

陆新征 许 镇 黄盛楠 著

基于计算机辅助的 桥梁倒塌事故分析



清华大学出版社

陆新征 许 镇 黄盛楠 著

基于计算机辅助的 桥梁倒塌事故分析

清华大学出版社

U447/02

内 容 简 介

桥梁是交通生命线的咽喉工程。然而,近些年来国内外桥梁倒塌事故屡见不鲜。桥梁倒塌不仅会造成交通阻断,产生巨大的经济损失,而且还会危及人民生命安全,带来严重的社会负面效应。

为科学、高效地分析桥梁倒塌事故的原因,本书提供了一套基于计算机辅助的技术方案。一方面,通过建立精细化的有限元模型,识别了桥梁倒塌的关键区域,并实现了桥梁倒塌过程的全过程模拟,揭示了事故的内在力学机理;另一方面,通过虚拟现实技术,建立具有真实感的桥梁倒塌现场的三维场景,并基于有限元分析结果再现了桥梁倒塌过程,为辅助事故调查提供了有力支持。此外,本书还提供了多个桥梁倒塌分析的算例,可供读者更好地掌握书中的技术内容。

本书可供广大桥梁专业人员及科研人员、研究生在桥梁事故分析、桥梁倒塌模拟中使用,也为桥梁的安全设计提供参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于计算机辅助的桥梁倒塌事故分析/陆新征,许镇,黄盛楠著. --北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-38725-1

I. ①基… II. ①陆… ②许… ③黄… III. ①桥—倒塌—事故分析—计算机辅助分析 IV. ①U447-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 285473 号

责任编辑:周莉桦

封面设计:陈国熙

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫丰华彩印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:14.5

字 数:348千字

版 次:2015年2月第1版

印 次:2015年2月第1次印刷

定 价:58.00元

产品编号:055786-01



国内外近年来发生大量桥梁倒塌事故,造成严重的人员伤亡和社会经济财产损失。科学、规范、准确地调查桥梁倒塌事故原因,认定事故责任,消除安全隐患,对国家建设、经济运行、社会安定具有非常重要的意义,应当得到充分的重视和研究。

然而,实际桥梁结构倒塌的严重事故,势必是多种不确定因素共同作用的结果。一方面,一些影响因素存在着较大的离散性和不确定性,需要大量的、反复的、独立的对比分析,确定其敏感度;另一方面,一些重要数据和信息会因为结构的彻底破坏而灭失,需要重现事故发生过程,分析结构残骸来推断。因此,桥梁倒塌事故调查必须依赖计算机模拟。

为此,本书提出了一套基于计算机辅助的桥梁倒塌事故分析方法。基于有限元模拟技术,提出了桥梁结构易损性评价方法和倒塌全过程模拟方法,对石拱桥、钢筋混凝土拱桥、斜拉桥等倒塌算例进行了分析。并且,提出了基于物理引擎的桥梁倒塌中碎块模拟方法,以及基于 GPU(图形处理器)的场景高性能渲染技术,具有真实感地还原了桥梁倒塌的全过程,为辅助事故调查提供了技术支持。

本书第 1 章由陆新征、许镇和黄盛楠共同完成,第 2~5 章由黄盛楠和陆新征共同完成,第 6~9 章由许镇和陆新征共同完成。全书最后由陆新征负责整理。

此外,特别感谢交通运输部交通运输建设重大科技专项(2011-318-223-170),国家自然科学基金(编号:51308321,51222804,91315301)对本书所涉及的科研工作的支持。

由于作者水平所限,疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2014 年 12 月

于清华园

第 1 章 桥梁倒塌事故分析概述	1
1.1 国内外的桥梁倒塌事故	1
1.1.1 国内桥梁倒塌事故	1
1.1.2 国外桥梁倒塌事故	7
1.2 基于计算机辅助工程的事故分析思路	9
参考文献	11
第 2 章 结构易损性分析方法	13
2.1 现有重要性评价指标综述	13
2.1.1 与荷载作用无关的评价方法	14
2.1.2 与荷载作用相关的评价方法	15
2.1.3 结构构件重要性评价方法的要求	16
2.2 结构重要性评价的概念与经验	16
2.2.1 基本概念	16
2.2.2 工程经验	17
2.3 广义结构刚度	17
2.4 基于结构广义刚度的重要性指标	18
2.4.1 构件的重要性确定	18
2.4.2 子结构的重要性指标	19
2.4.3 节点的重要性确定	19
2.5 结构冗余度指标及结构整体属性指标	19
2.5.1 结构冗余度指标	19
2.5.2 结构其他整体属性指标	20
2.6 重要性评价算例	21
2.6.1 重力荷载下的构件重要层次与整体结构属性	22
2.6.2 水平荷载下的构件重要层次与整体结构属性	25
2.7 拆除构件法与刚度折减法的关系	27
2.7.1 算例参数	27
2.7.2 重要性指标变换公式的建议	28
2.8 小结	30
参考文献	31

