

超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析*

张炎圣¹ 陆新征¹ 宁 静² 江见鲸¹

(清华大学¹ 北京 100084) (北京市计算中心² 北京 100005)

摘要 基于高性能非线性有限元,对超高车辆-组合结构桥梁碰撞进行了高精度仿真分析,结果表明,组合结构桥梁由于下部的钢板较薄,抗撞击能力差,遭到超高车辆撞击后,易产生较大变形和较大范围的钢板屈服,从而使截面产生扭转,桥梁应力大幅提高;超高车辆撞击对组合结构桥梁的破坏比较严重,在实际应用中需要对组合结构桥梁进行有效地防撞保护。

关键词 组合结构;桥梁;碰撞;非线性;有限元

中图分类号:U 44 文献标识码:A

0 引言

随着我国城市规模的日益扩大,城市道路交通压力与日俱增。大量建设公路立交桥梁,发展立体交通成为解决该问题的重要途径。根据有关数据统计,北京的立交桥半数曾被超高车辆撞击,超高车辆撞击导致的桥梁损坏已占损坏桥梁总数的20%以上。因此,需深入研究超高车辆撞击立交桥的车-桥碰撞机理,科学评价超高车辆撞击对桥梁的损坏情况。

组合结构是结构工程领域近来发展很快的一个方向,因其能充分发挥混凝土的抗压强度和钢材的抗拉强度,应用范围越来越广泛^[1-2]。

目前,国内对车辆碰撞的研究多集中于车撞桥墩和车撞护栏方面^[3-7],很少涉及超高车辆对立交桥梁的碰撞。因进行超高车辆与立交桥梁碰撞的试验代价昂贵,人们常利用计算机进行仿真分析。其中应用较多的软件是MSC.MARC 2005程序^[8],它能对超高车辆-组合结构桥梁碰撞问题进行高精度仿真分析,并能模拟由碰撞造成的桥梁损坏情况。

1 有限元模型

为了叙述方便,以下将超高车辆简称为卡车;组合结构桥梁简称为桥梁,因此,超高车辆-组合结构桥梁碰撞可简称为卡车-桥梁碰撞。本次卡车-桥梁碰撞仿真分析,有限元模型包括数万个单元,充分考虑了碰撞过程中的几何非线性、材料非

线性以及接触非线性,以确保能较真实地模拟卡车-桥梁碰撞过程。

1.1 桥梁模型

某2幅4车道的组合结构简支梁桥单幅截面如图1所示。桥梁跨越8车道,跨度为30m。因为2幅在结构上互相独立,所以只对其中1幅进行分析。桥梁的横断面包括300mm厚的混凝土面板,以及2个1m高的梯形钢箱梁。梯形钢箱梁的上边宽2.5m,下边宽1.5m。桥梁结构的横断面参见图1。

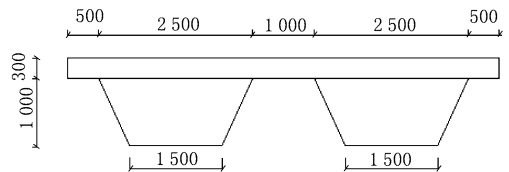


图1 桥梁横断面尺寸(mm)

桥梁上部结构包括混凝土面板和钢箱梁。混凝土面板划分成六面体单元,考虑了混凝土的压碎、开裂等复杂非线性行为。钢箱梁划分成壳单元,钢材采用基于von Mises屈服准则的弹塑性本构模型。钢箱梁底板和支座处横隔板的厚度为30mm,腹板和中间2个横隔板的厚度为18mm。混凝土面板和钢箱梁之间通过共用节点模拟完全剪力连接。

正确模拟桥梁的支承条件是仿真分析的一个重点。桥梁的上部结构和承台之间布置了400mm×400mm×50mm的方形多铅橡胶隔震支座,水平刚度为3kN/mm^[9]。为了真实模拟隔震支座的行,将钢箱梁通过面-面接触直接放在承台顶面,通过接触传递竖向荷载,水平方向可以相对运动。钢箱梁和承台之间设置水平弹簧模拟隔震

收稿日期:2007-02-12

*北京市科委资助项目(批准号:y0605010041231)

