

# 某超高车辆撞落人行天桥事故的过程仿真与分析\*

何水涛 张炎圣 卢 啸 陆新征

(清华大学土木工程系 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室 北京 100084)

**摘 要** 文中对一起超高车辆撞翻人行天桥事故进行了数值仿真,分析其原因,提出了相应的防护措施,并对采取防护措施后的桥梁进行撞击过程仿真以验证措施的实效性。

**关键词** 车桥撞击;数值模拟;桥梁;撞击防护

**中图分类号**:U441 **文献标志码**:A **DOI**:10.3963/j. ISSN 1674-4861.2009.06.021

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。2006年11月,西南某城市1辆自重约8 t的翻斗车由于不明原因,在行进过程中突然将车斗翻起,造成车辆超高,将1座长达80余m,重达100 t的人行天桥撞落至路面,总水平位移达3~4 m。肇事车辆被坠落的天桥压在下面,肇事司机当场死亡,并导致整个环路交通堵塞8 h,对城市正常运行造成重大影响。

事故发生后,其机理和今后的防护措施引起了有关专业人员的关注。简单的刚体碰撞动力学分析表明,由于该车辆自重远小于桥梁重量、且桥体上部结构与桥墩之间无特殊连接处理,同时忽略摩擦力作用,则根据动量交换定律,碰撞后桥体获得的水平速度约为(假设车辆速度为80 km/h):

$$v_{\text{桥}} = \frac{m_{\text{车}} v_{\text{车}}}{m_{\text{桥}}} = \frac{8 \times 80}{100} = 1.778 \text{ m/s} \quad (1)$$

而桥体从桥墩落下需时为:

$$t = \sqrt{\frac{2b}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{9.8}} = 1.01 \text{ s} \quad (2)$$

桥体落梁后水平方向的刚体位移为:

$$D = v_{\text{桥}} t = 1.778 \times 1.010 = 1.796 \text{ m} \quad (3)$$

故而很难如事故中将桥梁撞出3~4 m远。该事故其过程机理是否有特别之处?另一方面,这么重要的大型人行天桥竟如此容易被撞毁,桥梁的设计和防护手段是否有待进一步改进?

为了解答上述工程问题,并为今后城市车桥撞击事故原因分析和桥梁防护设计提供参考,本

文利用高性能非线性有限元分析手段<sup>[1-2]</sup>,同时参考了已经较为成熟的船桥碰撞问题的研究方法<sup>[3-5]</sup>,重现了该事故过程。并对事故的机理和未来设计进行了讨论。

## 1 有限元模型

### 1.1 概述

超高车-桥碰撞试验研究代价非常高昂(基本上是车毁桥伤),因而到目前为止,有关文献中撞击试验数量极少<sup>[1]</sup>。而基于计算机模拟的有限元分析技术,则具有便捷、安全、易于重复、可对不同参数进行单个分析的优点。特别是随着汽车碰撞安全研究的进步,高性能非线性有限元碰撞模拟技术已经相当成熟,这为实现车-桥撞击模拟奠定了良好的基础。

### 1.2 天桥有限元模型

事故天桥主体结构高度为5 m、宽4 m,横跨8条车道,总长度为80 m,为钢箱型连续梁结构,桥面上部为1层混凝土面板。基于实际桥梁,建立非线性有限元分析模型,混凝土面板划分成六面体实体单元(通用有限元程序MSC. Marc中的7号单元),其受压本构关系采用了基于von Mises屈服准则的弹塑性本构模型,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,并在翻斗车撞击处单元划分加密以提高模拟精度。

事故天桥的1个重要特征是为了减少温度应力,桥梁上部结构和桥墩顶部之间未焊接在一起,只是浮搁在桥墩上,这是导致桥梁被撞落的1个

收稿日期:2009-05-04 修回日期:2009-11-08

\*国家自然科学基金项目(批准号:50808106)资助

作者简介:何水涛(1984),硕士研究生,研究方向:结构非线性分析研究。E-mail:hst08@mails.tsinghua.edu.cn

关键因素。为了正确模拟这一支座条件,在有限元分析中,通过接触分析,准确模拟了桥墩和上部结构之间的相互关系,依据钢结构设计规范 GB50017—2003<sup>[7]</sup>,钢板(Q345)与钢板(Q345)之间经喷砂处理后摩擦因数取为0.5。最终桥梁有限元模型如图1所示。

