

# 超高车辆与立交桥梁 碰撞的高精度非线性有限元仿真

陆新征<sup>1</sup>, 张炎圣<sup>1</sup>, 宁 静<sup>2</sup>, 江见鲸<sup>1</sup>, 任爱珠<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 北京市计算中心, 北京 100005)

**摘要:** 超高车辆和立交桥梁之间的碰撞事故屡见不鲜, 深入研究车-桥碰撞机理, 为提出车-桥碰撞桥梁损害计算方法奠定基础, 具有重要的现实意义。基于高性能非线性有限元, 对超高车辆-立交桥碰撞进行了高精度仿真分析, 并对不同车速导致的桥梁损害情况进行了讨论。分析结果可为深入研究车-桥碰撞问题提供参考。

**关键词:** 碰撞; 立交桥; 车辆; 仿真; 非线性

**中图分类号:** U447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3226(2007)01-0029-06

## 1 引言

随着我国城市规模的日益扩大, 大量建设立交桥, 发展立体交通, 成为缓解城市地面交通压力的主要途径。由于驾驶人员素质不高, 加上监管力度不到位, 超高车辆与立交桥的碰撞事故屡见不鲜。因此如何科学评价超高车辆撞击对桥梁的破坏, 进而在桥梁的设计、运营、维护等过程中对此类破坏进行正确考虑, 是一个有着重要应用价值的课题。国内目前对此类课题的研究成果还很少, 车辆结构碰撞多集中于评价车撞桥墩或者车撞护栏等<sup>[1-5]</sup>。由于重车撞实桥的试验难度相当大, 且代价非常高昂(基本上是车毁桥伤), 所以通过计算机模拟技术进行车-桥碰撞分析, 就具有非常明显的优势。

近年来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。以 LS-DYNA 为代表的汽车碰撞有限元分析软件得到了非常广泛的应用。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) 还推出了基于 LS-DYNA 软件的标准汽车模型, 供相关研究者免费下载。而计算机技术的飞速发展, 使得汽车碰撞模拟这类大规模工程计算问题门槛不断降低。因此, 国内外很多科研机构都开展了基于 LS-DYNA 的汽车碰撞模拟分析研究<sup>[1-3]</sup>。

但是, 与一般汽车碰撞安全分析所不同的是: 做汽车碰撞分析关心的是汽车以及汽车里面乘员的安全问题, 而对被撞对象 (比如桥墩等) 的分析精度要求不高。被撞对象直接采用线弹性或简单弹塑性材料甚至刚体模型模拟问题都不大<sup>[4,5]</sup>。但是对于本课题而言, 立交桥梁是需要重点研究的对象, 其材料的屈服、开裂、钢筋和混凝土的组合方式等重要细节都对分析结果有着重要影响<sup>[6,7]</sup>。而从汽车工程和抗爆工程发展起来的 LS-DYNA 程序进行复杂立交桥结构建模存在较大难度<sup>[8,9]</sup>。因此, 采用在土木结构非线性分析方面有着广泛应用的 MSC/MARC 2005 程序<sup>[7]</sup>, 对超高车辆-立交桥碰撞问题进行了非线性仿真分析, 并对碰撞造成的桥梁损坏情况进行了讨论。

传统的车-桥碰撞分析大多基于非常简化的模型, 例如将卡车简化为一移动的质量体, 将被撞桥梁简化为刚体或者简单的空间梁单元, 而碰撞过程则简化为一个弹簧-阻尼体系。这样的模型是受过去计算机分析能力限制而不得已采用的简化方法, 由于过多简化而引入了很多假设, 且许多参数的取值存在困难, 与真实情况的吻合程度也难以保证。而现代高性能计算为此类课题的研究提供了更加真实模拟碰撞过程的可能性。例如, 在本文研究中, 用了数万个壳单元和实体单元, 真实地建立了卡车的车身结构, 包括

