

# 桥梁在灾害作用下的高性能仿真分析

陆新征, 李 易, 张炎圣, 黄盛楠, 江见鲸

(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】**桥梁是交通生命线的枢纽工程。我国是一个灾害多发国家,且目前处于经济高速发展阶段,各种自然和人为灾害对桥梁工程造成严重威胁。由于灾害的区域性、突发性和毁灭性等特点,所以计算机仿真技术在解决桥梁防灾问题方面有着突出的优势。本文对清华大学土木工程系开展的基于高性能计算的桥梁防灾研究的代表性成果进行了介绍。包括基于大比例桥梁模型实验对桥梁结构非线性计算方法的探讨和验证。对各种尺度下多种桥梁灾害行为的高性能仿真分析。例如在小尺度范围内研究了单体桥梁受到超重车辆过桥时的动力作用,以及受到超高车辆撞击作用。在大尺度范围内研究了地震行波效应对超长高架桥梁破坏的影响。针对高性能仿真遇到的关键瓶颈问题:桥梁非线性建模问题,开发了桥梁非线性快速建模方法。为深入研究高架桥梁体系在各种灾害下的破坏模式和安全状况提供了依据。

**【关键词】**桥梁,高性能仿真分析,超载,撞击,地震,快速建模

## High Performance Simulation for Bridges under Disaster

*Lu Xin-zheng, Li Yi, Zhang Yan-sheng, Huang Sheng-nan, Jiang Jian-jing*

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

**Abstract:** Bridge is the key project in lifeline engineering. Currently, various natural and man-induced disasters become a serious threat to the bridges in China. Due to the large-scale, unpredictable, and destructive features of disasters, computer simulation has obvious advantages in disaster prevention and mitigation of bridges. This paper presents the researches on disaster prevention and mitigation of bridges developed by the Department of Civil Engineering in Tsinghua University, which base on high performance computing. The nonlinear computing method is discussed and benchmarked with large-scale test. High performance simulation on different scales for bridges implemented by Tsinghua University are presented. In small scale, analyses about dynamic behavior of the bridge traveled by overload trucks and impact on the bridge by over-high trucks are illustrated. And in large scale, failure simulation for large viaducts with traveling wave effect is presented. In addition, Tsinghua University also developed the nonlinear quick modeling method for bridges, so as to provide abilities to conveniently obtain the failure model and safety assessment of bridges under various disasters.

**Keywords:** bridge, high performance simulation, overloaded, impact, earthquake, quick modeling.

\*基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(编号: JC2007003)

## 1 引言

结构在极限状态下的力学行为是土木工程领域重要的研究内容，尤其在地震、火灾、爆炸、撞击等自然和人为灾害下，有必要进行结构的极限分析，以提高结构的防灾减灾能力。在“911”事件发生后，工程界对土木工程的极限分析日益重视，开展了土木工程的抗冲击、抗爆、抗火等一系列的研究。桥梁是交通生命线网络关键枢纽工程，每年因为车辆超载、撞击以及地震等人为和自然灾害，都要发生数百起桥梁破坏事件，故在桥梁工程设计中进行极限分析也变得日益重要。

由于结构的极限分析涉及各类复杂的非线性行为，包括材料非线性、几何非线性，接触非线性等，所以极限分析往往比较复杂，必须依赖于高性能的计算手段。本文对清华大学土木工程系开展的基于高性能计算的桥梁防灾研究的代表性成果进行了介绍。首先基于大比例桥梁模型实验，对桥梁结构非线性计算方法进行了探讨和验证。在此基础上，对各种尺度下多种桥梁灾害行为进行了高性能仿真分析。例如在小尺度范围内研究了单体桥梁受到超重车辆过桥时的动力作用，以及受到超高车辆撞击作用。在大尺度范围内研究了地震行波效应对超长高架桥梁破坏的影响。并针对高性能仿真遇到的关键瓶颈问题：桥梁非线性建模问题，开发了桥梁非线性快速建模方法。为深入研究桥梁体系在各种灾害下的破坏模式和安全状况提供了依据。

