

Influential Factors Analysis of Peak Impact Force and Time Duration for Substructures of the Bridge Impacted by Heavy Vehicles

Juan Wang¹, Jiang Qian², Deyuan Zhou²

¹Business School, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai

²State Key Laboratory of Disaster Risk Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: daphnei@163.com, jqian@mail.tongji.edu.cn, concrete@126.com

Received: Jun. 29th, 2017; accepted: Jul. 14th, 2017; published: Jul. 18th, 2017

Abstract

In bridge design code, the load from vehicle impacting is applied as a constant static force. Such simple specification couldn't meet the rapid development of modern transportation and infrastructure. In order to investigate influential factors to decide the peak impact force and time duration for the bridge substructures impacted by heavy vehicles, based on the LS-DYNA software, the simulation for validated refined bridge-vehicle models is carried out. The effect of height of piers, vehicle's velocity and weight on variation of impact time duration and peak impact force is discussed, which offers important reference for design methodology of impacting force with different factors.

Keywords

LS-DYNA, Finite Element Model, Bridge-Vehicle Impact, Peak Impact Force, Time Duration

重型车辆撞击桥梁下部结构的碰撞力持时和峰值的主要影响因素

王娟¹, 钱江², 周德源²

¹上海建桥学院, 商学院工程管理系, 上海

²同济大学, 土木工程与防灾国家重点实验室, 上海

Email: daphnei@163.com, jqian@mail.tongji.edu.cn, concrete@126.com

收稿日期: 2017年6月29日; 录用日期: 2017年7月14日; 发布日期: 2017年7月18日

摘要

桥梁规范中以恒定的静力作为车辆的撞击力, 这种简单的规定已经不能满足现代交通和基础设施的高速发展。为了考察重型车辆碰撞桥梁下部结构的碰撞力持时和峰值的主要影响因素, 在LS-DYNA平台上, 采用经验证的车桥碰撞精细化有限元模型, 对桥梁下部结构遭受重型车辆碰撞的全过程进行了数值模拟, 分析了桥墩高度、车辆重量和速度等参数的变化对碰撞力持时和峰值的影响, 参数研究结果为综合考虑不同参数作用的碰撞力设计方法提供了重要依据。

关键词

LS-DYNA, 有限元模型, 车桥碰撞, 碰撞力峰值, 碰撞力持时

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代化交通路网设施的发展和完善, 给社会经济发展和人民生活提供极大便利的同时, 也带来了一些负面影响, 我国是当今世界上道路交通事故最严重的国家之一。其中, 由于大型、重型车辆冲撞跨线桥梁的恶性事故引起人员伤亡、交通中断, 进而导致的间接损失巨大。桥墩是桥梁的重要承重构件, 车辆撞坏桥墩造成的后果更加严重。2010年1月17日, 广州市一辆超载大车撞断上步桥桥墩, 造成上步立交桥外侧桥墩被撞损严重(如图1所示), 钢筋裸露, 桥墩弯曲变形, 致使21条公交断线[1]。如何提高跨线桥梁抗碰撞性能是桥梁结构设计面临的一个实际问题。

我国和美国桥梁规范[2] [3]在桥梁抗车辆碰撞方面仅采用静力设计方法。欧洲规范除了静力方法[4]之外给出了阶跃荷载为撞击力的动力设计方法[5], 但给出的碰撞力幅值和碰撞持续时间公式是假定碰撞为硬碰撞(撞击物吸收全部撞击动能)或软碰撞(被撞击物吸收全部碰撞动能)而得出, 因而给出的碰撞力设计值与实际情况不符合。桥梁规范对车撞力的简单规定已经不能满足实际工程的需要。



