

内爆作用下钢筋混凝土框架结构 及承重件的毁伤与评估

Damage response and evaluation of reinforced concrete frame and
supporting parts under internal blast loading

陶俊林 李 丹 著
刘 彤 贾 彬



科学出版社

内爆作用下钢筋混凝土框架 结构及承重件的毁伤与评估

陶俊林 李 丹 著
刘 彤 贾 彬

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

除煤气管(罐)、化学药品偶然发生爆炸外,恐怖袭击和战争条件下,也存在不少的爆炸隐患。因此,现代建筑结构的安全设计,除考虑包括自重在内的静载作用、风和地震等的振动荷载作用外,还需要考虑爆炸荷载的作用。

本书介绍了在建筑内部发生爆炸的情况下,钢筋混凝土框架结构承重件的毁伤与评估。本书以梁、柱、板承重件及承重框架结构为研究对象,以实验研究为主要研究方法,研究钢筋混凝土框架结构及承重件在内爆作用下的毁伤形态、毁伤程度、毁伤模式及爆毁后的毁伤与评估。

本书可供从事爆炸力学、结构工程、爆破拆除及结构抗爆防爆性能与设计等方面的研究人员参考,也可供相关学科研究生和高年级本科生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

内爆作用下钢筋混凝土框架结构及承重件的毁伤与评估 / 陶俊林等著.
— 北京: 科学出版社, 2017.4
ISBN 978-7-03-050850-8

I. ①内… II. ①陶… III. ①钢筋混凝土框架-框架结构-抗爆性-研究 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 281911 号

责任编辑: 张 展 华宗琪 / 责任校对: 葛茂香

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年4月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年4月第一次印刷 印张: 10 3/4 插页: 8 面

字数: 220 千字

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自 2001 年“9·11”事件发生后,众多研究人员将研究重点转向与此相关的研究,即将爆炸力学、冲击动力学与土木工程紧密地结合起来,在爆炸冲击荷载下土木工程建筑材料、构件与结构的瞬态力学行为方面开展了坚持不懈的研究。

本书获得国防科工局国防基础科研项目—— $\times\times\times$ 研究(B3120110004)、国家自然科学基金项目——混凝土在冲击载荷作用下的破坏准则与破坏机理(10972187)和无筋混凝土材料高温动态力学性能测试技术研究(10602048)等课题的资助,在此表示真诚的感谢。

本书相关内容的研究得到中国工程物理研究院总体工程研究所陈裕泽研究员的悉心指导,以及西南科技大学土木工程与建筑学院王汝恒和姚勇教授的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书相关研究内容的完成除陶俊林、李丹、刘彤、贾彬、刘筱玲 5 位作者的共同努力工作外,还有彭芸、富裕、朱国权等老师及朱晓伟、文祝、孙坤林、李家辉、黄晓莹、梁培、刘晨、李江涛、胡正东、陈波等研究生和本科生的辛勤工作,在此表示衷心的感谢。

本书共有 7 章,其中陶俊林教授负责第 1 章和第 7 章的撰写,李丹副教授负责第 2 章、第 3 章和第 4 章的撰写,刘彤教授和贾彬教授负责第 5 章的撰写,刘筱玲副教授负责第 6 章的撰写。全书的统稿和修改工作由陶俊林教授和李丹副教授负责。本书的前言、内容简介等其他工作由陶俊林教授负责。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请各位专家同行批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状分析	3
1.2.1 钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析	3
1.2.2 钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析	4
1.2.3 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析	4
1.2.4 钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析	5
1.2.5 钢筋混凝土构件及结构在爆炸与冲击荷载作用下毁伤评估的研究现状分析	7
1.3 本书的主要内容	8
参考文献	8
第2章 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的毁伤模式研究	12
2.1 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁缩尺模型试验研究	14
2.1.1 模型设计及制作	14
2.1.2 模型试验方案	16
2.1.3 钢筋混凝土梁结构模型爆炸试验	20
2.2 钢筋混凝土梁结构模型爆炸毁伤效应分析	28
2.2.1 不同爆点位置下钢筋混凝土梁模型的毁伤模式分析	28
2.2.2 爆炸距离对毁伤模式的影响	33
2.3 钢筋混凝土梁结构模型的剩余承载力研究	34
2.3.1 方案设计与制作	34
2.3.2 试验过程及结果分析	39
2.4 本章小结	47
参考文献	48
第3章 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的毁伤模式研究	49
3.1 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱缩尺模型试验研究	50
3.1.1 模型设计与制作	50
3.1.2 试验方案	51

