

简支梁桥在车辆冲击荷载下的动态响应试验研究

金彦荣

杭州市交通工程集团有限公司 浙江 杭州 311000

摘要：本文聚焦于简支梁桥在车辆冲击荷载下的动态响应问题，通过精心设计并开展系统的试验研究，深入剖析车辆冲击荷载对简支梁桥的动力作用特性。详细阐述了试验方案的设计，涵盖试验桥梁的精准选择、测点的科学布置、试验荷载的逼真模拟等关键环节。对试验数据进行细致处理与深入分析，揭示了简支梁桥在不同车辆冲击荷载工况下的位移、应变、加速度等动态响应规律。

关键词：简支梁桥；车辆冲击荷载；动态响应；试验研究

1 引言

简支梁桥因构造简单、施工便捷等优势在交通基建中广泛应用。然而实际运营中，车辆荷载受多种因素影响会产生冲击荷载，其作用时间短、幅值变化大，长期作用会威胁桥梁寿命安全。当前，桥梁结构动力分析多集中于理论分析和数值模拟，但实际桥梁结构复杂，存在诸多不确定因素，理论模型和模拟难以准确反映真实动态响应。故开展相关试验研究意义重大，能为桥梁设计、评估和维护提供可靠依据。

2 试验方案设计

2.1 试验桥梁的选择

选择一座具有代表性的简支梁桥作为试验对象至关重要。本次试验选取的桥梁为某公路简支T梁桥，该桥桥跨布置为单跨20m，桥面宽度为12m，设计荷载等级为公路Ⅱ级。该桥建成于2010年，经过多年的运营，结构状况良好，无明显病害，能够满足试验要求。在试验前，对该桥进行了详细的外观检查和静载试验，进一步确认了桥梁的结构性能和承载能力。

2.2 测点布置

2.2.1 位移测点

在桥梁跨中、1/4跨和3/4跨等关键截面处布置位移传感器。采用拉线式位移传感器，其量程为 $\pm 100\text{mm}$ ，精度为 0.1mm 。将位移传感器的一端固定在桥梁的固定参考点上，另一端通过拉线与测量点相连，以测量桥梁在这些位置的竖向位移动态变化。

2.2.2 应变测点

在桥梁跨中截面的上下缘以及支座附近等应力集中区域布置应变传感器。选用箔式应变片，其灵敏度系数为 $2.08 \pm 1\%$ ，电阻值为 120Ω 。在粘贴应变片前，对粘贴部位进行打磨、清洗等处理，确保应变片与桥梁结构表面良好粘结。同时，采用温度补偿片来消除温度对应变测

量的影响。

2.2.3 加速度测点

在桥梁跨中位置布置加速度传感器，选用压电式加速度传感器，其量程为 $\pm 5g$ ，灵敏度为 100mV/g 。将加速度传感器牢固地安装在桥梁结构上，以获取桥梁在车辆冲击荷载作用下的加速度动态信号，用于分析桥梁的动力特性。

2.3 试验荷载的模拟

为了模拟实际的车辆冲击荷载，采用一辆载重汽车作为试验荷载。该汽车为三轴载重货车，轴距分别为3.8m和1.4m。通过在汽车货厢上加载不同重量的配重，改变汽车的载重，以研究不同载重对桥梁动态响应的影响^[1]。本次试验设置了三种载重工况，分别为空载（汽车自重15t）、半载（总重30t）和满载（总重45t）。同时，控制汽车以不同的速度通过桥梁，模拟不同的车速工况。车速设置为20km/h、40km/h和60km/h三种情况。在试验过程中，使用高精度雷达测速仪记录汽车的行驶速度，确保车速的准确性，并记录汽车通过桥梁的时间等信息。

2.4 试验数据采集系统

采用高性能的数据采集仪器对传感器测得的信号进行实时采集和存储。选用美国NI公司的PXI数据采集系统，该系统具有高精度、高采样率等特点，最大采样率可达 1MS/s ，能够准确地记录桥梁在车辆冲击荷载作用下的动态响应信号。同时，配备相应的数据采集软件LabVIEW，实现对数据采集过程的实时监控和参数设置。在数据采集过程中，设置合适的采样频率，对于位移和应变信号，采样频率设置为 1kHz ；对于加速度信号，采样频率设置为 5kHz ，以确保能够捕捉到信号的细节变化。

