

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0495

长历时爆炸冲击波荷载作用下梁板组合结构的动力响应*

李圣童¹, 汪 维², 梁仕发³, 桑琴扬¹, 郑荣跃¹

- (1. 宁波大学土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;
3. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为研究钢筋混凝土梁板组合结构在长历时远爆冲击波荷载作用下的动力响应及毁伤形态, 通过实验获得了梁板组合结构的破坏形态和背爆面中心点位移变化。利用有限元软件对钢筋混凝土梁板组合结构的动态响应过程进行数值模拟研究, 模拟得到的结构破坏现象与实验吻合较好。在此基础上, 分析了梁板组合结构在相同冲量、不同峰值爆炸荷载作用下组合结构的动态响应和破坏过程, 并结合挠跨比与破坏形态划分破坏模式。研究表明, 相同冲量作用下, 随着爆炸荷载峰值强度增加, 梁板组合构件的破坏程度逐渐增加, 破坏模式从弯曲破坏向弯剪联合破坏转换, 最后呈现冲切破坏模式; 组合构件中板部分发生破坏的时间早于交叉梁部分、破坏程度大于交叉梁。

关键词: 梁板组合结构; 抗爆性能; 动态响应; 破坏模式; 钢筋混凝土

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Dynamic response of beam-slab composite structures under long-lasting explosion shock wave load

LI Shengtong¹, WANG Wei², LIANG Shifa³, SANG Qinyang¹, ZHENG Rongyue¹

- (1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
2. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;
3. Institute of Defense Engineering, Academy of Military Science, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: To identify the anti-explosion performance, dynamic response and typical failure mode of a reinforced concrete beam-slab composite structure, the explosion experiment was conducted by the shock tube, which was used to simulate the long-lasting long-distance explosion shock wave. The failure form of the reinforced concrete beam-slab composite structure, the shock wave variation curve and the displacement change at the center point of the backside surface were obtained through the experiment. The dynamic response process of the reinforced concrete beam-slab composite structure is numerically simulated by finite element software. Compared with the experimental results, it is found that the simulated failure phenomenon is similar to the experimentally observed one, and the peak displacement at the center point of the backside surface is also close to the experimental one. Both of these have verified the accuracy and applicability of the numerical model adopted. On this basis, the dynamic response and failure process of the beam-slab composite structure under the simplified triangular explosion shock wave load are analyzed. The simplified triangular explosion shock wave used in numerical simulation has the same impulse as that in experiment but different peak values and durations. According to the deflection-span

* 收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(11302261, 11972201)

第一作者: 李圣童(1996—), 女, 硕士研究生, lst9606@outlook.com

通信作者: 汪 维(1983—), 男, 博士, 副教授, wangwei7@nbu.edu.cn

ratio a and the failure form, the failure patterns are classified into four modes as light failure, moderate failure, severe failure and complete failure. The results show that the cracks are firstly distributed along the diagonal of the backside surface of the reinforced concrete beam-slab composite structure. Under the same impulse, with the increase of the peak value of the explosion load, the damage degree of the beam-slab composite members gradually deepens. Meanwhile, the failure mode changes from a bending failure to a combined bending-shear failure, and finally appears as a punching failure. The failure of the plate part of composite members occurs earlier than the cross-beam part, while the former's damage degree is greater than the latter's.

Keywords: beam-slab composite structure; anti-explosion performance; dynamic response; failure mode; reinforced concrete

近年来,世界范围内因意外和恐怖袭击引起的爆炸事件频繁发生。爆炸不仅使建筑物发生破坏和倒塌,还对人类财产和社会稳定造成极大危害。钢筋混凝土梁板组合结构是建筑结构中重要的组成部分,对其开展在爆炸荷载作用下的动态响应和损伤状况研究,可为建筑物抗爆性能和整体安全提供参考依据。

爆炸荷载作用下,结构的应变率高达 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 或更高,钢筋和混凝土材料的强度明显提高,应力-应变关系变得更复杂,需要在材料模型中考虑非线性和应变速率效应等因素^[1-3]。目前,对钢筋混凝土板、梁的抗爆性能已有一定研究成果。阎石等^[4]将爆炸荷载作用下板的整体破坏模式分为弯曲破坏、剪切破坏和弯剪联合破坏;史祥生^[5]和贾敬尧等^[6]研究发现增加板厚、提高混凝土强度、增大钢筋直径、减少钢筋间距可以提高板的抗爆能力;李忠献等^[7]使用剩余承载力为指标评估构件破坏等级,提出一种简化确定钢筋混凝土板超压-冲量曲线的方法;张想柏等^[8]提出了震塌破坏系数,将近爆作用下钢筋混凝土板的典型破坏形态分为爆炸成坑、爆炸震塌、爆炸贯穿和爆炸冲切;Wang 等^[9]将接触爆炸作用下板的局部损伤划分为层裂、穿孔和冲孔失效;岳松林等^[10]推导了板的临界震塌厚度和临界贯穿厚度的计算公式;方秦等^[11-12]、柳锦春等^[13]发现不同爆炸冲击峰值作用下钢筋混凝土梁会发生弯曲、弯剪、斜剪以及直剪型等不同破坏形态;崔满^[14]通过实验探究了梁的裂缝开展、应变和位移变化情况,发现提高混凝土强度、增强箍筋用量可以提高梁的抗爆性能;汪维等^[15]通过近爆实验发现钢筋混凝土梁的破坏形态与爆高和比例距离有关;唐德高等^[16]研究发现使用高强钢筋可以提高大峰值爆炸荷载作用下梁变形恢复能力,降低位移峰值、裂缝长度和宽度。一些学者也进行了纤维材料加固后钢筋混凝土构件的动力响应和破坏机理分析^[17-21]。已有工作多为近爆或接触爆炸作用下对单独构件的研究,缺乏梁板组合结构整体抗爆性能的研究结果,对长历时远爆荷载作用下构件响应的研究深度不够。

为此,本文中,对长历时远场爆炸荷载作用下钢筋混凝土交叉梁板组合结构的毁伤特性和动态响应开展实验研究,分析组合结构的破坏模式。通过有限元软件 Abaqus^[22]建立钢筋混凝土交叉梁板组合结构数值模型,将组合结构在爆炸荷载作用下的数值模拟结果与实验结果进行对比分析,使用挠跨比划分钢筋混凝土梁板组合结构的破坏模式。

