

引文格式:覃幼辙,黄楷铅,原小兰,等.火灾与爆炸耦合作用对 RC 板力学性能影响研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):171-180.  
QIN Youzhe, HUANG Kaiqian, YUAN Xiaolan, et al. Study on coupling effect of fire and explosion on mechanical properties of RC slab[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 171-180.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09036

# 火灾与爆炸耦合作用对 RC 板力学性能影响研究

覃幼辙<sup>1,2</sup>, 黄楷铅<sup>3</sup>, 原小兰<sup>3</sup>, 吴优<sup>1,3</sup>, 李治<sup>1,3</sup>

(1. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室,广西 桂林 541004; 2. 广西建工轨道装配式建筑产业有限公司,广西 柳州 545000; 3. 桂林理工大学 土木工程学院,广西 桂林 541004)

**摘要:**为研究火灾下钢筋混凝土(RC)板抗爆性能,利用ABAQUS有限元软件对已有试验进行模拟并验证火灾下RC板高温模型以及RC板常温爆炸模型的有效性。在此基础上,分析了火灾下RC板的爆炸工作机理,研究了受火时间、不同方位角以及不同爆炸位置对RC板在火灾下抗爆性能的影响。结果表明:火灾下的RC板受爆炸荷载作用时,板中部首先发生剪切破坏,随后楼板整体发生受弯破坏;随着受火时长增加,混凝土受高温劣化,钢筋强度下降,RC板的抗爆性能下降严重;在受火时长120 min工况下,板角爆炸相比板边、板中爆炸的峰值位移分别增加了134.4%、150.9%;在受火时长180 min工况下,板角爆炸相比板边、板中爆炸的峰值位移分别增加了138.4%、159.9%;不同位置爆炸对RC板影响较明显,其中板中爆炸对RC板的破坏程度最高,且RC板破坏越严重,其动力响应持续时间越长;在受火时长120 min工况下,爆炸方位角为60°和90°的RC板峰值位移相比爆炸方位角30°的RC板峰值位移分别减小了4.4%、2.4%,不同方位角爆炸对RC板的影响不明显。

**关键词:**火灾;动力响应;数值模拟;RC板;爆炸荷载

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)04-0171-10

## Study on coupling effect of fire and explosion on mechanical properties of RC slab

QIN Youzhe<sup>1,2</sup>, HUANG Kaiqian<sup>3</sup>, YUAN Xiaolan<sup>3</sup>, WU You<sup>1,3</sup>, LI Zhi<sup>1,3</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Construction Railway Prefabricated Construction Industry Co., Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi, China; 3. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** To study the anti-explosion performance of reinforced concrete (RC) slab under fire, ABAQUS finite element software was used to simulate existing test and verify the validity of high-temperature model under fire and the normal temperature explosion model of RC slab. Based on this, the explosion mechanism of RC slab under fire was analyzed, then the effects of fire time, different azimuth angles, and different explosion positions on the anti-explosion performance of RC slab under fire were studied. The results show that when an RC slab under

fire is subjected to explosive load, shear failure occurs in the middle of the slab firstly, and then flexural failure occurs in the whole slab. With the increase of fire duration, the concrete will deteriorate under high temperature and the strength of reinforcement will decline, and the explosion resistance of RC slab will decline seriously. Under the working condition of 120 min under fire, the peak displacement of slab corner explosion increases by 134.4% and 150.9% compared with that of slab edge and slab middle explosion. Under the working condition of 180 min under fire, the peak displacement of slab corner explosion increases by 138.4% and 159.9% compared with that of slab edge and slab middle explosion. The explosion at different positions has an obvious impact on RC slab, among which the explosion in the slab has the highest damage degree to RC slabs, and the more serious the damage of the RC plate is, the longer the dynamic response duration is. Under the working condition of 120 min under fire, the peak displacement of RC slab under the condition of 60° and 90° explosion azimuth angle decreases by 4.4% and 2.4% respectively compared with that of 30° explosion azimuth angle. The impact of the explosion at different azimuth angles on the RC slab is not obvious.

**Key words:** fire; dynamic response; numerical simulation; RC slab; explosion load

**Author resume:** LI Zhi(1991-), male, PhD, associate professor, E-mail: Lizhi@glut.edu.cn.

## 0 引言

近年来,火灾事故频发,火灾与爆炸通常相伴发生,对建筑结构造成严重破坏<sup>[1-3]</sup>。在实际工程中,火灾和爆炸荷载可能对楼板造成局部甚至完全损坏,从而导致其承载能力下降并影响建筑结构的使用寿命,对建筑结构的稳定性造成了严重威胁。因此,深入研究钢筋混凝土(RC)板在高温和冲击荷载作用下的力学行为和损伤机理具有重要意义。

当前,国内外学者对于火灾下RC板的力学性能以及常温下RC板的抗爆性能进行了一系列试验和数值模拟研究。Zhang等<sup>[4]</sup>进行RC板柱节点高温拟静力加载试验,研究火灾对RC平板结构残余冲压抗剪强度的影响,并验证了交叉加固对提高冲切后RC板承载能力的有效性。王滨等<sup>[5-9]</sup>对四边简支RC板足尺试件进行火灾试验,研究双向板在火灾下板平面内外的变形、板边转角随温度的改变情况,试验结果表明,四边简支RC双向板的破坏模式与常温下不同,裂缝主要出现在板顶长边跨中、距短边支座1/4处以及角部。Jin等<sup>[10]</sup>对RC板进行火灾下的数值模拟,对比火灾与常温下RC板的破坏模式、整体变形、能量耗散以及加速度等冲击性能差异,研究结果表明:随着火灾持续时间的增加,RC板的残余承载力和固有频率降低,但位移和能量耗散增加。汪维等<sup>[11-13]</sup>对方形RC板进行了近场爆炸加载试验,并利用有限元软件对RC板的动力响应过程进行数值模拟,研究结果表明,随着装药质量的