支座。

桥梁的有限元模型如图2所示,有关参数如表1所列。本次分析对桥梁上部结构及其支承条件的仿真程度较高,从而保障了分析结果的精度。

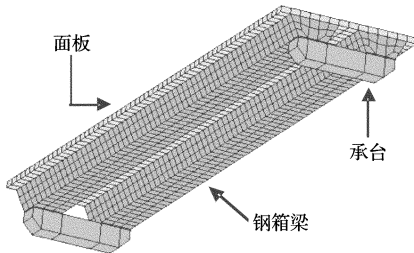


图2 桥梁有限元模型

表1 桥梁模型有关材料参数

材料	E/MPa	ν	f_c/MPa	f_y/MPa	f_t/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
混凝土	3×10^4	0.2	30		3	2 500
钢材	2×10^5	0.3		300		7 800

1.2 卡车模型

随着国际汽车行业的飞速发展,汽车碰撞动力分析发展迅速。由美国联邦高速公路局(FHWA)和美国高速公路安全协会(NHTSA)支持的“国家碰撞分析中心”(National Crash Analysis Center, NCAC)推出了基于LS-DYNA软件的标准汽车模型,供相关研究者免费下载。本文采用NCAC提供的标准双轴卡车有限元模型,该模型原本是基于LS-DYNA软件的,需要进行适当的修改,才能适应MSC/MARC 2005软件。另外,根据李广慧等人的研究成果^[10],对卡车重量进行了适当调整,以符合我国常见双轴卡车重量。确定的卡车模型如图3所示。同桥梁模型一样,本次分析对卡车模型的仿真程度也较高,进一步保障了分析结果的精度。

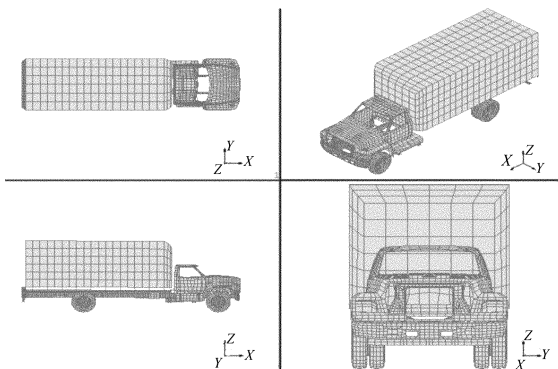


图3 卡车有限元模型

1.3 分析工况

本次卡车-桥梁碰撞分析,考虑了桥梁自重、桥上车荷载以及卡车的撞击作用,撞击位置在1/2跨处。其中车荷载的布置按照B级车荷载

规定。对于撞击作用,分析了初始车速分别为30, 60, 90, 120 km/h时,桥梁被撞击后的受力和变形情况。

2 计算结果及其分析

2.1 不同工况桥梁变形及损伤情况

卡车-桥梁碰撞是十分复杂的车桥相互作用过程。本文选取跨中截面(即正碰截面)和桥梁端部截面进行讨论。每个截面取若干个关键点,关键点的位置以及编号如图4所示。

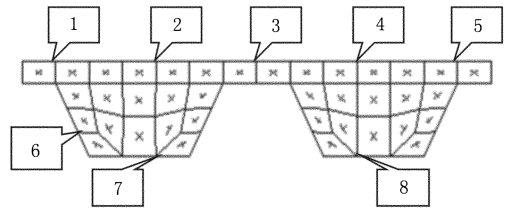


图4 关键点的位置及其编号

跨中截面6号点是正碰点,碰撞过程产生较大的内凹变形,图5是跨中截面6号点相对3号点的侧移,也就是钢箱梁正碰点内凹变形量。从图5可以看出,碰撞过程中,6号点的内凹变形先是迅速达到最大值,然后由于弹性恢复,内凹变形有所减小。由于塑性发展,内凹变形无法消除,而是稳定在一个值附近。

