



土木工程结构研究新进展丛书

清华大学抗震防灾与高性能结构研究组报告集 Ⅱ

超高车辆撞击桥梁上部结构研究 ——破坏机理、设计方法和防护对策

Collision between over-height vehicles and bridge superstructures:
failure mechanism, design methodology and protective measures

陆新征 何水涛 黄盛楠 ©著

Xin-Zheng LU, Shui-Tao HE, Sheng-Nan HUANG

中国建筑工业出版社

土木工程结构研究新进展丛书

清华大学抗震防灾与高性能结构研究组报告集 II

超高车辆撞击桥梁上部结构研究 ——破坏机理、设计方法和防护对策

Collision between over-height vehicles and bridge superstructures:
failure mechanism, design methodology and protective measures

陆新征 何水涛 黄盛楠 著

Xin-Zheng LU, Shui-Tao HE, Sheng-Nan HUANG

中国建筑工业出版社

前 言

随着我国城市的发展,构建城市立体交通系统成为解决城市交通问题的重要途径。但是,由于种种原因,我国近年来频繁发生超高车辆撞击桥梁上部结构的事故,严重威胁桥梁结构安全和城市交通运行。根据国外研究和工程经验,由于超高车辆撞击事故难以完全避免,要减少超高车辆撞击损失,除管理和教育等“软手段”外,增强桥梁结构的抗撞击能力,减小撞击事故对桥梁的损坏等“硬手段”也必不可少。而我国当前在该问题上的基础研究还很少,对超高车辆撞击造成桥梁上部结构破坏的内在机理认识不足,导致缺少可靠的设计依据和防护对策。

因此,本课题组在国家自然科学基金项目(50808106)、交通部交通运输建设重大科技专项(2011-318-223-170)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0528)的资助下,对超高车辆撞击桥梁上部结构问题开展了一系列的研究,包括案例调研、模型试验、数值仿真和理论分析,揭示了超高车辆撞击桥梁上部结构的破坏机理,提出了撞击荷载的工程设计公式,并开发了防护装置,可供广大桥梁专业人员在桥梁设计和加固中参考。

本书第1、2、6章由陆新征和何水涛共同撰写,第3章由何水涛和黄盛楠共同撰写,第4、5章由陆新征和黄盛楠共同撰写。全书最后由陆新征负责整理。

参加本课题研究工作的还有:博士生卢啸、李易,硕士生张炎圣、曹海韵,本科生程晓波。在整个研究工作中,还得到了清华大学叶列平老师、潘鹏老师、王宗刚老师的帮助和支持,在此也表示衷心的感谢。并感谢清华大学“力学计算与仿真”实验室和“土木工程安全与耐久教育部重点实验室”提供的高性能计算平台和实验研究条件。

由于作者水平有限,本书一定存在不足和错误,欢迎有关专家和读者提出宝贵意见。

作者
2011年8月
北京清华园

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	4
1.2.1 车桥碰撞的试验研究	5
1.2.2 车桥碰撞的理论研究和设计方法	5
1.2.3 其他碰撞领域的相关研究	7
1.2.4 桥梁防护对策	8
1.3 研究内容	10
2 撞击模型试验研究	11
2.1 试验设计	11
2.1.1 试验总体设计	11
2.1.2 试验模型设计	12
2.1.3 撞击试验加载方案	27
2.1.4 撞击试验数据采集	28
2.2 试验过程和结果分析	29
2.2.1 油罐车撞击钢箱梁桥上部结构模型试验	30
2.2.2 油罐车撞击钢板梁桥上部结构模型试验	35
2.2.3 油罐车撞击钢筋混凝土 T 梁桥上部结构模型试验	41
2.2.4 油罐车撞击 FRP 梁桥上部结构模型试验	49
2.2.5 本节小结	52
3 碰撞试验有限元分析	54
3.1 材料本构模型	54
3.1.1 混凝土本构及其验证	54
3.1.2 钢材本构及其验证	60
3.2 油罐车撞击钢箱梁桥上部结构模型有限元分析	61
3.2.1 有限元模型	61
3.2.2 有限元分析结果	63
3.3 油罐车撞击钢板梁桥上部结构模型有限元分析	64
3.3.1 有限元模型	64

3.3.2 有限元分析结果	65
3.4 油罐车撞击混凝土 T 梁桥上部结构模型有限元分析	66
3.4.1 有限元模型	66
3.4.2 有限元分析结果	67
3.5 本章小结	68
4 超高车辆撞击桥梁上部结构有限元模拟	69
4.1 有限元模型	69
4.1.1 车辆有限元模型	69
4.1.2 桥梁有限元模型	71
4.1.3 网格尺寸和时间步长精度检验	75
4.2 典型桥梁上部结构损坏机理分析	76
4.2.1 简支预应力钢筋混凝土 T 梁桥	76
4.2.2 简支钢箱—混凝土板组合梁桥	83
4.2.3 三跨连续预应力钢筋混凝土箱梁桥	87
4.2.4 四跨连续钢箱梁人行天桥	92
4.3 桥梁上部结构损坏模式与损坏程度	96
4.3.1 损坏模式分类	96
4.3.2 竖向承载力损失程度	97
4.3.3 整体变形损伤程度	98
5 简化计算模型及工程设计公式	109
5.1 简化计算模型	109
5.1.1 撞击荷载的影响因素	109
5.1.2 撞击计算简化模型	116
5.2 撞击荷载工程设计公式	126
5.2.1 已有工程设计公式概述	126
5.2.2 工程设计公式	128
5.2.3 参数分析	131
5.2.4 车轮刚度及车厢塑性的影响	134
5.2.5 设计公式系数取值	138
6 桥梁上部结构防护对策	142
6.1 防护装置设计和分析	142
6.1.1 防护装置的初步设计	142
6.1.2 防护效果有限元模拟	143
6.2 桥梁上部结构防护装置试验研究	143
6.2.1 试验模型设计	143

