

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.015

预制节段拼装梁桥车桥耦合振动分析

胡佳文¹, 李雪峰¹, 束晓宇², 张智越¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省城乡规划设计研究院, 安徽 合肥 230051)

摘要: 预制节段拼装结构具有标准化程度高、建设速度快等优势, 被应用在越来越多的桥梁上, 然而其车桥耦合振动研究较少。文章依据 Runge-Kutta 法在 MATLAB 软件中编写考虑随机路面不平整度的 1/4 车辆模型的求解程序来求解车辆模型, 路面不平整度函数采用三角级数正弦波叠加模拟, 桥梁阻尼采用 Rayleigh 阻尼; 采用约束方程法对胶接缝进行模拟, 利用 ANSYS 求解桥梁模型; 再采用全过程迭代法对车桥耦合模型进行求解, 以桥梁各跨跨中竖向振动响应为指标, 研究路面不平整度、车辆速度、桥梁阻尼比以及胶接缝对预制节段拼装梁桥各跨跨中竖向振动响应的影响。结果表明: 预制节段拼装梁桥的车桥耦合振动响应随路面不平整度的增大而增大, 随桥梁阻尼比的增大而减小, 有无接缝的影响较小; 车辆速度对跨中竖向振动的影响会随着车辆位置的变化而改变且不是单调的; 车桥力的频率也有不可忽视的影响, 且不是单调的。

关键词: 车桥耦合振动; 预制节段; 胶接缝; 路面不平整度; 全过程迭代法

中图分类号: U441.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2026)03-0378-08

Vehicle-bridge coupled vibration analysis of precast segmental bridge

HU Jiawen¹, LI Xuefeng¹, SHU Xiaoyu², ZHANG Zhiyue¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Urban and Rural Planning and Design Institute, Hefei 230051, China)

Abstract: The precast segmental assembly structure has the advantages of high standardization and fast construction speed. It is applied to more and more bridges. However, its vehicle-bridge coupled vibration is rarely studied. According to Runge-Kutta method, the solution program of 1/4 vehicle model considering random pavement roughness was compiled in MATLAB to solve the vehicle model. The sine wave of trigonometric series superposition was used to obtain the pavement roughness function. Bridge damping was simulated with Rayleigh damping. The constraint equation method was used to simulate the epoxy resin joint to solve the bridge model in ANSYS. Then the coupling model was solved with the inter-system iteration method. With the vertical vibration response of each span as the index, the influence of pavement roughness, vehicle speed, bridge damping ratio and epoxy resin joint on the vertical vibration response of each span of precast segmental bridge was studied. The results showed that the vehicle-bridge coupled vibration response increased with the increase of pavement roughness, decreased with the increase of bridge damping ratio, while the presence of epoxy resin joint was of little influence. The effect of vehicle speed on the vertical vibration of each span was not monotonic, but varied with the vehicle position. The frequency of vehicle-bridge force also had a non-negligible effect, and was not monotonic.

Key words: vehicle-bridge coupled vibration; precast segment; epoxy resin joint; pavement roughness; inter-system iteration method

收稿日期: 2023-06-05; **修回日期:** 2023-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278301)

作者简介: 胡佳文(2000—), 男, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

李雪峰(1980—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: hfutlxf@163.com.

0 引言

车辆行驶经过桥梁时,由于车辆自身的质量及行驶过程中的振动会对桥梁产生冲击作用,桥梁结构受到冲击力的作用后会产生振动。当桥梁的振动幅度和频率达到一定限值后,就会影响桥梁结构的耐久性,甚至会导致桥梁结构因疲劳而破坏,造成人员伤亡和财产损失。在车辆影响桥梁的同时,桥梁路面的不平整以及桥梁自身的固有振动也会加剧车辆的振动,这种车桥间的相互作用、相互影响被研究者们称为车桥耦合作用^[1-2]。随着研究的深入,车桥耦合振动分析领域取得了较好的发展。文献[3-7]综述了车桥耦合振动的理论和应用研究进展;文献[8]研究在桥面不平整度激励下,桥梁的响应、车轮的动载以及车辆加速响应,并与现场的试验结果进行比较;文献[9]对谐波叠加模型的建立进行了研究,生成随机路面谱对各级路面不平顺进行模拟,并能较好地适应复杂的路面形状;文献[10]基于实测路面样本研究路面非一致激励;文献[11]基于 Fourier 变换提出具有相关性的路面不平整度样本算法;文献[12]将车辆设定为拥有 3 自由度刚体,建立车桥耦合模型,可对桥梁的应力状态进行评估;文献[13-14]基于桥梁规范提出一组车辆动力模型参数并验证其合理性,并提出用于车桥耦合振动分析的精细化轮胎模型;文献[15-17]将车桥耦合系统拆分为车辆计算模型和桥梁计算模型,通过轮轨关系将二者联系成一个整体,选用分离迭代法求解,进行大跨度钢斜拉桥和连续拱桥组合钢桥的振动分析;文献[18]研究将车辆与桥梁作为整体的耦合求解方法;文献[19]给出基于 Newmark- β 法的详细迭代格式;文献[20]考虑车辆制动以及桥面不平顺的影响,将车辆荷载等效为连续移动力,推导了车桥耦合系统运动方程,分析多跨连续梁的车致振动响应;文献[21]基于有限元软件 ANSYS,使用 APDL 进行二次开发,使用 MASS21 和 COMBIN14 单元来模拟质量与弹簧,利用生死单元法进行瞬态动力分析来模拟车辆过桥的过程,并通过算例验证方法的可行性;文献[22]以鄱阳湖二桥为背景,利用 ANSYS 和 MIDAS 对叠合梁斜拉桥进行车桥耦合振动研究,考虑不同的有限元模型、车辆模型,研究不同车辆横向作用位置、车速、路面等级及车辆制动等对车致振动响应的影响。