增加,方形RC板的破坏模式逐渐由整体弯曲破坏转变为局部冲切破坏。李忠献等<sup>[14-17]</sup>利用LS-DYNA有限元软件建立了典型RC板在爆炸荷载作用下的数值模型,提出了RC板超压-冲量曲线的数学表达式,且提出的简化曲线可对任意爆炸荷载作用后RC板的破坏进行评定。陈晔等<sup>[18]</sup>采用FLACS模拟得到了室内燃气爆炸的典型超压时程曲线,结合LS-DYNA有限元软件建立的楼板数值分析模型,研究了RC板在燃气爆炸下的动态响应、破坏模式及在抗倒塌过程中的受力机制和承载能力。

综上所述,国内外学者对RC板的抗火性能和抗爆性能分别进行了一定的研究,但对火灾与爆炸同时作用下RC板的破坏机理以及动力响应方面的研究非常有限。针对以上问题,结合课题组前期对于建筑结构抗倒塌方向的研究<sup>[19-29]</sup>,本文采用ABAQUS有限元软件,对王滨等<sup>[5]</sup>和汪维等<sup>[11]</sup>的试验进行数值模拟,分别验证热分析方法、高温劣化模型和爆炸模拟的有效性,以此研究文献[5]中的RC板在火灾与爆炸耦合作用下的破坏特征和动力响应,并预测RC板在不同受火时长以及不同爆炸位置工况下的抗爆性能。

## 1 有限元模型的建立与验证

### 1.1 材料模型

#### 1.1.1 高温下材料本构模型

混凝土常温材料本构参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[30]</sup>,高温下混凝土强度参考

过镇海等<sup>[31]</sup>提出的强度退化模型,如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{c,T}}{f_c} &= \frac{1}{1 + 2.4(T - 20)^6 \times 10^{-17}} \\ \frac{f_{t,T}}{f_t} &= 1 - 0.001T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $f_{c,T}$ 、 $f_{t,T}$ 分别为高温下混凝土的抗压、抗拉强度; $f_c$ 、 $f_t$ 分别为室温下混凝土的抗压、抗拉强度; $T$ 为混凝土的温度。

根据《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)<sup>[32]</sup>,高温下钢筋的强度退化模型为

$$\frac{f_y^T}{f_y} = 1 / [1 + 24(\frac{T_1}{1000})^{4.5}] \quad (2)$$

式中: $f_y^T$ 为钢筋在不同温度时的屈服强度; $f_y$ 为钢筋常温时的屈服强度; $T_1$ 为钢材的温度。

### 1.1.2 爆炸荷载作用下材料应变率效应

在爆炸荷载作用下,需要考虑混凝土以及钢筋的应变率效应,本文混凝土的应变率效应采用CEB规范<sup>[33]</sup>中给出的公式,计算混凝土抗压强度的动力放大系数 $C_{DIF}$ 和抗拉强度的动力放大系数 $T_{DIF}$ ,如式(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} C_{DIF} &= \frac{f_{cl}}{f_{c0}} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{c0})^{0.014} & \dot{\epsilon}_c \leqslant 30 \text{ s}^{-1} \\ 0.012(\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{c0})^{1/3} & \dot{\epsilon}_c > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \\ T_{DIF} &= \frac{f_{tl}}{f_{t0}} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_t / \dot{\epsilon}_{t0})^{0.014} & \dot{\epsilon}_t \leqslant 10 \text{ s}^{-1} \\ 0.0062(\dot{\epsilon}_t / \dot{\epsilon}_{t0})^{1/3} & \dot{\epsilon}_t > 10 \text{ s}^{-1} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $f_{cl}$ 、 $f_{tl}$ 分别为 $\dot{\epsilon}_c$ 应变率下的抗压强度、抗拉强度; $f_{c0}$ 、 $f_{t0}$ 分别为静态抗压强度、抗拉强度; $\dot{\epsilon}_c$ 为静态抗拉下的应变率; $\dot{\epsilon}_t$ 为静态抗压下的应变率; $\dot{\epsilon}_{c0} = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ;  $\dot{\epsilon}_{t0} = 10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

钢筋的应变率效应通过Cowper-symonds模型来确定,钢筋的屈服应力 $\sigma_y$ 为

$$\sigma_y = (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}) [1 + (\frac{\epsilon}{C})^{\frac{1}{P}}] \quad (4)$$

式中: $\sigma_0$ 为初始屈服应力; $\beta$ 为硬化参数; $E_p$ 为塑性应变模量; $\epsilon_{eff}$ 为等效塑性应变; $\epsilon$ 为应变率; $C$ 、 $P$ 为常数, $C=40 \text{ s}^{-1}$ , $P=5$ 。

## 1.2 RC板抗火试验有限元模型建立与验证

对文献[5]中的试验进行数值模拟,验证本文采用的热分析方法以及高温模型的有效性。

### 1.2.1 RC板抗火试验简介

选取文献[5]中的四边简支板(FESS)进行建模与验证,其截面尺寸和配筋如图1(a)所示。试验采用的混凝土立方体抗压强度平均值为32 MPa,钢筋采用HRB400,实测的屈服强度平均值为435 MPa,抗拉强度平均值为580 MPa,混凝土保护层厚度为

15 mm。板的支座布置形式如图1(b)所示,采用钢球和滚轴模拟板的简支边界,钢球和滚轴的直径均为100 mm。试验采用恒载升温方案,在板上施加均布荷载,并分五级进行加载,每级0.4 Pa,共2.0 Pa,对RC板底部进行加热,火灾升温曲线参照ISO 834<sup>[34]</sup>标准火灾曲线。