收稿日期: 2006-10-30

作者简介: 陆新征 男 1978 年出生 讲师



车头、底盘、车轴、车轮等等。同样的,桥梁的几何外形,以及内部的混凝土、钢筋配置情况,都得到了比较准确的模拟。且碰撞过程中的接触非线性、钢材的屈服和失稳、以及混凝土的开裂等都可以在模型中加以真实反映,从而保证了分析的精度和真实性。

## 2 有限元模型

### 2.1 立交桥模型

目前立交桥结构中,钢筋混凝土结构占了绝大部分。混凝土本身是一个非常复杂的工程材料,存在开裂、压碎等多种复杂力学行为。一般常用的土木工程结构分析程序,例如 MSC MARC, ABAQUS, ANSYS, ADINA 等都自带有较好的混凝土本构模型,且提供了组合式钢筋模型或整体式钢筋模型等配筋建模方式<sup>[6]</sup>。由于立交桥的受力、变形和破坏是研究的重点,因此,选择了在钢筋混凝土有限元分析上具有较好表现的 MSC MARC 2005 程序作为仿真分析的软件平台<sup>[7]</sup>。采用实体单元建立混凝土模型,用 MSC MARC 自带的钢筋单元 (Rebar Element) 模拟钢筋,通过给钢筋单元输入初始应力来模拟预应力筋<sup>[6]</sup>。其中,混凝土材料受压采用弹塑性本构模型,受拉采用基于最大拉应力准则的弥散裂缝模型。钢材采用基于 Von Mises 屈服准则的理想弹塑性本构模型,具体参数设置参见文献 [6] 和文献 [7]。分析的立交桥模型如图 1 所示,主梁为四根预应力 T 形梁,跨度为 25 m,桥面宽度为 8 m,主梁高度为 1.6 m。可见分析中数值模型对桥梁实际情况的仿真程度较高,从而保证了分析结果的精度。

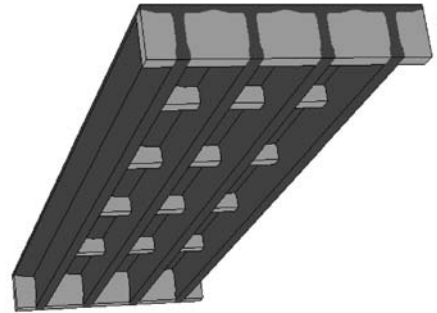


图 1 被撞桥梁模型

### 2.2 卡车模型

采用美国国家碰撞分析中心实验室提供的标准双轴卡车有限元模型,但该模型原本是基于 LS-DYNA 软件的,需要进行适当的修改以适应 MSC MARC 2005 的分析。卡车钢材采用基于 Von Mises 屈服准则的弹塑性本构模型,卡车车轮采用弹性材料模型。另外,根据李广慧等的研究成果<sup>[10]</sup>,对卡车质量进行了适当调整,以符合我国常见双轴卡车质量。最终卡车模型如图 2 所示。同样可见分析对卡车数值模型的仿真程度也较好,从而有效保障了分析结果的精度。