由于接缝的存在,预制节段拼装梁桥的车桥

耦合振动会与传统的一体式梁桥有所不同。目前针对预制节段拼装梁桥的车桥耦合振动研究较少,本文对预制节段拼装梁桥的车桥耦合振动进行研究,采用全过程迭代法^[23],编写相应的 APDL 求解程序,以 ANSYS 为主分析程序,进行车桥耦合振动问题的求解。分析路面不平整度、车辆速度、桥梁阻尼比、胶接缝对车桥时程力和桥梁各跨跨中竖向振动响应的影响。

1 车桥耦合系统建立及求解

1.1 车辆模型的建立

本文选用 1/4 车辆模型,如图 1 所示。1/4 车辆模型有 2 个自由度,分别为悬架车轮系统竖向位移和车身竖向位移。

图 1 中: m_v 为车体质量; k_v 为车体和悬架车轮系统弹簧的刚度; c_v 为车体和悬架车轮系统弹簧的阻尼系数; y_v 为车体竖向位移; m_w 为车轮和悬架总质量; k_w 为悬架车轮系统弹簧的刚度; c_w 为悬架车轮系统弹簧的阻尼系数; y_w 为悬架车轮系统竖向位移; y_c 为轮胎和桥面接触点竖向位移。

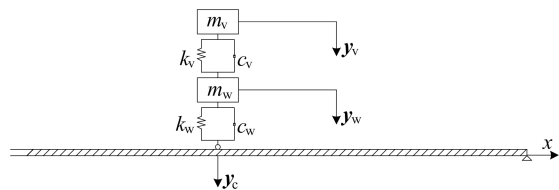


图 1 1/4 车辆模型

运用达朗贝尔原理推导车体和悬架轮胎系统的振动平衡方程,可得车体振动平衡方程为:

$$m_v \ddot{y}_v + c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (1)$$

悬架轮胎系统的振动平衡方程为:

$$m_w \ddot{y}_w + c_w (\dot{y}_w - \dot{y}_c) + k_w (y_w - y_c) - c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) - k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (2)$$

将上述 2 个方程写为矩阵形式:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}_v = \mathbf{F}_v \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix}; \mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v + c_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_w \end{bmatrix}; \mathbf{Y}_v = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -c_w \dot{y}_c + k_w y_c \end{bmatrix}.$$

1.2 桥梁模型的建立

本文的研究对象为一座三跨(3×30 m)体外

预应力单箱单室等截面预制节段拼装箱梁桥,如图 2 所示。整个桥梁由节段箱梁、转向块、横梁、胶接缝、体外预应力筋和支座组成。节段箱梁为 C50 混凝土,使用 SOLID186 单元模拟;转向块、横梁为 C50 混凝土,使用 SOLID185 单元模拟;胶接缝符合 ASTM32B 标准,使用约束方程法模拟;体外预应力为无粘结镀锌钢绞线,使用 LINK180 单元进行模拟;支座为球形支座,使用节点约束进行模拟。

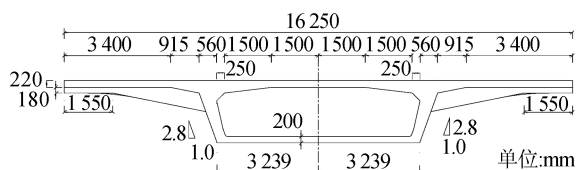


图 2 箱梁横断面图

接缝处有剪力键凹凸槽,划分单元时为了精确描述剪力键的力学行为,使用较高的网格密度,主体箱梁可以使用较低的网格密度。端横梁、中横梁、转向块使用 desize 命令将尺寸控制在 300 以下,箱梁顶板底板腹板用 lsize 命令将尺寸控制在 400 以下,与齿块相连的箱梁使用 desize 命令将尺寸控制在 180 以下。齿块单元尺寸在 180 (非齿块高度方向),总单元数为 109 056 个,其中齿块单元数 50 880 个,箱体单元数 58 176 个。在建立模型时,将凹凸槽前、后 3 倍剪力键高度的部分单独建模和网格划分,并用约束方程法与节段箱梁连接,节段箱梁与转向块、节段箱梁与横梁、剪力键凹槽与凸槽、预应力与转向块和横梁的连接均采用约束方程法。