3.1.3 钢筋混凝土柱结构模型爆炸试验	54
3.2 钢筋混凝土柱结构模型爆炸毁伤效应分析	59
3.3 钢筋混凝土柱结构模型的剩余承载力研究	61
3.3.1 试验方案设计	61
3.3.2 毁伤模式分析	63
3.3.3 爆后钢筋混凝土柱的剩余承载力及位移分析	64
3.4 本章小结	66
参考文献	66
第4章 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的毁伤模式研究	68
4.1 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的毁伤试验研究	70
4.1.1 模型设计及制作	70
4.1.2 试验方案	74
4.1.3 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板构件爆炸试验	77
4.2 钢筋混凝土板结构模型爆炸毁伤效应分析	85
4.2.1 钢筋混凝土板的毁伤模式	85
4.2.2 钢筋混凝土板破坏简化模型	90
4.2.3 超声波损伤检测	91
4.3 钢筋混凝土板结构模型的剩余承载力研究	94
4.3.1 试验方案设计	94
4.3.2 试验结果及分析	96
4.4 本章小结	98
参考文献	99
第5章 钢筋混凝土框架结构内部爆炸毁伤效应研究	101
5.1 钢筋混凝土框架结构内部爆炸试验研究	102
5.1.1 模型概况	102
5.1.2 试验方案	103
5.1.3 钢筋混凝土框架结构内部爆炸试验	107
5.2 框架结构内部爆炸数值模拟研究	125
5.2.1 数值模拟材料参数选取及计算模型的建立	125
5.2.2 数值研究结果与爆炸试验的对比验证	127
5.2.3 框架结构在内部爆炸荷载下的动力响应研究	129
5.3 框架结构内部爆炸毁伤效应影响因素分析	131
5.3.1 炸药药量影响	131
5.3.2 爆点位置影响	133
5.3.3 填充墙及其门窗洞口影响	136

5.4 本章小结	138
参考文献	139
第6章 爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件毁伤评估方法	140
6.1 爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件的毁伤模式	140
6.1.1 钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的毁伤模式	140
6.1.2 钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的毁伤模式	141
6.1.3 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的毁伤模式	141
6.2 钢筋混凝土构件毁伤评估指标	142
6.2.1 混凝土构件的损伤评估区间及等级划分	143
6.2.2 钢筋混凝土结构及构件毁伤指标的确定	147
6.3 爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件毁伤评估的神经网络 BP 算法	156
6.3.1 混凝土板的剩余承载力计算	157
6.3.2 混凝土梁的剩余承载力计算	157
6.3.3 混凝土框架的剩余承载力计算	158
6.4 本章小结	158
参考文献	159
第7章 总结和展望	160
7.1 总结	160
7.2 展望	160
彩色图版	163

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

钢筋混凝土框架结构是现代和当代最主要也是最基本的建筑结构形式,在民生、商业、工业、军事等领域得到广泛的应用,框架结构作为建筑的承重结构,钢筋混凝土梁、柱、板作为建筑的承重构件。建筑结构除承受包括自重在内的静载作用外,还经常受到风和地震等振动荷载的作用,偶尔还会承受撞击、爆炸等冲击荷载作用。

爆炸荷载虽然是偶然发生,但是却极易产生灾难性后果,如 2015 年 8 月 12 日,位于天津市滨海新区天津港的瑞海公司危险品仓库发生火灾爆炸事故,造成 165 人死亡、798 人受伤,304 幢建筑物、12428 辆商品汽车、7533 个集装箱受损。截至 2015 年 12 月 10 日,依据《企业职工伤亡事故经济损失统计标准》等标准和规定统计,已核定的直接经济损失达 68.66 亿元^[1]。2014 年 8 月 2 日,位于江苏省苏州市昆山市昆山经济技术开发区的昆山中荣金属制品有限公司抛光二车间发生特别重大铝粉尘爆炸事故,当天造成 75 人死亡、185 人受伤,依照《生产安全事故报告和调查处理条例》规定的事故发生后 30 日报告期,共有 97 人死亡、163 人受伤(事故报告期后,经全力抢救医治无效陆续死亡 49 人,尚有 95 名伤员在医院治疗,病情基本稳定),直接经济损失达 3.51 亿元^[2]。2014 年 9 月 22 日,湖南省株洲市醴陵市浦口南阳出口鞭炮烟花厂发生重大爆炸事故。2014 年 9 月 28 日,国家安全监管总局发布通报称,该事故共造成 14 人死亡、45 人受伤,事发生区内工库房全部被炸毁,相邻的醴陵市白兔潭镇先锋花炮厂多栋工库房严重受损,周边约 1200 户村民房屋因爆炸冲击波作用受损^[3]。2012 年 2 月 28 日,位于河北省石家庄市赵县工业园区生物产业园内的河北克尔化工有限公司生产硝酸胍的一号车间发生爆炸,造成 25 人死亡、4 人失踪、46 人受伤,整个车间被全部炸毁,北侧地面被炸成一个中心深度为 3.67m 的椭圆形爆坑,车间主体横梁被炸飞 116.6m,一车间西侧的 20m³ 半挂罐车,撞在二车间二层框架顶部后翻转坠下,北侧相邻 60m 的围墙被推倒。经计算,事故爆炸总量相当于 6.05t TNT^[4]。2000 年 9 月 8 日,一辆运载准备销毁的爆炸物品的车辆行至乌鲁木齐西郊的西山路段时发生爆炸,造成数百人伤亡,二十余辆汽车及附近房屋受损^[5]。

