

# 多参数车桥碰撞动力响应分析

彭可可, 潘启明

佛山科学技术学院, 交通与土木建筑学院, 广东 佛山

收稿日期: 2022年10月16日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月22日

## 摘要

桥梁纵坡、碰撞力水平偏角、碰撞力水平偏心是车桥碰撞的主要几何参数, 研究不同车速条件下, 上述参数对车桥碰撞动力响应的影响。基于车辆简化模型, 采用ANSYS和LS-DYNA软件, 建立车桥碰撞三维仿真动力有限元模型, 以方形墩为例, 分析车桥碰撞几何参数在设计时速为40 Km/h、60 Km/h、80 Km/h时对桥墩的顺桥向撞击力的影响。分析表明, 顺桥向撞击力峰值随碰撞速度的增加而增加。就同一碰撞速度而言, 随着桥梁纵坡的增大, 顺桥向碰撞力最大值呈现下降趋势。随着碰撞力水平偏角增加, 顺桥向碰撞力峰值呈现下降趋势。当碰撞力水平偏心距小于0.8 m时, 顺桥向碰撞力峰值随着碰撞力水平偏心的增加呈增大趋势。当撞击偏心距为0.8 m时, 顺桥向碰撞力峰值达到最大值。当偏心距大于0.8 m时, 顺桥向碰撞力峰值随偏心距增大呈减小趋势。该研究指出了不同车速条件下车桥碰撞几何参数与顺桥向碰撞力峰值的变化关系规律, 可为桥梁防撞决策和防撞设计提供理论依据。

## 关键词

车桥碰撞, 动力响应, 碰撞力, 几何参数, 仿真模拟

# Dynamic Response Analysis of Vehicle-Pier Collision with Multi Parameters

Keke Peng, Qiming Pan

School of Transportation and Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan Guangdong

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 15<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

Longitudinal slope along the bridge, horizontal impact angle and horizontal eccentricity are the main geometric parameters of vehicle-pier collision. The influence of these parameters on vehicle-pier collision dynamic response under different vehicle speeds is studied. Based on the simplified vehicle model, a three-dimensional dynamic finite element model for vehicle-pier collision

simulation is established by using ANSYS and LS-DYNA software. Taking a square pier as an example, the effects of the geometric parameters on the impact force along the bridge when the speed is 40 Km/h, 60 Km/h, 80 Km/h are analyzed. The results show that the maximum impact force along the bridge increases with the increase of impact speed. At the same speed, as the slope increases, the maximum impact force along the bridge shows a decreasing trend. With the increase of horizontal impact angle, the maximum impact force along the bridge shows a decreasing trend. When the horizontal eccentricity is less than 0.8 m, the maximum of the impact force along the bridge increases with the increase of the horizontal eccentricity. When the horizontal eccentricity is 0.8 m, the peak value of impact force along the bridge reaches the maximum value. When the horizontal eccentricity is greater than 0.8 m, the peak value of impact force along the bridge decreases with the increase of horizontal eccentricity. The research points out the trend of the relationship between the geometry parameters and the peak value of impact force, which can provide a theoretical basis for bridge collision prevention decision and design.

## Keywords

Vehicle-Pier Collision, Dynamic Response, Impact Force, Geometrical Parameter, Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城镇化建设持续的推进和交通压力的增加, 全国建设了大量立交桥, 车辆撞击桥墩时有发生, 车辆撞击对桥梁结构的安全造成了威胁。影响车撞桥墩动力响应的参数较多, 大致可以分为两类, 即与主动撞击物体相关的参数和与被撞击桥墩相关的参数。与主动撞击物体相关的参数包括冲击速度、冲击质量和撞击力的水平偏角等。与被撞击桥墩相关的参数包括柱端边界条件、桥墩轴向压力、桥墩截面尺寸、配筋情况等。