1 实验设计

1.1 实验概况

采用激波管作为实验装置,对钢筋混凝土交叉梁板组合结构进行 1 炮次模拟核武器爆炸冲击波加载作用。激波管能够模拟远场爆炸产生的爆炸冲击波^[23],调整炸药质量、高压段充压和实验段长度可以控制爆炸冲击波的超压强度和持续时间。激波管由图 1 所示 4 个主要部分组成:(1) 高压段,用于产生爆炸冲击波;(2) 膜片和切割索,膜片用于保持高压段充压,切割索用于破坏膜片,使高压段和过渡段连通;(3) 实验段,长度可以调整,通过过渡段与高压段连接;(4) 端部框架,用于固定试件。

钢筋混凝土梁板组合构件与外框采用 C35 混凝土整体浇筑。十字交叉梁截面尺寸为 $117\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ (宽 \times 高),受拉区配筋为 6HPB300 ϕ 6,受压区配筋为 4HPB300 ϕ 6,箍筋配筋为 HPB300 ϕ 6@70。板尺寸为 $2\ 000\ \text{mm} \times 2\ 000\ \text{mm} \times 80\ \text{mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),板内放置 HRB400 ϕ 12@200 双层双向钢筋。外框截面尺寸为 $250\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ (宽 \times 高),受拉区配筋为 3HRB400 ϕ 20,受压区配筋为 2HRB400 ϕ 14,箍筋配筋为 HPB300

∅8@100, 浇筑时预留螺栓孔。组合构件尺寸及配筋示意图如图 3 所示, 钢筋保护层厚度均为 15 mm。构件安装示意图如图 2 所示。

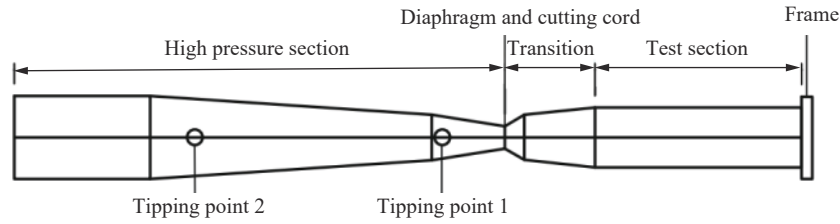


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

实验前, 在点爆源安装炸药, 点爆源位置如图 1 所示。炸药安装完成后密封人员出入口, 对高压段充压至 150.0 kPa。通过实验构件框架上预留的螺栓孔, 采用高强钢构螺栓将实验件固定在实验段的末端。背爆面中心点位置采用一个量程为 100 mm 的自动回弹位移传感器, 型号为 JWBS-100。在实验靶标框架顶部安装 2 个的爆炸冲击瞬态压力测量传感器, 用于测量作用在靶标上的冲击波超压, 型号为 CYG401, 灵敏度温度系数为 3×10^{-4} FS/°C, 位置如图 3 所示。实验时, 在 0 ms 利用电子延时起爆器同时起爆切割索和 1、2 号点的炸药, 同步启动测试系统, 采集量测数据。

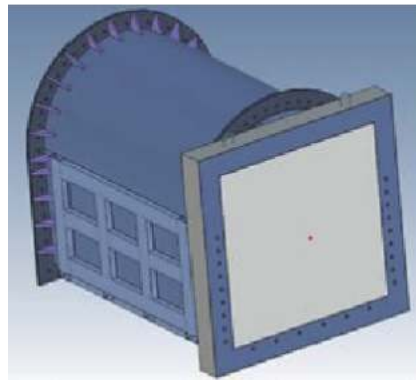


图 2 构件安装

Fig. 2 Widget installation

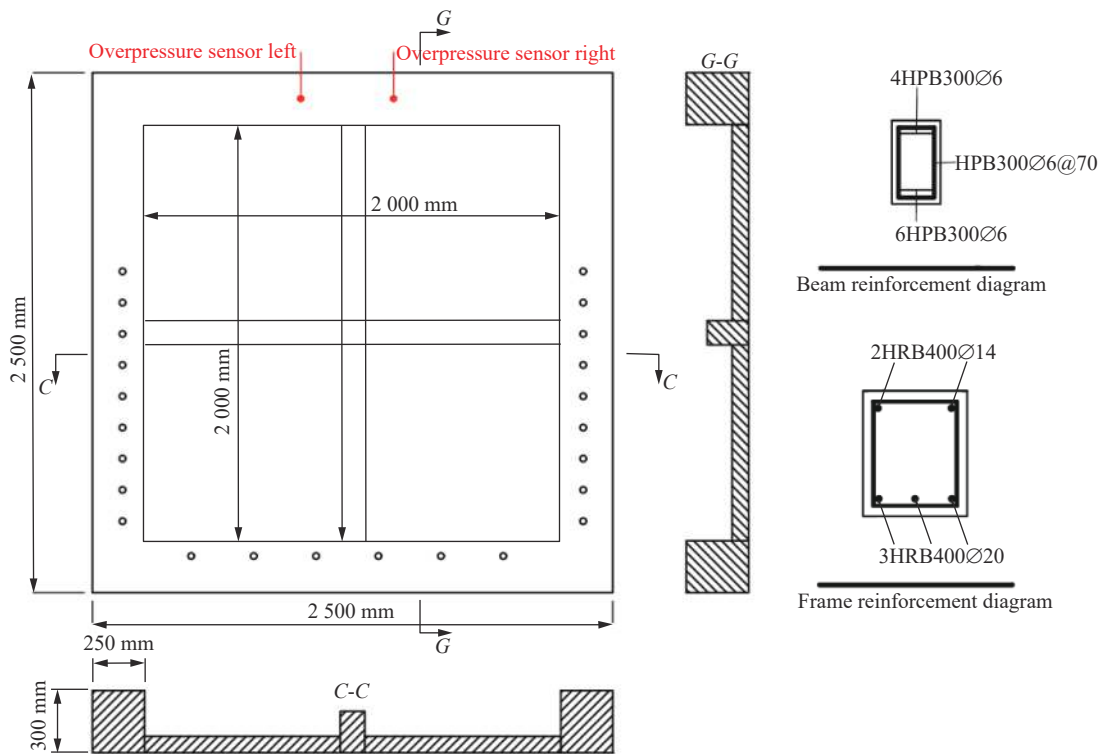


图 3 梁板组合构件尺寸及配筋示意图

Fig. 3 Dimensions and reinforcement of a beam-slab composite structure

1.2 实验结果与分析

实验测得的冲击波超压测试波形如图 4 所示, 组合结构背爆面中心点位移如图 5 所示, 实验后试件裂纹如图 6 所示。由图 4~6 可以看出, 作用在靶标上的平均冲击波超压峰值为 202.4 kPa, 超压持续时间接近 1 000 ms, 组合结构背爆面中心最大位移为 5.9 mm, 实验后, 组合结构背爆面出现多条宽约 0.5 mm 的裂纹, 组合构件处于轻微破坏状态, 整体呈现弯曲破坏模式。在约 76 ms 时, 爆炸冲击波传递到了梁板组合构件上, 在图中表现为冲击波超压突然上升, 达到峰值, 组合构件开始响应, 此时组合构件中板和交叉梁共同工作。

