

爆炸作用下原型 RC 框架结构的毁伤效应*

欧渊¹, 王帆¹, 吴昊², 李军润²

(1.中国人民解放军 32801 部队, 北京 100080;

2.同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 钢筋混凝土 (RC) 框架结构是大量政治经济活动的载体, 然而全球爆炸袭击与公共安全事故频发, 以及国际形势复杂多变, 使得 RC 框架结构成为重要的打击与防护目标。为探究多次爆炸作用下 RC 框架结构的毁伤效应, 设计并建造了一栋两层含填充墙的原型 RC 框架结构, 分别开展了等效 TNT 当量为 11.573kg 和 20kg 的四发结构外爆炸和内爆炸试验, 考察了不同位置和当量炸药爆炸作用下的冲击波载荷特征以及单个构件、房间和整体结构的动态响应和破坏模式。结果表明: 近距离外爆炸作用下, 楼板和填充墙可以有效衰减传播至房间内部的冲击波载荷, 峰值超压降幅约 84.75%。楼板和填充墙呈局部冲切破坏, 房间内部构件和整体结构损伤相对较小; 内爆炸作用下, 楼板和填充墙呈整体冲切破坏, 毁伤等级高于框架柱和梁。除冲击波载荷外, 爆源房间墙板碎片的抛掷碰撞是造成沿冲击波传播方向填充墙和楼板损伤破坏的关键毁伤元。最后, 基于建筑结构毁伤评估准则, 对每发试验后单个构件、房间及整体结构的毁伤等级进行确定, 得出内爆炸作用下建筑结构的毁伤等级和范围高于外爆炸工况。

关键词: 爆炸试验; 原型 RC 框架; 动态响应; 破坏模式; 毁伤评估

中图分类号: TU375

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Experimental Study on Damage Effects of RC Frame Structures with Masonry Walls under Explosion Loads

OU Yuan¹, WANG Fan¹, WU Hao², LI Junrun²

(1. Unit 32801 of the People's Liberation Army of China, Beijing 100080, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Reinforced Concrete (RC) frame structures are the most widely adopted structural form in civil infrastructure, government facilities, commercial buildings and critical public premises, undertaking irreplaceable roles in normal political and economic operations. However, with the growing frequency of terrorist explosion attacks, accidental industrial and gas explosion incidents, alongside the complex and volatile global security environment, RC frame structures have become both high-priority attack targets and the core line of defense for personnel protection. To investigate the damage effects of multiple explosion scenarios on RC frame structures, a full-scale two-story RC frame structure with infill masonry walls, designed in line with current building design codes, was constructed. A series of field explosion tests, including external and internal explosion scenarios with TNT equivalents of 11.573kg and 20kg, were conducted on this structure. The load characteristics of shock waves, dynamic

*收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2026-03-28;

基金项目: 国家自然科学基金 (52078379);

第一作者: 欧渊 (1984-), 男, 工学博士, 副研究员. E-mail: ouy5@163.com;

通信作者: 吴昊 (1981-), 男, 工学博士, 教授. E-mail: wuhaocivil@tongji.edu.cn;

王帆 (1992-), 女, 工学博士, 副研究员. E-mail: wangfan05@126.com.

response and failure modes of structural components were examined. The results show that under close-range external explosion, the floor slabs and masonry walls can attenuate the shock wave loads propagated into the adjacent room, with a peak overpressure reduction of 84.75%. The floor slabs and masonry walls exhibit local shear failure, while the damage to the internal components and the global structure is minor. In contrast, under internal explosion, the floor slabs and masonry walls show global shear failure, with higher damage compared to the RC columns and beams. In addition to the shock wave loads, the explosive ejection of wall/slab fragments from the explosion source room is the primary reason for damage to the masonry walls and slabs along the direction of shock wave propagation. Finally, based on damage assessment criteria, the damage levels of components, rooms, and the RC structure for each test were determined. The damage level and affected range of the RC structure under internal explosion are significantly higher than those under external explosion with the same equivalent.

Keywords: explosion tests; full-scale RC frame; dynamic response; failure model; damage assessment

钢筋混凝土 (RC) 框架结构因其较高的承载能力、较好的抗震性能、施工便捷、成本效益高等优点成为定点防御、承担指挥、通信中枢等重要职能以及大量政治经济活动的载体^[1, 2]。然而, 世界范围内各类恐怖爆炸袭击事件和公共安全事故频发, 并且随着国际形势的错综复杂, 使得 RC 框架结构成为重要的打击和防护目标^[3-7]。例如: 2004 年澳大利亚驻印度尼西亚大使馆附近发生一起自杀性汽车炸弹爆炸事故, 造成使馆及附近 7 栋建筑严重破坏, 约 10 人遇难, 180 人受伤^[6]; 2023 年俄罗斯军方采用高超音速导弹攻击乌克兰军方某指挥中心, 造成建筑结构大范围破坏^[7]。因此, 开展爆炸作用下 RC 框架结构的毁伤效应研究, 有助于优化战前火力部署和战后快速毁伤评估, 也可作为重要防护目标的工程设计与加固提供参考。

