurocode则按荷载效应组合类型分类，永久荷载分项系数根据荷载占比调整（0.9-1.35），可变荷载引入组合系数（0.7-1.0），更注重荷载概率分布的影响，如对小概率大荷载事件降低分项系数。(2) 美国AASHTO LRFD规范以极限状态设计为核心，将极限状态分为强度、稳定、疲劳等7类，荷载组合采用“荷载系数×荷载效应”模式，如强度极限状态组合为1.2永久荷载+1.6活荷载+0.5环境荷载；同时引入抵抗力系数（0.75-1.0），根据材料可靠性调整，如钢材抵抗力系数高于混凝土，体现“荷载与抵抗力分项系数”设计思想，更强调结构全生命周期安全。

2.2 极限状态设计法

(1) 承载能力极限状态需验算强度与稳定性：强度验算要求荷载效应设计值 $\leq$ 结构抗力设计值，如受弯构件需满足 $M \leq \gamma_0 f_n W_n$ （ γ_0 为重要性系数， f_n 为材料强度设计值， W_n 为净截面模量）；稳定性验算针对受压构件（如桥墩），需计算整体稳定（长细比控制）与局部稳定（翼缘宽厚比限制），防止失稳破坏，如钢筋混凝土柱长细比 ≤ 30 。(2) 正常使用极限状态聚焦裂缝与挠度：裂缝控制按环境类别划分，一类环境下受弯构件最

大裂缝宽度 $\leq 0.3\text{mm}$, 需通过配筋率调整, 如采用小直径密配钢筋; 挠度验算要求短期挠度 $\leq 1/250$ 、长期挠度 $\leq 1/200$ (1为跨径), 长期挠度需考虑混凝土收缩徐变影响, 乘以挠度增大系数 (1.5-2.0) [2]。

2.3 动态荷载放大效应

(1) 车辆动载系数 (DMF) 需结合现场测试与理论修正: 现场测试通过应变传感器采集车辆通行时的应变响应, 计算DMF (实测应变/静态应变), 通常取值 1.1-1.5; 理论修正需考虑桥面平整度 (如IRI值 $> 2.0\text{m/km}$ 时增大DMF) 与车辆速度 (60-80km/h时DMF达峰值), 修正公式为 $\text{DMF} = 1.05 + 0.005v$ (v 为车速, 单位 km/h)。(2) 风致振动与地震动下的动力响应分析: 风致振动需计算涡激振动 (振幅控制 $\leq 1/1000$) 与颤振临界风速 (需 $\geq$ 设计风速1.2倍), 采用风洞试验获取气动系数; 地震动响应分析通过反应谱法计算地震作用效应, 如水平地震影响系数 $\alpha_{\max}$ 按设防烈度确定 (7度区取0.16), 动力时程分析需选取3条符合场地类别的地震波, 确保结构最大响应包络值满足要求。

2.4 有限元模拟在复杂荷载中的应用

(1) 空间杆系模型与实体单元模型适用场景不同: 空间杆系模型 (如MIDASCivil中梁单元) 适用于中小跨径梁桥、拱桥, 可高效计算整体内力 (弯矩、剪力), 但无法模拟局部应力 (如支座附近); 实体单元模型 (如ANSYS中Solid185单元) 适用于复杂结构 (如异形桥墩、钢混叠合梁), 能精准分析局部应力分布, 但计算量大, 需简化网格 (关键区域网格尺寸 $\leq 0.1\text{m}$)。(2) 移动荷载瞬态分析可通过ANSYS、MIDAS实现: MIDASCivil中采用“移动荷载工况”定义标准车流, 设置加载速度 (如50km/h) 与步长 (0.5m), 自动计算跨中最大弯矩等瞬态响应; ANSYS中需通过APDL命令流定义移动荷载, 采用瞬态动力学分析模块 (Transient), 设置时间步长 (0.01s), 输出不同时刻的位移、应力云图, 模拟车辆通行时的动态效应 [3]。