Figure 1. A damaged pier impacted by a flat car

图1. 平板车撞坏桥墩图

车桥碰撞研究已经成为近年来的研究热点，但是由于车桥碰撞实验代价较大，目前关于足尺碰撞试验鲜有报告，英国 ARUP 公司开展过卸货车和油罐车撞击桥梁上部结构和下部结构的试验，但试验报告并未公开。由于计算机硬件和仿真软件的高速发展，对车桥碰撞的仿真研究非常广泛。陆新征等人[6]在 MARC 软件平台上模拟并分析了超高车辆撞击桥梁上部结构的损坏机理和撞击荷载。EI-Tawil 等人[7]和 Sharma 等人[8]在 LS-DYNA 平台上采用精细化车辆模型对桥梁下部结构进行了撞击过程模拟，分别给出了等效静力和动力设计方法的建议。Thilakarathna 等人[9]在 LS-DYNA 平台上以简化的三角形脉冲碰撞力代替车辆对建筑物底层柱子进行了碰撞分析。这些数值模拟研究中没有涵盖双柱墩支撑的整体桥梁模型，对于桥梁下部结构动力破坏机理及碰撞力的参数变化规律也没有深入的研究。

为了深入探讨城市桥梁下部结构遭受重型车辆撞击的碰撞力和碰撞持时随参数变化的规律性，本文基于 LS-DYNA 显示动力分析软件[10]建立了精细化重型车辆和具有上部结构和双柱墩支撑的整体桥梁模型，对桥墩高度分别为 4 m、6 m 和 8 m 的桥梁下部结构进行了碰撞分析，讨论了桥墩高度、车辆质量和速度对碰撞力持时和峰值的变化规律，为综合考虑不同参数影响的碰撞力设计方法提供了重要参考。

2. 车桥碰撞有限元模型的建立

2.1. 桥梁模型的建立

考虑到我国道路桥梁以钢筋混凝土结构为主的现实，选择常见的双柱墩钢筋混凝土跨线桥为研究对象。桥梁上部结构由桥面板、护栏、支撑桥面的工字型主梁和连接两跨上部结构的隔梁组成，桥梁下部结构由盖梁和两个支撑桥墩组成(如图 2 所示) [11]。

由于本文研究的重点是桥梁下部结构的碰撞破坏特点，考虑到上部结构在车撞桥墩中基本完好，上部结构采用简单建模方式，采用梁和壳单元；下部结构采用精细化的实体单元，从而同时兼顾了计算精度和计算代价。

桥梁下部结构仅考虑地面以上的部分，不考虑地面以下的结构，由两根桥墩和其上的盖梁组成。桥墩为圆形截面，直径 1.07 m，钢筋保护层厚度 100 mm，纵向钢筋共 10 根，直径 35.7 mm，箍筋直径 16 mm，间距 300 mm。盖梁长度 13.5 m，高度 1.22 m，宽度 1.32 m。盖梁纵筋有两种尺寸，直径分别为 19.5 mm 和 29.9 mm，箍筋直径 16 mm。桥墩混凝土圆柱体轴心抗压强度为 28 MPa，盖梁混凝土圆柱体轴心抗压强度为 23 MPa，钢筋屈服强度为 414 MPa。

为保证计算的稳定性，桥墩和盖梁有限元模型全部采用六面体实体单元。经过网格尺寸的优化计算，既确保有限元计算结果的精确性，又保证计算效率，有限元模型的尺寸确定为最小为 52 mm，最大尺寸为 118 mm。桥梁上部结构及盖梁和桥墩的有限元模型如图 3 所示。

计算中，实体单元采用单点积分公式，单点积分公式能够避免单元的剪切锁死和体积锁死并提高计算效率，但是采用单点积分公式的弊端是容易出现沙漏模式。为了避免沙漏模式的出现，采用沙漏选项控制沙漏能。

