

引用格式: 齐宝欣, 刘师琦, 张海霞, 等. 内部爆炸作用下钢筋混凝土框架结构动态响应数值模拟[J]. 工业建筑, 2026, 56(4): 130-140. QI Baoxin, LIU Shiqi, ZHANG Haixia, et al. Numerical Simulation of Dynamic Response of RC Frame Structures Under Internal Explosion Loads [J]. Industrial Construction, 2026, 56(4): 130-140 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG24042901

## 内部爆炸作用下钢筋混凝土框架结构动态响应数值模拟\*

齐宝欣<sup>1,2</sup> 刘师琦<sup>1</sup> 张海霞<sup>1</sup> 阎石<sup>1</sup> 范书立<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要** 为研究室内爆炸作用下钢筋混凝土框架结构的动态响应, 通过数值模拟方法, 探究了室内爆炸钢筋混凝土板和梁柱节点的破坏模式。基于已有的钢筋混凝土框架结构在内部爆炸荷载作用下的试验数据, 利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立一个分离式的单层单跨钢筋混凝土缩尺三维有限元模型, 考虑炸药爆炸冲击波在空气域传递与结构的流固耦合作用和应变率参数对材料本构模型的影响规律, 模拟 200 g 炸药在框架内部中心区域爆炸的情况。模拟结果与试验结果吻合良好, 验证了模型选用材料和参数设置的正确性。此外, 还分析了板和梁的破坏失效过程, 整体来看, 破坏主要发生在板梁交界处和梁柱交界处。采用控制变量法研究了混凝土强度等级以及板和梁配筋方式等参数对钢筋混凝土框架结构抗爆性能的影响。研究结果表明: 提高混凝土强度等级可以提高结构的抗爆性能。然而, 一定程度上提高混凝土强度等级后, 进一步提升并不会具有显著意义; 采用双层双向配筋可以稍微减少顶板的竖向位移和混凝土开裂; 增加钢筋直径可以显著减少顶板位移, 但会增加混凝土开裂; 适当缩短板内钢筋伸入梁内的长度可提高顶板的抗爆性能; 在提高框架梁的抗爆性能时, 应首先考虑采用梁内纵筋加粗的配筋方式, 其次在破坏严重区域设置加密箍筋; 增加钢筋混凝土框架内部配筋直径可以提高整体抗爆性能。

**关键词** 钢筋混凝土框架结构; 爆炸荷载; 动态响应; 流固耦合; 破坏模式

## Numerical Simulation of Dynamic Response of RC Frame Structures Under Internal Explosion Loads

QI Baoxin<sup>1,2</sup> LIU Shiqi<sup>1</sup> ZHANG Haixia<sup>1</sup> YAN Shi<sup>1</sup> FAN Shuli<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic response of reinforced concrete frame structures under indoor explosion conditions, the study explored the failure modes of reinforced concrete slabs and beam-column joints through numerical simulation methods. Based on existing experimental data of reinforced concrete frame structures under internal explosion loads, a segregated single-layer single-span reduced-scale three-dimensional finite element model was established using the finite element software ANSYS/LS-DYNA. This study considered the shock wave propagation of explosive charge in the air domain, the fluid-structure coupling effect, and the influence of strain rate parameters on the material constitutive model. The simulation modeled the explosion of a 200 g explosive charge in the central area of the frame. The simulated results were in good agreement with the experimental results, validating the cor-

\* 国家自然科学基金项目(52278196); 海岸与近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817)。

第一作者: 齐宝欣, 博士, 副教授, 主要从事建筑结构抗爆性能分析方面的研究。

电子信箱: bxqi@sjzu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-29

rectness of the material and parameter settings in the model. Additionally, the failure processes of the slabs and beams were analyzed, and overall, failure predominantly occurred at the junctions of the slab-beam and beam-column. By applying a controlled variable method, this study investigated the influence of parameters such as concrete strength grade and slab and beam reinforcement methods on the blast resistance of reinforced concrete frame structures. The results indicated that increasing the concrete strength grade enhanced the structure's blast resistance. However, after a certain degree of increase in concrete strength grade, further increments did not yield significant improvements. Using double-layer bidirectional reinforcement slightly reduced vertical displacement and concrete cracking in the top slab. Increasing the rebar diameter significantly reduced slab displacement but might increase concrete cracking. Properly shortening the length of rebars extending from the slab into the beam enhanced the blast resistance of the slab. To improve the blast resistance of frame beams, the method of increasing the diameter of longitudinal reinforcement inside the beam should be considered first, followed by the application of enhanced hoop reinforcement in heavily damaged areas. Increasing the diameter of the internal reinforcement of the reinforced concrete frame can improve overall blast resistance.

**Keywords:** reinforced concrete frame structure; blast loading; dynamic response; fluid-structure coupling; failure mode

## 0 引言

虽然如今世界局势已趋于太平,但各种恐怖袭击事件仍然会发生在世界各地。恐怖袭击通常表现为炸弹爆炸,这些爆炸的发生在给建筑物造成破坏的同时,也给建筑物内外人们的生命财产造成了巨大的损失。现在大多数建筑物都采用钢筋混凝土结构,在爆炸发生时,其抵抗爆炸荷载的能力偏弱,而真正给人民财产带来威胁的是爆炸发生时的结构倒塌以及随之带来的高速飞溅的混凝土碎片<sup>[1-6]</sup>。因此提高现有建筑物抵抗爆炸荷载的性能,减小由于爆炸冲击带来的建筑物连续倒塌以及爆炸碎片的危险,引起了世界各地土木以及建筑界的广泛关注。

由于爆炸冲击波作用时间短且传播速度快,因此爆炸冲击载荷作用下钢筋混凝土结构的动力响应较为复杂<sup>[7-8]</sup>。目前,国内外学者对在爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架和构件的抗爆性能已有一系列研究:柳锦春等<sup>[9]</sup>创建了Timoshenko梁动力有限元法,研究了钢筋混凝土梁在爆炸荷载下的动态响应,发现钢筋混凝土梁发生了剪切破坏。魏雪英等<sup>[10]</sup>采用ANSYS/LS-DYNA有限元软件分析了爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动态响应,通过对比矩形柱和方柱在相同爆炸荷载作用下的破坏情况发现方柱的抵抗爆炸荷载能力强于矩形柱。师燕超等<sup>[11]</sup>采用ANSYS/LS-DYNA有限元软件对钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的动态响应和力学性能进

