

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.050



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



爆炸灾后建筑性能评价及修复加固研究进展

师燕超^{1a,1b}, 刘少增^{1a}, 崔健^{1a,1b}, 郭宗明²

(1. 天津大学 a. 建筑工程学院; b. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350;
2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029)

摘要:在爆炸荷载作用下, 建筑结构会产生不同程度的损伤, 甚至可能发生连续性倒塌。建筑性能评价是爆炸灾后重建阶段结构处置与修复加固方式选择的重要依据, 是指在爆炸发生之后, 考虑建筑爆炸损伤, 对建筑结构的残余性能进行分析和评定。经过几十年的发展, 建筑结构抗爆研究已经成为一个热门研究方向, 许多学者开展了诸多相关研究, 但现有研究成果大多为爆炸发生前的防护设计与分析。为了促进该领域更加全面深入的研究, 为灾后重建工作提供技术支持, 对爆炸灾后建筑性能评价涉及的一些关键问题进行详细的介绍与总结, 并对可行修复加固技术的相关研究及应用进行总结与评述。经过多年发展, 学者们建立了用于结构构件爆炸损伤评估的超压-冲量曲线和残余承载力评估公式, 提出了建筑爆炸损伤等级及受灾区域划分方法, 并在碳纤维布加固修复钢筋混凝土结构方面积累了丰富的经验, 但目前关于灾后建筑性能评定及修复的研究仍处于起步阶段, 距离实际工程应用还有较大差距。

关键词:爆炸; 建筑结构; 结构抗爆; 性能评价; 修复加固

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0001-13

State-of-art review on performance evaluation and retrofitting of building structures after explosion event

SHI Yanchao^{1a,1b}, LIU Shaozeng^{1a}, CUI Jian^{1a,1b}, GUO Zongming²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Coast Civil Structural Safety of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, P. R. China; 2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, Guangdong, P. R. China)

Abstract: Building structures will suffer different degrees of damage, or even progressive collapse when subjected to blast loading. The performance evaluation of building structures after the explosion is to analyze the residual resistance of the building structures considering the effects of blast damage, which is essential for selection of structural disposal and retrofitting techniques in the reconstruction stage. Explosion-proof research

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51878445、51938011、52178498)

作者简介: 师燕超(1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗爆与防护研究, E-mail: yanchaoshi@tju.edu.cn。

崔健(通信作者), 男, 博士, 副研究员, E-mail: jian.cui@tju.edu.cn。

Received: 2021-12-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878445, 51938011, 52178498)

Author brief: SHI Yanchao (1982-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: explosion-resistance and protection of engineering structure, E-mail: yanchaoshi@tju.edu.cn.

CUI Jian (corresponding author), PhD, associate research fellow, E-mail: jian.cui@tju.edu.cn.

of building structures has become a popular research field during the past decades. Extensive studies have been conducted by numerous scholars, but most studies have focused on protective design and analysis before explosions. In order to promote in-depth investigation in this field and provide technical support for post-blast reconstruction, several key issues related with structural performance evaluation of buildings after explosion event were introduced and summarized in detail, and feasible repair and reinforcement techniques were also summarized and commented. After years of development, pressure-impulse curves and correlations for evaluating residual bearing capacity of blast-damaged structural components have been established. Methods for blast damage grading of buildings and affected areas division have been proposed. Besides, experience in reinforcement and repair of reinforced concrete structures using carbon fibre reinforced polymer has been continuously accumulated. However, current study on performance evaluation and post-blast repair of building structures is still in its infancy, and there is still a huge gap from perspective of engineering practice and application.

Keywords: explosion; building structures; explosion-resistance of structures; performance evaluation; repair and reinforcement

现代城市的安全运行面临着来自地震、台风、火灾和爆炸等多种极端灾害的严重威胁。自20世纪中叶以来,爆炸事件已逐渐发展成为严重威胁城市安全、导致重大人员伤亡和财产损失的主要原因之一。如1983年贝鲁特军营恐怖爆炸事件造成241人遇难、105人受伤;1995年美国俄克拉何马城联邦大厦汽车炸弹爆炸事件造成168人遇难、680多人受伤,直接经济损失6.52亿美元;2005年伦敦地铁公交连环爆炸事件造成56人遇难、700多人受伤^[1-4]。与此同时,随着城市规模的扩大,由于城市规划的迟滞导致居民区、商业区与工业区的距离逐渐缩小。在这种情况下,一旦发生意外爆炸事件,爆炸冲击波传播并作用在周边城市建筑群上,将产生灾难性的后果。例如,2015年天津港“8·12”特别重大火灾爆炸事故共造成165人遇难、8人失踪、798人受伤,直接经济损失68.66亿元;2019年江苏响水“3·21”特大爆炸事故造成78人遇难、76人重伤,直接经济损失19.86亿元;2020年黎巴嫩贝鲁特港特大爆炸事故共造成178人遇难、超过6500人受伤,超30万人无家可归,经济损失超150亿美元^[5-7]。现有针对建筑结构抗爆分析与设计的研究多为预防性研究,其目的是通过合理的抗爆、减爆及防爆技术,尽可能避免爆炸灾害的发生及爆炸灾害发生后建筑结构的损伤破坏^[8],而对于爆炸灾后建筑结构性能评价及处置的研究还鲜见报道。建立有效的爆炸灾后建筑结构抗灾性能评价和修复的理论与方法仍十分重要。原因在于,无论采用何种预防措施,都不能从根本上避免恐怖或意外爆炸的发生,而恐怖或意外爆炸一旦发生,爆炸冲击波的传播必

将造成周边建筑群的损害^[9-10],爆炸灾后建筑结构性能评价是确保爆炸灾后应急救援快速、科学、有效以及建筑结构灾后重建方案经济、合理、安全的关键。

为了促进建筑结构爆炸灾后性能评价和修复领域相关研究的发展,综述了建筑结构爆炸损伤评估、爆炸受损结构抗灾性能分析和损伤修复与加固等领域的最新研究成果,对爆炸灾后建筑结构性能评价涉及的一些关键问题进行详细介绍与总结,并对一些热门的建筑结构修复加固技术进行总结与评述,对目前研究的不足之处进行讨论,并对今后的工作进行展望。

1 结构构件爆炸损伤评估

在开展建筑结构爆炸灾后性能评价及修复工作之前,首先需要对爆炸规模及其造成结构构件损伤的程度和分布情况进行评估。建筑结构构件爆炸损伤评估最为关键的是建立可靠的损伤评估准则。地震荷载和爆炸荷载都是建筑结构设计时需要重点考虑的偶然荷载,相比于抗震研究,建筑抗爆研究起步稍晚,期间借鉴了建筑抗震的相关研究思路,如等效单自由度方法、基于数值手段的多参数分析法、蒙特卡洛方法及人工智能算法等,在建筑结构抗震和抗爆领域均有应用。但是,不同于地震荷载低周往复加载的特点,爆炸荷载具有持时短、幅值大、衰减快、作用位置不定和分布不均等特征,因此,爆炸产生的应变率效应更明显,且结构大多倾向于弯曲破坏、弯剪破坏或局部破坏。虽然建筑抗震和抗爆领域的研究方法基本大同小异,但由