许多学者分别对上述一种或几种车撞桥墩的参数进行了研究。王潇宇[1]通过钢管混凝土柱的水平冲击试验, 研究了在不同撞击速度和不同边界条件下, 撞击力和残余位移的变化规律。K. M. A. Sohel [2]通过数值模拟方法, 研究了撞击速度、截面尺寸、轴向压力对方形钢筋混凝土柱的抗冲击性能的影响。李瑞文[3]建立了多种有限元车桥碰撞工况, 分析了车速、车重对碰撞力和桥墩变形的影响。姚鹏飞[4]以相同的碰撞速度对不同空心率的钢筋混凝土墩进行了落锤冲击试验, 研究了桥墩截面空心率、落锤质量与碰撞力峰值的关系。R.W. Li [5]采用简化小车碰撞方形墩试验和数值模拟的方法, 研究了冲击速度、桥墩纵向配筋率对碰撞力、损伤程度和能量耗散的影响。赵武超[6]通过数值模拟, 研究了不同碰撞参数对侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的动态响应以及抗冲击性能的影响, 涉及的碰撞参数包括冲击质量、冲击速度和轴压力。曹伟[7]模拟了车辆与圆形桥墩的碰撞接触过程, 研究了车撞下桥墩非线性损伤和加固技术。赵武超[8]探讨了卡车类型、冲击速度、桥墩截面等关键变量对卡车冲击力和结构刚度的影响。康昌敏[9]研究了轴压比对钢管混凝土柱侧向冲击性能的影响, 发现轴压比对钢管混凝土的侧向抗冲击性能有显著影响。司强[10]通过落锤冲击试验, 研究了柱端边界条件、轴压比和落锤高度对内衬八边形钢管空心混凝土柱的抗冲击性能的影响。陈林[11]通过数值模拟, 研究了不同柱端边界条件和箍筋直径的桥墩在车辆撞击作用下的动力响应及损伤特征。彭可可[12]基于 AASHTO 模型, 引入时间参数, 提出了一种预测桥墩损伤概率的动力学方法。蒋洪涛[13]对重卡碰撞过程进行了数值模拟, 分析了重卡质量、碰撞速度、

水平碰撞角度等参数对桥墩破坏模式的影响。

由上述诸多研究成果可知, 国内外学者对与被撞击桥墩相关的参数, 如柱端边界条件、桥墩轴向压力、桥墩截面尺寸、配筋情况等都已进行了较多的理论与实验研究。除了考虑冲击速度和冲击质量之外, 考虑其他与主动撞击物体相关的参数的车桥碰撞研究目前较少。因此, 本文分别研究了三个描述车桥碰撞的几何参数对车桥碰撞动力响应的影响。这三个参数分别为碰撞纵坡(即碰撞力竖向偏角)、碰撞力水平偏角和碰撞力作用点偏心。基于 LS-DYNA 软件对车辆与桥墩的碰撞过程进行了数值模拟, 得到了在不同碰撞几何参数的影响下, 车桥碰撞的顺桥向碰撞力峰值的变化规律, 为桥梁的防撞决策和防撞设计提供理论依据。

## 2. 基于弹塑性随动硬化模型和刚体模型的有限元建模思路

### 2.1. 车辆简化模型

公路上行驶的车辆以轿车和货车为主, 考虑到国内外车辆撞击桥墩的事故中, 车型多为货车, 又因本文数值模拟的工况较多, 所以本文使用简化的货车模型, 如图 1 所示。简化的货车模型高度为 2.45 m, 宽度为 2.5 m, 全长 11.55 m, 由车首和车身两部分组成。车首和车身均采用 SHELL163 壳单元, 厚度分别为 10 mm 和 90 mm。全车总重为 2.364 吨, 共计 8288 个单元。车首的材料本构采用弹塑性随动硬化模型(\*MAT\_PLASTC\_KINEMATIC), 相关材料参数见表 1 所示。车身的材料本构采用刚体模型(\*MAT\_RIGID) [14]。

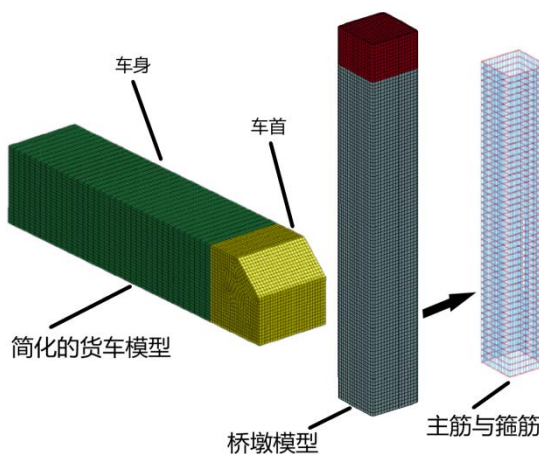


Figure 1. Finite element model of the vehicle-pier collision  
图 1. 车桥碰撞有限元模型

Table 1. MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC material parameters

