

# 曲线钢-混组合箱梁桥车桥 耦合振动及支座受力研究

孙渤佳<sup>1</sup>, 马海龙<sup>2</sup>, 王荣霞<sup>1</sup>, 王东升<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北首都新机场高速公路开发有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**曲线钢-混组合箱梁桥已经建设较多,在设计中因对其车桥耦合振动认识有限,相关支座反力因弯扭耦合效应引起的变化情况等尚未很好解决。基于 ABAQUS 有限元软件,利用傅里叶级数描述车辆平、竖曲线运动,实现了曲线梁桥车桥耦合振动的数值分析,并基于既有试验和理论成果验证了方法的准确性。以某 4 跨曲线钢-混组合箱梁桥为例,分析了车辆在内、外侧车道以不同速度行驶及超高条件下对桥梁支座反力的影响。结果表明:当车辆沿着曲线梁桥内侧或外侧车道行驶时,另一侧箱梁的外支座会出现脱空的现象。车速对支座峰值反力的影响较小,但可以通过较低的车速减轻支座脱空。超高对支座反力的影响较小,车辆沿着内侧车道行驶时,缓解了外侧箱梁部分支座脱空;沿着外侧车道行驶时,加重了内侧箱梁支座脱空。

**关键词:**钢-混组合曲线箱梁桥;车桥耦合振动;数值模型;支座脱空

中图分类号:U441.3

文献标识码:A

## Study on vehicle bridge coupled vibration and support reaction force of curved steel-concrete composite box girder bridge

SUN Bojia<sup>1</sup>, MA Hailong<sup>2</sup>, WANG Rongxia<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Capital New Airport Expressway Development Co., Ltd., Langfang 065000, China)

**Abstract:** Many steel-concrete composite curved box girder bridges have been built recently, while in these bridge designs, the understanding of vehicle-bridge coupled vibration was limited. Due to the effect of bending-torsion coupled under vertical loading, the change of the reaction force of the relevant support bearing has not been well solved. In this paper, based on the ABAQUS general finite element software, the horizontal curved motion of the vehicle was simulated by the method of Fourier series, which made the numerical analysis of vehicle bridge coupled vibration be possible. The numerical analysis results had verified for its accuracy with the existing experimental and theoretical ones. Taking a steel-concrete composite box girder bridge with four spans as an example, further analysis were carried out considering the influence of the support bearing force of bridge under the case of vehicle on the inside and outside lanes and superelevation. The results indicate that the outer support bearing of the other side of the box girder will appear falling, when the vehicle is driving along the inside or outside lanes of the curved girder bridge. The vehicle speed has little influence on the peak support bearing force, while the bearing separation can be alleviated by the lower vehicle speed. The superelevation has little effect on the support bearing reaction force. When the vehicle is driving along the inside lane, it will be easy to alleviate the falling of some support bearings of the outside box girder. When it is driving along the outside lane, it will aggravate the bearing separation of the

收稿日期:2022-11-15; 修回日期:2023-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52178473)

作者简介:孙渤佳(1997—),男,硕士研究生,主要从事车桥耦合动力特性研究。E-mail:sun867850592@163.com

通讯作者:王东升(1974—),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震与减震控制研究。E-mail:dswang@hebut.edu.cn

inside box girder.

**Key words:** steel-concrete composite curved box girder bridge; vehicle bridge coupled vibration; numerical model; bearing separation

## 0 引言

车辆通过桥梁时彼此的相互动力反应构成了车桥耦合振动问题<sup>[1]</sup>。关于车桥耦合振动,已有研究主要集中于直线梁桥<sup>[2-4]</sup>,对曲线梁桥的研究相对较少。曲线梁桥与直线梁桥相比具有更加复杂的静力与动力反应形态:如在自重作用下其存在弯扭耦合效应,内、外侧支座受力不均并出现拉力,出现如“爬移”等无法预计的变形形式等。目前,一些主梁倾覆的案例中,曲线梁桥也占有相当大的比例<sup>[5-6]</sup>。当车辆在曲线梁桥上行驶时往往会加剧上述现象的发生,或者使之处于更不利的状态,某些时候会影响桥梁的正常使用<sup>[7]</sup>。因此,曲线梁桥的车桥耦合振动问题更加值得关注。

国内外学者对曲线梁桥的车桥耦合振动问题进行了现场试验以及有限元模拟,黄新艺等<sup>[8]</sup>、SENTHILV-ASAN 等<sup>[9]</sup>、HUANG<sup>[10]</sup>分别针对曲线钢-混组合梁桥以及钢筋混凝土曲线梁桥进行了现场跑车试验,并利用有限元软件建立车桥耦合模型进行分析验证,研究表明一个合适的有限元力学模型可以很好地预测桥梁对动态荷载的响应。HUANG 等<sup>[11-12]</sup>针对钢筋混凝土曲线梁桥提出车桥空间数学模型(space mathematical models)来确定车辆对桥梁动态响应的影响,其通过曲线薄壁梁单元对曲线梁进行数值离散,较其他方法减少了计算时间并且较容易得到桥梁的内力响应。晏路曼<sup>[13]</sup>、罗浩<sup>[14]</sup>基于 ANSYS 有限元软件以某座钢筋混凝土曲线梁桥为例建立车桥耦合振动模型,前者利用模态综合技术与 Newmark- $\beta$  两者相结合编制了求解曲线车桥耦合振动的响应程序,提高了计算的速度而后者利用 Matlab 编制曲线梁桥车桥耦合振动的程序,有效减少了计算时间。TAN 等<sup>[15]</sup>将汽车以移动质量方式模拟为竖向力以及径向力,求得水平曲线梁桥在车桥耦合作用下的解析解,可一定程度验证数值解的准确性。在此基础上,部分学者通过 ABAQUS 有限元软件,基于 Fortran 语言将车辆荷载简化为移动力来计算冲击效应<sup>[16-18]</sup>,并针对钢筋混凝土曲线梁桥<sup>[19-20]</sup>以及曲线钢-混组合梁桥<sup>[21]</sup>进行车桥耦合振动的模拟。需要指出,这种方法忽略了车桥耦合振动中车辆(含车辆惯性<sup>[22-24]</sup>以及车桥共振<sup>[25-26]</sup>)的影响,其计算结果与实际状况有一定的出入。