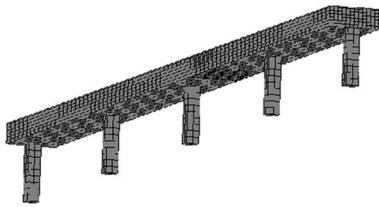


图1 桥梁有限元模型

### 1.3 翻斗车模型

根据文献[8],建立翻斗卡车模型,其中参与碰撞的主要对象——车厢采用壳单元进行离散化,弹性模量取为200 GPa,泊松比为0.3,整个模型具有较高的精细程度。并根据事故车辆对卡车重量进行调整,以符合真实情况,最终形成卡车模型如图2所示。

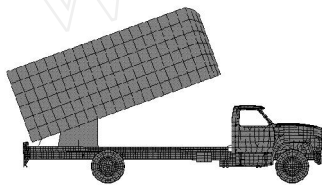


图2 汽车有限元模型

## 2 计算结果及分析

### 2.1 事故过程分析

在有限元模型中,将事故车辆以80 km/h的速度撞击桥梁,得到整个事故过程如图3所示。

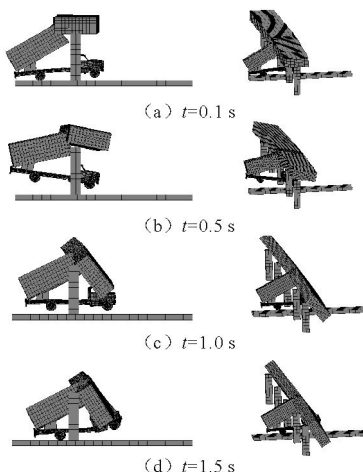


图3 事故模拟过程

从图3中可以看出,由于桥梁长度较大,侧向刚度较差,故而撞击并非是2个刚体撞击,而是1个非常复杂的力学过程。翻起的车斗给桥梁1个竖直方向向上和水平方向向前的撞击力,在这个撞击力作用下,桥梁发生了1个竖向和水平向的弯曲变形,最大变形量(0.1 s前)分别达到385 mm(水平)、172 mm(竖直)(这里变形量定义为:撞击位置水平变形量/竖直变形量-桥梁端部水平变形量/竖直变形量)。在0.1 s时(撞击力第一峰值/主撞击冲量过程完成),撞击局部位置的桥梁水平速度为3 666 mm/s,撞击位置两侧紧邻桥墩处桥梁的水平位移达到213 mm。由此可以看出,被撞桥梁并非为一刚体行为,而是1个变形体,其惯性质量受到整个桥刚度所限,并不能全部参与碰撞过程。进而导致在主撞击冲量完成时(0.1 s时),撞击位置的变形(254 mm),远大于桥梁的平均变形(71 mm,5个桥墩顶部位置位移平均值)。

由图3可知,在 $t=0.5$  s时,桥体已经产生较大的偏移,由于此时撞击位置的临近桥墩顶部,桥梁上部结构的侧向位移导致这部分桥梁的重心已经超出桥墩支承范围(超出830 mm),再加上桥梁的向上掀起等,最终导致桥梁从浮搁的桥墩顶部滑落,从而造成这一事故的发生。

### 2.2 数据分析与讨论

#### 2.2.1 车辆给桥梁的冲击作用

车辆和桥梁之间的水平冲击力时程如图4所示。由图中可以看出,主冲量发生在0.1 s以内。根据文献[9],取平均撞击时间为0.1 s,则其总冲量大约为270.0 kN·s。平均撞击力大约为270.0 kN·s/0.1 s=2 700 kN,高于规范<sup>[10]</sup>建议的1 000 kN(欧洲规范 EuroCode - 1 建议公路的基本撞击力 $F_0$ 为2 400 kN)。当然,对于静力平均撞击力的等效方法,目前还有待进一步讨论,本文算例并不能完全说明我国规范建议车辆撞击力的安全性存在严重问题,但可以为进一步研究车辆撞击荷载提供参考。