第3章 石拱桥事故倒塌模拟和易损性分析	32
3.1 拱桥结构的易损点分析	32
3.1.1 石拱桥	32
3.1.2 上承式混凝土拱桥	32
3.1.3 中承式混凝土拱桥	33
3.1.4 系杆(下承式)混凝土拱桥	33
3.2 石拱桥倒塌数值模拟方法	33
3.2.1 背景资料	33
3.2.2 有限元模型的建立	34
3.2.3 材料参数取值	35
3.2.4 接触算法	35
3.2.5 倒塌分析工况	36
3.2.6 单元失效准则	36
3.2.7 某倒塌桥梁的2D倒塌模拟	37
3.2.8 某倒塌桥梁的3D倒塌过程模拟	38
3.2.9 三跨石拱桥倒塌模拟	40
3.2.10 倒塌仿真结果的讨论	41
3.3 石拱桥的构件重要性分析	41
3.3.1 重要性评价的主要步骤	42
3.3.2 三跨石拱桥的重要性评价	42
3.3.3 三跨石拱桥关键区域合理性验证	43
3.3.4 某倒塌桥梁重要性评价	44
3.3.5 某倒塌桥梁关键区域合理性验证	44
3.4 施工阶段某倒塌桥梁的重要性评价和临时工程的安全性研究	46
3.4.1 施工阶段某倒塌桥梁的重要性评价	46
3.4.2 临时支撑体系的重要性评价及安全性研究	48
参考文献	51
第4章 钢筋混凝土拱桥超载倒塌模拟及易损性分析	52
4.1 钢筋混凝土桥数值模拟方法	52
4.1.1 分层壳单元模块	52
4.1.2 单元生死模块	53
4.1.3 数值模型的验证	53
4.2 某工程情况模拟	64
4.2.1 基本工程概况	64
4.2.2 双重车过桥模拟	64
4.2.3 超载倒塌过程模拟	67
4.2.4 构件重要性评价	69

4.2.5	关键区域合理性验证	70
4.3	某钢筋混凝土拱桥因超载导致的倒塌模拟及重要性评价	71
4.3.1	基本工程概况	71
4.3.2	有限元模型	72
4.3.3	倒塌过程模拟	73
4.3.4	倒塌仿真模拟过程的讨论	75
4.3.5	构件重要性评价	76
4.3.6	关键区域合理性验证	77
第5章	斜拉桥地震倒塌过程模拟和易损性分析	80
5.1	某大跨单塔斜拉桥地震易损性分析	80
5.1.1	工程概况	80
5.1.2	桥梁结构有限元分析模型	80
5.1.3	地震作用下桥梁结构倒塌模拟	81
5.1.4	缆索结构构件重要性分析	81
5.1.5	缆索结构关键区域合理性验证	82
5.1.6	地震作用下桥梁结构的构件重要性评价	83
5.2	某超大跨三塔斜拉桥地震易损性分析	85
5.2.1	工程概况	85
5.2.2	斜拉桥模型简化	87
5.2.3	桥梁结构有限元分析模型	88
5.2.4	模态分析	88
5.2.5	地震作用下的倒塌过程模拟	100
5.2.6	缆索结构构件重要性分析	102
5.2.7	缆索结构关键区域合理性验证	104
5.2.8	全桥的构件重要性分析	109
	参考文献	111
第6章	真实感的桥梁倒塌场景模拟	112
6.1	桥梁倒塌有限元模拟的数据特点	112
6.2	基于有限元数据的桥梁场景建模	114
6.2.1	图形平台的选择	114
6.2.2	桥梁模型场景层次设计	114
6.2.3	场景模型绘制方法	117
6.2.4	桥梁相关的虚拟环境建模	119
6.3	桥梁场景模型的纹理映射	121
6.3.1	基于多重纹理的映射方法设计	121
6.3.2	OSG 环境下的纹理映射实现算法	123
6.4	桥梁倒塌动画机制设计	125