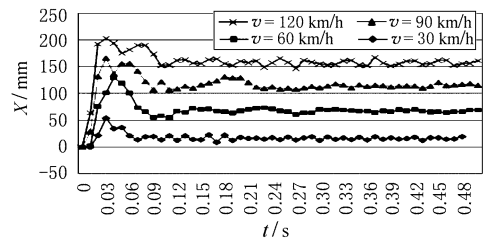


图5 钢箱梁正碰点内凹变形量

在碰撞过程中,由于水平方向上的隔震支座的刚度较小,所以桥梁除了发生正碰点的局部内凹变形外,还发生整体的水平振动。图6是跨中截面和跨端截面3号点的侧移时程曲线,该点的侧移能够反映桥梁的整体侧移。对比图6(a)和6(b)可以看出,由于隔震弹簧刚度远小于桥梁的整体横向弯曲刚度,使得跨中截面和跨端截面的侧移几乎相等,桥梁自身的弯曲变形相对很小,从而大大降低了桥梁的内力。可见采用隔震支座,不仅可以提高桥梁在地震下的安全水平,还可以减小碰撞事故对桥梁的破坏作用。

图5,图6表明,撞击速度越大,钢箱梁正碰点的塑性变形越大。例如,当 $v=120$ km/h时内凹塑性变形达到150 mm,变形量超过截面有效宽度的

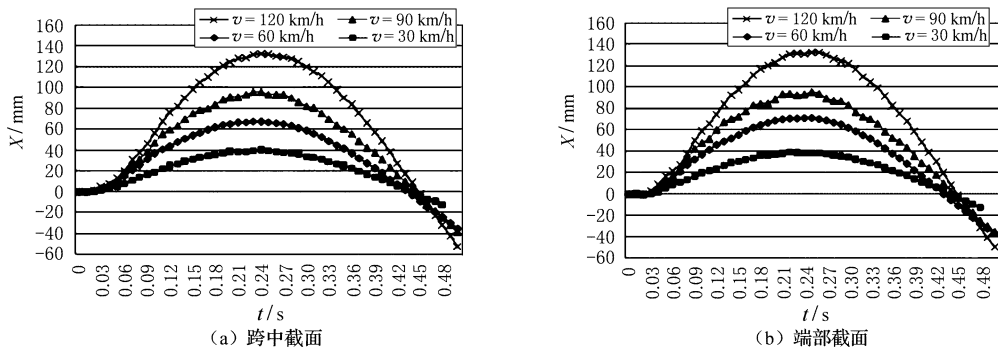


图6 碰撞过程中桥梁不同截面整体侧移历程

1/10, 严重削弱了构件的抗弯承载力。另外, 撞击速度越大, 桥梁整体侧移的峰值也越大, 对支座的水平变形量的要求就越高。例如, 当 $v = 120 \text{ km/h}$ 时, 侧移量达到 135 mm, 如果支座的水平变形能力达不到要求, 支座就会被损坏。

为了分析碰撞过程桥梁损伤情况, 有 2 个时间点应给予关注, 一是正碰点内凹变形达到最大值的时间点 t_1 , 另一个是正碰点内凹变形达到稳定值的时间点 t_2 。表 2 给出不同工况的 t_1 和 t_2 的值。本次分析结束仅耗时 0.48 s, 此时, 各个工况的内凹变形已趋稳定, 所以 t_2 可取分析结束的时间点即 0.48 s。

表2 各种工况位移达到最大时间和碰撞结束时间

t/s	v/(km · h ⁻¹)			
	30	60	90	120
t_1	0.03	0.04	0.03	0.03
t_2	0.48	0.48	0.48	0.48

由于钢箱梁正碰点的内凹变形, 使得跨中截面的受力和变形发生变化。撞击速度越大, 内凹变

形也越大(参见图5), 截面有效受拉区削弱得也越严重(当速度达到 120 km/h 时, 截面受拉区有超过 1/10 受到削弱)。下面对碰撞造成的跨中截面内力和变形进行分析, 分析点的位置及其编号仍如图 4 所示。

图 7 给出 t_1 、 t_2 时刻, 桥梁上表面 1~5 号关键点的竖向位移, 从而反映截面的扭转情况。由图 7 可见, 在碰撞过程中, 由于车撞击在钢箱梁底部, 给桥梁一个整体的扭转作用, 最大扭转幅度 ($v = 120 \text{ km/h}$) 超过正常使用阶段的 5 倍。因此建议在设计中, 如果桥梁可能受到车辆撞击的话, 应当考虑此扭转作用。

