

重载交通作用下长联钢栈桥结构的动力响应分析

刘嘉乐 王义凯 王保春

中交路桥建设有限公司 黑龙江哈尔滨 150090

摘要: 钢栈桥在复杂地形中作为临时通道的应用日益广泛, 当其作为土方运输的通道时, 通行车辆均为重载车辆, 这时钢栈桥的动力响应问题仍需深入研究。本文结合典型土方运输场景, 构建车桥耦合动力分析模型, 开展动态响应计算, 从位移响应、应力分布与振动特性三方面分析了重载交通作用对桥梁结构性能的影响, 揭示重载交通作用下多跨长联钢栈桥的动力响应机制与影响因素。

关键词: 钢栈桥; 重载交通; 动力响应; 车桥耦合振动

引言

随着城市基础设施建设的快速推进, 临时性结构在大型工程中的应用愈加广泛, 尤其是在大量土方运输的需求下, 钢栈桥因其具有搭设便捷、结构轻巧、可重复利用等优点, 成为大多数工程穿过复杂地形的运输方案。在重载交通频繁运行的条件下, 多跨长联钢栈桥结构的受力性能问题日益突出, 影响施工的安全性与可靠性。为此, 需要对重载交通作用下钢栈桥的动力响应进行系统分析。

一、动力响应分析方法

桥梁在车辆、行人或其他移动荷载作用下, 内部结构会产生动态响应, 动态效应与静态荷载作用效果的比值称为冲击系数^[1, 3]。冲击系数通常定义为桥梁在车辆运动过程中最大动力响应与静力响应之差的比值, 其反映了桥梁在动荷载作用下的实际受力状态放大程度。对于长联钢栈桥而言, 由于其结构柔性较大, 动力放大效应较为显著, 冲击系数的准确预测十分重要。

目前, 常见的动力响应分析方法有模态分析法和时程分析法等。模态分析法作为一种频域分析方法, 识别结构的固有频率、振型和阻尼特性, 通过求解结构的特征方程, 可获得结构在自由振动状态下的响应。然而, 模态分析法无法直接给出结构在车辆荷载作用下的响应随时间的演化过程。在实际研究中, 更为常用的方法是时程分析法, 通过建立车辆-桥梁系统的耦合动力学模型, 考虑车辆荷载在桥面上随时间移动的过程, 能够动态计算桥梁的动力响应。

在时程分析法中, 首先需建立合理的车辆荷载模型与桥梁有限元模型。车辆部分通常简化为多个刚体组成的多自由度系统, 同时考虑车体质量、悬挂刚度与阻尼等参数。桥梁部分根据结构实际情况建模, 设定梁、壳

或实体单元, 并设定适当的网格划分与边界条件。随后, 通过车辆在桥梁上的运动进行时变荷载施加, 结合系统动力学方程进行数值积分, 获得结构的动态响应时程。取出车辆通过期间结构的最大响应值与对应的静载响应值, 代入冲击系数公式, 即可得到冲击系数的定量指标。^[4]

二、重载车辆模型构建

本文选取运土车辆类型为“前四后八”型重载货车, 属于四轴八轮的重载车辆。该车型具有整备质量大、车身刚性高等特点。为了反映该类车辆在桥面行驶过程中对结构的真实激励效应, 本文建立了一个四轴重载车辆动力学模型。

四轴车可以看作9个刚体, 其中包括1个车体和8个车轮。车体有浮沉 z_v 、点头 θ_v 、侧滚 ϕ_v 和侧移 y_v 四个自由度, 每个车轮各有竖向 z_s 和横向 y_s 两个自由度, 四轴车辆共计有20个自由度^[2]。该类型四轴车轴距为1.9m+2.5m+1.35m, 轴重分配为0.15: 0.31: 0.27: 0.27。在实际参数赋值过程中, 为保证模型的合理性和准确性, 车辆的质量参数依据典型“前四后八”运土车的结构设计标准进行设定。整车总质量取为50吨, 前两轴各承担15%和31%的荷载, 后两轴各承担约27%的荷载, 符合车辆轴载分布规范。

在建立四轴车辆动力学模型过程中, 本文参考实际工程中运土车辆的结构形式与动力学特性, 部分参数设定如表1所示。

三、钢栈桥结构模型构建

1. 工程概况

哈尔滨都市圈北环土方钢栈桥标准段桥面宽9m, 标准跨径15m, 跨径布置为10×15m标准联布置, 栈桥及平台桥跨均采用钢管桩与贝雷的梁柱式组合结构, 纵向承重梁采用321型标准贝雷梁拼装, 贝雷梁每节长3m,

表1 四轴车辆动力学模型参数选取

名称	数值	名称	数值
俯仰惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	845700	后轴弹簧刚度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	35561
侧倾惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	34050	前轴弹簧阻尼 ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	3500
前轴弹簧刚度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	26460	后轴弹簧阻尼 ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)	13658