近些年,受钢桥快速建设的驱动,以钢箱结合混凝土桥面板的钢-混组合箱梁桥的建设较多,也包含曲线梁桥。在设计中因对该桥型车桥耦合振动认识有限,相关支座受力变化和冲击系数取值等问题尚未解决,而在曲线梁桥设计中,支座是否会出现拉力及是否需要采取措施是必须考虑的。由此,本文采用 ABAQUS 软件,以某高速曲线钢-混组合箱梁桥为背景,发展了一套车桥耦合振动问题的数值模拟方法,在利用现有文献实测或模拟数据验证该方法正确性的基础上,分析了车辆在不同行驶半径(曲线梁内、外侧)和不同超高条件下支座竖向反力的变化。本文可为曲线钢-混组合箱梁桥车桥耦合振动的深入研究提供可行性的方案。

## 1 曲线梁桥车桥耦合振动分析方法

### 1.1 车辆运动方程

车辆建模为具有 9 个自由度的质量-弹簧-阻尼系统,分别为车轮、车体的竖向自由度  $\delta = \{Z_V, Z_{S_1}, Z_{S_2}, Z_{S_3}, Z_{S_4}, Z_{S_5}, Z_{S_6}, \theta, \Phi\}$ ,车辆与路面接触点的位移与桥面的位移相同,因此该接触点不是独立的自由度。具体车辆模型如图 1 所示。

由图 1 可知, $Z_V$ 为车体的竖向位移; $Z_{S_i}$ 为车轴处的竖向位移; $a$ 、 $b$ 和 $c$ 分别为前轴、中轴以及后轴到车体重心的距离; $S$ 为左右两车轴中心点的距离; $K_{S_i}$ 为悬架系统的刚度系数; $C_{S_i}$ 为悬架系统的阻尼系数; $K_{T_i}$ 为车轴与轮胎连接弹簧的刚度系数; $C_{T_i}$ 为车轴与轮胎连弹簧的阻尼系数; $\theta$ 为车辆的俯仰角度; $\Phi$ 为车辆的侧倾角度; $m_V$ 为车体的质量; $m_i$ 分别为各个车轴的质量; $Z_{T_i}$ 为轮胎处的竖向位移; $I_\theta$ 为车辆的俯仰惯性矩; $I_\phi$ 为车辆的侧倾惯性矩。其中  $i=1,2,3,4,5,6$ 。

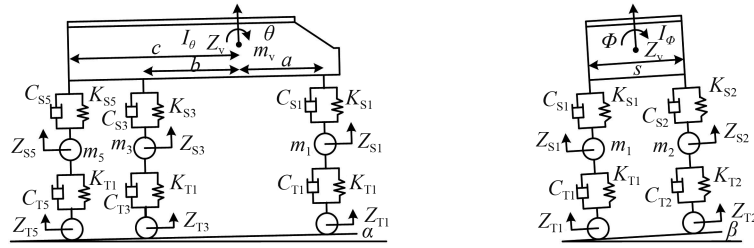


图 1 计算车辆模型图

Fig. 1 Calculated vehicle model diagram

本文根据达朗贝尔原理推导三轴九自由度车辆的振动方程,其中车体的竖向位移、俯仰、侧倾以及车轴的竖向位移的平衡方程为

$$m_v \ddot{Z}_v + \sum_{i=1}^6 C_{Si}(\dot{Z}_{Vi} - \dot{Z}_{Si}) + \sum_{i=1}^6 K_{Si}(Z_{Vi} - Z_{Si}) = 0 \quad (1)$$

$$I_\theta \ddot{\theta} + a \sum_{i=1}^2 K_{Si}(Z_{Vi} - Z_{Si}) + a \sum_{i=1}^2 C_{Si}(\dot{Z}_{Vi} - \dot{Z}_{Si}) - b \sum_{i=3}^4 K_{Si}(Z_{Vi} - Z_{Si}) \quad (2)$$

$$- b \sum_{i=3}^4 C_{Si}(\dot{Z}_{Vi} - \dot{Z}_{Si}) - c \sum_{i=5}^6 K_{Si}(Z_{Vi} - Z_{Si}) - c \sum_{i=5}^6 C_{Si}(\dot{Z}_{Vi} - \dot{Z}_{Si}) = 0$$

$$I_\phi \ddot{\Phi} + \frac{S}{2} \sum_{i=1}^6 (-1)^{i+1} K_{Si}(Z_{Vi} - Z_{Si}) + \frac{S}{2} \sum_{i=1}^6 (-1)^{i+1} C_{Si}(\dot{Z}_{Vi} - \dot{Z}_{Si}) = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^6 m_i \ddot{Z}_{Si} + K_{Si}(Z_{Si} - Z_{Vi}) + C_{Si}(\dot{Z}_{Si} - \dot{Z}_{Vi}) + K_{Ti}(Z_{Si} - Z_{Ti}) + C_{Ti}(\dot{Z}_{Si} - \dot{Z}_{Ti}) = 0 \quad (4)$$

式中:  $Z_{Vi}$  为车体与悬架系统弹簧连接处的位移;  $\ddot{Z}_v$  为车体的竖向加速度;  $\dot{Z}_{Vi}$  为每个车体与悬架系统弹簧连接处的竖向加速度;  $\dot{Z}_{Si}$  为车轴处的竖向加速度;  $\ddot{\theta}$  为车体俯仰加速度;  $\ddot{\Phi}$  为车体的侧倾加速度;  $\dot{Z}_{Ti}$  为车轮处的竖向加速度; 其余参数物理含义已经在文中介绍。

其中每个车体与悬架系统弹簧连接处的位移  $Z_v$ , 通过式(5)计算得

$$\begin{aligned} Z_{Vi} &= \sum_{i=1}^2 Z_v + a\theta + (-1)^i \frac{S}{2} \Phi \\ Z_{Vj} &= \sum_{j=3}^4 Z_v - b\theta + (-1)^j \frac{S}{2} \Phi \\ Z_{Vk} &= \sum_{k=5}^6 Z_v - c\theta + (-1)^k \frac{S}{2} \Phi \end{aligned} \quad (5)$$

式中参数物理含义已经在文中介绍。

通过式(1)~式(5)可整理得出车辆振动的矩阵方程为

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{Z} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_{v-b} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}_v$ ,  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{K}_v$  分别为车辆的质量、阻尼以及刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{Z}}$ ,  $\dot{\mathbf{Z}}$ ,  $\mathbf{Z}$  分别为车辆各自由度的加速度、速度以及位移矢量;  $\mathbf{F}_G$  为车辆的重量矢量;  $\mathbf{F}_{v-b}$  为作用在车辆上的轮-路接触力矢量。

### 1.2 桥梁运动方程

对于桥梁的运动方程为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{d}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{d}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{d}_b = \mathbf{F}_{b-v} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{M}_b$ ,  $\mathbf{C}_b$ ,  $\mathbf{K}_b$  分别为桥梁的质量、阻尼以及刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{d}}_b$ ,  $\dot{\mathbf{d}}_b$ ,  $\mathbf{d}_b$  分别为桥梁节点的加速度、速度以及位移矢量;  $\mathbf{F}_{b-v}$  为作用在桥梁上的路-轮接触力矢量。