于所提出的构件损伤评估模型大多是针对预定荷载场景的经验方法,具有各自的适用范围,不能一概而论。近年来,学者们对不同结构构件在爆炸荷载作用下的动力响应及破坏模式展开了研究,提出了结构构件损伤程度评估方法。根据评估方法输入参数的不同,可以将这些方法分为两类:一类是基于爆炸荷载的损伤评估方法,包括超压-冲量曲线图及各类采用比例距离和炸药当量为主要输入指标的经验方法;另一类方法则依赖于灾后现场检测结果进行损伤评估,现场检测内容包括相对残余变形、混凝土剥落程度和振动频率变化等。

1.1 基于爆炸荷载的损伤评估方法

超压-冲量曲线是指结构构件在爆炸荷载作用下对应某一损伤程度的等损伤曲线。在对二战中遭到炸弹破坏的英国砌体建筑进行评估时首次引入该方法,随后被广泛应用于对爆炸荷载作用下各类结构损伤及人体伤亡情况的评估^[11]。基于不同类型的结构构件和不同的损伤定义,可以得到爆炸荷载作用下包括钢筋混凝土柱、板、梁以及钢柱等常见结构构件损伤评估的超压-冲量曲线。Shi等^[12]通过数值模拟,对爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的损伤程度评估进行了详细研究,提出了基于竖向剩余承载力的破坏准则,建立了爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱损伤评估的超压-冲量曲线。Mutalib等^[13]基于相同方法,给出了典型纤维复合材料(Fibre Reinforced Polymer, FRP)加固后钢筋混凝土柱超压-冲量曲线的经验公式,该公式与Shi等^[12]给出的经验公式具有相同的表达形式,也可用于未加固钢筋混凝土柱的损伤评估。Parisi等^[14]在已有钢筋混凝土柱超压-冲量曲线的基础上,通过考虑钢筋混凝土柱的材料及构件属性的不确定性,采用蒙特卡罗方法,建立了钢筋混凝土柱的爆炸易损性曲线。Wang等^[15]和Xu等^[16]研究了钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的动态响应和损伤破坏模式,采用单自由度方法并考虑弯曲和剪切破坏模式,建立了钢筋混凝土板的超压-冲量曲线。Al-Thair等^[17]考虑到轴力对钢柱水平向抗力的影响,对其抗力函数进行修正,建立了钢柱抗爆分析的等效单自由度方法,并在此基础上提出了钢柱损伤程度评价的超压-冲量曲线。Shi等^[18]通过数值模拟方法,建立了预测爆炸荷载作用下波纹板损伤程度的超压-冲量曲线。Zhang等^[19]基于试验研究和数值模拟所得数据,提出了超高性能混凝土填充空心钢管(Ultra-High Performance Concrete Filled Double-skin Steel

Tube, UHPCFDST)柱损伤程度评估的超压-冲量曲线。Liao等^[20]开展了高强钢筋混凝土梁和普通钢筋混凝土梁的野外爆炸试验,比较了二者的抗爆性能,基于最大钢筋拉应变的破坏准则,建立了高强钢筋混凝土梁和普通钢筋混凝土梁损伤评估的超压-冲量曲线。Zhang等^[21]通过试验和数值模拟,建立了浮法玻璃及PVB(polyvinyl butyral)夹层玻璃损伤评估的超压-冲量曲线。陈俊杰等^[22]提出了运用图像法计算阻尼耗能,在原有单自由度方法和理想弹塑性抗力模型的基础上考虑阻尼影响,得到了与数值结果较一致的钢筋混凝土构件超压-冲量曲线。Huang等^[23]采用超压-冲量图的模态逼近法分析爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的响应和损伤,根据不同的失效模式,考虑剪切破坏、弯曲破坏和联合破坏模式,建立了结构剪切和弯曲破坏的临界方程,给出了不同失效模式下钢筋混凝土板快速损伤评估的超压-冲量曲线。上述成果采用的超压-冲量曲线大多符合反比例函数的形式,如表1所示,其中, P_0 和 I_0 是与损伤大小、构件尺寸、混凝土强度、钢筋强度和配筋率等参数相关的两个参数。

表 1 典型构件超压-冲量曲线

Table 1 Pressure-impulse curves of typical structural components

构件类型	超压-冲量曲线
RC柱 ^[12-13]	$(P - P_0)(I - I_0) = 12(P_0/2 + I_0/2)^{1.5}$
RC板 ^[14]	$(P - P_0)(I - I_0)^{0.5-0.6} = 0.33(P_0/2 + I_0/2)^{1.5}$
RC板 ^[15]	$(P - P_0)(I - I_0) = 0.006(P_0/2 + I_0/2)^{1.6}$
UHPC钢管 ^[18]	$(P - P_0)(I - I_0) = 2.2(P_0/2 + I_0/2)^{0.8}$
玻璃 ^[21]	$(P - P_0)(I - I_0) = 2.4(P_0/2 + I_0/2)^{1.2}$

除超压-冲量曲线方法外,另一种基于爆炸荷载的构件损伤评估方法主要采用炸药当量或比例距离作为输入参数。例如,Chen等^[24]通过现场爆炸试验,观察到柱形炸药两端引爆时钢筋混凝土柱的压剪破坏模式,并结合数值模拟方法,给出了以比例距离等作为输入参数的柱形炸药两端引爆的情况下钢筋混凝土损伤评估的经验公式。李忠献等^[25]基于BP神经网络对大量数值结果进行了训练,以截面宽度、截面高度、构件长度、箍筋配筋率、纵筋配筋率、轴压比、混凝土轴心抗压强度标准值、炸药质量和比例距离作为输入,以损伤作为输出,建立了爆炸作用下钢筋混凝土柱损伤分区图,如图1所示。Li等^[26]将爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的剥落损伤分为3类,基于数值研究结果,提出了考虑炸药

质量、距离、柱深、配筋情况的混凝土剥落损伤估算公式。Ibrahim等^[27]以比例距离和炸药当量等作为输入参数,采用神经网络方法分析了钢筋混凝土板在近距离爆炸荷载作用下混凝土剥落或炸坑损伤的数值结果,并编制了相应的程序代码。

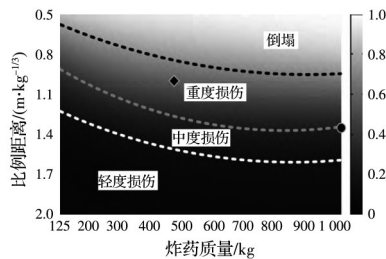


图1 爆炸作用下RC柱损伤的分区^[25]

Fig. 1 Damage partition of of RC columns under blast^[25]

