

# 基于车厢变形推算撞击作用的研究

刘小燕<sup>1</sup>, 李仁杰<sup>1</sup>, 王光辉<sup>2</sup>, 贺龙飞<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南理工学院 土木建筑工程学院, 湖南 岳阳 414006)

**摘要:** 基于痕迹学理论, 研究超高车辆撞击桥梁上部结构后车厢的变形特征, 提出了基于车厢变形快速计算车桥撞击作用的方法. 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立车桥碰撞仿真模型, 分析了不同车重、车速的超高车辆与桥梁撞击效应, 揭示了车辆撞击作用与车厢变形受车速、车重影响的规律. 由实测的车厢变形、车辆质量推算出撞击时的车速, 计算了该车辆对某桥梁的撞击效应. 考虑车厢变形特征的超高车辆撞击桥梁效应仿真分析结果可为桥梁的损伤评估、维修加固提供依据.

**关键词:** 桥梁工程; 车桥碰撞; 车厢变形; 瞬态分析

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-5298(2018)02-0071-05

## Analysis of Vehicle Impact Effect on Bridge Based on Vehicle Deformation

LIU Xiaoyan<sup>1</sup>, LI Renjie<sup>1</sup>, WANG Guanghui<sup>2</sup>, HE Longfei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University Of Science And Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Hunan Institute Of Science And Technology, Yueyang 414006, China)

**Abstract:** On the basis of ichnology theory, the deformation characteristics of over-high trucks impacting on superstructures of bridges are studied. An efficient computational approach is presented for evaluating vehicle impact effect based on the vehicle deformation. The ANSYS/LS-DYNA is used to establish the vehicle-bridge interaction model. Numerical studies of vehicle-bridge impacts were conducted considering different vehicle weights and driving speeds of over-high vehicles. The numerical results show the influence of driving speeds and vehicle weights on the vehicle impact effect and vehicle deformation. The driving speed of a vehicle impacting on a bridge was evaluated based on its deformation and vehicle weight, and the impact effect of the vehicle on a bridge was computed. The simulation result of the impact effect of an over-high vehicle impacting on a bridge considering vehicle deformation characteristics provides a basis for the fast assessment of bridge damage, maintenance and reinforcement.

**Key words:** bridge engineering; vehicle-bridge interaction; vehicle deformation; transient analysis

近年来, 我国城市立体交通高速发展, 随之而来的是超高车辆撞击桥梁上部结构事故时有发生. 车辆的撞击会对桥梁结构造成损伤, 同时也会严重影响城市交通, 甚至造成重大的人员伤亡和巨大的经济损失. 为了有效减少和避免此类事故的发生, 人们纷纷开展对车桥碰撞作用的研究. 崔堃鹏<sup>[1]</sup>采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了卡车撞击桥墩有限元模型, 分析了不同车速下的撞击力, 并将撞击荷载等效为静力荷载, 给出车撞桥墩撞击力的计算方法; 马祥禄<sup>[2]</sup>等通过有限元软件对超高车辆撞击桥梁上部结构进行模拟分析, 研究了不同撞击车速、车重等情况下桥梁的受力状态, 但没有给出具体的撞击作用计算方式, 而现有规范、标准仅仅给出了车撞桥墩撞击力的计算值, 对车辆撞击桥梁上部结构撞击作用的计算完全是空白; 文[3]建立了车桥碰撞有限元仿真模型, 通过大量计算提出了一种由车速、车重推算车辆撞击桥梁上部结构撞击作用的计算方法, 它是建立在已知车速、车重的基础上. 然而在车辆撞击桥梁事故中, 由于撞击发生突然且短暂, 车辆撞击的速度往往是很难检测的, 因此, 难以利用车速、车重计算撞击作用大小. 因此, 找到一种能还原撞击车速、快速估算撞击作用的方法, 成为车桥撞击作用计算亟需解决的问题.

