文章编号:1005-0523(2013)06-0019-06

# 用LS-DYNA仿真车-桥墩碰撞时角度对桥梁的影响

程海根,邹江娜

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

**摘要**:车撞护栏规范公式表明碰撞角度与撞击力成二次函数关系,运用LS-DYNA对车-桥墩碰撞进行仿真模拟,探讨该规范公式用于车-桥墩碰撞的可行性。结果表明碰撞角度与撞击力成三次函数关系,同时也证实角度与桥梁的位移成一次线性关系,角度越大,横向位移越小,纵向位移越大。

**关键词**:车-桥墩碰撞;规范公式;碰撞角度;最大撞击力;位移

**中图分类号**:U447 **文献标志码**:A

随着我国交通事业的迅速发展,道路交通量和桥梁建设的数量与日俱增,不同路线的交叉也越来越多,带来了桥墩因受车辆撞击而诱发桥梁破坏事件甚至是垮塌事件也常有发生。所以在车流量较多的或是立体交的高架桥梁的规划和设计中,桥墩受到车辆撞击的情况尤其要重视。但是在我国现有的公路规范中主要是针对护栏被撞时对撞击情况的计算与评价,而对于实际桥墩被撞的情况却并未提及,国内外大量学者积极投身于此方面的研究[1-5]。如何科学地评价桥墩被撞时对桥梁的破坏程度,为桥梁设计和运营及养护管理等方面具有重要的现实意义和应用价值。考虑到车-桥墩碰撞实体实验的困难性,本文通过LS-DYNA软件对车-桥墩碰撞过程进行模拟研究,采用东风自卸汽车为撞击车辆,对不同的碰撞角度撞击桥墩进行数值模拟分析,并考虑对整跨桥梁的动力响应。

## 1 车辆撞击护栏撞击力规范公式

在《高速公路交通安全设施设计与施工技术规范》[6]中,忽略了车辆与结构的变形,将车桥碰撞中的复杂运动过程简化为匀减速运动以求解平均撞击力,没有考虑时间效应、阻尼、摩擦等能量损失因素。计算方法采用伪静力法给出了车辆撞击护栏的撞击力公式。

$$F=\frac{mv^2\sin^2\theta}{2\left[c\sin\theta+b\left(\cos\theta-1\right)+z\right]}$$

式中:$F$为车辆作用在护栏的最大横向力,N;$m$为车辆质量,kg;$V$为车辆的碰撞速度,m·s$^{-1}$;$\theta$为车辆的碰撞角,(°);$c$为车辆重心距前保险杠的距离,m;$b$为车辆的宽度,m;$z$为护栏的横向变形,m,对混凝土护栏$Z$=0,金属制护栏$Z$=0.3~0.6 m。

通过对公式推导过程的分析可知,护栏所受到的最大撞击力与角度成二次多项式关系。但该规范公式存在诸多的假定条件,而这些假定条件与车辆撞击桥墩的情况并不吻合,故若该规范公式用于计算和评

**收稿日期**:2013-09-03

**基金项目**:国家自然科学基金项目(51068005)

**作者简介**:程海根(1971-),男,教授,研究方向为桥梁的检测与设计。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

价车辆与桥墩碰撞时的撞击情况并不准确。如伪静力法假定车辆发生碰撞的整个过程中,车辆的纵向和横向加速度不变,而对模型分析可知,车-桥墩撞击时加速度在不停的发生变化,必然会影响撞击力的变化情况,所以有必要对研究适用于车-桥墩撞击时撞击力的公式。

## 2 车-桥墩碰撞仿真模拟计算

### 2.1 有限元模型

桥梁模型上部结构采用五片刚性连接的预应力混凝土简支梁桥,主跨20 m,桥面宽7 m;下部结构采用桥台和圆形墩柱构成,桥台尺寸为6.94 m×1.5 m×1.65 m,墩柱直径为1.4 m。主梁其中布置普通钢筋和预应力筋,但因为研究的主要是下部结构,所以在实际ANSYS建模时,并未将其考虑进去。根据桥梁结构和研究项目的特点,桥梁的上部结构有限元模型包括两个部分:主梁结构和支座,而防撞栏、桥面铺装层等其余部分予以忽略(质量包含在内)。其中支座为板式橡胶支座,采用BLATZ-KO橡胶非线性弹性材料进行模拟,其重力密度为2 600 kg·m$^{-3}$,剪切模量为1 MPa。每片板节点处理成刚性连接。本文采用的是圆形桥墩,故在研究车辆以不同的角度撞击桥墩时,可以保证撞击面积相等,排除了面积不等对撞击力的影响。整跨桥梁的材料参数如表1所示,有限元模型见图1。