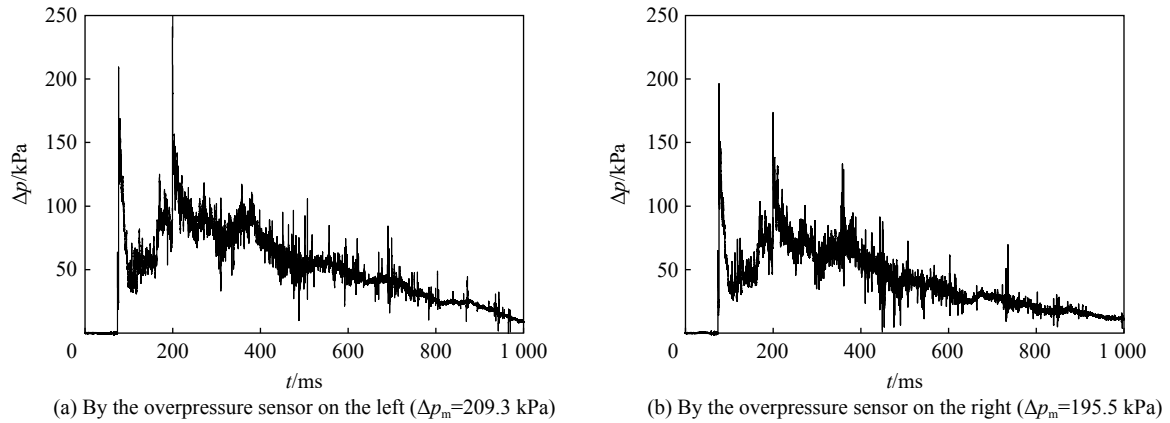


图 4 边框上冲击波超压测试波形

Fig. 4 Shock wave overpressure waveforms measured on the frame

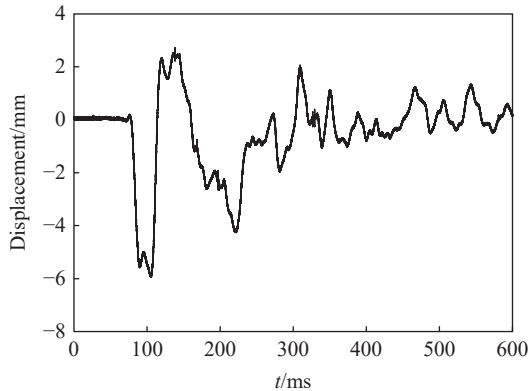


图 5 组合结构背爆面中心点位移时程曲线

Fig. 5 Displacement-time curve at the center point of the backside of the beam-slab composite structure



图 6 实验后裂纹

Fig. 6 Cracks after experiment

2 数值模拟

2.1 有限元模型建立

利用有限元软件 Abaqus^[22] 进行建模, 板、梁、框尺寸及配筋与实验构件相同, 有限元模型如图 7 所示。混凝土为 solid 六面体单元, 单元类型为 C3D8R, 钢筋为 truss 单元, 单元类型为 T3D2。采用 embedded region 定义钢筋与混凝土的连接, 取组合构件和框支座间的面定义面-面接触 (surface to surface contact), 边框的 4 个侧面均设置为固定约束。在网格划分中, 将混凝土部分网格尺寸设置为 20 mm, 钢筋部分网格尺寸设置为 50 mm。

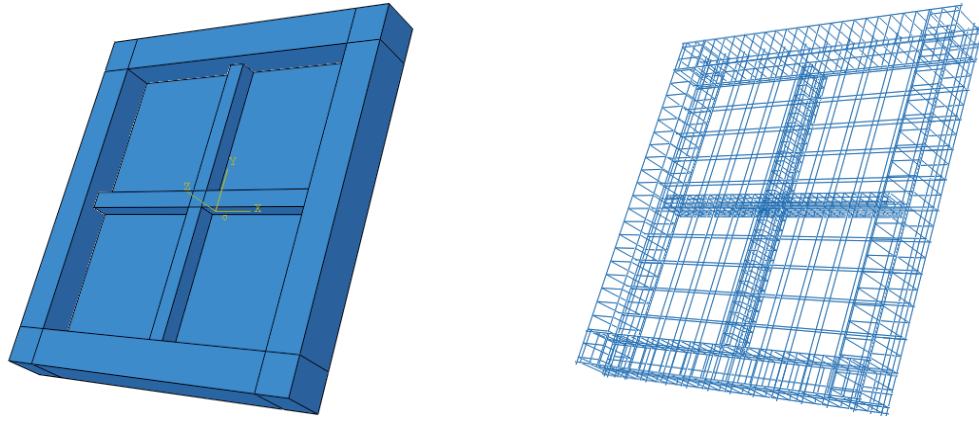


图 7 数值计算模型

Fig. 7 Numerical calculation models

2.2 材料模型

混凝土使用软件提供的混凝土塑性损伤 (concrete damaged plasticity, CDP) 模型^[24], 按《混凝土结构设计规范》^[25] 规定, 混凝土单轴受压的应力-应变关系为:

$$\sigma = (1 - D_c)E_c\varepsilon \quad (1)$$

式中: σ 为应力, D_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数, E_c 为混凝土弹性模量, ε 为应变。且 D_c 为:

$$D_c = \begin{cases} 1 - \frac{\beta_c^n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\beta_c^n}{\alpha_c(x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\beta_c = f_c^*/(E_c\varepsilon_c)$; f_c^* 为混凝土单轴抗压强度, 其值按实际结构分析需要取标准值、设计值或平均值; ε_c 为与单轴抗压强度 f_c^* 相应的混凝土峰值压应变; $x = \varepsilon/\varepsilon_c$; $n = E_c\varepsilon_c/(E_c\varepsilon_c - f_c^*)$; α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段的参数值。混凝土单轴受拉的应力-应变关系为:

$$\sigma = (1 - D_t)E_c\varepsilon \quad D_t = \begin{cases} 1 - \beta_t(1.2 - 0.2x^5) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\beta_t}{\alpha_t(x - 1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\beta_t = f_t^*/(E_c\varepsilon_t)$; f_t^* 为混凝土单轴抗压强度, 其值按实际结构分析需要取标准值、设计值或平均值; ε_t 为与单轴抗压强度 f_t^* 相应的混凝土峰值压应变; $x = \varepsilon/\varepsilon_t$; α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值。

参数经过换算调整后取值如表 1 所示^[25-26], 表中 ρ_c 为混凝土的密度, E_c 为混凝土的弹性模量, μ 为混凝土的泊松比, θ 为膨胀角, e 为偏心率, f_{b0}/f_{c0} 为混凝土双轴与单轴抗压强度的比, K 为影响屈服面形态的系数, η 为黏性参数。

表 1 混凝土材料模型参数^[25-26]

Table 1 Parameters of the concrete material model^[25-26]

混凝土型号	$\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_c/GPa	μ	θ	e	f_{b0}/f_{c0}	K	η
C35	2 390	31.5	0.2	38	0.1	1.16	0.666 67	0.000 01

对钢筋材料采用双折线模型, 其应力-应变本构关系为:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s\varepsilon_s & 0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \\ 0.01E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy}) + \sigma_{sy} & \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \\ 0 & \varepsilon_s > \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_s 为应力; E_s 为钢筋的弹性模量; ε_s 为应变; σ_{sy} 为钢筋的屈服强度, 其值按实际结构分析需要取标准值、设计值或平均值; ε_{sy} 为钢筋达到屈服强度时对应的应变; ε_{su} 为钢筋极限强度对应的峰值应变。钢筋模型材料参数的取值如表 2 所示^[27], 表中 ρ_s 为钢筋的密度, E_s 为钢筋弹性模量, d_s 为钢筋的直径, μ_s 为钢筋的泊松比。

表 2 钢筋材料模型参数^[27]

Table 2 Parameters of the steel material model^[27]

钢筋型号	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s/GPa	σ_{sy}/MPa	d_s/mm	μ_s
HRB335	7 853.2	221.4	335	8	0.3
HPB300	7 853.2	224.6	300	6	0.3
HPB300	7 853.2	221.4	300	8	0.3

2.3 模型验证

对图 4 所示的 2 个超压传感器的测量结果取均值后进行降噪滤波处理, 使用该简化载荷对模型进行加载, 如图 8 所示, 实验与数值模拟所得背爆面中心位移对比如图 9 所示, 实验后构件背爆面裂缝趋势和数值模拟对比如图 10 所示, 梁板组合结构在长持时爆炸荷载作用下破坏过程如图 11 所示。从图 9~11 可以看出, 组合构件背爆面裂纹和中心点位移峰值的计算结果与实验结果吻合较好, 本研究采用的数值模拟能够较好地展示钢筋混凝土梁板组合构件在爆炸荷载作用下的开裂、裂纹传播和混凝土破坏等过程, 可用于研究梁板组合构件在爆炸荷载作用下的破坏形态和动态力学性能。

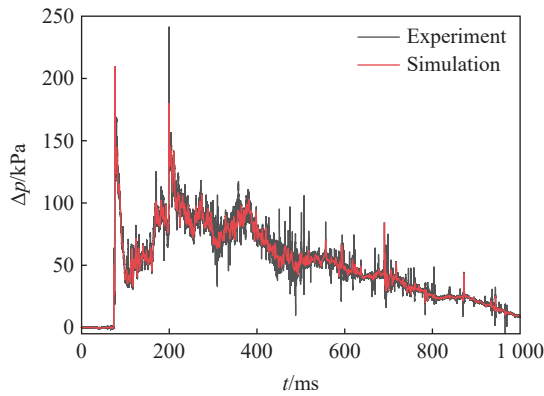


图 8 简化加载曲线

Fig. 8 Simplified loading curves

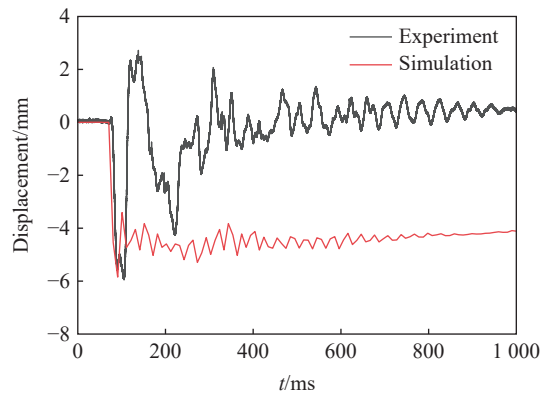
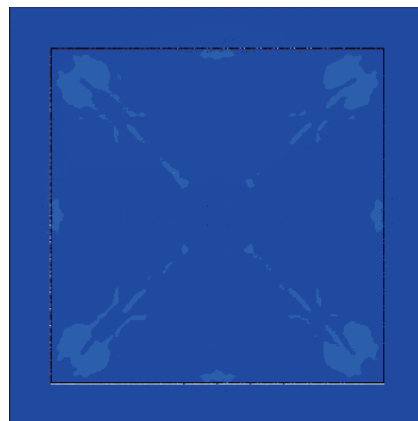


图 9 背爆面中心点位移时程曲线

Fig. 9 Displacement-time curves at the center point of the backside



(a) Experiment



(b) Simulation

图 10 实验和数值模拟得到的裂缝

Fig. 10 Experimental and simulated cracks

由图 9 可以看出, 在 0~76 ms 时段, 实验和数值模拟所得位移曲线的变化趋势几乎一致, 二者峰值十分接近; 实验位移曲线在 220~1 000 ms 时段振动趋于零, 数值模拟位移曲线在 200~1 000 ms 时段振动趋于 4.0 mm; 与数值模拟相比, 实验背爆面中心点位移响应滞后约 20 ms。爆后, 实验和数值模拟的