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057701); 长沙科技计划项目(k1309003-11)

作者简介: 刘小燕(1963-), 女, 湖南桃江人, 教授. 主要研究方向: 钢筋混凝土基本理论; 桥梁结构设计计算

本文建立车桥碰撞有限元仿真模型,大量地计算不同工况下的车桥撞击作用力。基于痕迹学理论,研究撞击作用、车厢变形与车速、车重之间的规律,拟合车厢变形与车辆质量、速度的相关曲线,实现对撞击时车辆速度的还原,最终根据车厢变形量计算撞击作用大小。

## 1 车桥碰撞模型建立

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立超高车辆撞击 T 梁桥上部结构有限元模型,计算撞击作用。在模型中充分考虑碰撞过程中的材料非线性和接触非线性<sup>[4]</sup>,以确保能较真实地模拟车桥撞击过程。

车辆采用文[4]中所提的标准双轴卡车 F800 有限元模型。选取标准跨径为 30m 的预应力混凝土简支 T 梁桥为受撞桥梁模型,桥梁横断面由 5 片 T 梁构成,从支座到跨中每 5m 设置一道横隔板,为考虑最不利受撞的情形,跨中不设横隔板。

采用分离式建模方法建立 T 梁桥模型<sup>[5]</sup>。主梁 C50 混凝土采用 SOLID164 单元模拟,材料本构模型采用 HJC(Holmquist-Johnson-Cook)模型<sup>[6-8]</sup>;普通钢筋选用 HRB400,采用 LINK160 杆单元模拟,材料本构关系选用考虑材料应变率的 Cowper-Symonds 模型<sup>[9]</sup>。车桥之间设置接触来实现耦合,使用自动面面接,采用莫尔-库仑接触类型,摩擦系数取为 0.2<sup>[10]</sup>,具体计算见文[11]。车辆正面撞击桥梁跨中位置,超高值 250mm<sup>[12]</sup>。车桥耦合模型如图 1 所示。

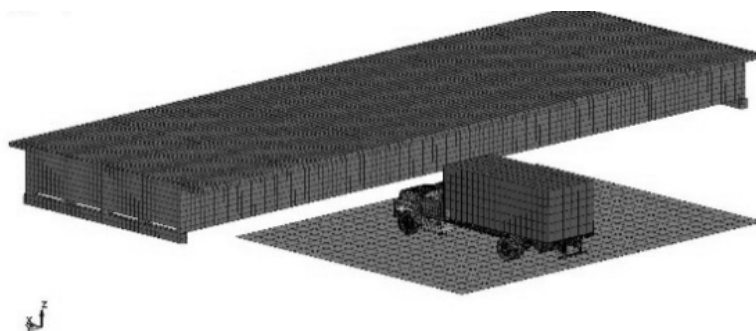


图 1 车桥耦合模型

## 2 痕迹学原理与应用

痕迹学,即通过事故发生后遗留下来的内在或外在痕迹来反推其发生和演变的过程<sup>[13]</sup>,这是一种逆向思维的方法,它被广泛应用于交通事故的鉴定、刑侦技术破案等领域。在交通事故鉴定过程中,鉴定人员通过交通事故现场车体痕迹来推断事故发生前车辆的速度,为交通事故原因、责任的认定提供理论依据。

超高车辆撞击桥梁上部结构后,由于桥梁刚度远大于车辆刚度,故桥梁的变形相对比较小,车体的变形相对比较大,按照痕迹学理论,如果能够根据汽车车厢的变形,反推出碰撞前车体的速度,甚至撞击作用大小,这样就能快速计算撞击作用力了。按照这一思路,利用有限元模型进行大量的计算分析,特别是重点研究撞击后的车厢变形情况,准确地测量车厢的变形、选取车辆的变形体积作为合适的变形参数,并将其用于撞击作用的关系式中。

采用文[14]中提到的关键点测量法测量车厢上各关键点变形量,然后再由各关键点变形值计算出车厢的变形体积。由车厢撞击变形图(图 2)可知,车厢沿各个方向均会发生不同程度的变形,其中沿车厢宽度的挤压变形较小,故为了简化计算不考虑沿车厢宽度的变形,将车厢沿宽度中心取剖面进行二维的变形计算分析,车厢变形剖面如图 3 所示。