6.2.2 试验过程和结果分析	145
6.2.3 试验有限元模拟	150
6.3 本章小结	150
7 结论与展望	151
参考文献	152

1 引言

1.1 研究背景

近年来我国城市规模加速扩大，城市交通负担日益繁重，构建城市立体交通系统成为应对这一挑战的重要途径。城市桥梁是城市立体交通系统的重要组成部分，其安全和正常使用对保障城市工作和生活的正常运行起着重要作用。

但是，由于驾驶人员素质不高，有关部门监管不够到位，我国近年来频繁发生超高车辆撞击桥梁上部结构事故(图 1.1)，严重威胁桥梁结构安全和城市交通运行。根据北京市交通部门的统计数据^[1]，北京市约 50% 的桥梁上部结构曾遭超高车辆撞击，由此损坏的桥梁占有所有损坏桥梁的 20% 以上。

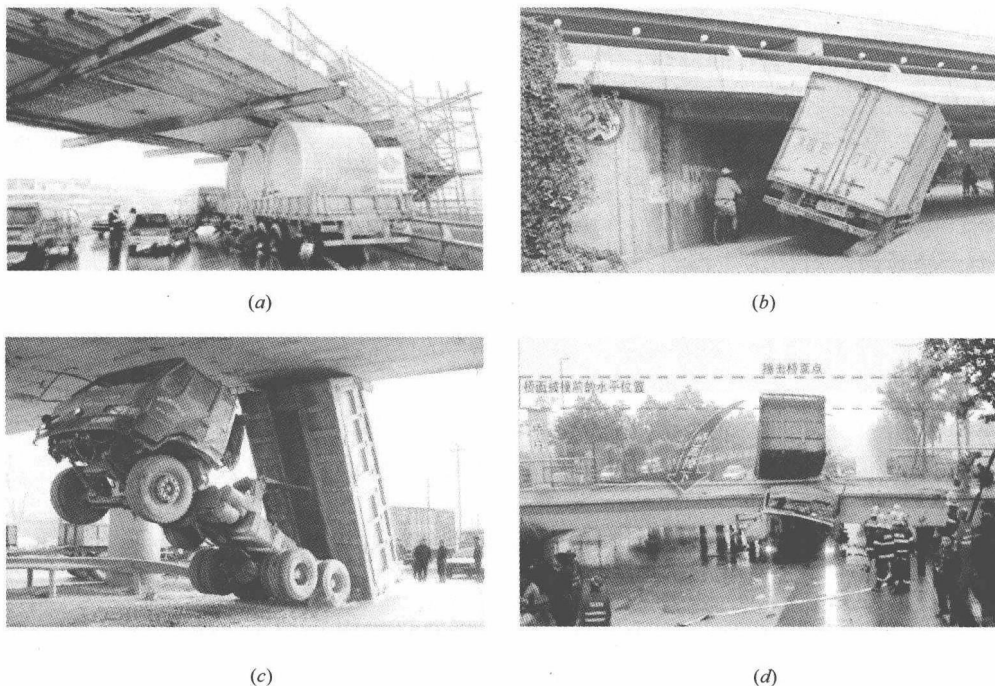


图 1.1 我国超高车辆撞击桥梁上部结构事故(网页图片)

(a) 货物超高导致撞击；(b) 车辆超高导致撞击；(c) 货斗意外翻起导致撞击；(d) 超高车辆撞落人行天桥

本书重点对北京市超高车辆撞击桥梁上部结构的事故进行了调研，同时也对我国其他城市以及美国、欧洲此类事故进行了一定的了解。2000 年以来，我国超高车辆撞击桥梁

上部结构的部分事故概况如下:

● 2000 年, 1~5 月间北京市发生超高车辆撞击桥梁上部结构的事故 30 多起。其中, 安华桥 6 个月内被超高车辆撞击 5 次, 紫竹桥南一号人行天桥于 5 月中旬被超高车辆撞断主梁。

● 2001 年, 北京市发生超高车辆撞击桥梁上部结构事故 73 起。其中, 西八里庄桥曾于 3 月因一辆自卸卡车货斗自动脱钩翻起而遭到重撞。

● 2002 年, 分别于 8 月 4 日和 8 月 8 日, 北京东四环和南四环各有 1 座人行天桥被超高车辆撞击, 原因都是货斗突然翻起, 事故导致车毁人伤, 2 座人行天桥都受到严重损坏。

● 2003 年, 北京市发生超高车辆撞击桥梁上部结构事故 86 起。

● 2004 年, 截至 11 月, 北京市发生 60 多起超高车辆撞击桥梁上部结构事故。

● 2005 年, 北京市发生车辆撞击桥梁事故 48 起, 共造成栏杆损坏 100m、限高架损坏 6 个、梁体损坏 16 座, 其中 23 起属于超高车辆撞击桥梁上部结构事故。