裂纹发展相似, 但残余位移存在约 4.2 mm 的差别, 这是因为: (1) 现浇钢筋混凝土梁板组合试件为非均匀介质, 存在初始缺陷, 而数值模拟中使用的材料模型十分理想, 导致实验与数值模拟结果不同; (2) 建模使用的钢筋与混凝土 constrain-embedded region 约束的滑移与构件实际情况不同, 造成差异; (3) 在数值模拟中, 背爆面的混凝土单元发生开裂损伤, 单元损伤后弹性模量降低, 导致回弹数值偏低。

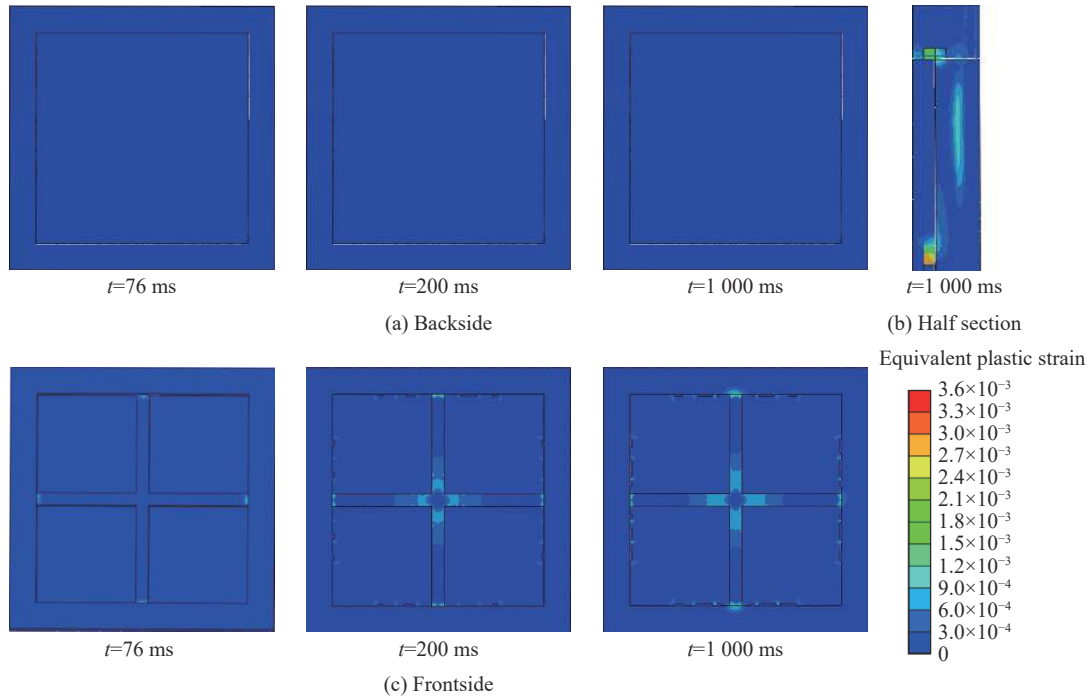


图 11 简化爆炸冲击波荷载下结构的破坏过程

Fig. 11 Failure process of the structure under simplified explosion shock wave loading

由图 11 可以看出, 在 76 ms 时, 爆炸冲击波传递至梁板组合构件, 迎爆面的框支座连接处、梁板连接处以及背爆面的混凝土发生轻微破坏; 在 200 ms 时, 构件迎爆面破坏发展至框支座连接处混凝土部分破坏、十字梁 1/2 跨度内应变较大, 但交叉梁中心混凝土完整, 且板与框支座连接处应变较大处位置分布与板中心处底层钢筋布置位置接近; 到 1 000 ms 时, 组合整体呈现弯曲破坏, 背爆面出现多条裂纹, 裂纹主要沿对角线分布, 背爆面中心最大位移 5.9 mm, 组合构件处于轻微破坏状态。

3 分析与讨论

3.1 破坏模式分析

结合钢筋混凝土板和钢筋混凝土梁的破坏模式, 在相同实验冲量 ($I=50\ 000\ \text{kPa}\cdot\text{ms}$)、不同峰值爆炸荷载作用下对梁板组合结构的破坏模式进行研究。采用简化三角形爆炸压力时程曲线对梁板组合结构进行加载, 模拟时, 使用多组冲量相同、荷载峰值不同的简化爆炸荷载时程曲线对组合构件进行加载。取其中具有代表性的 4 组工况, 荷载峰值 p_{\max} 分别为 200.0、208.3、217.4 和 222.2 kPa, 对应的加载时间 t_p 分别为 500、480、460 和 450 ms, 简化加载曲线如图 12 所示; 在长持时、冲量相同、峰值不同的爆炸冲

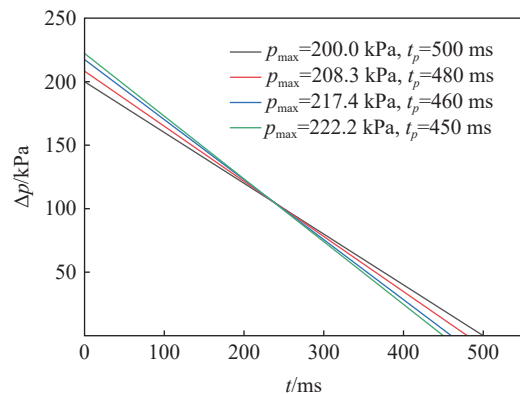


图 12 简化三角形加载曲线

Fig. 12 Simplified triangle load curves

击荷载作用下梁板组合构件典型破坏如图 13 所示, t_f 为发生该破坏对应的时刻。

数值模拟结果表明, 在峰值为 200.0 kPa 的简化爆炸荷载作用下, 梁板组合结构迎爆面框支座连接处混凝土破坏, 背爆面中心板与十字梁交叉部分连接处发生少量混凝土剥落, 组合结构发生轻微弯曲破坏, 如图 13(a) 所示。