## 2 预应力连续刚构混凝土桥的试验与仿真研究

### 2.1 桥梁模型

为确保数值模型的可靠性，清华大学进行了大比例桥梁模型试验。试验模型是预应力轻骨料混凝土连续刚构桥，模型比例为 1: 4。模型由 3 跨组成，跨度分别为 4.75 米、8.75 米和 4.75 米，总长度为 18.25 米（如图 1 所示），其他参数见文献[1]。

### 2.2 试验加载方案

试验加载分为 10 步，用五个液压千斤顶模拟车辆荷载，车辆荷载的移动用四种加载位置模拟，如图 2 所示。进行了多轮加载，逐步增加千斤顶推力模拟不同超载水平，直至将桥梁加坏，并测量了不同工况加载后桥梁的动力特性。



图1 模型试验

Figure 1: The Photo of Model Bridge

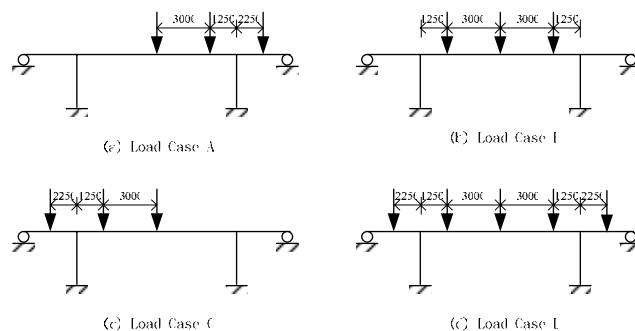


图2加载作用位置

Figure 2: The Load Cases

### 2.3 有限元模拟计算与结果

由于该结构以平面弯曲变形为主，在有限元分析中采用平面应力单元进行模拟，其中预应力钢筋用平面 rebar 单元模拟，混凝土用混凝土平面应力单元模拟（如图 3 所示）。此外，混凝土材料采用断裂模型，能够模拟断裂裂缝的开展。本文选取试验进入极限状态后的试验和计算结果进行对比（图 4、图 5、图 6），通过试验和有限元分析结果比较说明，计算结果准确的获得桥梁在极限状态下的承载力性能以及裂缝的开展情况。