国内外学者针对单个建筑构件 (柱、梁、板和墙) 的抗爆性能和毁伤效应进行了大量野外爆炸试验, 分析了不同爆炸载荷下构件的动态响应、破坏模式和损伤机理^[8-13]。如 Lu 等^[11]开展了不同比例距离的 RC 柱抗爆试验, 得出比例距离较大时 ($0.61 \text{ m/kg}^{1/3}$) RC 柱呈整体弯曲破坏, 而比例距离较小时 ($0.50 \text{ m/kg}^{1/3}$) 呈局部混凝土剥落和弯曲变形的联合破坏模式。Chen 等^[12-13]基于大截面激波管开展了爆炸作用下喷涂聚脲加固砌体墙动力行为的试验研究, 得出聚脲涂层可以显著提升砌体墙的抗爆能力, 并有效抑制墙体砖块碎片的产生和抛掷。同时, 部分学者开展了 RC 单室结构的内爆炸试验^[14-20]。如 Kim 等^[17]针对典型 RC 公寓结构开展了 2kg 和 3kg TNT 当量的内爆炸试验, 得出炸药后燃烧效应显著加剧了结构损伤程度。杨亚东等^[18, 19]利用原型 RC 箱型结构爆炸试验探究了完全密闭条件下的内爆炸载荷分布特征, 得出结构内壁面峰值超压关于结构中心呈“W”型分布。朱晓伟^[20]开展了 16 发单层单跨无砌体填充墙 RC 框架结构的内爆炸试验, 得出柱-梁-板节点处更易发生冲切破坏, 且冲切锥角约为 $34^\circ \sim 53^\circ$ 。

原型 RC 框架整体结构爆炸毁伤效应的试验研究由于成本和试验周期的原因相对较少^[21-23]。其中 Lina 等^[24]针对原型两跨 RC 框架结构进行了 10kg 和 20kg TNT 当量下的外爆炸试验, 得出 10kg TNT 当量下楼板仅产生少量裂纹, 而 20kg TNT 当量下楼板发生局部冲切破坏。Santos 等^[25]开展了原型 RC 结构的内爆炸试验, 得出砌体隔墙对冲击波载荷的衰减作用是相邻房间结构损伤等级小于爆源房间的主要原因。Guo 等^[26]进行了 1/3 缩尺带门窗洞口的 RC 结构内爆炸试验, 分析了多个房间剪力墙结构在爆炸作用下的累积损伤破坏, 但并未进一步分析单次爆炸试验中相邻房间的毁伤效应。Woodson 等^[27]开展了 (含/不含填充墙) 1/4 缩尺两层 RC 框架结构的外爆炸试验, 得出由于加筋填充墙对相邻柱的拉结作用, 导致冲击波对墙体的作用加剧了整体结构的损伤程度。高超等^[28]针对 1/8 缩尺的三层不含填充墙 RC 框架结构进行了 3 种 TNT 当量下 (0.4kg、1.0kg 和 2.0kg) 的结构外爆炸和内爆炸试验, 得出内爆炸作用下框架结构损伤程度高于外爆炸工况, 除框架柱和梁构件破坏外, 柱-梁-板节点处损伤同样严重。刘盛等^[29]针对一榀两跨足尺 RC 框架结构进行了 3kg 和 10kg TNT 当量下的内爆炸试验, 得出传播至相邻房间的冲击波超压峰值大幅衰减且持时进一步延长。

综上所述, 已有关于含填充墙 RC 框架结构爆炸毁伤效应的研究工作主要还存在以下不足:

(1) 结构抗爆性能的试验研究主要聚焦于单个构件或单个房间, 忽视了构件间的相互作用以及建筑

鲁棒性对结构抗爆性能的影响，特别是爆源房间墙板碎片对相邻房间构件的冲击作用^[30, 31]；（2）由于外爆炸和内爆炸载荷特征存在显著区别，单个构件、房间和整体结构将呈现不同的动态响应、破坏模式和毁伤等级，上述差异尚待进一步开展原型试验澄清^[32, 33]。

针对以上研究不足，本文设计并建造了一栋两层含填充墙原型 RC 框架结构，进一步开展了四发结构外爆炸和内爆炸试验，探究了近距离爆炸作用下楼板和填充墙对冲击波载荷的衰减作用，分析了不同爆炸工况下的冲击波载荷特征以及单个构件、房间和整体结构的动态响应和破坏模式。最后，基于建筑结构毁伤评估准则，对每发试验后单个构件、房间和整体结构的毁伤等级进行确定，并对比了建筑结构的毁伤范围。相关结论可为 RC 框架结构的快速毁伤评估和工程防护设计提供试验数据支撑。

1 试验概况

1.1 结构尺寸及配筋

基于《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[34]、《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[35]和《钢筋混凝土用钢 第3部分：钢筋焊接网》(GB/T 1499.3-2022)^[36]规范，设计并建造2层含填充墙原型 RC 框架结构，如图1所示。结构细部尺寸如图2所示。框架结构总建筑面积250m²，轴网尺寸19500mm×5750mm，层高3000mm。每层共5个房间，单个房间尺寸3900mm×5750mm。

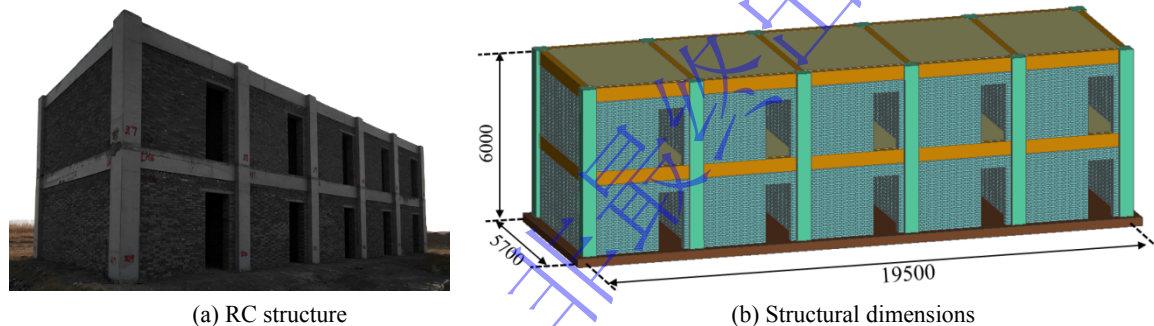


图1 含填充墙原型 RC 框架结构 (单位: mm)

Fig.1 Prototype RC frame structure with masonry infill walls (unit: mm)