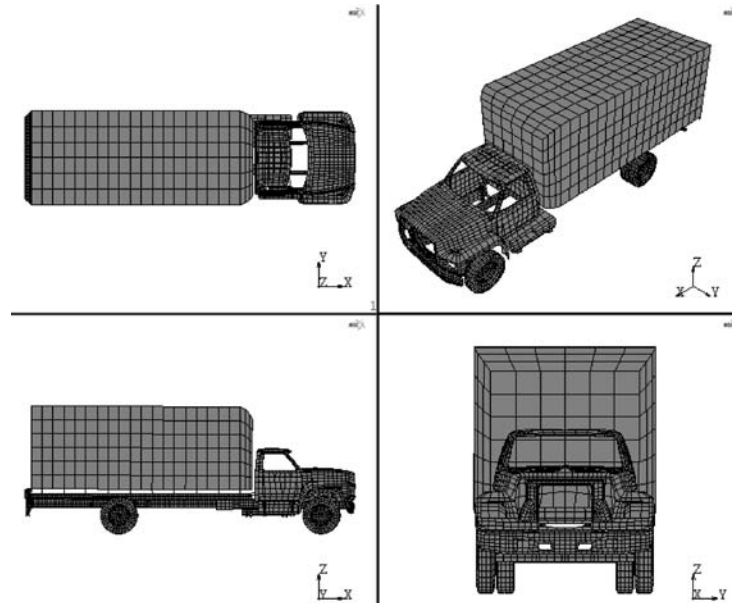


图 2 卡车三视图

### 2.3 分析工况

分别分析了车以 4 种不同时速撞击桥梁的工况: ①工况 1, 车速 60 km/h; ②工况 2, 车速 80 km/h; ③工况 3, 车速 100 km/h; ④工况 4, 车速 120 km/h。

### 2.4 接触分析网格收敛性验证

有限元分析结果受单元网格划分密度影响很大,特别是本算例牵涉到复杂的接触问题,因此在分析前有必要对网格收敛性进行检查,证明网格划分已经足够细密,再细分网格对计算结果影响不大。为了避免桥梁结构材料非线性的干扰,网格收敛性验证时对桥梁采用线弹性材料本构模型。图 3 为两个不同桥梁网格密度的计算结果对比,其中精细网格的单元大小比粗糙网格小了一倍。计算结果表明,不同网

格密度对桥梁和车体变形差异影响很小。说明对于本模型而言,桥梁接触分析的网格已经足够精确。

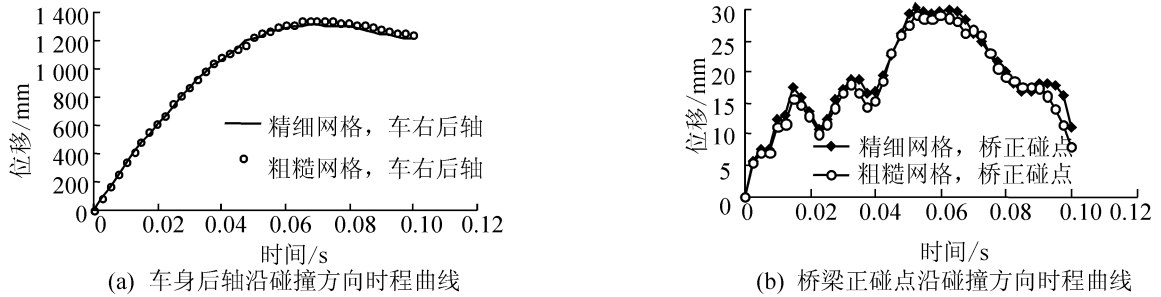


图 3 不同单元网格对计算结果的影响

### 3 计算结果

#### 3.1 不同工况卡车破坏情况

计算得到碰撞过程中车身后轴时程曲线如图 4,以时速 60、120 km/h 为例,计算得到的车身变形情况如图 5、图 6 所示,为了清晰起见,不再显示支座和主梁之间的连梁。从图 4 和图 5、图 6 中不难看出,随着车辆时速的增加,车身变形明显增加,60 km/h 时速撞击时,仅前方局部车厢变形,车体整体变形不大。而当时速增加大到 120 km/h 时,不仅车厢前部近 1/4 完全撞毁,而且车身大梁也发生较大变形,车身有一明显“拱起”变形(图 6(c))。碰撞作用时间也和