1.2 基于现场检测指标的损伤评估方法

经过几十年的发展,基于爆炸荷载的构件损伤评估方法已相对成熟,但这种方法仅适用于爆炸荷载或炸药当量已知的情形。在爆炸灾后,作用于损伤结构上的爆炸荷载严重依赖于灾后爆炸源反演和冲击波传播计算结果,很难确定。为了克服上述缺点,学者们基于相对残余变形、混凝土剥落或炸坑、自振频率变化等灾后现场可检测指标,通过试验或数值方法,提出了典型结构构件损伤程度评估的判别准则或经验公式。例如,Bao等^[28]基于数值模拟结果,提出将钢筋混凝土柱在近距离爆炸后的残余承载力表示为相对变形、轴压比、配筋率、配箍率、长细比的函数。Cui等^[29]研究了近距离爆炸作用下钢筋混凝土柱的破坏机理,通过参数分析研究了柱子尺寸、箍筋和保护层厚度等参数对典型钢筋混凝土柱损伤程度的影响,提出了一种基于相对残余位移的损伤判别准则,并给出了对应的适用范围。周龙云等^[30]引入相对挠度的概念,基于数值模拟结果,研究了爆炸荷载作用下H型钢柱剩余承载力系数与相对挠度的关系,提出了钢柱爆炸损伤等级的快速判定依据。师燕超等^[31]提出了一种基于现场实测频率变化的钢筋混凝土柱爆炸损伤快速评估方法,建立了柱损伤程度与频率变化之间的公式,从而实现了在爆炸现场通过频率测试对矩形钢筋混凝土柱爆炸损伤程度的快速评估。

综上所述,爆炸灾后结构构件的损伤评估仍面临挑战。一方面,爆炸灾后作用于建筑上的爆炸荷载很难及时准确地获取;另一方面,现有研究针对同一构件提出了不同的破坏准则,如剩余承载力、

残余变形、混凝土剥落程度、局部应力和应变及模态信息等,不同破坏准则的有效性及其适用范围有待进一步研究。在爆炸荷载未知的情况下,如何通过现场无损检测方法,结合受损结构构件的动态性能等参数识别结构构件的损伤程度与破坏模式,是建立爆炸灾后构件损伤评估方法的关键。

2 灾后建筑性能评价

灾后建筑性能评价是在建筑结构构件爆炸损伤评估的基础上,对建筑结构在剩余使用寿命期限内的持久工况、短暂工况和偶然工况下的性能进行深入研究,对结构的承载能力和正常使用状态进行科学判断,其结果将直接为建筑结构的留用、修复或拆除等最终处置提供科学依据^[32-33]。目前,有关爆炸灾后建筑结构性能评价的研究仍处于探索阶段,类似于建筑物抗震性能评价体系^[34],根据研究对象的不同,现有研究成果主要分为两类,分别为单体建筑性能评价与城市建筑群性能评价。

2.1 灾后单体建筑性能评价

类似于结构构件的损伤评估,对于单体建筑,其整体损伤评价也有对应的超压准则或超压-冲量准则。例如,Pape等^[35]通过总结前人的研究成果,依据建筑物的结构类型,分别给出了超压与建筑物破坏程度的关系。Stephens^[36]给出了爆炸荷载作用下砌体结构的超压破坏准则。FEMA^[37]综合考虑了结构形式、材料强度及爆炸荷载效应等多方面因素,将建筑物的损伤程度分为5个等级,并且给出了砌体结构、钢结构、混凝土结构破坏程度与爆炸荷载超压参数对应的表格。除了上述超压准则外,学者们也提出了建筑结构损伤评价的超压-冲量准则。例如,Chee等^[38]基于单自由度体系理论,提出了爆炸荷载作用下浅埋盒式建筑结构动态响应的分析方法,考虑屋顶破坏模式以及土-结构相互作用,进一步得出了分别对应于屋顶弯曲破坏和直剪破坏的浅埋盒式建筑结构损伤评估的超压-冲量曲线。Elliott等^[39]将砖砌体结构破坏分为4个等级,并给出了相应损伤评估的超压-冲量曲线。综上所述可以看出,超压准则多基于爆炸灾后或试验观察的结构损伤破坏结果得出,由于爆炸现场条件及试验条件的不同,得到的同一类型结构的超压准则往往差异很大,仅能应用于灾后建筑结构损伤程度的初步评估。李殷^[40]基于爆炸荷载和结构构件损伤评估方法的简化,编制了可以绘制建筑损伤分布的程序,并应用于天津港“8·12”特别重大火灾爆炸事故中某

交警大楼的损伤评价,评估结果与实际情况基本吻合,如图 2、图 3 所示。不过需要注意的是,作者同时指出,该方法在评估出现局部倒塌的建筑时存在较大误差。



图 2 天津港爆炸中交警大楼损伤情况现场实拍^[40]

Fig. 2 Scene of the damage of the traffic cop building in Tianjin Port explosion^[40]

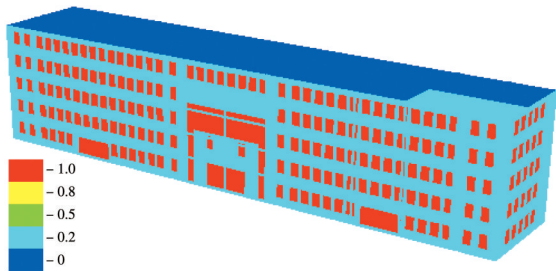


图 3 天津港爆炸中交警大楼损伤评估^[40]

Fig. 3 Damage assessment of the traffic cop building in Tianjin Port explosion^[40]

灾后现场调查也是单体建筑灾后性能评价的重要方式,现场调查和检测不仅可以直观地理解爆炸损伤和结构破坏的机理,也可以有效地对受损建筑物进行分类。表 2 给出了在二战伦敦空袭中英国砖砌体结构的损伤分级及依据^[41-42]。此外,Sorensen 等^[43]概括了爆炸灾后现场勘查需要的调查事项,包括结构损伤的类型及特征、炸药的等效 TNT 质量和位置、结构损伤的后果分析等。Turgut 等^[44]通过现场调查,揭示了引起爆炸事故的原因,解释了钢筋混凝土构件的损伤破坏机理。方秦等^[5]基于爆炸现场人员和建筑物的损毁情况,对天津港“8·12”特大火灾爆炸事故中建筑结构受灾害程度进行了定量评估。陈大鹏等^[6]对江苏盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故进行了爆炸威力分析及灾害后果评估。

2.2 城市建筑群受损区域快速评估

针对城市建筑群的灾后评价,通常做法是先对

表 2 建筑爆炸损伤分类^[41-42]

Table 2 Blast damage classification of buildings^[41-42]

等级	描述
A	完全摧毁
B	损伤严重,无法修复
C _b	不宜居住,必须进行大规模修复
C _a	不宜居住,但仅需要小规模修复
D	仅有部分砖瓦和窗户等损坏,仍可以居住

涉灾的各个建筑逐一进行评价,划定某一分类等级,然后汇总得到不同等级的受灾区域。在江苏响水“3·21”特别重大爆炸事故调查报告中,依据该方法将涉灾城市建筑群划分为严重受损、中度受损和玻璃受损 3 个区域^[45],如图 4 所示。由于涉及的建筑物数量较多,该方法效率并不高。为克服这一缺点,Zheng 等^[46]提出采用高分辨率遥感成像技术对城市建筑群爆炸受损区域进行快速评估,并对贝鲁特港等爆炸事件中建筑的毁损情况进行了分析,绘制了可以标识建筑毁损级别的遥感云图,如图 5 所示。图 6 给出了更高分辨率的巴塔军营爆炸建筑损伤遥感分析图。

