

# 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的抗爆与加固技术研究进展

曲艳东,李鑫,孔祥清,孙从煌

辽宁工业大学土木建筑工程学院,锦州 121001

**摘要** 爆炸可能导致建筑物的严重破坏甚至灾难性倒塌。爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应与加固技术是当前结构安全问题的研究热点之一。钢筋混凝土梁作为建筑结构的主要承重构件之一,在爆炸冲击荷载作用下发生破坏很可能引起整个结构的倒塌。综述了国内外在爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动态响应、损伤机理、加固技术等研究现状与发展趋势,提出了钢筋混凝土梁的抗爆与加固的研究难点和发展方向。

**关键词** 爆炸荷载;钢筋混凝土梁;抗爆性;动态响应

临近建筑在爆炸恐怖袭击和生产生活中的意外爆炸事故中往往损伤破坏严重,甚至发生连续性倒塌,造成大量的人员伤亡和财产损失。例如,2006年6月26日,陕西府谷村发生爆炸,造成10人死亡,15人受伤,24间民房被炸成废墟。2007年1月15日,山西省大同市城区新开北路龙岗苑小区15号楼3单元发生爆炸,造成3人死亡,6人受伤,导致其中的4户房屋倒塌。2011年11月14日,陕西省西安市嘉天国际公寓底商樊记腊汁肉夹馍店发生液化石油气泄露爆炸重大事故,造成10人死亡,36人受伤,殃及临近6家店铺,受损面积约1500 m<sup>2</sup>。2014年3月12日,纽约曼哈顿一建筑物发生爆炸并倒塌,造成3人死亡,63人受伤。2015年8月12日,天津滨海新区塘沽开发区的天津东疆保税港区瑞海国际物流有限公司所属危险品仓库发生火灾爆炸,造成天津港公安消防支队大楼和数千辆车在爆炸中被毁,165人死亡。因此,开展建筑结构抗爆与加固研究是十分必要的。爆炸中,建筑物的整体倒塌主要是由于梁、板和柱等主要受力构件遭到爆炸冲击波的破坏,从而引起整个结构的倒塌<sup>[1]</sup>。钢筋混凝土梁是建筑结构的主要承重构件之一,从安全设计看,对爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁动态响应以及加固技术的研究是减轻爆炸事故危害的一项重要措施。

钢筋混凝土梁在爆炸冲击荷载作用下的受力特性和动态响应过程是一个高度非线性的动力学问题,与常规受静载作用有着明显的不同<sup>[2,3]</sup>。根据钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动态响应、破坏机理及其加固技术等研究现状,本文综述国内外该领域的最新研究进展。

## 1 钢筋混凝土梁的抗爆研究

### 1.1 钢筋混凝土梁抗爆理论研究

为了分析在爆炸荷载作用下建筑结构的动力响应,Norris等<sup>[4]</sup>率先提出了等效单自由度法,该方法的关键是确定模型等效弹性位移、破坏位移和屈服强度,具有概念清晰、简单实用等特点,主要用于钢筋混凝土构件和钢构件的抗爆分析。随后,等效单自由度法被推广到考虑应变速率效应<sup>[5]</sup>、定义无量纲的参量(位移指数和位移延性指数)来提高计算精度<sup>[6]</sup>以及分析梁板等构件的动力响应问题<sup>[7,8]</sup>方面。Martin等<sup>[9]</sup>率先提出利用模态近似法研究爆炸荷载作用下结构构件的动力响应。该方法是假定在爆炸冲击荷载作用下结构构件的变形遵循一定的规律(如假定结构构件的变形和速度沿着构件的分布规律是相同的),这样使得求解结构复杂的运动方程减少到直接求解一个变量微分方程,因此该方法更适用于求解初始条件无法准确界定的问题。后来,该方法被推广应用到考虑有限挠度<sup>[10]</sup>、非耦合的运动弹-塑性阶段<sup>[11,12]</sup>、弹性恢复、建立基于能量法的平衡方程、综合考虑弹性变形效应以及多种约束形式<sup>[13-15]</sup>等诸方面,用于分析在爆炸荷载作用下建筑结构的动响应问题。Mata等<sup>[16]</sup>建立空中爆炸冲击波和结构相互作用的集中质量模型,并将其用于分析钢筋混凝土框架结构的爆炸冲击响应问题。集中质量模型建模相对简便,且计算工作量小,特别适合应用于工程抗爆分析与设计。Krauthammer<sup>[17,18]</sup>对爆炸荷载作用下的钢筋混凝土梁的弯曲破坏模式提出了简化抗力模型,应用等效单自由度体系进行结构动力响应分析。Carta等<sup>[19]</sup>构建了爆炸荷载作用下混凝土梁的