6.4.1	桥梁倒塌动画概述	125
6.4.2	顶点数据渲染模式研究	126
6.4.3	基于回调的倒塌动画机制	127
6.5	桥梁倒塌动画实现算法设计	129
6.5.1	基于位移数据的顶点动态更新	129
6.5.2	“生死单元”的动态隐藏处理	131
6.5.3	动画控制与实现	134
6.6	应用算例	136
	参考文献	139
第7章	桥梁倒塌过程中的碎块模拟	140
7.1	桥梁倒塌特效概述	140
7.1.1	倒塌特效问题	140
7.1.2	倒塌特效的技术路线	141
7.2	倒塌特效模拟机制设计	143
7.2.1	OSG 与 PhysX 的结合	143
7.2.2	结合特效的桥梁倒塌模拟机制	145
7.3	倒塌特效模拟的关键技术	148
7.3.1	OSG 与 PhysX 的协同工作	148
7.3.2	倒塌碎块建模	148
7.3.3	烟尘特效算法设计	154
7.4	倒塌模拟算例	157
	参考文献	159
第8章	桥梁倒塌场景模拟的渲染优化	160
8.1	桥梁倒塌场景模拟的渲染瓶颈	160
8.2	基于 CUDA 的渲染加速架构设计	163
8.2.1	CUDA 平台的特性分析	163
8.2.2	渲染加速架构设计	164
8.3	并行化的倒塌场景模拟渲染加速	166
8.3.1	OSG 与 CUDA 的结合	166
8.3.2	CUDA 线程结构与并行性能讨论	166
8.3.3	顶点位移动画加速算法设计	169
8.3.4	单元消隐动画加速算法设计	172
8.3.5	基于 GPU 内存的数据访问优化	175
8.4	渲染加速效果测试	179
8.4.1	初步渲染加速结果	179
8.4.2	二次渲染加速	181
8.4.3	最终渲染加速结果	183

8.5 GPU 内存约束问题概述	184
8.5.1 问题的提出	184
8.5.2 整体解决思路	185
8.6 基于聚类法的关键帧提取算法	186
8.6.1 关键帧提取方法选择	186
8.6.2 基于聚类的关键帧提取算法	187
8.7 基于 CUDA 的实时帧插值算法	190
8.7.1 动画帧插值方法比较	190
8.7.2 B 样条的大规模数据插值问题	191
8.7.3 基于 CUDA 的大规模数据高效插值算法	192
8.7.4 提取与插值的配合机制	196
8.8 算例测试与分析	197
8.8.1 桥梁倒塌典型运动分析	197
8.8.2 关键帧提取算法测试	197
8.8.3 帧插值算法测试	199
参考文献	201
第 9 章 桥梁倒塌虚拟现实系统及应用	203
9.1 系统需求分析	203
9.1.1 系统目标	203
9.1.2 系统功能需求	203
9.1.3 系统开发约束	205
9.2 系统设计	206
9.2.1 系统架构	206
9.2.2 系统模块设计	207
9.2.3 系统界面设计	208
9.3 立体感的桥梁倒塌演示	209
9.3.1 立体感显示技术综述	209
9.3.2 系统立体显示实现	210
9.4 石拱桥倒塌算例	211
9.4.1 石拱桥倒塌场景模拟效果	211
9.4.2 真实场景对照	213
9.4.3 桥梁倒塌事故辅助功能展示	215
9.5 钢筋混凝土桥倒塌算例	217
9.5.1 钢筋混凝土桥倒塌场景模拟效果	217
9.5.2 倒塌模拟性能评测	220
参考文献	220

桥梁倒塌事故分析概述

1.1 国内外的桥梁倒塌事故

1.1.1 国内桥梁倒塌事故

桥梁是公路的咽喉,安全、便捷、快速的公路交通运输系统是国民经济发展的命脉。自 20 世纪 70 年代以来,我国的交通建设进入了一个飞速发展的时期,加快了我国现代化建设的步伐。但是,由于各种原因,现行桥梁的使用状况令人担忧,各种桥梁事故屡屡发生,造成了严重的经济损失和人员伤亡。近几年来,已经发生了多起令人震惊的桥梁悲剧,给我们留下了沉痛的教训,桥梁的安全问题已经成为社会关注的重大的问题。