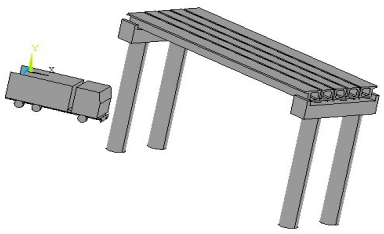


图1 整跨桥梁和汽车的有限元模型

Fig.1 The finite element model of the bridge and the vehicle

表1 整跨桥梁的材料参数

Tab.1 The material parameters of the bridge

| 仿真项目 | 主要材料 | 材料模型 | 弹性模量/×10$^4$MPa | 泊松比 |
|---|---|---|---|---|
| 主梁 | C40混凝土 | 双线性各向同性硬化模型 | 3.25 | 0.2 |
| 桥台 | C30混凝土 | 双线性各向同性硬化模型 | 3.0 | 0.2 |
| 墩柱 | C30混凝土 | 双线性各向同性硬化模型 | 3.0 | 0.2 |

车辆模型采用东风EQ3166三轴自卸汽车[7],整车尺寸为7.425 m×2.48 m×2.98 m,车架断面尺寸为4.55 m×2.3 m×0.93 m,其中前轴到中轴距离为3.6 m,中轴到后轴距离为1.35 m,前轮距为1.94 m,后轮距为1.86 m,空载时质量为13 t,满载时为55 t,最高车速为80 km·h$^{-1}$。整个车辆模型利用ANSYS软件建立三维有限元模型,并对其进行单元网格划分,尤其是对车辆结构的特性如质量、转动惯量、结构重力及刚度均进行准确模拟。在简化模型中,虽然车辆的很多组成部分依旧被忽略了,但本文认为简化模型是合理的,无法避免会导致该简化模型的计算结果和实际桥梁动力响应特征并不完全一致,但只要不影响结果的判定即可。车辆模型的材料参数如表2。

表2 车辆模型的材料参数

Tab.2 The material parameters of the vehicle model

| 仿真项目 | 单元类型 | 材料模型 | 密度/(kg·m$^{-3}$) | 弹性模量/×10$^5$MPa | 泊松比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 车头 | 壳单元 | 分段线性塑性材料 | 7 800 | 2.1 | 0.3 |
| 车厢 | 壳单元 | 刚体材料 | 22 000 | 2.1 | 0.3 |
| 车架 | 实体单元 | 刚体材料 | 7 800 | 2.1 | 0.3 |

车-桥墩碰撞过程是大变形、高压和高应变的问题,在壳体的材料模型选择时,还必须考虑材料的失效

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和应变率的影响，针对于钢材故采用了Cowper-Symbols模型[8]，该模型的失效是基于有效塑性应变、塑性疏伐和平面主应变[2]，其中的参数 $C=40.4$ ，$P=5.0$ ，材料模型中会自带材料的失效准则，一般钢材的失效应变取为0.35，屈服强度为235 MPa。车厢部位并非是撞击部位，而只是提供一个惯性力的作用，因此为了提高计算效率把该部分的模型看成是刚体来进行软件模拟。为了简化分析，利用改变车厢的密度来分别模拟车辆空载和满载时不同质量的情况。车架部位[9]采用非承载式车架，将所有构件都设置为刚体。

## 2.2　撞击工况

本文取车辆行驶方向与桥梁横向的夹角为碰撞角度，如图2所示。针对以下不同的工况（表4）进行了模拟分析。

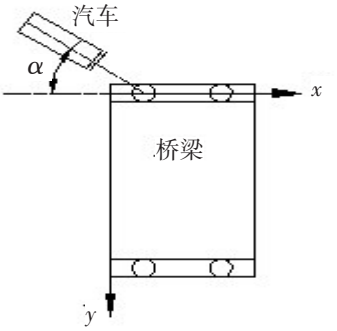



图2　碰撞角度示意图

Fig.2　The diagram of the collision angle

表3　工况参数

Tab. 3　The parameters of the project

| 工况 | 碰撞角度/(°) |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 2 | 20 |
| 3 | 40 |
| 4 | 60 |
| 5 | 70 |
| 6 | 90 |