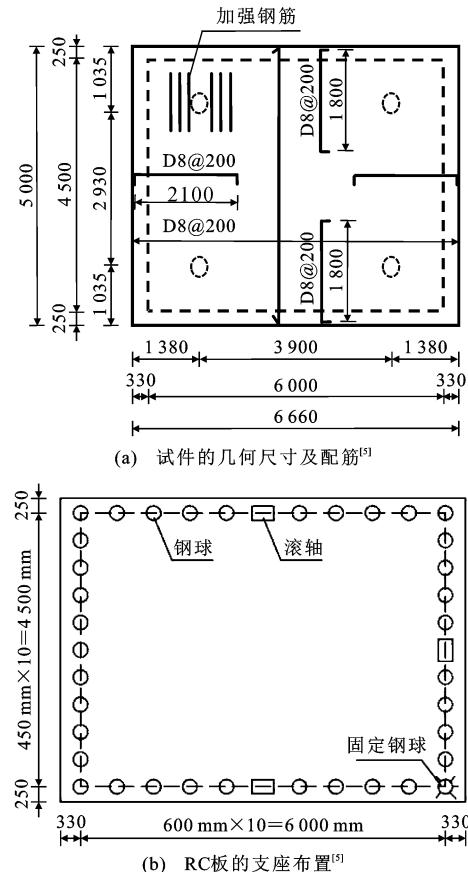


图1 试件几何尺寸、配筋以及支座布置(单位:mm)

Fig. 1 Specimen geometric dimension, reinforcement and support layout(unit:mm)

### 1.2.2 RC板抗火试验有限元模型建立与验证

图2为试件FESS的有限元模型。在ABAQUS软件的热力耦合分析中,为了更贴近实际工程,本文数值模拟中考虑RC板自重影响,在ABAQUS有限元软件中定义材料密度,其中,混凝土材料密度定义为 $2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,钢筋材料密度定义为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,并在分析步中定义重力加速度为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

在热分析中,本文使用“热传递(瞬态)”分析步进行计算,分析步时长设置为200 min;混凝土采用DC3D8八节点线性传热六面体单元,钢筋采用DC1D2二节点传热连接单元,受火表面的热对流与热辐射系数分别采用 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$ 和0.6,并

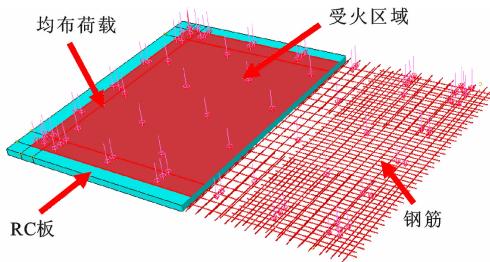


图 2 RC 板有限元模型

Fig. 2 Finite element model of RC slab

利用 ABAQUS 有限元软件顺序热力耦合建模方式进行数值模拟。

考虑到网格尺寸与分析时长密切相关,为寻找较为合适的单元尺寸,本文采用试算法对试件 FESS 在 P1 点进行网格敏感度分析,并选取 3 种不同的单元尺寸进行试算,计算结果如图 3 所示。可以看出,25 mm 的网格尺寸更贴合试验结果,且计算效率较高,综合考虑后,单元尺寸选择 25 mm。

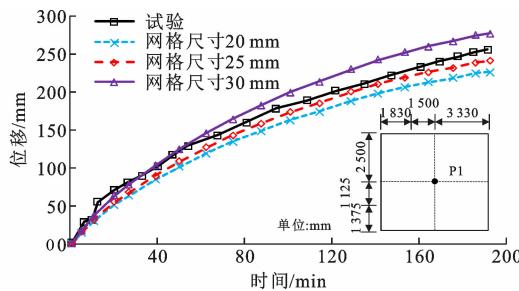


图 3 网格敏感度分析

Fig. 3 Mesh sensitivity analysis

利用 ABAQUS 有限元软件的顺序热力耦合建模方式,按照 ISO 834 标准曲线<sup>[34]</sup>对试件 FESS 进行升温模拟,结果如图 4 所示,分别测得在距离 RC 板顶部 20、60、80 mm 和底部各点的板内升温曲线[图 4(a)]以及高温下 RC 板的 P1 点与 P2 点的挠度曲线[图 4(b)]。从有限元模拟结果与试验结果对比可知,高温模型与试验的温度时程曲线相对误差值不超过 8%,静力加载过程中柱底的挠度与试验结果相对误差值不超过 5%,因此本文采用热力耦合建模方式可以准确地复现 RC 板在高温下的力学性能。