### 1.3 车桥相互作用方程

根据车桥接触点的位移关系与作用力关系可以建立如式(8)的方程<sup>[27]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{d}}_b \\ \ddot{\mathbf{Z}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{b-b} & \mathbf{C}_{b-v} \\ \mathbf{C}_{v-b} & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{d}}_b \\ \dot{\mathbf{Z}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{b-b} & \mathbf{K}_{b-v} \\ \mathbf{K}_{v-b} & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_b \\ \mathbf{Z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{b-v} \\ \mathbf{F}_{v-b} + \mathbf{F}_G \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $C_{b-b}$ 、 $C_{b-v}$  和  $C_{v-b}$  为车桥相互作用的阻尼耗能项;  $K_{b-b}$ 、 $K_{b-v}$  和  $K_{v-b}$  为相互作用的刚度;  $F_{b-v}$  和  $F_{v-b}$  为车桥之间的相互作用力; 其余参数同前面介绍。

当已知任意时刻的车轮及接触点的位移及速度, 相互作用力公式为

$$F_{b-r} = F_{r-b} = [Z_T - d_v]K + [\dot{Z}_T - \dot{d}_v]C \quad (9)$$

式中:  $Z_T$  为车轮处的竖向位移;  $d_v$  为轮胎与桥梁接触点处桥梁的竖向位移;  $K$ 、 $C$  分别为与地面接触时轮胎的刚度与阻尼。

#### 1.4 车桥耦合运动方法

在本文中, 首先基于 ABAQUS 有限元软件建立车桥耦合振动模型, 之后采用内嵌的 Hilber-Hughes-Taylor- $\alpha$  (HHT- $\alpha$ ) 隐式动力方法将车辆和桥梁的振动进行耦合并迭代求解。该方法是由 Hilber、Hughes 和 Taylor 引入自由参数  $\alpha$  并以 Newmark- $\beta$  的方法为基础发展起来的<sup>[28]</sup>, 具有参数单一, 数值阻尼可控, 可消除由于改变时间步长而引入的小高频噪声等优点。为实现车辆的曲线运动<sup>[29]</sup>, 可将车辆运动分解为  $x$  与  $y$  方向的三角函数运动, 如图 2 所示, 事实上周期型幅值广义上都可采用傅里叶级数表示为

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos n\omega(t - t_0) + B_n \sin n\omega(t - t_0)] \quad (10)$$

式中:  $A_n$  与  $B_n$  分别为  $\cos$  项与  $\sin$  项的系数, 与初始位置  $x$  与  $y$  的数值相关;  $N$  为傅里叶级数项的个数, 对本文的圆曲线运动, 取为 1;  $\omega$  为圆频率 (rad/s), 通过车辆的行驶时间和距离进行计算;  $A_0$  为初始幅值, 其大小与行车曲率半径相关;  $t_0$  为初始时间, 本文中取值为 0。

车轮与桥面采用面与面接触, 接触属性采用无摩擦的切向行为与罚函数的法向行为。前轮、中轮与后轮之间以及车体内部采用转换器单元连接。在 ABAQUS 中建立局部坐标系, 因此转换器在局部坐标系中仅在车辆竖向方向存在位移的自由度, 限制住了其他方向位移及旋转的自由度, 如图 3 所示。

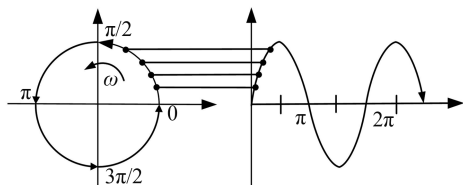


图 2 转动与正弦函数的对应关系

Fig. 2 Corresponding relationship between the rotation and the sine function

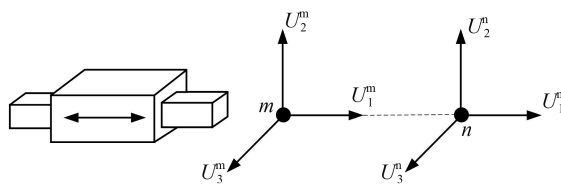


图 3 转换器连接件原理图

Fig. 3 Schematic diagram of converter connectors

## 2 车桥耦合振动数值方法验证

本文基于 ABAQUS 有限元软件, 以某五跨连续梁桥<sup>[30]</sup>以及某跨线桥<sup>[8]</sup>为例, 建立曲线梁桥模型并引入质量-弹簧-阻尼系统的实体车辆模型, 利用傅里叶级数方法实现车辆的曲线运动, 进行车桥耦合振动的数值模拟。通过与这些既有桥梁实测或数值结果进行对比, 以验证本文建议方法的可行性。

### 2.1 对某 5 跨连续梁桥的分析

当车辆行驶于曲线梁桥上时, 因车辆存在离心力, 加之车辆 (竖载) 与桥梁的弯扭耦合作用, 车辆对桥梁产生横向力, 进而桥梁产生横向位移。在横向力作用下, 易出现横向滑移、支座脱空和主梁侧翻等病害, 因此横向位移在曲线梁桥车桥耦合分析中较为重要<sup>[31-32]</sup>。为验证该方法对于桥梁横向位移计算的正确性, 以某 5 跨连续梁桥为例建立模型。该桥梁总长度为 125.6 m, 曲率半径  $R=160$  m。桥段为单箱单室箱梁桥, 材料属性及支座约束条件等可参考文献<sup>[33]</sup>。

采用工况为 35 t 的三轴车辆<sup>[34]</sup>, 以 30 km/h 的速度在光滑路面上行驶。提取第二跨箱梁底部中点数据, 如图 4 所示, 车桥耦合振动分析的结果也几乎相同。

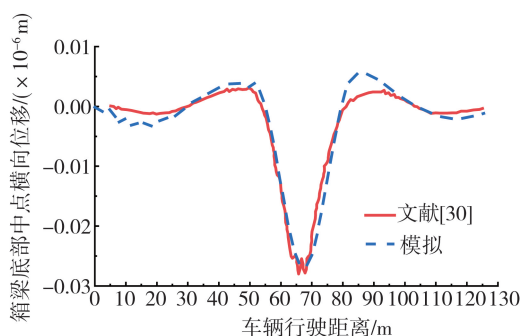


图 4 某 5 跨连续梁桥横向位移反应

Fig. 4 Transverse displacement response of continuous beam bridge with five spans

