

文章编号:1673-9469(2024)06-0079-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.012

车桥耦合振动对曲线钢混组合梁桥的影响

陈博宇^{1,2}, 高非凡^{1,2}, 李烁威³, 张运波^{1,2*}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 中铁建安工程设计院有限公司, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对曲线桥上部结构在车辆作用下受弯扭耦合影响的现象, 应用有限元软件 ANSYS 和动力学软件 UM, 对曲线桥跨中截面位移与应力在车桥耦合作用下的响应情况进行分析研究, 结果表明: 位移与应力响应均在车辆行驶至该跨跨中时达到峰值, 在车辆行驶至相邻跨跨中时达到相反峰值; 径向位移与车速成正比, 车速发生改变, 除径向位移外的其他位移与应力响应曲线的整体趋势基本不变, 响应峰值与速度的关系不成比例; 内外偏载使跨中径向位移向偏载侧反向偏移, 其余位移和应力响应的整体趋势基本不受偏载影响; 不平顺等级的提升, 桥梁上部结构响应的波动幅值均有提升。

关键词: 车桥耦合; 曲线桥; 钢混组合桥; 上部结构

中图分类号: U441

文献标识码: A

Influence of Vehicle-Bridge Coupled Vibrations on Curved Steel-Concrete Composite Girder Bridges

CHEN Boyu^{1,2}, GAO Feifan^{1,2}, LI Shuwei³, ZHANG Yunbo^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. China Railway Jian'an Engineering Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: In response to the phenomenon of bending and torsional coupling of the upper structure of a curved bridge under vehicle load, the displacement and stress responses of the cross-section at the midspan of the curved bridge under the combined action of the vehicle and the bridge were analyzed and studied using ANSYS finite element software and UM dynamic software. The results show that the displacement and stress responses reach their peak values when the vehicle travels to the midspan of the span, and reach the opposite peak values when it travels to the midspan of the adjacent span. The radial displacement is proportional to the vehicle speed, and the trend of other displacements and stress responses other than the radial displacement remains unchanged, while the peak values of the responses are not proportional to the speed. The lateral load causes the radial displacement at the midspan to shift in the opposite direction of the load, and the overall trend of the other displacements and stress responses is basically unaffected by the lateral load. The increase in the roughness grade of the road surface causes an increase in the amplitude of the fluctuations of the upper structure response.

Key words: vehicle-bridge coupling; curved bridge; steel-concrete composite bridge; superstructure

收稿日期: 2023-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778377)

作者简介: 陈博宇(2000-), 男, 河北固安人, 硕士研究生, 从事大跨度桥梁施工控制及结构理论方面的研究。

* 通信作者: 张运波(1971-), 男, 河北馆陶人, 博士, 副教授, 从事大跨度桥梁施工控制及结构理论方面的研究。

曲线钢混组合连续桥具有自重低、刚度大、施工速度快等优点,能够很好地适应地形与线路的要求,因而在城市高架、跨越河渠等线路中有广泛的应用^[1]。随着车辆的增多以及车载的增大,车辆作用在桥梁上的冲击荷载逐渐提升,这对梁体结构产生了一定的影响^[2]。相较于一般直线桥,曲线桥更易受弯扭耦合影响^[3-4],其受力较复杂,所以,研究曲线钢混组合连续桥在车桥耦合作用下的桥梁上部结构动态响应具有重要的工程意义。

通过车桥耦合得到的桥梁响应给桥梁的设计研究提供了很多的理论依据,唐云伟等^[5]对一三跨连续钢构桥进行车辆荷载作用下的仿真计算,结果表明,仿真结果与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中横向力系数吻合,但对冲击效应考虑不足。Wang等^[6]提出了模态叠加法,大幅提升了计算效率,在车桥耦合动力学研究上得到了广泛应用。Guo等^[7]对大跨度曲线弯梁桥的位移、弯矩和剪力冲击系数及其关系做了理论预测,并利用7自由度车辆模型和曲线梁模型对理论结果进行了验证。张霞等^[8]通过建立车辆-桥面铺装耦合模型,探究了单车、多车与偏载工况对桥面响应的影响,并创造性地将宏观世界的车-桥耦合与微观世界中的轮胎-路面接触关系联系起来。林玉森等^[9]以三跨连续箱梁桥为研究对象,建立了桥梁模型和车辆模型从而组成车桥耦合动力模型,并对车辆荷载作用下桥梁结构的冲击系数进行研究分析。