### 1.3 RC 板爆炸试验有限元模型建立与验证

本节对汪维等<sup>[11]</sup>开展的方形 RC 板抗爆试验进行数值模拟,验证 ABAQUS 内置 CONWEP 模型模拟爆炸试验的合理性和精度。

#### 1.3.1 RC 板爆炸试验

汪维等<sup>[11]</sup>开展的方形 RC 板抗爆试验中试件 B、C 的截面尺寸和几何形状如图 5 所示,其中 RC

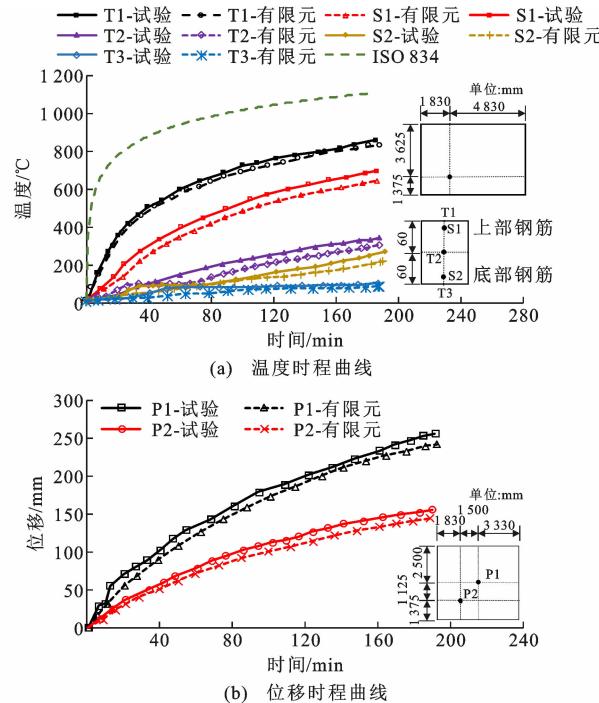
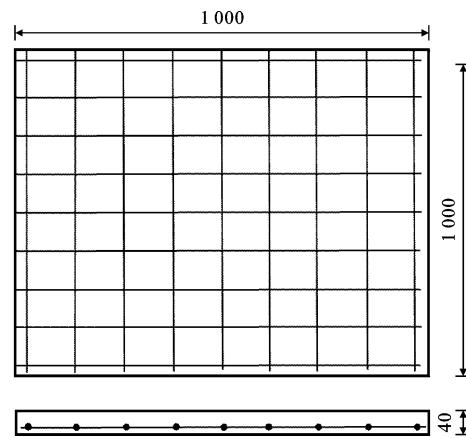


图 4 试验与有限元模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and finite element simulation results

图 5 RC 板的几何形状和截面尺寸<sup>[11]</sup>(单位:mm)Fig. 5 Geometry and sectional dimension of RC slab<sup>[11]</sup>(unit:mm)

板截面尺寸为 1 000 mm × 1000 mm,板厚 40 mm,混凝土的单轴压缩强度测试值为 39.6 MPa,拉伸强度为 8.2 MPa,弹性模量为 28.3 MPa;钢筋的屈服应力为 501 MPa,弹性模量为 200 GPa。将板两端用 U 型钢板支座固定住,并在距离板面上方 400 mm 处分别放置 0.31、0.46 kg 的 TNT 进行爆炸试验。

#### 1.3.2 RC 板爆炸试验有限元模型建立与验证

RC 板爆炸试验有限元模型如图 6 所示,本文利用 ABAQUS 有限元软件内置的 CONWEP 模型

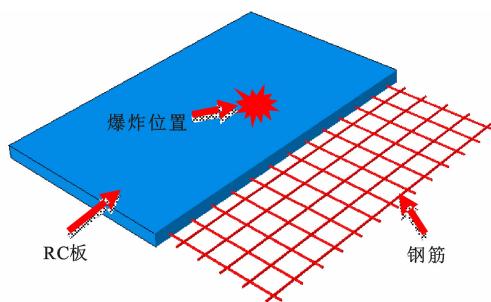


图 6 RC 板爆炸试验有限元模型

Fig. 6 Finite element model of RC slab explosion test

进行爆炸数值模拟。CONWEP 模型是目前比较常用的爆炸冲击有限元分析模型,可用于自由空气场爆炸和近距离爆炸计算,无需建立炸药和空气单元,且不考虑爆炸冲击波在空气中的传递过程,只需要在相互作用中设置入射角度与爆点距离即可,简化了研究内容,降低了模型复杂程度,提高了计算效率。

在爆炸分析中,爆炸荷载分析步设置为动力显式分析(Dynamic, Explicit),分析步时长为 0.06 s,混凝土以及其他部件的单元类型为 C3D8R 八节点线性六面体单元,钢筋设置为 T3D2 二节点线性三维桁架单元;经过网格收敛性计算得混凝土网格尺寸为 25 mm, 钢筋网格尺寸为 25 mm, Incident wave 设置为 Air blast, 并设置添加爆点的位置以及入射面的位置选择,最后设置入射波的距离以及 TNT 等效质量。

图 7 为 ABAQUS 有限元软件 CONWEP 爆炸模型数值模拟结果与汪维等<sup>[11]</sup>数值模拟结果的对比,可以看出使用 CONWEP 模型所得位移时程曲线趋势以及板峰值位移与汪维等<sup>[11]</sup> AUTDYN 软件数值结果拟合程度较好。试验中板 A 与板 B 爆炸后跨中峰值位移分别为 15 mm 和 29 mm, 汪维等<sup>[11]</sup> 数值模拟得到的结果为 13 mm 和 24 mm, 本节使用 CONWEP 模型所得的结果为 14 mm 和 25 mm。这是由于在爆炸试验过程中支撑混凝土板的支架可能产生一定的松动,在加载后期对靶板的支撑可能不完全牢固,而数值模拟中对 RC 板是完全固定的,因此数值模拟结果比试验所得的结果小。

图 8 为试件 A、B 爆炸后的破坏模态与数值模拟破坏模态对比,由于 CONWEP 模型的加载表面限定于实体单元、壳单元,与三角波的加载方式相比,增加了空间维度,在 RC 板中产生的应力场与实际更加相符。从图 8 可以看出,试验结果与数值模拟结果吻合较好,CONWEP 模型能够很好地模拟

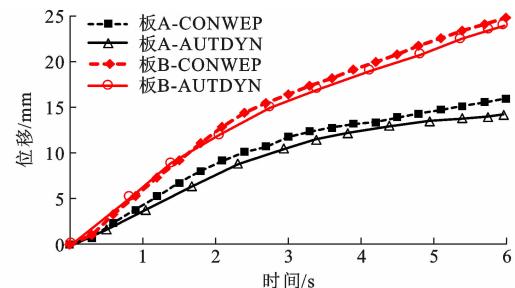


图 7 板中心点位移时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of displacement time-history curve of slab center point