高1.5m。构件材料为16Mn，栈桥顶面标高120.7m，栈桥贝雷梁底面高程118.84m，单排桩，每一联中间与伸缩缝处设制动墩，每排采用3根 $\Phi 630 \times 10\text{mm}$ 螺旋钢管，间距2.745m，钢管入土深度12m。主梁上设置I22a分配梁，桥面采用单块尺寸为 $6\text{m} \times 2\text{m}$ 的10mm厚花纹钢板，主肋

为I12.6规格，主栈桥材料采用2I40a工字钢。栈桥及钻孔平台桩间横向平联采用20槽钢。钢栈桥结构标准横断面图如图1所示。

2.有限元模型构建

选取跨径布置为 $10 \times 15\text{m}$ 的标准联作为分析对象，采用有限元软件ANSYS建立数值分析模型，其中贝雷梁、花窗、工字钢、分配梁、钢管采用BEAM44梁单元进行建模，桥面板采用SHELL181板单元进行建模，边界条件按照施工现场实际情况进行模拟。建立的钢栈桥有限元模型如图2所示。

在有限元软件中采用生死单元法对车桥耦合振动进行分析。通过生成和杀死单元，可以模拟单元随着荷载步的进行不断增加，对按照要求排序后生成和杀死的单

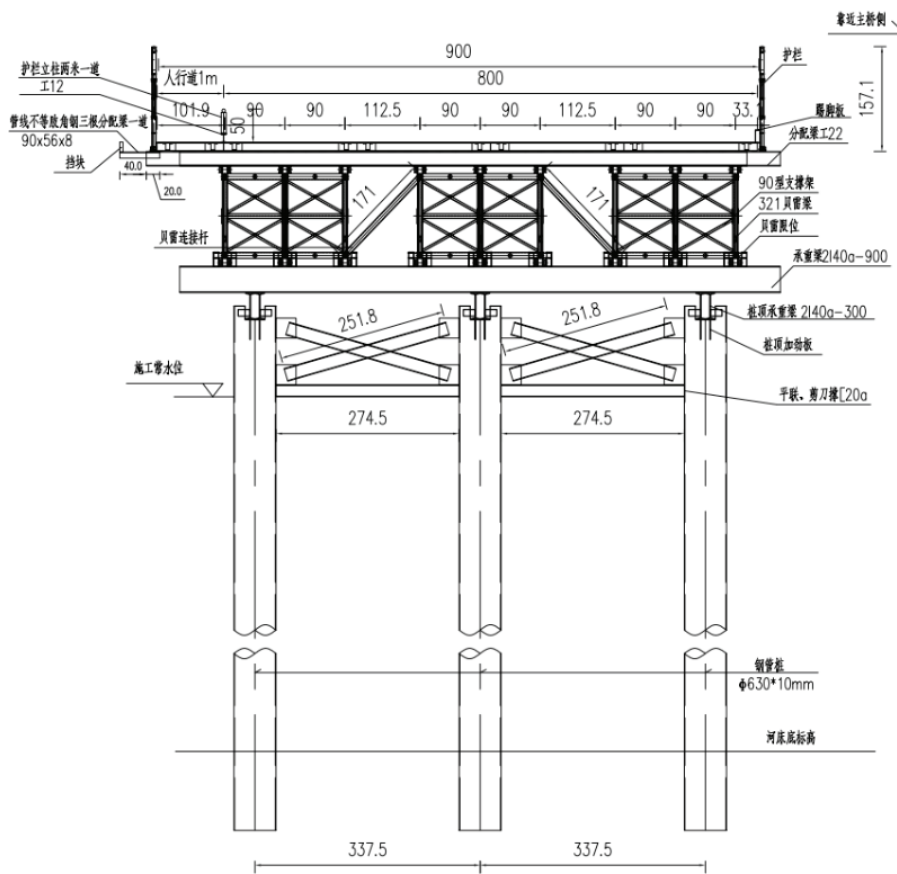


图1 钢栈桥结构标准横断面图

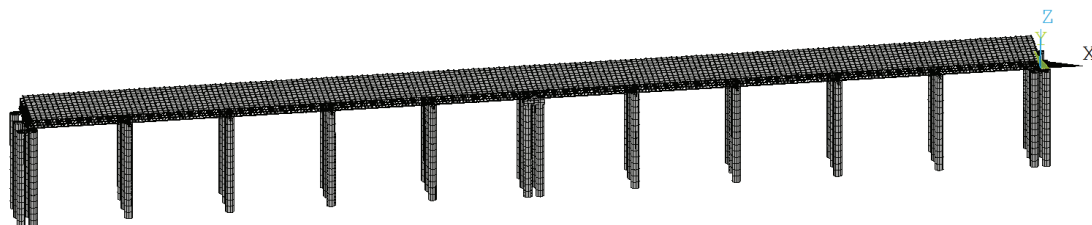


图2 钢栈桥有限元模型

元施加荷载,进行循环求解。采用 MASS21 质量单元和 COMBIN14 弹簧单元模拟车辆荷载,根据现场实际情况,栈桥运输速度为 20km/h,车间距为 40m,考虑车辆在桥面移动所引起的荷载时间变化,需结合车辆行驶速度与桥面平整度函数建立车轮荷载路径,从而得到每一时刻车轮所受的荷载输入。