行研究,发现混凝土强度、纵筋配筋率和箍筋配筋率等因素对钢筋混凝土柱的抗爆性能有着紧密影响。Jayasooriya等<sup>[12]</sup>建立了10层钢筋混凝土框架模型,运用两阶段有限元分析方法,观察钢筋混凝土框架结构在近距离爆炸荷载作用下损伤程度,并分析框架结构损伤后的剩余承载力。姚宇飞等<sup>[13]</sup>采用ANSYS/LS-DYNA研究了钢筋混凝土结构在不同比例距离爆炸荷载作用下的动力响应,提出通过引入爆炸荷载放大系数来考虑爆炸荷载作用的影响具有更广的适用范围。Hong等<sup>[14]</sup>对近距离爆炸荷载作用下的钢筋混凝土板进行了数值模拟,并对其层裂特性进行分析。何庆锋等<sup>[15]</sup>对比分析被炸柱中有、无纵筋的数值计算,结果表明:在爆破过程中,柱内纵筋外鼓变形对上部结构会产生较大的向下拉力作用,导致结构向下运动,从而加大了结构的倒塌风险。Toy等<sup>[16]</sup>使用数值和经验方法分析了炸药离墙的距离对混凝土挡土墙的影响。Gholipour等<sup>[17]</sup>通过DYNA模拟钢筋混凝土梁在近场爆炸及冲击荷载组合下的破坏,研究梁在不同加载模式下的破坏特征及变化趋势。Sevim等<sup>[18]</sup>模拟了两层钢筋混凝土建筑在不同装药重量炸药下的爆破响应,结果表明:100 g炸药爆炸只会建筑物上造成可忽略不计的裂缝;在250 g炸药爆炸作用下,构件会产生坍塌趋势;而500 g炸药的爆炸,结构将完全坍塌。调研发现国内外学者对钢筋混凝土框架结构抗爆性能已有一定的研究基础,但是针对钢筋混凝土框

架结构对于内部爆炸作用响应的研究较少,且由于研究条件和研究对象限制,绝大部分的研究手段为数值模拟研究,缺少试验数据支撑,仍有许多问题尚未解决。

## 1 钢筋混凝土框架模型设计

为验证内部爆炸作用下钢筋混凝土框架结构响应的数值模拟结果,对文献[19]中的钢筋混凝土缩尺结构爆炸试验进行了数值模拟计算,主要模拟了结构模型在不同起爆点位置、不同爆炸当量的试验研究。根据模型的结构强度相似律进行缩尺设计,比例为1/6。

单层单跨钢筋混凝土框架模型的长×宽×高为750 mm×600 mm×500 mm,模型测点位置以及设置爆点位置如图1、2所示。顶板保护层厚度为5 mm,梁截面尺寸为40 mm×80 mm,配筋率为2.15%;柱截面尺寸为75 mm×75 mm,配筋率为2.3%。模型梁、柱中纵筋均选用型号HRB400的热轧钢筋,箍筋均选用直径2 mm的镀锌铁丝。具体配筋如图3、4所示。板中配筋选用直径1 mm的镀锌铁丝,间距20 mm。

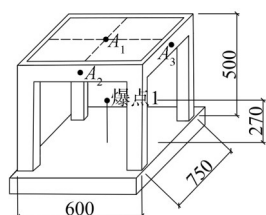


图1 试验模型测点位置 mm

Fig. 1 Locations of measurement points for the experimental model

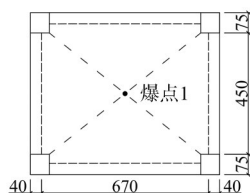


图2 试验模型爆点位置平面 mm

Fig. 2 Plan of the explosion point location of the experimental model

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 数值模型

对文献[20]中的200 g炸药位于框架内部中心区域爆炸情况下的KJA-2模型工况进行有限元分析,采用“结构-炸药-空气”相互作用的耦合模型。应用ANSYS/LS-DYNA软件建立1/6单层单跨钢筋混凝土缩尺有限元模型。混凝土选择强度等级为

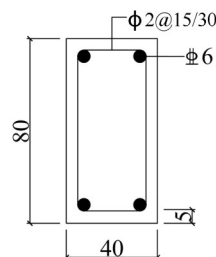


图3 梁配筋 mm

Fig. 3 Reinforcement of beams

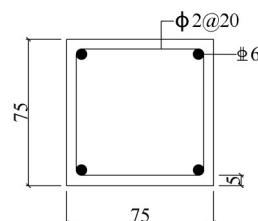
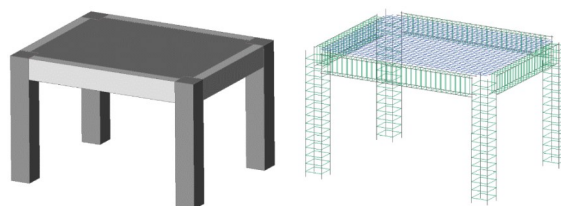


图4 柱配筋 mm

Fig. 4 Reinforcement of columns

C40的细石混凝土,采用Solid 164进行模拟。柱、梁内纵筋强度等级为HRB400,箍筋、板中配筋采用镀锌铁丝,采用Beam 161进行模拟。建模中混凝土和钢筋单元采用共结点,即钢筋单元上的结点与其对应混凝土位置的结点共用。由于大多数情况下是否考虑黏结滑移对计算结果影响不大,为计算简便,不考虑混凝土和钢筋间的黏结滑移作用,即连接假定为刚性连接。钢筋混凝土框架1/6模型如图5所示,采用分离式建模,体现了两种材料力学性能的差异,单独考虑单元之间的承载贡献,当混凝土达到极限承载力而发生侵蚀时,钢筋单元仍继续承担荷载直至失效。



(a) 混凝土1/6模型

(b) 钢筋1/6模型

图5 钢筋混凝土框架1/6模型

Fig. 5 1/6 model of the reinforced concrete frame

钢筋混凝土框架采用Lagrange网格进行建模,在保证计算时间短的前提下,为提高计算精确度,网格尺寸设为10 mm,考虑到爆炸后可能会发生网格畸变问题,炸药和空气采用ALE建模,炸药为200 g当量TNT,起爆点距离顶板引爆面0.35 m,空气域除底面外各面设为无反射边界。综合计算时

间和精确度,网格尺寸均设为 10 mm。混凝土单元数量为 118128,钢筋单元数量为 6416。框架柱底座采用 MAT\_RIGID,设为刚性地面的网格尺寸为 40 mm,柱与底座之间设置自动面-面接触。数值计算模型如图 6 所示。