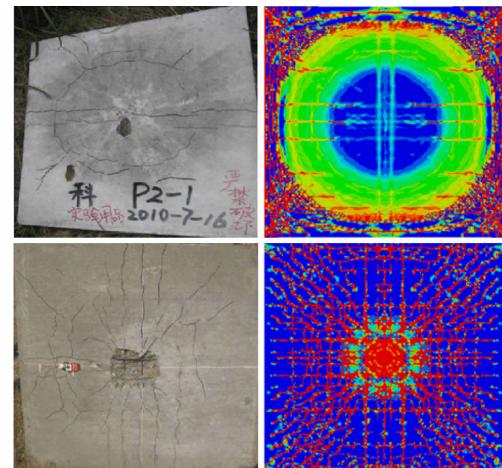
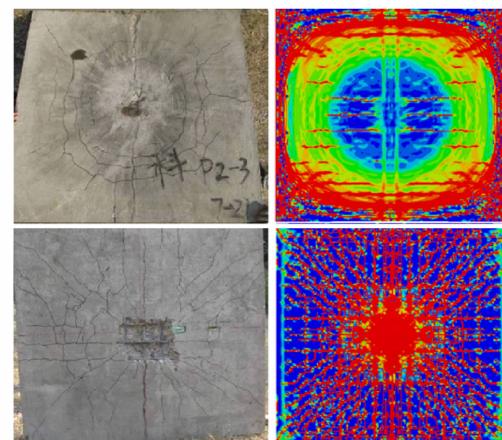
(a) 试件A试验与模拟结果<sup>[11]</sup>(b) 试件B试验与模拟结果<sup>[11]</sup>

图 8 试验与数值模拟破坏模态对比

Fig. 8 Comparison of failure mode between test and numerical simulation

RC 板在爆炸载荷作用下的开裂、裂纹传播、底部层裂脱落过程,验证本文所采用的 CONWEP 模拟方法的有效性。

## 2 火灾与爆炸荷载共同作用下 RC 板数值模拟

以上文验证的试件 FESS<sup>[5]</sup> 为研究对象,保持

其试件尺寸、材料参数以及物理边界条件等因素不变,将试验中的静载改为 TNT 爆炸荷载,进一步研究不同爆炸位置以及爆炸方位角对 RC 板在爆炸荷载作用下的毁伤破坏影响。

## 2.1 火灾下不同方位角爆炸对 RC 板抗爆性能影响

为研究火灾下不同爆炸方位角对 RC 板破坏模式以及动力响应的影响,在保持其他参数不变的前提下,利用 ABAQUS 软件中“预定义场”功能,将 RC 板热分析后所得的 OBD 文件导入,并设置爆炸分析步为动力显式分析(Dynamic, Explicit),分析步时长为 0.02 s。本节网格尺寸以及单元节点的设置如下:混凝土以及支座采用 C3D8R 八节点线性六面体单元,钢筋设置为 T3D2 二节点线性三维桁架单元,经过网格收敛性计算得混凝土网格尺寸为 25 mm,钢筋网格尺寸为 25 mm。由于爆炸载荷的作用时间非常短,通常可以假定钢筋和混凝土之间的黏结是完好的,即建模时钢筋和混凝土接触单元共用节点,界面的分离条件为一旦混凝土或钢筋单元失效则在计算时将其删除,界面自动分离。此外,为解决网格的大变形问题,模型中采用侵蚀算法(Erosion)处理,将失效的混凝土单元自动删除,避免了网格扭曲造成的计算精度下降、计算步长变小等问题。

不同方位角爆炸荷载示意如图 9 所示,基于对称性,在 RC 板上方以板的长边为直径( $D = 6.66$  m),在方位角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  的圆弧上放置 TNT 当量为 2.5 kg 的炸药,设置受火时长为 120 min 和 180 min 两种工况,对 RC 板的破坏模式和破坏等级进行分析。

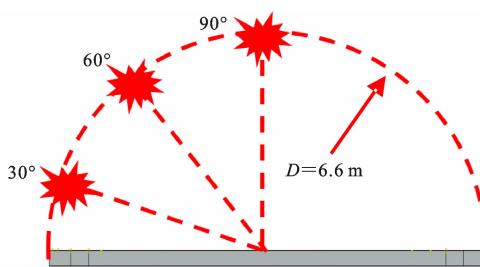


图 9 不同方位角爆炸荷载示意图

Fig. 9 Schematic diagram of explosion loads at different azimuth angles

图 10 为火灾下不同方位角爆炸工况下 RC 板的破坏模态,对比破坏模态可以看出,在爆炸方位角为  $30^\circ$  工况下,由于距离较近,爆炸冲击波更快到达板面,对板面的破坏更大,且随受火时长的增加,RC

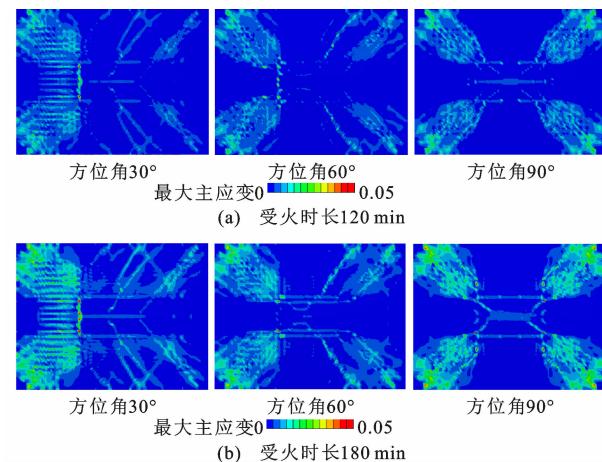
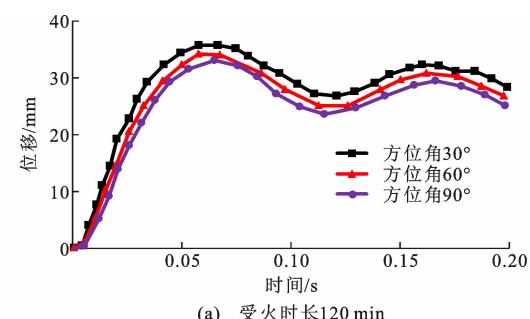