除意外产生爆炸荷载外,恐怖袭击及报复性犯罪也可能产生爆炸荷载,比较著名的有2001年的“9·11”事件和2015年11月13日发生在法国巴黎的系列枪击爆炸事件。几年来,国内与爆炸相关的恐怖袭击及报复性犯罪也时有发生,如2014年5月22日7时50分许,乌鲁木齐市沙依巴克区公园北街早市发生一起爆炸案,暴徒驾驶两辆车冲破防护隔离铁栏,冲撞碾压人群,引爆爆炸装置,造成人员伤亡^[6]。

虽然国际公约要求在战争中不对平民及民用建筑进行攻击,但是一旦发生战争,许多建筑特别是标志性的建筑都会成为攻击的目标,如2009年1月6日,以色列攻击巴基斯坦加沙地区的三所联合国建设的学校,使至少45人丧失生命。战争中,军用或军民两用的典型建筑(如核设施、军用住宿楼、办公楼、指挥中心,军工厂、电厂、通信中心、机场大楼等)是重点的攻击目标。现在的恐怖袭击对象也是人口集中区的宾馆、商场、办公楼等重要建筑,如“9·11”事件中的世贸大厦。

欧美等发达地区和国家已经对建筑规范做出了改进,对冲击荷载的破坏提出了相应的防护措施,如英国规范BS5950和BS8110规定对于多于5层的建筑,必须在横向和竖向设置拉结以增大结构的整体抗侧压性能^[7-9];由美国土木工程协会和美国国家标准委员会联合出版的民用建筑规范ASCE 7/ANSI A 58^[10]提出了直接设计方法和间接设计方法以抵抗冲击等偶然荷载;美国国家安全委员会2001年还出台了临时的防御系统设计标准DoD AD/FP^[11]。国外这些相关规范和标准给出的都是原则上的设计方法,对于具体建筑结构形式则需要具体分析。而我国现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)首次增加了偶然荷载,偶然荷载中炸药引起的爆炸荷载等效为均布静荷载的计算参考的是《人民防空地下室设计规范》(GB 50038—2005);偶然荷载中燃气爆炸引起的爆炸荷载等效为均布静荷载的计算参考的是欧洲规范《由撞击和爆炸引起的偶然作用》(EN1991),并且规定偶然荷载的设计原则与工程结构可靠性设计统一标准(GB 50153—2008)一致,认为是否考虑偶然荷载由设计人员根据经验决定,并非强制考虑^[12]。我国现行《建筑结构荷载规范》中并未强制考虑包括爆炸荷载在内的偶然荷载的原因有以下三个方面:一是还未引起足够的认识;二是考虑建筑成本;三是现有的研究基础还远未达到足以形成国家标准的程度,如结构在爆炸荷载作用下的力学响应能否(或者在什么条件下)与静载作用下进行等效,静载和爆炸荷载下的毁伤模式和机理是否能够等效,考虑偶然荷载应该考虑到什么程度才合适等诸多科学问题还未解决。

因此,研究建筑在爆炸荷载作用下的毁伤形态、毁伤程度、毁伤机理及维修加固具有十分重要的科学意义和工程实际意义。本研究就以当前最基本的钢筋混凝土框架结构作为研究对象,对爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架结构承重件的毁伤模式进行初步研究。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析