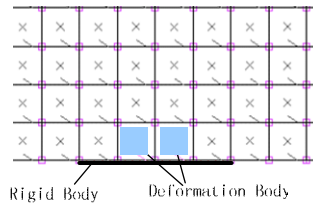


图 3 有限元接触边界条件

Figure 3: The Contact Boundary

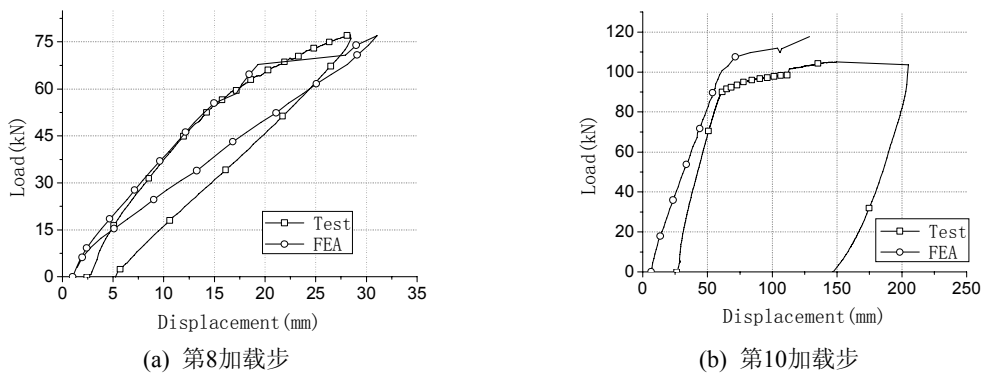


图 4 跨中荷载—挠度曲线

Fig.4: Load-deflection at mid-span

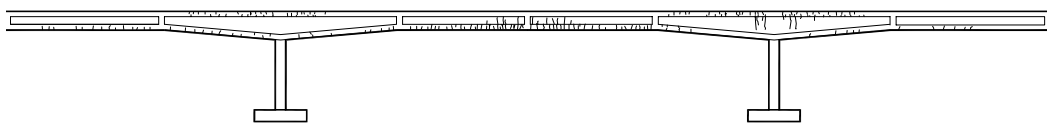


图 5 试验中的裂缝分布

Fig.5: The Crack Distribution of Test Results

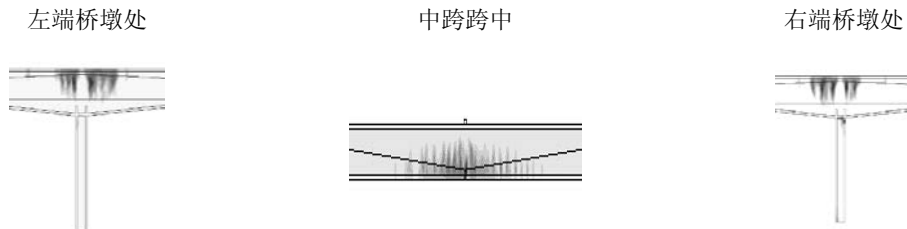


图 6 有限元分析中的裂缝分布（第 9 加载步）

Fig.6: The Crack Distribution of Finite Element Results (No.9 Step)

### 3 超高车辆撞击桥梁的研究

车撞桥事故屡有发生,以北京四环路为例,统计数据显示,2006年一年,四环路上的立交桥限高防撞架就先后被撞135次,直接经济损失达282万元;立交桥桥梁直接被撞22次,导致经济损失94万元。鉴于超高车辆撞击立交桥梁的事故屡见不鲜,研究超高车辆-桥梁上部结构的碰撞机理很有必要。高性能计算平台对汽车车厢与桥梁的接触非线性,以及撞击区域的材料非线性、几何非线性都能得到很好的模拟,因此可以很好地分析撞击过程以及结果,为桥梁的防撞、加固提供参考。

#### 3.1 有限元模型

超高车辆有限元模型以美国“国家碰撞分析中心”(National Crash Analysis Center, NCAC)提供的标准双轴卡车模型为基础,对其进行适当的修改以适应MSC.MARC的分析。计算了混凝土T梁桥、箱梁桥、组合结构桥等多种不同桥型。以钢-混凝土组合简支梁桥为例,其上部的桥梁面板混凝土划分成实体单元,采用基于von Mises屈服准则的弹塑性模型模拟其受压行为,采用基于最大拉应力准则的弥散裂缝模型模拟其受拉开裂行为<sup>[5,6]</sup>。其下部的钢箱梁划分成壳单元,材料模型采用基于von Mises屈服准则的理想弹塑性本构。混凝土面板内部钢筋采用MARC自带的Rebar单元,材料模型采取基于Von Mises屈服准则的理想弹塑性本构。

#### 3.2 有限元分析结果

通过分析可以获得卡车在不同速度下撞击桥梁后的破坏程度,包括塑性区大小、碰撞区域附近混凝土的开裂范围和裂缝宽度等信息,如图7和图8所示(以 $V=90\text{km/h}$ 为例)。通过研究撞击后桥梁的荷载-挠度曲线,可以分析撞击造成的桥梁承载力损失情况。图9是各种工况的荷载-挠度曲线。可见,数值模拟可以较好地预测整桥的极限承载力。在准确计算桥梁抗撞击承载力极限的基础上,可以对桥梁进行优化设计,获得考虑冲击效应的、更为安全的桥梁结构设计方案。