表 1. 弹塑性随动硬化模型的材料参数

参数	取值	参数	取值
密度( $t/mm^3$ )	$7.85 \times 10^{-9}$	切线模量(MPa)	1180
剪切模量	210,000	应变率参数( $s^{-1}$ )	40.4
泊松比	0.3	应变率参数	5
屈服应力	235	应变率参数	0.34

### 2.2. 桥墩模型

本文采用方形桥墩模型, 将上部结构等效为质量块, 质量块与桥墩墩顶采用共节点的连接方式, 墩底

简化为固结。桥墩有限元模型高度为 10 m, 桥墩截面形状边长为 1.6 m 的正方形、四角设置直径为 100 mm 的倒角。桥墩顶部质量块的高度为 1 m, 截面形状与桥墩相同。桥墩模型的混凝土部分和墩顶质量块均采用 SOLID164 实体单元。混凝土材料本构采用 HJC 模型(\*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE) [15], 混凝土标号为 C35, 相关材料参数见表 2 所示。墩顶质量块材料本构采用刚体模型(\*MAT\_RIGID) 属性为刚体材料。主筋和箍筋均采用 LINK160 杆单元, 分别为直径 25 mm 的 HRB400 钢筋和直径 12 mm 的 HPB335 钢筋。钢筋的材料本构采用弹塑性随动硬化模型(\*MAT\_PLASTC\_KINEMATIC) [16]。

**Table 2.** HJC model material parameters

**表 2.** HJC 模型的材料参数

参数	取值	参数	取值
密度( $t/mm^3$ )	$2.4 \times 10^{-9}$	归一化最大强度	7.0
弹性模量(MPa)	32.5	弹性压强(MPa)	16.0
泊松比	0.2	弹性体应变	0.001
剪切模量(Pa)	14,860	压碎强度	800
归一化粘聚性材料参数	0.79	压碎体应变	0.1
归一化压力硬化参数	1.6	损伤参数 D1	0.04
应变率系数	0.07	损伤参数 D2	1.0
压力硬化指数	0.61	压强参数 K1 (MPa)	85,000
抗压强度(MPa)	48.0	压强参数 K2 (MPa)	-171,000
抗拉强度(MPa)	4.0	压强参数 K3 (MPa)	208,000
断裂塑形应变	0.01	参考应变率	$0.001^{-1}$

### 2.3. 接触定义

考虑到车辆与桥梁的碰撞往往是车辆头部与桥墩的碰撞, 本文只研究车辆头部与桥墩表面发生碰撞的情况。在所有的碰撞条件下, 车辆的撞击点都位于桥墩的下部, 车辆头部下缘到桥墩底部的垂直高度为 0.5 m。车辆码头碰撞模型的接触类型分为两类: 1) 车辆自身的接触类型为自动单面接触(\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE), 静摩擦系数为 0.3, 动摩擦系数为 0.25 [14]; 2) 车辆头部与码头的接触类型为自动面对面接触(\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE)。静摩擦系数为 0.3 [14], 动摩擦系数为 0.3 [14]。