3 试验过程与数据采集

3.1 试验准备

在试验前,对试验桥梁进行全面的检查和检测,确保桥梁结构处于正常状态。对传感器进行安装和调试,按照设计要求准确安装位移传感器、应变传感器和加速度传感器,并使用万用表等仪器检查传感器的连接是否正常,保证传感器的准确性和可靠性。对数据采集系统进行校准和测试,使用标准信号源对数据采集系统进行校准,确保采集数据的准确性。同时,对试验车辆进行检查和维护,保证车辆的性能良好,轮胎气压正常,制动系统灵敏可靠。

3.2 试验过程

按照预定的试验方案,控制试验车辆以不同的载重和速度通过桥梁。在每次车辆通过桥梁时,同步启动数据采集系统,记录桥梁各测点的位移、应变和加速度等动态响应信号。每个工况重复进行5次试验,以获取足够的数据样本,提高试验结果的可靠性。在试验过程中,安排专人负责指挥车辆行驶,确保车辆按照规定的速度和路线通过桥梁,同时记录试验车辆的相关信息,如车速、载重、通过时间等。

3.3 数据采集

在试验过程中,数据采集系统实时采集传感器传来的信号,并将其转换为数字信号存储在计算机中。采集的数据包括时间序列、位移值、应变值和加速度值等^[2]。同时,对采集到的数据进行初步整理,标记好每个工况的试验数据,以便后续的数据处理和分析。

4 试验数据处理与分析

4.1 数据预处理

对采集到的原始数据进行预处理,包括去除噪声、滤波等操作。对于加速度信号,由于其频率成分较为复杂,采用数字滤波技术进行滤波处理。选用巴特沃斯低通滤波器,截止频率设置为200Hz,以消除高频噪声的干扰,提高信号的质量。对位移和时变数据进行平滑处理,采用五点三次平滑法去除异常数据点,保证数据的准确性和可靠性。

4.2 动态响应分析

4.2.1 位移响应分析

通过对不同工况下桥梁跨中、1/4跨和3/4跨等位置的位移数据进行统计分析,绘制位移时程曲线。以满载45t、车速60km/h工况为例,桥梁跨中位移时程曲线显示,在车辆未上桥时,位移基本为零;当车辆开始上桥时,位移逐渐增大,在车辆行驶到跨中位置时,位移达到最大值,约为8.5mm;随后车辆继续行驶下桥,位移逐渐减小直至恢复为零。

分析不同工况下的位移响应数据发现,随着车辆载

重的增加,桥梁的位移响应明显增大。当车速为40km/h时,空载、半载和满载工况下桥梁跨中最大位移分别为3.2mm、5.8mm和8.5mm。车速对桥梁位移响应也有一定影响,在一定范围内,车速越快,位移响应越大,但当车速超过一定值后,位移响应的变化趋于平缓。例如,在满载工况下,车速从20km/h增加到40km/h时,跨中最大位移从6.8mm增加到8.5mm,增加了25%;而车速从40km/h增加到60km/h时,跨中最大位移从8.5mm增加到8.8mm,仅增加了3.5%。

4.2.2 应变响应分析

对桥梁跨中截面上下缘以及支座附近等部位的应变数据进行整理和分析,绘制应变时程曲线。以半载30t、车速40km/h工况为例,跨中截面下缘应变时程曲线显示,在车辆行驶到跨中附近时,应变达到最大值,约为120 $\mu\epsilon$ 。

研究发现,车辆冲击荷载作用下,桥梁的应变响应呈现出明显的动态变化特征。不同位置的应变响应大小不同,跨中截面下缘的应变响应最大,支座附近的应变响应相对较小。车辆载重和车速对应变响应的规律与位移响应类似,载重和车速的增加都会导致应变响应的增大。在空载工况下,车速为20km/h时,跨中截面下缘最大应变为35 $\mu\epsilon$;而在满载工况下,车速为60km/h时,跨中截面下缘最大应变达到180 $\mu\epsilon$ 。

4.2.3 加速度响应分析

根据加速度传感器采集到的数据,计算桥梁在不同工况下的加速度幅值和频率等动力特性参数。以满载45t、车速60km/h工况为例,桥梁跨中加速度时程曲线显示,加速度幅值较大,最大加速度约为0.8g。

通过对加速度信号进行频谱分析,得到桥梁的固有频率和振型等动力特性信息。分析结果表明,该简支梁桥的一阶固有频率约为5.2Hz,与理论计算值基本吻合。车辆冲击荷载会引起桥梁的振动,加速度幅值随着车辆载重和车速的增加而增大^[3]。在空载工况下,车速为20km/h时,跨中加速度幅值约为0.2g;而在满载工况下,车速为60km/h时,跨中加速度幅值达到0.8g。