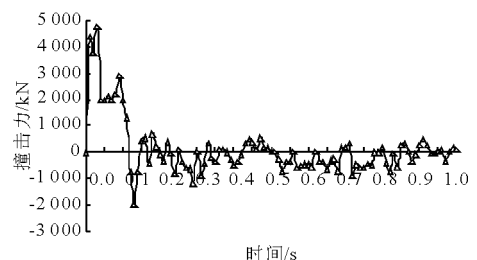


图4 车对桥水平方向冲击力时程图

2.2.2 桥梁的响应

在主冲量 0.1 s 内,桥梁和车辆的平均速度变化如图 5 所示。其中,桥梁平均速度为各跨中点、跨端及碰撞点共 9 个点平均得到,车辆平均速度为车箱尾部、车轴尾部、车箱前部及车轴前部共 4 个部位 8 个点平均得到。由桥梁的平均速度,可以得到 0.1 s 时桥梁获得的动量为 231.6 kN · s,小于车辆给桥梁的冲量 270.0 kN · s。其原因是在撞击过程中,桥墩顶部的摩擦力,地面对车辆的摩擦力等的影响,并且桥梁自身平均速度计算方法也不是很精确。但是,两者差异 231.6/270.0 = 85.8%,考虑到实际撞击问题的复杂性,这样的差别是可以接受的。故可以认为,车桥撞击过程基本符合动量交换原理。

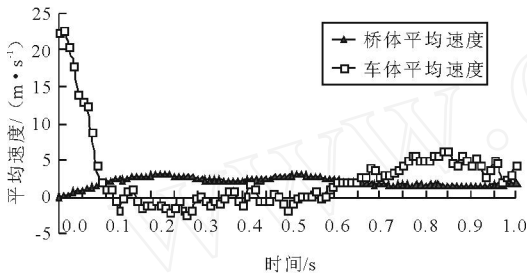


图 5 平均速度 - 时间图

但是,如果将 0.02 ~ 0.10 s 时间内桥梁的水平变形绘制于图 6 中,即可发现,在车桥撞击过程中,虽然桥梁作为一个整体基本符合动量原理,但是由于桥梁惯性力作用和桥梁自身的变形,因而不是 1 个刚体碰撞过程。撞击位置局部的速度和位移远大于远离撞击位置的速度和位移。故而,如采用刚体碰撞分析计算车 - 桥撞击引起的落梁作用,则会因为无法考虑桥梁的变形而使结果有所偏差。以 0.1 s 时为例,刚体碰撞分析和有限元计算结果差异如表 1 所列。

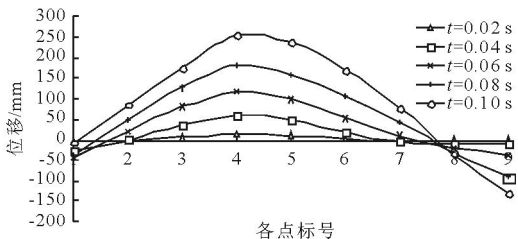


图 6 桥体变形时程图

表 1 刚体碰撞分析和有限元计算结果差异 (t = 0.1 s)

位移类型	刚体碰撞	有限元	相对误差/ %
整体位移/ mm	177.78	92.97	91.2
桥体撞击位置的位移/ mm		254.83	30.0

如果将桥梁等效为 1 根弹性梁,其线密度,刚

度等和实桥一致。将车辆 0.1 s 以内的撞击力时程作用于该弹性梁,得到弹性梁撞击位置相对于端部的最大位移值为 386 mm,而原模型的撞击位置相对于端部的最大位移值为 385 mm,弹性梁的变形与原模型的变形基本相同,因此,虽然因为弹性简化导致不能考虑桥身的塑性变形等,但出于工程简化起见,进行车桥撞击工程设计时,可以采用等效弹性梁的方法来简化计算。

2.2.3 防落梁措施

因本次事故为整体落梁破坏,其造成的间接经济损失尤其重大,故而应尽量设法避免。如果将桥梁上部结构与各个桥墩横向连接在一起<sup>[11-12]</sup>,再对整个撞击过程重新进行模拟。得到典型支座反力时程如图 7 所示。参照文献[9],取有效碰撞时间为 0.1 s,得到各个桥墩的平均撞击力如表 2 所示。因此,如果采用刚性连接来避免落梁破坏,则建议每个桥墩与上部结构刚性连接的水平方向承载力不小于 3 058.7 kN,竖直方向承载力不小于 1 137.6 kN。