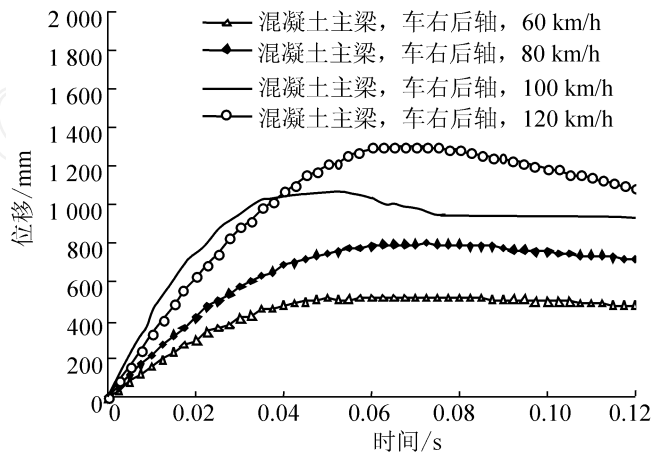


图 4 车身后轴沿碰撞方向时程曲线

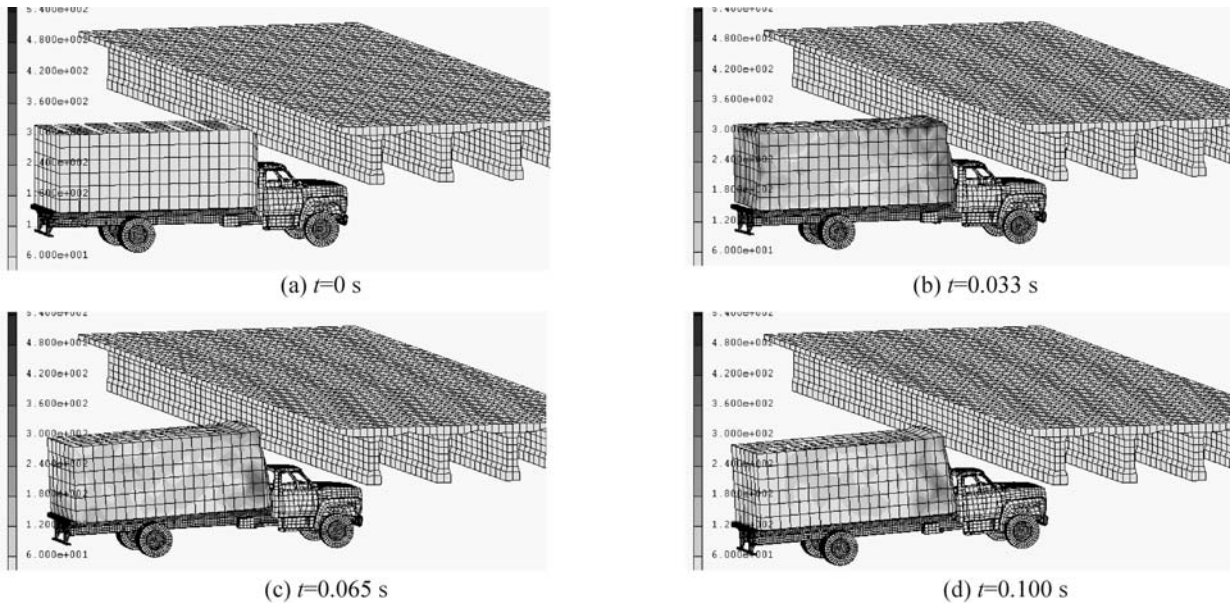


图 5 卡车时速 60 km/h, 卡车应力云图(单位:MPa)

车速明显相关,随着车速的增加,碰撞作用时间从约 0.04 s 增加到约 0.065 s(图 7)。车身的前冲变形,从 0.511 m 增加到 1.302 m(图 8)。