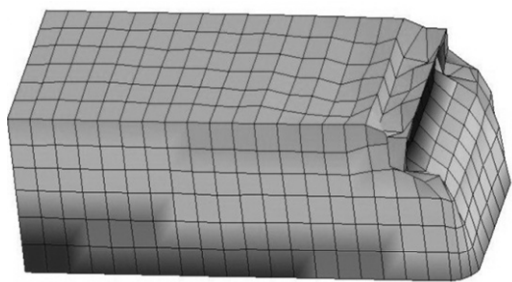


图2 车厢变形

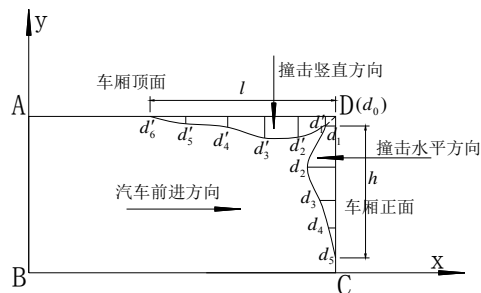


图3 车厢变形剖面示意图

取车厢上远离碰撞区且变形较小的三个角点 A、B、C 作为测量参考点, 建立车厢剖面坐标系. 本文取车厢正面水平方向最大变形深度值作为车厢变形的最大变形值( $d_{\max}$ ), 同时将车厢剖面的变形面积 $d_s$ 乘以车厢宽度获得的变形体积 $d_v$ 作为车厢变形的另一考查值.

以车厢正面(CD)水平方向变形为例, 由关键点变形量( $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$ )计算两相邻关键点的平均变形深度, 相邻两关键点的高度为 $h_m$ , 则可得车厢横向的平均变形量

$$d_{\text{aver}} = \frac{1}{2h} \sum_{m=1}^n h_m (d_{m-1} + d_m). \quad (1)$$

其中 $h$ 为车厢变形高度, 车厢正面沿高度方向的水平向变形面积

$$d_{s1} = d_{\text{aver}} h. \quad (2)$$

同理, 车厢顶面(AD)变形在水平面投影面积

$$d_{s2} = d'_{\text{aver}} l. \quad (3)$$

其中 $l$ 为车厢变形长度;  $d'_{\text{aver}}$ 为车厢竖向平均变形量.

设车厢宽度为 $w$ , 通过计算出的两个方向的面积, 可得变形体积

$$d_v = (d_{s1} + d_{s2}) \cdot w. \quad (4)$$

### 3 车桥撞击作用计算与分析

车辆撞击桥梁上部结构是一动态过程, 撞击作用是一条时程曲线<sup>[4]</sup>. 在桥梁设计中一般是将其等效为静力荷载, 用撞击力的最大值或平均值(总冲量与撞击持续时间之比值)计算, 如图4所示. 撞击作用的大小受到多种因素的影响, 本文结合文[2]的研究结果, 主要考虑车速、车重对撞击作用的影响, 同时研究车厢变形与车速、车重的关系, 最终得出撞击作用与车厢变形的关系.

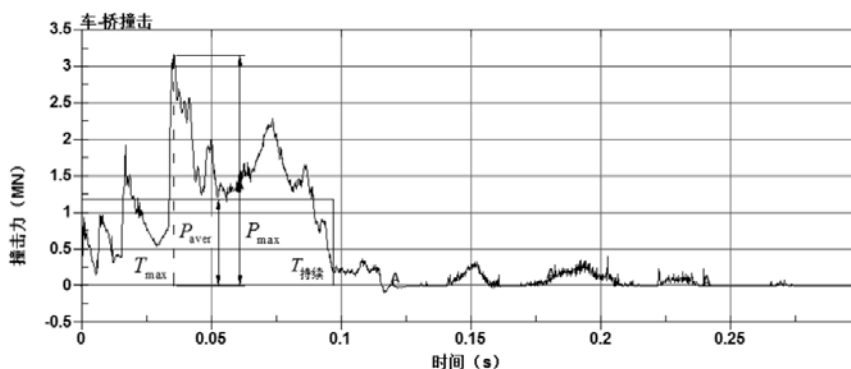


图4 撞击力时程曲线

#### 3.1 撞击作用与撞击车速、车重关系

文[15]已经得出平均撞击力和最大撞击力关于车速、车重的关系为

$$P_{\text{aver}} = R_1 F_1(v) G_1(m), \quad (5)$$

$$P_{\max} = R_1' F_1'(v) G_1'(m). \quad (6)$$

其中  $R_1$ 、 $R_1'$  为常数项;  $v$ 、 $m$  为撞击车速(km/h)、车重(t);  $F_1$ 、 $G_1$ 、 $F_1'$ 、 $G_1'$  为撞击作用关于车速、车重的关系式;  $P_{\text{aver}}$ 、 $P_{\max}$  的单位是 MN.

为了更全面地获取车速、车重与撞击作用之间的关系, 选取多种工况进行撞击模拟计算, 具体见表 1.