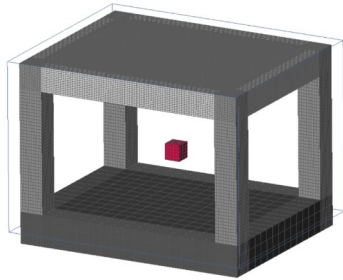


图 6 数值计算模型  
Fig. 6 Numerical model

## 2.2 材料模型

混凝土采用损伤模型 MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3,能较为准确地模拟混凝土在大变形、高应变率下的力学性质,确定好密度和泊松比后,只需输入剪切模量数值,在后处理中其他材料参数可自动生成。具体模型参数见表 1。

表 1 混凝土材料参数

| Table 1 Material parameters of concrete  |                   |     |                  |            |
|------------------------------------------|-------------------|-----|------------------|------------|
| 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量/<br>MPa      | 泊松比 | 剪切模量/<br>MPa     | 塑性失效<br>应变 |
| $2.44\times 10^3$                        | $3.21\times 10^4$ | 0.2 | $1.3\times 10^3$ | 0.15       |

钢筋采用随动硬化塑性模型 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC<sup>[20]</sup>,该模型能够较准确地描述材料在高温、大变形下的力学性能,同时考虑材料的应变率效应和失效准则。在爆炸荷载作用下,由于爆炸冲击波传播的速度远远大于热传递的速度,配筋单元中的热效应可以忽略,所以本文所有配筋单元不考虑热效应,具体模型参数见表 2。

表 2 钢筋材料参数<sup>[21-23]</sup>

| Table 2 Material parameters of rebars |                                          |                   |         |              |              |            |
|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------|--------------|--------------|------------|
| 类型                                    | 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模<br>量/MPa      | 泊松<br>比 | 屈服强<br>度/MPa | 剪切模<br>量/MPa | 塑性失<br>效应变 |
| 纵筋                                    | $7.8\times 10^3$                         | $2.00\times 10^5$ | 0.3     | 430          | 76.9         | 0.023      |
| 箍筋                                    | $7.8\times 10^3$                         | $1.92\times 10^5$ | 0.3     | 430          | 76.9         | 0.021      |

炸药的材料模型采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,基于爆炸气体压力-体积的关系用 EOS\_JWL 状态方程去描述炸药爆轰的过程。JWL 状态方程表达式如式(1)所示。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: $p$ 为爆轰波压力; $V$ 为爆轰产物体积相对于初始体积的比值; $E_0$ 为单位体积爆轰能量; $\omega$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 均为状态方程系数。炸药材料具体模型参数见表 3。

表 3 炸药材料参数<sup>[23-25]</sup>

| Table 3 Material parameters of the explosive |                                           |                  |                                              |              |              |       |       |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|--------------|--------------|-------|-------|
| 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )     | 爆炸速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 压力/<br>MPa       | $E_0$ /<br>( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | $A$ /<br>GPa | $B$ /<br>GPa | $R_1$ | $R_2$ |
| $1.630\times 10^3$                           | $6.93\times 10^3$                         | $2.1\times 10^4$ | $7\times 10^6$                               | 371          | 3.23         | 4.15  | 0.95  |

空气视为理想气体,此时气体分子之间无相互作用力。空气的材料模型采用 MAT\_NULL,状态方程采用 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 描述,状态方程表达式如式(2)所示。

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_a \quad (2)$$

其中  $\mu = 1/V - 1$

式中: $P$ 为压力; $C_0\sim C_6$ 为常量; $E_a$ 为单位体积初始内能; $V$ 为气体的相对体积。空气材料具体模型参数见表 4。

表 4 空气材料参数<sup>[26-29]</sup>

| Table 4 Material parameters of air       |       |       |       |       |       |       |       |                                              |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------------------|
| 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $E_a$ /<br>( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
| 1.22                                     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   | 0     | 253                                          |

## 2.3 数值模拟验证

在结构静力平衡的基础上,建立炸药和空气模型,模拟内部爆炸荷载对结构的作用,计算终止时间设为 60 ms,结构趋于稳定后移除炸药、空气和结构失效单元,对剩余结构进行非线性动力分析。图 7 为 200 g 炸药位于框架内部中心区域爆炸工况下的数值模拟结果(右图)与试验现场照片(左图)对比。可以看出,钢筋混凝土顶板背爆面出现弯曲破坏特征,顶板外鼓,中心最先产生裂缝,板内铁丝露出,裂缝延伸至梁板交界处。梁与板交界处出现明显冲切破坏,形成贯通上下面的冲切锥面,整个板在爆炸冲击作用下有明显起拱现象,但由于板内铺设镀锌铁丝的约束,顶板并未冲飞。梁柱节点区域形成大量的冲切裂缝,在纵筋的作用下并未完全断开。由图 7 可知,模拟结果与试验中出现的顶板起拱、梁柱节点断开等现象吻合良好。