人们对钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的响应进行的研究主要集中在梁的毁伤模式和破坏过程方面。文献[13~16]较早地给出了钢筋混凝土结构在冲击爆炸荷载作用下的实验及初步的理论分析,这些成果表明钢筋混凝土结构在冲击爆炸荷载作用下的受力及破坏特性与通常受静载作用的情况有明显的不同,结构除常见的弯曲毁伤模式之外,在某些情况下还可能发生按弯曲破坏设计的结构构件却转变为脆性的剪切破坏,即剪切破坏先于弯曲破坏发生。围绕这些试验现象,许多学者开展了一系列研究。Krauthammer^[13]对爆炸荷载作用下的钢筋混凝土梁的弯曲毁伤模式提出了简化抗力模型,并应用等效单自由度体系进行结构动力响应分析,而对剪切毁伤模式也套用以弯曲毁伤模式为基础的等效单自由度分析方法。Krauthammer^[14]后来又对原先提出的等效单自由度分析方法进行修正,并提出一种经验的动力剪切抗力模型。Ross^[15]则求得了脉冲荷载作用下 Timoshenko 梁弹性动力响应的分析解,从理论上证明了在某些情况下剪切破坏可能先于弯曲破坏发生,但分析仅限于弹性结构。Ghabossi^[16]等应用有限元技术,对 OAMHEST 试验结果进行数值模拟。Krauthammer 等^[17,18]又以 Timoshenko 梁理论为基础,应用差分数值分析手段进行了爆炸荷载作用下的钢筋混凝土梁的动力响应和破坏分析。陈肇元^[19]也较早地提出了短作用时间爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的抗剪设计计算问题。方秦等^[20]考虑材料非线性和应变率效应,建立了以 Timoshenko 梁单元为基础的分层非线性动力有限元分析方法,柳锦春等^[21]则在此基础上考虑了横向箍筋的影响。由于结构受力的复杂性,在分析中做了一些假定(如梁的轴向变形与剪切变形不存在耦合作用等),在一定程度上影响了动力分析的精度。张亚栋^[22]基于弹黏塑性理论,建立了应变速率型 2D 混凝土结构非线性动态分析方法,较好地模拟了爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的弯曲破坏,但由于应变局部化处理上的困难,未能很好地反映结构的剪切破坏。陈力等^[23]应用 ABAQUS/Explicit 中特有的混凝土脆性开裂模型较好地模拟了钢筋混凝土结构在强动载作用下发生的弯曲破坏、弯剪破坏及直剪破坏等毁伤模式,但该模型没有体现混凝土材料受压破碎特点。张大禹^[24]通过理论和数值计算方法也对钢筋混凝土梁在爆炸作用下的响应与可靠性进行了研究,其研究重点是可靠性研究,在可靠性研究中引入了随机因素。

1.2.2 钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析

关于钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的力学特性的研究较少。陈肇元等^[25]对轴心受压柱和偏心受压柱进行了等变形快速加载和模拟爆炸荷载加载的实验研究,得出了在快速加载情况下,钢筋混凝土柱的极限承载力有明显提高而构件的毁伤模式、变形性能和指标值都与静载构件无明显差别的结论,但其文献中的快速加载与冲击和爆炸荷载作用下的加载速率还有较大的差别。Sun 等^[26]对钢骨钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的动力特性进行了分析,认为钢骨钢筋混凝土柱较普通混凝土柱在抵抗爆炸冲击荷载方面更具优势。Sheng 等^[27]则模拟了手提炸药爆炸对钢筋混凝土柱的破坏。Morrill 等^[28]对钢筋混凝土柱的抗爆加固问题进行了研究。师燕超等^[29]采用 LS-DYNA 软件,对钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的动态响应进行了数值模拟,研究了截面惯性矩、混凝土轴心抗压强度、纵筋配筋率和箍筋配筋率等参数对钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下动态响应特征和毁伤模式的影响。吴振涛^[30]通过数值计算研究了纵筋配筋率、箍筋间距和约束条件等对钢筋混凝土承重柱在爆炸冲击荷载作用下的动力响应的影响,但其文献中将混凝土和钢筋均考虑为塑性材料,且没有考虑混凝土的破坏失效。相对于梁的研究情况来看,柱方面的研究情况更加缺乏系统性。尽管梁和柱在结构形式上类似,梁的许多研究方法和结果可以移植到柱上来,但是尺寸、约束条件、配筋方式及钢筋和混凝土在梁和柱中各自承载作用的差别等,对它们在爆炸与冲击荷载作用下力学响应的影响还需要大量深入的研究。另外,从柱的破坏会给典型建筑造成更大危害来看,也需要加强对柱的研究。

1.2.3 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析

早在 1981~1982 年,美国军方就进行了一系列的作用于单向钢筋混凝土板的爆炸试验^[31,32]。Woodson 等^[33]开展了钢筋混凝土板的加劲肋对板的抗剪和抗拉性能的影响研究,研究中把爆炸荷载看作随时间变化的均布荷载,研究表明加劲肋对板的抗剪和抗拉性能的提高起到了良好作用。Ayaho 等^[34]分析了脉冲荷载作用下钢筋混凝土板的失效模式。Ross^[15]应用分层有限元方法分析钢筋混凝土板在持时较长的爆炸荷载作用下的破坏模态,并考虑了应变率和荷载形式的影响。Miyamoto 等^[35]运用三维失效准则和塑性理论对钢筋混凝土板在冲击荷载下的动力性能进行了数值分析,模型考虑了箍筋的抗剪能力,与试验结果分析比较后证明该模型能够很好地模拟板的极限状态、失效后性能和毁伤模式。