图 8 为混凝土面板上 2 号点和 4 号点的压应力随车速的变化情况。图 9 为钢箱梁底板 7 号点和 8 号点的等效力随车速的变化情况。从图 7、8、9 可以看出: 车-桥碰撞过程中, 除了正碰点的局部变形外, 对桥梁影响最大的是由碰撞引起的整体扭转变形。扭转使被撞钢箱梁上面的混凝土面板

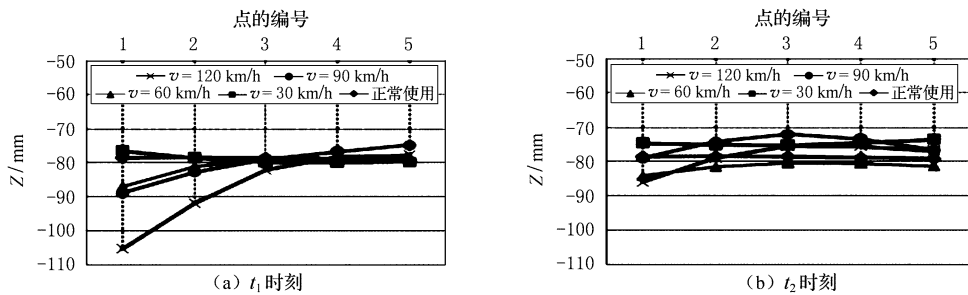


图7 不同车速下 t_1 时刻和 t_2 时刻跨中截面扭转情况

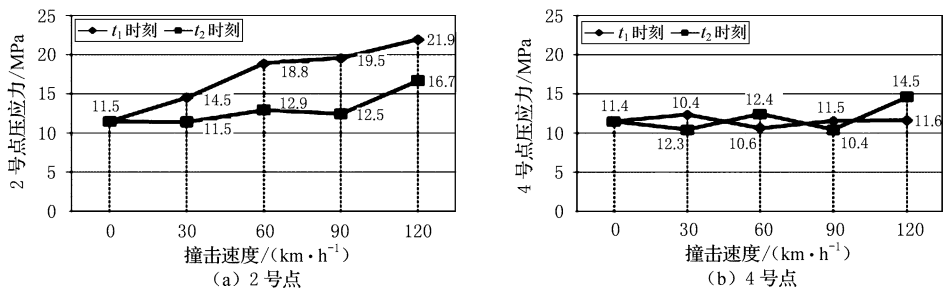


图8 混凝土面板压应力随车速变化情况

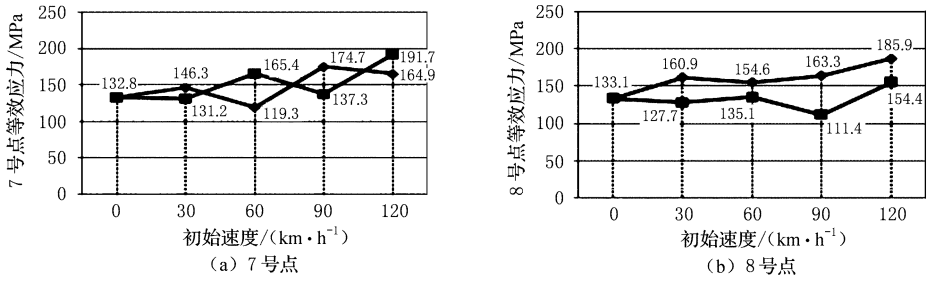


图9 钢箱梁底板等效应力随车速变化情况

(2号点)的应力增加了约1倍,使另一个钢箱梁底板(8号点)应力增加了近50%(图8(a),9(b))。可见,钢箱梁被撞,加大了上部混凝土和另一个钢箱梁承担的内力。且撞击速度越大,桥梁损伤越严重。

组合桥梁遭到撞击之后,损伤情况包括钢箱梁的屈服变形,以及混凝土面板的开裂。图10、图11分别是 $v = 30 \text{ km/h}$ 和 $v = 120 \text{ km/h}$ 时, t_1 、 t_2 时刻钢箱梁的塑性应变和混凝土面板的开裂应变