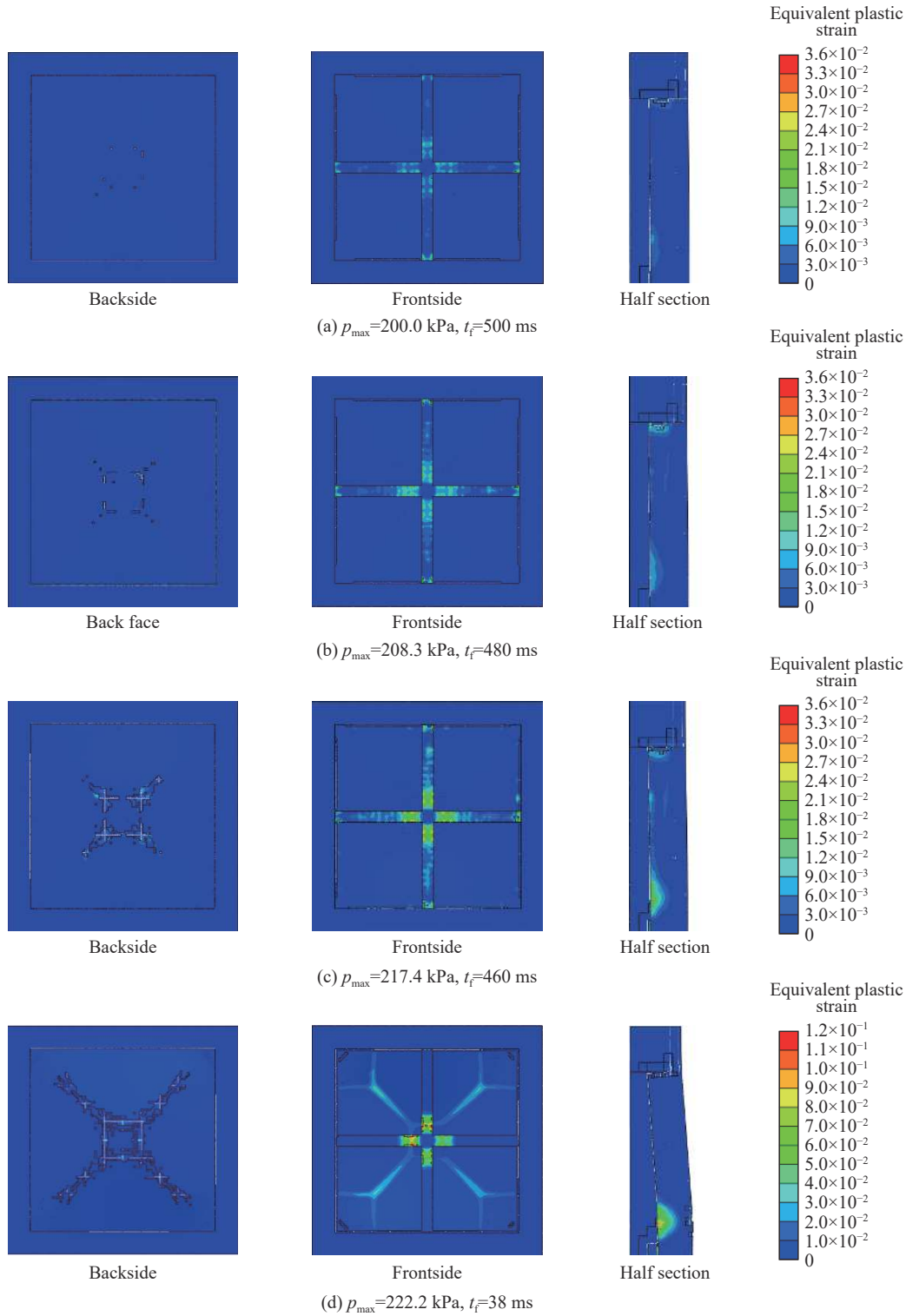


图 13 不同工况下构件背爆面、迎爆面以及半剖面的破坏

Fig. 13 Failure in the backsides, frontsides and half sections of the structures under different load conditions

在峰值为 208.3 kPa 的简化爆炸荷载作用下, 组合结构迎爆面与框支座连接处混凝土破坏程度继续增加, 背爆面中心发生混凝土层裂剥落, 部分钢筋裸露, 剥落部分与板中心处底层钢筋分布十分接近, 沿对角线向外延伸, 十字梁部分未发生混凝土剥落, 组合构件发生弯剪组合破坏, 如图 13(b) 所示。

在峰值为 217.4 kPa 的简化爆炸荷载作用下, 迎爆面组合结构与框支座的连接处、十字梁混凝土破坏区域扩大, 此时组合构件破坏程度加重、混凝土剥落量增加、支座连接处钢筋裸露, 背爆面中心部分混凝土破坏沿对角线发展且层裂加深, 此时板底层钢筋裸露面积增加, 组合构件整体呈现弯剪组合破坏, 板与交叉梁丧失共同工作能力, 如图 13(c) 所示。

在峰值为 222.2 kPa 的简化爆炸荷载作用下, 加载至 38 ms 时, 组合构件突然在支座连接处呈现混凝土冲切破坏, 加载至 450 ms 时, 组合构件板部分混凝土背爆面崩塌破碎区域与迎爆面压碎区域贯穿, 钢筋弯曲变形, 梁部分在迎爆面中心交叉部分旁的混凝土呈现冲切破坏, 在背爆面近交叉梁中心 3/5 处均存在混凝土破坏剥落, 残余混凝土厚度为 30~40 mm, 组合构件发生冲切破坏, 丧失承载力, 如图 13(d) 所示。

图 14 为不同工况的背爆面中心点位移峰值对比图, 图 15 为不同工况的背爆面中心点位移曲线。由图 14、图 15 可以看出, 相同冲量作用下, 随着加载峰值的提高, 组合构件背爆面中心点位移峰值增加。在峰值为 200.0、208.3 和 217.4 kPa 的简化爆炸冲击波加载作用下, 组合构件背爆面中心点位移发展至最大位移值之前曲线斜率一致, 达到最大值之后均呈现振动回弹下降趋势; 而峰值为 222.2 kPa 的简化爆炸冲击波加载作用下, 组合构件突然毫无征兆地发生破坏并丧失承载力。随着长历时爆炸荷载峰值的提高, 梁板组合结构从构件发生轻微弯曲破坏, 过渡到支座处混凝土破坏、背爆面混凝土层裂剥落、钢筋弯曲裸露的弯剪联合破坏, 最终发展成短时间内框支座处冲切破坏, 背爆面板部分混凝土贯穿破坏、钢筋裸露并弯曲变形, 此时交叉梁部分跨中附近混凝土破坏、钢筋弯曲变形, 构件完全丧失承载力。