Krauthammer 等^[13,36]开展了钢筋混凝土构件在脉冲荷载作用下的反应机理研究, 基于 Timoshenko 梁理论研究了钢筋混凝土板和梁在瞬时荷载作用下的反应, 其中包括了应变率效应、荷载反向作用和结构转动机理的研究, 得出了完整的钢筋混凝土构件变形曲线、弯矩和内力分布等数据。Ettouney 等^[37]研究了一个 8 层的商业建筑的抗爆性能, 并针对楼板提出了 8 种可能产生的破坏形式, 同时提出了相应的改善方法, 对于结构的抗爆设计很有帮助。Crouch 等^[38]对钢筋混凝土板在远距离的爆炸荷载作用下的动力响应进行了分析。Duranovic^[39]对钢筋混凝土板在爆炸冲击下的建模问题做了具体的研究及说明。Low 等^[40]对钢筋混凝土板的抗剪和抗弯性能与各种因素的关系进行了进一步的分析, 研究结果表明, 在高强度、短持时的爆炸荷载作用下结构容易发生剪切破坏, 在低强度、长作用时间的爆炸荷载作用下容易发生弯曲破坏。阎石等^[41]运用 ABAQUS 软件分析了钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的毁伤模式, 结果表明, 在相同强度的脉冲压力作用下钢筋混凝土板会发生不同的毁伤模式, 随着峰值压力的增加和作用时间的减少, 毁伤模式逐渐由弯曲破坏转变为剪切破坏。董军、张想柏等^[42,43]研究了钢筋混凝土板接触爆炸时的震塌效应, 通过量纲分析, 建立了震塌厚度与装药量、混凝土板材料强度参数的关系。王明洋等^[44]则分析了钢筋混凝土板在低速冲击下的变形与破坏及其计算方法。Zineddin 等^[45]研究了混凝土板在冲击荷载下的动力响应和动力性能, 通过试验获得冲击力时程、加速度时程、钢筋应变时程和位移时程, 并分析了最大冲击力的影响因素。李天华^[46]利用理论分析和数值模拟方法对爆炸荷载下钢筋混凝土板的动态响应进行了研究, 分析了混凝土强度、钢筋屈服强度、板厚、边界等对板动态响应的影响, 但其数值计算分析时将爆炸荷载等效为均布三角形冲量荷载进行分析。这些研究对于认识钢筋混凝土板在爆炸和冲击作用下的力学响应非常重要, 但是还缺乏板材料、尺寸、边界等因素变化对力学响应影响的系统研究, 对破坏失效机理及破坏过程的数值模拟等方面的研究均还有较大的深入空间。

1.2.4 钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载作用下的力学特性研究现状分析

爆炸与冲击荷载作用下框架结构响应的研究根据框架的破坏情况可分为三类: 一是框架没有明显破坏; 二是框架柱或梁有局部破坏, 但没有使框架发生垮塌; 三是框架发生局部或连续垮塌。对于第一种情况, 研究框架结构的动力响应行为可直接参照研究地震作用下框架结构动力响应的方法进行。对于第二种情况, 多采用移去中柱的方式来模拟爆炸对框架的破坏^[47], 然后可采用第一种情况的分析方法。第三种情况是危害最严重也是研究得最多的情况, 其研究往往同防治倒塌, 特别是防治连续性倒塌的研究同时进行, 下面主要介绍这方面的研究

现状。

美国自“9·11”事件后,总务管理局(General Service Administration, GSA)和国防部(Department of Defense, DoD)分别于2003年6月和2005年1月颁布了各自的连续倒塌设计分析指南,建议各自所属的建筑物(包括新建建筑和既有建筑)应当进行连续倒塌分析,减少新建建筑发生连续倒塌的可能性,评估已建联邦建筑物发生连续倒塌的可能性并进行相应的必要加固^[48]。Hao和Wu等^[48]通过研究发现,DoD静力分析方法能够正确预测结构连续倒塌过程中的竖向位移,但GSA静力分析方法和DoD静力分析方法对结构连续倒塌过程中的应力和应变均给出了偏小的预测。他们提出了一种结构连续倒塌分析的DYN方法。此方法的优点是能够较为准确地模拟结构连续倒塌的整个过程,缺点是需要更长的分析时间和知道爆炸荷载的相关信息,要求分析人员对爆炸冲击波有较为详尽的了解。因此不太适合设计和工程技术人员使用。