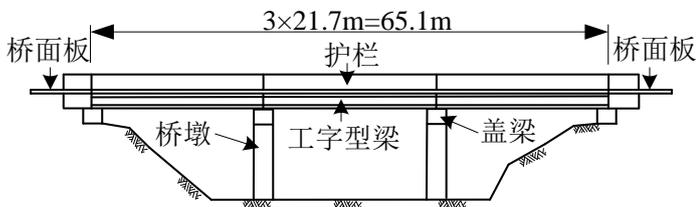


Figure 2. Configuration of the bridge
图 2. 桥梁立面图

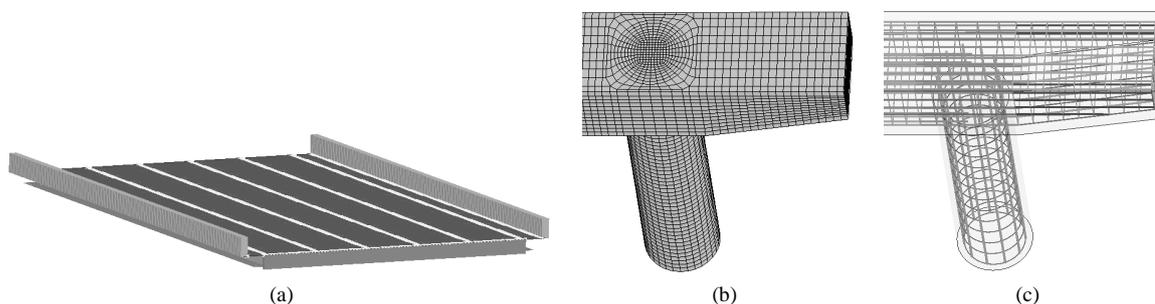


Figure 3. Finite element model of the superstructure and part of the pier and cap: (a) Finite element model of bridge structure; (b) Local model of bridge pier and girder; (c) The bridge pier and the cover girder with the reinforcement model

图 3. 桥梁上部结构和部分盖梁桥墩有限元模型：(a)桥梁上部结构有限元模型；(b)桥墩和盖梁局部模型；(c)桥墩和盖梁配筋模型

桥墩的静态抗剪承载力设计值根据美国规范[12]计算出的结果为 1518 kN，根据中国混凝土结构设计规范[13]计算出的结果为 1727 kN。

为了考察不同高度桥墩的桥梁下部结构碰撞破坏规律，建立了三种高度桥墩模型，桥墩高度为 4 m、6 m 和 8 m 的整体桥梁模型如图 4 所示。

2.2. 车辆有限元模型的选择和建立

本文重点在于研究桥墩的抵抗冲击碰撞的极限承载力，因而只选择重量大的车辆模型，并经调整载货质量而采用。车辆模型原型采用 NCAC 官网[14]公布的精细化车辆有限元模型 Ford 800 (如图 5(左)所示)，这个模型也在文献[8]中用于碰撞数值模拟。车辆总长度 8.58 m，高度 3.32 m，宽度 2.44 m，前轴和后轴的轴距为 5.29 m。

为了研究重型车辆对桥梁碰撞冲击破坏规律，在 Ford800 车辆模型的基础上开发了一系列 10 吨~50 吨车辆模型，10 吨~20 吨车辆模型如图 5(左)所示。通过增加车厢长度和增加后轴的轮胎数量并调整车辆载重获得 30 吨以上车辆模型，新车辆模型总长度为 13.3 m，30 吨~50 吨车辆模型如图 5(右)所示。

车桥耦合模型的验证见文献[15] [16]。

3. 碰撞力持时的影响因素

碰撞力持时与碰撞车辆的质量和速度均有关系，车辆的惯性作用越大，碰撞持时越长。以 4 m 高桥墩为例，以 50 吨车辆在 40、60、80、100 和 120 km/h 的速度下进行碰撞，碰撞力时程曲线如图 6 所示，可以看出：相同车辆质量下，速度越大，碰撞力峰值越大，碰撞力持时越小，不同速度对应的碰撞力持时分别为 0.40 s、0.31 s、0.29 s、0.24 s 和 0.23 s。