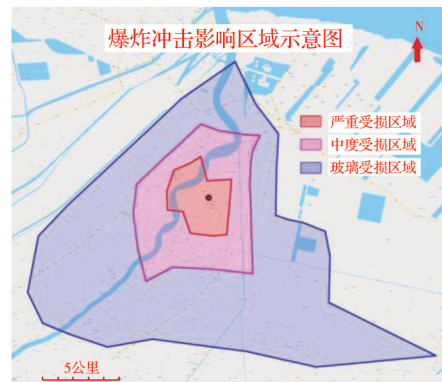


图 4 江苏响水“3·21”爆炸冲击影响区域示意图^[45]

Fig. 4 Schematic diagram of affected areas by "3·21" explosion in Xiangshui, Jiangsu Province^[45]

2.3 建筑爆炸灾后抗灾性能精确评价

针对单个建筑和城市建筑群的灾后损伤评价方法都只是对受损建筑进行受损等级分类和区域划分,属于快速评价方法,适合于灾后应急救援阶段。在灾后重建阶段,需要更为精确的建筑抗灾性能评价方法,为建筑结构的留用、修复或拆除等最终处置方案提供科学依据。可行的做法是在结构构件损伤评估结果的基础上,研究建筑结构局部构件损伤与建筑整体性能之间的关系。然而,建筑结构局部构件损伤与建筑整体性能之间的联系是一

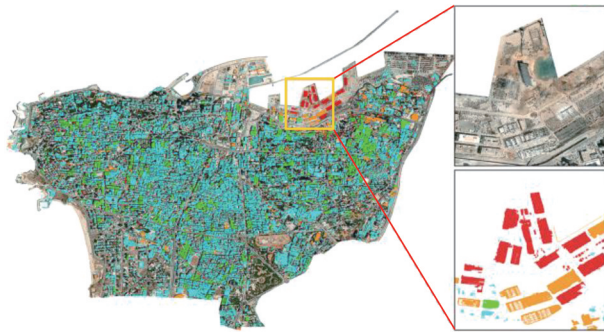


图 5 贝鲁特港爆炸建筑损伤遥感分析图^[46]

Fig. 5 Remote sensing analysis diagram of building damage in Beirut Port explosion^[46]

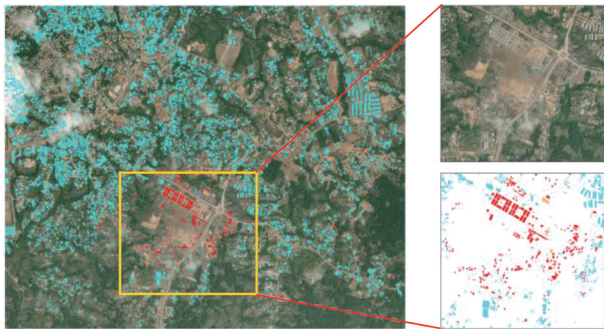


图 6 巴塔军营爆炸建筑损伤遥感分析图^[46]

Fig. 6 Remote sensing analysis diagram of building damage in Bata military barracks explosion^[46]

个十分复杂的课题。为了建立上述关系,学者们对建筑结构在爆炸荷载作用下因关键构件失效引发的整体连续倒塌进行了系统研究。例如,Luccioni等^[9]建立了炸药、空气和结构的三维流固耦合数值模型,通过与实际案例的对比,验证了该数值方法的有效性,并分析了在爆炸荷载引起局部破坏的情况下建筑结构的连续倒塌机制。Shi等^[10]在拆除构件法的基础上提出了一种可以考虑建筑初始位移、速度和临近构件损伤的结构连续倒塌数值分析方法,该方法在保证数值结果可靠性的前提下,极大地降低了数值计算成本,可直接应用于爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌的全过程分析;Elsanadedy等^[47]和Al-Salloum等^[48]采用CONWEP爆炸荷载模型,分析了内爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱和钢柱的失效行为引发的结构连续性倒塌。在实际爆炸灾害中,建筑结构未必一定发生连续倒塌,而目前对于爆炸作用下未倒塌受损结构的损伤程度评估的研究较少。曾繁等^[49]以砌体结构损伤评估为切入点,提出了一种基于构件损伤加权的结构评估方法,并将提出的评估方法应用于某两樞两开间两层砖混结构的爆炸损伤评估,通过与已有文献的评估

结果进行对比,验证了所提出的结构评估方法的有效性。Gombeda等^[50]提出了一种基于钢筋混凝土框架结构构件爆炸损伤的映射方法,用于建筑结构连续倒塌性能评估,通过某钢筋混凝土原型建筑框架的损伤分布计算表明,所提出的方法可用于框架结构的连续倒塌性能评估。与建筑抗爆性能评价相比,现阶段的抗震性能评价发展较为成熟,常用评价方法主要包括反应谱法、非线性静力push-over法和非线性动力分析法等^[51],这种划分主要考虑的是材料非线性。建筑抗爆同样存在材料非线性,同时还存在爆炸冲击波与建筑结构流固耦合的难题,一般按照施加爆炸荷载的简易程度,将结构与冲击波的相互作用简化为直接施加超压时程、COMWEP方法和分步流固耦合方法^[52]。在后续建筑抗爆性能评价研究中,也可参照建筑抗震性能评价方法,结合爆炸荷载形式,提出高效合理的建筑抗爆性能评价方法。

综上所述,现有爆炸灾后建筑结构局部构件损伤与建筑整体性能关系的研究主要关注的是建筑结构的抗连续倒塌性能。然而,灾后建筑抗灾性能评价更为关心的是那些受损而未倒塌的建筑,灾后建筑结构抗灾性能的精确评价可以为其灾后处置方案提供科学依据。如何依据局部结构构件的损伤破坏情况对整体建筑结构的抗灾性能进行评估依然是这一研究领域面临的重大挑战。一种可能的解决办法是基于建筑原始资料,结合现场无损检测,建立考虑爆炸引起初始损伤的建筑结构数值模型修正技术,并基于该模型对已损伤建筑结构的抗灾性能进行评价。与此同时,受损建筑结构能否长期使用,除了承载力安全外,其抗震、抗爆等综合抗灾性能也很重要。目前尚缺少对受损建筑结构抗震、抗爆等综合抗灾性能的研究。

3 爆炸灾后结构构件损伤修复

在得到建筑性能评价结果之后,就可以依据评价结果对受损建筑进行处置,包括修复和拆除。在爆炸灾后建筑性能修复与提升方面,修复技术和方案的选择尤为重要,《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)^[53]和《钢结构加固技术标准》(GB 51367—2019)^[54]中给出了若干种较为常用的加固方法,例如,增大截面加固法、置换混凝土加固法、体外预应力加固法、粘贴钢板或纤维复合材料加固法、增设支点加固法等。与针对完好结构的加固不同,修复面向的是受损结构,其难度和工作量