2001 年 11 月 7 日凌晨 4 点,从四川南部宜宾进入云南的咽喉要道宜宾南门大桥(长江大桥)发生悬索及桥面断裂事故(图 1-1(b)),桥两端同时塌陷,一辆公交大客车和一辆出租车掉入长江,造成 2 人死亡、2 人受伤,并造成交通及市外通信中断。



(a) 南门大桥原貌



(b) 南门大桥倒塌后

图 1-1 南门大桥原貌和倒塌后对比

南门大桥长 384m,宽 13m,为单孔跨径 240m 的钢筋混凝土中承式公路拱桥,桥面由 17 对钢缆吊杆凌空悬挂,于 1990 年 6 月竣工通车。南门大桥双向各一条机动车道和一条非机动车道,非机动车道外侧有不锈钢栏杆,栏杆外侧是人行步道。从图 1-1(b)中很明显看出,断裂部位皆位于拱圈和桥面的连接点,承重的拱圈上垂下 17 对吊杆牵引桥面,已有 4 对与桥面分离,其中北侧的一对已不知去向,而南侧有三对孤零零吊在半空。脱离了吊杆的桥面上无牵引、下无支撑,因此倒塌。

2004 年 9 月 7 日,成温邛公路金马河上的三渡水大桥新桥部分一侧突然下陷,如图 1-2 所示,约 50m 长的桥面在半个小时内下沉了 0.5m,两个巨大桥墩明显倾斜,整座桥岌岌可危。随后,新桥和旧桥的第三、四、五跨桥面相继倒塌,掉进金马河中。

成都三渡水大桥是一座全长 550m 的双曲混凝土拱桥,由 15 孔组成,桥宽 26.5m,在成温邛高速公路修好前是成温邛公路的唯一通道,交通量非常大。该桥最早建于 1967 年,当时只有两个车道。1993 年,又在旁边修了一座新桥,两座桥合并成了现在的三渡水大桥。图 1-2 为三渡水大桥倒塌事故的照片。

2005 年 11 月 5 日 13 时,务川县务彭(务川至重庆彭水)公路上正在施工的珍珠大桥悬拼钢拱架突然发生倒塌,19 名现场施工人员落入河谷,造成 2 名施工人员当场死亡、3 人重伤、14 人失踪,事故发生后只有桥头的塔吊未倒,整个桥坠入河中(图 1-3)。



图 1-2 三渡水大桥倒塌



图 1-3 珍珠大桥倒塌遗址

2006 年 5 月 16 日,位于甘肃岷县的甘肃省省道 306 线北门洮河大桥突然全部倒塌(图 1-4)。事故造成了省道 306 线岷县境内交通中断,两辆农用车辆落水损坏,4 名群众落水受伤。洮河大桥建于 1974 年 7 月,桥面宽 8m,桥长 206.5m,设计荷载 10t,为双曲石拱桥。据目击者称,大桥倒塌前 1min,一辆载重 35t 的货车经过大桥。

2006 年 11 月 25 日凌晨,316 国道陕西省白河县境内冷水河大桥在没有车辆行驶的情况下突然倒塌(图 1-5),致使 316 国道交通中断。冷水河大桥全长 122m,桥高约 30m,宽 7m,为混凝土双曲拱桥,跨径为 20m+80m,于 1985 年 6 月建成通车,倒塌的部分是 80m 处的一跨。



图 1-4 洮河大桥倒塌现场

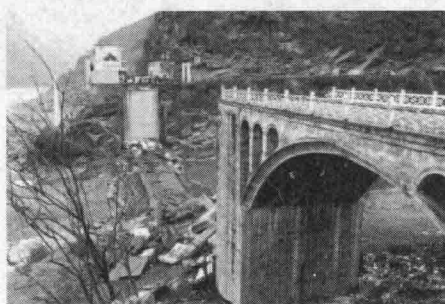


图 1-5 冷水河大桥倒塌现场

2007 年 5 月 13 日凌晨 5 时,位于江苏省常州漕桥附近的运村大桥,西半幅突然坍塌(图 1-6),幸好未发生车辆、行人、船只损伤的事故。

常州运村大桥为下承式系杆拱桥,跨度约为 55m,分为东、西两幅,单幅桥宽 12m,桥梁设计荷载为标准车 20t,挂车为 100t。现在西幅桥面已经完全坍塌,而东幅桥面完好无损。