● 2006 年, 截至 6 月底北京市发生超高车辆撞击限高架事故 12 起, 此外安华桥上部结构 1 周内连续 2 次被超高车辆撞击, 最严重时导致梁的钢筋裸露在外。另外, 一辆拖挂大货车行驶至东三环路双井桥北辅路二闸桥时, 由于超高, 先撞毁限高龙门架, 再撞上二闸桥, 导致桥梁严重受损, 可见现有限高架也不能完全避免桥梁上部结构遭受超高车辆撞击。

● 2007 年, 1~11 月间北京市发生超高车辆撞桥事故 63 起, 其中造成梁体损坏的事故 5 起。此外, 在沈阳市, 沈海立交桥被超高车辆撞断了三根主筋, 被迫换梁并造成一条车道断行一个月, 损失约 90 万元; 在上海市, 一辆超高货车将吴淞大桥撞偏近 10cm。

● 2008 年, 在成渝高速路, 一辆超高货车强行通过一座在建的跨线公路桥, 将桥底主轴撞歪, 导致两个月的施工白费, 损失近百万元。

● 2009 年 11 月 11 日, 湖北武汉一辆超高集装箱车辆撞倒限高架, 致使正在施工的桥梁工程停工; 11 月 28 日, 陕西户县一辆装满货物的超高超长车撞击西汉高速户县出口的立交桥。

● 2010 年 8 月 2 日, 北京市城铁大钟寺过街天桥被翻斗车撞击, 原因是翻斗车突然翻起, 撞击部位混凝土剥落, 露出钢筋, 桥面出现裂缝, 必须更换主梁, 损失超过 200 万元。

● 2011 年 2 月 22 日, 广西省兰海高速, 钦州至防港的卜家立交桥被翻斗车撞击, 原因是翻斗车突然翻起, 撞击部位混凝土剥落, 致使该桥成为危桥。3 月 6 日, 广东省化州市区北京大桥被一辆未将车厢降落的大型自卸载重汽车撞击, 将桥梁的一根横梁撞断。

在西方发达国家, 此类事故也不可完全避免。在美国, 根据抽样数据^[2~5], 大约 61% 的跨线桥梁上部结构曾遭超高车辆撞击(图 1.2)。在欧洲, 2007 年 11 月 27 日, 英国伦敦一辆卡车吊货杆翘起, 撞击桥梁上部结构, 导致 T 梁严重损坏(图 1.3(a)), 修复费用达 500000 美元, 并使有关路段被迫关闭一个月; 2005 年 6 月, 法国图卢兹发生超高车辆撞击桥梁上部结构事故(图 1.3(b)), 司机当场死亡。

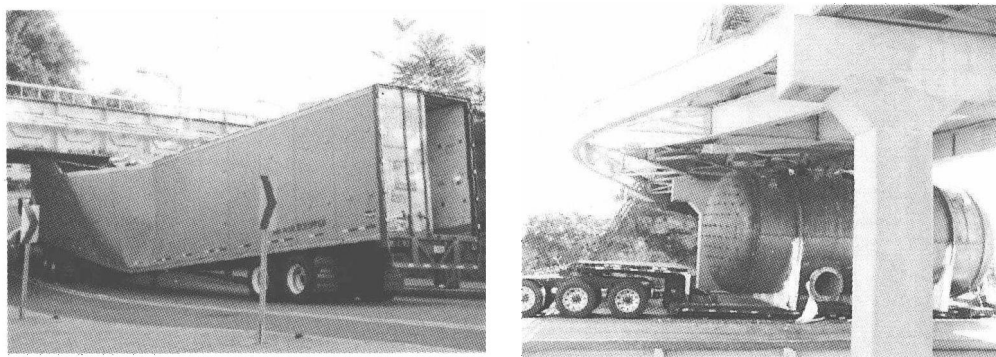


图 1.2 美国超高车辆撞击桥梁上部结构事故

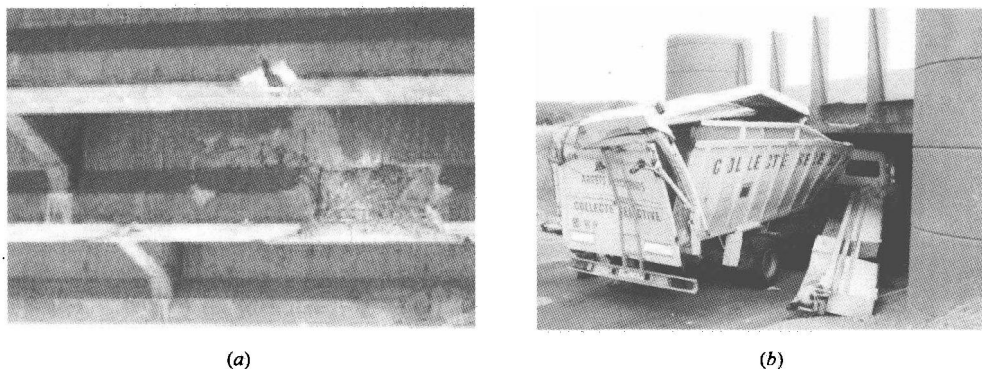


图 1.3 欧洲超高车辆撞击桥梁上部结构事故(网页图片)

(a)英国伦敦被超高车辆撞坏的混凝土 T 梁；(b)法国图卢兹超高车辆撞击桥梁上部结构

由此可见，超高车辆撞击是导致桥梁损坏的重要原因。即使在管理水平远高于我国的西方发达国家，此类事故也不可完全避免。因此很有必要对超高车辆撞击桥梁上部结构的机理和防护对策开展研究。