为了考察相同冲量下不同车辆速度和质量对碰撞力持时和碰撞力峰值的影响，采用 4 m 高桥墩的桥梁模型在冲量为 1600 Ton·km/h 的作用下进行冲击，即以 10 吨、20 吨、30 吨、40 吨和 50 吨车辆分别在 150、80、53.3、40 和 32 km/h 速度下进行撞击，碰撞力时程曲线如图 7 所示，图例表示车辆的吨数。碰撞力从大到小依次为 7630 kN、5530 kN、3810 kN、2810 kN 和 1880 kN，相应的碰撞力持时分别为 0.16 s、0.23 s、0.30 s、0.36 s 和 0.51 s。相同冲量撞击下，速度越大，碰撞力峰值越大，持时越小，损伤程度越大，结构的响应也越大。相同冲量下不同吨位车辆撞击桥墩的柱顶水平位移峰值列于表 1 中。从表中数据可以看出：10 吨车辆撞击的桥墩位移响应相比其他工况响应都大，损伤程度最严重。尽管 50 吨车辆撞击的碰撞力持时最大，但桥梁损伤最小，因而碰撞力幅值比碰撞力持时对桥梁响应的更大。

选择桥梁碰撞损伤程度相似的两个荷载工况比较碰撞力持时和碰撞力幅值的变化规律。两个荷载

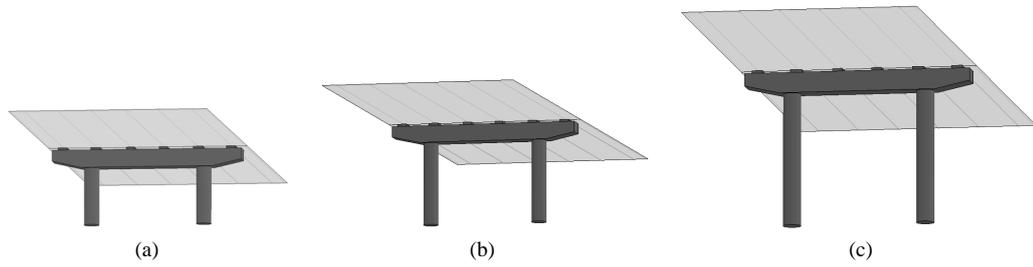


Figure 4. Finite element model of whole bridge: (a) High bridge pier is 4 m; (b) High bridge pier is 6 m; (c) High bridge pier is 8 m
图 4. 桥梁整体有限元模型: (a)桥墩高为 4 m; (b)桥墩高为 6 m; (c)桥墩高为 8 m

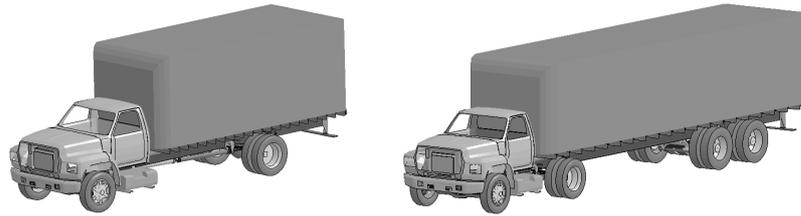


Figure 5. Heavy truck finite element model [14] (left) and modified model (right)
图 5. 重型卡车有限元模型原型[14] (左)和改进后的模型(右)

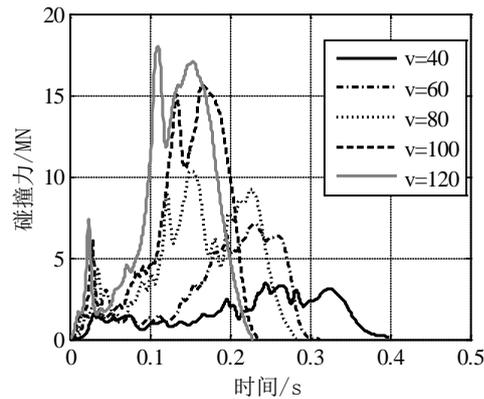


Figure 6. The time history of impact force impacted by 50 ton vehicle at different velocities
图 6. 在 50 吨车辆在不同速度下的碰撞力时程曲线