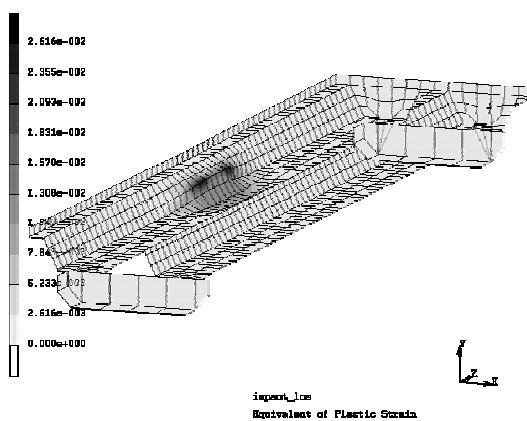


图7  $V=90\text{km/h}$ , 钢箱梁塑性应变云图  
Fig.7: Plastic Stress Distribution for Steel Box Beam  
( $V=90\text{km/h}$ )

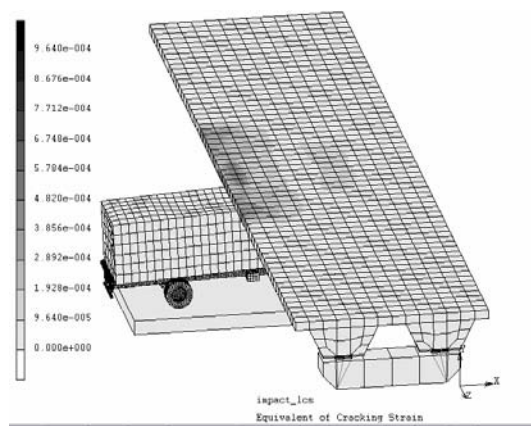


图8  $V=90\text{km/h}$ , 混凝土面板开裂应变云图  
Fig.8: Cracked Strain Distribution for Concrete Slab  
( $V=90\text{km/h}$ )

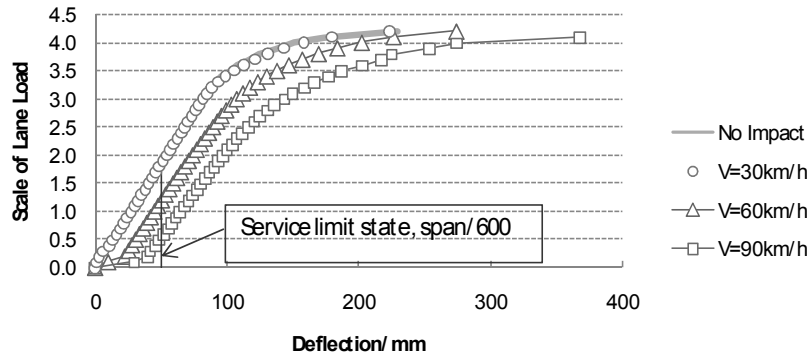


图 9 不同工况桥梁承载力损失情况

Fig.9: Loss of Bearing Capacity for bridges under Different Velocity Impacts

#### 4 重型车辆过桥

重型车辆荷载，既是公路桥梁设计的重要控制工况，也是桥梁安全性检测的重要手段。目前我国交通运输管理存在缺陷，超重车辆的使用比较混乱，据调查，仅在 104 国道连江路段，每天有 1000 多部超限运输车运行，超载一倍是很正常的。而在公路桥梁方面，目前对超重车辆对桥梁结构影响的研究成果并不多，主要是由于成本、技术等手段的限制，完全基于实验研究重车对桥梁的作用尚存在一些不足。通过准确的计算机模拟，可以辅助实验更加深入的了解重车对桥梁的影响。

准确的重车过桥模拟是一个非常复杂的非线性课题，涉及车轮与桥面的接触非线性，以及结构损伤后的材料非线性和几何非线性。本文重型车辆有限元模型，是严格按照我国公路桥梁规范轴重建模。钢筋混凝土拱桥有限元模型，采用壳单元建模。本例重在研究车辆移动荷载的影响和冲击效应，因此对车轮-桥面的接触非线性进行了精确的模拟。