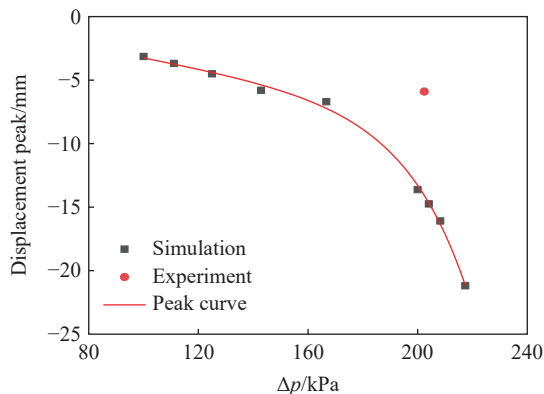


图 14 不同工况下背爆面中心点的位移峰值

Fig. 14 Displacement peaks of the central point of the backside under different load conditions

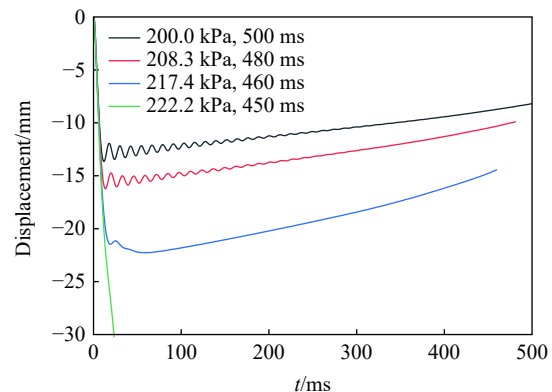


图 15 不同工况下背爆面中心点的位移时程曲线

Fig. 15 Displacement-time curves of the central point of the backside under different load conditions

3.2 破坏等级划分

为了进行长历时爆炸荷载作用下梁板组合构件毁伤的等级划分, 结合实验和数值模拟对背爆面中心点处的位移曲线进行了测量和统计, 统计结果如表 3 所示。其中, 构件 2 的数值模拟使用实验波形加载曲线, 构件 3~11 的数值模拟使用三角形简化加载曲线。根据统计结果和结构的毁伤程度, 以中心点处的位移挠跨比、组合构件的破坏表现作为划分标准, 将不同工况下组合结构伤划分为轻度破坏、中度破坏、重度破坏和完全破坏。轻度破坏的表现形式是梁板组合结构的迎爆面支座处出现少量混凝土脱落, 背爆面仅出现小裂纹, 没有明显的混凝土破坏, 挠跨比 $a \leq 0.5\%$; 中度破坏的表现是梁板组合构件迎爆面中心弯曲凹陷, 支座连接处混凝土破坏加深, 背爆面混凝土开始剥落, 随加载峰值的增加, 剥落沿板中心处底层钢筋布置发展, 构件主要为弯曲破坏, 挠跨比 $0.5\% < a \leq 1.0\%$; 重度破坏的主要表现是组合构件支座处混凝土破坏, 板背爆面混凝土沿对角线破坏剥落, 钢筋变形并裸露, 交叉梁背爆面混凝土中心

四侧破坏, 钢筋弯曲变形, 组合构件总体呈现弯剪联合破坏, 挠跨比 $1.0\% < a \leq 1.5\%$; 完全破坏的破坏特征为组合构件突然发生破坏, 板部分混凝土整体破坏贯穿、钢筋完全裸露变形, 交叉梁背爆面中心外侧均有混凝土崩塌剥落现象, 组合构件完全丧失承载能力, 挠跨比 $a > 1.5\%$ 。

表 3 相同冲量作用下梁板组合构件的破坏等级划分

Table 3 Failure grade classification of beam-slab composite structures under the same impulse

构件	方法	加载峰值/kPa	爆炸持续时间/ms	背爆面中心点最大位移/mm	挠跨比/%	破坏等级
1	实验	202.4	1000	5.90	0.30	轻度破坏
2		202.4	1000	5.85	0.29	轻度破坏
3		100.0	1000	3.14	0.16	轻度破坏
4		111.1	900	3.69	0.18	轻度破坏
5		125.0	800	4.51	0.23	轻度破坏
6		142.9	700	5.80	0.29	轻度破坏
7	模拟	166.7	600	6.70	0.34	轻度破坏
8		200.0	500	13.62	0.68	中度破坏
9		204.1	490	14.75	0.74	中度破坏
10		208.3	480	16.09	0.80	中度破坏
11		217.4	460	21.18	1.05	重度破坏
12		222.2	450	310.01	15.50	完全破坏

4 结 论

设计并进行了长持时爆炸冲击波荷载作用下梁板组合结构的实验, 结合有限元软件建立了数值模型, 并将模拟结果与实验结果进行了比较, 验证了模型的可行性。在此基础上, 分析了长持时爆炸荷载加载强度对构件抗爆性能的影响, 得出以下结论。

(1) 本文中建立的数值模型可以对结构破坏的动态演变过程进行可视化再现, 数值模拟计算结果与实验结果的毁伤相似度较高、背爆面中心点的位移峰值接近, 证实了该数值模型及算法的有效性。

(2) 相同冲量作用下, 随着长持时爆炸荷载峰值的提高, 梁板组合结构从整体轻微弯曲破坏, 过渡到弯剪联合破坏, 最终发展至短时间内构件冲切破坏; 组合构件中, 板部分破坏早于交叉梁部分, 当板部分混凝土整体贯穿破坏时, 组合构件丧失共同承载力。

(3) 本次实验的钢筋混凝土梁板组合结构的破坏等级划分和相应的破坏模式为: 挠跨比 $a \leq 0.5\%$ 时, 轻微破坏, 构件能够正常使用; 当 $0.5\% < a \leq 1.0\%$ 时, 中度破坏, 稍微维修后可继续正常使用; 当 $1.0\% < a \leq 1.5\%$ 时, 重度破坏, 较大维修后可继续使用; 当 $a > 1.5\%$ 时, 完全破坏, 组合构件完全丧失承载能力。

应注意的是, 本文中建立的破坏等级划分是依据本次实验的少量实验数据建立的, 建立的判据仅适用于本次实验的钢筋混凝土梁板组合构件, 对其他形式组合构件的毁伤判据需要在以后进一步研究。文中的数据可为钢筋混凝土梁板组合结构的抗爆研究与设计提供实验结果, 也为后续的钢筋混凝土建筑物整体毁伤评估奠定基础。

参考文献:

- [1] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型 [J]. *水利学报*, 1997(7): 72-77. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1997.07.013.
DONG Y L, XIE H P, ZHAO P, et al. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(7): 72-77. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1997.07.013.