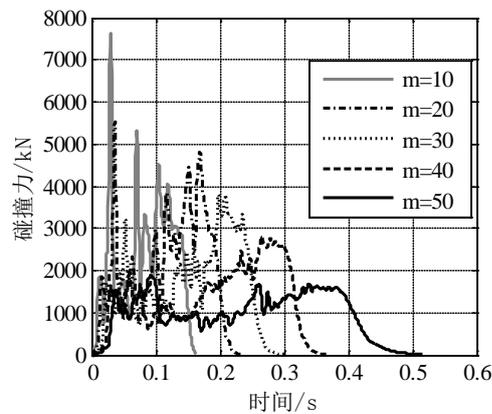


Figure 7. The time history of impact force with same impulse
图 7. 以相同冲量撞击下的碰撞力时程

Table 1. The response of piers under same impulse with different weight vehicles
表 1. 不同吨位车辆以相同冲量撞击下的桥墩响应

车重	柱中点水平位移(mm)	柱顶点水平位移(mm)	最大柱底水平剪力(kN)	最大柱底弯矩(kN·m)
10 吨	73.2	9.6	5441	2184
20吨	2.8	1.7	5322	1884
30 吨	1.4	1.2	3614	1612
40 吨	0.9	0.7	2680	1373
50 吨	0.5	0.5	1630	1050

工况为：工况 1 为 6 m 桥墩以 20 吨车辆在 100 km/h 的速度下撞击，工况 2 为 6 m 桥墩以 30 吨车辆在 80 km/h 的速度下撞击，工况 3 为 6 m 桥墩以 40 吨车辆在 60 km/h 的速度下撞击。

三种工况的碰撞力时程曲线如图 8 所示。三个工况的碰撞力峰值依次为 8.06 MN, 7.11 MN 和 7.08 MN, 碰撞力持时依次为 0.22 s, 0.24 s 和 0.29 s。可以看出碰撞力幅值比较接近，说明与碰撞力持时相比较，碰撞力幅值影响桥梁响应和损伤程度具有决定性作用。

4. 碰撞力峰值的影响因素

碰撞力的峰值受很多因素影响，比如桥墩的刚度和惯性、车辆前端的刚度、速度和重量。碰撞力峰值可以作为衡量桥梁的动态抗撞性能的重要指标。本文对相同截面的桥墩高度为 4 m、6 m、8 m 的桥梁遭遇不同重量和初速度的车辆撞击进行了时程分析，得出不同长细比的桥墩碰撞力峰值随车辆质量和速度的变化如图 9 所示。可以看出：随着车辆重量和车速的增加，碰撞力峰值整体上呈增长趋势。碰撞力峰值范围在 1.44~18.81 MN 之间，对于相同的荷载，4 m、6 m 和 8 m 桥梁桥墩的碰撞力比较接近，4 m 桥墩的碰撞力稍高，8 m 的略低。由于桥梁长细比不同，桥梁的侧向刚度也不同，同样的冲击作用下，4 m 高的桥梁碰撞力峰值稍大，而 8 m 高的桥梁碰撞力峰值稍小，如图 10 所示，在 10 吨车辆以 80 km/h 速度的碰撞荷载下 4 m、6 m 和 8 m 高桥墩桥梁的碰撞力峰值分别为 3.33 MN、3.26 MN 和 3.19 MN。

图 11(a)显示了桥墩 8 m 高的桥梁在 10 吨、20 吨和 30 吨重量的车辆以 60 km/h 速度碰撞下的碰撞力时程曲线，可以看出 60 km/h 速度下重量大的车辆对桥梁的作用持时更长，后续阶段碰撞力峰值更大。图 11(b)显示了桥墩 8 m 高的桥梁在 10 吨、20 吨和 30 吨重量的车辆以 80 km/h 速度碰撞下的碰撞力时程曲线，在 80 km/h 速度下重量大的车辆造成碰撞力峰值更大，由于 80 km/h 速度的速度比 60 km/h 速度更大，冲量作用时间短，碰撞力持续时间比 60 km/h 速度的工况小。从图 11 中可以明显看出，20 吨和 30 吨车辆碰撞点碰撞力时程曲线与 10 吨车辆的碰撞曲线明显不同，在 0.1 s 之后，20 吨和 30 吨车辆碰撞的时程曲线出现在高于 0.1 s 之内的峰值，这是由相同速度下 20 吨和 30 吨车辆的惯性作用比 10 吨更大，导致除了车辆前端产生的第一次碰撞之外，产生了由于车厢碰撞导致的二次碰撞，而二次碰撞力的幅值更大。