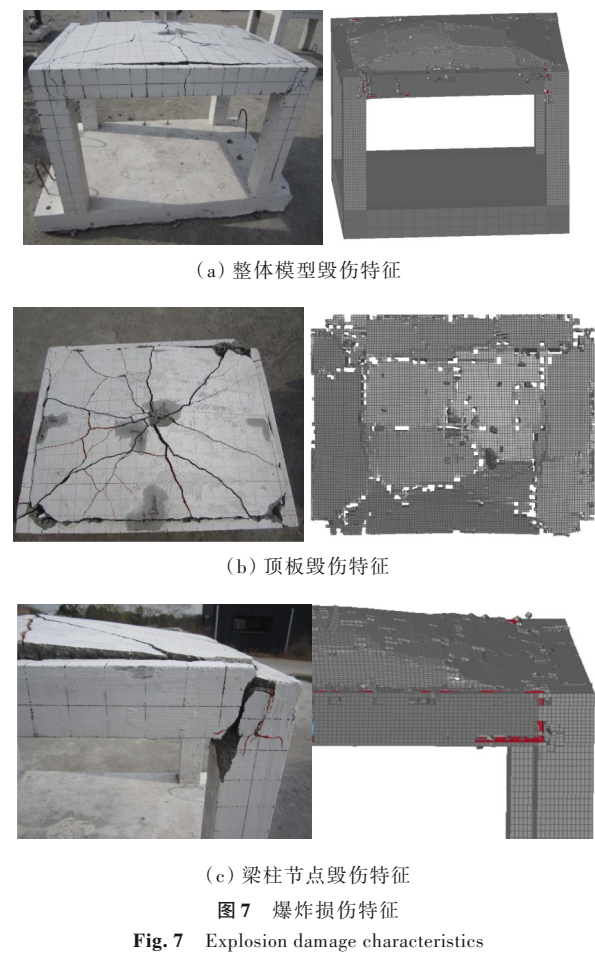


Fig. 7 Explosion damage characteristics

图8为 $A_2$ 、 $A_3$ 测点加速度计算值与试验值结果对比。从图8(a)中可以看出,加速度响应迅速,约为十几毫秒, $A_2$ 、 $A_3$ 测点在首个波峰到达的时间内均未出现最大加速度,最后随着爆炸冲击波逐渐消散,加速度响应减弱并逐渐趋近于静止。从图8(b)中可以看出,构件表面加速度响应计算值与试验测得曲线相吻合,表明采用本文拟用的模拟计算参数能较好地模拟钢筋混凝土框架在内部爆炸作用下的响应过程。

3 钢筋混凝土框架结构抗爆性能分析

3.1 混凝土强度对试件抗爆性能的影响

在其他参数不变的条件下,设计4组不同混凝土强度等级的钢筋混凝土框架结构工况(表5),均在相同爆炸环境下进行有限元模拟。

4种不同混凝土强度下钢筋混凝土框架的破坏形式如图9所示。可以看出,相较于其他3种工况,工况C-3破坏形式较为明显,顶板、梁和柱飞碎的混凝土更多,钢筋有明显露出迹象;而工况C-4、C-5

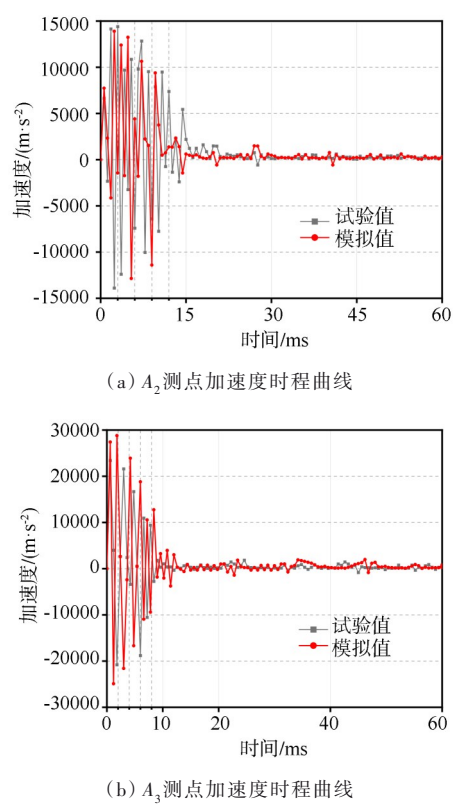


图8 加速度计算值与试验值对比

Fig. 8 Comparison between calculated and experimental acceleration values

表5 不同混凝土强度下工况说明

Table 5 Description of working conditions for different concrete strengths

| 工况编号    | C-3 | C-4 | C-5 | C-6 |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 混凝土强度等级 | C30 | C40 | C50 | C60 |

中仅在顶板、梁柱交界处等易损部位发生混凝土破坏。选取顶板 $A_1$ 测点和长轴梁 $A_2$ 测点分别绘制合位移时程曲线,如图10所示。可以发现,爆炸荷载作用下构件位移与混凝土强度等级呈相关趋势,即混凝土强度等级越高,构件产生的位移越小。其中,混凝土等级为C30的板最大位移为74.5 mm,梁最大位移为6.4 mm;混凝土等级为C40的板最大位移为62.4 mm,梁最大位移为2.7 mm;混凝土等级为C50的板最大位移为59.5 mm,梁最大位移为2.4 mm;混凝土等级为C60的板最大位移为50.7 mm,梁最大位移为2.2 mm。相较于C30的板,C40、C50和C60板的最大位移分别减少了16.2%、20.1%和31.9%,梁最大位移分别减少了57.8%、62.5%和65.6%。

总的来说,混凝土强度等级越高,钢筋混凝土

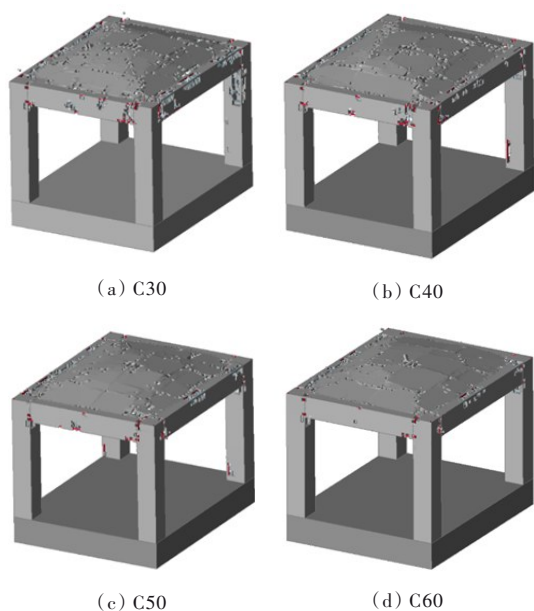
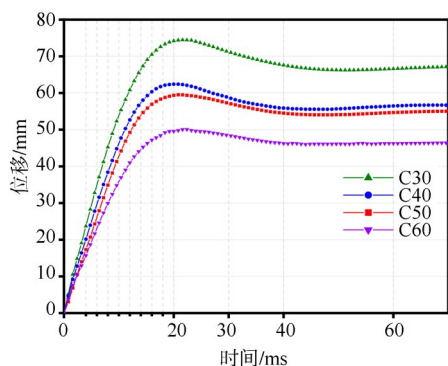
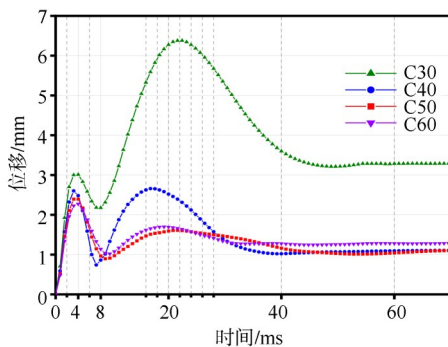


图9 不同混凝土强度下钢筋混凝土框架的破坏形式

Fig. 9 Failure modes of reinforced concrete frames under different concrete strengths