在6种工况下，车辆的质量均取空载13 t，碰撞部位均为车头与桥墩下部碰撞。考虑到驾驶员在碰撞前均会采取自发的刹车行为，故虽然行驶速度比较大，但实际上碰撞速度并不大，故本文取碰撞速度均取2 780 mm·s$^{-1}$（即10 km·h$^{-1}$）。

## 2.3　仿真计算结果

### 2.3.1　桥墩的最大撞击力

本文所研究的车桥碰撞的撞击部位位于桥墩处。故从有限元模型中提取出桥墩受撞部位的最大撞击力。图3给出了工况一即角度为0°时的最大撞击力时程曲线。从图中可以看出，随着撞击时间的增加，撞击部位所受到的撞击力会出现明显的波峰及波谷，而这个原因在于汽车由于受到桥墩的阻力作用，自身的加速度和速度的大小和方向也在不断地变化，两者同向时撞击力则越来越大，直至到达波峰，而两者反向时撞击力则越来越小，直至到达波谷，并且随着撞击过程的进行，能量也在不断的消耗，直至为0。

从规范公式可以得出最大撞击力曲线图，将本文车辆和桥梁的参数代入进去可得撞击力与角度的变化曲线图（图略），分析其规律可知最大撞击力与角度成二次多项式关系，对该公式进行合理修正，用于车-桥墩撞击上时如图4所示。利用LS-DYNA分别提取不同角度撞击时桥墩部位的最大撞击力，并同时绘出图4作为原始数据，从图中可以看出在不同的角度碰撞下规范公式与原始数据拟合效果并不好，故认为最大撞击力与角度之间并不是像规范公式中所计算出两者成二次函数关系，而是成三次函数关系，并且平行撞击时的撞击力几乎是正面撞击时的近两倍。这可能是因为在角度改变的

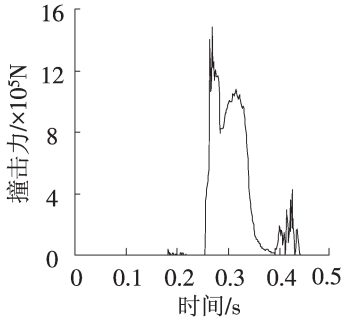



图3　角度为0°时的最大撞击力时程曲线图

Fig.3　The time history curve of the maximum impact force（0°）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同时,桥梁上部结构的刚度也随之发生改变,故三次多项式拟合效果更好。

2.3.2 桥梁的横向位移

不同角度碰撞下桥墩处的横向位移时程曲线如图5所示。从图中可以看出,随着角度的增加,碰撞所导致的桥墩的横向位移在不断的减小,即正面碰撞(0°)时最大,平行碰撞(90°)时最小。

正面碰撞时,桥墩会受到很大的水平撞击力,使之墩身和墩顶产生很大的横向位移,而这些下部结构的变化必然会带动桥梁的上部结构发生变化,这些变化主要表现为承台、桥端、跨中等部分的位移。桥梁的横向的破坏主要在于承台与桥端的位移差,一旦两者之间的位移差超过了本身预留的距离时,将会导致承台结构的破坏,使桥梁与承台和桥墩不再成为一个整体共同承担荷载的作用,这对于桥梁结构来说是一个致命性的破坏,很有可能导致桥梁结构的垮塌。但车桥碰撞过程是一个瞬时的过程,故横向位移并不会向图中所示一样持续增加。从不同的角度的有限元模型中提取出汽车的速度曲线图可知,汽车从初速度为2 780 mm·s$^{-1}$(10 km·h$^{-1}$)降至0 mm·s$^{-1}$时的时间仅为0.1 s,可见这是一个瞬时的动态过程。本文取汽车的速度降至0 mm·s$^{-1}$时的时间为撞击停止的时间,即 $t$ = 0.35 s,取此时桥梁的横向位移为最大位移。图6给出了 $t$ = 0.35 s时不同角度碰撞下的承台与桥端的横向最大位移差。从图中可以看出:碰撞所产生的横向位移差与角度成一次线性减小。最大位移差为角度是0°时,位移差达到了7 mm而一般承台设计中,此位移差为10~20 mm,可见在初速度较小时,任何角度的车桥碰撞都不足以对承台造成破坏。