5. 结论

本文在 LS-DYNA 的平台上建立了重型车辆和桥梁的有限元模型，对不同高度桥墩的桥梁在重 10 吨 - 50 吨重型车辆撞击下进行全过程碰撞仿真分析，深入探讨了桥墩高度、车辆重量和速度的变化对碰撞力持时和峰值的影响。主要结论如下：

1) 碰撞力持时受车辆的质量和速度影响，车辆的惯性力越大，碰撞持时越长。相同重量车辆作用下，速度越大，持时越小。相同冲量作用下，速度越大，持时越短；

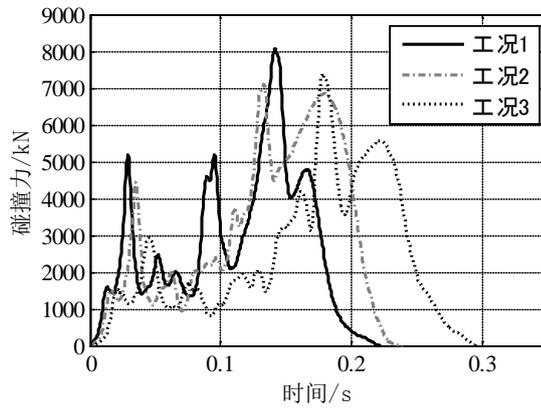


Figure 8. Impact force of three load cases with same damage level
 图 8. 相似损伤程度的三种荷载工况的碰撞力历程