(a)  $A_1$  板测点



(b)  $A_2$  梁测点

图10 不同混凝土强度下钢筋混凝土框架构件的位移时程曲线

Fig. 10 Displacement time-history curves of reinforced concrete frame components under different concrete strengths

框架构件的抗爆性能越好。这是因为提高混凝土强度等级可以提高钢筋混凝土框架结构的整体强

度和刚度,增强各构件的抗拉性能和抗挤压性能等。此外,高强混凝土具备更有效的吸收并分散爆炸荷载的能力,破坏模式更加韧性,从而提高钢筋混凝土框架结构的抗爆性能。然而,由于混凝土具有脆性,当混凝土等级达到一定程度后,继续提高混凝土强度意义不大,可能反而会降低框架的抗爆性能。

### 3.2 钢筋混凝土顶板破坏状况

采用塑性应变云图来描述顶板的有效塑性应变和混凝土内部的损伤演化程度,以便进一步预测混凝土顶板失效。图11为顶板背爆面在结构内部爆炸冲击波作用下的破坏过程,红色区域混凝土单元塑性应变达到极限值。可以看出,炸药在空气中起爆先形成球形冲击波,0.5 ms时冲击波已经到达顶板迎爆面表面中心区域上,并且由板中心区域沿四周扩散成应力波。在爆炸初期( $t=1$  ms),由于顶板迎爆面受到压缩波而发生压坏,背爆面中心区域塑性应变迅速增大,爆炸冲击波对混凝土板产生的向上冲击力大于结构自重,使其出现向上运动趋势,混凝土板中心位置应力最大,发生受拉破坏并开始产生失效单元。随着爆炸时间的增长,在15 ms时顶板中心塑性破坏开始向四周扩展,爆炸冲击波导致顶板起拱,拱形顶板使得中心区域的混凝土先达到抗压强度而被压碎,出现数条延伸至梁板交界处的裂缝。起爆30 ms后,结构趋于稳定,整个混凝土板表面产生数条裂缝,沿裂缝有内部铁丝露出,但顶板无严重破坏,表明在内部铁丝的约束下,混凝土可充分发挥其抗压能力强的特点,在有效吸收爆炸能量的同时仍能保持其整体性。通过有效塑性应变云图(图11)可以看出,顶板在出现冲切破坏的同时,也产生了弯曲破坏现象。主要是由于混凝土板中铁丝的存在,提高了顶板抵抗冲切破坏临界值的同时,也引起了整块板面的弯曲变形。针对爆炸冲击波的传播特点,为提高顶板抵抗爆炸荷载的能力,减小混凝土的破坏,应提高板内镀锌铁丝的抗拉能力。

图12为混凝土顶板中心节点在爆炸荷载作用下的竖向位移曲线。可见:爆炸冲击波作用在顶板使顶板产生竖向位移,这一过程对应图中0~15 ms的运动曲线;当冲击波趋于环境压力衰减时( $t=15$  ms),顶板的竖向位移不再增加;15~30 ms为结构向下运动阶段,这是因为随着冲击波对结构的向上作用力减弱,且内部铁丝层对顶板产生向下作用力,从而使得结构向下运动;30 ms后,结构趋于稳定。

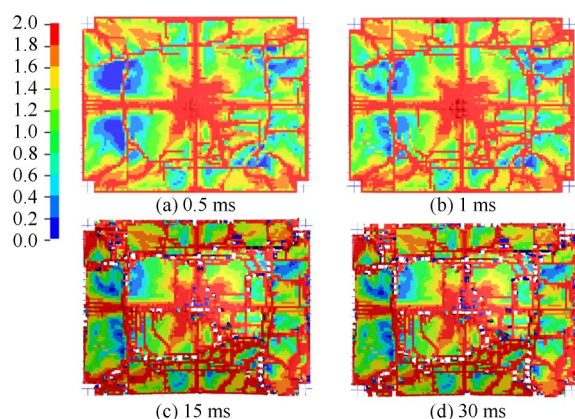
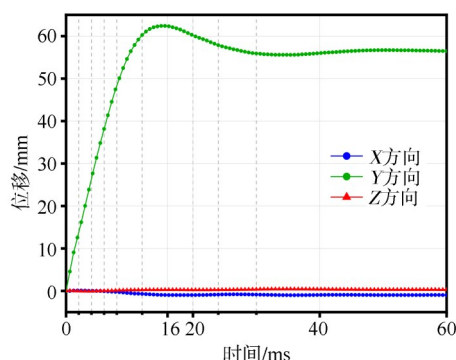


图 11 爆炸荷载作用下混凝土顶板破坏过程

Fig. 11 Failure process of the concrete top slab under explosive loading

图 12 顶板  $A_1$  测点竖向位移时程曲线Fig. 12 Vertical displacement time-history curves of measuring point  $A_1$  on the top slab

### 3.3 板内配筋方式对结构抗爆性能影响

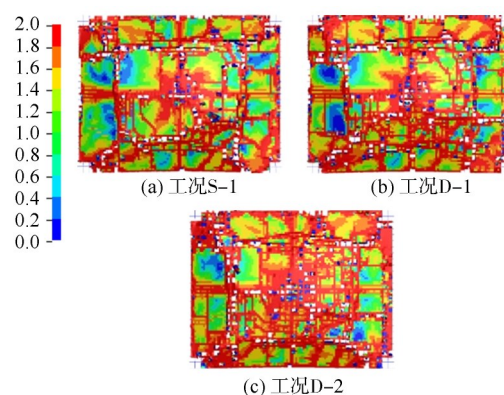
其他参数不做变动,只改变顶板内配筋方式,具体顶板内不同配筋方式的工况见表6。

表 6 不同配筋方式下板工况  
Table 6 Slab working conditions under different reinforcement methods

| 工况编号  | 配筋方式                               |
|-------|------------------------------------|
| S-1   | 单层直径 1 mm 镀锌铁丝                     |
| D-1   | 双层直径 1 mm 镀锌铁丝                     |
| D-2   | 单层直径 2 mm 镀锌铁丝                     |
| S-1-C | 单层直径 2 mm 镀锌铁丝<br>缩短单层直径 1 mm 镀锌铁丝 |

图 13 为工况 S-1、工况 D-1 和工况 D-2 中顶板的应变云图。可以看出,当  $t=30$  ms 时,塑性损伤破坏基本趋于稳定,与配筋直径 1 mm 的顶板相比,增加至直径 2 mm 后,顶板产生的混凝土碎片飞散更多、裂缝更宽,这是因为在内部爆炸冲击波对顶板作用后,由于直径 2 mm 镀锌铁丝的抗拉强度更大,