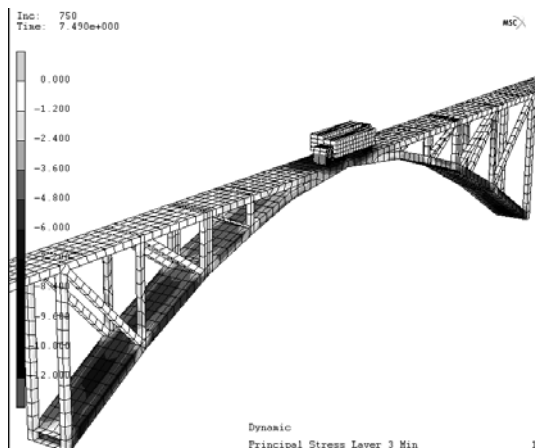


图 10 两车在桥的跨中相遇时，桥梁主压应力云图  
Fig.10: Distribution of Principal Compressive Stress  
(two trucks meet on the middle of bridge)

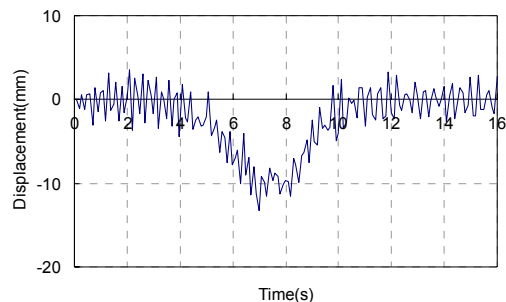


图 11 重车过桥引起的桥梁附加挠度时程  
Fig.11: Extra Deflection of Bridge due to the  
Over-loaded Truck



图 10 是两车在桥的跨中相遇时桥梁的主压应力云图。重车过桥引起的桥梁附加挠度如图 11 所示, 最大值为-13.3mm, 发生在两车相遇时。重车过桥的冲击荷载系数约为 0.07。可见, 通过仿真分析, 可以全面把握整个重车过桥过程中各个杆件各个部位的应力分布情况, 可以研究移动荷载和冲击作用下结构的力学响应, 为进一步分析桥梁的损伤情况, 以及考虑重车过桥的桥梁承载力提供必要基础。

## 5 地震行波效应作用下大型高架桥梁破坏

由于高架桥梁规模越来越大, 传统的局部桥段分析已经不足以满足现代防灾工程的要求。因而非常有必要进行基于高性能计算的大规模高架桥梁非线性分析, 考虑行波效应导致不同桥段不同位置的地震输入差异, 以真实模拟地震破坏。

根据国内外大量地震灾害资料<sup>[7]</sup>, 高架桥梁的破坏主要模式包括: 桥墩的破坏、桥墩和上部结构连接破坏、上部结构之间的碰撞破坏。

### 5.1 有限元模型

针对高架桥梁的破坏特点, 本文采用清华大学土木工程系开发的纤维模型有限元程序 THUFIBER<sup>[8,9]</sup>, 来建立桥墩的有限元模型, 可以较好模拟钢筋混凝土构件在复杂轴力下的强度、延性和滞回行为。对于箱梁上部结构本文采用壳单元建模, 墩顶横梁采用实体单元建模。横梁和上部结构, 以及上部结构之间, 均采用基于面一面接触的精确接触模型加以模拟<sup>[6]</sup>。接触模型允许大范围的接触、分离、滑动甚至脱落, 从而可以真实模拟得到落梁破坏。分析时首先施加自重荷载, 程序自动根据桥墩和上部结构之间的接触关系计算出接触面的法向应力和摩擦力, 然后输入地震荷载。地震荷载在结构中产生内力, 如果内力高于桥墩的开裂或屈服承载力, 则桥墩会出现开裂或者屈服破坏; 如果内力高于接触面的接触力或摩擦力, 则会发生接触面之间的分离或相对滑移。(图 12) 为了比较不同参数的影响, 讨论了不同震源位置, 不同地震输入, 不同桥梁建模方式等多个工况。