四、动力响应分析

1. 位移响应

基于建立的有限元模型,本文对长联钢栈桥在重载交通作用下的位移响应进行了系统分析。通过时程分析法获取桥梁关键截面在贝雷梁下弦杆处的位移变化,揭示结构在车辆荷载作用下的动力响应特征。当重载车辆走过车间距 40m 后,第 1 跨跨中竖向位移随时间变化图如图 3 所示。

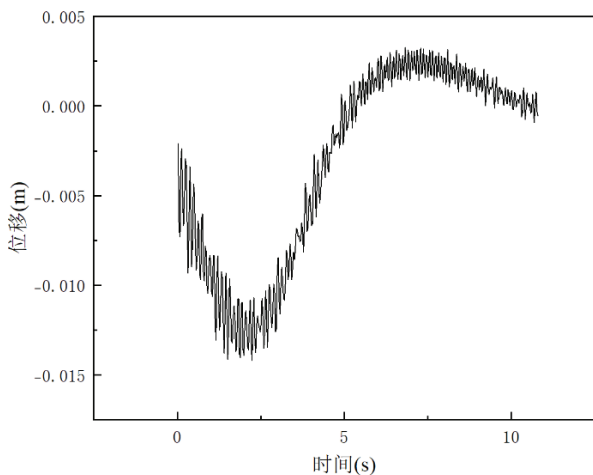


图3 第1跨跨中竖向位移随时间变化图

分析结果表明,桥梁每一跨的跨中截面在车辆通过过程中会产生最大竖向位移。第1跨支点处位移为 0.3mm, 1/4 处为 9.1mm, 最大值出现在第1跨跨中断面中,为 14.9mm, 第3跨和第5跨跨中断面位移为 14.2mm, 这表明跨中截面为变形最显著部位,从各关键截面位移分布可以看出,位移沿跨向呈典型抛物线分布,中部大、两端小,且具有对称性。另外,第1跨跨中断面在桥宽方向上最左侧、中间、最右侧三点的位移依次为 12.5mm、14.9mm、12.5mm; 第3跨为 10.5mm、14.2mm、10.5mm; 第5跨为 10.9mm、14.2mm、10.9mm,可观察到跨中断面中部位置的纵向位移普遍大于两侧位置,这可能是因为车辆主要集中通行于桥面中部车道,使中部区域受力更为集中,导致纵向位移增大。这说明,桥梁在重载交通作用下的动力响应具有明显的周期性与空间相关性。

2. 应力分布

通过动力分析,可以获得长联钢栈桥在重载交通作

用下的应力响应特性,本文重点分析贝雷梁下弦杆处在车辆荷载作用下的受力分布规律。数据表明,第1跨贝雷梁下弦杆处左、右侧最大应力均为 18.7MPa,第3跨为 13.6MPa,第5跨达到最大值 20.4MPa。第5跨处于桥梁中部位置,这说明重载车辆长时间集中通行导致桥梁中部贝雷梁下弦杆应力最大。此外,沿桥宽方向左右两侧应力相同,这表明两侧受力分布对称。最大应力值仍处于钢材弹性工作范围内,结构整体安全性良好。然而,长期重载作用下可能导致疲劳累积效应,应作为后续疲劳寿命评估和结构加固的重点区域。

3. 振动特性

采用模态分析方法研究长联钢栈桥结构的固有振动特性,获得结构的主导振型及对应频率。计算结果表明,该桥结构的一阶和二阶竖向弯曲振型频率分别为 10.015Hz 和 10.102Hz,频率较为接近,桥梁在特定激励频率下可能更易出现共振响应,需引起结构设计和安全性评估的关注。

基于静力分析与时程分析的结果,计算结构响应的冲击系数。对跨中截面与墩顶截面进行研究,计算得到其冲击系数分别为 0.391 和 0.393,说明在重载车辆高速通过时,结构动力效应显著增强,局部构件可能承受远高于静载作用下的内力。

结语

通过建立考虑车辆与桥梁耦合振动的动力学模型,采用数值仿真方法分析栈桥结构的动力响应特性。研究发现,重载交通中重型车辆的空间分布特征和行驶速度对长联钢栈桥的动力响应具有显著影响。基于有限元分析结果,揭示了重载工况下栈桥结构的位移、应力及振动特性,为长联钢栈桥的安全设计与荷载评估提供了重要参考。

参考文献

[1]高庆飞.移动车辆荷载作用下梁式桥动力性能设计与评价方法[D].哈尔滨工业大学,2015.
 [2]李岩.汽车与桥梁耦合振动理论及工程应用[M].北京:知识产权出版社,2021.
 [3]夏禾,张楠,郭薇薇.车桥耦合振动工程[M].北京:科学出版社,2014.
 [4]Gao Q, Zhang K, Wang T, et al. Numerical investigation of the dynamic responses of steel-concrete girder bridges subjected to moving vehicular loads[J]. Measurement and Control, 2021, 54(3-4): 465-484.