目前车桥耦合振动研究中,对直线桥研究较多,对曲线桥研究少,曲线桥梁体在车桥耦合作用下受力较为复杂。因此,本文建立某曲线钢混组

合连续梁桥精细化有限元模型,并根据某实际车辆建立其多刚体振动模型。基于模态叠加法基本原理,建立车辆、曲线桥耦合的动力模型,使车辆在不同工况下沿既定曲线车道行驶。分析了在车辆荷载作用下车速、路面不平顺及偏载情况对曲线钢混组合连续梁上部结构的影响,为同类型桥梁的设计及运行状态下的维护提供参考。

1 车桥耦合振动模型

1.1 桥梁模型

某公路曲线钢混组合三跨连续梁桥跨径布置为55 m+85 m+55 m。桥梁第一跨位于曲率半径 $R=110$ m的缓和曲线上,第二、三跨位于 $R=300$ m的圆曲线上,桥梁部分截面如图1(a)所示。

该曲线桥支座具体的布置形式如图1(b)所示。针对车辆作用下曲线桥的受力特点,对该桥上部结构中跨和边跨的跨中截面底板位移、底板应力及顶板应力进行计算分析,具体测点如图1(c)(d)所示。

根据横隔板位置、预应力筋位置、底板腹板厚度变化位置及竖向加劲肋位置,将主梁划分为210个截面,在每个截面建立沥青层、混凝土调平层、混凝土梁层、混凝土#0块、底板及其加劲肋、钢腹板和横隔板。其中,混凝土梁层内设置预应力筋,预应力筋采用杆单元模拟,与混凝土梁单独建模,将杆单元与实体单元耦合连接,施加初应变模拟钢绞线的预应力;钢板采用壳单元模拟,壳单元与实体单元之间采用耦合方式建立连接。模型共建立39 690个关键点,生成126 580个节点和114 332个

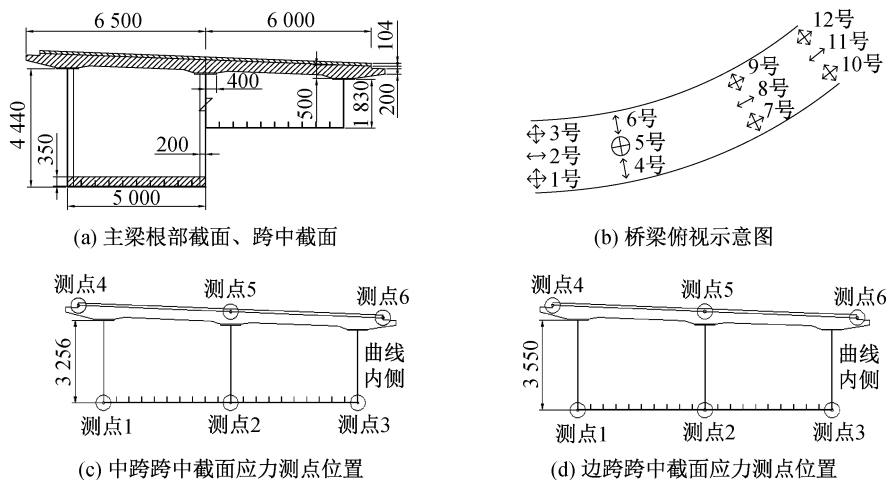


图1 桥梁横截面、俯视图及截面测点图(单位:mm)

Fig. 1 Bridge cross section, top view and cross section measurement points(unit:mm)

表 1 主梁材料及单元属性

Tab. 1 Main beam material and unit properties

| 结构组成 | 厚度/mm | 材料 | 单元类型 | 结构组成 | 厚度/mm | 材料 | 单元类型 |
|------|--|--------|----------|---------|-------------|-----|---------|
| 钢底板 | 30/40 | Q345qD | SHELL181 | 沥青铺装 | 104 | SBS | SOLID65 |
| 钢腹板 | 20/25 | Q345qD | SHELL181 | 调平层 | 80 | C50 | SOLID65 |
| 钢横隔板 | 28.4 | Q345qD | SHELL181 | 混凝土顶板 | 200~420 | C50 | SOLID65 |
| 钢承托 | 40 | Q345qD | SHELL181 | 混凝土#0 块 | 2 230~4 440 | C50 | SOLID65 |
| 加劲肋 | 20 | Q345qD | SHELL181 | 增强区底板 | 350 | C50 | SOLID66 |
| 预应力筋 | 14 或 19 根每束,共 46 束,采用直径为 15.2 mm 钢绞线, LINK8 单元 | | | | | | |