收稿日期:2015-04-23;修回日期:2015-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11302094,11302093);辽宁省优秀人才项目(LJQ2014063);辽宁省教育厅项目(L2011095)

作者简介:曲艳东,副教授,研究方向为爆炸加工、爆炸安全与爆炸力学,电子邮箱:quyandong@lnut.edu.cn

引用格式:曲艳东,李鑫,孔祥清,等.爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的抗爆与加固技术研究进展[J].科技导报,2016,34(2):99-103;doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2016.2.015

破坏形态模型。柳锦春等<sup>[20]</sup>构建了反映箍筋抗剪作用的材料模型,并对爆炸荷载作用下的钢筋混凝土梁的动力响应和破坏形态(弯曲破坏、剪切破坏以及弯曲与剪切耦合破坏)进行了数值分析。Li等<sup>[21]</sup>把两端固支梁的材料模型由刚塑性模型扩展到理想弹塑性模型,研究了理想爆炸荷载作用下弹性剪切变形对固支梁的横向剪切失效模式的影响。Stochino等<sup>[22]</sup>提出了两种单自由度模型来预测钢筋混凝土结构的动力响应。为考察边界约束的差异对结构的动力响应及承载能力的影响,宋春明等<sup>[23]</sup>建立了复杂约束条件下抗爆梁在弹性阶段和塑性阶段的解析计算方法,并分析了竖向弹性与阻尼约束、水平约束刚度、抗弯约束、荷载形式以及屈服弯矩动力强化系数对动力响应的影响。

在爆炸荷载作用下,固体材料的力学性能与准静态荷载作用下有本质的区别<sup>[2]</sup>。钢筋混凝土梁是由钢筋和混凝土复合而成,这两种材料在爆炸荷载作用下的协同作用机制比较复杂;同时,钢筋混凝土梁的弯矩、剪力和轴力间的相互作用机制以及各种破坏模式的形成原因尚不清楚。现有的理论研究方法(等效单自由度法、模态近似法和集中模型法等),由于对梁的质量分布过度简化、忽略剪切与弯曲的耦合效应<sup>[24]</sup>、没有考虑钢筋混凝土结构材料的应变率效应<sup>[25]</sup>、忽略加载速率对混凝土结构的失效模式和裂纹类型影响<sup>[26]</sup>等,这势必降低分析结果的精度,使计算结果的可靠度下降。总之,钢筋混凝土梁的抗爆理论研究尚缺乏系统性,相关理论研究尚待进一步发展与完善。

### 1.2 钢筋混凝土梁抗爆实验研究

实验研究是工程结构抗爆与加固研究和工程防护领域的一种重要方法。Menkes和Opat等对两端固支铝(6010-T6)梁进行了爆炸冲击实验<sup>[27]</sup>。匡志平等<sup>[28]</sup>对3根两端铰接低配箍钢筋混凝土梁在爆炸荷载下的力学性能开展了实验研究,分析了梁的裂缝、应变和挠度变化。方秦等<sup>[29]</sup>开展了钢筋混凝土梁的破坏模式的爆炸实验研究,并证实爆炸荷载作用持续时间较长时,钢筋混凝土梁通常会发生常见的弯曲破坏形态;在持续时间较短时,钢筋混凝土梁有可能在弯曲破坏发生之前产生剪切破坏。Zhang等<sup>[30]</sup>通过实验研究了近场爆炸荷载作用下混凝土梁的破坏模式以及不同炸药量和起爆距离对梁损伤破坏的影响。郭东等<sup>[31]</sup>基于等效单自由度体系和分布参数体系研究了爆炸荷载作用下梁在弹性阶段的反弹机制。许多的实验研究都发现,在横向爆炸冲击荷载作用下,刻痕的存在会改变梁的塑性变形和失效模式,即使梁内预留很小的刻痕,也会显著改变其动态响应和失效行为<sup>[32,33]</sup>。Adhikary等<sup>[34]</sup>研究了在爆炸冲击条件下钢筋混凝土深梁强度和剪切行为。