#### 3.2 不同工况桥梁破坏情况

计算得到碰撞过程中桥梁主梁下翼缘正碰点的位移时程曲线如图 9 所示,同样以时速 60、120 km/h

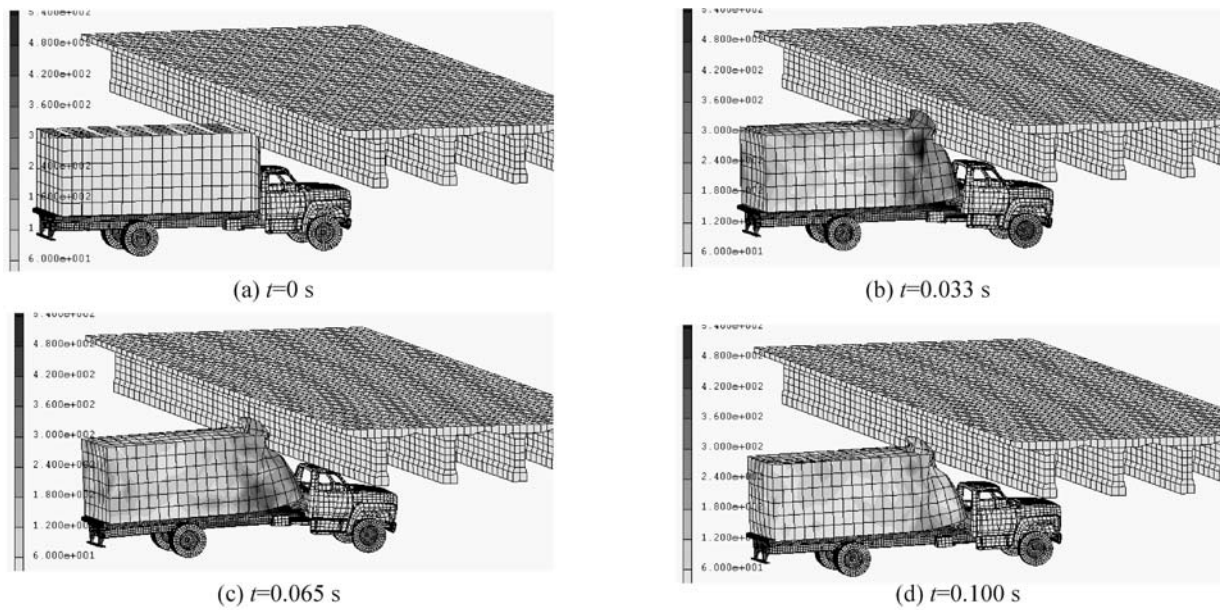


图 6 卡车时速 120 km/h, 卡车应力云图 (单位 :M Pa)

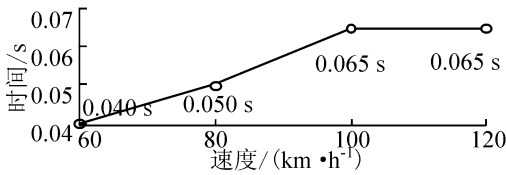


图 7 桥梁碰撞持续时间与速度关系曲线

为例,计算得到桥梁内裂缝发展如图 10、图 11 所示,云图为碰撞过程中桥梁的开裂应变大小。从图中可以看出,车撞击相当于给了桥梁腹板一个冲切力,首先在被撞区域四周出现裂缝。同时,腹板由于撞击产生的扭转又给了桥面一个扭矩,引起主梁上翼缘和桥面的开裂。从图 10 中可以看出,当车速不快,撞击力冲量不是很大时,桥梁所受损伤较小,在撞击结束后裂缝基本可以闭合(图 10(d))。而当车速较大时(图 11(d)),不仅腹板、桥面出现很多裂缝,而且在撞击结束后,桥面和腹板上仍然有很多残余裂缝。

从图 9 和图 12 中可以看出,当车速为 60 km/h 和 80 km/h 时,桥梁正碰点撞击导致的最大变形差别不大,基本都是 22~24 mm 之间。而当车速达到 120 km/h 时,桥梁正碰点的最大变形比 80 km/h 时增加了约一倍,达到 47 mm。这是因为当车速低于 80 km/h 时,桥梁在碰撞过程中受到的损失还不大,大部分钢筋均未进入屈服,所以刚度退化不多,碰撞的能量基本都是由车身变形来消耗,故而最大变形差别不多。而当车速超过 80 km/h 后,碰撞会导致桥内钢筋大量进入塑性,桥梁刚度显著降低,碰撞能量由车身和桥梁的塑性变形共同消耗,其碰撞结束后的塑性残余的变形也明显增加(图 13)。