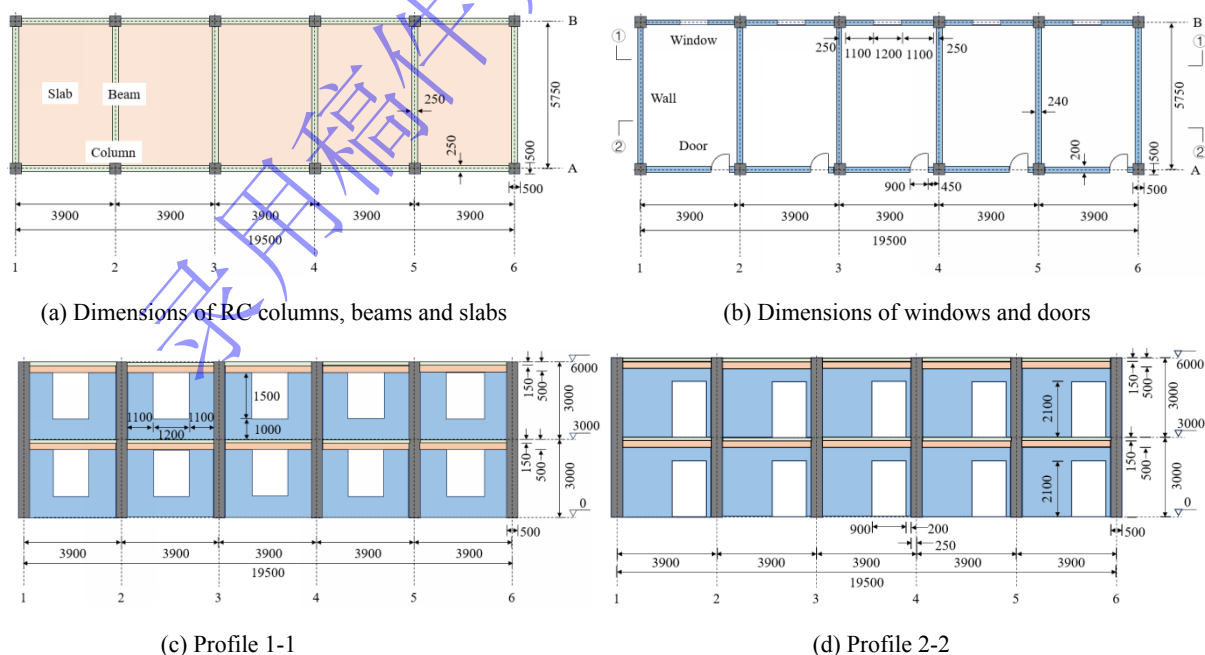


图2 RC 框架结构细部尺寸 (单位: mm)

Fig.2 Detailed dimensions of RC frame structure (unit: mm)

框架柱和梁构件截面尺寸分别为 500mm×500mm 和 250mm×500mm，楼板厚 150mm，门窗尺寸分别为 900mm×2100mm 和 1200mm×1500mm。抗震设防等级为 7 级，采用 C40 混凝土浇筑。各构件尺寸及配筋如图 3 所示。砌体填充墙材料采用烧结型建筑青砖，标准尺寸为 240mm×115mm×53mm。填充墙高度 2500mm，厚度 240mm。采用一顺一丁砌法砌筑，在转角部位加设配砖，进行错缝。

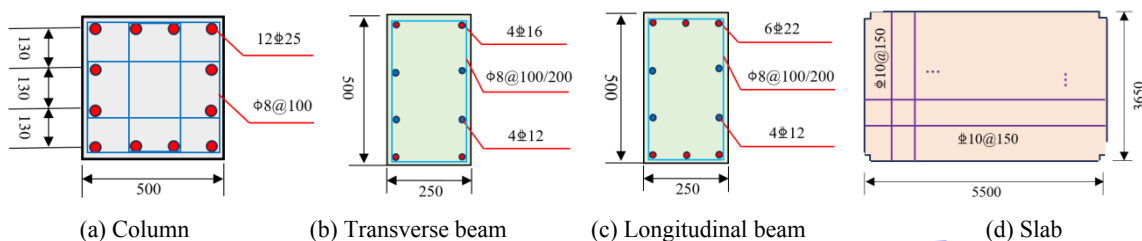


图 3 RC 框架各构件尺寸及配筋 (单位: mm)

Fig.3 Dimensions and reinforcements of structural components (unit: mm)

1.2 爆炸工况设计及测点布置

为了便于整体框架结构及各构件动力行为特征的清晰描述，对各构件和房间进行编号，如图 4 所示。其中，F 指房间编号，Z 指框架柱编号，LH 和 LZ 指横梁和纵梁编号，B 指楼板编号，QW、QC 和 QM 分别指完整墙、带窗墙和带门墙编号。