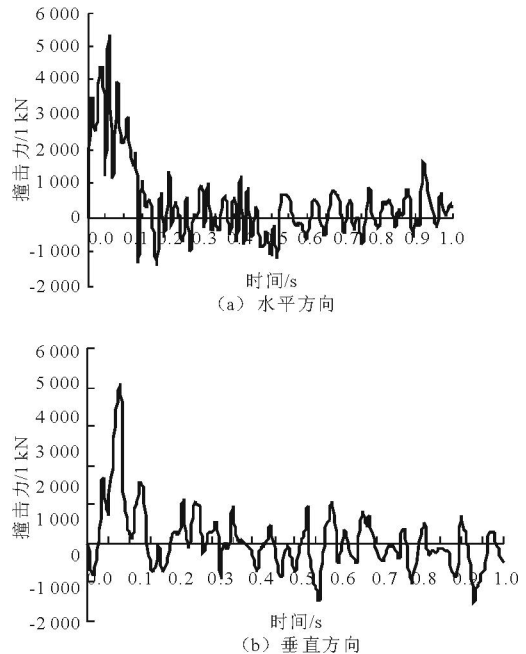


图 7 3号桥墩反力时程图

表 2 桥墩平均反力值 kN

反力方向	桥墩编号				
	1	2	3	4	5
水平方向	240.0	619.4	3 058.7	657.6	157.6
竖直方向	250.6	411.1	1 137.6	540.8	116.7

如果桥墩顶部和桥梁上部结构之间采用弹性橡胶支座柔性连接<sup>[12-13]</sup>,则当橡胶支座的剪切刚度(相当于规格 H × A × B = 110 mm × 594 mm ×

475 mm 的盆式橡胶支座)分别为 2 253、4 506、9 012 kN/m 时,得到的橡胶支座最大剪切位移为 389、315、260 mm。所以,应设计橡胶支座使其可以承受这样的位移。

### 3 结 论

1) 在桥梁设计时,可通过弹性梁模型来估算桥梁在冲击荷载作用下的变形量,进行桥体变形和位移设计。

2) 可以通过设置弹性橡胶支座,以防止发生落梁破坏。橡胶支座的作用主要表现在以下 2 个方面: 通过剪切变形消耗车辆撞击传递给桥体的能量, 限制桥梁上部结构位移。限制水平方向位移以防止桥体移出桥墩支承范围之外;限制竖直方向位移以防止桥体脱离桥墩支承面以致水平方向没有约束。支座变形能力或承载力可采用本文建议方法计算。

#### 参考文献

- [1] 陆新征,张炎圣,宁 静,等. 超高车辆与立交桥梁碰撞的高精度非线性有限元仿真[J]. 石家庄铁道学院学报 2007,20(1):29-37
- [2] 张炎圣,陆新征,宁 静,等. 超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J]. 交通与计算机,2007,25(3):65-69
- [3] Yun H, Nayeri R, Tasbihgoo F, et al. Monitoring the collision of a cargo ship with the Vincent Thomas Bridge[J]. Struct. Control Health Monit,2008(15):183-206
- [4] Wang Lili, Yang Liming, Huang Dejin, et al. An impact dynamics analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008(35):895-904
- [5] Liu Jiancheng, Gu Yongning. Simulation of the whole process of ship-bridge collision[J]. China Ocean Engineering,2002(3):369-382
- [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] 中华人民共和国行业标准 GB50017—2003. 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003
- [8] 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
- [9] Iowa department of transportation. Steel Diaphragms in Prestressed Concrete Girder Bridges[R]. Iowa: Iowa department of transportation and Iowa Highway Research Board, center for transportation research and education, 2004
- [10] 中华人民共和国行业标准 JTG D60—2004. 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004
- [11] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2006
- [12] 范立础,王志强. 桥梁间隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001
- [13] 胡兆同,陈万春. 桥梁通用构造及筒支梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001

## Simulation and Analysis of a Collision Accident Between Over-high Truck and Pedestrian Bridge

HE Shuitao ZHANG Yansheng LU Xiao LU Xinzheng

(Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A high precision simulation of a collision between over-high truck and pedestrian bridge is presented in this paper. The reason for the girder falling of the impacted pedestrian bridge is discussed based on the simulation results. The response of the bridge is analyzed and corresponding prevention methods are proposed.

**Key words:** truck-bridge collision; numerical simulation; bridge; collision prevention