1.3 路面不平整的模拟

因为路面不平整在车桥耦合振动中起到激励的作用,路面状况越差影响也越大,所以在分析中选用三角级数叠加法对路面不平整进行模拟。三角级数叠加法分为余弦和正弦谐波叠加法。在国家标准《机械振动道路路面谱测量数据报告》(GB/T 7031—2005)的基础上根据正弦谐波叠加法对路面不平整进行模拟。

将频率区间段划分成 N 个小区间段,用每个小区间的中心频率对应的功率谱密度函数近似得到每个小区间的功率谱函数,将各段的正弦波函数叠加,得到随机路面位移函数,通过转化可以得到用路程坐标 x 表示的路面不平整度函数:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi n_{\text{mid-}i} x + \varphi_i),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

其中: A_i 为各小区间段的振幅; φ_i 为正弦波函数相位差; $n_{\text{mid-}i} = f_{\text{mid-}i}/v$, $f_{\text{mid-}i}$ 为第 i 个小区间的中心频率。

1.4 车桥耦合系统求解

本文选用全过程迭代法,车辆系统在 MATLAB 中编程求解,桥梁系统在 ANSYS 软件中建立有限元模型来求解。

全过程迭代法假定桥梁系统是刚性的,以路面不平整度作为激励求解车辆系统的振动响应,得到车辆对桥梁的作用力时程;接着将此作用力时程施加在桥梁系统上,进行求解可以得到桥梁系统的振动响应和桥面的位移时程;然后将位移时程与路面不平整度叠加,作为下一步迭代对车辆系统的激励,再次得到车辆对桥梁的作用力时程;将两次求解得到的作用力时程的误差作为判断是否收敛的标准,若误差小于收敛标准,则计算结束,若误差大于收敛标准,则进入下一步迭代,直到满足收敛标准。

全过程迭代法对于车辆和桥梁 2 个单独的系统采用无条件收敛的积分方式,即可保证各个计算步骤的收敛,然而对于 2 个子系统间的宏观迭代,却并非无条件收敛,也可能出现迭代步幅值逐渐增大的现象。但由于每次迭代都可以得到系统的响应时程,较容易利用人工干预的方法使计算过程最终收敛。全过程迭代法的优点在于:车辆和桥梁系统的计算是完全分离的,这样有助于用最适合的方法分别求解桥梁和车辆子系统,适用于多系统和复杂结构的求解;另外,全过程迭代法比分离迭代法的计算次数要少,计算的效率更高^[22]。

2 桥梁车桥耦合振动分析

2.1 静力与动力车桥耦合振动分析对比

将车辆荷载施加在桥梁不同位置进行静力分析,将结果与动力分析结果进行比较。耦合振动分析工况为车速 30 m/s,路面不平整度 B 级,桥梁阻尼比 0.03。

静力分析和动力分析得到的各跨跨中竖向位移,位移变化反映振动响应,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,动力分析与静力分析总体跨中位移趋势是保持一致的,由于动力分析车桥力随时间变化,动力分析结果会基于静力分析结果上下波动,位移响应最大值会增大,即车桥耦合振动对桥梁结构的不利影响。