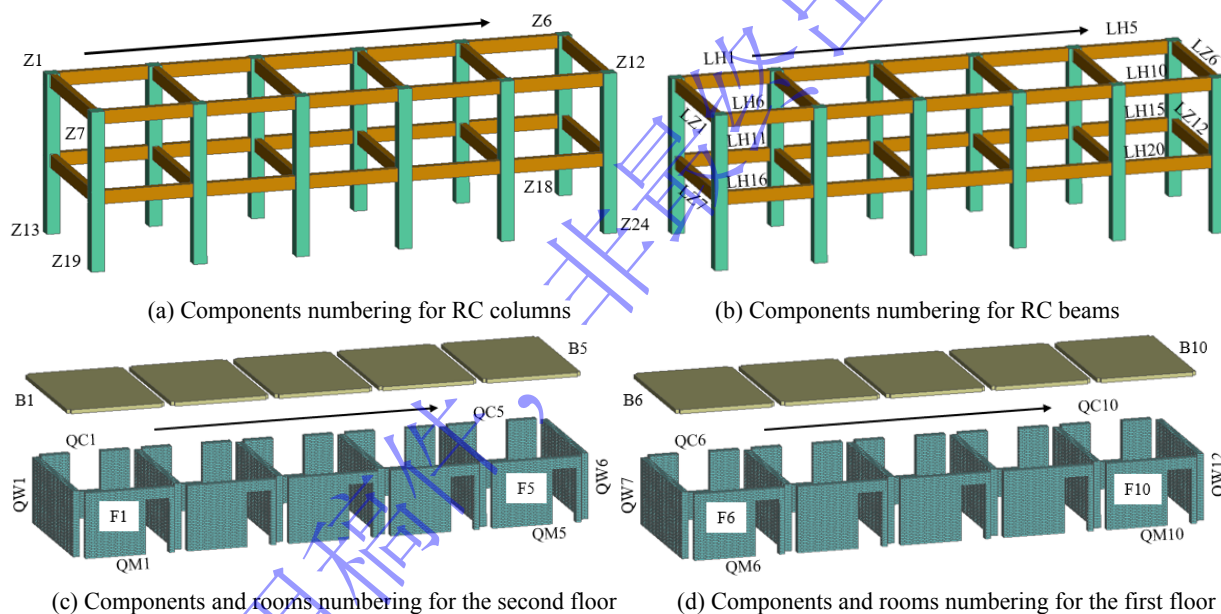


图 4 RC 框架各构件及房间编号

Fig.4 Components and rooms number of RC frame structure

共开展 4 发野外爆炸试验，其中，试验一、二为结构外爆炸试验，等效 TNT 药柱直径 155mm，高度 376mm，当量为 11.573kg（依据某型制式武器中装药质量、爆热等参数精确换算得到）；试验三、四为结构内爆炸试验，TNT 药柱直径 227.24mm，高度 300mm，当量为 20kg。各试验工况中装药和测点布置如图 5 所示。试验一中装药位于房间 F1 顶部外表面，装药底部水平标高 6000mm，距离轴线位置分别为 1950mm 和 2875mm。分别于房间 F1 构件 QW1 底部中心 (PR_1) 和 3 面角隅处布置一个 PFB 地面反射超压传感器 (PR_2)，量程为 0~0.38MPa；试验二中装药位于房间 F10 外侧，距离墙体表面 500mm，装药底部水平标高 0.0mm。于房间 F10 构件 QW12 外侧距离爆点 7m 处分别布置一个自由场超压传感器 (PF_1 ，量程 0~1.38MPa，标高 1500mm，传感器指向爆心) 和一个地面反射超压传感器 (PR_3 ，量程 0~0.38MPa)，同时于房间 F9 构件 QW11 底部 3 面角隅处布置相同量程的两个地面反射超压传感器 (PR_4 和 PR_5 ，量程 0~0.38MPa)；试验三中装药位于房间 F5 内部，距离轴网尺寸分别为 1950mm 和 2875mm，装药中心距离二层底板 1500mm；试验四中装药位于

房间 F9 内部，距离轴网尺寸分别为 1950mm 和 2875mm，装药中心距离地面 1500mm。由于内爆炸破坏威力较大，墙体破碎程度严重，安装超压传感器较为困难，因此仅在试验四中房间 F6 构件 QW7 底部 3 面角隅处布置两个地面反射超压传感器 (PR_6 和 PR_7)，其型号和量程同试验一。