云图。

图5已经表明,当车速不断增大时,碰撞点的最终内凹变形也不断增大,当车速达到 90 km/h 以上,内凹变形量达到 100 mm 以上。

图10、图11进一步表明,随着车速的增大,钢箱梁的塑性区域也不断扩大,碰撞区附近混凝土的裂缝宽度也不断增大,当车速达到 120 km/h 时,钢箱梁塑性区大小超过当 $v = 30 \text{ km/h}$ 时的塑性区大小的3倍。

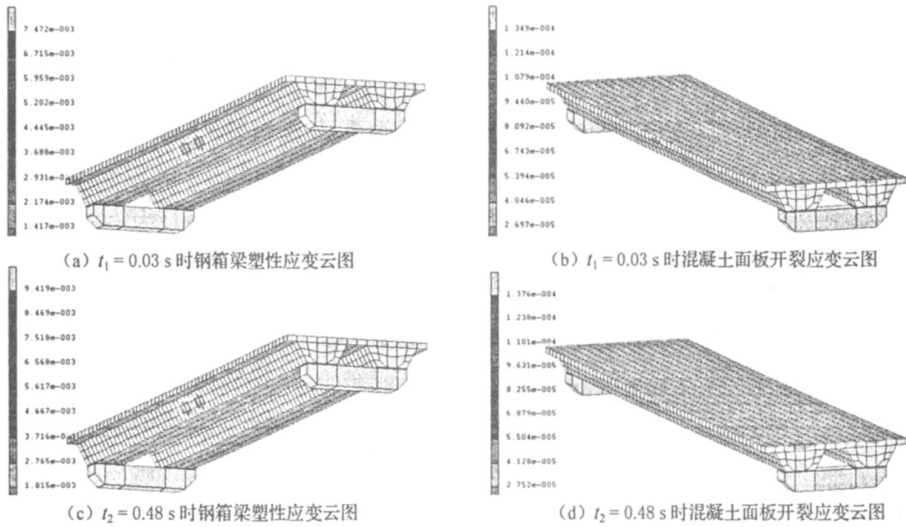


图10 $v = 30 \text{ km/h}$ 桥梁损伤情况

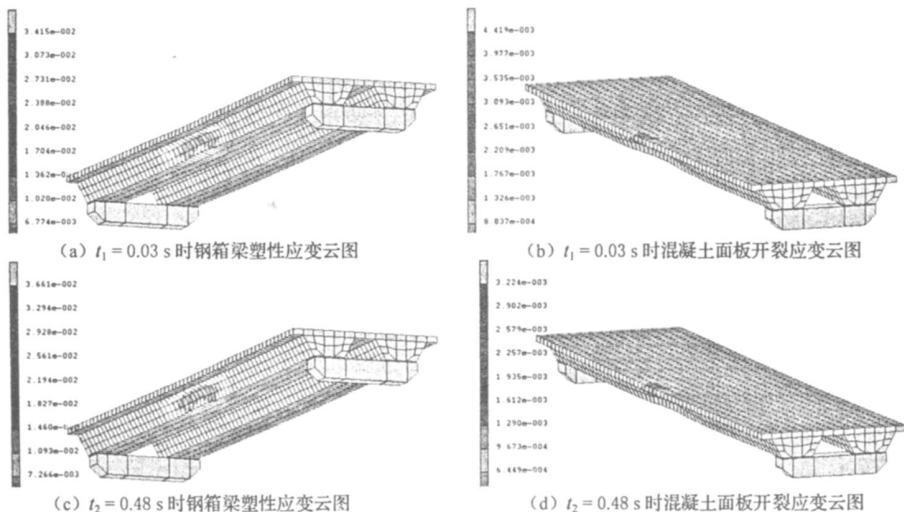


图11 $v = 120 \text{ km/h}$ 桥梁损伤情况

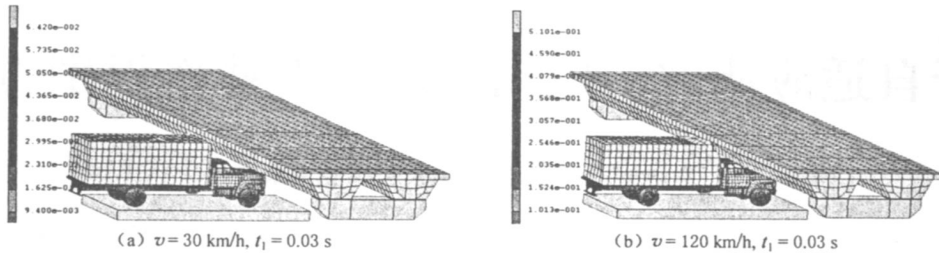


图12 卡车的破坏情况

2.2 不同工况卡车破坏情况

卡车车厢破坏情况随车速的增大而加大,图12以 $v=30\text{ km/h}$ 和 $v=120\text{ km/h}$ 为例给出不同工况下卡车在 t_1 时刻的变形情况。 $v=30\text{ km/h}$ 时,卡车车厢发生破坏的区域很小, $v=60\text{ km/h}$ 、 90 km/h 时破坏区域逐渐加大。当 $v=120\text{ km/h}$ 时,车厢的前面 $1/4$ 区域都被破坏。另外, $v=60$ 、 90 km/h 时,碰撞过程出现了车的后轮离地的现象,当 $v=120\text{ km/h}$ 时,出现车的前后轮都离地的现象,且车的大梁变形也随着车速增大而增加。

3 结论

超高速车辆-立交桥碰撞是十分复杂的过程,本文利用高性能非线性有限元,对超高速车辆-组合桥梁进行高精度的仿真分析,得出如下结论:

1) 鉴于超高速车辆撞击立交桥的事故频频发生,开展超高速车辆-立交桥的碰撞研究很有必要。利用有限元软件,可以很好地进行这一过程的仿真分析,避免真实实验的高昂代价。仿真分析的结果可以科学评价超高速车辆撞击造成桥梁的损伤情况。

2) 组合结构桥梁由于下部的钢板较薄,抗撞能力较差。遭到超高速车辆撞击以后,容易产生较大变形和较大范围的钢材屈服,从而使得截面产生扭转,这对桥梁受力十分不利。

3) 鉴于组合结构被撞的后果较为严重,实际设计、运营和维护等过程中要注重对组合结构桥梁采取防撞措施。

参考文献

- [1] 聂建国,刘明,叶列平. 钢-混凝土组合结构. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 聂建国,余志成. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.