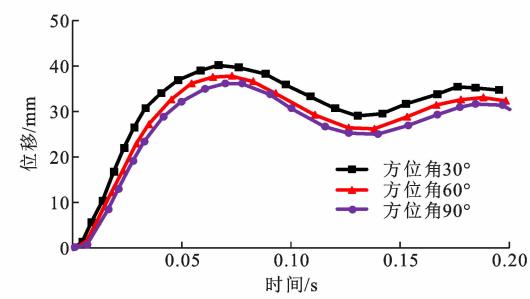
图 10 不同方位角爆炸破坏模态

Fig. 10 Explosion damage mode at different azimuth angles  
板面的破坏更严重。在爆炸方位角为  $60^\circ$  和  $90^\circ$  工况下,由于炸药与板面的爆炸距离进一步加大,其冲击波到达板面的强度稍有减弱。

图 11 为不同方位角爆炸工况下 RC 板的位移时程曲线,当受火时长为 120 min,爆炸方位角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  工况下,RC 板跨中峰值位移分别为 35.7、34.2、33.4 mm;受火时长为 180 min,爆炸方位角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  工况下,RC 板跨中峰值位移分别为 40.4、37.9、36.7 mm。



(a) 受火时长 120 min



(b) 受火时长 180 min

图 11 不同方位角爆炸位移时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of explosion displacement at different azimuth angles

图 12 为不同方位角爆炸下 RC 板跨中峰值位移对比。从相同受火时长、不同方位角爆炸的角度分析,当受火时长为 120 min 时,爆炸方位角为  $60^\circ$

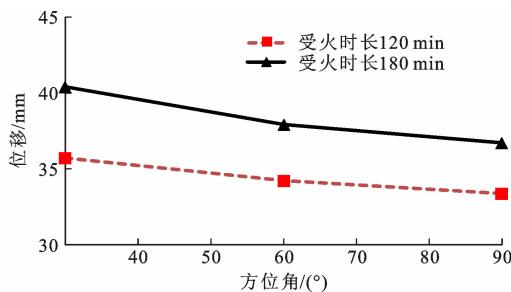


图 12 不同方位角爆炸位移对比

Fig. 12 Comparison of explosion displacement at different azimuth angles

和 90° 的 RC 板跨中峰值位移相比 30° 工况下分别减小了 4.4%、2.4%；当受火时长为 180 min 时，爆炸方位角为 60° 和 90° 的 RC 板跨中峰值位移相比 30° 工况下分别减小了 6.2%、3.2%。因此，在相同受火时长下，不同方位角爆炸对 RC 板跨中峰值位移无明显影响。从相同方位角爆炸、不同受火时长的角度分析，在方位角为 30°、60° 和 90° 工况下，受火时长为 180 min 的 RC 板跨中峰值位移相比 120 min 分别增加了 13.2%、10.8% 和 9.9%，平均增加 11.3%。可以看出，相同方位角爆炸工况下 RC 板跨中峰值位移都随受火时长的增加而增加。

## 2.2 火灾下不同爆炸位置对 RC 板抗爆性能影响

为研究火灾下不同爆炸位置对 RC 板破坏模式以及动力响应的影响，本节对 2 种受火时长（120、180 min）、TNT 炸药量为 2.5 kg、爆炸位置距离板正面 2 m 处不同爆炸位置（板中、板角、板边）的爆炸工况进行数值模拟，其中板边位置是指 RC 板长边中点处。

图 13 为 2 种受火时长（120、180 min）和 3 种不同爆炸位置（板中、板角、板边）爆炸工况下 RC 板的破坏模态图。可以看出，在板中处爆炸时 RC 板的破坏更严重，背爆面出现层裂现象，底部混凝土出现掉落，板边爆炸的破坏集中在爆点位置以及两边支座处，但在板角处爆炸 RC 板的破坏程度最轻，裂缝集中在板角处，背爆面中部区域出现裂缝并向四周发展，无鼓包现象。受火时长越长，RC 板的破坏越严重，当爆点距离 RC 板中部区域较近时，板中产生峰值较高、持续时间较短的压缩脉冲荷载，这种压缩脉冲遇到结构内表面反射产生的拉伸波，能够造成背爆面表层混凝土的广泛剥落和震塌，当爆炸产生的爆坑深度和震塌厚度之和大于板厚度时，板将发生震塌贯穿式破坏。