鉴于爆炸冲击作用的特殊性,常规仪器设备难以胜任其实验测量任务,同时受爆炸实验对场地条件要求苛刻、安全性差和费用高等影响,有关爆炸冲击作用下钢筋混凝土梁的动态响应、破坏分析的实验研究相对较少<sup>[35]</sup>。在为数不多的实验中,实验条件差异很大,实验数据难以进行可靠性的比

较分析。因此该领域尚需加强实验研究工作,以便为钢筋混凝土梁等结构抗爆与加固理论研究提供更多的基础性实验数据。

### 1.3 钢筋混凝土梁抗爆数值模拟研究

目前,应用数值仿真技术研究结构抗爆问题逐渐成为一个重要的研究手段。Krauthammer等<sup>[36]</sup>应用差分法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。在初步考虑钢筋和混凝土的材料非线性和应变率效应、反复加载效应等的基础上,Krauthammer等<sup>[37]</sup>提出了在均布爆炸荷载下钢筋混凝土梁板结构动态响应的一种简化的数值分析方法。陈力等<sup>[38]</sup>采用ABAQUS软件对爆炸荷载下钢筋混凝土梁的破坏形态进行了数值分析。杨涛春等<sup>[39]</sup>运用LS-DYNA软件研究了接触爆炸下钢-混凝土组合梁的破坏过程和破坏模式。殷志祥等<sup>[40]</sup>应用LS-DYNA有限元软件,利用双向张弦结构索的平衡荷载与索曲面及索拉力间的关系,对爆炸荷载作用下的双向张弦梁进行数值模拟,得到了结构在外部爆炸荷载下冲击波的传播规律、张弦梁下部的预应力索的轴力、上部桁架杆件的轴向力和节点位移时程规律。Remennikov等<sup>[41]</sup>对轴向约束的非复合铁-混凝土-铁夹层梁(steel-concrete-steel sandwich beam)的冲击问题进行了实验和数值模拟研究。此外,直接模拟蒙特卡罗法也被用来模拟工字型梁的爆炸冲击问题<sup>[42]</sup>。Kim等<sup>[43]</sup>应用随机模型研究了高度冲击条件下钢筋混凝土梁的失效行为。

利用数值仿真研究混凝土梁的抗爆也得到了比解析方法更可靠的分析结果。但是,目前仍然存在诸多亟待解决的问题,如数值结果与有限元结构模型大小、网格疏密程度有关,庞大的结构模型对计算机软硬件提出了更高要求,增加了计算成本<sup>[44]</sup>。此外,由于钢筋混凝土梁结构的整体性和特殊的变形机制,模拟代价较高,如何提高计算效率已经成为模拟分析的关键<sup>[45]</sup>。

## 2 钢筋混凝土梁的加固抗爆研究

纤维复合材料加固修复混凝土建筑结构技术是近年来新兴的一种加固技术。从1999年美国开展碳纤维布补强加固已有建筑物抗爆性能的实验研究<sup>[46]</sup>开始,国内外许多学者先后对钢筋混凝土梁进行抗爆与加固研究。理论研究方面,Nakul<sup>[47]</sup>研究了碳纤维布(CFRP)加固钢筋混凝土梁在静荷载和冲击荷载作用下的动响应问题,并建立了单自由度弹塑性模型。实验研究方面,Ross等<sup>[48]</sup>使用铵油炸药对碳纤维布加固的混凝土横梁及厚板进行抗爆性实验,证明加固后的构件抗爆性有极显著提高。陈万祥等<sup>[49]</sup>实验研究了CFRP黏贴层数、配筋率、爆炸荷载大小等对CFRP加固钢筋混凝土梁的裂缝开展、破坏形式、应变和挠度的影响。贺虎成等<sup>[50]</sup>对用碳纤维布不同加固方式和配筋率的钢筋混凝土模型进行了外贴碳纤维布加固钢筋混凝土构件的抗爆实验研究。薛建英等<sup>[51]</sup>以相同管径3种不同壁厚的钢管混凝土筒支梁为实验对象,对爆炸作用力、套箍系数与钢管混凝土筒支梁的变形的关系