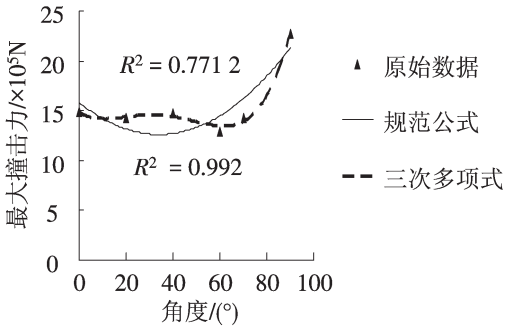



**图4 不同的角度碰撞下的最大撞击力的曲线图**

**Fig.4 The curve of the maximum impact force at different collision angles**

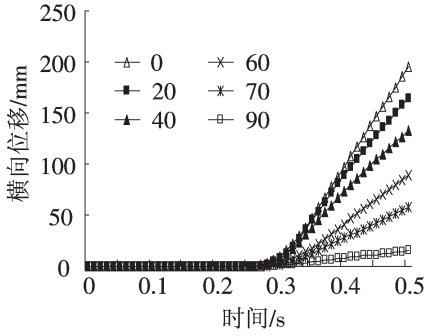



**图5 不同角度碰撞下桥墩处的横向位移时程曲线**

**Fig.5 The horizontal displacement time history curve of the bridge pier at different collision angles**

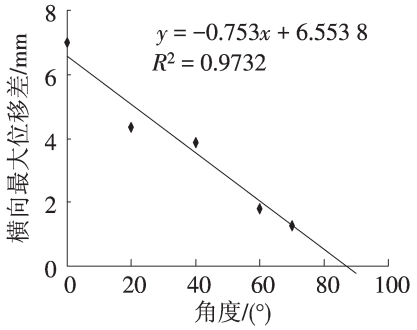



**图6 $t$=0.35 s时不同角度碰撞下的承台与桥端的横向最大位移差**

**Fig.6 The maximum horizontal displacement difference of bearing platform and bridge at different collision angles ($t$=0.35 s)**

2.3.3 桥梁的纵向位移

不同角度碰撞下桥墩处的纵向位移时程曲线如图7所示。从图中可以看出,随着角度的增加,碰撞所导致的桥墩的横向位移在不断的增大,即正面碰撞(0°)时最小,平行碰撞(90°)时最大。

桥梁的纵向的破坏主要在于桥梁端部的位移,两跨桥梁之间的端部都会预留一部分的空间,用以调节桥梁的温度变形或是其他。对于简支桥梁来说,桥梁端部变形若是超过了预留的范围,则会将本跨所受的变形传递到下一跨上,也就是相当于对下一跨桥梁端部施加纵向水平力,会使桥梁的承载力有一定的影响。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图8给出了 $t$ = 0.35 s时不同角度碰撞下的桥端的纵向最大位移。从图中可以看出：碰撞所产生的纵向最大位移与角度成一次线性增加。最大位移差为角度是90°时，位移差达到了11 mm，而一般预留的距离为10~20 mm，可见在初速度较小时，任何角度的车桥碰撞对下一跨的影响都比较小。

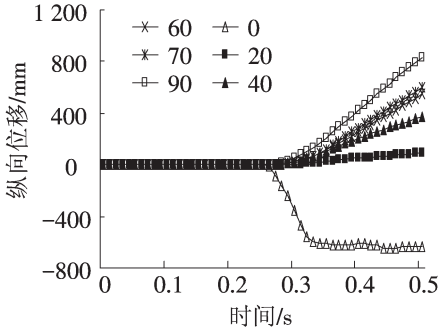



图7　不同角度碰撞下桥墩处的纵向位移时程曲线

Fig7　The longitudinal displacement time history curve of the bridge pier at different collision angles