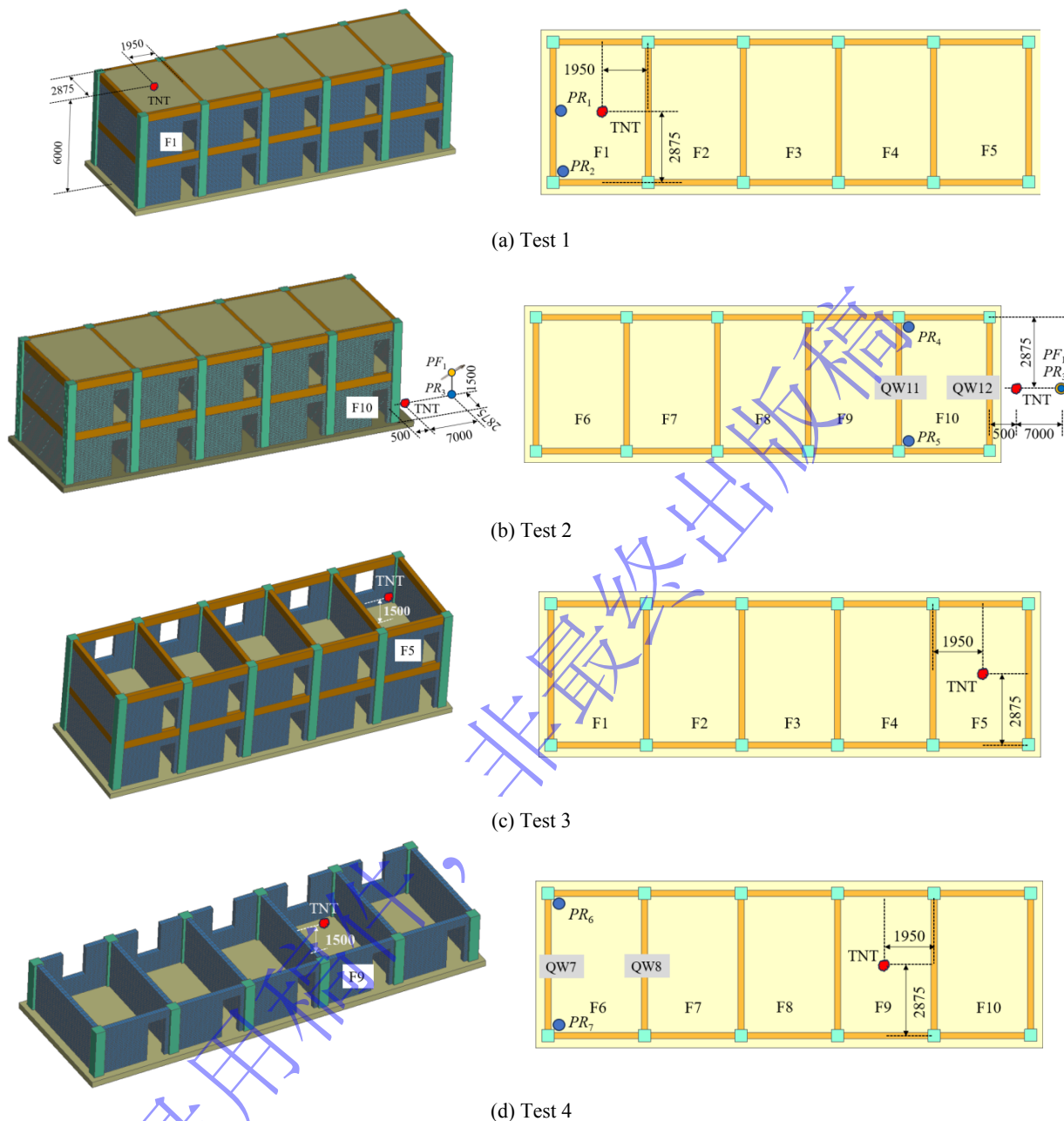


图 5 试验工况中装药和测点布置 (单位: mm)
Fig.5 Test layout of charge and overpressure transducers (unit: mm)

2 试验结果分析

2.1 爆炸载荷

图 6 (a, b) 给出了试验一中 PR_1 和 PR_2 测点的地面反射超压时程曲线。可以看出，房间楼板对冲击波载荷的衰减作用导致房间 F1 内部压力峰值较小，两个测点的峰值超压分别为 0.065MPa 和 0.055MPa。图 6 (c~f) 给出了试验二中 PR_3 、 PR_4 和 PR_5 测点的地面反射超压时程曲线和 PF_1 测点的自由场超压时程曲线。同样受房间 F10 填充墙 QW12 对冲击波载荷的衰减作用，房间内 PR_4 和 PR_5 测点峰值超压较小，分别为 0.045MPa 和 0.057MPa。由于冲击波在结构内壁面的反射与叠加， PR_4 和

PR_5 测点超压时程曲线呈现典型多峰值和长持时的特点。距离爆心 7m 处 PF_1 测点的自由场峰值超压和 PR_3 测点的地面反射峰值超压分别为 0.1MPa 和 0.141MPa。 PR_3 测点反射超压略大于 PF_1 测点, 其原因一方面是由于地面对冲击波的反射增强效应, 另一方面测点 PR_3 较 PF_1 距离炸药更近。图 6 (g, h) 给出了试验四中 PR_6 和 PR_7 测点的地面反射超压时程曲线。由于填充墙 QW9~QW11 对冲击波载荷的连续衰减作用导致房间内 PR_6 和 PR_7 测点峰值超压较小, 分别为 0.0126MPa 和 0.008MPa。