混凝土吸收大量爆炸能量,使得更多的混凝土单元达到抗压强度而被压碎。与板内单层配筋方式相比,采用双层双向配筋的顶板应力分布更均匀,并且在产生裂缝的部位仍有部分混凝土单元未发生失效,其主要原因是内部采用了双层配筋,在爆炸发生后顶板吸收冲击波时可以更均匀地将应力分布到混凝土上,同时增加一层配筋可以保留一部分混凝土不产生飞溅破坏现象。3 种配筋方式顶板的损伤模式均为混凝土中间区域向上鼓起,并产生延伸至梁板交界处的裂缝。

图 13 不同配筋方式下顶板应变云图 ( $t=30$  ms)Fig. 13 Strain contour plots of top slabs under different reinforcement methods ( $t=30$  ms)

工况 S-1-C 在配置单层 2 mm 直径镀锌铁丝的顶板基础上缩短板内镀锌铁丝伸入梁内的长度,镀锌铁丝的端部位于梁板交界边缘处,如图 14 所示,使得框架在内部爆炸作用下顶板迎爆面中心出现混凝土破碎的同时板与梁的交界处发生冲切破坏。模拟结果显示其顶板产生的裂缝更细,且飞碎的混凝土更少,如图 15 所示。

在顶板 XZ 方向对角线上均匀选取 9 个结点作为测点,用于描述顶板位移,绘制 4 个工况下的结点位移曲线,如图 16 所示。由图可知,测点在向上运动过程中,设置单层直径 1 mm 镀锌铁丝顶板的最大位移为 62 mm,采用双层双向配筋方式的顶板最大位移和残余位移与单层配筋方式的顶板相差不大,减少了 14.5%;与改变配筋方式相比,内部直径 2 mm 钢筋的顶板最大位移和残余位移减小效果显著,减少了 43.6%;缩短板内镀锌铁丝伸入梁内的长度的设置形式使得顶板中心位置最大位移为 47.2 mm,略小于将镀锌铁丝伸入梁内的顶板。

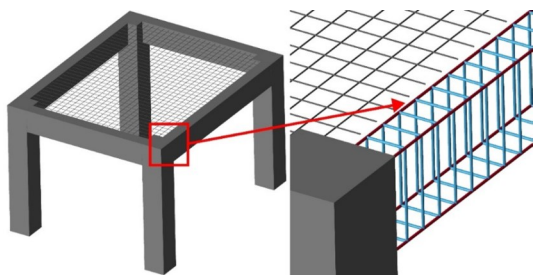


图 14 工况 S-1-C 的顶板配筋方式

Fig. 14 Reinforcement of the top slab in Working Condition S-1-C

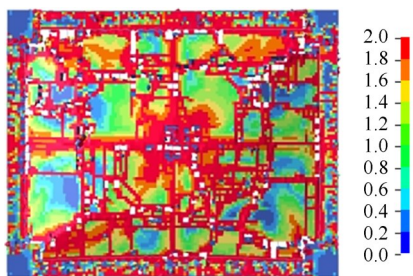
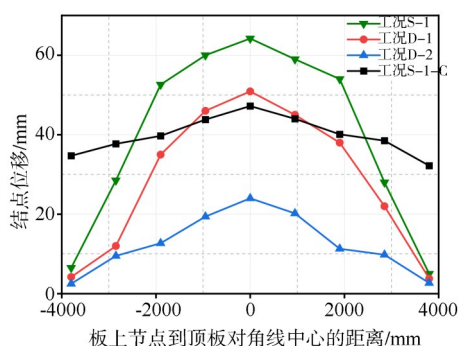
图 15 缩短钢筋长度顶板应变云图( $t=30$  ms)Fig. 15 Strain contour plot of the top slab with shortened rebar length ( $t=30$  ms)

图 16 不同配筋方式下顶板节点位移

Fig. 16 Displacements of top slab nodes under different reinforcement methods

### 3.4 钢筋混凝土梁破坏状况

图 17 为钢筋混凝土框架长轴梁背爆面在爆炸冲击波作用下的破坏过程,应变云图中红色区域表示混凝土单元塑性应变达到极限值。选取梁上  $A_2$  测点绘制位移时程曲线,如图 18 所示。由图可得,内部爆炸作用下梁最终位移趋势为沿  $X$ - $Y$  轴呈外翻状。结合应变云图 17 和位移时程曲线图 18 可以看出,在 0.5 ms 时,冲击波已经到达梁迎爆面中部位置上,此时梁中部的应力最大;3 ms 时,应力波开始由梁中部区域沿梁板交界处向两端扩散,梁沿  $X$ 、 $Y$  方向产生位移;20 ms 时梁中部应力继续扩散,梁板交界处开始产生失效单元,梁柱节点区域应力迅速增大,呈现冲切破坏特征,梁整体位移逐渐稳定;

起爆 40 ms 后梁动态响应趋于稳定,破坏主要发生在梁板交界处和梁柱节点区域,且主要是混凝土破碎,钢筋变形较小。

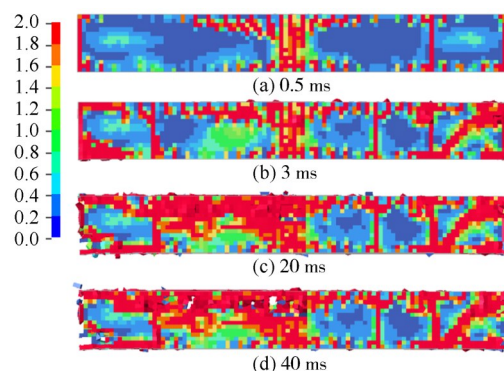
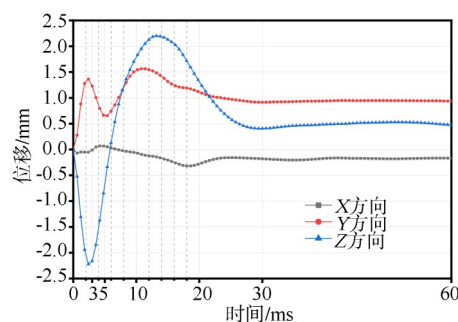


图 17 钢筋混凝土梁破坏过程

Fig. 17 Failure process of the reinforced concrete beams

图 18 梁  $A_2$  测点位移时程曲线Fig. 18 Displacement time-history curve at measuring point  $A_2$  of the beam