从上述分析还可以看出,车桥碰撞是一个非常复杂的非线性分析过程。碰撞的能量分担比例随车速

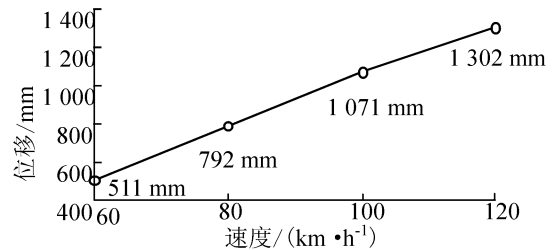


图 8 车身后轴沿碰撞方向最大位移与速度关系曲线

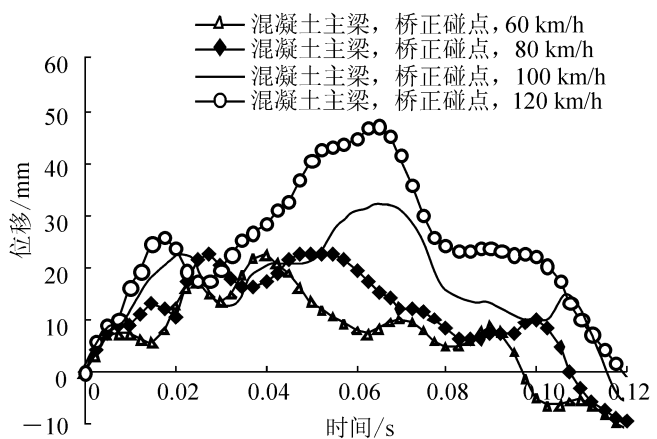


图 9 桥梁沿碰撞方向正碰点位移时程曲线

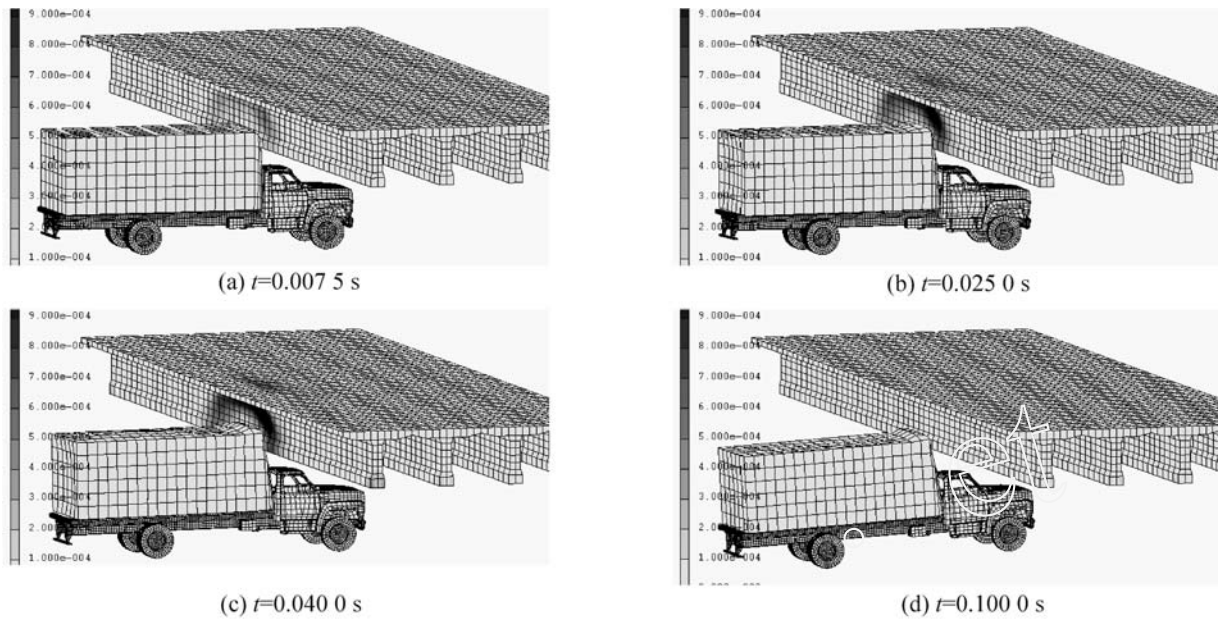


图 10 卡车时速 60 km/h,桥身裂缝分布和发展 (图中云图单位为开裂应变)