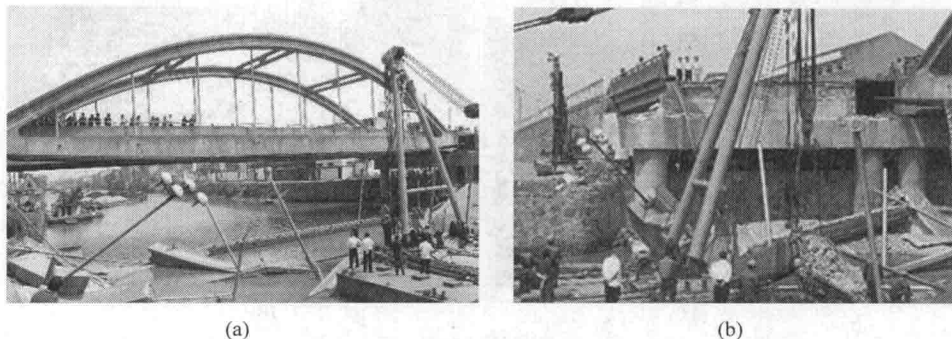


图 1-6 常州大运村桥倒塌

2007年6月15日凌晨5时10分,一艘佛山籍运沙船行驶至九江大桥偏离主航道航行而撞击九江大桥,导致桥面发生坍塌,桥面坍塌约200m(图1-7)。



图 1-7 九江大桥事故

广东九江大桥是325国道上的一座特大型桥梁,位于广东省佛山市南海区九江镇与鹤山市之间,跨越珠江水系西江主干流,是广湛公路上一座特大型公路桥梁,全长1675.2m,采用塔、梁、墩固结体系,桥面净宽16m,其中:主桥由两孔160m独塔混凝土斜拉桥与21孔50m连续箱梁组成,全长1370m,引桥由20孔16m先张法预应力混凝土空心板组成,全长320m,塔高80m(自桥面起)。于1985年9月开工,1988年6月正式建成通车。船撞桥事故发生后,斜插入江的那截桥面已于2008年8月拆除,于2009年6月10日恢复通车。

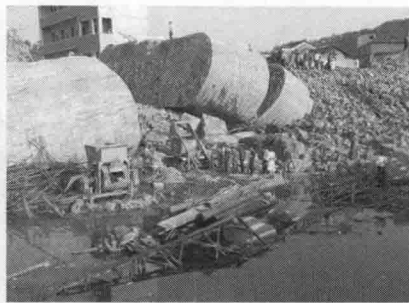
2007年8月13日,湖南省湘西土家族苗族自治州凤凰县在建的凤凰堤溪大桥在拆除拱圈支架时,瞬间发生坍塌(图1-8),造成了64人死亡,22人受伤,直接经济损失3974.7万元。凤凰堤溪大桥为4跨连拱桥,每跨65m,全长328.45m,高42m,横跨沱江。从事故的现场来看,原本高42m的大桥只剩下两端的桥台,大桥桥墩断成几段倒在沱江峡谷中,石拱圈已经完全粉碎。

2007年8月29日12时45分左右,在江苏省昆山市大洋桥水域,一艘货船因避让船只,撞上大洋桥桥墩,致使大桥部分桥面发生坍塌(图1-9),船上一男子腿部被砸伤,另有2人落水失踪。

2009年5月17日,湖南株洲红旗广场莲易高架桥在拆除过程中发生坍塌(图1-10),断裂的桥面砸向正在桥下行驶的22辆汽车,致9死16伤。



(a)



(b)

图 1-8 凤凰堤溪大桥倒塌现场



图 1-9 昆山大洋桥事故



(a)



(b)

图 1-10 红旗广场莲易高架桥倒塌现场

2009年6月29日,位于伊哈公路123km处的黑龙江铁力市呼兰河大桥倒塌(图1-11),造成8辆车坠入河中,4人死亡。呼兰河大桥建于1973年,桥长187.7m,桥宽15m,是6孔双幅桥。由于桥龄较长、加之连日大雨,河水冲刷桥体加重,被重车压塌该桥其中1幅的中间4孔段,坍塌的桥梁长约120m、宽7.5m。呼兰河大桥的使用寿命为30年,限重30t。呼兰河大桥在2006年被定为危桥,2007年曾进行安全维修。