### 2.2 对某跨线桥的分析

以一座跨线桥为例建立模型<sup>[8]</sup>,该桥段为单箱双室预应力混凝土箱梁,在上部铺设 4 cm 厚的沥青混凝土。车行道宽为 11 m,两侧分别设有 0.5 m 的人行道与防撞墙,路面存在 6%的横向坡度,跨径布置:30 m+40 m+30 m,曲率半径  $R=280$  m。仅模拟上部结构,对于支座采用固定约束。

工况为 30.4 t 的三轴车<sup>[35]</sup>,以 30.4 km/h 的速度沿着外侧偏心 1.8 m 处行驶。车辆在光滑路面行驶过程中在第一跨跨中的位移动力响应结果如图 5 所示,本文计算结果也与文献[8]实测结果较为一致。

由图 4 和图 5 可知,在 ABAQUS 中发展的车桥耦合振动模拟计算结果与文献[8,30]的实测和有限元结果具有很好的一致性,充分说明了本文方法的正确性,因其是基于通用有限元软件 ABAQUS 实现,故具有更好的可操作性。

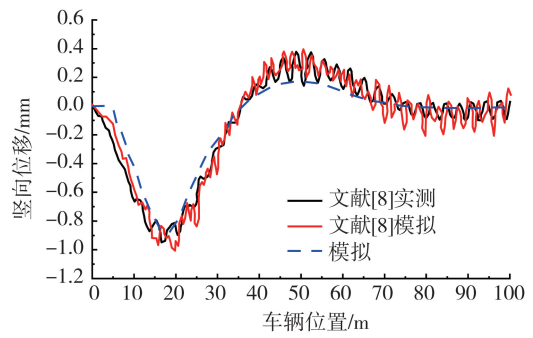


图 5 某跨线桥加载侧竖向反应

Fig. 5 Vertical response on the loading side of the flyover

## 3 曲线钢-混组合箱梁桥车桥耦合振动分析

### 3.1 工程概况

以某高速曲线钢-混组合箱梁桥为例,其横截面及跨径如图 6 所示。采用 ABAQUS 有限元软件建立空间桥梁模型。桥梁跨径布置为:27 m+2×43 m+27 m,曲率半径  $R=160$  m,桥面铺装层:10 cm 厚的沥青混凝土+防水层+8 cm 厚的 C50 混凝土,桥面荷载:公路-1 级,桥面宽 10.5 m。支座分别采用 1#至 4#表示该桥段为双箱单室钢箱梁,边界约束条件依空间支座的布置情况施加在箱梁底板处,即不考虑墩柱对上部结构的影响<sup>[36]</sup>,如图 6 所示。分析中桥梁阻尼采用瑞利阻尼假设<sup>[37]</sup>,箱梁与箱间横梁材料为 Q345qD 钢,桥面板材料为 C50 混凝土,铺装层由沥青混凝土与 C50 混凝土组成,具体材料参数如表 1 所示。

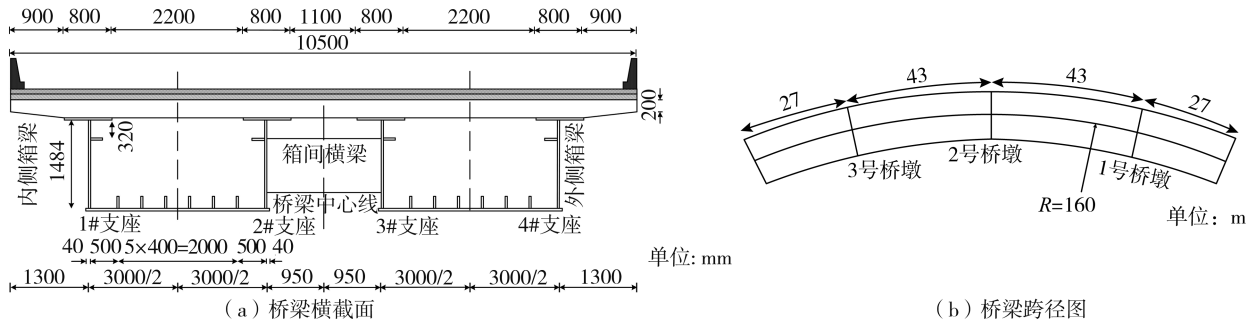


图 6 曲线梁桥模型

Fig. 6 Curved bridge model

表 1 曲线桥材料参数

Table 1 Material parameters of curved bridge

桥梁部件	材料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\mu$
上层铺装层	C50 混凝土	2500	$3.45 \times 10^{10}$	0.20
桥面板				
箱间横梁	Q345qD 钢	7850	$2.06 \times 10^{11}$	0.30
箱梁				
下层铺装层	沥青混凝土	2460	$1.40 \times 10^9$	0.35

桥梁上部结构采用空间支座约束,连续曲梁的支座布置如图 7 所示。

该桥现场试验采用脉动法进行自振频率测试,并对桥梁试验测得的振动加速度时程做 FFT 变换得到桥梁的前 3 阶振动频率,与数值模型的前 3 阶频率进行对比,结果如表 2 所示。

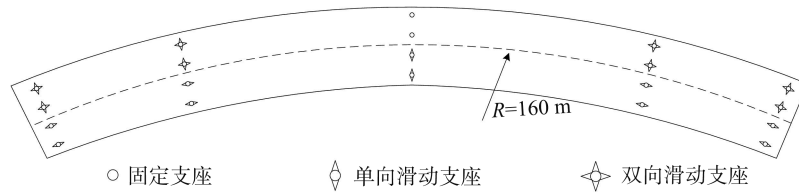


图7 连续曲梁支座布置

Fig. 7 Layout of continuous curved beam support

表2 前3阶实测频率与模拟频率

Table 2 The first three measured frequencies and simulated frequencies

阶数	实测 $f/\text{Hz}$	模拟 $f/\text{Hz}$	误差/%	平均误差/%
一阶	2.78	2.56	8.59	
二阶	3.90	3.71	5.12	7.04
三阶	5.66	6.08	7.42	

由表2可知,有限元模型计算的前3阶固有频率与该曲线桥的实测频率接近,误差最大为8.59%,说明有限元计算模型的质量、刚度和约束条件总体上接近于实际桥梁结构。

本文采用的车辆为三轴货车,重17.8 t,在车辆运动过程中假设车轮始终接触地面运动,并且车体在运动过程中不发生变形<sup>[14,38]</sup>,车辆轮胎接地面积采用 $0.4\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 。车辆参数如表3所示。为更好的模拟实际跑车的工况,分别在驶进桥梁前与驶出桥梁后假设存在一定的曲线路面段,其不被纳入到车桥耦合振动模拟结果,仅是为了满足模拟的物理边界。