进行了实验研究。实验表明,通过提高构件的套箍系数及自振周期,能够提高混凝土梁的抗爆能力。鲍育明等<sup>[52]</sup>对碳纤维布加固钢筋混凝土梁的抗爆性实验表明,加固后梁的承载力及延性均有很大增强,有效抑制了实验梁裂缝的延展。卢亦焱等<sup>[53]</sup>提出用碳纤维布及角钢复合加固钢筋混凝土柱梁的方法,可以更有效地发挥加固材料的横向约束作用,提高混凝土构件的承载力及延性。梁磊等<sup>[54]</sup>开展了有关芳纶纤维增强层复合材料(AFRP)约束条件下混凝土抗冲击的动力学性能研究,结果表明:各约束层数AFRP约束混凝土动态峰值应力对冲击次数不敏感,上下浮动不超过8%,稳定性良好;随着冲击次数的增加,内部混凝土损伤增大,损伤因子与冲击次数呈线性关系;AFRP约束混凝土内部损伤在达到普通混凝土极限损伤后仍能保持试件完整,具备对抗下次冲击的能力。在数值模拟方面,Barbato提出了一种简单高效的二维有限元模拟方法,该方法能够准确预测纤维增强复合材料(FRP)加固的钢筋混凝土梁的抗爆承载力<sup>[55]</sup>。运用改进的Chen-Chen模型,张仲林等<sup>[56]</sup>对钢纤维混凝土简支梁进行了非线性动力响应分析,所得结果与实验结果吻合良好。

总之,纤维复合材料加固技术在钢筋混凝土结构中的加固修补应用还是一个新的研究课题,目前研究多集中在静载和爆炸荷载条件下的CFRP和建筑结构,如砌体墙<sup>[57]</sup>、混凝土板<sup>[58]</sup>、钢管混凝土结构<sup>[59]</sup>和金属结构<sup>[60]</sup>之间黏贴行为。对于加固的混凝土梁在抗爆原理、理论分析和设计计算方法等诸多方面的研究尚处于初级阶段,需加强此领域的研究。

### 3 结论

目前有关钢筋混凝土梁的抗爆与加固领域的研究和应用还相对滞后,很多问题尚待深入分析,相关基础性实验数据还比较缺乏,建议主要从以下几方面开展研发工作。

1) 研究钢筋混凝土梁等结构的动力响应,对各种常见爆炸波冲击下所受的荷载、构件的损伤机理及各种减灾控制效果进行更为符合实际的模拟和分析,建立考虑钢筋混凝土梁中钢材和混凝土之间的应变率效应的动态损伤演化方程和损伤本构关系。此外,由于材料本构模型和材料参数的确定对数值模拟研究至关重要,规范<sup>[61,62]</sup>推荐的模型无法反映材料的动态特性,如何确定屈服强度放大系数也是建筑结构抗爆研究分析的一个关键问题。

2) 鉴于钢筋混凝土在爆炸冲击波荷载作用下的复杂性,其理论研究应综合考虑钢筋的黏结滑移、混凝土的剥落、钢筋与混凝土整体性等对钢筋混凝土梁的抗爆性能的影响。由于钢筋与混凝土黏结关系的复杂性,钢筋混凝土材料在爆炸空气冲击波荷载作用下的动力特性仍然是抗爆结构设计研究的难点。

3) 确定影响钢筋混凝土梁的结构破坏形态及抗爆性能的因素,研发可靠、有效的室内外实验装置和实验方法,以获取丰富的数据资料并掌握其内在的客观规律,实验验证理论模型的合理性,为爆炸荷载作用下各类大型建(构)筑物的抗

爆设计和受爆炸损坏后的加固提供直接的指导和措施。

4) 探索简单可行的结构计算模型和合理代表爆炸尺度的爆炸冲击参数。提出既简单又能反映爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁结构的新的有限元模型,构建高效的数值模拟方法,以提高计算速率,降低计算成本。

5) 加强对加固的钢筋混凝土梁等建筑结构在抗爆原理、实验研究、理论分析和设计计算方法等方面的研究,综合考察结构惯性、加载率效应和反弹性等对加固结构的损伤破坏的影响,积极开展其他类型钢筋混凝土结构及其加固体的抗爆设计规范研究。