- [2] 孙文彬, 王冰, WU C. 爆炸荷载下混凝土梁中混凝土和钢筋应变率研究 [J]. *混凝土*, 2008(12): 35–37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.12.011.
SUN W B, WANG B, WU C. Study on the strain rates of concrete and steel in concrete beams under blast loadings [J]. *Concrete*, 2008(12): 35–37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2008.12.011.
- [3] MALVAR L J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars [J]. *Materials Journal*, 1998, 95(5): 609–616.
- [4] 阎石, 张亮, 王丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析 [J]. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2005, 21(3): 177–180. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1922.2005.03.001.
YAN S, ZHANG L, WANG D. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2005, 21(3): 177–180. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1922.2005.03.001.
- [5] 史祥生. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的损伤破坏分析 [D]. 天津: 天津大学, 2008: 16–27. DOI: 10.7666/d.y1530778.
SHI X S. Damage assessment of RC slabs subjected to blast load [D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2008: 16–27. DOI: 10.7666/d.y1530778.
- [6] 贾敬尧. 近距爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动力响应及损伤评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 49–59. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2019.000263.
JIA J Y. Dynamic response and damage assessment of reinforced concrete slabs under close-in blast loading [D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 49–59. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2019.000263.
- [7] 李忠献, 师燕超, 史祥生. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土板破坏评定方法 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(6): 60–66. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.008.
LI Z X, SHI Y C, SHI X S. Damage analysis and assessment of RC slabs under blast load [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 60–66. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.06.008.
- [8] 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. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.06.004.
ZHANG X B, YANG X M, CHEN Z Y, et al. Explosion spalling of reinforced concrete slabs with contact detonations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2006.06.004.
- [9] WANG W, ZHANG D, LU F Y, et al. Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 27: 41–51. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.010.
- [10] 岳松林, 王明洋, 张宁, 等. 混凝土板在接触爆炸作用下的震塌和贯穿临界厚度计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
YUE S L, WANG M Y, ZHANG N, et al. A method for calculating critical spalling and perforating thicknesses of concrete slabs subjected to contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- [11] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2001.02.001.
FANG Q, LIU J C, ZHANG Y D, et al. Finite element analysis of failure modes of blast-loaded R/C beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(2): 1–8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2001.02.001.
- [12] 方秦, 吴平安. 爆炸荷载作用下影响 RC 梁破坏形态的主要因素分析 [J]. *计算力学学报*, 2003, 20(1): 39–42; 48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2003.01.009.
FANG Q, WU P A. Main factors affecting failure modes of blast loaded RC beams [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, 20(1): 39–42; 48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2003.01.009.
- [13] 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): 25–30.
LIU J C, FANG Q, GONG Z M, et al. Analysis of dynamic responses and failure modes of R/C beams under blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 25–30.
- [14] 崔满. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007: 24–47. DOI: 10.7666/d.y1811049.
CUI M. Experimental research of reinforced concrete beam under the explosive load [D]. Shanghai, China: Tongji University, 2007: 24–47. DOI: 10.7666/d.y1811049.
- [15] 汪维, 刘瑞朝, 吴颀, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁毁伤判据研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1421–1429. DOI:

- 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.012.
- WANG W, LIU R C, WU B, et al. Damage criteria of reinforced concrete beams under blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1421–1429. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.012.
- [16] 唐德高, 廖真, 薛宇龙, 等. 爆炸荷载下高强钢筋加强混凝土梁抗弯性能 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(3): 122–126. DOI: 10.13245/j.hust.170322.
- TANG D G, LIAO Z, XUE Y L, et al. Research for flexural behavior of concrete beams with high-strength reinforcements under blast loading [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(3): 122–126. DOI: 10.13245/j.hust.170322.
- [17] WU C, OEHLERS D J, REBENTROST M, et al. Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(9): 2060–2069. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.
- [18] 谢卫红, 董昊, 辛家宝. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁的动力性能分析 [J]. *混凝土*, 2009(7): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.07.007.
- XIE W H, DONG H, XIN J B. Analysis of dynamic behavior of reinforced concrete beam with CFRPS [J]. *Concrete*, 2009(7): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.07.007.
- [19] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2016.08.009.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2016.08.009.
- [20] EBEAD U, SAEED H. Flexural and interfacial behavior of externally bonded/mechanically fastened fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2014, 111(4): 741–751. DOI: 10.14359/51686628.
- [21] 刘三丰, 金丰年, 周寅智, 等. GFRP 筋混凝土梁抗爆性能试验研究与数值分析 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(2): 024610. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0178.
- LIU S F, JIN F N, ZHOU Y Z, et al. Experimental study and numerical simulation of explosion resistance of GFRP reinforced concrete beams [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(2): 024610. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0178.
- [22] 巩玉发, 段劲松, 段圣允. 冲击荷载下型钢混凝土梁的动态响应及破坏模式仿真分析 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(3): 71–75. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2018.03.017.
- GONG Y F, DUAN J S, DUAN S Y. Dynamic respond and finite element analysis of failure mode of steel reinforced concrete beams under impact loads [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(3): 71–75. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2018.03.017.
- [23] LI Y, ALGASSEM O, AOUDE H. Response of high-strength reinforced concrete beams under shock-tube induced blast loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189: 420–437. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.005.
- [24] Dassault Systems Simulia Corporation. ABAQUS analysis user's manual [M]. Providence, USA: Dassault Systems Simulia Corporation, 2016.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部组织. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [26] 张飞, 马建勋, 南燕. 混凝土塑性损伤模型参数的选取与验证计算 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(11): 7–11, 29. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.01.007.06.
- ZHANG F, MA J X, NAN Y. Parameters selection and verification calculation of concrete plastic damage model [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2021(11): 7–11, 29. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.01.007.06.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用余热处理钢筋: GB/T 13014—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

(责任编辑 张凌云)