当车辆与桥梁发生耦合运动时,时间增量步 $\Delta t$ 的选取尤为重要,时间增量步 $\Delta t$ 与桥梁竖向振动周期 $T$ 存在 $\Delta t \leq 0.1 T$ 关系时,认为模拟的结果较为良好<sup>[39]</sup>。由表4已知,桥梁周期 $T \approx 0.4\text{ s}$ ,因此综合考虑计算的时间成本及精度将时间增量步 $\Delta t$ 设为 $0.02\text{ s}$ 。

动力荷载下简支梁桥及连续梁桥中支座反应行为已有一定研究<sup>[40-41]</sup>,但曲线钢混组合箱梁桥行驶车辆

对支座的影响尚缺乏。因此,本文分析了车辆行驶位置半径、桥梁超高对曲线梁桥2号桥墩内外侧(1#支座~4#支座)支座受力的影响(图6),并假设支座为刚体(未考虑弹性及破坏效应)。

### 3.2 车辆行驶半径对支座受力的影响

由于桥梁存在曲率的影响,使得车辆是否沿着中心线行驶,都会存在弯扭耦合现象,使内、外侧的腹板受力不均,进而导致支座受力的改变。对于车辆行驶位置的研究,曲线工字梁桥的成果尚有些参考<sup>[42-43]</sup>,但曲线箱梁桥的成果主要集中于单箱梁桥<sup>[44]</sup>,对于本文双箱梁桥的研究尚未见到。

因此本小节考虑5种行车位置,分别沿着半径 $R$ 为156、158、160、162、164 m,如图8所示,以50 km/h的速度行驶,计算2号桥墩内外侧支座的竖向支座反力,如图9所示。并计算车辆以30、50、70、90 km/h的速度行驶条件下2号桥墩内外侧支座竖向支座峰值反力,计算结果如表4所示。

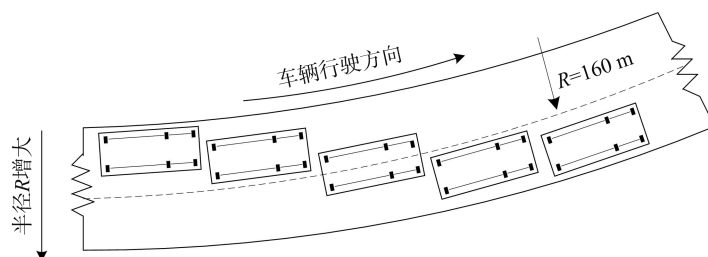


图8 车辆行驶半径

Fig. 8 Radius of driving vehicles

表3 模拟车辆参数<sup>[34]</sup>Table 3 Simulation of vehicle parameters<sup>[34]</sup>

参数	单位	数值
车体质量( $m_v$ )	kg	17 800
前上层悬架系统( $K_{S1}, K_{S2}$ )		1 200
中后上层悬架系统( $K_{S3}, K_{S4}, K_{S5}, K_{S6}$ )	kN/m	2 400
前下层悬架系统( $K_{T1}, K_{T2}$ )		2 400
中后下层悬架系统( $K_{T3}, K_{T4}, K_{T5}, K_{T6}$ )		4 800
前上层悬架系统( $C_{S1}, C_{S2}$ )		5.0
中后上层悬架系统( $C_{S3}, C_{S4}, C_{S5}, C_{S6}$ )	kg/m	10.0
前下层悬架系统( $C_{T1}, C_{T2}$ )		6.0
中后下层悬架系统( $C_{T3}, C_{T4}, C_{T5}, C_{T6}$ )		12.0
前轴-中轴( $a+b$ )		3.4
中轴-后轴( $c-b$ )	m	1.4
左轮-右轮( $S$ )		1.8