单元。主梁材料及单元属性见表 1,曲线桥全桥有限元模型见图 2。

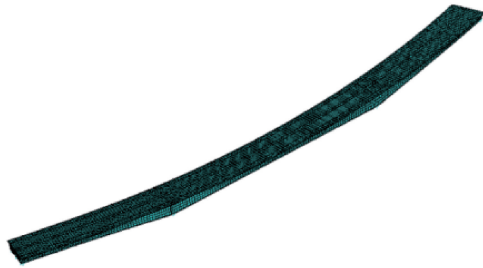


图 2 曲线桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of curved bridge

1.2 车-桥耦合的实现

本文将 ANSYS 桥梁模型的模态信息输入多体动力学软件 UM 中,采用 Park 积分法求解动力方程,实现对车桥耦合系统的快速求解。本文选用三轴重型车辆^[10],建立 13 自由度车辆模型,考虑车体的浮沉、俯仰、侧倾 3 个自由度以及 10 个车轮的竖向振动。车桥耦合模型见图 3。

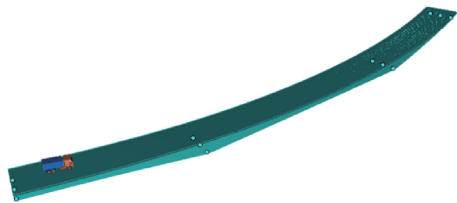


图 3 车桥耦合模型

Fig. 3 Vehicle-bridge coupling model

根据达朗贝尔原理得出车辆振动方程^[11]:

$$M_v \ddot{Z}_c(t) + C_v \dot{Z}_c(t) + K_v Z_c(t) = F_{b-v} + F_g \quad (1)$$

式中: M_v 、 C_v 、 K_v 分别表示车辆的质量、阻尼、刚度矩阵; Z_c 表示车体构件的位移向量, mm; F_{b-v} 表示轮胎与路面之间的相互作用接触力, kN; F_g 表示车辆的重力矢量, kN。

桥梁在车辆作用下的运动方程可以用下式表示^[12]:

$$M_b \ddot{X}_b(t) + C_b \dot{X}_b(t) + K_b X_b(t) = F_{b-v}(t) \quad (2)$$

式中: M_b 、 C_b 、 K_b 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; $F_{b-v}(t)$ 为车辆作用在桥面的荷载, kN。桥梁的阻尼按照 Rayleigh 阻尼考虑,即刚度和阻尼的线性组合,阻尼比 ξ 取 5%。

1.3 路面不平顺度

一般认为路面不平顺度是稳定而均匀的,通常采用功率谱密度来表示,我国 GB/T 7031—2005 标准中规定了模拟不平顺度的功率谱密度公式^[13]:

$$G_d(n) = G_d(n_0) (n/n_0)^{-\omega} \quad (3)$$

式中: n 为单位长度的波数; n_0 为单位长度标准波数; $G_d(n_0)$ 为标准 0 波数对应的不平顺度系数; ω 为频率指数,决定路面谱的频率结构。

国际标准化组织 (ISO) 将路面平整度分为 A (非常好)—E (非常差) 5 个等级,我国《车辆振动输入—路面平度表示方法》(GB 7031—86) 中,对路面平整度等级做出了如表 2 所示规定。

表 2 桥面不平顺度系数

Tab. 2 Inadequacy factor of bridge deck

| 桥面等级 | 下限 | 几何平均值 | 上限 |
|------|---------|---------|---------|
| A | 8 | 16 | 32 |
| B | 32 | 64 | 128 |
| C | 128 | 256 | 512 |
| D | 512 | 1 024 | 2 048 |
| E | 2 048 | 4 096 | 8 192 |
| F | 8 192 | 16 384 | 32 768 |
| G | 32 768 | 65 536 | 131 072 |
| H | 131 072 | 262 144 | 524 288 |

本桥桥面铺装层服役时间较长,通过实地考察,发现该桥桥面铺装情况极不理想,路面不平顺等级较高,磨损严重,并且伴随沥青层被剥离而出现的较大坑槽,有必要针对不同路面不平顺度对桥梁响应进行分析,故采用 A、B、C 三个不平顺度对桥面进行模拟。

2 底板位移响应

将 ANSYS 桥梁模型导入动力学软件 UM 中完成车桥耦合的模拟,调整车辆行驶轨迹,使其可以在不同车道行驶,在 UM 中设置车速、车重及桥面不平顺度等工况,选取测点及所需计算的位移及切向应力,完成车辆在不同工况下在桥梁上的行驶,随后直接生成各测点在不同工况下随行驶距离的位移及切向应力响应曲线。