表 1 碰撞参数取值

参数	取值					
车辆速度(km/h)	30	40	50	60	70	—
车辆质量(t)	8	10	15	20	25	30

表 1 中, 不同车速和车重自由组合, 共有 30 种工况. 由仿真模型计算出每种工况对应的平均撞击力和最大撞击力, 进行曲线拟合, 即可得到撞击作用关于车速、车重的计算公式.

依照文[15]将计算结果进行整理, 发现水平撞击力平均值和峰值与车速、车重均呈非线性关系, 比较符合二次函数的变化规律, 故用二次函数  $y = ax^2 + bx + c$  来拟合水平撞击力和车速、车重的关系, 最终得到水平撞击力关于车速、车重的函数关系为

$$P_{h\text{aver}} = 2.6045(-0.0003v^2 + 0.0395v - 0.3723)(-0.0014m^2 + 0.0801m - 0.1217), \quad (7)$$

$$P_{h\max} = 4.2269(-0.0004v^2 + 0.0546v - 0.7546)(-0.001m^2 + 0.0544m + 0.2736). \quad (8)$$

同理, 竖直撞击力与车速、车重的函数关系为

$$P_{v\text{aver}} = 1.2424(-0.0004v^2 + 0.0478v - 0.4474)(-0.0022m^2 + 0.1052m - 0.187), \quad (9)$$

$$P_{v\max} = 2.1941(-0.0004v^2 + 0.0475v - 0.4131)(-0.0015m^2 + 0.0694m + 0.259). \quad (10)$$

### 3.2 车厢变形与撞击车速、车重关系

车桥撞击后, 不同撞击程度即车辆质量、速度都会影响到撞击时车厢的变形. 应用痕迹学的逆向思维方法, 可根据撞击后车厢变形推断出特定车重下撞击发生时的车速. 按照这个思路, 需先建立起车厢变形关于车速、车重的函数关系.

采用关键点测量法测量出表 1 中各工况对应的关键点车厢变形值, 并由关键点变形值计算出车厢变形体积, 通过计算整理了车厢变形与车速、车重的关系曲线, 如图 5~8 所示, 呈现明显的线性关系.