### 参考文献(References)

- [1] 张秀华, 段忠东, 张春巍. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应和破坏过程分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 51-53.  
Zhang Xiuhua, Duan Zhongdong, Zhang Chunwei. Analysis for dynamic response and failure process of reinforced concrete beam under blast load[J]. Journal of North East Forestry University, 2009, 37(4): 51-53.
- [2] 孙建运, 李国强. 动力荷载作用下固体材料本构模型研究的进展[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(5): 144-149.  
Sun Jianyun, Li Guoqiang. Development of solid material's constitutive model on the dynamic load[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(5): 144-149.
- [3] 曲艳东, 吴敏, 王家力, 等. 燃气爆炸对砖混建筑的结构破坏研究[J]. 渤海大学学报: 自然科学版, 2013, 34(3): 323-327.  
Qu Yandong, Wu Min, Wang Jiali, et al. Study on the structure failure of the masonry buildings under the flammable gas explosion[J]. Journal of Bohai University: Natural Science Edition, 2013, 34(3): 323-327.
- [4] Norris G H, Hansen R J, Holley M J. Structural design for dynamic loads[M]. New York: Mo Graw Hill Book Co, 1959.
- [5] Yang G C, Tat-Seng L. Analysis of RC structure subjected to air-blast loading accounting for strain rate effect of steel reinforcement[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(12): 1924-1935.
- [6] Rong H C, Li B. Probabilistic response evaluation for RC flexural members subjected to blast loadings[J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 146-163.
- [7] Campidelli M, Viola E. An analytical-numerical method to loading[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(1/2): 260-286.
- [8] Fischer K, Haring I. SDOF response model parameters from dynamic blast loading experiments[J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1677-1686.
- [9] Martin J B, Symonds P S. Mode approximations for impulsively loaded rigid plastic structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1966, 92: 43-66.
- [10] Symonds P S. Elastic, finite deflection and strain rate effects in a mode approximation technique for plastic deformation of pulse loaded structures[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1980, 22(4): 189-197.
- [11] Symonds P S, Mosquera J M. A simplified approach to elastic-plastic response to general pulse loads[J]. Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(1): 115-122.
- [12] Li Q M, Jones N. Shear and adiabatic shear failures in an impulsively loaded fully clamped beam[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(6): 589-607.
- [13] Schleyer G K, Hsu S S. A modeling scheme for predicting the response of elastic-plastic structures to pulse pressure loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(8): 759-777.