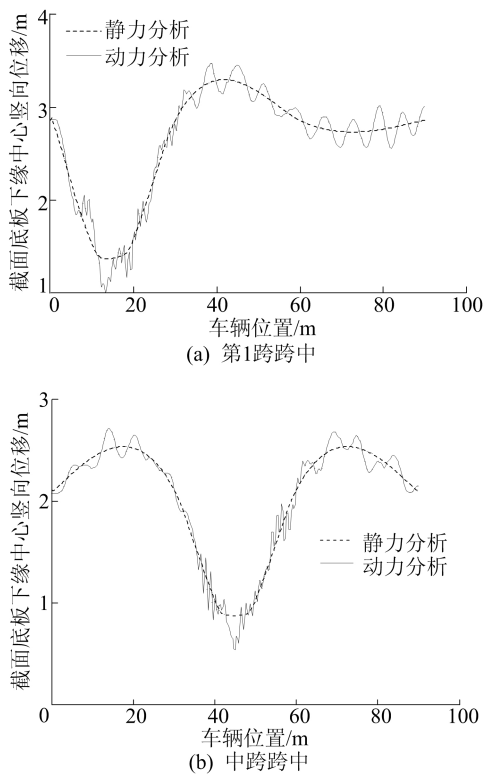


图 3 静力和动力分析跨中竖向位移

2.2 不同路面不平整度下车桥耦合振动分析

路面不平整度是车桥耦合振动的激励因素之一,路面不平整的幅度越大,对振动的激励也越大。本文采用 A 级、B 级、C 级路面 3 种工况来进行研究,车辆速度选用 10 m/s,桥梁阻尼比选用 0.03。在不同的路面不平整度下求解车辆的振动响应,得到不同的车桥时程力,进而得到不同的桥梁振动响应。路面不平整度对车桥时程力的影响如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着路面不平整度由 A 级变到 C 级,车桥力的变化幅度也越来越大。在路面不平整度为 A 级时,车辆行驶至 76.8 m 处的车桥力最大,为 510 537 N;车辆行驶至 76.5 m 处车桥力最小,为 423 166 N;前、后变化幅度为 87 371 N。在路面不平整度为 B 级时,车辆行驶至 76.8 m 处的车桥力最大,为 558 421 N,车辆行驶至 76.5 m 处的车桥力最小,为 383 604 N;变化幅度为 174 817 N,是 A 级的 2 倍。在路面不平整度为 C 级时,车辆行驶至 76.8 m 处的车桥力最大,为 654 233 N;车辆行驶至 76.5 m 处的车桥力最小,为 304 547 N;前、后变化幅度为 349 686 N,是 A 级的 4 倍。原因是 1/4 车辆模型形成的车桥力为悬架车轮系统间弹簧的阻尼力和弹性力的合力,弹簧的阻尼力与弹簧两端的速度差有关,弹性力与弹簧的伸长量有关。路面不平整度的变化越大,弹簧的伸长量变化也越大,进而增大了弹性力的峰值,导致车桥力的峰值增加。

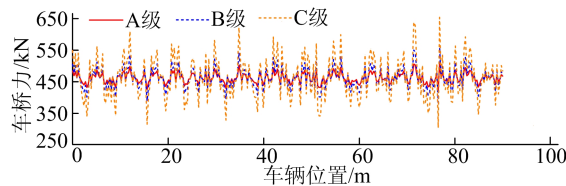


图 4 路面不平整度对车桥力的影响

不同路面不平整度下,各跨跨中的竖向位移最大值、最小值以及对应的车辆行驶位置的数据见表 1 所列。

表 1 不同路面不平整度下各跨跨中竖向位移响应最值及其对应的车辆位置

不平整度	统计值	第 1 跨跨中		中跨跨中		第 3 跨跨中	
		竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m
A 级	最大值	3.348	45.3	2.677	17.7	3.309	49.8
	最小值	1.240	12.3	0.765	42.6	1.126	72.0
B 级	最大值	3.437	45.3	2.812	17.7	3.369	49.8
	最小值	1.151	12.3	0.644	42.6	0.877	72.0
C 级	最大值	3.614	45.3	3.081	17.7	3.488	49.8
	最小值	0.925	17.4	0.401	42.6	0.379	72.0

由表 1 可知,除了第 1 跨跨中振动达到最小值时车辆的位置不同,其他工况下各跨中振动达到最值时车辆的位置全都相同,这说明不同的路面不平整度几乎不会影响到各跨跨中竖向位移响应达到最值时车辆的位置。3 种工况下车辆的速度相同,因为路面不平整度控制了正弦波函数的

相位差相同,其对桥梁的激振频率是相同的,所以桥梁的振动仅与车桥力的大小有关。车桥力变化的幅度越大,桥梁的振动幅度也越大,而桥梁的整体振动趋势是相同的。

2.3 不同车辆速度下车桥耦合振动分析

路面不平整度为 B 级、桥梁阻尼比为 0.03

时,将不同的车辆速度(10、20、30 m/s)代入 MATLAB 程序中,求解车辆的振动响应,得到不同的车桥时程,如图 5 所示,进而得到不同的桥梁振动响应,结果如图 6 所示。

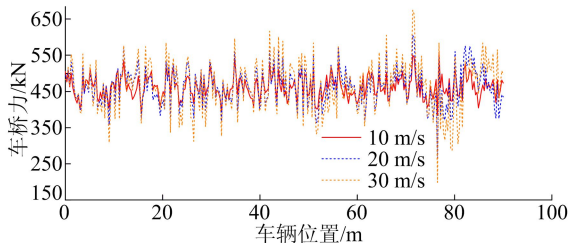
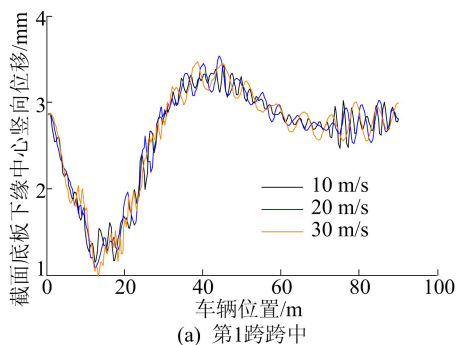
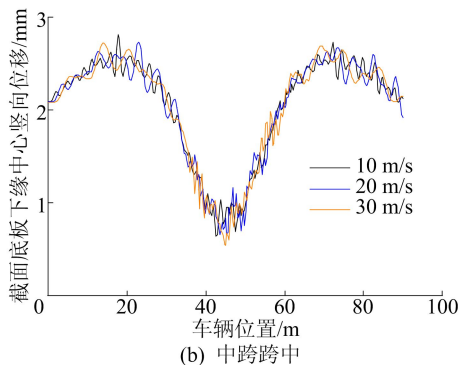