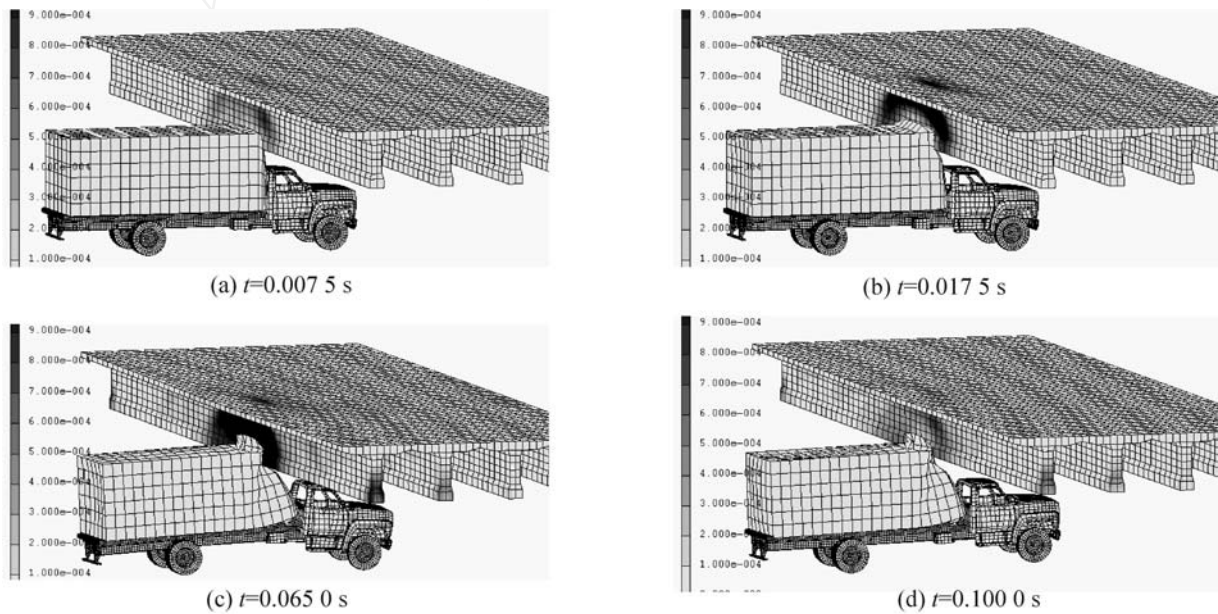


图 11 卡车时速 120 km/h,桥身裂缝分布和发展 (图中云图单位为开裂应变)

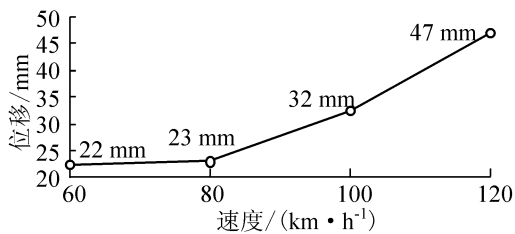


图 12 桥梁正碰点沿碰撞方向最大变形与速度关系曲线

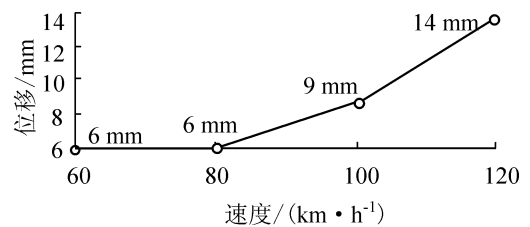


图 13 桥梁正碰点沿碰撞方向残余塑性变形与速度关系曲线

不同而有明显差异。因此,在现代高性能计算已经可以满足车-桥碰撞精确模拟这种复杂强非线性分析时,采用精细化的汽车模型和桥梁模型对提高分析精度,加深对破坏机理的理解,有着非常重要的意义。