对于框架结构在冲击爆炸荷载作用下的连续倒塌和抗倒塌分析主要是通过数值模拟方法来进行的(包括数值模拟程序的开发)。SAP2000是美国当前结构分析和地震分析的行业标准。Sasani等^[49]运用SAP2000预测分析了一栋10层钢筋混凝土建筑在首层一根外柱爆破(突然拆除)和一栋6层钢筋混凝土填充墙结构同时拆除两根毗邻外柱(一根为角柱)后结构的响应。其分析不考虑空气爆炸的局部效应或直接效应(高压压力导致的破坏)。Tsai等^[50]运用SAP2000对一个11层钢筋混凝土抗震框架建筑遭受柱失效时(危险独立)的非弹性响应和连续倒塌抗力进行了分析研究,此研究中柱构件均被假定为弹性,不考虑剪切失效和悬链效应,作者建议GSA线性法中的DAF应修正为计入非弹性动力效应的合适值。结构极端加载(ELS[®])是美国较新出现的分析程序,其基本原理为应用单元法,可以进行非线性动力分析,材料模型随同失效准则由用户定义。该程序能够有效预测不同程度的局部和整体倒塌行为,但存在不足,与建模选用参数高度相关。Sasani^[51]运用ELS[®]模拟分析一栋6层钢筋混凝土填充墙结构同时拆除两根毗邻外柱(一根为角柱)后结构的响应,变形形状较SAP2000有限元模拟结果更符合试验观测。也有很多的研究者应用ANSYS/LS-DYNA等软件对钢筋混凝土框架结构在冲击爆炸荷载作用下的连续倒塌和抗倒塌进行了分析^[52-56]。这些数值计算分析的精度还有待进一步提高,计算分析的系统性还有待加强。

钢筋混凝土框架结构在冲击爆炸荷载作用下的连续倒塌和抗倒塌实验由于代价昂贵等原因,最近才有几例。易伟建等^[57]对一个4跨、3层钢筋混凝土平面框架进行倒塌试验,Sasani等^[49,58]对一栋10层钢筋混凝土建筑在首层一根外柱爆破和一栋6层钢筋混凝土填充墙结构同时拆除两根毗邻外柱爆破进行倒塌试验。高超等^[59]对3层钢筋混凝土框架结构模型进行了爆炸试验研究。由于试验费用昂贵,试验的次数偏少,对于响应的规律性分析还不够。

1.2.5 钢筋混凝土构件及结构在爆炸与冲击荷载作用下毁伤评估的研究现状分析

孙伟等^[60]对混凝土目标侵爆毁伤评估方法进行了研究,给出了别列赞公式、修正别列赞公式、基于空腔膨胀理论(CET)的侵彻计算模型,以及战斗部爆炸对建筑物、人员的破坏杀伤模型,并基于一组作战条件假定,计算分析了某型导弹毁伤目标的效果。但是其采用的相关理论和假设条件等对钢筋混凝土是否合适还需进一步研究。杨鑫等^[61]对钢筋混凝土坑道头部结构的爆炸毁伤进行了试验与数值模拟研究,主要是进行试验和数值模拟的破坏形貌的对比,对于毁伤指标和最终的毁伤效果的研究还有待进一步研究。阎石等^[62]则利用有限元的方法对爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的损伤进行了分析,该方法便利,但其有效性还取决于毁伤等级依据、材料模型和参数的准确度等因素。李天华^[46]、贾昊凯^[63]、汪维^[64]等分别在数值模拟的基础上,使用压力-冲量曲线对爆炸荷载下钢筋混凝土板、柱的损伤进行了评估研究。

通过对钢筋混凝土材料和典型结构典型构件和结构力学响应的研究,人们已提出了许多指标(如破坏准则、损伤参量及其演化规律、压力-冲量曲线^[65]等),但是指标的合理性、整个指标体系的建立及毁伤机理等方面还有大量工作需要深入开展。目前建立的用于毁伤和损伤的评估方法主要有动力指纹法、模型修正与系统识别法和人工神经网络法^[66-70],这些方法各有各的适用范围。毁伤和损伤效果评估精度主要取决于指标是否合理、全面,评估方法是否正确。

从已有的研究来看,爆炸作用下钢筋混凝土框架结构的承重构件——梁、板、柱的力学响应方面的研究(理论分析、试验研究和数值模拟)还比较多,理论分析在构件本身、边界条件、荷载加载及构件本构模型方面均做了相应简化;试验研究中试验构件相对真实情况也做了约束条件等方面的简化,各个研究团队之间实验构件与加载等试验条件也不尽相同,较为缺乏系统性;数值模拟研究中大多采用将钢筋混凝土等效为一种材料进行材料参数的设计,分离式建模研究中对于钢筋和混凝土之间的黏结性能的考虑还较为简单,不少的数值计算中均将炸药爆炸加载简单地等效为均布的三角形静荷载加载,这些因素均影响了数值计算结果的可靠性。由于研究的难度、成本及受制于计算科学技术的发展,爆炸作用下钢筋混凝土承载框架结构力学响应方面相关的理论、数值计算和试验方面的研究均开展得很少,还需要开展大量深入的研究。在已有研究中主要考虑在建筑外部发生爆炸,对于建筑内部爆炸则考虑得很少。