切向位移正方向为车辆行进方向,由图 4 (a)一(c)测点切向位移可知,车辆速度对中跨跨中测点切向位移影响不大,在不同速度下,三个测点各自的切向位移响应曲线相同,峰值基本一致;当车辆行驶在第一跨时,测点位移方向与车辆行进方向相反,车辆行驶在中跨时,测点向车辆前进方向移动,车辆位于中跨跨中时,测点位移最大。车辆位于第三跨时,测点位移较小。

径向位移正方向为指向曲线外侧方向,由图 4 (d)一(f)测点径向位移可知,行车速度对中跨跨中径向位移具有一定影响,行车速度越大测点径

向位移越大;车辆行驶在边跨时,测点向曲线内侧移动;车辆行驶在中跨时,测点向曲线外侧移动。

竖向位移正方向为竖直向上方向,由图 4 (g)一(i)测点竖向位移响应可以得出如下结论:车速对该桥中跨跨中测点竖向位移影响较小,不同车速下的竖向位移响应曲线趋势基本一致;不同车速下,响应曲线的峰值有一定差别,即动力振动幅值不同,幅值与车速并不是简单的正相关或负相关的关系。

图 5 为在不同不平顺度工况下底板位移响应曲线,可以看出,随着不平顺等级的提升,三种位移响应逐渐剧烈,切向位移响应与竖向位移响应波动更为明显;桥面等级为 C 级时,在车辆行驶至第三跨时,三种应力响应曲线的波动性明显增强,即在该不平顺下车桥耦合系统发生了一定程度的共振。

图 6 为不同偏载工况下的曲线钢混组合梁桥的底板位移时程曲线,由图 6(a)一(c)测点切向位移可知,车辆偏载对中跨跨中测点切向位移基本无影响,三个测点各自的切向位移在偏载工况