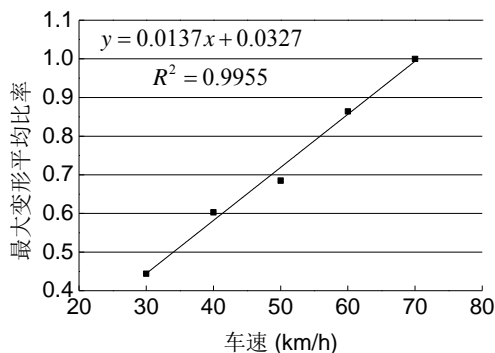


图 5 最大变形比率与车辆速度拟合关系曲线

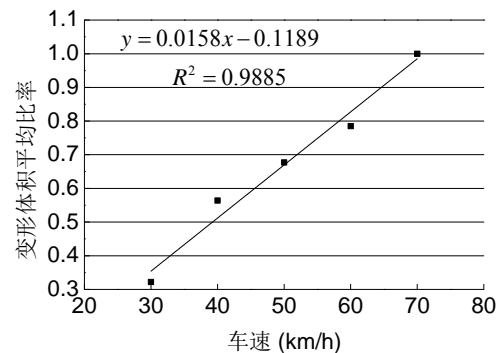


图 6 变形体积比率与车辆速度拟合关系曲线

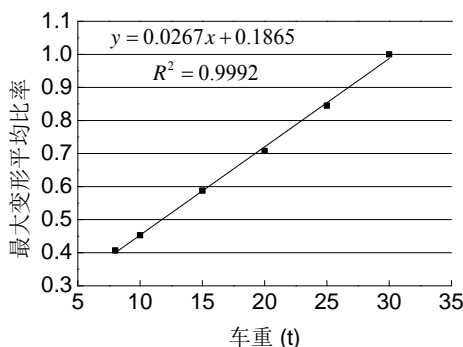


图 7 最大变形比率与车辆重量拟合关系曲线

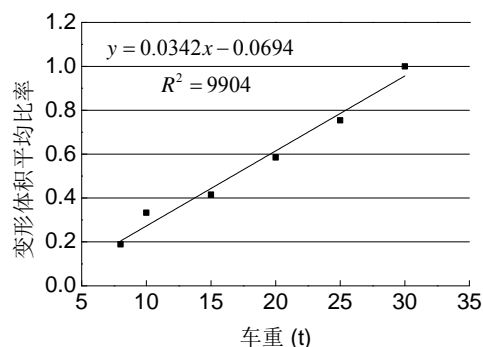


图 8 变形体积比率与车辆重量拟合关系曲线

对于含有两个变量(车速、车重)的公式采用常规曲线拟合方法是很难成功的,本文借鉴文[15]中的多参数曲线拟合方法来获取车速、车重与车厢变形的关系式.求解中,车速、车重是两个独立的变量,故车厢变形最大值 $d_{\max}$ 、车厢变形体积 $d_v$ 与车速、车重函数关系式可以假设为

$$d_{\max} = R_2 F_2(v) G_2(m), \quad (11)$$

$$d_v = R'_2 F'_2(v) G'_2(m). \quad (12)$$

其中 $R_2$ 、 $R'_2$ 为常数项; $v$ 、 $m$ 为撞击车速(km/h)、车重(t); $F_2$ 、 $G_2$ 、 $F'_2$ 、 $G'_2$ 为撞击变形关于车速、车重的关系式; $d_{\max}$ 的单位是m, $d_v$ 的单位是 $m^3$ .

由图5~8中各点的分布规律可知,最大变形( $d_{\max}$ )和变形体积( $d_v$ )与车速、车重均呈线性关系,因此采用线性函数 $y = ax + b$ 来拟合.

将得到的 $F_2$ 、 $G_2$ 、 $F'_2$ 、 $G'_2$ 代入式(11)和(12),再将所有工况数据结果进行拟合,得出 $R_2 = 1.3070$ , $R'_2 = 5.4403$ ,即可得到撞击变形与车速、车重的关系为

$$d_{\max} = 1.3070(0.0137v + 0.0327)(0.0267m + 0.1865), \quad (13)$$

$$d_v = 5.4403(0.0158v - 0.1189)(0.0342m - 0.0694). \quad (14)$$

将式(13)、(14)移项得到车速关于车厢变形和车重的函数关系为

$$v = \frac{d_{\max}}{0.0005m + 0.0033} - 2.3869, \quad (15)$$

$$v = \frac{d_v}{0.0029m - 0.0060} + 7.5253. \quad (16)$$

由于在实际工程中,车辆最大变形比变形体积更易于获得,故推荐通过最大变形来推算撞击速度,同时结合变形体积来加强验证.

### 3.3 撞击作用与车厢变形关系

前面已经建立了撞击作用、车厢变形与撞击车速、车重的关系式.联合相关函数式,消去车辆撞击速度变量,即可获得撞击作用关于车重、车厢变形的关系式.

(1) 车速关于车厢变形、车重的关系:

$$\begin{cases} v = \frac{d_{\max}}{0.0005m + 0.0033} - 2.3869, \\ v = \frac{d_v}{0.0029m - 0.0060} + 7.5253. \end{cases}$$

(2) 水平撞击作用计算公式:

$$\begin{cases} P_{h\text{aver}} = 2.6045(-0.0003v^2 + 0.0395v - 0.3723)(-0.0014m^2 + 0.0801m - 0.1217), \\ P_{h\text{max}} = 4.2269(-0.0004v^2 + 0.0546v - 0.7546)(-0.001m^2 + 0.0544m + 0.2736). \end{cases}$$

(3) 竖直撞击作用计算公式:

$$\begin{cases} P_{v\text{aver}} = 1.2424(-0.0004v^2 + 0.0478v - 0.4474)(-0.0022m^2 + 0.1052m - 0.187), \\ P_{v\text{max}} = 2.1941(-0.0004v^2 + 0.0475v - 0.4131)(-0.0015m^2 + 0.0694m + 0.259). \end{cases}$$

由于车厢变形和车辆质量在撞击发生后都容易获得,这样就能方便准确地估算出桥梁受车辆撞击时的撞击作用情况,为受撞桥梁的快速评估、维修加固提供参考.

## 4 结语

本文基于变形痕迹学原理,研究撞击作用、车厢变形与撞击车速、车重的关系,实现了通过车桥碰撞后易获取的车厢变形与车辆质量,对撞击时车辆速度的还原和撞击作用的快速推算,为受撞桥梁结构的受力计算提供了依据.

(下转第78页)