本课题和国外的事故调查结果^[6~8]表明，超高车辆撞击下桥梁上部结构的损坏形式及其特点如下：

(1) 支座破坏，桥梁上部结构位移过大甚至发生落梁破坏。人行天桥与车道数较少的简支立交桥容易发生此类破坏。例如 2006 年 11 月 23 日，在成都市三环路上，一辆重型卡车货斗意外翻起，撞落一座人行天桥并将司机当场砸死，还造成整个三环路交通瘫痪了 8h，如图 1.1(d)所示。

(2) 桥梁被撞区域产生局部损坏，尤其混凝土 T 梁和钢 T 梁局部损坏非常严重。对于混凝土 T 梁，被撞区域出现混凝土崩落、斜向开裂、钢筋裸露，如图 1.4(a)所示，以及腹板一面板交接处纵向开裂，如图 1.4(b)所示。对于钢 T 梁，会导致 T 梁严重塑性变形，如图 1.4(c)所示。

(3) 除了被撞区域，桥身其他地方也会出现各种损伤。例如对于混凝土 T 梁桥，在被撞梁端部出现扭转斜裂缝，如图 1.4(d)所示。

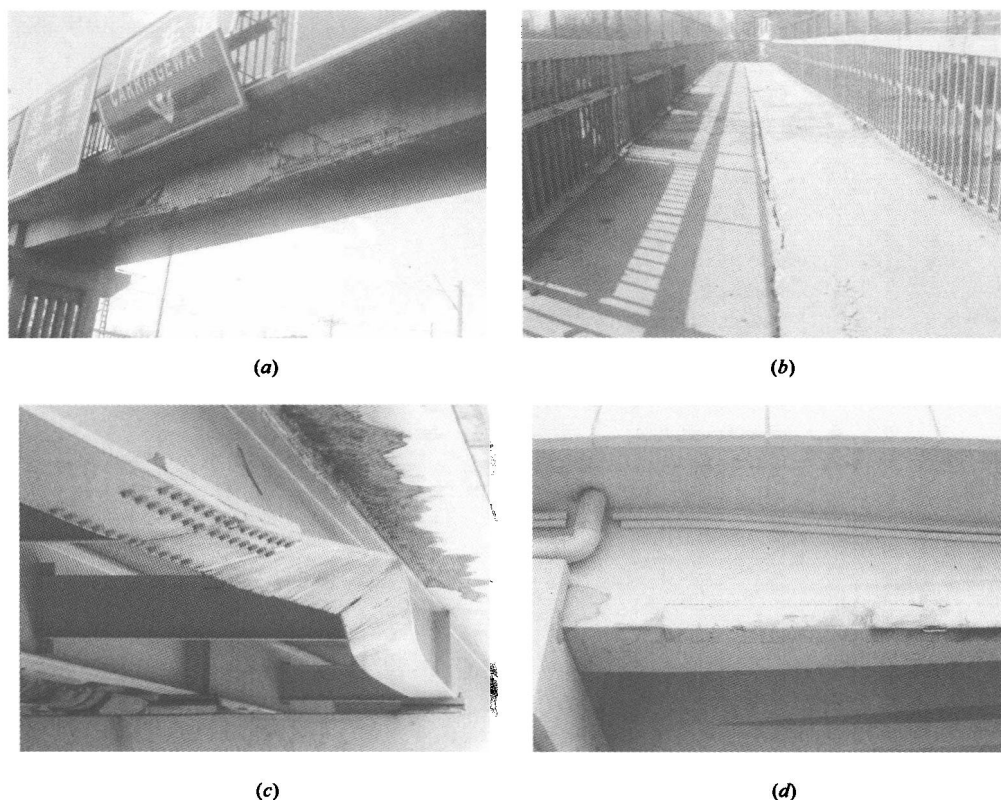


图 1.4 超高车辆撞击下桥梁上部结构损坏情况

(a)被撞区域混凝土崩落和斜向开裂；(b)混凝土 T 梁腹板一面板交接处纵向开裂；
(c)被撞区域 T 型钢梁严重屈服；(d)混凝土 T 梁腹板端部扭转斜裂缝

1.2 研究现状

由于超高车辆撞击桥梁上部结构是近几年随着城市立体交通快速发展才暴露出来的问题，因此国内对此研究尚很缺乏。我国 2004 版桥梁通用规范^[9]参考国外规范，简单规定了等效撞击力大小（“车辆行驶方向取 1000kN，垂直于车辆行驶方向取 500kN”），但是对撞击力作用时间和区域，输入能量和冲量大小以及防护措施等并未给出具体规定。国外针对超高车辆撞击桥梁上部结构已经开展了一些试验和理论分析，也形成了相对具体的设计方法，但是这些研究仍然不够系统。特别是考虑到我国车辆和桥梁情况都与国外有所差别，因此国外规范对于我国工程实践不能完全适用。所以需要参考已有的相关研究成果，进一步开展针对我国超高车辆撞击桥梁上部结构问题的研究。

由于车撞桥墩、车撞护栏以及船撞桥墩等问题与车撞桥梁上部结构问题具有一定的相似性，而且国内外已对这些问题进行了比较全面和深入的研究，因此本书也借鉴了这些相关碰撞领域的研究成果。