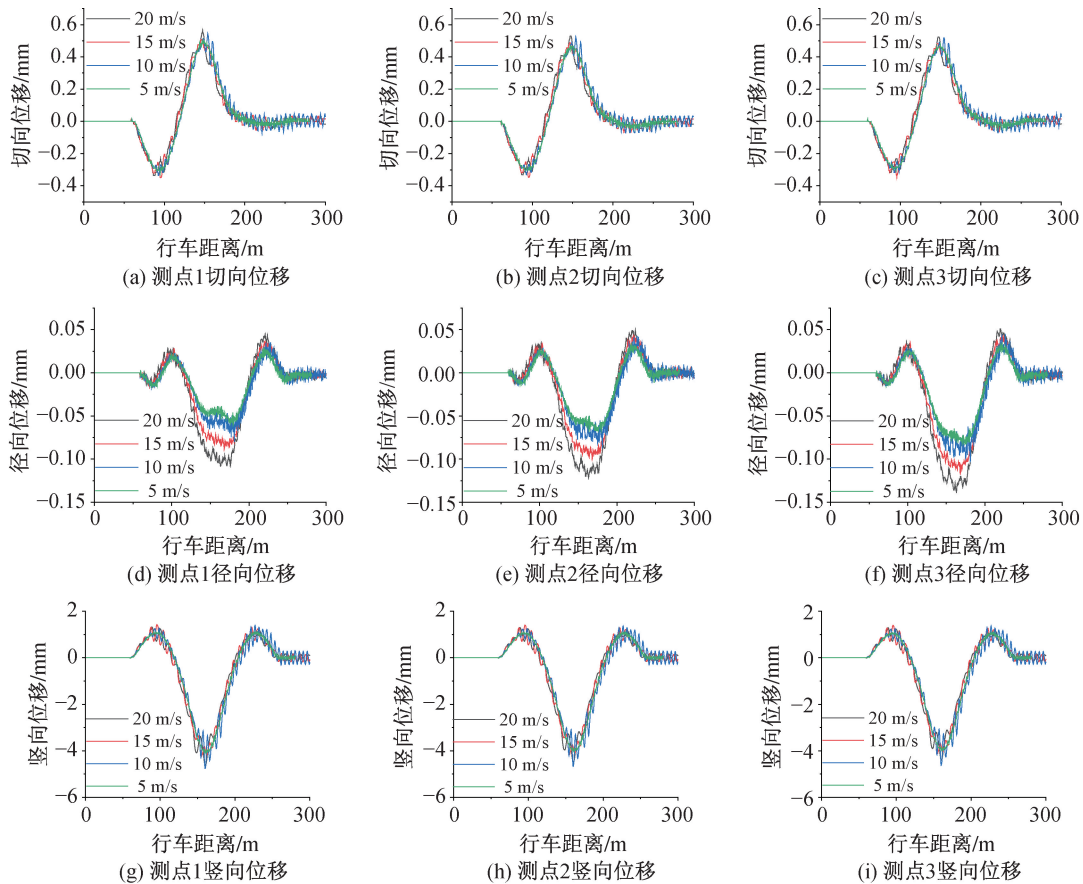


图 4 不同车速下底板位移响应

Fig. 4 Displacement response of the undercarriage at different speeds

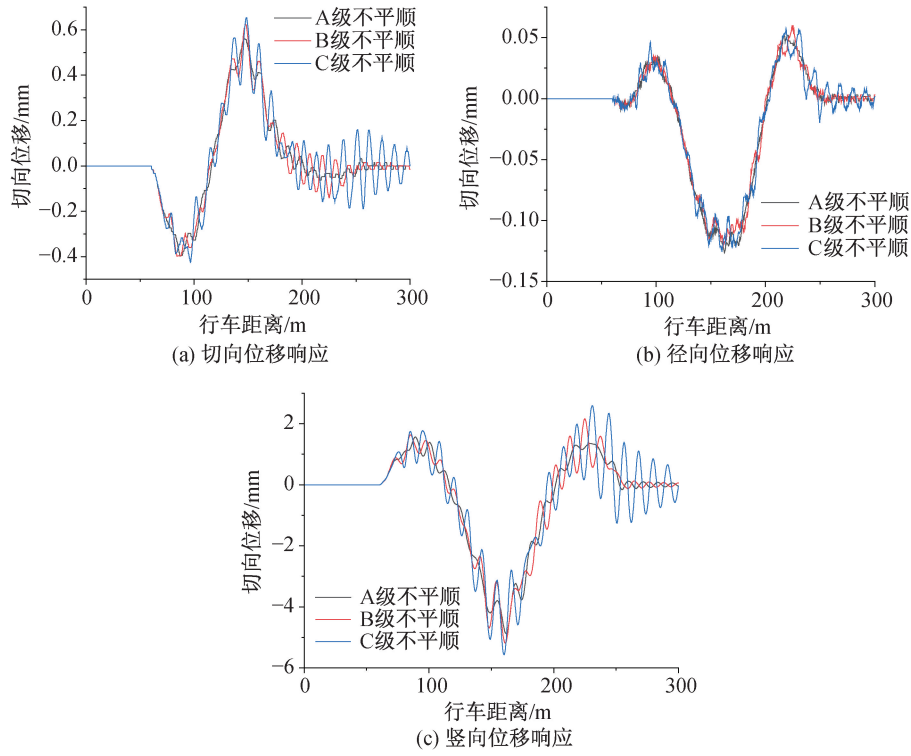


图 5 不同桥面不平顺度激励下底板位移响应

Fig. 5 Displacement response of floor under excitation of different bridge deck irregularities