1.3 本书的主要内容

针对目前的研究现状,本书着手于试验,以相对系统的系列爆炸试验(考虑在建筑内发生爆炸的情况),对钢筋混凝土梁、柱、板及框架结构在爆炸荷载作用下的毁伤及其评估进行研究。在实验设计上以与梁、柱、板实际受约束情况一致为理念,设计梁试件时考虑了板和柱对其的影响,设计柱试件时考虑了柱对其的影响,设计板试件时考虑了梁和柱对其的影响。考虑了炸药药量、爆炸位置对钢筋混凝土梁、柱、板及框架结构的毁伤的影响,并且设计了剩余承载力试验,对爆损的承重构件及部分爆损后加固的承重构件进行了剩余承载力的试验,获得较准确的数据供损伤评估及其他相关研究使用。对于框架结构的爆炸试验还考虑填充墙及填充墙开洞的影响,并进行了对应的数值计算分析。最后使用BP神经网络方法对钢筋混凝土梁、柱、板及框架结构在爆炸荷载作用下的毁伤进行了评估。

各章节的主要内容如下:

第1章是绪论,主要介绍本书相关研究的背景、意义及国内外主要研究现状。

第2、3、4章分别介绍爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁、柱、板的毁伤模式,介绍了相关试验设计、试验现象、毁伤模式及剩余承载力等方面的研究。

第5章是钢筋混凝土框架结构内部爆炸毁伤效应研究,分别介绍了相关试验和数值模拟,研究了框架结构的动力响应、毁伤特征、毁伤机理、毁伤效应及其影响因素。

第6章是爆炸荷载下钢筋混凝土构件毁伤评估方法,研究了相关的损伤评估指标体系及使用BP神经网络方法来评估构件的毁伤。

第7章是总结和展望。

参考文献

- [1]百度百科. 8·12天津滨海新区爆炸事故[DB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=6LE19pr5D_xmNEoSp0ZVchednkOIBW0fZKFNaEIaHxLbfLAnf8Sj0N8g0IYD-Nq9l7Q8J88jTt8GXqofjVZXIbhNmJlpqhE-wIEgpdhHlcz0wb2lnxlKRCv-u28kBd614UvQ2H7hq860nVLWWjCe5XSPAUpC692i9JUR4Xd8yWc5T2xowwHRza0bXIoTHskTYAr6bMS8WQAlbq4kCsgDKzGbuJ8QKbyHDo01_flt1iTYLJy40j8sx169fh uSb41pleENLWoT_vqV2qI53ae1Ll94vGEGUBfHie2ze06u.
- [2]百度百科. 8·2昆山工厂爆炸事故[DB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=iR-MgGxO6V2vAhGAXNEdbx99oxYeO8sno83A4QDeGIKb4cMTIRPrp6GKVgSqHab7BcJ6oChWcwb-Zis3UIVUs652etA-YVCfHSCr8Je41toDHNat2SLB-QdgXV7jkQj4OWe48QT0RpL-PETL0YT8ZuVlrpJuvIMPf61u_1qSqHLxRLa8B7AuSd0q2uIAbBnDcmIHUv08C-M5agzZUK.
- [3]韩颖. 湖南醴陵“9·22”重大爆炸事故追踪[DB/OL]. <http://d.wanfangdata.com.cn/Periodi->

- cal/ldbh201411014. 2014-11-26.
- [4]赵丹. 河北克尔化工“2·28”重大爆炸事故溯源[DB/OL]. <http://www.esafety.cn/laodongbao-hu/78689.html>. 2012-11-01.
- [5]中国新闻网. 乌鲁木齐特大爆炸事故原因查明[DB/OL]. <http://www.chinanews.com/2000-09-13/26/46306.html>. 2000-09-13.
- [6]百度百科. 5·22 乌鲁木齐爆炸事件[DB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=gf7pFRjK5Ftae_IGh_x72XxxbECreBfbTZHV1ORgUWzYW-5zrMuvRHeqyQN2V5zzB-P7I3BsM8vujOKupvRdUK.
- [7]British Standard. The Structural Use of Steelwork in Buildings (BS5950: part1)[M]. London: British Standards Institution, 1990.
- [8]British Standard. Code of Practice for Special Circumstances (BS8110: part2)[M]. London: British Standards Institution, 1985.
- [9]British Standard. Code of Practice for Design and Construction (BS8110: part1)[M]. London: British Standards Institution, 1997.
- [10]American Standard. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7/ANSI A58) [M]. Washington: The American Society of Civil Engineers, The American National Standards Institute, 1993.
- [11]American Standard. Interim Construction Standards for Guidance on Structural Requirements (DoD AT/FP) [M]. Washington: The United States Department of Defense Antiterrorism/Force Protection, 2001.
- [12]住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB 50009—2012)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13]T Krawthammer. Shallow-buried RC box-type structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(3): 637-651.
- [14]Krauthammer T, Bazeos N, Holmquist T J. Modified SDOF analysis of RC box-type structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(4): 726-744.
- [15]Ross T J. Direct shear failure in reinforced concrete beams under impulsive loading[R]. Report No. AFWL-TR-83-84, Air Force Weapons Laboratory, Kittland Air Force Base, NM, 1983.
- [16]Ghabossi J, Millavec W A, Iseaberg J. R/C structures under impulsive loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(3): 505-522.
- [17]Krauthammer T, Assadi-Lamouki A, Shanaa H M. Analysis of impulsively loaded reinforced concrete elements-I theory[J]. Computers and Structures, 1993, 48(5): 851-860.
- [18]Krauthammer T, Assadi-Lamouki A, Shanaa H M. Analysis of impulsively loaded reinforced concrete elements-II implementation[J]. Computers and Structures, 1993, 48(5): 861-871.
- [19]陈肇元. 防护工程钢筋混凝土构件的抗剪性能与设计方法[J]. 防护工程, 1994(1): 1-7.
- [20]方秦, 柳锦春, 张亚栋, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁毁伤模式有限元分析[J]. 工程力学, 2001, 18(2): 1-8.
- [21]柳锦春, 方秦, 龚明, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及毁伤模式分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 25-50.
- [22]张亚栋. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构非线性有限元动力分析[D]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 1996.
- [23]陈力, 方秦, 还毅, 等. 强动载作用下钢筋混凝土梁毁伤模式的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(6): 580-585.
- [24]张大禹. 钢筋混凝土梁在爆炸作用下的响应与可靠性[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [25]陈肇元, 罗家谦. 钢筋混凝土轴压和偏压构件在静载和快速变形下的性能//科学研究报告集(第4集) [C]. 北京: 清华大学出版社, 1986: 33-44.