- [14] Lellp J, Tom K. Shear and bending response of a rigid-plastic beam subjected to impulsive loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(9): 1081-1105.
- [15] Ma G W, Shi H J, Shu D W. P-I diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beams[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(6): 1081-1094.
- [16] Mate, Saraiva J G. Lumped model for aerial blast wave propagation and structure interaction[J]. *Computational Mechanics*, 1991: 513-518.
- [17] Krauthammer T. Shallow buried RC box type structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(3): 637-651.
- [18] 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.
- [19] Carta G, Stochino F. Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads[J]. *Engineering Structural*, 2013, 49: 306-315.
- [20] 柳锦春, 方秦, 龚自明, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 26-30.  
Liu Jinchun, Fang Qin, Gong Ziming, et al. Analysis of dynamic responses and failure modes of RC beams under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 26-30.
- [21] Li Q M, Ye Z Q, Ma G W, et al. The influence of elastic shear deformation on the transverse shear failure of a fully clamped beam subjected to idealized blast loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2009, 51(6): 413-423.
- [22] Stochino F, Carta G. SDOF models for reinforced concrete beams under impulsive loads accounting for strain rate effects[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 306-315.
- [23] 宋春明, 王明洋, 刘斌. 边界约束对梁抗爆动力响应的影响(I)-理论研究及分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(5): 82-86.  
Song Chunming, Wang Mingyang, Liu Bin. Effects of boundary restraints on dynamic responses of a beam under blast loadings (I)-theoretical study and analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(5): 82-86.
- [24] Ma G W, Shi H J, Shu D W. P-I diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beam[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 34(6): 1081-1094.
- [25] Akanshu Sharma, Joško Ožbolt. Influence of high loading rates on behavior of reinforced concrete beams with different aspect ratios-A numerical study[J]. *Engineering Structures*, 2014, 79: 297-308.
- [26] Joško Ožbolt, Akanshu Sharm. Numerical simulation of reinforced concrete beams with different shear reinforcements under dynamic impact loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38: 940-950.
- [27] Menkes S B, Opat H J. Broken beams: Tearing and shear failures in explosively loaded clamped beams[J]. *Experimental Mechanics*, 1973, 13: 480-486.
- [28] 匡志平, 杨秋华, 崔满. 爆炸荷载下钢筋混凝土梁的试验研究和破坏形态[J]. *同济大学学报*, 2009, 37(9): 1153-1156.  
Kuang Zhiping, Yang Qiuhua, Cui Man. Experiment research and failure modes analyses of RC-beams under blast loading[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(9): 1153-1156.
- [29] 方秦, 柳锦春, 张亚栋, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁破坏形态有限元分析[J]. *工程力学*, 2001, 18(2): 1-8.  
Fang Qin, Liu Jinchun, Zhang Yadong. Finite element analysis of failure modes of blast-loaded RC beams[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(2): 1-8.
- [30] Zhang D, Yao S J, Lu F Y, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 33: 497-504.
- [31] 郭东, 刘晶波, 闫秋实. 爆炸荷载作用下梁板结构反弹机理分析[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(2): 64-71.  
Guo Dong, Liu Jingbo, Yan Qiushi. Rebound mechanism analysis in beams and slabs subjected to blast loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(2): 64-71.
- [32] Kumar S, Petroski J. Plastic response to impact of a simply supported beam with a stable crack[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1985, 3(1): 27-40.
- [33] Chen F L, Yu T X. An experimental study of pre-notched clamped beams under impact loading[J]. *International Journal of Solid and Structures*, 2004, 41: 699-724.
- [34] Adhikary S D, Li B, Fujikake K. Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 259: 14-28.
- [35] Børvik T, Hanssen A G, Langseth M, et al. Response of structures to planar blast loads-A finite element engineering approach[J]. *Computers and Structures*, 2009, 87: 507-520.
- [36] Krauthammer T, Assadi-Lamouki A, Shana H M. Analysis of impulsively loaded reinforced concrete elements: I theory[J]. *Computers and Structures*, 1993, 48(5): 851-860.
- [37] Krauthammer T, Shahriar S, Shana H M. Response of reinforced concrete elements to severe impulsive loads[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(4): 1061-1079.
- [38] 陈力, 方秦, 还毅, 等. 强动载作用下钢筋混凝土梁破坏模式的有限元分析[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(6): 580-585.  
Chen Li, Fang Qin, Huan Yi. Finite element analysis of failure mode of RC beams subjected to severe dynamic loads[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(6): 580-585.
- [39] 杨涛春, 李国强. 接触爆炸荷载下钢-混凝土组合梁的破坏模式研究[J]. *结构工程师*, 2009, 25(1): 34-40.  
Yang Taochun, Li Guoqiang. Research on the failure mode of steel concrete composite beam under contact detonation[J]. *Structural Engineers*, 2009, 25(1): 34-40.
- [40] 殷志祥, 赵思达. 爆炸冲击荷载作用下双向张弦梁结构动力响应分析[J]. *建筑结构*, 2013, 43(增2): 493-497.  
Yin Zhixiang, Zhao Sida. Dynamic response analysis of dual-direction beam string structure under explosion load[J]. *Building Structure*, 2013, 43(Suppl 2): 493-497.
- [41] Remennikov A M, Kong S Y, Uy B. The response of axially restrained non-composite steel-concrete-steel sandwich panels due to large impact loading[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 806-818.
- [42] Sharma A, Long L N. Numerical simulation of the blast impact problem using the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 200: 211-237.
- [43] Kim K, Bolander J E, Lim Y M. Failure simulation of RC structures under highly dynamic conditions using random lattice models[J]. *Computers and Structures*, 2013, 125: 127-136.
- [44] Remennikov A M, Kong S Y. Numerical simulation and validation of impact response of axially-restrained steel-concrete-steel sandwich panel[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(12): 46-55.
- [45] 肖锋, 逮勇, 章振华, 等. 夹层结构冲击动力学研究综述[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(18): 1-7.  
Xiao Feng, Chen Yong, Zhang Zhenhua, et al. A review of studying on impact dynamics of sandwich structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(18): 1-7.
- [46] DTRA/TSWG Program. Blast mitigation for structures, status report, commission on engineering and technical systems, national research