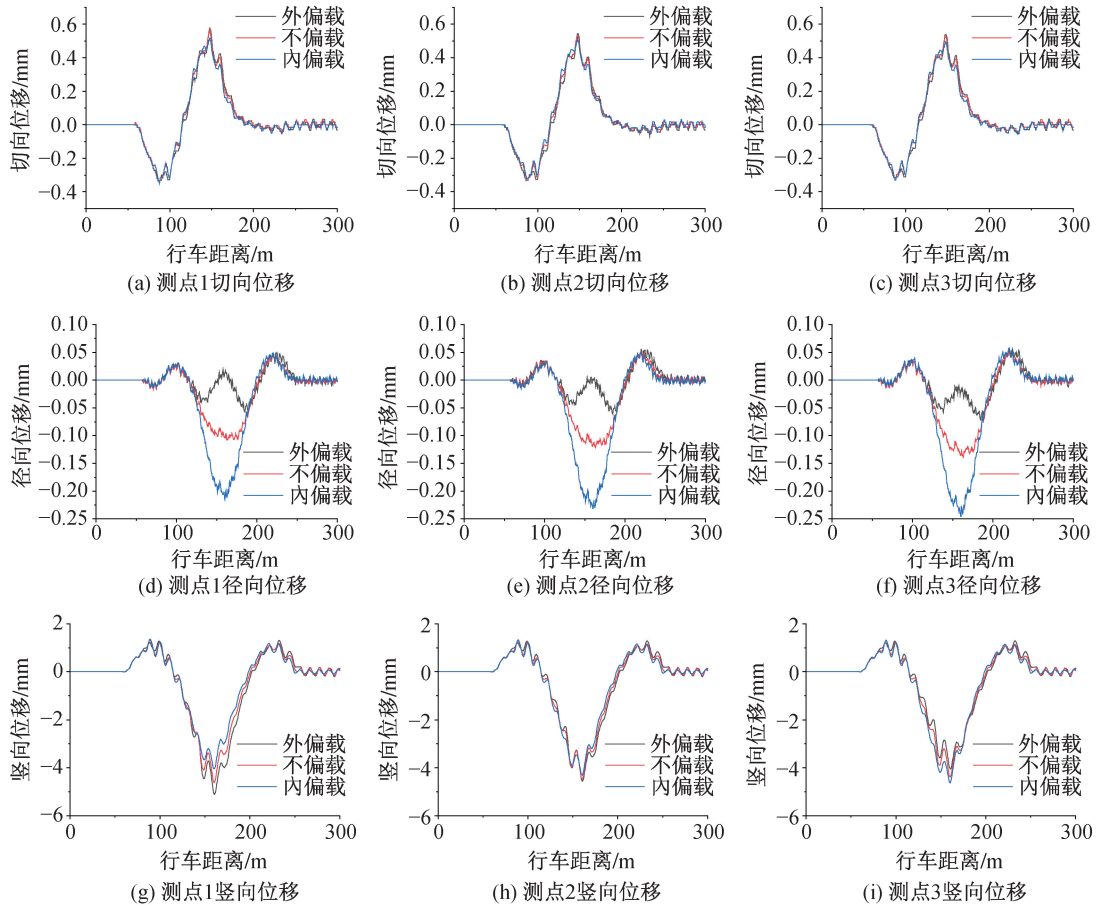


图 6 不同偏载工况下底板位移响应

Fig. 6 Displacement response of floor under different off-load conditions

下响应曲线趋势一致,峰值以及动力响应幅值基本相同;由图6(d)~(f)测点径向位移可以得出以下结论:不同车道工况对测点径向位移有较大影响,响应曲线在峰值以及趋势上均不同,但振动幅度基本相同;车辆行驶在边跨时,径向位移响应基本一致;车辆行驶至中跨时,以车辆行驶在中车道为比较对象,若车辆内偏载,则桥梁测点相对向曲线外侧位移;若车辆外偏载则相反;图6(g)~(i)为测点竖向位移响应曲线,可以反映出:三个测点各自挠度响应趋势相同或相似,即偏载对挠度的影响较小;当车辆偏载行驶于内车道或外车道,会使该侧测点挠度增大,而另一侧的挠度相对降低,即桥梁在偏载车辆作用下发生对应方向的扭转。

3 底板切向应力响应

图7为曲线钢混组合梁桥在不同车速影响下中跨和边跨跨中底板测点的切向正应力响应曲线,分析可知,车辆行驶于边跨时,中跨跨中底板受压;车辆行驶于中跨时,中跨跨中底板受拉;车辆行驶于边跨时,边跨底板受拉;车辆行驶于中跨时,边跨底板受压;车辆行驶于各跨中点时,应力响应均达到极值,以车辆位于中跨跨中为例,

此时边跨跨中应力处于较大的量值;速度不同,响应波动的幅度与波长也不同,速度越低,波长越短。

图8为曲线钢混组合梁桥在不同路面不平顺度激励作用下中跨和边跨跨中底板测点的切向正应力响应曲线。每幅图的两条曲线波动具有较高的相似度,说明曲线桥振动模态中的弯曲振动起到了较大作用;外侧测点的响应峰值均为三条曲线中最高的一条;不平顺等级提升,使应力响应的波动幅度加强,波动峰值提高。

图9为不同偏载工况下的曲线钢混组合梁桥的底板切向正应力时程曲线,六个位置的测点正应力在不同偏载工况下,没有较大变化,每一条响应曲线的峰值的大小关系均保持一致;每一幅图的两条曲线的波动性保持一致,这说明桥梁具有较好的刚度。

4 结论

1) 车辆行驶于曲线桥之上,跨中截面测点位移与应力在车辆行驶至该跨跨中时达到峰值,在车辆行驶至相邻跨跨中时达到相反峰值,并伴随波动;各测点径向位移响应随车速提高而提高,在内外偏载时出现反向的偏移。