都更大。目前,有关建筑结构修复的研究主要集中在抗震、耐久性等非抗爆领域,常用修复方法包括纤维复合材料包裹修复^[55-59]、钢导架包裹^[55, 60-61]和钢筋网水泥砂浆包裹^[57, 62]等。不过,爆炸损伤与地震损伤、腐蚀损伤在损伤原因及破坏模式上存在明显不同:钢筋混凝土结构耐久性的最大问题是由混凝土碳化或氯离子侵蚀导致材料劣化,特别是由钢筋锈胀引发的自内向外的混凝土开裂或剥落等,因而钢筋除锈补强是其耐久性损伤的首要解决目标;由地震灾害造成的建筑结构损伤以剪切破坏为主,严重时还伴有整体破坏和地基液化的危险,因而地震损伤的修复主要以恢复结构抗剪承载能力为主,同时,立足于建筑整体经济目标,协调平衡各部位的修复成本;相比于地震荷载,爆炸荷载具有持时短、幅值大和衰减快等特征,爆炸造成的结构损伤基本以弯曲破坏或弯剪破坏为主,因而爆炸损伤的修复必须兼顾结构抗剪和抗弯承载能力的修复。由于爆炸损伤与地震损伤、腐蚀损伤等具有差异,对于爆炸损伤结构不能简单地采用现有的损伤结构修复方法,亟需开展爆炸灾后结构构件损伤修复研究。目前,在抗爆领域,有关受灾建筑修复的研究十分少见,除少量有关碳纤维复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP)修复加固的文献之外,采用其他技术进行修复的研究仍未见报道。

纤维复合材料是当前结构抗爆研究领域中最常用的加固材料,各国均出台了特定的技术规范和标准,例如,美国混凝土协会(ACI)、国际结构混凝土协会(FIB)以及日本土木工程学会(JSCE)均颁布了外贴FRP加固钢筋混凝土结构的技术标准^[63-65]。作为纤维复合材料中最成熟的代表,碳纤维复合材料加固钢筋混凝土结构大多数用在无损建筑物的加固或非爆炸损伤建筑结构构件的修复上,以提高结构的抗爆性能。例如,Morrill等^[66]基于单自由度理论和抗力函数,提出了FRP加固钢筋混凝土结构的抗爆设计方法,并通过现场爆炸试验和室内拟静力试验验证了所提出方法的有效性。Berger等^[67]通过野外爆炸试验,对比了CFRP加固和钢骨聚合物(Steel Reinforced Polymer, SRP)加固钢筋混凝土柱的抗爆效果,结果表明,与SRP加固整体弯曲破坏不同,CFRP加固后的钢筋混凝土柱趋于局部弯曲破坏。潘金龙等^[68]、Cheng等^[69]、Elsanadedy等^[70]分别通过数值方法研究了CFRP布加固后提高钢筋混凝土柱抗爆性能的可行性和设计方法。Yan等^[71]和Hu等^[72]则采用物理试验和数

值分析相结合的方法研究了不同CFRP包裹方式加固后钢筋混凝土柱的抗爆性能。Li等^[73]通过BP神经网络对数值结果进行训练,提出了CFRP加固钢筋混凝土柱在爆炸后残余承载能力的评估公式。陈万祥等^[74]的试验研究结果表明,CFRP可以有效提高钢筋混凝土梁的刚度,但加固梁的变形能力减小。郭樟根等^[75]的试验研究结果表明,外贴FRP条带加固能有效限制爆炸荷载下混凝土裂缝的发展。Shirinzadeh等^[76]研究认为,增加CFRP布层数有利于提高剪力墙的耗能能力,显著降低剪力墙的爆炸损伤。陈力等^[77-79]对CFRP加固砌体墙的抗爆性能展开了深入的研究,发现CFRP外贴加固砌体墙的破坏模式主要是弯曲破坏,与均布粘贴方法相比,集中粘贴CFRP抗爆性能更优。此外,对CFRP加固钢筋混凝土空心板、蒸压加气泡沫混凝土板和防护门等特殊结构构件的抗爆性能也有不同程度的研究^[80-82]。

在CFRP布修复裂缝结构以提升其抗爆性能研究方面,Kong等^[57]采用LS-DYNA研究了CFRP布层数和大小对带裂缝钢筋混凝土板的加固效果,结果表明,2~3层700 mm×700 mm大小的CFRP布能有效减小板在爆炸荷载作用下的最大位移。曲艳东等^[58]研究了CFRP布加固裂纹梁的抗爆效果并指出,当CFRP布为4层且加固宽度为300 mm时,CFRP布可有效提高带初始裂纹钢筋混凝土梁的抗爆效果。Pereira等^[59]采用CFRP修补开裂的钢箱结构以提高其抗爆性能,研究表明,CFRP贴片能有效减小裂纹周围的应力场,防止裂纹的扩展,显著提高带裂纹钢结构的抗爆性能;CFRP贴片厚度(或层数)和方向对残余变形无明显影响,而贴片宽度的最优数值约为70 mm。

目前,针对受爆炸损伤结构修复及其性能提升的案例和研究仍旧很少。在爆炸荷载作用下,钢筋混凝土结构或构件的损伤类型主要包括轻微裂缝或贯通裂缝、混凝土剥落、结构残余变形、钢筋屈服或断裂等。中国学者在这方面的研究多以某一爆炸事故为例,介绍爆炸现场调查及检测情况,并根据检测结果提出修复加固方法^[83-84]。Hudson等^[85]采用高强修补砂浆和双层三面CFRP布修复爆炸后的钢筋混凝土梁,并通过静载试验方法对比CFRP修复梁与无损梁、未修复损伤梁的承载能力,结果表明,CFRP布修复后的钢筋混凝土梁虽然延性略微降低,但承载能力和刚度均有明显提高。Chen等^[86]通过二次爆炸试验研究了CFRP条带粘贴和锚固两

种方法相结合修复爆炸受损后地下拱结构的抗爆性能,证明了此加固方法可以有效增强爆炸损伤的地下拱结构的抗爆性能,且不会发生CFRP条带的剥落破坏,并给出了CFRP条加固比率最优取值的计算公式。吴志昇^[87]通过三分点加载静力试验研究了CFRP布粘贴修复爆炸损伤后钢筋混凝土板的承载性能,结果表明,修复后钢筋混凝土板的承载能力可以恢复至与未损伤时相同。Lee等^[88]采用物理试验的方法研究了钢纤维补强胶结复合材料(Steel Fiber Reinforced Cementitious Composite, SFRC)修复爆炸损伤后钢筋混凝土梁的抗弯承载力,结果表明,SFRC不仅能有效恢复构件的抗弯承载力,且其延性仅略小于无损构件。