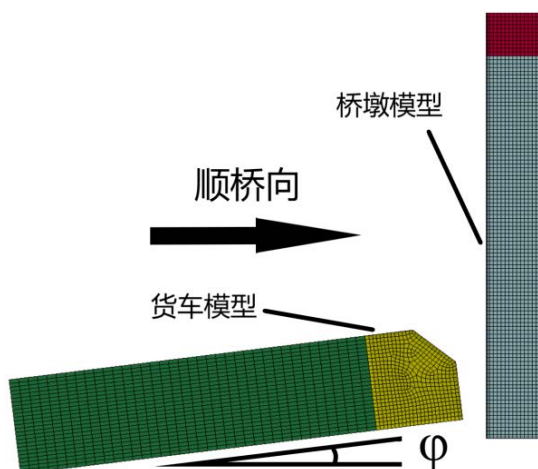
## 3. 动力响应分析

### 3.1. 桥梁纵坡对车桥碰撞的动力响应影响分析

在车桥碰撞事故中, 若碰撞发生在车辆上坡时, 车辆行驶方向不与桥墩表面垂直, 如图 2 所示, 其中地面纵坡  $\phi$  为碰撞纵坡。本节选用时速 40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 的简化货车模型, 设置碰撞纵坡为  $0^\circ$  (正撞)、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $11^\circ$ 、 $13^\circ$ 、 $15^\circ$  的撞击工况, 研究桥梁纵坡改变对桥墩动力响应的影响。

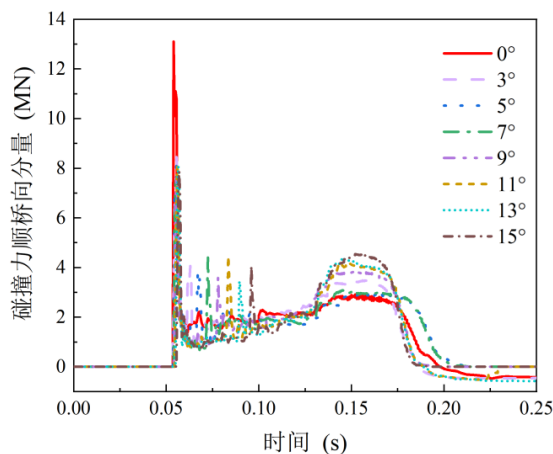
以车速为 40 km/h 的情况为例, 不同桥梁纵坡下碰撞力时程曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 各桥梁纵坡下碰撞力发展规律相似, 但顺桥向碰撞力最大值和撞击持续时间有差异。当车辆撞击桥墩后, 顺桥向碰撞力的时程曲线迅速上升至第一峰值, 随着车头内部的压缩形变, 刚度较大的车厢与桥墩发生接触, 碰撞力再次上升至第二峰值。相较于其他纵坡的碰撞, 当桥梁纵坡为  $0^\circ$  时, 因为车头正面与桥墩的初始接触面

积最大, 所以顺桥向碰撞力第一峰值是最大的, 为 13.102 MN。又因为当桥梁纵坡为  $0^\circ$  时, 小车在顺桥向碰撞力到达第一峰值的过程中耗散了大量的动能, 所以顺桥向碰撞力的第二峰值明显低于第一峰值。



**Figure 2.** Schematic diagram of longitudinal slope along the bridge

**图 2.** 桥梁纵坡示意图



**Figure 3.** Time history curves of impact forces along the bridge at different longitudinal slope along the bridge (vehicle speed = 40 km/h)

**图 3.** 不同桥梁纵坡下的顺桥向碰撞力的时程曲线(车速 = 40 km/h)

通过有限元计算结果, 绘制不同车速下的桥梁纵坡与顺桥向碰撞力最大值的的关系曲线, 如图 4 所示。由图可知, 当车辆上坡撞击时(桥梁纵坡为正), 随着碰撞纵坡不断增大, 顺桥向碰撞力最大值不断减小。这是因为碰撞纵坡越大, 车头与桥墩的初始接触面积越小, 汽车速度在顺桥向上的分量也越小, 所以顺桥向碰撞力最大值会随着碰撞纵坡的增大而减小。

### 3.2. 碰撞力水平偏角对车桥碰撞的动力响应影响分析

车桥碰撞事故中, 车辆很少直接与桥墩发生正面撞击, 往往是为了避让来往行车或者车辆失控撞上桥墩, 所以碰撞发生时, 车辆行驶方向与桥墩中心线存在一定角度, 如图 5 所示, 其中车辆初速度方向

与顺桥向的夹角  $\theta$  为碰撞力水平偏角。本节选用时速 40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 的简化货车模型, 设置碰撞力水平偏角为  $0^\circ$  (正撞)、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的撞击工况, 研究碰撞力水平偏角对桥墩动力响应的影响。