3 典型道路桥梁结构的设计方法与实践

3.1 简支梁桥设计

(1) 跨中弯矩与支座剪力计算需结合荷载组合: 跨中弯矩按“1.2永久荷载+1.4可变荷载”组合计算, 公式为 $M_{\max} = (1.2g + 1.4q) l^2 / 8$ (g 为梁自重线荷载, q 为车辆荷载线荷载, l 为跨径), 如20m跨径简支梁, $g = 30\text{kN/m}$ 、 $q = 20\text{kN/m}$ 时, $M_{\max} \approx 330\text{kN} \cdot \text{m}$; 支座剪力按 $V_{\max} = (1.2g + 1.4q) l / 2$ 计算, 同时需验算支座抗剪承载力, 确保不小于计算值1.1倍。(2) 预应力混凝土梁抗裂设计核心是控制有效预压应力: 受拉区混凝土有效预压应力 σ_{pc}

需满足 $\sigma_{\text{pc}} \geq 0.7f_{\text{ck}}$ (f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值), 通过配置预应力钢束实现, 如采用15.2mm钢绞线, 张拉控制应力取 $0.75f_{\text{ptk}}$ (f_{ptk} 为钢绞线抗拉强度标准值), 同时设置非预应力钢筋, 防止局部开裂。

3.2 连续梁桥设计

(1) 内力重分布与负弯矩区配筋需考虑超静定特性: 通过调整支座截面抗弯刚度 (如增大支座处梁高) 实现内力重分布, 负弯矩区配筋率需 $\geq 0.25\%$, 且钢筋锚固长度 $\geq 30d$ (d 为钢筋直径), 如30m跨径连续梁, 中间支座负弯矩区需配置直径25mm的HRB400钢筋, 间距150mm。(2) 收缩徐变引起的次内力计算采用换算弹性模量法: 将徐变系数 $\varphi(t)$ 纳入计算, 次弯矩 $M_{\text{creep}} = \varphi(t) \times M_0$ (M_0 为初始弯矩), 对50m跨径连续梁, 运营5年后 $\varphi(t) \approx 2.0$, 次弯矩约占初始弯矩的30%, 需通过设置温度伸缩缝或调整预应力束位置抵消次内力。

3.3 拱桥与斜拉桥设计

(1) 拱脚水平推力平衡设计有两种方式: 中小跨径拱桥采用重力式拱座, 通过增大基础自重 (如采用混凝土重力墩, 自重 $\geq$ 推力1.5倍) 平衡推力; 大跨径拱桥采用系杆, 系杆拉力需等于拱脚水平推力, 系杆采用高强度钢绞线, 安全系数 ≥ 2.5 。(2) 斜拉索索力优化与抗风稳定性至关重要: 索力优化采用“影响矩阵法”, 使主梁弯矩分布均匀, 最大正、负弯矩差值 $\leq 10\%$; 抗风稳定性需验算涡激振动 (振幅 $\leq 1/1500$, 1为跨径) 与颤振临界风速 ($\geq$ 设计风速1.3倍), 可通过安装导流板或减震装置提升稳定性 [4]。

3.4 大跨度桥梁的特殊考虑

(1) 悬索桥几何非线性分析需计入位移影响: 采用非线性有限元法, 考虑主缆垂度变化、梁体大位移引起的刚度变化, 计算时需迭代求解, 如1000m跨径悬索桥, 主缆垂跨比1/10, 活荷载作用下主缆垂度变化 $\leq 0.5\text{m}$, 确保结构变形在允许范围。(2) 钢-混叠合梁界面力学重点验算粘结性能: 界面需传递剪力, 设置抗剪连接件 (如栓钉, 直径19mm, 间距150mm), 验算连接件抗剪承载力, 要求单个栓钉抗剪力 $\geq 100\text{kN}$; 同时控制界面混凝土收缩, 采用补偿收缩混凝土, 减少界面开裂风险。