采用CFRP外贴修复受爆炸损伤后钢筋混凝土构件施工简便,现有研究中多采用此类加固方法。外贴CFRP材料不仅能为受损结构构件提供必要的抗拉强度,还可以对包裹混凝土产生约束作用。CFRP包裹修复爆炸损伤后的钢筋混凝土结构或构件一般包括预处理、填充高强砂浆、涂抹环氧腻子 and 粘贴CFRP布4个主要步骤。大量试验研究表明,在试验过程中,FRP加固的试件比较容易产生纤维带的剥离破坏^[89-90],除了粘贴工艺要求外,一般也可采用可靠的锚固方式来解决纤维剥落问题^[78]。同时,由于采用高强砂浆与CFRP布组合可能会使结构延性降低,可考虑采用钢纤维混凝土或超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)代替高强砂浆来解决^[88, 91]。尽管如此,在实际情况中仍旧存在一些难以解决的问题,比如,残余变形难以恢复、缺乏钢筋破坏及修复后的性能评价方法等。此外,除爆炸损伤外,环境因素引起的钢筋锈蚀和材料老化等问题也会给建筑的修复带来一定难度。建筑结构爆炸灾后修复加固是一项综合工程,仅仅依靠CFRP技术修复爆炸受损结构的做法是不可取的。在现有修复加固技术的基础上,大力发展新材料、新结构型式和新的施工工法,将会是建筑结构爆炸灾后修复与加固研究领域的发展方向。

4 结论与展望

经过几十年的发展,学者们在建筑结构抗爆研究领域已取得许多重要成果,建立了用于结构构件爆炸损伤评估的超压-冲量曲线和残余承载力经验公式,提出了建筑损伤等级及受灾区域划分方法,并在CFRP加固修复钢筋混凝土结构方面积累了丰

富经验。但是,目前关于灾后建筑结构性性能评定及修复的研究仍处于起步阶段,距离实际工程应用还有很大的差距,主要不足:

1)在灾后建筑结构构件损伤评估方面,目前缺乏有效的损伤评估判定准则。一方面,基于超压-冲量曲线的损伤评估方法有赖于灾后爆炸源反演和爆炸荷载计算的结果;另一方面,在爆炸荷载未知的情况下,如何通过现场无损检测方法,结合受损结构构件的动态性能等参数,识别结构构件的损伤程度与破坏模式,是建立爆炸灾后构件损伤评估方法亟须解决的关键问题。

2)现有研究大多针对结构构件或围护构件损伤评估开展,而有关爆炸中建筑结构构件损伤与整体性能联系的研究也基本都是基于预定爆炸场景或荷载的连续性倒塌分析。对于在爆炸中未发生连续倒塌的建筑结构,缺乏有关结构构件局部破坏与整体结构安全之间关系的定量研究。

3)灾后建筑结构的修复和性能提升十分复杂,目前相关研究匮乏,现有文献仅在试验条件下对结构构件的裂缝等损伤进行简单修复,且主要为CFRP外贴修复加固,尚未涉及实际工程中可能遇到的更为复杂的情况,离工程应用还有很大的差距。

因此,急需开展详细的灾后建筑结构综合抗灾性能评估理论与方法研究,提出爆炸受损建筑结构修复及加固技术,为爆炸灾后建筑结构的拆除或修复加固提供科学依据,具体包括以下几个方面:

1)建筑结构损伤评价与安全性能评估。针对爆炸受损但未倒塌的建筑结构,揭示建筑结构局部构件破坏与整体结构安全之间的关系,提出建筑结构整体损伤破坏准则及损伤程度评定方法,建立爆炸荷载作用后建筑结构安全性能评估方法。

2)建筑结构综合抗灾性能评价。在构件损伤评估的基础上,进一步开展构件损伤映射、数值模型修正和建筑结构安全性能评价体系研究,提出考虑爆炸引起初始损伤的受损构件及结构数值模型修正技术,建立爆炸灾后构件及结构抗震、抗爆及综合抗灾性能的分析方法,提出构件及结构综合抗灾性能的评价标准,建立灾后结构构件及结构综合抗灾性能评价方法。

3)灾后受损结构的修复与加固。从结构构件、围护构件和建筑整体3个层面出发,研究爆炸受损建筑结构修复与加固技术,包括结构构件加固技术措施、围护构件减、防爆技术措施及建筑整体防倒塌(地震倒塌和爆炸连续倒塌)技术措施等。

参考文献

- [1] FRYKBERG E R, TEPAS J J, ALEXANDER R H. The 1983 Beirut Airport terrorist bombing. Injury patterns and implications for disaster management [J]. *The American Surgeon*, 1989, 55(3): 134-141.
- [2] MLAKAR P F, CORLEY W G, SOZEN M A, et al. The Oklahoma City bombing: Analysis of blast damage to the Murrah Building [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1998, 12(3): 113-119.
- [3] OSTERAAS J D. Murrah building bombing revisited: A qualitative assessment of blast damage and collapse patterns [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2006, 20(4): 330-335.
- [4] BREWIN C R, SCRAGG P, ROBERTSON M, et al. Promoting mental health following the London bombings: A screen and treat approach [J]. *Journal of Traumatic Stress*, 2008, 21(1): 3-8.
- [5] 方秦, 杨石刚, 陈力, 等. 天津港“8·12”特大火灾爆炸事故建筑物和人员损伤破坏情况及其爆炸威力分析 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(3): 12-18.
- FANG Q, YANG S G, CHEN L, et al. Analysis on the building damage, personnel casualties and blast energy of the “8·12” explosion in Tianjin Port [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(3): 12-18. (in Chinese)
- [6] 陈大鹏, 陈力, 还毅, 等. 盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故爆炸威力分析及灾害后果评估 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(2): 196-203.
- CHEN D P, CHEN L, HUAN Y, et al. Analysis on the power and disaster consequences of “3·21” explosion accident in the chemical industry park of Xiangshui, Yancheng [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(2): 196-203. (in Chinese)
- [7] SIVARAMAN S, VARADHARAJAN S. Investigative consequence analysis: A case study research of Beirut explosion accident [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: 104387.
- [8] DRAGANIĆH, GAZIĆ G, VAREVAC D. Experimental investigation of design and retrofit methods for blast load mitigation: A state-of-the-art review [J]. *Engineering Structures*, 2019, 190: 189-209.
- [9] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D, DANESI R F. Analysis of building collapse under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(1): 63-71.
- [10] SHI Y C, LI Z X, HAO H. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(6): 1691-1703.
- [11] JARRETT D E. Derivation of the British explosives safety distances [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1968, 152(1): 18-35.
- [12] SHI Y C, HAO H, LI Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11): 1213-1227.
- [13] MUTALIB A A, HAO H. Development of P-I diagrams for FRP strengthened RC columns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(5): 290-304.
- [14] PARISI F. Blast fragility and performance-based pressure-impulse diagrams of European reinforced concrete columns [J]. *Engineering Structures*, 2015, 103: 285-297.
- [15] WANG W, ZHANG D, LU F Y, et al. Pressure-impulse diagram with multiple failure modes of one-way reinforced concrete slab under blast loading using SDOF method [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(2): 510-519.
- [16] XU J C, WU C Q, LI Z X. Analysis of direct shear failure mode for RC slabs under external explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 69: 136-148.
- [17] AL-THAIRY H. A modified single degree of freedom method for the analysis of building steel columns subjected to explosion induced blast load [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 94: 120-133.
- [18] SHI J H, ZHU Y, CHEN G M, et al. Assessment on blast loading resistance capacity of corrugations on offshore cabins based on the P-I model [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 105: 237-249.
- [19] ZHANG F R, WU C Q, ZHAO X L, et al. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for square UHPCFDST columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 115: 188-195.
- [20] LIAO Z, TANG D G, LI Z Z, et al. Study on explosion resistance performance experiment and damage assessment model of high-strength reinforcement concrete beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 133: 103362.
- [21] ZHANG X H, HAO H, MA G W. Parametric study of laminated glass window response to blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 1707-1717.
- [22] 陈俊杰, 高康华, 孙敖. 爆炸条件下结构超压-冲量曲线简化计算研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(13):