2009年7月15日凌晨,津晋高速公路港塘收费站800m处匝道桥坍塌(图1-12),5辆货车坠落,造成6人死亡、4人受伤。港塘互通立交桥A匝道桥设计载荷为汽车55t、挂车120t。事故发生时,第一辆装载电石的货车总重量53.98t,自津晋高速公路港塘收费站驶上A匝道;随后是第二辆和第三辆载重货车,总重量分别为140.22t和142.28t;第四辆载

重货车总重量 146.72t,这三辆车从天津港散货物流公司装车后驶往河北省方向。车辆绕行津晋高速公路延长线,行至港塘收费站约 100m 处掉头转向互通立交桥 A 匝道桥上;第五辆车从港塘收费站驶上 A 匝道,自重 19.26t。第一辆和第五辆为不超载车辆,其余 3 辆为严重超载车辆。5 辆车行至 A 匝道桥上时,前方一辆货车逆行,为避让此车,包括 3 辆严重超载货车的顺行车辆在单行道 7.5m 宽 A 匝道桥上靠右密集停车,并偏离行车道,车辆外轮距右侧护栏内缘小于 1m,从而形成巨大偏载,导致桥梁梁体向右侧倾斜而引起桥梁倒塌。



图 1-11 呼兰河大桥倒塌现场



图 1-12 津晋高速公路匝道桥事故

2010 年 8 月 19 日 15 时 15 分,水害致宝成铁路德阳至广汉间石亭江大桥倾斜。K165 次旅客列车司机发现险情后,紧急停车,车上约 1300 名旅客撤往安全地带。几分钟后,桥墩倒塌,两节车厢掉入河中(图 1-13)。经确认,没有发生人员伤亡。

2011 年 2 月 21 日凌晨,浙江省上虞市境内的春晖立交桥发生引桥坍塌,坍塌总长度 120m,最高落差 7m(图 1-14)。事故造成引桥上 4 辆货车侧翻,3 人轻伤。



图 1-13 宝成铁路德阳至广汉间石亭江大桥事故



图 1-14 浙江上虞桥事故

2011 年 7 月 19 日,一辆重达 160t 的严重超载沙石 6 轴货车(车长 14m、宽 2.5m、高 2.2m),通过北京怀柔区宝山寺白河桥第一孔时,发生桥梁坍塌,4 孔全部坍塌(图 1-15),所幸事故没有造成人员伤亡。该桥梁上部为 4 孔净跨 50m 的钢筋混凝土刚架拱,矢跨比 1/10,下部结构为实体墩台,嵌岩桩基础。该桥始建 1987 年,2006 年上部结构加固,经检测为二类桥梁,设计荷载为汽车—20 级(6 轴货车车货总重不超过 55t),事故原因为严重超载。

2012 年 8 月 24 日 5 时 32 分,哈尔滨三环路高架桥洪湖路上桥匝道处(距阳明滩大桥



图 1-15 白河桥事故

3.5km),有4辆满载石料和饲料的重载货车行驶在匝道桥外侧时,造成连续钢筋混凝土叠合梁侧滑,4辆重载货车侧翻(图1-16),当场造成2人死亡、6人受伤、1名伤者被送到医院后经抢救无效死亡。经调查,事故直接原因是货车超载,货车司机驾驶改变了机动车外形和技术数据的严重超载车辆,在121.96m的长梁体范围内同时集中靠右侧行驶,造成匝道钢筋混凝土连续叠合梁一侧偏载受力严重超载荷,而导致匝道倾覆。