## 4 结论

超高车 桥碰撞是一个有着很强现实意义又有着较大研究难度的课题。现代高性能结构计算为深入研究这类破坏问题提供了有力的工具。根据分析结果可以得到以下几条主要结论:

(1)MSC MARC有限元软件可以较好的模拟车 桥碰撞过程,包括碰撞过程中车体的材料屈服和几何失稳,以及桥梁的开裂和残余塑性变形;

(2)车 桥碰撞是一个比较复杂的非线性问题,碰撞对桥梁的破坏情况与桥梁、卡车自身的结构都有着密切关系。对于分析的双轴卡车而言,在车速小于 80 km/h时,碰撞的能量主要由卡车自身破坏吸收,而当车速高于 80 km/h时,碰撞将会对桥梁产生较大损伤。因此,对于高速路上的立交桥,应该设置相应的防撞设施以减少碰撞对桥梁的严重毁伤;

(3)车 桥碰撞相当于给了桥梁腹板一个侧向的冲切力,而这个荷载在设计中一般都没有考虑。随着现代桥梁的发展,桥梁腹板越来越薄,这对碰撞而言是很不利的,建议在采用 T型或薄壁箱梁的桥梁结构设计中应适当考虑碰撞引起的冲切荷载。

致谢:感谢北京市科委“桥梁结构安全实时评价体系研究及计算机仿真”项目和教育部科学技术研究重点(重大)项目(No. 704003)对本研究的资助,感谢清华大学土木工程系数字防灾与虚拟工程实验室提供高性能计算环境。

## 参 考 文 献

- [1] 陆勇,曹立波.对汽车撞柱的仿真研究[J].农业装备与车辆工程,2006,174(1):28-31.
- [2] 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[J].天津汽车,2006(4):12-16.
- [3] 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[J].中国安全科学学报,2006,16(8):9-16.
- [4] 姚启明.汽车碰撞防撞护栏碰撞力计算方法的研究[C]//上海市公路学会第六届年会学术论文集.上海:[出版者不详],2003:122-127.
- [5] 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[J].公路工程与运输,2006,144:169-171.
- [6] 江见鲸,陆新征,叶列平.混凝土结构有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 江见鲸,何放龙,何益斌,等.有限元法及其应用[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 陆新征,江见鲸.世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J].土木工程学报,2002,34(6):8-10.
- [9] Lu X Z, Yang N, Jiang J J. Application of computer simulation technology for structure analysis in disaster[J]. Automation in Construction, 2004, 13 (5): 597-606.
- [10] 李广慧,张存超,王东炜,等.高速公路桥梁活荷载参数研究[J].郑州大学学报:工学版,2005,26(1):20-22.

## Simulation of Impact between Over-high Truck and Viaduct Based on High Precision Nonlinear Finite Element Analysis

Lu Xinzhen<sup>1</sup>, Zhang Yansheng<sup>1</sup>, Ning Jing<sup>2</sup>, Jiang Jianjing<sup>1</sup>, Ren Aizhu<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

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

**Abstract:** Accidents of impact between over-high trucks and viaducts happen frequently. Detailed study on the mechanism of truck-viaduct impact is important for setting up the computational method of impact. In this paper a high precision simulation is presented for the truck-viaduct impact based on high performance nonlinear finite element analysis and the influence of truck speed to the damage of the bridge is discussed. The computational results can be used for further studies on the truck-viaduct impact problem.

**Key words:** impact; viaduct; truck; simulation; nonlinear

(责任编辑 车轩玉)