图 5 车辆速度对车桥力的影响



(a) 第1跨跨中



(b) 中跨跨中

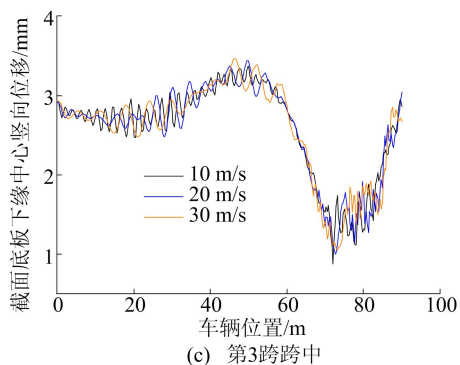


图 6 车辆速度对跨中竖向振动的影响

由图 5 可知,随着车辆速度的增加,车桥力的变化幅度也越来越大。主要原因是车辆速度的增大会使轮胎沿竖直方向获得的速度增大,进而使弹簧两端速度差增大,弹簧也会储存更多的能量,即伸长压缩量会增加,导致阻尼力和弹性力的峰值都会增加,最终使车桥力的变化幅度增加。

不同速度下各跨跨中竖向位移响应最值以及对应的车辆行驶位置见表 2 所列。表 2 中的数据受预应力、自重、二期荷载的影响,最值数据反映的是车桥耦合振动中桥梁振动的幅度。

从表 2 可以看出,增大车辆行驶速度虽然可以增大车桥力变化的范围,即增加激振力的大小,但未必可以增大桥梁整体的振动幅度。这种现象在图 6 中对 10、30 m/s 工况的比较中较为明显。产生这种现象的原因是在外力作用下的振动,其振幅大小不仅与激振力的大小有关,而且与激振力的频率有关,激振力的频率与结构固有频率越接近,则共振的现象越明显,结构的振幅也会相应增大。

表 2 不同车辆速度下各跨跨中竖向位移响应最值及其对应的车辆位置

车辆速度/ (m/s)	统计值	第 1 跨跨中		中跨跨中		第 3 跨跨中	
		竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m
10	最大值	3.437	45.3	2.812	17.7	3.369	49.8
	最小值	1.151	12.3	0.644	42.6	0.877	72.0
20	最大值	3.541	44.1	2.733	22.8	3.441	49.8
	最小值	1.079	12.6	0.656	43.5	0.999	72.6
30	最大值	3.469	38.7	2.721	13.8	3.463	46.5
	最小值	0.986	13.2	0.540	45.0	1.047	73.2

2.4 不同桥梁阻尼下车桥耦合振动分析

阻尼对车桥耦合振动也有一定影响,阻尼越大,对桥梁振动的削弱作用也越大。本文设置车辆速度为 10 m/s、路面不平整度为 B 级,采用桥梁阻尼比为 0.03、0.05、0.08 这 3 种工况来研究

其对车桥耦合作用的影响。

将不同的质量矩阵系数和刚度矩阵系数代入 ANSYS 软件中,求解桥梁的振动响应,由于阻尼会影响桥梁振动和下一步迭代车桥时程力的计算,得到不同的桥梁振动响应,桥梁阻尼对车桥时