4.3 影响因素分析

4.3.1 车速的影响

为了深入研究车速对桥梁动态响应的影响,选取不同车速工况下的试验数据进行对比分析。以满载工况为例,绘制桥梁跨中最大位移、最大应变和最大加速度随车速的变化曲线。结果表明,车速对桥梁的位移、应变和加速度响应均有显著影响。随着车速的提高,桥梁的动态响应增大,但当车速达到一定值后,动态响应的增

长趋势变缓。这是因为车速较低时,车辆与桥梁的相互作用时间较长,冲击作用相对较小;而车速较高时,车辆在桥梁上的停留时间缩短,但冲击力增大,导致桥梁的动态响应增大。当车速超过50km/h后,桥梁动态响应的增长幅度明显减小。

4.3.2 车辆载重的影响

分析不同车辆载重工况下的试验数据,发现车辆载重是影响桥梁动态响应的重要因素之一。以车速为40km/h为例,绘制桥梁跨中最大位移、最大应变和最大加速度随车辆载重的变化曲线。随着车辆载重的增加,桥梁的位移、应变和加速度响应均呈近似线性增长趋势。这是因为车辆载重的增加直接增大了对桥梁的作用力,从而导致桥梁的动态响应增大。当车辆载重从空载增加到满载时,桥梁跨中最大位移从3.2mm增加到8.5mm,增长了165.6%;最大应变从35 $\mu\epsilon$ 增加到150 $\mu\epsilon$,增长了328.6%;最大加速度从0.25g增加到0.7g,增长了180%。

5 实验结果与理论分析对比

将试验结果与采用有限元软件ANSYS建立的桥梁模型进行数值模拟的结果进行对比分析。数值模拟中,考虑了桥梁的材料特性(混凝土弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为0.2;钢材弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为0.3)几何尺寸以及车辆荷载的动力特性等因素。

对比结果表明,试验结果与数值模拟结果在整体趋势上具有较好的一致性。例如,在位移响应方面,不同工况下试验测得的桥梁跨中最大位移与数值模拟结果的误差在 $\pm 15\%$ 以内;在应变响应方面,误差在 $\pm 20\%$ 以内;在加速度响应方面,误差在 $\pm 25\%$ 以内^[4]。但在某些局部细节上存在一定的差异,这可能是由于数值模拟中采用的模型简化、材料参数取值以及边界条件假设等因素与实际情况存在一定偏差导致的。通过对比分析,验证了数值模拟方法的合理性,同时也为进一步改进数值模拟模型提供了依据。

6 结论与展望

6.1 结论

本文开展简支梁桥在车辆冲击荷载下的动态响应试验研究得出:车辆冲击荷载对桥梁动态响应影响显著,位移、应变和加速度等指标随车辆载重和车速增加而增大,如满载工况下,车速从20km/h增至60km/h时,桥梁跨中最大位移、应变、加速度均增大;不同位置动态响应大小有别,跨中截面位移和应变响应最大,支座附近较小;加速度响应可反映桥梁动力特性,频谱分析可得该桥一阶固有频率约5.2Hz;试验与数值模拟结果整体趋势一致,验证了数值模拟方法的可靠性、为桥梁动力分析和评估提供试验依据,但局部细节有差异,需改进数值模拟模型。

6.2 展望

本文虽在简支梁桥车辆冲击荷载动态响应试验研究上取得一定成果,但仍存不足,后续研究需改进完善:一是扩大试验规模,增加不同桥型(如箱梁桥、板梁桥等)、跨径(如10m、30m等)及结构形式(如连续梁桥、拱桥等)桥梁的试验,以提升成果普适性;二是深入探究车辆与桥梁耦合振动问题,构建更精确的车辆—桥梁耦合振动模型,考量车辆动力特性、路面不平平整度、桥梁损伤状态等因素对桥梁动态响应的影响,为桥梁动力设计和评估提供精准理论依据;三是结合无损检测技术(如超声波检测、红外热成像检测等)实时监测评估桥梁在车辆冲击荷载下的损伤,建立桥梁损伤与动态响应的定量关系,为桥梁维护加固提供科学支撑。

参考文献

- [1]刘越,龙金喜,英瑞馨,等.移动荷载作用下简支梁桥挠度冲击系数的数值计算与试验验证[J].北京工业大学学报,2025,51(06):715-724.
- [2]周勇军,赵洋,赵煜,等.基于动载试验荷载效率的简支梁桥冲击系数研究[J].振动与冲击,2021,40(20):207-216.
- [3]冯录熠.基于荷载试验的斜交简支梁桥承载能力研究[J].山西建筑,2025,51(14):152-155.
- [4]谢君利,张军军.荷载试验在简支梁桥检测中的应用研究[J].黄河科技学院学报,2023,25(11):71-74.