- council[R]. Washington D C: National Academy Press, 1999.
- [47] Nakul R S. Static and impact load response of reinforced concrete beams and slabs with NSM-CFRP retrofitting[D]. Norfolk: Old Dominion University, 2012.
- [48] Ross C A, Purcell M R, Elisabetta L. Blast response of concrete beams and slabs externally reinforced with fibre reinforced plastics (FRP)[C]. Building to Last: Proceedings of Structures Congress Xv, Portland, Oregon, USA, April 13-16, 1997.
- [49] 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 Wanxiang, Yan Shaohua. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP under blast loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 1-9.
- [50] 贺虎成, 唐德高, 陈向欣, 等. 爆炸冲击波作用下碳纤维布加固构件抗弯特性研究[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2002, 3(6): 68-73.  
He Hucheng, Tang Degao, Chen Xiangxin, et al. Study on flexural resistance of component strengthened by carbon fiber reinforced plastics under explosive blast[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2002, 3(6): 68-73.
- [51] 薛建英, 刘玉存, 刘天生. 钢管混凝土结构构件抗爆性能的试验研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 786-790.  
Xue Jianying, Liu Yucun, Liu Tiansheng. Experimental study on anti-knock performance of concrete filled steel tube[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2011, 32(6): 786-790.
- [52] 鲍育明, 赵艳秋. 碳纤维布加固钢筋混凝土构件抗爆性能研究综述[J]. 建筑技术, 2006, 37(6): 428-430.  
Bao Yuming, Zhao Yanqiu. Study on blast resistant behaviors of reinforced concrete component with CFS[J]. Architecture Technology, 2006, 37(6): 428-430.
- [53] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 4(5): 18-22.  
Lu Yiyang, Shi Jianyong, Zhao Guofan. Experimental research on concrete columns strengthened with the combination of CFRP and steel [J]. Journal of Building Structure, 2003, 4(5): 18-22.
- [54] 梁磊, 顾强康, 原璐. AFRP约束混凝土多次冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 90-95.  
Liang Lei, Gu Qiangkang. Experimental research on AFRP confined concrete under impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 90-95.
- [55] Barbato M. Efficient finite element modeling of reinforced concrete beams retrofitted with fibre reinforced polymers[J]. Computers and Structures, 2009, 87(3/4): 167-176.
- [56] 张仲林, 许金余, 朱笃美, 等. 爆炸荷载作用下碳纤维混凝土梁的动力响应分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2004, 5(5): 92-94.  
Zhang Zhonglin, Xu Jinyu, Zhu Dumei, et al. Dynamic response of steel fiber concrete beam under explosive load[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(5): 92-94.
- [57] 黄华, 吕卫东, 刘伯权. 爆炸荷载作用下粘贴 Polymer Sheet 膜材砌体墙防护性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(19): 131-138.  
Huang Hua, Lü Weidong, Liu Boquan. Protective performance of masonry walls strengthened with polymer sheet under explosive loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 131-138.
- [58] Tabatabaei Z S, Volz J S, Baird J, et al. Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 57: 70-80.
- [59] 陈忱, 赵颖华. FRP钢管混凝土构件抗冲击性能仿真分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(19): 197-201.  
Chen Chen, Zhao Yinghua. Simulation for anti-impact performance of concrete-filled FRP-steel tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 197-201.
- [60] Bambach M R. Numerical simulation of the shock spalling failure of bonded fibre - epoxy strengthening systems for metallic structures[J]. Engineering Structures, 2014, 64: 1-11.
- [61] 中国建筑标准设计研究院. GB 50038—2005 人民防空地下室设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2005.  
China Institute of Building Standard Design. GB 50038-2005 Code for design of civil air defence basement[S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2005.
- [62] Crawford R E, Higgins C J, Buttmann E H. The air force manual for design and analysis of hardened structures[M]. New Mexico: Civil Nuclear System Corporation, 1980.

## Research progress of blast-resistant performance of reinforced concrete beams under blast loads and reinforcement technology

QU Yandong, LI Xin, KONG Xiangqing, SUN Conghuang

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China

**Abstract** Explosion may lead to severe damage to buildings, even catastrophic collapse, consequently, loss of lives and property. Dynamic response and strengthening techniques of reinforced concrete structure under blast loads are one of the hot topics in structure safety. As one of the main bearing components of building structure, the damage of reinforced concrete beams may cause the collapse of the whole structure under blast loads. A comprehensive overview of research progress of dynamic response, failure modes and strengthening technology of reinforced concrete beams is presented, meanwhile, the research emphasis and main development trend are put forward.

**Keywords** blast loads; reinforced concrete beam; blast-resistant performance; dynamic response

(责任编辑 王媛媛)