程力的影响如图 7 所示。

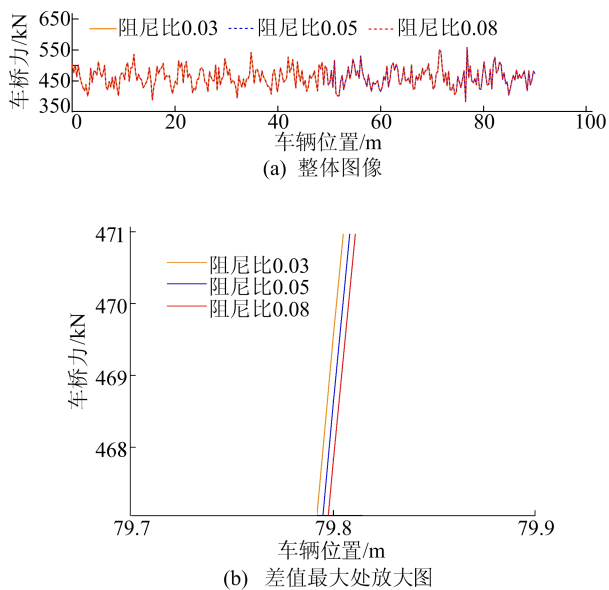


图 7 桥梁阻尼比对车桥力的影响

从图 7 可以看出:随着桥梁阻尼比的增大,车桥力的变化很小;当桥梁阻尼比为 0.03 时,车桥

力最大为 558 421 N,最小为 383 603 N;当桥梁阻尼比为 0.05 时,车桥力最大为 558 626 N,最小为 383 633 N;当桥梁阻尼比为 0.08 时,车桥力最大为 558 759 N,最小为 383 646 N。车桥力最值之间的差值最大为 205 N,非最值之间的差值最大为 869 N,差值与车桥力相比可以忽略,因此桥梁阻尼比的变化对车桥力几乎没有影响。

不同桥梁阻尼比下,各跨跨中竖向位移响应最值及其对应车辆行驶位置见表 3 所列。表 3 中的数据受预应力、自重、二期荷载的影响。由表 3 可知,随着桥梁阻尼比的增大,各跨跨中竖向位移响应的最大值在减小,最小值在增大,且跨中位移响应的变化幅度在减小。从以上对车桥力以及跨中位移响应的分析可以得出,阻尼增大会削弱桥梁各跨跨中的竖向振动,在车辆行驶至非检测跨时削弱较多。该影响不是通过影响车桥力来实现的,而是通过改变桥梁自身的振动特性来实现的。在实践中,可以通过人为增大桥梁阻尼的方法来减小车桥耦合振动。

表 3 不同阻尼比下各跨跨中竖向位移响应最值及其对应的车辆位置

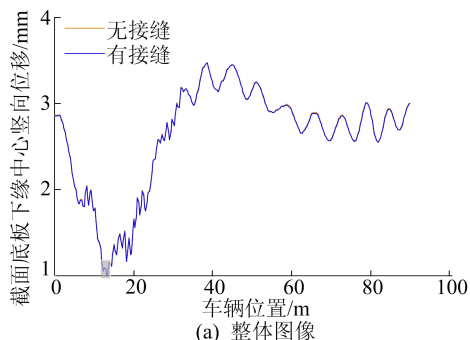
阻尼比	统计值	第 1 跨跨中		中跨跨中		第 3 跨跨中	
		竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m	竖向位移/mm	车辆位置/m
0.03	最大值	3.437	45.3	2.812	17.7	3.370	49.8
	最小值	1.151	12.3	0.644	42.6	0.880	72.0
0.05	最大值	3.401	45.3	2.784	17.7	3.340	49.8
	最小值	1.156	17.4	0.652	42.6	0.900	72.0
0.08	最大值	3.377	43.2	2.747	17.7	3.330	47.7
	最小值	1.158	17.4	0.675	42.6	0.930	72.0

2.5 胶接缝对车桥耦合振动的影响

与传统的桥梁不同,预制节段拼装桥梁是先将桥梁的每一跨划分为许多小的节段,再通过预应力和接缝进行连接,接缝是其比较特殊的构造,可以起到传力和限位的作用。本文建立了无胶接缝和有胶接缝 2 种模型,在设置车速为 30 m/s、路面平整度为 B 级、桥梁阻尼比为 0.03 的工况下,研究胶接缝对车桥耦合振动的影响,如图 8~图 10 所示。

由图 8~图 10 可知:考虑胶接缝与不考虑胶接缝计算出的不同跨中的振动情况非常相似;第 1 跨跨中截面底板下缘中心处竖向位移差值最大处在车辆行驶至 12.9 m 处,差值为 0.013 mm;中跨跨中截面底板下缘中心处竖向位移差值最大处在车辆行驶至 64.5 m 处,差值为 0.009 mm;第 3 跨跨中截面底板下缘中心处竖向位移差值最

大在车辆行驶至 85.8 m 处,差值为 0.015 mm。与桥梁的振动幅度相比都可以忽略不计,说明胶接缝对车桥耦合振动的影响很小。主要原因为桥梁的振动是车辆系统与桥梁系统相互作用的宏观体现,桥梁的接缝属于对整个桥梁局部结构的改进。