以车速为 40 km/h 的情况为例, 不同碰撞力水平偏角下的桥墩顺桥向碰撞力的时程曲线如图 6 所示。由该图可知, 在 5 种碰撞力水平偏角工况下, 顺桥向顺桥向碰撞力的时程曲线发展规律相似。当车辆撞击桥墩后, 顺桥向碰撞力的时程曲线迅速上升至碰撞力第一峰值, 此时的顺桥向碰撞力取得最大值。随着车头内部的压缩形变, 刚度较大的车厢与桥墩发生接触, 顺桥向碰撞力再次上升至第二峰值。

通过对有限元计算的结果进行分析, 绘制不同车速下的碰撞力水平偏角与顺桥向碰撞力最大值的关系曲线, 如图 7 所示。由该图可知, 随着碰撞力水平偏角增加, 碰撞力水平偏角与顺桥向顺桥向碰撞力的关系曲线总体呈现下降趋势, 这是因为当车辆撞击方向与顺桥向轴线存在一定夹角的时候, 桥墩碰撞力会出现横桥向的分量, 随着碰撞力水平偏角的增加, 顺桥向的碰撞力最值逐渐减小。但当碰撞力水平偏角在  $45^\circ$  附近取值时, 该关系曲线会出现一个小峰值, 这是因为桥墩的方形墩截面在对角线方向上的抗弯刚度比在另一条截面对称轴方向上的抗弯刚度大, 当碰撞力水平偏角在  $45^\circ$  附近取值时, 顺桥向的碰撞

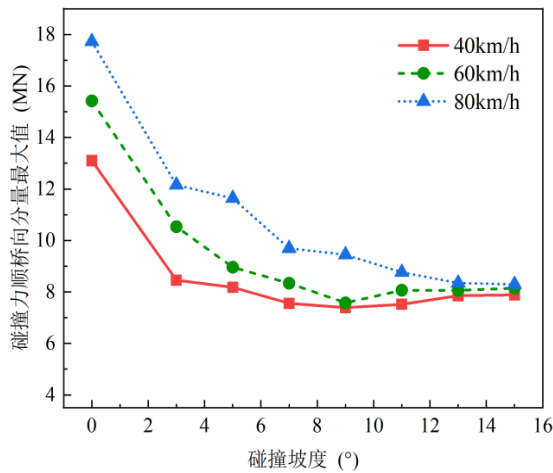


Figure 4. Relationship between longitudinal slope along the bridge and maximum impact force along the bridge  
图 4. 桥梁纵坡与顺桥向碰撞力最值的关系

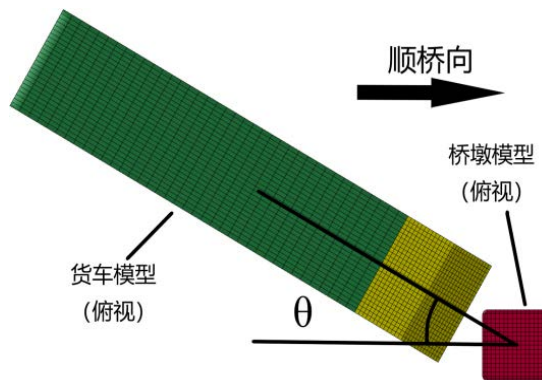
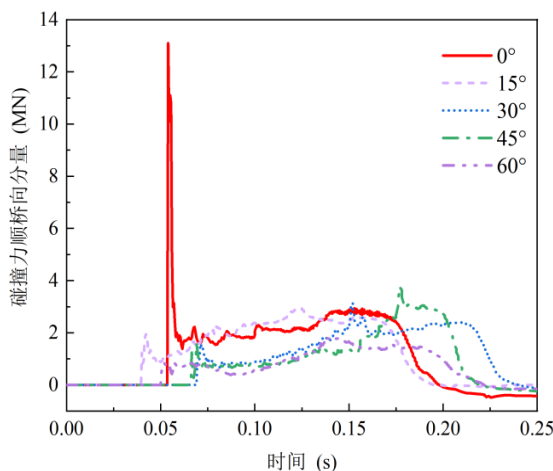
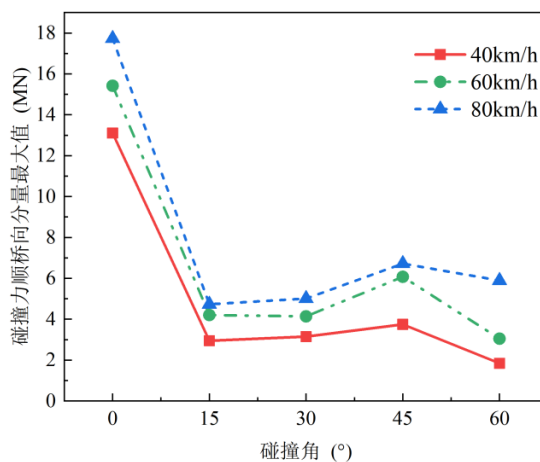