图 14 为火灾下不同爆炸位置工况下 RC 板跨

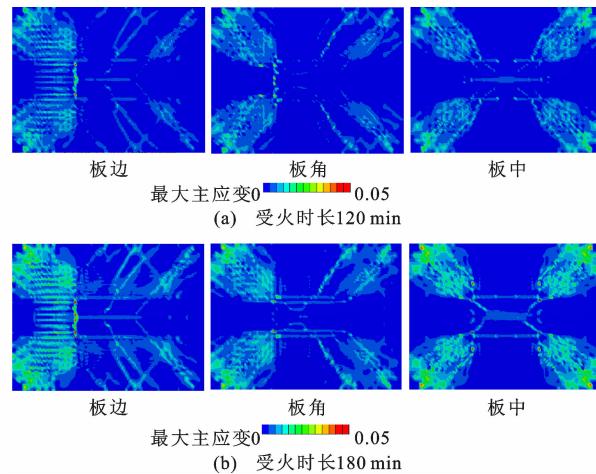


图 13 不同爆炸位置破坏模态

Fig. 13 Destruction mode of different explosion positions

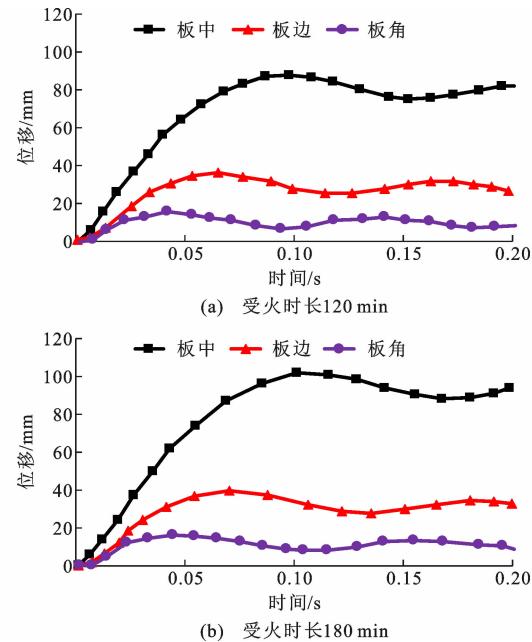


图 14 不同爆炸位置位移时程曲线

Fig. 14 Displacement time-history curves of different explosion positions

中位移时程曲线，受火时长为 120 min、爆炸位置在板中、板边、板角时，RC 板跨中峰值位移分别为 88.1、35.4、15.1 mm；受火时长为 180 min、爆炸位置在板中、板边、板角时，RC 板跨中峰值位移分别为 101.6、39.1、16.4 mm；板中、板边、板角爆炸工况下，RC 板峰值位移分别在 0.1、0.07、0.04 s 左右。

图 15 为不同位置爆炸工况下 RC 板跨中峰值位移对比。从受火时长相同的角度分析，受火时长 120 min 工况下，板角爆炸与板边、板中爆炸相比跨中位移增加了 134.4%、150.9%；受火时长为 180 min 工况下，板角爆炸与板边、板中爆炸相比跨中位

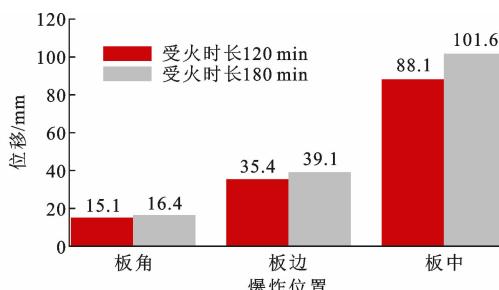


图 15 不同爆炸位置工况下跨中峰值位移对比

Fig. 15 Comparison of mid-span maximum displacement of different explosion positions

移增加了 138.4%、159.9%。从爆炸位置相同的角度分析,当爆点位置在板中、板边和板角,受火时长为 180 min 时 RC 板跨中峰值位移比受火时长为 120 min 的爆炸工况下分别增加 15.2%、10.5% 和 6.6%。

通过上述分析可知:受火时长越长,混凝土与钢筋劣化越严重,即使是相同位置爆炸也会使 RC 板的破坏更严重;板中爆炸对 RC 板的破坏最严重,板角爆炸对 RC 板的整体刚度影响不大;板中、板边、板角爆炸工况下,RC 板峰值位移所对应的时间分别为 0.1、0.07、0.04 s,即破坏越严重,RC 板的动力响应持续时间越长。

### 3 结语

(1) 在高温与爆炸耦合作用下,随着 RC 板的受火时长增加,温度上升幅度增大,混凝土内部发生结构性变化,钢筋强度下降,混凝土与钢筋配合机制下降,RC 板的强度下降明显。

(2) 板中爆炸对 RC 板的破坏最严重,板角和板中爆炸对 RC 板的整体刚度影响不大;板中、板边、板角爆炸下 RC 板峰值位移分别在 0.1、0.07、0.04 s 左右,即破坏越严重,RC 板的动力响应持续时间越长。

(3) 在相同受火时长工况下,爆炸方位角为 60° 和 90° 的 RC 板跨中峰值位移相比爆炸方位角 30° 工况下分别减小了 6%、3%,不同方位角爆炸对 RC 板跨中峰值位移无明显影响。

### 参考文献:

### References:

[1] 叶耀先. 中国建筑结构倒塌事故分析[J]. 建筑结构, 1990, 20(5):54-56,59.

YE Yaoxian. Analysis of building structure collapse accident in China[J]. Building Structure, 1990, 20(5):

54-56,59.

[2] 周扬,夏登友,高平.城市商业综合体建筑火灾事故演变路径分析[J].中国安全科学学报,2018,28(2):170-174.

ZHOU Yang, XIA Dengyou, GAO Ping. Analysis of evolution path of urban commercial complex fire accident[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 170-174.

[3] 彭开和.基于十堰市“6·13”重大燃气爆炸事故的城市天然气管道事故原因分析及对策研究[J].工业安全与环保,2022,48(5):20-22.

PENG Kaihe. Study on the causes and countermeasures of urban natural gas pipeline accidents based on the “June 13” gas explosion accident in Shiyan[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(5):20-22.

[4] ZHANG C Y, MA W C, LIU X, et al. Effects of high temperature on residual punching strength of slab-column connections after cooling and enhanced post-punching load resistance[J]. Engineering Structures, 2019, 199:109580.

[5] 王滨,董毓利.钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J].土木工程学报,2010,43(4):53-62.

WANG Bin, DONG Yuli. Experimental study of two-way reinforced concrete slabs under fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4):53-62.