### 3.5 梁内配筋方式对结构抗爆性能影响

通过模拟结果可知爆炸后钢筋混凝土梁的破坏主要发生在梁柱节点区域。在混凝土和炸药等参数不变的前提下只改变梁内配筋方式,具体梁内不同配筋方式的工况见表 7。

表 7 不同配筋方式下梁工况

Table 7 Beam working conditions under different reinforcement methods

| 工况编号 | LB-1 | LB-2 | LB-3 |
|------|------|------|------|
| 配筋方式 | 初始配筋 | 纵筋加粗 | 箍筋加密 |

图 19 为爆炸 40 ms 后 3 种配筋方式下梁的应变云图。可知,纵筋加粗后的梁在爆炸荷载下应力仍集中在梁中部、梁柱节点区域,但相较于原始配筋方式梁整体的应力有明显减小,且在爆炸后期产生的混凝土破坏明显减少,这是由于梁内纵筋加粗后提高了弹性强度,从而有效减少梁的位移。若不改变纵筋横截面直径,在梁应力集中区域设置箍筋加

密,梁中端的箍筋间距设为 10 mm。在爆炸荷载下设置箍筋加密后的梁整体应力均匀分布,梁柱节点区域破坏有所减少,由梁端向梁中心位置均匀产生混凝土碎片,说明中部设置箍筋加密后能最大程度地限制梁两端的位移。

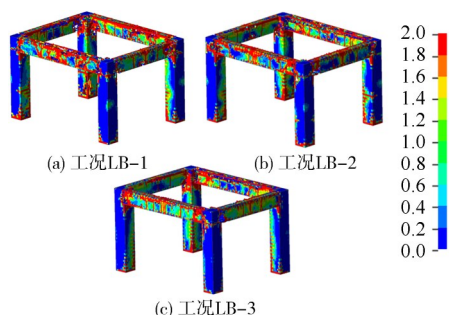


图 19 不同配筋方式下梁应变云图( $t=40$  ms)

Fig. 19 Strain contour plots of beams under different reinforcement methods ( $t=40$  ms)

在长轴梁外侧均匀选取 9 个结点作为测点,用于描述梁的位移,3 个工况下的结点位移曲线如图 20 所示。由图可知,相较于原始配筋方式,改变配筋方式后的梁位移有明显减少,且合位移曲线相对平缓,这是因为在分别进行纵筋加粗和箍筋加密后,梁内钢筋抗拉强度有所提升,进而有效减少梁柱节点区域位移。整体来看,原始配筋方式梁最终位移最大值为 12.1 mm,跨中挠度为 1.61%,毁伤等级为无毁伤。进行纵筋加粗和箍筋加密后能有效减小位移峰值,与原始配筋方式相比,分别减小了 54.5% 和 41.7%。改变配筋方式后的两种梁柱节点区域均未产生混凝土剧烈破坏,因此改变梁内配筋方式对提高梁柱节点抗爆性能是有效的,3 种配筋方式中梁内采用 10 mm 纵筋配筋的梁合位移最小,表明其抗爆性能优于另外两种。

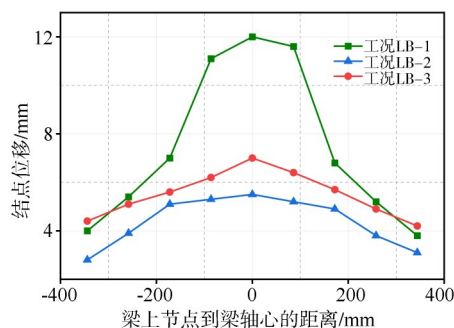


图 20 不同配筋方式下梁结点位移

Fig. 20 Displacements of beam nodes under different reinforcement methods

### 3.6 配筋方式对钢筋混凝土框架结构内部爆炸作用的影响

为清楚了解配筋方式对钢筋混凝土框架结构内部爆炸作用下的影响,在原结构基础上四面增加填充墙,并建立三层两跨的钢筋混凝土框架结构,采用塑性应变云图来描述钢筋混凝土框架的损伤演化程度。从图 21 中可以看出,在 3 ms 时,冲击波已到达填充墙内部和顶板底部,并转化成应力波开始沿柱、梁传递。在 10 ms 时,构件柱、板、梁交界处应变明显,开始出现破坏趋势,这一过程对应图 21 (b)。在 20 ms 时,顶板向 Y 轴鼓起,梁板交界处发生明显冲切破坏,这是因为四面填充墙的存在影响了框架结构内部爆炸冲击波的传播,框架结构内部应力显著提高,使得顶板、梁和柱的破坏显著增加。

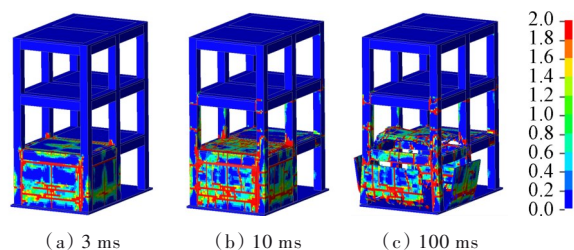


图 21 200g 炸药内部爆炸作用下框架结构应变云图

Fig. 21 Strain contour plots of the frame structure under internal explosion of 200 g explosive

其他条件不变,将构件内部纵筋直径由 6 mm 增至 10 mm,板内铁丝直径由 1 mm 增至 2 mm,如图 22 所示。可以看出,钢筋加粗的框架板破坏明显减小,整体结构柱和梁的应变也较小。选取两种工况下一层长轴梁  $A_3$  测点绘制位移时程曲线(图 23),可以看出,钢筋未加粗和钢筋加粗的框架梁跨中最大位移分别为 200 mm 和 93 mm。在其他条件不变的情况下,加粗混凝土框架结构板、梁和柱内钢筋的直径可以减轻内部爆炸作用下结构的破坏程度,提高抵抗内部爆炸荷载的性能。

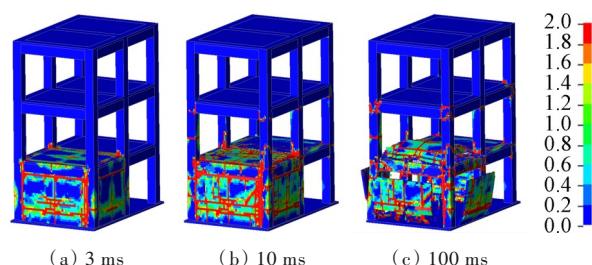


图 22 200g 炸药内部爆炸作用下钢筋加粗框架结构应变云图

Fig. 22 Strain contour plots of the frame structure with thickened rebars under internal explosion of 200 g explosive