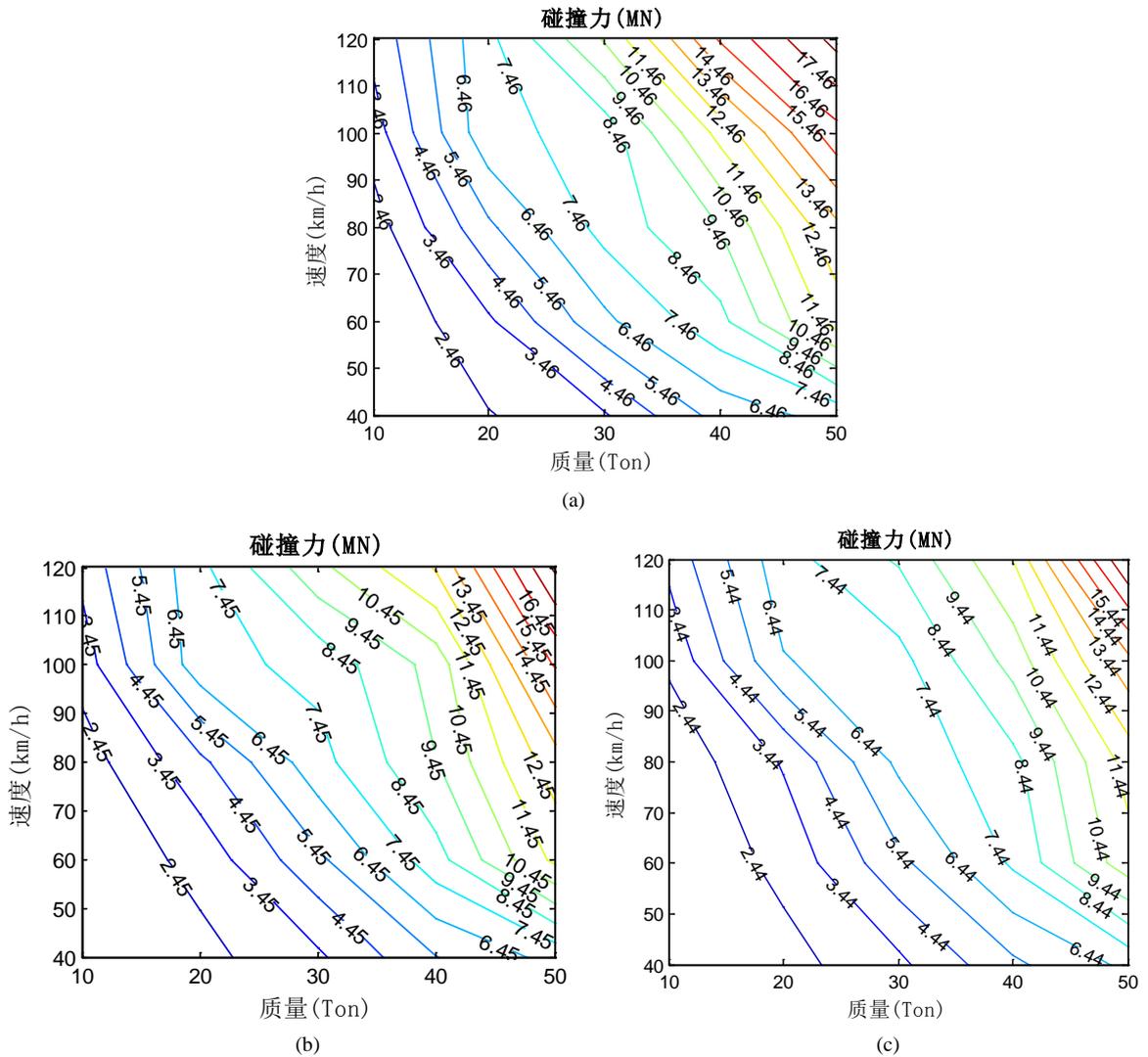


Figure 9. Peak impact force with variation of mass and velocity: (a) Bridge 4 m high; (b) Bridge 6 m high; (c) Bridge 8 m high

图 9. 不同质量和速度下的碰撞力峰值: (a)桥墩 4 m 高的桥梁; (b)桥墩 6 m 高的桥梁; (c)桥墩 8 m 高的桥梁

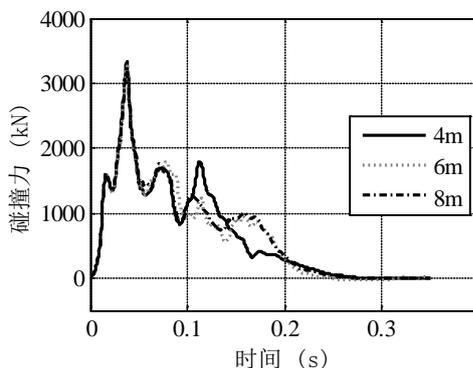


Figure 10. Impact force results of bridges of 4 m, 6 m and 8 m piers impacted by 10 ton vehicle at 80 km/h
图 10. 4 m、6 m 和 8 m 高桥墩桥梁在 10 吨车辆以 80 km/h 速度碰撞的碰撞力结果

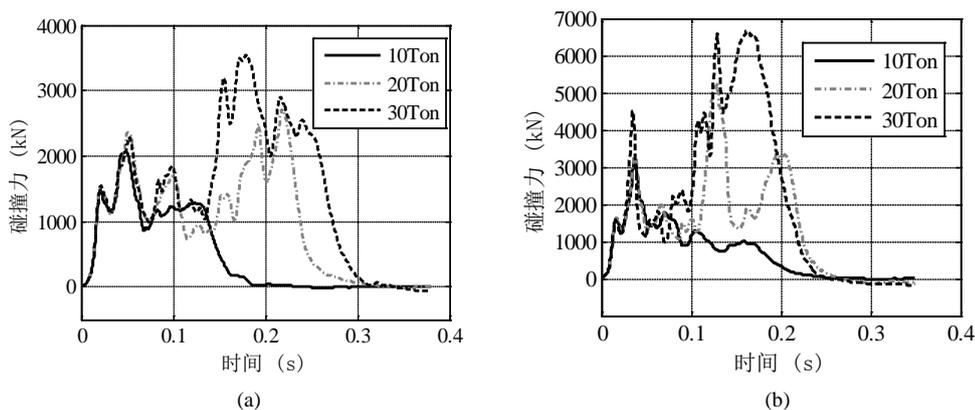


Figure 11. Impact force results of bridges of 8 m piers impacted by 10, 20 and 30 ton vehicle at 60 and 80 km/h: (a) The 60 km/h collision results are compared; (b) The 80 km/h collision results are compared