图 1-16 哈尔滨三环路高架匝道桥事故

2013年2月1日上午9时,连霍高速洛三段南半幅741+900M处义昌大桥,由于运输烟花爆竹车辆爆炸引起桥面倒塌,造成车辆坠落和多人伤亡(图1-17)。



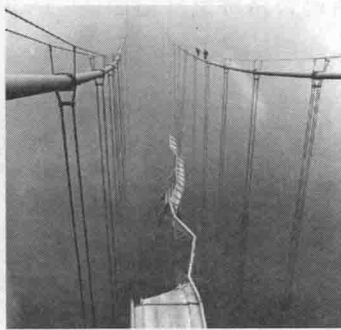
图 1-17 义昌大桥事故

1.1.2 国外桥梁倒塌事故

1940年11月7日,著名的塔科马海峡大桥因风振致毁,该事故是桥梁在风荷载作用下破坏的典型例子。塔科马海峡大桥位于美国华盛顿州,是一座全长1810.56m、主跨长853.4m、桥宽11.9m、而梁高仅1.3m的大跨度悬索桥,于1940年7月1日建成通车。塔科马海峡大桥的破坏是由于当时人们对柔性结构在风作用下的动力响应的认识还不深入,该桥的加劲梁形式极不合理,采用的是板式钢梁,导致在19m/s的中等风速下结构就发生破坏。不仅桥体在风荷载作用下遭受破坏,甚至斜拉索在风的作用下大幅度摆动最终失效破坏(图1-18)。



(a) 塔科马海峡大桥整体破坏



(b) 塔科马海峡大桥锁的破坏

图 1-18 塔科马海峡大桥整体破坏

1994年10月21日早上,在车流量高峰时刻,位于韩国首尔汉江上的圣水大桥第五根与第六根桥柱间的48m长混凝土桥板整体塌落入水(图1-19),6辆汽车中包括一辆载满学生及上班族的巴士和一辆载满警员的面包车跌进汉江,导致33人死亡、17人受伤。圣水大桥,全长1160m,最初于1979年建成,大桥坍塌的直接原因是:承建大桥工程的东亚建设公司没有按设计图纸施工,而且在施工中又偷工减料。



图 1-19 圣水大桥事故



图 1-20 银桥事故

1967年12月15日,正值下班高峰期,位于美国俄亥俄河上的银桥在一分钟内就彻底倒塌了(图1-20),直接导致50余辆汽车坠入俄亥俄河中,46人丧生。银桥连接着俄亥俄州

与西弗吉尼亚州,采用了“眼杆”型设计方案。这里所说的“眼杆”型,就是把桥设计成自行车链条的样式,中间交织连接并固定在支撑塔上,而两端则被牢牢钉死在两个桥台上。该事故的原因是“眼杆”的疲劳破坏。

2006年12月28日,印度西部中央直辖区达曼的一座桥梁突然坍塌(图1-21),致使行驶在桥上的机动车和行人坠入河中,造成至少24人死亡,其中包括21名学生。另有25人受伤、8人失踪。据当地警方透露,桥梁坍塌的时候,一辆满载学生的班车与另外10辆机动车同时坠入河中。据调查,这座长325m的百年老桥是因为年久失修和突降暴雨而坍塌并导致坠车事故的。

2007年4月29日,在美国加利福尼亚通往奥克兰的高速公路上,一辆油罐起火爆炸,导致一座高速公路桥意外坍塌(图1-22)。



图 1-21 印度西部中央直辖区达曼的桥梁事故

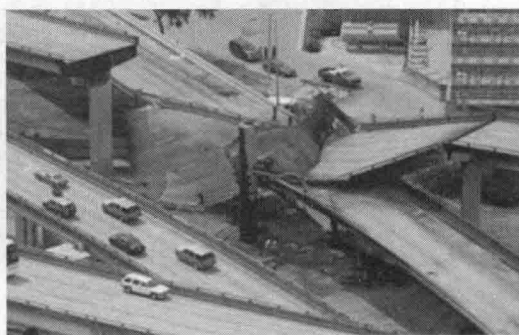


图 1-22 美国高速公路桥事故

2007年8月1日傍晚,美国中部城市明尼阿波利斯市发生一起桥梁坍塌事故。多辆汽车掉入密西西比河中,7人死,60人伤(图1-23、图1-24)。当地市长哀叹“这是悲剧性的一晚”。事故发生后,美国政府组织了相关人员对事故原因进行了专门分析。美国相关部门通过三维激光扫描仪获得事故的现场影像资料,在监测录像和事故检测的基础上,进行有限元建模分析(图1-25),并根据影像资料和检测资料修正有限元模型,通过虚拟现实技术,很好解释和再现了桥梁倒塌的过程(图1-26)。



(a)



(b)

图 1-23 美国明尼阿波利斯市桥梁事故