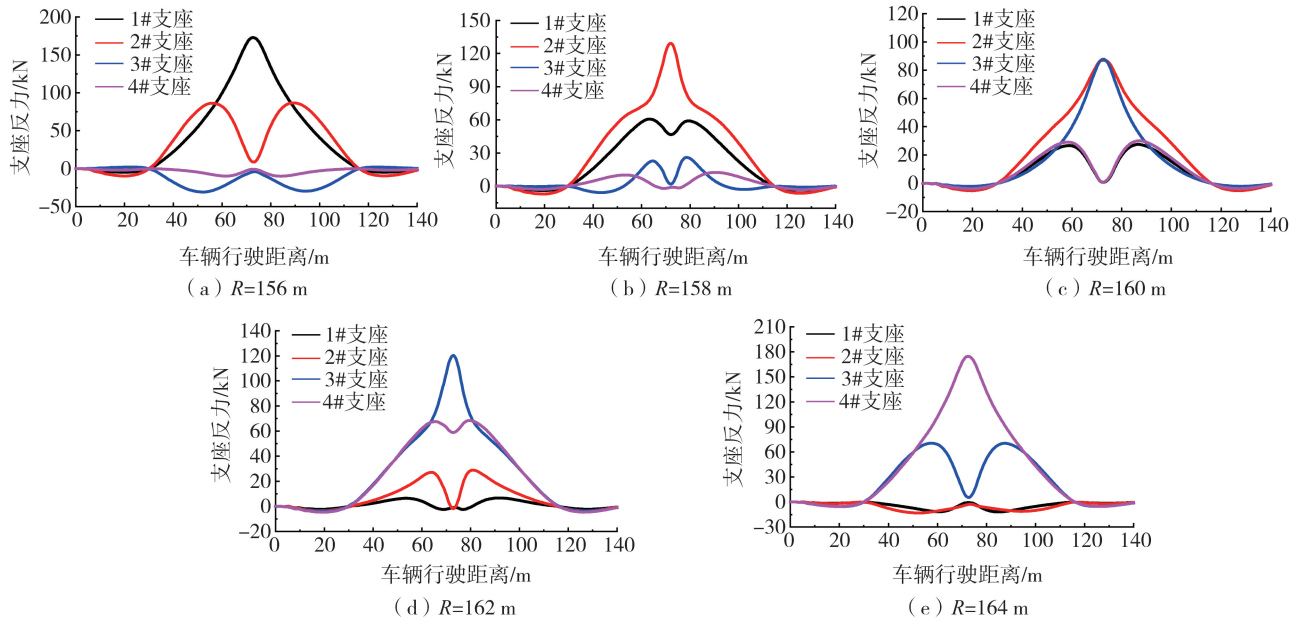


图 9 内外侧支座受力

Fig.9 Reaction force of inside and outside supports

表 4 内外侧支座峰值反力

Table 4 Peak reaction force of inside and outside supports

行驶半径/m	速度/(km/h)	支座峰值反力/kN			
		1#支座	2#支座	3#支座	4#支座
R = 156	30	173.27	9.07	-3.97	-0.79
	50	172.80	8.65	-3.96	-0.87
	70	173.06	7.94	-4.00	-0.94
	90	172.92	7.40	-4.00	-0.97
R = 158	30	46.74	129.69	1.99	-0.95
	50	46.63	129.30	1.79	-0.98
	70	46.54	128.88	1.48	-1.19
	90	46.22	128.69	1.39	-1.41
R = 160	30	0.84	87.33	88.22	1.08
	50	0.69	87.00	87.74	0.84
	70	0.54	86.91	87.48	0.56
	90	0.30	86.84	87.39	0.27
R = 162	30	-0.90	-1.65	120.62	59.39
	50	-0.95	-1.78	120.35	58.89
	70	-1.15	-2.03	120.39	58.41
	90	-1.31	-2.38	120.37	58.15
R = 164	30	-0.73	-2.59	5.27	175.69
	50	-0.81	-2.71	5.38	174.73
	70	-0.85	-2.98	5.43	174.25
	90	-0.87	-3.16	5.09	174.00

当车辆沿着  $R = 156 \text{ m}$  路径行驶时,3#支座和4#支座处于拉力状态即支座脱空,如图9(a)所示。曲线梁桥存在弯扭耦合作用,当车辆沿着半径  $R = 156 \text{ m}$  行驶时,存在桥梁向内扭转的趋势,使得外侧箱梁内侧(3#支座)的支座受到的拉力较大。当车辆行驶过程中1#支座反力先增大后减小,而2#支座反力呈现M形走势,在车辆行驶于2号桥墩时,2#支座反力迅速减小,主要承载力由1#支座承担,同样车辆沿着  $R = 164 \text{ m}$  路

径行驶时外侧箱梁支座反力具有相同的趋势,如图9(e)所示。

当车辆沿着  $R=158\text{ m}$  路径行驶时3#和4#的支座脱空现象得到缓解,如图9(b)所示。同理车辆沿着外侧路径行驶时,存在桥梁向外扭转的趋势,使得内侧箱梁内侧(2#支座)的支座受到的拉力较大。1#支座的反力呈现M形走势,而2#支座反力先增大后减小,主要承载力由2#支座承担。同样车辆沿着  $R=162\text{ m}$  路径行驶时外侧箱梁支座反力具有相同的趋势,如图9(d)所示。因此当车辆在内侧或外侧行驶时,会发生支座脱空及单支座承担荷载的现象,这是一种非常危险的现象,应得到重视。

当车辆的行驶速度逐渐增大时,受拉支座的峰值反力的逐渐增大,受压支座的峰值反力具有减小的趋势。因此降低车辆行驶速度可以减轻支座脱空,但支座峰值反力的变化微乎其微,如表4所示。

### 3.3 桥梁超高对支座受力的影响

当车辆在曲线梁桥行驶时,与桥梁之间存在沿径向的摩擦力。为了防止车辆高速行驶时发生过大的侧向偏移及发生“侧向打滑”,曲线梁桥会设计为外侧高内侧低的具有一定超高的截面形式<sup>[43]</sup>。因此本文考虑了2种截面,分别为无超高以及6%的超高,如图10所示。

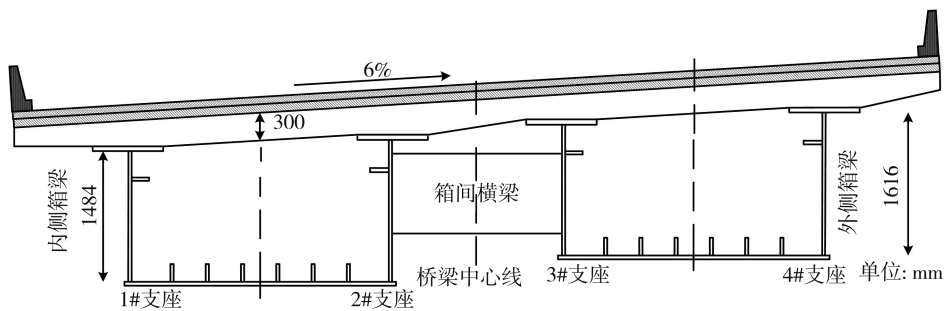


图10 6%超高截面形式

Fig. 10 Section form of 6% super elevation

由上一节的结论可知,车辆行驶速度对于支座峰值反力的影响较小,因此本节不再考虑车速的影响。使车辆以  $50\text{ km/h}$  的速度沿着  $R$  为  $156, 158, 160, 162, 164\text{ m}$  这5种路径行驶,分别计算2号桥墩处内外侧支座的竖向支座反力及支座峰值反力,计算结果如图11及表5所示。