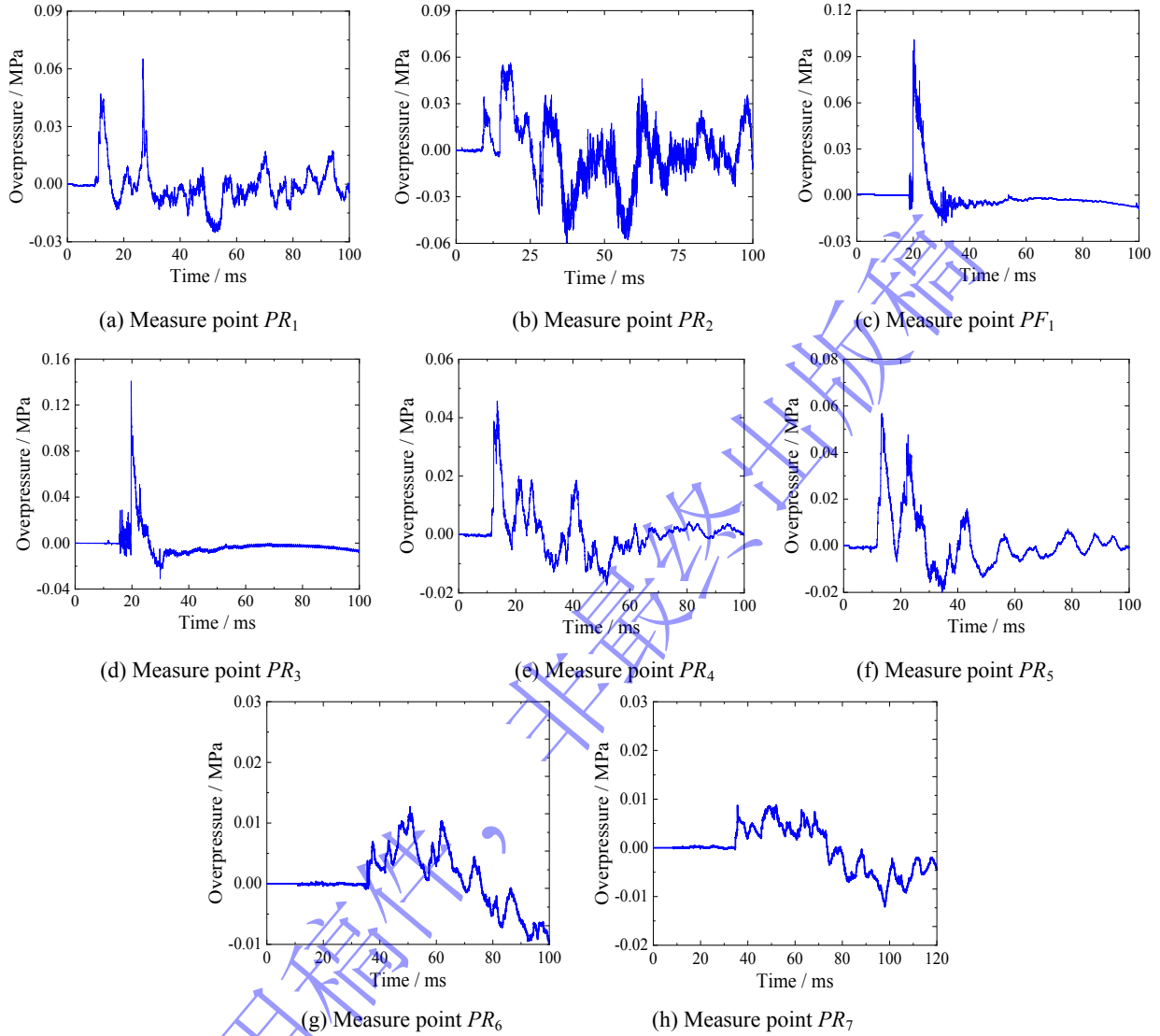


图 6 各测点的超压时程曲线

Fig.6 Overpressure-time history curves at measure points

为量化楼板和填充墙对冲击波峰值超压的衰减作用, 定义超压衰减系数:

$$\eta = \frac{p_{rf} - p_z}{p_{rf}} \quad (1)$$

式中: p_z 和 p_{rf} 分别为有、无隔挡(楼板、填充墙)时的反射峰值超压。

奥尔连科^[37]基于气体动力学理论对不同入射角度的冲击波反射超压进行了估算:

$$p_{rf} = \Delta p_m \left(1 + \frac{\cos \varphi}{C} + \frac{(\gamma + 1)\Delta p_m}{(\gamma - 1)\Delta p_m + 2\gamma p_0} \cos^2 \varphi \right) \quad (2)$$

式中: 入射峰值超压 Δp_m 由式 (3) ^[33] 计算, $1\text{bar}=0.1\text{MPa}$; $Z = H / \sqrt[3]{W_{\text{TNT}}}$ 为比例距离, H 为目标与爆炸中心的距离, W_{TNT} 为等效 TNT 当量; φ 为冲击波入射角度; γ 为绝热系数, 取 1.4; p_0 取 0.1MPa。

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{14.072}{Z} + \frac{5.54}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \text{ bar}, & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \text{ bar}, & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \text{ bar}, & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中 C 由 $\varphi = \varphi_{cr}$ 时反射参数的连续条件确定:

$$C = \begin{cases} \cos \varphi & \varphi \leq \varphi_{cr} \\ \cos \varphi_{cr} & \varphi > \varphi_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ_{cr} 为临界角度, 由式(5)计算。

$$\cos \varphi_{cr} = \sqrt{\frac{r+1}{4}} \sqrt[3]{1 - \exp(-2.3 \frac{\Delta p_m}{p_0})} \quad (5)$$

由式(2~5)可计算得到试验一、二工况下无隔挡时测点 PR_1 、 PR_2 、 PR_4 和 PR_5 的峰值超压 P_{rf} 分别为 0.514、0.409、0.3 和 0.3MPa。结合试验数据计算各个测点的超压衰减系数 η 分别为 87%、86%、85%和 81%。可以看出, 楼板和填充墙能够大幅衰减冲击波强度, 峰值超压平均衰减约 84.75%, 从而显著减轻相邻房间构件的损伤程度。

2.2 结构破坏

(a) 试验一

由于装药位于楼板 B1 顶部外表面, 框架柱、梁无明显混凝土剥落和裂纹产生, 砌体墙未见弯曲, 无裂纹产生, 如图 7 所示。房间 F1 楼板 B1 形成贯穿孔洞, 直径约 300mm, 如图 8 所示。迎爆面混凝土破碎飞散, 背爆面混凝土剥落, 并伴有几条裂纹产生, 钢筋外露并显著变形, 混凝土剥落区域直径最大约 810mm, 最小约 610mm, 钢筋弯曲高度最大约 200mm。

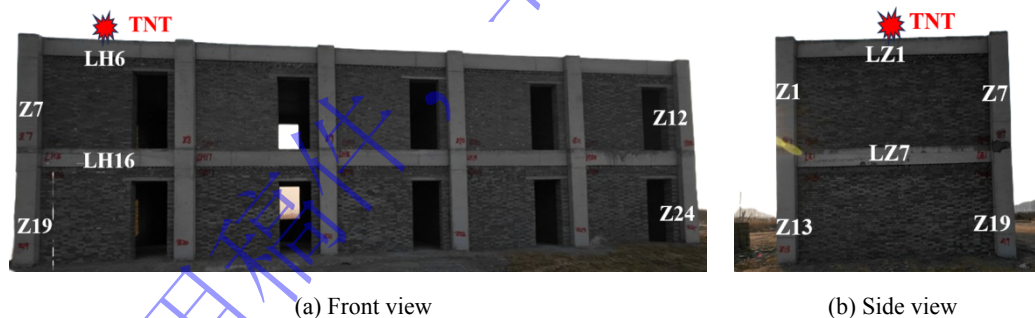
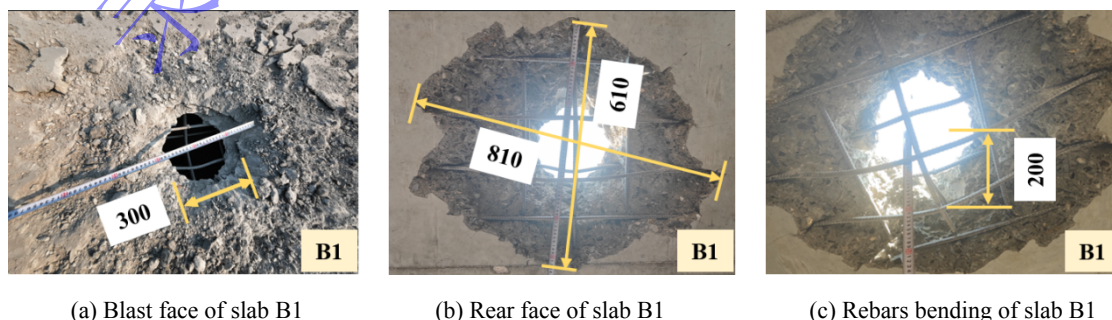