1.2.1 车桥碰撞的试验研究

车桥碰撞(包括车撞桥墩、车撞桥梁上部结构)的机理十分复杂,涉及大量的几何非线性、材料非线性、接触非线性以及动力效应,单靠理论研究难度较大,试验研究是重要的研究手段。英国 Arup 公司开展了车撞桥梁上部结构和车撞桥墩的足尺试验(图 1.5),为车桥碰撞损坏机理和撞击荷载的研究提供了重要参考^[10],但相关试验结果未公开。由于足尺试验代价过于高昂,因此这类试验数量极少,难以对不同车型、不同桥型碰撞问题进行系统的研究。

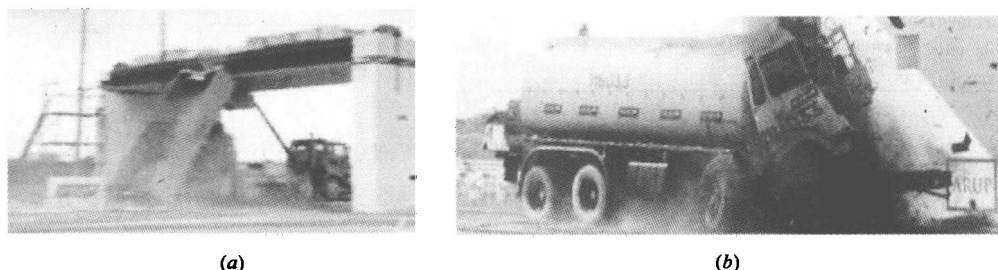


图 1.5 车桥碰撞足尺试验^[10]
(a)车撞桥梁上部结构; (b)车撞桥墩

1.2.2 车桥碰撞的理论研究和设计方法

1. 车桥碰撞的理论研究

关于车撞桥墩,刘佳林、赵强等分别将车辆和桥墩简化为刚体和弹性梁,基于能量守恒定理分析了撞击力大小及其影响因素,然后将撞击力作用于桥墩简化模型,推导了桥墩顶部位移和桥墩倒地的临界撞击力大小^[11]。陆勇、曹立波则基于精细化有限元,对实际车撞桥墩事故进行了仿真,并对撞击力大小和车辆损坏情况进行了深入分析^[12]。因此,虽然目前关于车撞桥梁上部结构的机理和撞击荷载的理论研究还很缺乏,但可参考车撞桥墩问题的有限元分析方法和简化分析方法对此开展理论研究。

2. 车桥碰撞的设计方法

欧洲规范 Eurocode 1^[13]分别针对桥梁下部结构和上部结构提出了车辆撞击作用的计算方法,如图 1.6、图 1.7 所示。对于不同类型的道路,根据行车情况, Eurocode 1^[13]建议的不同的撞击力基本值,如图 1.6(a)、图 1.7(a)所示。此外,对于撞击力位置与作用范围, Eurocode 1^[13]也给出了建议。其中,关于车辆对桥梁上部结构的撞击力,除了规定撞击力基本值, Eurocode 1^[13]还考虑了如下因素,如图 1.7(b)所示。

(1) 对撞击力基本值乘以净空折减系数,即认为撞击力随着桥下净空的增大而减小,当其达到一定高度(h_1)后不再考虑车辆超高撞击作用;

(2) 对于撞击桥梁底板情况,需要考虑竖向撞击力,即撞击力方向与水平方向存在夹角,规范建议的角度为 10° ;

(3) 规范建议撞击力作用面积取为 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m}$ 。

Table 4.1: Indicative equivalent static design forces due to vehicular impact on members supporting structures over or adjacent to roadways.

Category of traffic	Force F_{dx}^a [kN]	Force F_{dy}^a [kN]
Motorways and country national roads	1000	500
Country roads in rural area	750	375
Roads in urban area	500	250
Court yards and parking garages with access to:		
—Cars	50	25
—Lorries ^b	150	75

^a x=direction of normal travel, y=perpendicular to the direction of normal travel.
^b The term 'lorry' refers to vehicles with maximum gross weight greater than 3, 5ton

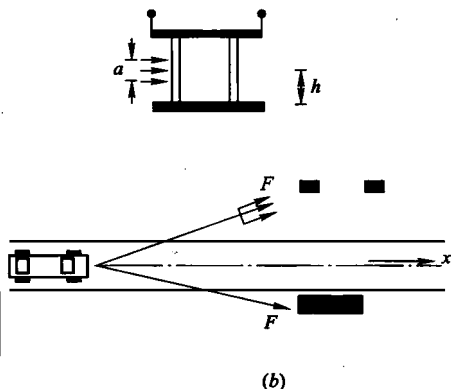


图 1.6 Eurocode 1 建议的桥梁下部结构撞击力

(a)不同类型道路撞击力大小；(b)撞击力作用区域

Table 4.2: Indicative equivalent static design forces due to impact on superstructures.

Category of traffic	Equivalent static design force F_{dx}^a [kN]
Motorways and country national roads	500
Country roads in rural area	375
Roads in urban area	250
Court yards and parking garages	75

^a x=direction of normal travel to the direction of normal travel.