- 224-232.
- CHEN J J, GAO K H, SUN A. Simplified calculation method for pressure-impulse curve of a structure under blast load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35 (13): 224-232. (in Chinese)
- [23] HUANG X, BAO H R, HAO Y F, et al. Damage assessment of two-way RC slab subjected to blast load using mode approximation approach [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017, 17 (1): 1750013.
- [24] CHEN L, HU Y, REN H Q, et al. Performances of the RC column under close-in explosion induced by the double-end-initiation explosive cylinder [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103326.
- [25] 李忠献, 钟波, 师燕超. 爆炸作用下RC柱损伤快速评估模型[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47(11): 973-978.
- LI Z X, ZHONG B, SHI Y C. Fast assessment model for damage of RC columns under blast loading [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(11): 973-978. (in Chinese)
- [26] LI J, HAO H. Numerical study of concrete spall damage to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 68: 41-55.
- [27] IBRAHIM A, SALIM H, FLOOD I. Damage prediction for RC slabs under near-field blasts using artificial neural network [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(3): 315-332.
- [28] BAO X L, LI B. Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(3): 295-308.
- [29] CUI J, SHI Y C, LI Z X, et al. Failure analysis and damage assessment of RC columns under close-in explosions [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(5): B4015003.
- [30] 周龙云, 石磊, 徐令宇, 等. 爆炸冲击作用下H型钢柱损伤等级快速评估[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39 (5): 851-857.
- ZHOU L Y, SHI L, XU L Y, et al. Method for classifying damage level of steel column under impact of explosion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(5): 851-857. (in Chinese)
- [31] 师燕超, 李绍琦, 李忠献, 等. 基于实测频率的钢筋混凝土柱爆炸损伤快速评估方法[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(11): 155-164.
- SHI Y C, LI S Q, LI Z X, et al. Rapid evaluation method for blast damage of reinforced concrete columns based on measured frequency [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(11): 155-164. (in Chinese)
- [32] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [33] 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- Code for design of steel structures: GB 50017-2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [34] 范夕森, 李少伟. 城市建筑群体抗震性能评价在抗震防灾规划中的应用[J]. *工程抗震与加固改造*, 2017, 39 (Sup1): 63-68.
- FAN X S, LI S W. Application of earthquake resistance capacity assessment for group of structures in urban planning on earthquake resistance and hazardous prevention [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(Sup1): 63-68. (in Chinese)
- [35] PAPE R, MNISZEWSKI K R, LONGINOW A, et al. Explosion phenomena and effects of explosions on structures. III: Methods of analysis (explosion damage to structures) and example cases [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2010, 15(2): 153-169.
- [36] STEPHENS M M. Minimizing damage to refineries from nuclear attack, natural and other disasters [R]. Office of Oil and Gas, Washington, D.C. (USA), 1970.
- [37] Federal Emergency Management Agency. Safe rooms and shelters-protecting people against terrorist attacks [M]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2006.
- [38] CHEE K H, KRAUTHAMMER T, ASTARLIOGLU S. Shallow buried RC structures behavior under airblast in the time and P-I domains [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109885.
- [39] ELLIOTT C L, MAYS G C, SMITH P D. The protection of buildings against terrorism and disorder [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1992, 94(3): 287-297.
- [40] 李殷. 建筑物爆炸破坏快速评估技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- LI Y. Study on rapid assessments method of damage to buildings under blast loading [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [41] GILBERT S M. A model for the effects of a condensed phase explosion in a built-up-area [D]. Loughborough University, UK, 1994.
- [42] VOORT M M VAN DER, WEES R M MVAN, BROUWER S D, et al. Forensic analysis of explosions:

- Inverse calculation of the charge mass [J]. *Forensic Science International*, 2015, 252: 11-21.
- [43] SORENSEN A, MCGILL W L. What to look for in the aftermath of an explosion? A review of blast scene damage observables [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(3): 836-845.
- [44] TURGUT P, GUREL M A, PEKGOKGOZ R K. LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A case study in Sanliurfa, Turkey [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 32: 220-235.
- [45] 国务院事故调查组. 江苏响水天嘉宜化工有限公司“3·21”特别重大爆炸事故调查报告[R]. 2019. Accident Investigation Group of State Council. Investigation report on "3·21" major explosion accident in Tianjiayi Chemical Co., LTD., Xiangshui, Jiangsu [R]. 2019.
- [46] ZHENG Z, ZHONG Y F, WANG J J, et al. Building damage assessment for rapid disaster response with a deep object-based semantic change detection framework: From natural disasters to man-made disasters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112636.
- [47] ELSANADEDY H M, ALMUSALLAM T H, ALHARBI Y R, et al. Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 101: 143-157.
- [48] AL-SALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H, KHAWAJI M Y, et al. Progressive collapse analysis of RC buildings against internal blast [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18(12): 2181-2192.
- [49] 曾繁, 肖桂仲, 冯晓伟, 等. 砌体结构长脉宽爆炸荷载损伤等级评估方法[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 127-137. ZENG F, XIAO G Z, FENG X W, et al. A damage assessment method for masonry structures subjected to long duration blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 127-137. (in Chinese)
- [50] GOMBEDA M J, NAITO C J, QUIEL S E, et al. Blast-induced damage mapping framework for use in threat-dependent progressive collapse assessment of building frames [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(2): 04016089.
- [51] 薄景山, 张毅毅, 郭晓云, 等. 结构抗震设计理论与方法的沿革和比较[J]. *震灾防御技术*, 2021, 16(3): 566-572. BO J S, ZHANG Y Y, GUO X Y, et al. Evolution and comparison of different structural seismic design theories and methods [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2021, 16(3): 566-572. (in Chinese)
- [52] ABEDINI M, ZHANG C W, MEHRMASHHADI J, et al. Comparison of ALE, LBE and pressure time history methods to evaluate extreme loading effects in RC column [J]. *Structures*, 2020, 28: 456-466.
- [53] 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [54] 钢结构加固设计标准: GB 51367—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. Standard for design of strengthening steel structure: GB 51367-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [55] LI J B, GONG J X, WANG L C. Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2653-2663.
- [56] YAQUB M, BAILEY C G, NEDWELL P, et al. Strength and stiffness of post-heated columns repaired with ferrocement and fibre reinforced polymer jackets [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 200-211.
- [57] KONG X Q, ZHAO Q, QU Y D, et al. Blast response of cracked reinforced concrete slabs repaired with CFRP composite patch [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(4): 1214-1224.
- [58] 曲艳东, 李鑫, 刘万里, 等. CFRP加固含初始裂纹的RC梁的抗爆性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016(8): 53-56, 26. QU Y D, LI X, LIU W L, et al. Numerical analysis of anti-explosion performances of RC beam with initial cracks strengthened with CFRP sheets [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2016(8): 53-56, 26. (in Chinese)
- [59] PEREIRA J M, GHASEMNEJAD H, WEN J X, et al. Blast response of cracked steel box structures repaired with carbon fibre-reinforced polymer composite patch [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5): 3092-3098.
- [60] XU C X, PENG S, DENG J, et al. Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 17: 154-166.
- [61] XU C X, GUO C, XU Q Q, et al. The global collapse resistance capacity of a seismic-damaged SRC frame strengthened with an enveloped steel jacket [J]. *Structures*, 2021, 33: 3433-3442.
- [62] SOMAN M, MOHAN J. Rehabilitation of RC columns using ferrocement jacketing [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181: 156-162.