图 7 整体结构破坏模式 (试验一)

Fig.7 Failure model of RC structure (Test 1)



(a) Blast face of slab B1

(b) Rear face of slab B1

(c) Rebars bending of slab B1

图 8 楼板 B1 破坏模式 (单位: mm)

Fig.8 Failure model of roof slab B1 (unit: mm)

(b) 试验二

图 9 给出了试验二后整体结构的破坏模式。由于炸药位于房间 F10 填充墙 QW12 外侧，因此建筑结构毁伤主要集中于房间 F10。如图 10 所示，框架柱 Z18 和 Z24 表面由于破片冲击，导致局部混凝土脱落，柱底破坏相对严重，少量钢筋外露，但仍满足承载力要求，可正常使用。框架梁 LZ12 表面由于破片冲击导致小部分混凝土剥落，楼板 B10 未见混凝土剥落和裂缝产生。填充墙 QW12 发生梯形冲切破坏，水平方向长度最小 1100mm，最大 2700mm，垂直方向高度 1300mm；填充墙 QW12 破碎砖块受爆炸波作用向房间 F10 内部抛掷，撞击到相邻砌体墙 QW11，但 QW11 未见明显变形。

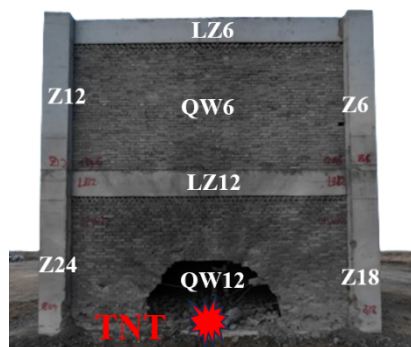
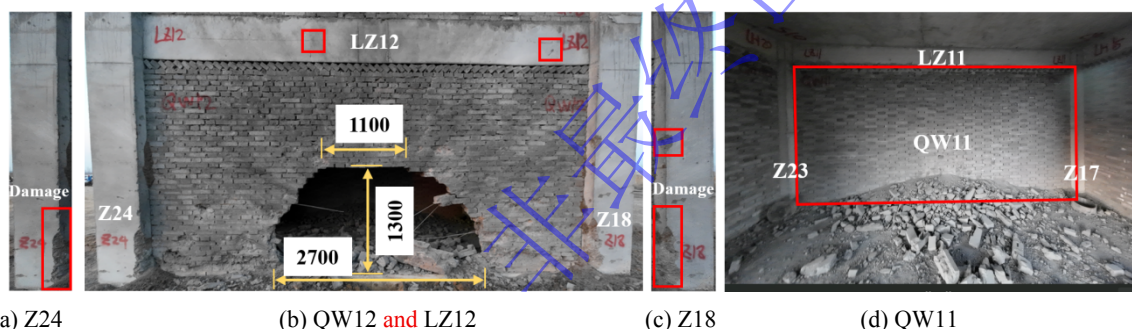


图 9 整体结构破坏模式 (试验二)

Fig.9 Failure model of RC structure (Test 2)



(a) Z24

(b) QW12 and LZ12

(c) Z18

(d) QW11

图 10 框架结构各构件破坏模式 (单位: mm)

Fig.10 Failure models of structural components (unit: mm)

(c) 试验三

图 11~15 分别给出了试验三整体结构和各构件的破坏模式。图 11 可以得出，整体结构损伤集中于爆源房间 F5 和竖向相邻房间 F10，房间内大部分墙体倒塌，框架梁和楼板发生严重变形破坏，而其余房间损伤相对较小。如图 12 所示，爆源房间 F5 框架柱 Z5、Z6、Z11 和 Z12 由于框架梁 LH5、LH10、LZ6 和楼板 B5 的变形膜力拉伸作用，柱顶混凝土局部剥落，出现贯穿裂纹，少量钢筋外露。由于 LH9、LH4 和 LZ4 对中柱的约束作用，使得中柱 Z5 和 Z11 的损伤程度轻于边柱 Z6 和 Z12。竖向相邻房间 F10 框架柱 Z18 和 Z24 底部出现多条细小裂纹。框架柱 Z17 和 Z23 损伤较小，无明显裂纹。框架柱 Z6 和 Z12 向内倾斜，其中 Z6 倾斜角度分别为 $86^{\circ}26'$ (LZ 方向) 和 $87^{\circ}51'$ (LH 方向)，Z12 倾斜角度分别为 $89^{\circ}21'$ (LZ 方向) 和 $88^{\circ}38'$ (LH 方向)。

图 13 给出了试验中框架梁的破坏模式。可以得出，爆源房间 F5 框架梁 LH5、LH10 和 LZ6 受爆炸载荷和楼板拉伸作用，向上弯曲并沿梁轴线逆时针旋转，梁端部和上表面混凝土破碎剥落，大量钢筋外露，梁中部形成多条贯穿裂纹，最大挠度 w_{\max} 分别为 350mm、300mm 和 500mm。此外，框架梁 LH15、LH20 和 LZ12 同样受爆炸载荷和底板拉伸作用，向下弯曲并沿梁轴线顺时针旋转，梁端部和上表面混凝土破碎剥落，梁中部形成多条贯穿裂纹，最大挠度 w_{\max} 分别为 300mm、220mm 和 350mm。由于水平相邻房间 F4 其余构件对框架梁 LZ5 的约束作用，导致框架梁 LZ5 损伤远小于 LZ6，仅在框架梁 LZ5 端部出现少量贯穿剪切裂纹。