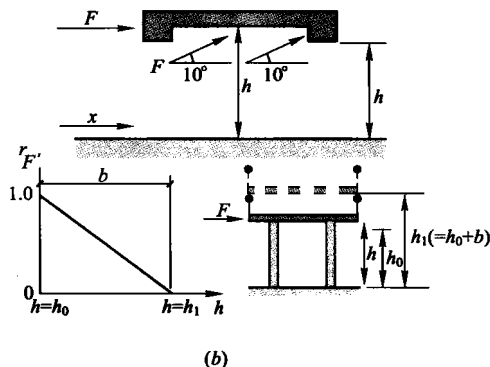


图 1.7 Eurocode 1 建议的桥梁上部结构撞击力

(a)不同类型道路撞击力大小；(b)撞击力作用区域

由于超高车辆—桥梁上部结构的碰撞问题十分复杂，相关研究目前仍不完善，而且各国交通、车辆以及桥梁情况差别较大，因此 Eurocode 1^[13]的相关建议仍然不够具体，例如对于桥梁的动力响应和损坏程度如何计算缺乏明确规定，而且规范中的许多参数需要欧洲各国根据自身情况开展进一步研究后进行取值。

我国关于车—桥碰撞荷载的设计方法更加缺乏。2004 年前，旧的桥梁通用规范^[14]未规定车辆撞击荷载，2004 年后，新的桥梁通用规范^[9]参考国外规范，对车辆撞击荷载简单规定如下：“汽车撞击力标准值在车辆行驶方向取 1000kN，在车辆行驶垂直方向取 500kN，两个方向的撞击力不同时考虑，撞击力作用于行车道以上 1.2m 处，直接分布于撞击涉及的构件上。”可见我国规范对车辆撞击力的建议过于笼统，未考虑撞击不同构件（桥墩与桥梁上部结构）的差别，以及车辆质量、速度等因素对撞击荷载的影响。

既有规范为超高车辆—桥梁上部结构碰撞荷载设计提供了参考，但由于既有规范，尤其我国规范的设计方法仍然很不完善，因此需要通过进一步的研究，对其进行改进，以符合我国工程设计要求。

1.2.3 其他碰撞领域的相关研究

1. 船撞桥墩

船撞桥墩与超高车辆—桥梁上部结构碰撞问题比较相似,而且国内外对该问题的研究比较充分,其中船桥碰撞机理和撞击荷载设计方法的研究对本课题有较大的参考价值,船桥碰撞机理研究包括试验和理论两个方面的研究。

日本曾进行过低能量碰撞试验研究,将船首视作一个钟摆,撞入另一条船的舷侧^[15]。荷兰的 ASIS(The Association for Structural Improvement of Shipbuilding Industry)和 CMO(the Netherlands Foundation for the Coordination of Maritime Research)联合进行了四次足尺的碰撞试验^[16],以验证船体结构损伤预测的计算方法。

在我国,陈泽宏等也曾对船舶撞击桥墩进行过模型试验^[17]。福州大学以泉州后渚大桥桥墩防撞岛为工程背景,于 2002 年进行了一次船桥碰撞缩尺试验^[18,19],如图 1.8 所示。该试验分别考虑了轮船类型、撞击部位、碰撞速度和防撞岛填筑材料等因素的影响。缩尺比例为 1:20,模型材料仍采用原型材料,防撞岛满足边界条件相似;缩尺后,轮船内部结构难以满足几何相似,根据能量相似确定模型的总质量,以确保撞击总能量相似。碰撞试验中主要采集了撞击力、防撞岛模型加速度、防撞岛模型位移及撞击区域动态应变等数据,最终得出各种工况下防撞岛的破坏模式。

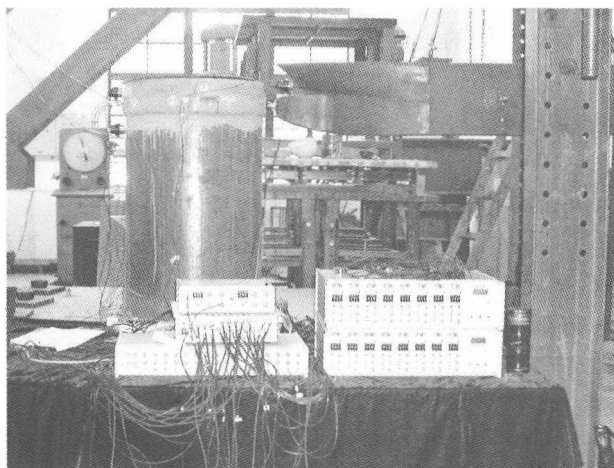


图 1.8 福州大学船撞桥墩缩尺试验^[18,19]

在理论研究方面,Minorsky 针对核动力军舰设计、核电站防护以及海洋结构防撞问题,研究了 26 件船舶碰撞事件,得出钢体积变形与吸收撞击能之间的线性关系,由此奠定了船舶碰撞的分析基础^[20]。文献 [21] 充实并深化了 Minorsky 的理论,并将其用于船桥碰撞分析。此后,国内外学者对船桥撞击计算方法进行了大量的理论研究^[22]。随着有限元方法和计算机技术的发展,高精度仿真为船桥碰撞分析提供了有力工具。刘建成等基于精细化有限元,对一艘 4 万吨级油轮的球鼻船艏与某一斜拉索桥桥墩的正向碰撞进行了仿真,分析了撞击力大小与能量转化方式,并将桥梁损伤原因分为两类:一是接触荷载引起高应力,发生在船与承台的接触区域;二是由于桥墩整体弯曲变形引起,发生在桥柱与

承台以及桥桩与承台的连接处^[23~25]。此外,王君杰、吴晶等基于精细化有限元模拟,对既有船撞力的规范设计公式进行了比较分析^[26,27]。

在船桥碰撞机理研究的基础上,船撞桥墩领域已经形成若干实用的设计方法,主要包括以下三类:

(1) 基于能量原理的撞击力设计公式。根据能量守恒定理,已知船舶初始动能,当其完全转化为变形势能时,如果变形刚度已知,则可求出最大撞击力。欧洲规范 Eurocode 1^[13,28]认为碰撞过程船舶动能完全转化为变形势能,从而建立最大撞击力公式。我国《铁路桥涵设计基本规范》^[29]也是基于船舶动能与变形势能的转化关系建立撞击力公式,但进一步考虑了碰撞能量损失、碰撞角度等因素,并将变形刚度细化为船舶刚度和桥墩刚度两个部分。

(2) 基于动量原理的撞击力设计公式。根据动量定理,已知船舶初始动量,只要再知道碰撞持续时间,便可求出平均撞击力。我国桥梁通用规范^[9,14]根据动量定理建立了平均撞击力设计公式,并认为最大撞击力是平均撞击力的 2 倍。

(3) 基于试验数据和经验总结的撞击力设计公式。例如美国规范 AASHTO^[30]基于 Woison 理论建立的撞击力设计公式,虽然也是基于能量原理,但是不再考虑变形刚度的影响,而是基于试验和事故数据拟合,对不同变形刚度都取统一的系数。

对于本课题超高车辆—桥梁上部结构碰撞荷载的设计计算公式,基于试验数据和经验总结的船撞力设计公式不能直接使用,但可以借鉴基于能量原理和动量原理的船撞力设计公式。基于能量原理和动量原理的设计公式,各自的关键分别为变形刚度和碰撞持续时间的取值,对此,车撞桥梁上部结构与船撞桥墩存在很大差别,需要专门进行研究。

2. 车撞护栏等其他碰撞问题

除了船撞桥墩以外,车撞护栏等其他碰撞问题也得到较多研究,其有限元分析方法和简化分析方法也可为本课题提供借鉴,介绍如下:

雷正保等对汽车与护栏碰撞过程进行计算机仿真,并与试验结果进行了比较,二者吻合良好^[31]。赖跃基于精细化有限元,对重型集装箱卡车撞击东海大桥半刚性护栏进行了仿真分析,对车辆运动规律、撞击荷载以及护栏响应进行了深入研究^[32]。姚启明采用简化的双自由度模型,通过数学推导,建立了撞击荷载的计算公式,并根据多次试验以及国内外经验,确定简化模型参数的取值^[33,34]。

此外,文献 [35] 分别基于动量原理和能量原理建立了防撞门的撞击力设计公式,并结合试验结果讨论了公式中参数的合理取值。文献 [36] 建立了桥梁上部结构与挡块碰撞的简化模型,包括将桥梁上部结构简化为刚体,将挡块弯曲剪切刚度以及支座剪切刚度合并为统一的变形刚度,将桥梁自身阻尼系数以及桥梁—挡块碰撞阻尼系数合并成统一的阻尼系数,从而基于动力方程建立碰撞力计算公式。

1.2.4 桥梁防护对策

除了上述关于桥梁撞击机理和撞击荷载设计方法的研究,国内外对桥梁撞击防护对策也开展了一些研究,主要包括如下两个方面:

1. 改进桥梁结构设计

针对超高车辆撞击,需要改进桥梁上部结构设计。一是通过加强构件承载能力,即在

设计阶段考虑撞击荷载,对此国内外规范进行了不同详细程度的规定^[9,13,14,28~30]。二是采用合理的构造措施,例如文献[37]研究了横向连系梁的工作机理,表明横向连系梁能明显提高桥梁上部结构的横向抗撞能力。

2. 安装附加防护装置

(1) 已有防护装置研究

对于超高车辆撞击桥梁上部结构,安装附加防护装置是减小桥梁损坏程度的有效手段。对此,国外已开展了多项研究。例如文献[38],提出使用钢支架提高桥梁在撞击时的整体性;文献[39]研究使用泡沫铝等新型吸能材料减小撞击力;文献[40]提出一些警告与防护相结合的防护手段等。这些研究对其提出的附加防护装置的效果,从模型试验、数值模拟、理论分析等方面进行了系统的论证。目前,文献[38]中建议的钢支架已经得到工程应用,其他技术还在推广阶段。

我国一些城市和行业,也已开始尝试采用附加防护装置对桥梁上部结构进行防撞保护。例如文献[41]采用在桥梁前面设立带橡胶垫的限高架,从一定程度上减轻了对桥梁自身的破坏。但是,由于目前我国对超高车辆—桥梁上部结构碰撞机理和撞击荷载(例如撞击力和撞击冲量大小、缓冲装置的缓冲机理、吸能装置的吸能机理等)的基础研究不足,导致这些附加防护装置设计缺少科学指导,效果评价也缺少客观依据,从而极大限制了其在实际工程中的应用。例如北京市二闸铁路桥,虽然已经设置了限高架,但由于对碰撞机理和撞击荷载认识不足,导致超高车辆撞毁限高架后继续撞坏桥身。

因此对于超高车辆—桥梁上部结构碰撞问题,附加防护装置的工作机理和设计方法还需进一步的研究。船撞桥墩在防护装置研究方面已有较多成果,可为车撞桥梁上部结构问题提供参考。根据文献[42~44],船撞桥墩附加防护装置按照设置场所分类,分成:

- ① 直接构造——防护装置与桥墩相连;
- ② 间接构造——防护装置不与桥墩相连。

按照能量吸收方法分类,分成:

- ① 弹性变形型——由弹性变形吸收撞击能量;
- ② 塑性变形型——由压屈、弯曲塑性变形等来吸收撞击能量;
- ③ 变位型——利用重力或浮力的还原力吸收撞击能量。

文献[45]提出新的防护装置,即黏滞耗能型——由黏性阻尼或摩擦阻尼吸收撞击能量。文献[41~45]分别给出各种类型附加防护装置的原理分析和应用实例。

(2) 汽车防撞系统概述

汽车的被动安全,也称为碰撞安全性,是指通过车辆结构的安全性设计并配置相应的安全装置,在碰撞事故发生时可以减少乘员和行人受到伤害的程度^[46]。被动安全的主要研究内容就是合理进行车身设计,利用车身结构构件的变形吸收能量,保护乘员的安全。

为了提高汽车的碰撞吸能水平,人们发展了多种吸能机理,其中渐进压溃式的吸能机理是目前应用范围最广、研究最深入的一种吸能机理。Alexander 率先研究了金属圆柱管轴向压缩能量吸收分析模型^[47]。

渐进压溃式吸能机理包括塑性变形、脆性断裂及二者组合3种破坏形式。然而,基于渐进压溃式机理的吸能结构,其力-变形特性存在很大的波动。因此,可通过削弱吸能构件横截面来消除压溃过程力的峰值,使得碰撞过程趋于平缓。

目前汽车防撞装置中应用的主要吸能材料有泡沫铝和吸能波纹管。它们在超高车辆撞击防护中都有一定的应用前景。复合材料具有重量轻强度高的优势,内部填充泡沫后吸能效果也很好。但是价格较高,加工和连接不便,暂时不适用于超高车辆撞击防护。

(3) 防护对策对比

船撞桥墩的防护装置目前研究较为广泛和深入,但是其防护装置普遍体积较大、成本较高,并且不易在桥身安装,因此对于本书的研究借鉴意义有限。

高速公路护栏主要防止车辆侧向撞击,吸能效果有限;此外,护栏对于低矮车辆的车身撞击有比较好的防护作用,主要用来防止汽车冲出车道。而本书中所要开发的防护装置为车厢局部对桥梁的正面撞击,主要防护目的为控制桥梁的动力响应和破坏程度。综上所述,高速公路护栏的防护装置对本书研究的参考意义也比较有限。

汽车的防撞系统有着轻质、高效的特点,对本书的研究有较好的参考价值。从汽车的防撞系统可对本书开发车桥防护装置有几点有益启示:

- ① 采用渐进压溃式吸能机理设计的防护装置效率高成本小;
- ② 轴向冲击作用下应保证一定的变形吸能长度;
- ③ 应该具有一定侧向约束,以保证在偏向撞击时的防护性能;
- ④ 设置多重防护结构层次,使碰撞过程分成几个阶段,可以控制碰撞力峰值。

1.3 研究内容

本书的主要内容包括:

- (1) 撞击试验研究;
- (2) 车桥撞击的材料模型和有限元模型;
- (3) 撞击的有限元模拟及桥梁破坏机理分析;
- (4) 撞击过程的简化计算方法和工程设计方法;
- (5) 桥梁上部结构防护装置。

下面几章分别针对以上内容进行详细叙述。

2 撞击模型试验研究

2.1 试验设计

为研究超高车辆撞击桥梁上部结构的作用过程和破坏机制,检验数值模型的正确性和合理性,本课题首先对超高车辆撞击桥梁上部结构进行了模型试验研究。

试验的顺利进行需要合理全面的试验设计。本节将详细介绍本课题碰撞试验的试验设计方案,包括试验总体设计、试验模型设计及数据采集方案等。

2.1.1 试验总体设计

试验研究以足尺模型试验最为准确,但是成本太高,往往车毁桥伤。缩尺试验则具有较大的可行性。车桥碰撞方面的试验研究,国内目前基本还是空白,但与车桥碰撞类似的船桥碰撞试验已有不少研究^[18,19]。本小节将根据相关文献[48~53]的研究,对碰撞试验进行总体设计。碰撞试验总体设计主要包括两部分:试验对象的选取和模型相似比计算。

试验模型主要包括两部分:桥梁上部结构模型和超高车辆模型。根据本课题文献[48~50]的研究,被撞击的桥梁自重越轻,则撞击的后果可能就越严重。因此,本课题试验选择自重较轻、抗撞击能力较弱的单跨钢箱梁桥、钢板梁桥、钢筋混凝土T梁桥及FRP梁桥作为研究对象,根据现行桥梁规范^[9,16,54]设计原型桥梁,并根据试验室场地条件进行缩比。同时,本课题文献[48~51,53]对不同车型撞击破坏能力大小的对比研究表明,一般说来,同样重量和速度情况下,罐车撞击造成的破坏最为严重。因此,本研究根据桥梁模型比例及文献[49,50]中提供的车辆资料,选择20t的中型油罐车作为超高车原型,并按照与桥梁模型同样相似比进行缩比。相关的相似比计算具体见表2.1。

主要相似比计算

表 2.1

	物理量	量纲	相似系数
材料特性	应力 σ	FL^{-2}	1.0
	应变 ϵ	—	1.0
	弹性模量 E	FL^{-2}	1.0
	泊松比 μ	—	1.0
	密度 ρ	$FL^{-4}T^2$	1.0
几何形状	尺寸 l	L	0.2
	位移 δ	L	0.2
载荷	力 F	F	0.04
动力特性	时间 t	T	0.2
	速度 V	LT^{-1}	1.0