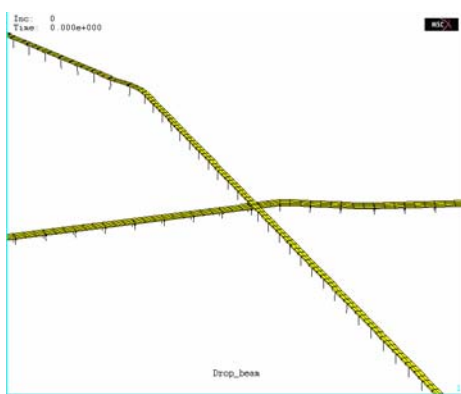


图12 全桥模型

Fig.12: Model for Bridge

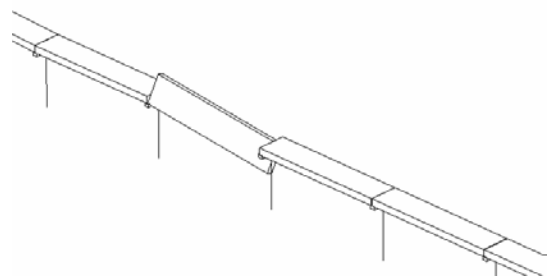


图13 落梁破坏 (t=14.5s)

Fig.13: Beam Falling

### 5.2 有限元分析结果

各个工况计算得到的桥梁破坏主要为以下两种类型: 1)东西向独墩高架桥主要为落梁

破坏; 2)南北向双墩高架桥主要为桥墩脚部塑性铰破坏。

东西向发生落梁的主要原因是因为独柱桥墩的抗扭性能较差, 在地震作用下发生了扭转, 使得桥面系一角从主梁上脱落, 进而发生倾倒落梁破坏 (图 13)。

南北向高架桥的双墩结构刚度较大, 且稳定性较好, 因此没有出现落梁破坏。但是墩脚受到的地震力较大, 大量出现塑性铰。以位于分析模型中心位置的双向交叉点南北向高架桥桥墩为例, 在基本工况下计算得到的底部的弯矩—曲率关系如图 14(a)所示。此时桥墩的钢筋拉应变已经超过 1%, 说明此时桥墩已经基本进入破坏阶段。由图 14(a)可见, 不考虑上部结构和桥墩之间接触, 按照通常结构力学方法分析时, 会过高估计上部结构和桥墩之间的协同工作能力, 进而会低估桥墩的变形, 不能正确预测桥墩受到的破坏。而不同地震输入也对桥墩的最大变形情况和损伤累积情况有着明显的影响, 图 14(b)。可见如果要准确预测桥梁的破坏模式, 行波效应和上部结构和桥墩之间的接触效应都应该加以正确考虑。