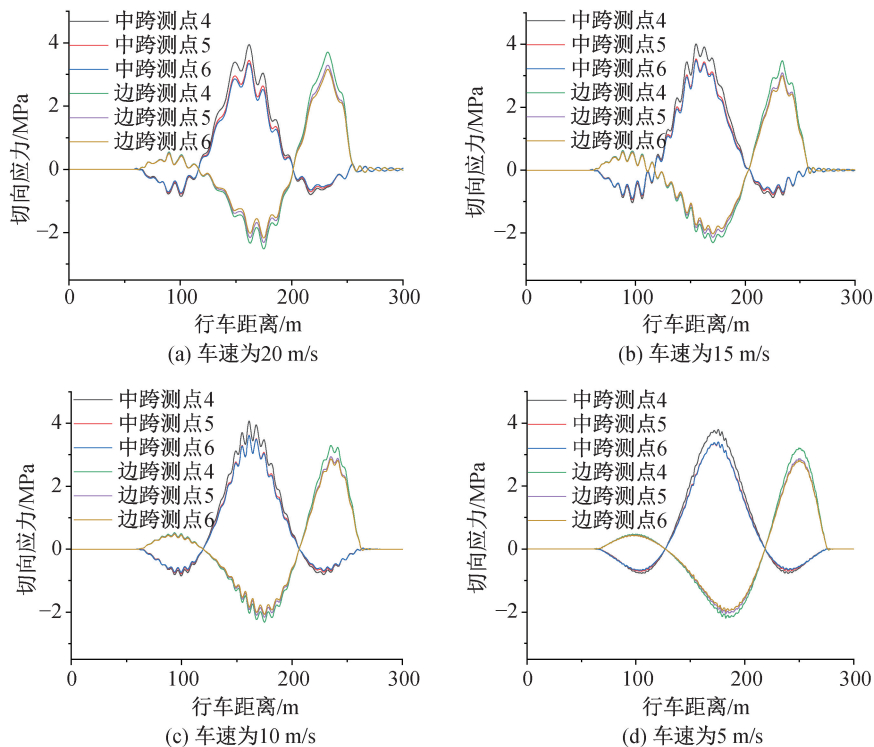


图7 不同车速下底板切向应力响应

Fig. 7 Tangential normal stress of floor under different speeds

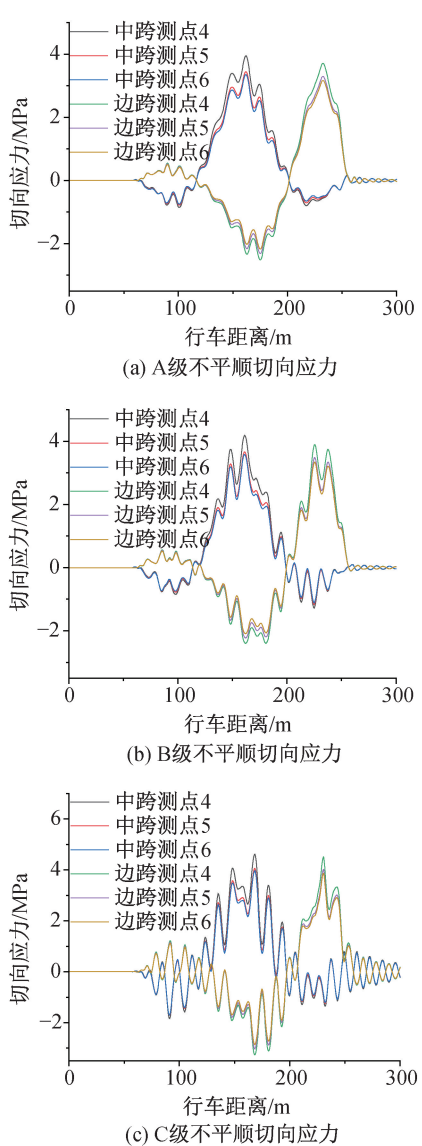


图 8 不同桥面不平顺度激励下底板切向正应力响应
Fig. 8 Tangential normal stress response of floor under excitation of different bridge deck irregularities

2)底板径向位移响应峰值与车速成正比,四种速度下的径向位移峰值为 0.068、0.088、0.100、0.121 mm;车速发生改变,除径向位移外的其他方向位移响应曲线的整体趋势基本不变,且位移响应峰值与速度的关系不是简单地成正比或反比,不同方向位移响应峰值达到最大值时的车速不同。内外偏载使跨中径向位移向偏载侧反向偏移,而其他方向位移响应的整体趋势基本不受偏载影响,且随偏载工况改变,底板三个测点的峰值大小关系没有改变。随着不平顺等级的提升,底板位移与应力响应的波动幅值均不断提升。