4 道路桥梁荷载设计的挑战与创新方向

4.1 超限车辆与重载交通的挑战

(1) 动态称重系统 (WIM) 数据可实时采集车辆轴重、车速等信息, 为荷载设计提供实测依据。通过分析WIM数据, 能识别超限车辆 (如轴重超100kN) 的通行频率与载重分布, 修正标准荷载模型; 同时将数据接入桥梁健康监测系统, 动态评估重载对桥梁的累积损伤,

为养护决策提供支持。(2) 基于可靠度的荷载系数调整方法,通过统计超限荷载的概率分布,计算结构失效概率。当超限车辆通行率超5%时,可将荷载系数从1.4提高至1.6;结合结构服役年限,对运营10年以上桥梁,按可靠度指标 $\beta \geq 3.2$ 调整系数,确保结构在重载下的安全储备。

4.2 极端环境下的耐久性设计

(1) 氯离子侵蚀会破坏钢筋钝化膜,当混凝土中氯离子含量超0.06%时,钢筋开始锈蚀,需在混凝土中添加阻锈剂(如亚硝酸钙),或采用环氧涂层钢筋;碳化会降低混凝土pH值,当碳化深度达钢筋表面时,需提高混凝土保护层厚度(从30mm增至50mm),延缓锈蚀进程。(2) 冻融循环与疲劳荷载耦合会加速结构损伤,冻融使混凝土产生微裂缝,疲劳荷载(如车辆反复作用)则扩大裂缝,需采用引气混凝土(含气量4%-6%)提升抗冻性,同时在荷载计算中引入耦合系数(取1.2),修正疲劳应力幅限值。

4.3 智能化设计技术

(1) BIM技术可构建桥梁三维模型,实现荷载-结构交互分析。在模型中嵌入荷载参数(如车辆荷载、温度荷载),能直观展示荷载作用下结构的内力分布;通过BIM与有限元软件联动,可自动生成荷载组合工况,提高设计效率,减少人为误差。(2) 机器学习可基于历史荷载数据(如近5年车辆荷载、风荷载)建立预测模型。采用LSTM神经网络,预测未来3年荷载变化趋势,误差控制在8%以内;同时识别荷载异常模式,如突发性超载,提前发出结构预警。

4.4 绿色桥梁设计理念

(1) 轻量化结构(如钢-木组合梁)可减少材料用量,降低结构自重荷载。采用高性能材料(如UHPC,抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$),在减小截面尺寸的同时,保证承载能力;通过优化结构形式(如变截面梁),进一步降低自重对基础的荷载要求。(2) 可拆卸与循环利用设计需考虑荷载传递路径的可拆分性。采用螺栓连接代替焊接,便于构件拆卸回收;在荷载计算中,预留可拆卸构件的吊装荷载(取构件自重的1.5倍),确保拆卸过程中的结构安全,实现资源循环利用。

结束语

道路桥梁荷载计算与设计方法的科学性与精准性,是保障桥梁结构安全、耐久及经济性的核心基础。面对交通荷载演变、极端环境冲击及智能化技术发展,需持续优化荷载模型、创新设计理念,并融合BIM、机器学习等新技术提升设计效率。未来,应进一步强化多学科交叉研究,推动绿色可持续设计,为构建安全、高效、环保的现代交通基础设施提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 褚建国,赵东辉.桥梁结构荷载计算方法研究[J].土木工程学报,2024,57(3):125-126.
- [2] 李海波.桥梁动力测试中的模态参数识别方法研究[J].公路交通科技,2020,37(5):56-57.
- [3] 魏晨浩,高云飞.基于有限元分析的桥梁结构荷载优化研究[J].工程力学,2023,40(5):88-89.
- [4] 蒋宏斌,许振国.道路桥梁荷载计算标准的演进与发展[J].建筑结构学报,2023,44(7):112-113.