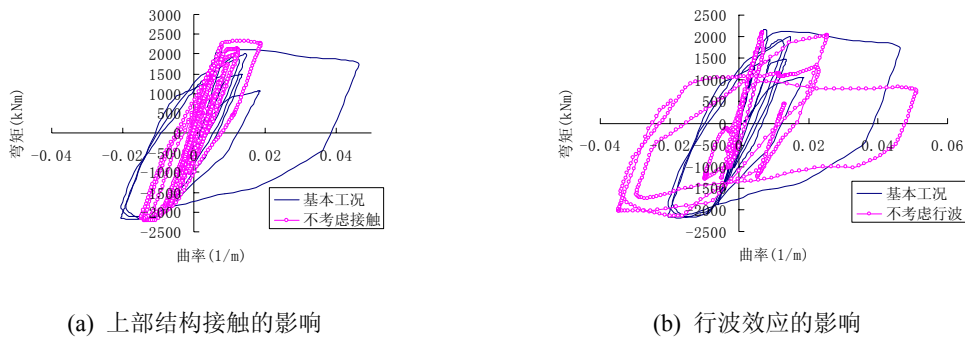


图 14 桥墩底部弯矩曲率关系

Fig.14: Relationship between Moment and Curvature at the Bottom of Pier

## 6 快速建模

精确的桥梁非线性行为模拟依赖于精确的非线性有限元模型。而非线性建模一直是一个非常繁重的工作。清华大学土木工程系开发了桥梁结构非线性快速建模技术。针对常用的混凝土梁桥结构类型, 进行参数化设计, 并开发与通用非线性有限元软件的接口。从而可以较简便的建立桥梁模型。利用该技术对某高速路上 6 座病害桥梁极限承载力进行了预测, 取得了较好效果 (图 15)。

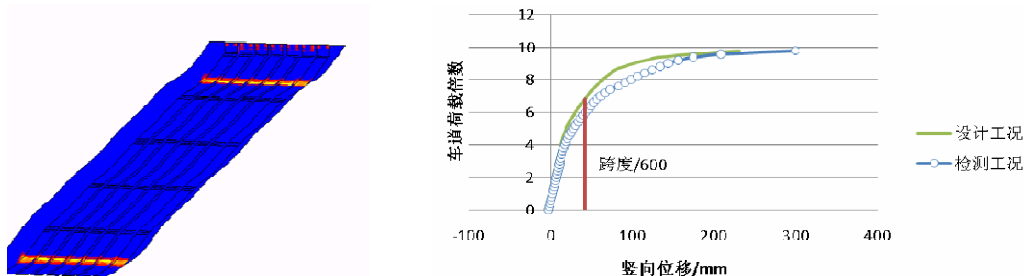


图 15 桥梁快速建模及承载力预测

Fig.15: Quick Modeling and Bearing Capacity Assessment for Bridges

## 7 结论

数值模拟技术是进行土木工程极限分析的重要手段, 由于桥梁工程这类大型结构体系的特殊性, 在桥梁工程领域借助高性能的仿真分析可以有效的弥补试验研究的不足。在合理的假设和简化前提下, 研究具体工程的特点, 选择正确的模拟技术, 有针对性的分析问题, 就能够获得比较满意的结果, 为设计和施工提供有益的参考作用。

## 8 致谢

本文感谢国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(编号: JC2007003)对本研究的支持。

### 参考文献

- [1]S. N. Huang, X. Z. Lu, L. P. Ye, Y. K. Liu, Nonlinear Finite Element Analysis for a Prestressed Continuous Rigid Frame Concrete Bridge, Proc. International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2007), Yao ZH & Yuan MW (eds.), Beijing: Tsinghua University Press & Springer, July 30-August 1, 2007, Beijing, China, 267 & CDROM.
- [2]陆新征, 张炎圣, 宁静, 江见鲸, 任爱珠. 超高车辆与立交桥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):29~34.
- [3]张炎圣, 陆新征, 宁静, 江见鲸. 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, 3(25):65~69.
- [4]陆新征, 叶列平 江见鲸 张炎圣考虑地震行波效应大型高架桥梁破坏模拟[J], 工程抗震与改造加固, 29(3), 2007, 1-5.
- [5]江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M].清华大学出版社,2005.
- [6]江见鲸, 何放龙, 何益斌, 陆新征. 有限元法及其应用[M].机械工业出版社,2006.
- [7]范立础, 李建中, 王君杰, 高架桥梁抗震设计[M].人民交通出版社, 2001
- [8]叶列平, Qazi AU, 马千里, 陆新征. 高强钢筋对框架结构抗震破坏机制和性能控制的研究[J], 工程抗震与加固改造, 28(1), 2006. 18-24.
- [9]陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J], 山西地震, 126(2), 2006, 7-11.