- [63] Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI 440.2R-17 [M]. American Concrete Institute, 2017.
- [64] CEB-FIB externally bonded FRP reinforcement for RC structures [R]. Lausanne: FIB, 2001.
- [65] Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets [S]. The Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2001.
- [66] MORRILL K B, MALVAR L J, CRAWFORD J E, et al. Blast resistant design and retrofit of reinforced concrete columns and walls [C]//Structures Congress 2004. May 22-26, 2004, Nashville, Tennessee, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2004: 1-8.
- [67] BERGER J O, HEFFERNAN P J, WIGHT R G. Blast testing of CFRP and SRP strengthened RC columns [C]//WIT Transactions on the Built Environment, Structures Under Shock and Impact X. May 14-16, 2008. Algarve, Portugal. Southampton, UK: WIT Press, 2008: 95-104.
- [68] 潘金龙, 罗敏, 周甲佳. 爆炸荷载下CFRP加固圆柱的动力响应和破坏机理[J]. 天津大学学报, 2010, 43(9): 755-761.
PAN J L, LUO M, ZHOU J J. Dynamic responses and failure mechanism of reinforced concrete cylindrical column wrapped with CFRP under blast loading [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(9): 755-761. (in Chinese)
- [69] CHENG D H, YANG Y H. Design method for concrete columns strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 331-344.
- [70] ELSANADEDY H M, ALMUSALLAM T H, ABBAS H, et al. Effect of blast loading on CFRP-retrofitted RC columns: A numerical study [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2011, 8(1): 55-81.
- [71] YAN J B, LIU Y, XU Z X, et al. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103720.
- [72] HU Y, CHEN L, FANG Q, et al. Study of CFRP retrofitted RC column under close-in explosion [J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111431.
- [73] LI Z X, ZHANG X J, SHI Y C, et al. Predication of the residual axial load capacity of CFRP-strengthened RC column subjected to blast loading using artificial neural network [J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112519.
- [74] 陈万祥, 严少华. CFRP加固钢筋混凝土梁抗爆性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 1-9.
CHEN W X, YAN S H. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP under blast loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 1-9. (in Chinese)
- [75] 郭樟根, 曹双寅, 王安宝, 等. 爆炸荷载作用下外贴FRP加固钢筋混凝土双向板试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 91-97.
GUO Z G, CAO S Y, WANG A B, et al. Experimental study on performance of FRP strengthened RC two-way slabs under explosion load [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 91-97. (in Chinese)
- [76] SHIRINZADEH M, HAGHOLLAHI A. Performance of shear wall with external reinforcement by CFRP and steel sheets against blast load [J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(5): 2735-2743.
- [77] CHEN L, FANG Q, FAN J Y, et al. Responses of masonry infill walls retrofitted with CFRP, steel wire mesh and laminated bars to blast loadings [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(6): 817-836.
- [78] 陈力, 郑康, 祝融, 等. CFRP加固砌体填充墙抗燃气爆炸泄爆荷载的优化设计及动力响应[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(5): 547-553.
CHEN L, ZHENG K, ZHU R, et al. Optimization design and dynamic responses of CFRP reinforced masonry infilled wall subjected to vented gas explosion [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(5): 547-553. (in Chinese)
- [79] LI Z, CHEN L, FANG Q, et al. Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 129: 66-79.
- [80] MAAZOUN A, MATTHYS S, BELKASSEM B, et al. Blast response of retrofitted reinforced concrete hollow core slabs under a close distance explosion [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 447-459.
- [81] WANG B, WANG P, CHEN Y S, et al. Blast responses of CFRP strengthened autoclaved aerated cellular concrete panels [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 226-236.
- [82] MENG F M, ZHANG B, ZHAO Z, et al. A novel all-composite blast-resistant door structure with hierarchical stiffeners [J]. Composite Structures, 2016, 148: 113-126.
- [83] 季海峰, 赵强, 赵王强, 等. 爆炸后高层剪力墙结构检测鉴定及加固方法[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(7):

- 1030-1033.
- JI H F, ZHAO Q, ZHAO W Q, et al. Detection and reinforcement method of high-rise shear wall structure after explosion [J]. *Fire Science and Technology*, 2020, 39(7): 1030-1033. (in Chinese)
- [84] 贾媛媛, 崔少华, 杨晓强. 某框架结构爆炸后检测鉴定及修复加固方案研究[J]. *工程质量*, 2017, 35(4): 75-77. JIA Y Y, CUI S H, YANG X Q. Security detection and research of reinforcement scheme of some flame building after gas explosion [J]. *Construction Quality*, 2017, 35(4): 75-77. (in Chinese)
- [85] HUDSON J L, DARWIN D. Evaluation and repair of blast damaged reinforced concrete beams [R]. University of Kansas Center for Research, Inc., 2005.
- [86] CHEN H L, XIE W, JIANG M R, et al. Blast-loaded behaviors of severely damaged buried arch repaired by anchored CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2015, 122: 92-103.
- [87] 吴志昇. RC板及加固/修复后抗爆性能与承载力试验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. WU Z S. Experimental study on the anti-blast performance and load-bearing capacity of non-treated, reinforced and damage-repaired RC slabs [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [88] LEE J Y, SHIN H O, MIN K H, et al. Flexural assessment of blast-damaged RC beams retrofitted with CFRP sheet and steel fiber [J]. *International Journal of Polymer Science*, 2018: 2036436.
- [89] TAN K H, ZHAO H D. Strengthening of openings in one-way reinforced-concrete slabs using carbon fiber-reinforced polymer systems [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(5): 393-402.
- [90] BAJI H, RONAGH H R, LI C Q. Probabilistic assessment of FRP-confined reinforced concrete columns [J]. *Composite Structures*, 2016, 153: 851-865.
- [91] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(2): 10-20. CHEN B C, WEI J G, SU J Z, et al. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(2): 10-20. (in Chinese)

(编辑 黄廷)