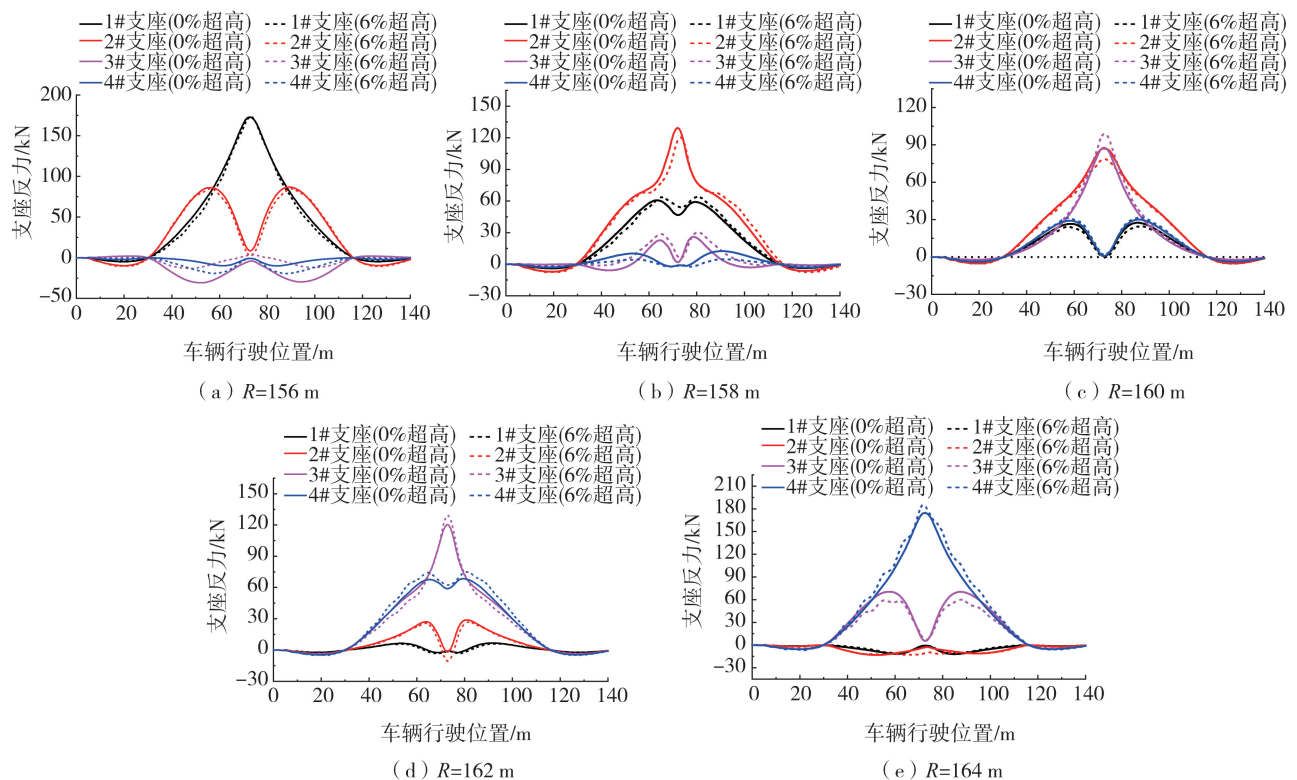


图11 不同超高条件下内外侧支座受力

Fig. 11 Reaction force of inside and outside supports under different super elevation

表 5 不同超高条件下支座峰值反力

Table 5 Peak reaction force of inside and outside supports under different super elevation

车辆行驶半径/m	超高/%	支座峰值反力/kN			
		1#支座	2#支座	3#支座	4#支座
R=156	0	172.80	8.65	-3.96	-0.87
	6	173.21	2.43	4.46	-0.86
R=158	0	46.63	129.30	1.79	-0.98
	6	54.16	120.72	5.44	-0.91
R=160	0	0.69	87.00	87.74	0.84
	6	-0.30	78.58	99.08	1.83
R=162	0	-0.95	-1.78	120.35	58.89
	6	-1.35	-10.66	129.19	62.38
R=164	0	-0.81	-2.71	5.38	174.73
	6	-0.95	-9.70	7.27	185.30

由图 11 及表 5 可知,尽管超高对支座反力有所影响,但变化的绝对值并不大。当车辆沿着内侧车道行驶并存在超高时,内侧箱梁的 1#支座竖向反力增大,2#支座反力减小且外侧箱梁 3#支座脱空现象得到缓解,但对 4#支座竖向反力的影响较小。当车辆沿着外侧车道行驶时,随着超高的增加,增大了桥梁的弯扭耦合效应,使内侧箱梁支座拉力增加,加重了支座脱空现象。

## 4 结论

本文基于 ABAQUS 有限元软件,利用傅里叶级数模拟车辆平曲线和竖曲线运动,实现了曲线钢-混组合箱梁桥车桥耦合振动分析。以某高速曲线钢-混组合箱梁桥为例,研究了车辆在内外车道以不同速度行驶及超高条件下对桥梁支座反力的影响,并得出如下结论:

1) 曲线梁桥车桥耦合振动数值模拟方法基于有限元软件 ABAQUS 实现,具有更好的通用性和可操作性。

2) 车桥耦合振动数值模拟可获得支座受力变化的全过程,就算例桥梁,当车辆分别在曲线梁桥内侧和外侧行驶时,都会使另一侧箱梁的最外支座出现脱空。

3) 6%的桥梁超高对支座受力影响的绝对值变化值不大;但当车辆沿曲线内侧车道行驶时,超高可缓解部分支座脱空;当车辆沿曲线外侧车道行驶时,它会加重了某些支座脱空。

4) 车辆的行驶速度对于支座峰值反力的影响微乎其微,但可以通过降低车速进而减轻支座脱空。

5) 本文将支座假设为刚体,未研究支座弹性反应及(自身)破坏行为。后续工作将分析车重、路面不平度以及伸缩缝等参数对支座受力行为的影响,将对支座细节建模进行研究,以充分考虑行车对曲线梁桥的动力影响,以期对车桥耦合振动条件下支座设计,还有增强曲线梁桥的抗倾覆能力等提供工程参考。

## 参考文献:

- [1] 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.  
LI Xiaozhen, ZHANG Liming, ZHANG Jie. State-of-the-art review and trend of studies on coupling vibration for vehicle and highway bridge system [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 230-240. (in Chinese)
- [2] 王宗林,高庆飞, KOH Chan Ghee, 等. 移动车辆荷载作用下大跨径连续梁桥动力响应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(2): 46-52.  
WANG Zonglin, GAO Qingfei, GHEE K C, et al. Dynamic responses of long span continuous girder bridges under action of moving vehicle loads [J]. Bridge Construction, 2015, 45(2): 46-52. (in Chinese)
- [3] 蒋培文. 公路大跨径连续体系桥梁车桥耦合振动研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
JIANG Peiwen. Coupled vibration between vehicles and highway long-span continuous series bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [4] 何维. 中小跨径梁桥动力冲击系数研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
HE Wei. Study of dynamic impact factor for medium and small span beam bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [5] 付琴琴. 曲线梁桥上部结构刚体失稳及防控技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