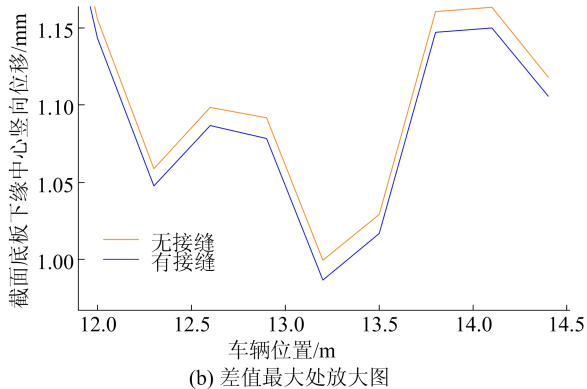


图 8 胶接缝对第 1 跨跨中竖向位移的影响

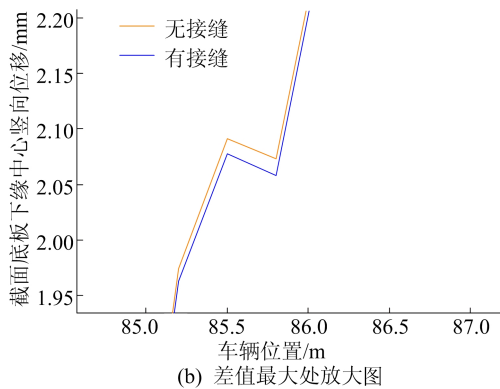


图 10 胶接缝对第 3 跨跨中竖向位移的影响

预制节段拼装梁桥与传统梁桥整体的传力机制是相同的,在正常承载阶段,接缝尤其是胶接缝对桥梁整体的刚度分布影响很小,因此二者表现出的振动响应差别很小。

3 结 论

1) 车桥耦合作用力会随着路面不平整度和车辆速度的增大而增大,桥梁跨中竖向振动响应会随着阻尼的增大而减小,有无接缝的影响很小。在实践中,分析预制节段拼装梁桥在单车荷载下车桥耦合振动产生挠度时,可以用传统的整体式桥梁模型,不考虑胶接缝的影响。

2) 车辆速度的增大对桥梁跨中竖向振动响应的影响不是单调的,原因在于车辆速度的变化同时改变了车桥力的变化幅度大小和频率;车桥力的频率对于跨中竖向振动响应也会有较大的影响,且不是单调的。

3) 在控制路面不平整度函数相位差相同的情况下,不同路面平整度引起的跨中竖向振动响应的变化趋势是基本保持一致的;桥梁阻尼的影响不是通过影响车桥力来实现,而是通过改变桥梁自身的振动特性来实现。

4) 在路面不平整度、车辆速度以及桥梁阻尼比中,路面不平整度对各跨跨中竖向振动响应造成的影响最大,桥梁阻尼比造成的影响最小;在施工过程中,应加强对路面不平整度的控制。

5) 有无接缝对车桥力和桥梁振动响应影响很小,即预制节段拼装梁桥和传统一体式梁桥在单车荷载下各跨跨中竖向振动响应差别很小。

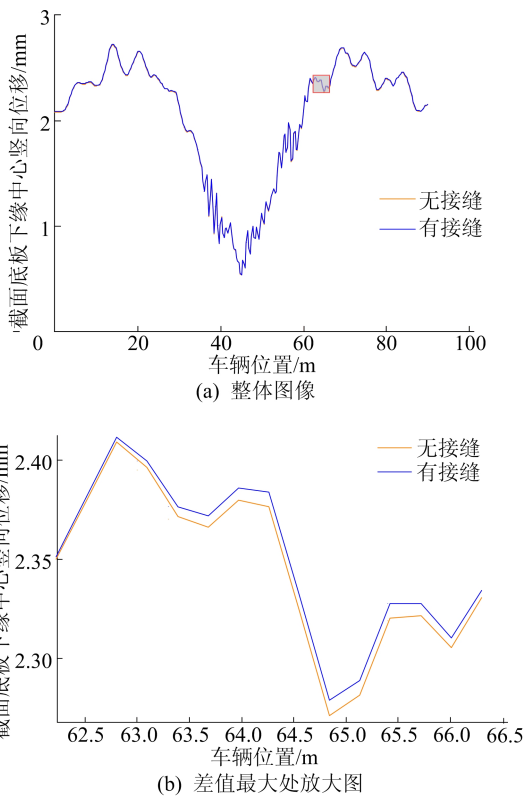
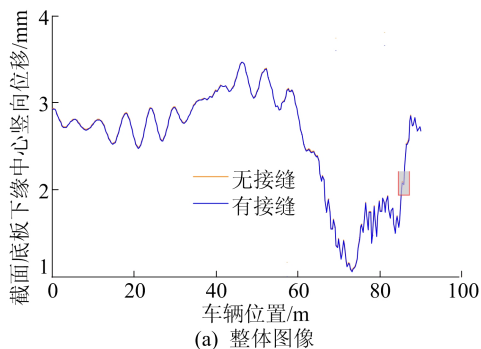


图 9 胶接缝对中跨跨中竖向位移的影响



[参 考 文 献]

[1] 施颖,陈伟,周帅,等.公路与城市桥梁车桥耦合振动研究发展综述[J].中国水运(下半月),2013,13(2):4.
 [2] 樊小虎,吴红林.车桥耦合振动研究方法综述[J].科学技术与工程,2009,9(14):4090-4099.
 [3] 邓露,何维,俞扬,等.公路车桥耦合振动的理论 and 应用研究进展[J].中国公路学报,2018,31(7):38-54.
 [4] 王宁波,任伟新,肖祥.列车桥梁耦合振动研究综述[J].力