Figure 5. Schematic diagram of horizontal impact angle  
图 5. 碰撞偏角示意图



**Figure 6.** Time history curve of impact force along the bridge under different horizontal impact angle (vehicle speed = 40 km/h)

**图 6.** 不同碰撞力水平偏角下的顺桥向碰撞力的时程曲线(车速 = 40 km/h)



**Figure 7.** Relationship between horizontal impact angle and maximum impact force along the bridge

**图 7.** 碰撞力水平偏角与顺桥向碰撞力最大值的关系

力变化主要受截面抗弯刚度的影响, 截面抗弯刚度越大, 碰撞力越大。也就是说, 当碰撞力水平偏角在  $45^\circ$  附近取值时, 截面抗弯刚度的变化对顺桥向的碰撞力的影响超过了碰撞力正交分解对顺桥向的碰撞力的影响。

通过分析在碰撞力水平偏角为  $45^\circ$  时, 汽车模型的变形情况和接触点位置, 如图 8 所示, 还可以发现, 汽车的车头与方形桥墩的初始接触面积很小, 实际上接触区域就是方形桥墩的棱角。车头的变形非常不均匀, 车头压缩的速度快, 车-桥墩碰撞完成的时间短, 由动量定理可知, 在小车的冲量不变的前提下, 碰撞时间越短碰撞力越大。这也是碰撞偏角在  $45^\circ$  附近取值时, 碰撞力水平偏角与顺桥向碰撞力最大值的关系曲线会出现一个小峰值的原因之一。

### 3.3. 撞击偏心距对车桥碰撞的动力响应影响分析

当汽车中轴线和桥墩中轴线不在同一个平面时, 汽车和桥墩的碰撞为偏心碰撞, 如图 9 所示, 其

中汽车中轴线和桥墩中轴线之间在横桥向上的间距  $L$  为水平碰撞偏心距。为了研究水平碰撞偏心距对碰撞结果的影响, 本节选用时速 40 km/h、60 km/h 和 80 km/h 的简化货车模型, 分别以 0 m, 0.4 m, 0.8 m, 1.2 m 和 1.6 m 的水平碰撞偏心距撞击桥墩, 对不同工况下的车辆速度和桥墩顺桥向碰撞力进行分析。