- FU Qinqin. Research on rigid body instability and prevention and control technology of curved girder bridge superstructure [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [6] 何雄君, 刘鑫, 梁亚兰. 大跨度小半径曲线梁桥抗倾覆性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 89-93.  
HE Xiongjun, LIU Xin, LIANG Yalan. Research on the anti-overturning performance of long-span small-radius curved beam bridges[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 89-93. (in Chinese)
- [7] 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.  
MA Yulong. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration on highway curved continuous beam bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [8] 黄新艺, 卓卫东, 盛洪飞, 等. 车桥耦合振动系统模型下桥梁冲击效应研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 59-63, 68.  
HUANG Xinyi, ZHUO Weidong, SHENG Hongfei, et al. Investigation of impact effect on bridge in model of vehicle-bridge coupled vibration system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 59-63, 68. (in Chinese)
- [9] SENTHILVASAN J, THAMBIRATNAM D P, BRAMELD G H. Dynamic response of a curved bridge under moving truck load[J]. Engineering Structures, 2002, 24(10): 1283-1293.
- [10] HUANG D Z. Field test of A curved steel box girder bridge [C]//Structures 2004. Nashville, Tennessee, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2004: 1-8.
- [11] HUANG D Z. Dynamic analysis of steel curved box girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(6): 506-513.
- [12] HUANG D Z, WANG T L, SHAHAWY M. Vibration of horizontally curved box girder bridges due to vehicles[J]. Computers & Structures, 1998, 68(5): 513-528.
- [13] 晏路曼. 公路曲线梁桥在移动荷载作用下车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.  
YAN Luman. Response study of highway horizontally curved beam bridges subjected to moving load [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [14] 罗浩. 公路曲线连续梁桥车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.  
LUO Hao. Study on vehicle bridge coupling vibration response of curved continuous beam bridge [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [15] TAN C P, SHORE S. Dynamic response of a horizontally curved bridge[J]. Journal of the Structural Division, 1968, 94(3): 761-781.
- [16] 李才志, 张春华. 移动荷载在 ABAQUS 中的模拟研究[J]. 水运工程, 2012(9): 61-64.  
LI Caizhi, ZHANG Chunhua. Simulation study of moving loads in ABAQUS[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(9): 61-64. (in Chinese)
- [17] 田飞, 褚进晶. 交通荷载特性及其模拟方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 66-71, 161.  
TIAN Fei, CHU Jinjing. Research on traffic load characteristics and simulation methods [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(4): 66-71, 161. (in Chinese)
- [18] 胡兴宇. 移动车辆冲击荷载在 ABAQUS 中的模拟研究[J]. 四川水泥, 2020(1): 347.  
HU Xingyu. Simulation study on impact load of moving vehicles in ABAQUS[J]. Sichuan Cement, 2020(1): 347. (in Chinese)
- [19] LI X D, REN J Y, LIU X. The dynamic response analysis of curved bridge under the moving load [C]//Proceedings of the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017). Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018: 324-330.
- [20] SAMAAAN M, KENNEDY J B, SENNAH K. Impact factors for curved continuous composite multiple-box girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(1): 80-88.
- [21] SENNAH K M, ZHANG X S, KENNEDY J B. Impact factors for horizontally curved composite box girder bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(6): 512-520.
- [22] MA L, ZHANG W, HAN W S, et al. Determining the dynamic amplification factor of multi-span continuous box girder bridges in highways using vehicle-bridge interaction analyses[J]. Engineering Structures, 2019, 181: 47-59.
- [23] SHI X M, CAI C S, CHEN S R. Vehicle induced dynamic behavior of short-span slab bridges considering effect of approach slab condition [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(1): 83-92.
- [24] YANG Y B, LIAO S S, LIN B H. Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11): 1644-1650.
- [25] 章长玖. 公路桥梁车桥耦合振动分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.  
ZHANG Changjiu. The analysis of vehicle-bridge coupling vibration of highway bridge [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese)
- [26] KOU J W. Continuous span highway bridge vibrations [D]. Connecticut: University of Connecticut, 1989.
- [27] 邓露, 王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9): 52-58.  
DENG Lu, WANG Fang. Study of the dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9): 52-58. (in Chinese)
- [28] 郭晔, 章定国, 陈思佳. Hilber-Hughes-Taylor- $\alpha$  法在接触约束多体系统动力学中的应用[J]. 物理学报, 2017, 66(16): 147-157.  
GUO Xian, ZHANG Dingguo, CHEN Sijia. Application of Hilber-Hughes-Taylor- $\alpha$  method to dynamics of flexible multibody system with contact and constraint [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(16): 147-157. (in Chinese)

- [29] 刘威. ABAQUS 6.14 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.  
QI Wei. ABAQUS 6.14 Super learning manual[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016. (in Chinese)
- [30] 刘星. 重型汽车-曲线桥相互作用及动力学分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.  
LIU Xing. Heavy vehicle-curved bridge interaction and dynamics analysis[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. (in Chinese)
- [31] 李皓玉, 宋健, 任剑莹. 移动荷载作用下曲线桥的动力响应分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(1): 1-6.  
LI Haoyu, SONG Jian, REN Jianying. Dynamic response analysis of curved bridge under the moving load[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2019, 32(1): 1-6. (in Chinese)
- [32] 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.  
TANG Yunwei, ZHENG Hongwei, SONG Hui, et al. Study of lateral force action coefficients of curved bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 51-55. (in Chinese)
- [33] LI S H, REN J Y. Investigation on three-directional dynamic interaction between a heavy-duty vehicle and a curved bridge[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(5): 721-738.
- [34] 韩万水, 王涛, 李永庆, 等. 基于模型修正梁格法的车桥耦合振动分析系统[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 47-55.  
HAN Wanshui, WANG Tao, LI Yongqing, et al. Analysis system of vehicle-bridge coupling vibration with grillage method based on model updating[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 47-55. (in Chinese)
- [35] 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.
- [36] 孙瑜祥. 曲线连续梁桥车桥耦合振动及车辆舒适性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
SUN Yuxiang. The analysis on vehicle-bridge coupling vibration and vehicle ride comfort of curved continuous beam bridges[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [37] LU X Z, KIM C W, CHANG K C. Finite element analysis framework for dynamic vehicle-bridge interaction system based on ABAQUS[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(3): 2050034.
- [38] SENTHILVASAN J, BRAMELD G H, THAMBIRATNAM D P. Bridge-vehicle interaction in curved box girder bridges[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1997, 12(3): 171-182.
- [39] 王百田. 车桥耦合作用下连续钢箱梁桥动力响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.  
WANG Baitian. Research of dynamic response of continuous steel box girder under load of vehicle-bridge coupling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [40] 魏标, 刘义伟, 蒋丽忠, 等. 地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J]. 土木工程学报, 2019, 52(6): 110-118.  
WEI Biao, LIU Yiwei, JIANG Lizhong, et al. Dynamic behaviors of double spherical isolation bearing in simply-supported railway bridges under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 110-118. (in Chinese)
- [41] 魏标, 杨添涵, 蒋丽忠. 轨道结构建模精细化程度对高速铁路连续梁桥地震易损性的影响[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 16-23, 51.  
WEI Biao, YANG Tianhan, JIANG Lizhong. The effects of model refinement of ballastless tracks on the seismic vulnerability of a continuous bridge on a high-speed railway[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 16-23, 51. (in Chinese)
- [42] CHANG D, LEE H. Impact factors for simple-span highway girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(3): 704-715.
- [43] AWALL M R, HAYASHIKAWA T. Parametric study on dynamic interaction of horizontally curved twin I-girder bridges and a moving vehicle[J]. Kozo Kogaku Ronbunshu A, 2011, 57: 242-251.
- [44] 黄新艺, 卓卫东, 盛洪飞. 车辆偏心行驶对曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 318-322.  
HUANG Xinyi, ZHUO Weidong, SHENG Hongfei. Vehicle moving eccentricity effect on vehicle-bridge coupled vibration of curved bridges[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 318-322. (in Chinese)