3)底板应力响应峰值随车速的变化基本保持

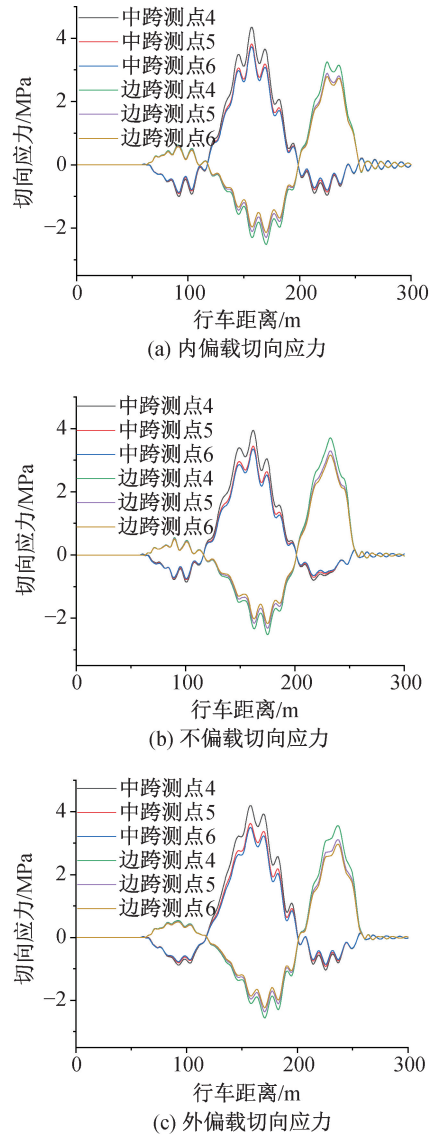


图 9 不同偏载工况下底板切向正应力响应
Fig. 9 Tangential normal stress response of floor under different off-load conditions

不变。在不同偏载工况下,底板应力响应峰值并未出现较大变化,每一条响应曲线的峰值的大小关系均保持一致。随着不平顺等级的提升,底板应力响应的波动幅值不断提升。

参考文献:

[1] 李烁威. 钢混组合曲线连续梁桥车桥耦合振动分析 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
[2] 赵露薇, 王青娥, 王贵春. 车流作用下大跨度拱桥车桥耦合振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 1004-1013.
[3] 韩智强, 谢刚, 李路遥, 等. 大跨连续梁桥车桥耦合振动响应[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4588-4595.

- [4] 马玉龙. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [5] 唐云伟, 郑宏伟, 宋辉, 等. 曲线桥梁横向力作用系数的研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 51-55.
- [6] WANG T L, HUANG D Z, SHAHAWY M. Dynamic response of multi-girder bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2222-2238.
- [7] GUO F, CAI H, LI H F, et al. Impact coefficient analysis of curved box girder bridge based on vehicle-bridge coupling [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(1): 8628479.
- [8] 张霞, 陈恩利, 李凌云. 多车荷载作用下沥青桥面铺装动力学响应[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 109-115+133. 2021. 11. 015.
- [9] 林玉森, 石君龙, 吴雄飞, 等. 汽车荷载作用下桥梁冲击系数影响规律研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.
- [10] 李凌云. 基于 UM 的曲线梁桥车-路-桥耦合动力学响应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- [11] 董婉. 基于 UM 仿真分析的车桥耦合振动及冲击系数研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [12] 王同威. 重载条件下的波形钢腹板连续箱梁桥车-铺装-桥耦合动力学响应研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [13] 李小珍, 马文彬, 强士中. 车桥系统耦合振动分析的数值解法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 21-25.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 57 页)

- [7] FAN L, CHEN S F. Consolidation analysis and effect analysis in the treatment of soft foundation by vacuum preloading [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 647(1): 012135.
- [8] LIU G, TONG F G, TIAN B. A finite element model for simulating surface run-off and unsaturated seepage flow in the shallow subsurface[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(26): 3378-3390.
- [9] 赵乐. 湿陷黄土区管廊场地水分运移及沉降变形规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [10] 王玲丽. 非饱和土体水分运移的孔隙尺度模拟研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [11] 陈锐, 刘坚, 乔劫. 多股管线大内径的传感器密封装置及其组装方法: CN103364020A [P]. 2013-10-23.
- [12] 陈锐, 刘坚, 吴宏伟, 等. 一种装配式新型张力计的研制[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 3028-3032.

(责任编辑 张爱丽)

《河北工程大学学报(自然科学版)》2024年起由季刊变更为双月刊

为进一步缩短论文出版周期,更快推动科研成果的传播,满足广大专家学者学术交流需要,经主管主办单位同意,申请期刊刊期变更,获得河北省新闻出版局批复(冀新闻出版[2024]-060000001),《河北工程大学学报(自然科学版)》于2024年第1期起由季刊变更为双月刊,每逢双月的25号出版,特此公告。