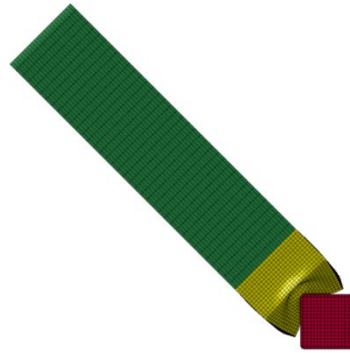


Figure 8. Deformation of the vehicle when horizontal impact angle is  $45^\circ$

图 8. 撞击偏角为  $45^\circ$  时的小车变形情况

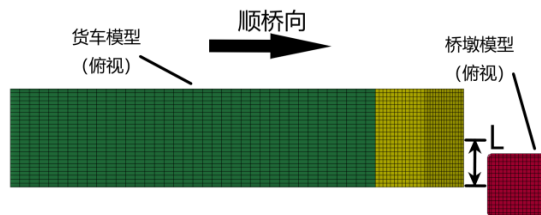


Figure 9. Schematic diagram of horizontal eccentricity

图 9. 偏心撞击示意图

以车速为 40 km/h 的情况为例, 图 10 为不同碰撞偏心距下的顺桥向碰撞力的时程曲线。

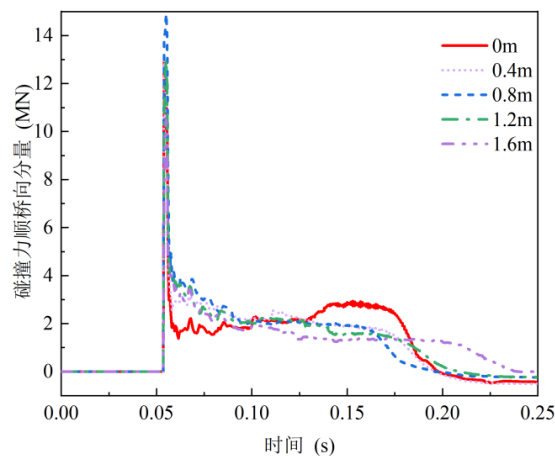


Figure 10. Time history curve of impact force along the bridge under different horizontal eccentricity (vehicle speed = 40 km/h)

图 10. 不同水平碰撞偏心距下的顺桥向碰撞力的时程曲线(车速 = 40 km/h)



由图 11 可知, 当存在偏心碰撞时, 顺桥向碰撞力的第二峰值都不明显。这是因为与正撞相比, 在偏心碰撞时, 车头与桥墩接触面积较小, 车头只能局部区域压缩, 吸收的动能大大降低, 且在车头不均匀压缩之后, 货车的速度方向不再沿着顺桥方向, 车厢难以完成第二次碰撞。且碰撞偏心距越大, 货车速度的方向改变越大。

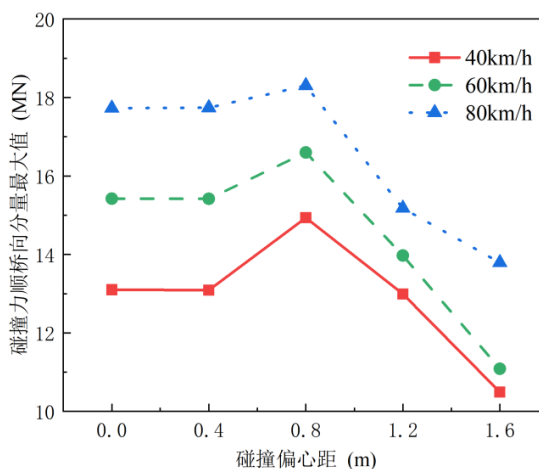


Figure 11. Relationship between horizontal eccentricity and maximum impact force along the bridge

图 11. 碰撞偏心距与顺桥向碰撞力最大值的关系

由图 11 可知, 当水平碰撞偏心距由 0 开始逐渐增大时, 碰撞力先增大后减小。当偏心距小于 0.8 m 时, 由于碰撞力作用点偏心, 导致桥墩的刚度不能充分利用, 所以碰撞力随着偏心距的增加呈增大趋势。当水平碰撞偏心距为 0.8 m 时, 碰撞力峰值达到最值。当水平碰撞偏心距大于 0.8 m 时, 车头与桥墩的接触面积减小, 由于消能作用, 顺桥向碰撞力峰值随水平碰撞偏心距增大呈减小趋势。

#### 4. 结论与展望

本文基于通用 ANSYS/LSDYNA 动力有限元软件, 建立了简化车辆模型和方形桥墩车桥碰撞三维仿真模型, 以及车桥碰撞动力有限元模型。通过大量的数值模拟试验, 研究了线路纵断面纵坡、车桥碰撞力水平偏角、车桥碰撞力水平偏心距三个几何参数在不同设计速度下对撞击力峰值的影响。得出了以下结论:

1) 碰撞时的汽车速度是影响车桥碰撞动力响应的因素之一, 顺桥向撞击力最大值随汽车速度的增加而增加;

2) 就同一碰撞速度而言, 随着碰撞纵坡(碰撞竖向偏角)增大, 顺桥向碰撞力最大值呈现下降趋势;