图 11. 8 m 高桥墩桥梁在 10、20、30 吨车辆以 60 和 80 km/h 速度碰撞的碰撞力结果: (a) 60 km/h 速度碰撞结果对比; (b) 80 km/h 速度碰撞结果对比

2) 相同破坏水平下不同的工况分析结果表明: 峰值碰撞力对桥梁下部结构的破坏具有主要影响, 碰撞过程的持时影响相对次要;

3) 碰撞力峰值随着车辆的重量和速度的增加而增加;

4) 桥墩的长细比对碰撞力峰值有影响, 桥墩长细比越小, 桥墩侧向刚度越大, 碰撞力峰值越大。

从以上的数值模拟分析可以看出, 仅仅采用恒定的静力作为桥梁的碰撞力进行设计, 不能反映出车辆和桥梁结构参数的变化导致碰撞力的变化, 对于重型车辆的碰撞力设计明显偏于保守。参数分析为碰撞力设计方法的改进、考虑不同参数的影响提供了重要参考依据。综合考虑不同参数影响的碰撞力设计方法将在后续论文中详述。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51438010)。

参考文献 (References)

- [1] 王吕斌, 张亮. 超载货车撞折上步桥桥墩 21 条公交断线[EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/c/2010-01-18/010916947998s.shtml>
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2008) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 4th Edition, Washington. D.C.
- [4] European Committee for Standardization (2009) Eurocode 1: Actions on Structures—Part 1-1: General Actions—Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings e (Annex B) BS EN 1991-1-2002. Brussels.
- [5] European Committee for Standardization (2010) Eurocode 1: Actions on Structures—Part 1-7: General Action—Accidental Actions, BS EN 1991-1-7:2006. Brussels.
- [6] 陆新征, 张炎圣, 何水涛, 等 (2009) 超高车辆撞击桥梁上部结构研究: 损坏机理与撞击荷载[J]. 工程力学, 26(s2): 115-125.
- [7] EI-Tawil, S., Severino, E. and Fonseca, P. (2005) Vehicle Collision with Bridge Piers. *Journal of bridge Engineering*, **3**, 345-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2005\)10:3\(345\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:3(345))
- [8] Sharma, H., Hurlbaas, S. and Gardoni, P. (2012) Performance-Based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact. *International Journal of Impact Engineering*, **43**, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.007>
- [9] Thilakarathna, H.M.I., Thambiratnam, D.P., Dhanasekar, M., *et al.* (2010) Numerical Simulation of Axially Loaded Concrete Columns under Transverse Impact and Vulnerability Assessment. *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 1100-1112. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003>
- [10] Hallquist, J.O. (2015) LS-DYNA Keyword User's Manual. Software Technology Corp., Livermore, CA.
- [11] 王娟. 城市桥梁下部结构抵抗重型车辆碰撞的性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2015.
- [12] American Concrete Institute Committee (2005) ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute Committee, Farmington Hills.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 54-64.
- [14] National Crash Analysis Center, George Washington University (2012) Finite Element Model Archive.
- [15] Wang, J., Kwasniewski, L., Qian, J., *et al.* (2014) Assessment of Simplified Numerical Models for Vehicle-Bridge Dynamic Interaction. *Advances in Transportation Studies*, **33**, 5-20.
- [16] 王娟, 钱江, 周德源. 城市桥梁下部结构抗重型车辆撞击的数值仿真分析[J]. 湖南大学学报, 2016, 43(7): 88-95.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org