- 学进展,2012,42(5):634-643.
- [5] 杨建荣. 车桥耦合作用下公路桥梁局部振动研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [6] 李小珍,张黎明,张洁. 公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J]. 工程力学,2008,25(3):230-240.
- [7] YANG Y B, LIN C W. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 284(1/2):205-226.
- [8] KIM C W, KAWATANI M, KIM K B. Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness[J]. Computers & Structures, 2005, 83(19/20):1627-1645.
- [9] 常志权,罗虹,褚志刚,等. 谐波叠加路面输入模型的建立及数字模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(12):5-8.
- [10] 韩万水,马麟,院素净,等. 路面粗糙度非一致激励对车桥耦合振动系统响应影响分析[J]. 土木工程学报,2011,44(10):81-90.
- [11] OLIVA J, GOICOLEA J M, ANTOLÍN P, et al. Relevance of a complete road surface description in vehicle-bridge interaction dynamics[J]. Engineering Structures, 2013, 56:466-476.
- [12] CHU K H, DHAR C L, GARG V K. Railway-bridge impact; simplified train and bridge model[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(9):1823-1844.
- [13] 邓露,段林利,何维,等. 用于我国车桥耦合振动研究的车桥动力分析模型[J]. 中国公路学报,2018,31(7):92-100.
- [14] 邓露,凌天洋,何维,等. 用于公路车桥系统振动分析的精细化轮胎模型[J]. 中国公路学报,2022,35(4):108-116.
- [15] 李小珍,强士中,沈锐. 利高速列车大跨度钢斜拉桥空间耦合振动响应研究[J]. 桥梁建设,1998(4):65-68.
- [16] 李小珍,王应良,强士中. 大跨度连续拱桁组合钢桥空间振动分析[J]. 振动与冲击,1999,18(4):35-39.
- [17] 李小珍,喻璐,强士中. 不同主梁竖曲线下大跨度斜拉桥的车桥耦合振动分析[J]. 振动与冲击,2003,22(2):43-46.
- [18] CAI C S, SHI X M, ARAUJO M, et al. Effect of approach span condition on vehicle-induced dynamic response of slab-on-girder road bridges[J]. Engineering Structures, 2007, 29(12):3210-3226.
- [19] 何维. 中小跨径梁桥动力冲击系数研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [20] LAW S S, ZHU X Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle[J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 282(3/4/5):805-830.
- [21] 陈卓. 基于 ANSYS 二次开发的车桥动力响应方法研究[J]. 铁路计算机应用,2007(6):8-10.
- [22] 李帅. 鄱阳湖二桥结构动力特性及车致振动响应分析[D]. 南昌:华东交通大学,2020.
- [23] 张楠,夏禾. 基于全过程迭代的车桥耦合动力系统分析方法[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):32-38.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 377 页)

- [18] ROMAN E, ROBERTS I, LIDHOLT K, et al. Overexpression of UDP-glucose dehydrogenase in *Escherichia coli* results in decreased biosynthesis of K5 polysaccharide[J]. Biochemical Journal, 2003, 374:767-772.
- [19] GUO L B, ZHU C Y, WU Y B, et al. A novel chondroitin AC lyase from *Pedobacter xixiisoli*: cloning, expression, characterization and the application in the preparation of oligosaccharides[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2021, 146:109765.
- [20] DONNENBERG M S, KAPER J B. Construction of an eae deletion mutant of enteropathogenic *Escherichia coli* by using a positive-selection suicide vector[J]. Infection and Immunity, 1991, 59(12):4310-4317.
- [21] 李文静,杨桂霞,周贤轩,等. 改造细菌基因组的双重选择系统的构建[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(12):1699-1704.
- [22] YU Y, YE H, WU D, et al. Chemoenzymatic quantification for monitoring unpurified polysaccharide in rich medium[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(18):7635-7645.
- [23] 陈婷婷,李文静,杨桂霞,等. 化学酶法对硫酸软骨素类多糖的定量分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(7):991-996.
- [24] WANG Z Y, LY M, ZHANG F M, et al. *E. coli* K5 fermentation and the preparation of heparosan, a bioengineered heparin precursor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2010, 107(6):964-973.
- [25] RAINSFORD K D. Importance of pharmaceutical composition and evidence from clinical trials and pharmacological studies in determining effectiveness of chondroitin sulphate and other glycosaminoglycans; a critique[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2009, 61(10):1263-1270.
- [26] ARREDONDO-ALONSO S, BLUNDELL-HUNTER G, FU Z, et al. Evolutionary and functional history of the *Escherichia coli* K1 capsule[J]. Nature Communications, 2023, 14(1):32328-32333.
- [27] YU Y, GONG B, WANG H, et al. Chromosome evolution of *Escherichia coli* Nissle 1917 for high-level production of heparosan[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2023, 120(4):1081-1096.

(责任编辑 闫杏丽)