[6] 王滨,董毓利.四边简支钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(6):23-33.

WANG Bin, DONG Yuli. Experimental research of four-edge simple support two-way reinforced concrete slab under fire[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6):23-33.

[7] 王滨,董毓利,索亮,等.足尺大型四边固支钢筋混凝土双向板火灾试验设计与其在异常狭小空间下的安装[J].工业建筑,2009,39(10):96-101.

WANG Bin, DONG Yuli, SUO Liang, et al. Fire test design of four-edge fixed large full-scale two-way reinforced concrete slabs and their installation under extremely narrow space[J]. Industrial Construction, 2009, 39(10):96-101.

[8] WANG B, DONG Y L, GAO L T. Fire experimental study of four-edge fixed reinforced concrete slab in fire[J]. Advanced Materials Research, 2010, 163-167: 1626-1637.

[9] DONG Y L, ZHU C J. Limit load carrying capacity of two-way slabs with two edges clamped and two edges simply supported in fire[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10):1182-1192.

- [10] JIN L, BAI J J, ZHANG R B, et al. Effect of elevated temperature on the low-velocity impact performances of reinforced concrete slabs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 149: 103797.
- [11] 汪维, 张舵, 卢芳云, 等. 方形钢筋混凝土板的近场抗爆性能[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 251-258.  
WANG Wei, ZHANG Duo, LU Fangyun, et al. Anti-explosion performances of square reinforced concrete slabs under close-in explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 251-258.
- [12] 汪维, 刘瑞朝, 李林, 等. 不同爆炸距离下单向支撑方形钢筋混凝土板破坏模式数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(增1): 233-241.  
WANG Wei, LIU Ruichao, LI Lin, et al. Numerical simulation study on failure mode of square reinforced concrete slab with unidirectional support under different explosion distances[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 233-241.
- [13] 汪维, 刘光昆, 汪琴, 等. 四边固支方形钢筋混凝土板抗爆试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(增1): 108-113.  
WANG Wei, LIU Guangkun, WANG Qin, et al. Experimental study on explosion resistance of square reinforced concrete slab with four edges fixed[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(S1): 108-113.
- [14] 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.  
LI Zhongxian, SHI Yanchao, SHI Xiangsheng. Damage analysis and assessment of RC slabs under blast load[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 60-66.
- [15] 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构破坏倒塌分析研究进展[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增2): 83-92.  
SHI Yanchao, LI Zhongxian. Research progress on failure and collapse analysis of reinforced concrete structures under explosion load[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 83-92.
- [16] 师燕超. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应行为与损伤破坏机理[D]. 天津:天津大学, 2009.  
SHI Yanchao. Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete structures under blast loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [17] 师燕超, 李忠献, 郝洪. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架结构的连续倒塌分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 652-658.  
SHI Yanchao, LI Zhongxian, HAO Hong. Numerical analysis of progressive collapse of reinforced concrete frame under blast loading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(6): 652-658.
- [18] 陈畔, 刘晅亚. 钢筋混凝土板受燃气爆炸作用下的行为响应及承载力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增1): 183-191.  
CHEN Ye, LIU Xuanya. Behavior response and bearing capacity performance analysis of reinforced concrete slab under gas explosion[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S1): 183-191.
- [19] 钱凯, 李治, 何畔, 等. 螺栓连接预制混凝土梁-板子结构抗连续倒塌机理研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 173-180.  
QIAN Kai, LI Zhi, HE Pan, et al. Progressive collapse mechanism of PC beam-slab substructure with bolted connections[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 173-180.
- [20] 李治, 翁运昊, 邓小芳, 等. 焊接连接预制混凝土梁-板子结构抗连续倒塌性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 121-128.  
LI Zhi, WENG Yunhao, DENG Xiaofang, et al. Behavior of precast concrete beam-slab substructures with welded connections to resist progressive collapse[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10): 121-128.
- [21] QIAN K, GENG S Y, LIANG S L, et al. Effects of loading regimes on the structural behavior of RC beam-column sub-assemblages against disproportionate collapse [J]. Engineering Structures, 2022, 251: 113470.
- [22] WENG Y H, QIAN K, FU F, et al. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101109.
- [23] 钱凯, 李治, 翁运昊, 等. 钢筋混凝土梁-板子结构抗连续性倒塌性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 239-247.  
QIAN Kai, LI Zhi, WENG Yunhao, et al. Behavior of RC beam-slab substructures to resist progressive collapse[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 239-247.
- [24] QIAN K, LI B, MA J X. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(2): 4014107.
- [25] QIAN K, LAN X, LI Z, et al. Behavior of steel moment frames using top-and-seat angle connections under various column-removal scenarios[J]. Journal of

- Structural Engineering, 2021, 147(10):04021144.
- [26] DENG X F, LIANG S L, FU F, et al. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(6):04020078.
- [27] QIAN K, LIANG S L, FU F, et al. Progressive collapse resistance of emulative precast concrete frames with various reinforcing details [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(8):04021107.
- [28] QIAN K, LAN D Q, ZHANG L, et al. Robustness of post-tensioned concrete beam-column subassemblies under various column removal scenarios [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(5):04022032.
- [29] LIANG S L, LI Z, WANG C L, et al. Experimental and analytical study on the compressive arch action of precast concrete assemblies with monolithic connections to resist progressive collapse [J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(4):04023010.
- [30] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 国家建筑工业出版社, 2010.
- Design specifications for concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [31] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Zhenhai, SHI Xudong. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [32] 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [33] Design code: CEB-FIP Model Code 1990 [S]. Trowbridge: Redwood Books, 1993.
- [34] Fire Resistance Tests: ISO 834-1 [S]. Geneva: ISO, 1999.