- [26]Sun J Y, Li G Q, Lu Y. Numerical simulation of response of SRC columns subjected to blast loading[J]. Transactions of Tianjin University, 2006, 12 (S1): 126-131.
- [27]Sheng R L, John E C, Kenneth B M. Design of reinforced concrete columns to resist the effects of suitcase bombs[C]. The 6th Asia-Pacific Conference Shock & Impact Loads on Structures. Perth W Australia; 2005: 325-331.
- [28]Morrill K B, Malvar L J, Crawford J E, et al. Blast resistant design and retrofit of reinforced concrete columns and Walls // Proceedings of the 2004 Structures Congress-Building on the Past; Securing the Future nashville, TN [C]. USA; K&C Corporation, 2004: 1471-1478.
- [29]师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与毁伤模式[J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4): 112-117.
- [30]吴振涛. 钢筋混凝土承重柱在爆炸冲击荷载作用下的动力分析[M]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [31]Kiger S A, Getchell J V, Slawson T R. Vulnerability of Shallow-Buried Flat-Roof Structures, Parts: 1-6[M]. Army Waterways Experiment Station, 1984.
- [32]Guice L, Sloawson T R. Static and Dynamic Slab Tests Conducted at WES, Technical Report SL-86-1, US[M]. Army Waterways Experiment Station, 1986.
- [33]Woodson S C, Kiger S A. Stirrup requirements for blast-resistant slabs[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(9): 2057-2069.
- [34]Ayaho, Miyamoto, Michael W King. Analysis of failure modes for reinforced concrete slabs under impulsive loads[J]. Structural Journal, 1991, 88(5): 538-545.
- [35]Miyamoto, Ayaho, King, et al. Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete slabs under impulsive loads[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(4): 411-419.
- [36]T Krauthammer. Response of structural concrete elements to severe impulsive loads[J]. Computers and Structures, 1994, 53(1): 119-131.
- [37]Ettouney M, Rittenhouse T. Blast resistant design of commercial buildings[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1996, 1(1): 31-39.
- [38]Crouch R S, Chisp T M. The response of reinforced concrete slabs to non-nuclear blast loading[C]. 4th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2001: 69-76.
- [39]Duranovic N. Impulsive loading on reinforced concrete slabs-modeling considerations[C]. International Conference on Structures Under Shock and Impact, SUSI, 1998: 817-826.
- [40]Low H Y, Hao H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading[J]. Engineering structures, 2002, 24 (2): 189-195.
- [41]阎石, 张亮, 王丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的毁伤模式分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(3): 117-180.
- [42]董军, 杨科之, 杨秀敏, 等. 装药接触钢筋混凝土板的震塌效应//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集[C]. 北京: 中国土木工程学会, 2004.
- [43]张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(6): 765-768.
- [44]王明洋, 宋春明, 王德荣, 等. 钢筋混凝土板在低速冲击下的计算方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 672-678.
- [45]Zineddin M, Krauthammer T. Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007(34): 1517-1534.
- [46]李天华. 爆炸荷载下钢筋混凝土板的动态响应及损伤评估[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [47]邱兆国. 钢筋混凝土框架在低速冲击荷载作用下的动力响应分析[D]. 唐山: 河北理工大学, 2008.