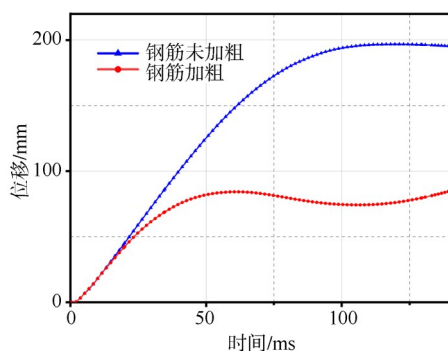


图 23 两种配筋方式下的  $A_3$  测点跨中位移时程曲线

Fig. 23 Time-history curves of mid-span displacements at measuring point  $A_3$  under two reinforcement methods

#### 4 结 论

采用 ASYS/LS-DYNA 有限元软件建立了分离式钢筋混凝土框架、炸药和空气的三维模型,并使用二阶段的模拟方法,对钢筋混凝土框架在 200 g 炸药位于框架内部中心区域爆破下的工况进行了数值模拟,考虑炸药、空气和钢筋混凝土结构之间的流固耦合作用以及应变率对材料的影响,分析了被炸顶板和梁的破坏过程以及顶板和梁内配筋对结构动态响应的影响,得出了以下主要结论:

1) 计算得到的钢筋混凝土框架在内部爆炸作用下柱、板、梁的破坏形态和动态响应等,与试验结果吻合良好,所提出的流固耦合数值模拟方法可合理地展现内部爆炸作用下混凝土的破坏过程以及钢筋的变形和受力过程。

2) 钢筋混凝土框架在内部爆炸冲击波作用下的主要破坏位置发生在顶板中部、梁板交界处和梁柱交界处,长轴方向梁中部有弯曲现象和开裂趋势,在实际工程应用中应对以上区域混凝土设置合理的防护。

3) 内部爆炸作用下,提高钢筋混凝土框架中混凝土强度等级可以提高框架整体的抗爆性能,但当混凝土等级达到一定程度后,进一步提高强度意义不大。从顶板位移减少角度考虑,增加板内配筋直径是最佳选择,而采用双层双向配筋方式的顶板由于应变分布更均匀所产生的混凝土破碎较少,且在不考虑位移情况下,适当缩短板内铁丝伸入梁内长度可以减少顶板破坏,提高抗爆能力,在实际工程中应根据需求考虑配筋方式。

4) 对比梁的三种配筋方式,梁内采用 10 mm 纵筋配筋的梁柱节点位移最小、混凝土破坏程度最轻,表明要提高框架梁的抗爆性能应优先考虑梁内

纵筋加粗配筋方式,其次对梁柱节点区域设置箍筋加密。可通过增加钢筋混凝土框架内部配筋直径来提高整体抗爆性能。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] CARTA G, STOCHINO F. Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 306-315.
- [3] ASTARLIOGLU S, KRAUTHAMMER T. Response of normal-strength and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2014, 61: 1-12.
- [4] KWON H, TAK K, MAKEN S, et al. Analysis of air blast effect for explosives in a large scale detonation [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2017, 34(12): 3048-3053.
- [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.
- [6] 高超, 宗周红, 伍俊. 爆炸荷载下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(7): 9-20.
- [7] 齐宝欣, 阎石, 武行. 建筑结构抗爆设防性能目标研究[J]. *爆破*, 2018, 35(3): 135-140.
- [8] 师燕超, 刘少增, 崔健, 等. 爆炸灾后建筑结构性性能评价及修复加固研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(1): 1-13.
- [9] 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(1): 25-30.
- [10] 魏雪英, 白国良. 爆炸荷载下钢筋混凝土柱的动力响应及破坏形态分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2007(5): 525-529.
- [11] 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破坏模式[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 112-117.
- [12] JAYASOORIYA R, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J, et al. Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3483-3495.
- [13] 姚宇飞, 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载下钢筋混凝土框架结构连续倒塌分析方法比较[J]. *建筑科学与工程学报*, 2015, 32(1): 64-72.
- [14] HONG J, FANG Q, CHEN L, et al. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1013-1024.
- [15] 何庆锋, 周超, 易伟建. 爆炸移除钢筋混凝土框架柱抗倒塌性能数值模拟[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 61-67.

- [16] TOY A T, SEVIM B. Numerically and empirically determination of blasting response of a RC retaining wall under TNT explosive [J]. *Advances in Concrete Construction*, 2017, 5(5): 493.
- [17] GHOLIPOUR G, ZHANG C, MOUSAVI A A. Loading rate effects on the responses of simply supported RC beams subjected to the combination of impact and blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109837.
- [18] SEVIM B, TOY A T. Blasting response of a two-storey RC building under different charge weight of TNT explosives [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, 44: 565-577.
- [19] 刘彤, 朱晓伟, 贾彬, 等. 钢筋混凝土框架结构内部爆炸毁伤效应试验研究[C]//第六届全国强动载效应及防护学术会议暨2014年复杂介质/结构的动力学行为创新研究群体学术研讨会论文集. 北京: 2014: 67-73.
- [20] 朱晓伟. 钢筋混凝土框架结构内部爆炸效应研究 [D]. 成都: 西南科技大学, 2015.
- [21] 田力, 胡杨. 汽车撞击和爆炸共同作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(1): 41-48.
- [22] LI S, LI X, WANG Z, et al. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 1-12.
- [23] 杨光, 张博一, 韦建树, 等. 聚脲喷涂钢制罐体抗爆性能试验及数值模拟研究 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(1): 44-53.
- [24] 高矗, 孔祥振, 方秦, 等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(12): 68-80.
- [25] 胡志乐, 马亮亮, 吴昊, 等. 远距离近地面爆炸空气冲击波计算的网格尺寸优化与验证[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(11): 118-132.
- [26] LI J, HAO H. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique [J]. *Engineering Structures*, 2013, 52: 101-113.
- [27] 何庆锋, 刘义仁, 蒋曲翀, 等. 锤击作用下钢筋混凝土框架倒塌性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 40-46.
- [28] 赵春风, 何凯城, 卢欣, 等. 弧形双钢板混凝土组合板抗爆性能数值研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2): 140-153.
- [29] 陈德, 吴昊, 方秦. 爆炸荷载作用下单向砌体填充墙动态响应计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(10): 197-210.