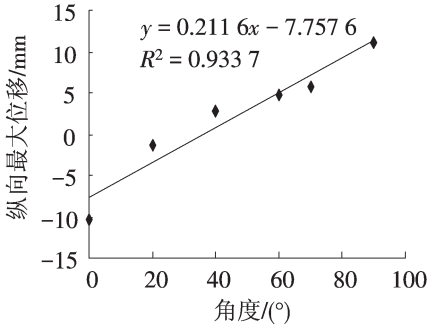



图8　$t$=0.35 s时不同角度碰撞下的桥端的纵向最大位移

Fig. 8　The maximum longitudinal displacement of the bridge pier at different collision angles ($t$=0.35 s)

## 3　结语

车–桥墩碰撞是一个高度非线性的问题，决定碰撞对桥梁结构损伤程度的因素有很多。汽车自身的特性、车辆自身的特性和不同的工况特征等都对最终的碰撞结果起着非常重要的作用。本文仅针对不同的角度对汽车撞击桥墩后桥梁的响应进行了数值分析，得出结论如下：最大撞击力与角度成三次函数关系，并且平行撞击时的撞击力几乎是正面撞击时的近两倍；桥梁的位移与角度成一次线性关系，角度越大，横向位移越小，纵向位移越大。故在实际立体交叉高架桥设计时，在行驶车速较大时，偶然的车–桥墩碰撞对桥梁上部结构的影响较大，有必要将此偶然作用考虑进去。

**参考文献：**

[1] 中交公路规划设计院. JTG D60-2004 公路桥涵养护规范[S]. 北京：人民交通出版社，2004.
[2] EL TAWIL S，SEVERINO E，FONSECA P. Vehicle couision with bridge press[J]. Journal of Bridge Engineering，2005，10(3)：345-353.
[3] 包宇波，胡斌. 应用LS-DYNA进行汽车正面碰撞模拟分析[N]. 科技创新导报，2008-09-28(7).
[4] 蒋洪涛，裴小吟. 车辆撞击城市跨线桥桥墩的损伤机理分析[J]. 西部交通科技，2011，42(1)：66-69.
[5] 陈水生. 公路车桥耦合振动响应计算方法对比研究[J]. 华东交通大学学报，2011，28(3)：18-25.
[6] 中交公路规划设计院. JTJ074-94. 高速公路交通安全设施设计与施工技术规范[S]. 北京：人民交通出版社，1994.
[7] 赵辉. 基于LS-DYNA公路桥梁车桥耦合振动响应研究[D]. 南昌：华东交通大学，2011.
[8] 王泽鹏，胡仁喜，康士廷，等. ANSYS13.0/LS-DYNA非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2011：44-47.
[9] 浙江省教育厅职成教教研室. 汽车构造与拆装[M]. 北京：机械工业出版社，2011：53-57.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

# Influence of Angle on Bridge in Vehicle-Pier Collision Based on LS-DYNA Simulation

Cheng Haigen, Zou Jiangna

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract**: The standard formula in crash barrier shows that collision angle and impact force are in a quadratic function relation. This paper discusses the feasibility of the standard formula in the vehicle-pier collision based on LS-DYNA vehicle-pier collision simulation. The results indicate that impact force has cubic function relationship with the collision angle and the displacement of the bridge has primary linear relationship with the collision angle: the greater the angle is, the smaller the horizontal displacement is, and the bigger the longitudinal displacement is.

**Key words**: vehicle -pier collision; standard formula; collision angle; impact force; displacement

(上接第11页)

# Influences of Wheelset Defection Angle on Dynamic Performance of High-speed Railway Vehicle

Zou Ruiming, Ma Weihua, Bi Xin

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract**: In order to investigate the influences of wheelset defection angle on dynamic performance of high-speed train, this paper analyzed the stress distribution of wheelset with defection angle and the effects of motion tracing as it progresses in theory at first. A dynamic model was built up by SIMPACK based on high-speed railway vehicle in our country. It analyzed the influences of wheelset defection angle on dynamic performance in straight track and curve passing separately. And it draws a conclusion that the 1st and 2nd wheelset will deviate from the rail central line in reversed deflection with the defection angle of 1st wheelset, reducing the operation safety. The ride stability has less been affected by small wheelset defection angle, but largely impacted on stability when the angle is greater than 1mrad; Defection angle will cause certain negative effects on curve passing, and the effects increase with the angle. So the defection angle should be minimized for high-speed train as far as possible to control it within 1mrad.

**Key words**: wheelset defection angle; high-speed railway vehicle; dynamic performance; bogie

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net