3) 就同一碰撞速度而言, 随着碰撞力水平偏角增加, 顺桥向碰撞力最大值呈现下降趋势。

就同一碰撞速度而言, 当水平碰撞偏心距由 0 开始逐渐增大时, 顺桥向碰撞力最大值先增大后减小。当水平碰撞偏心距小于 0.8 m 时, 顺桥向碰撞力最大值随着偏心距的增加呈增大趋势。当水平碰撞偏心距为 0.8 m 时, 顺桥向碰撞力最大值达到最大值。当水平碰撞偏心距大于 0.8 m 时, 碰撞力峰值随偏心距增大呈减小趋势。

上述研究指出了车桥碰撞几何参数与碰撞力的变化关系趋势, 可为桥梁防撞决策和防撞设计提供理论依据。车桥碰撞是一个非常复杂、仍有待研究的问题。决定撞击荷载对桥墩损伤程度的因素很多, 除桥墩本身的结构特性和本文研究的速度和碰撞几何参数外, 车辆的结构、刚度、变形能力等都起着至关

重要的作用, 进一步开展多参数综合作用下车桥碰撞力的取值问题, 是该领域研究的方向。

## 基金项目

广东省教育厅普通高校特色创新项目(项目编号: 2020KTSCX128)、国家自然科学基金项目(项目编号: 51608119)、佛山科学技术学院研究生自由探索基金(项目编号: 2021ZYTS01)。

## 参考文献

- [1] 王潇宇, Demartino, C., 徐金俊, 肖岩. 侧向冲击作用下钢管混凝土柱动力响应试验研究及计算方法[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 28-36.
- [2] Sohel, K.M.A., Al-Jabri, K. and Al Abri, A.H.S. (2020) Behavior and Design of Reinforced Concrete Building Columns Subjected to Low-Velocity Car Impact. *Structures*, **26**, 601-616. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.054>
- [3] 李瑞文, 周德源. 车辆撞击下桥墩动力响应与撞击荷载研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 83-92.
- [4] Yao, P., Zhu, J., Zhu, L., Fang, H. and Qian, C. (2021) Experimental and Numerical Analysis of Hollow and Solid Reinforced Concrete Piers under Static and Impact Loadings. *Shock and Vibration*, **2021**, Article ID: 9926010. <https://doi.org/10.1155/2021/9926010>
- [5] Li, R.W., Zhou, D.Y. and Wu, H. (2020) Experimental and Numerical Study on Impact Resistance of RC Bridge Piers under Lateral Impact Loading. *Engineering Failure Analysis*, **109**, Article ID: 104319. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104319>
- [6] 赵武超, 钱江. 侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能[J]. 工程科学学报, 2019, 41(3): 408-415.
- [7] 曹伟, 吴合良, 贺耀北. 车撞作用下桥墩非线性损伤及加固措施研究[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 147-151.
- [8] Zhao, W. and Ye, J. (2021) Impact Force Characteristic and Mechanical Behavior of Trucks in Collisions against Bridge Piers. *Structures*, **34**, 1489-1506. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.049>
- [9] 康昌敏, 王蕊, 朱翔. 轴压比对钢管混凝土柱侧向冲击性能影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(Z1): 254-260.
- [10] 司强, 王蕊. 冲击荷载下内衬八边形钢管空心钢筋混凝土柱的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 85-94.
- [11] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 祝明桥. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 261-267, 273.
- [12] Peng, K.K. (2021) Dynamic Ship-Bridge Collision Risk Decision Method Based on Time-Dependent AASHTO Model. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, **102**, 305-313. <https://doi.org/10.1007/s40030-020-00506-9>
- [13] Heng, K., Li, R., Li, Z. and Wu, H. (2021) Dynamic Responses of Highway Bridge Subjected to Heavy Truck Impact. *Engineering Structures*, **232**, Article ID: 111828. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111828>
- [14] 王建国, 陈涛. 船舶与大跨度斜拉桥碰撞的有限元数值模拟[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 12-17.
- [15] Chen, X., Xu, L. and Zhu, Q. (2017) Mechanical Behavior and Damage Evolution for Concrete Subjected to Multiple Impact Loading. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**, 2351-2359. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1143-8>
- [16] Heng, K., Jia, P., Xu, J., Li, R. and Wu, H. (2022) Vehicular Impact Resistance of Highway Bridge with Seismically-Designed UHPC Pier. *Engineering Structures*, **252**, Article ID: 113635. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113635>