- [3] 陆勇,曹立波. 对汽车撞柱的仿真研究. 农业装备与车辆工程, 2006, 174(1): 28-31.
- [4] 郑福荣,刘燕霞,吕浩,等. 轿车碰撞安全性的评价及车身碰撞安全性设计. 天津汽车, 2006(4): 12-16.
- [5] 雷正保,周屏艳,颜海棋,等. 汽车-护栏系统耐撞性研究的有限元模型. 中国安全科学学报, 2006, 16(8): 9-16.
- [6] 姚启明. 汽车碰撞防撞护栏碰撞力计算方法的研究. 上海公路, 2003(sup): 122-127.
- [7] 刘佳林,赵强,甘英,等. 汽车撞击城市立交桥墩后对桥墩结构的影响. 公路工程与运输, 2006, 144(3): 169-171.
- [8] 江见鲸,何放龙,何益斌,等. 有限元法及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 杜修力,韩强,刘文光,等. 方形多铅芯橡胶支座力学性能研究. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 125-130.
- [10] 李广慧,张存超,王东炜,等. 高速公路桥梁活荷载参数研究. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(1): 20-22.

Computer Simulation for the Impact Between Over-high Truck and Composite Viaduct

ZHANG Yan sheng¹ LU Xin zheng¹ NING Jing² JIANG Jian jing¹

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)¹

(Beijing Municipal Computing Center, Beijing 100005, China)²

Abstract: A high precision simulation for the truck-composite viaduct impact based on high performance nonlinear finite element analysis was presented. The results show that the impact may result in serious damage to the bridges and that protection against impact should be given to composite bridges.

Key words: composite structure; viaduct; impact; nonlinear; finite element