对于结构板，如图 14 所示，爆源房间 F5 楼板 B5 和 B10 发生整体冲切破坏，向外抛出，梁-板-

柱节点处混凝土破碎，钢筋断裂。楼板 B4 在梁-柱节点和梁-板节点处出现多条裂纹，最长约 450mm。对于砌体填充墙，如图 15 所示，爆源房间 F5 填充墙 QW5、QW6、QC5 和 QM5 大部分坍塌，砖块最远抛掷距离约 100m。由于柱、梁和板的变形破坏，导致竖向相邻房间 F10 填充墙 QW12、QC10 和 QM10 墙体大部分倒塌。填充墙 QW11 未见裂纹产生，完整性较好。水平方向相邻房间 F4 填充墙 QW4 全部倒塌，填充墙 QC4 有明显裂纹产生，在墙体与框架连接处产生最大横向位移，约 70mm。填充墙 QM4 有明显裂纹产生，并在墙体中心以及墙体和框架连接处均产生最大横向位移，约 45mm。房间 F3 填充墙 QW3 由于 QW4 和 QW5 抛掷砖块的冲击作用发生大面积倒塌，房间 F2 填充墙 QW2 由于抛掷砖块的冲击作用产生少量横向位移，其余墙体未见明显裂纹和砖块破碎。

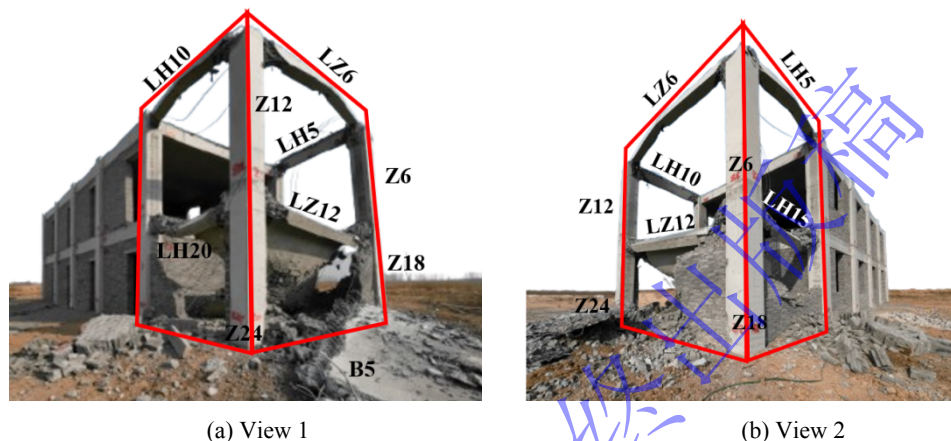


图 11 框架结构整体破坏模式 (试验三)

Fig.11 Failure model of RC structure (Test 3)

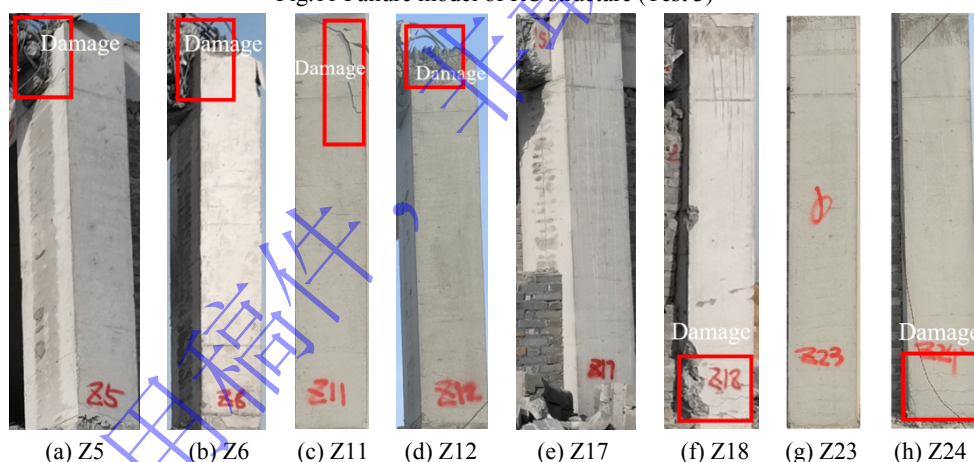
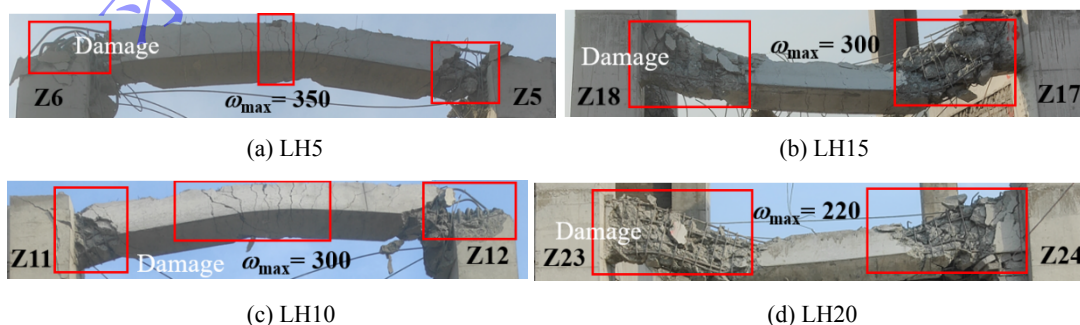


图 12 框架柱破坏模式

Fig.12 Failure models of RC columns



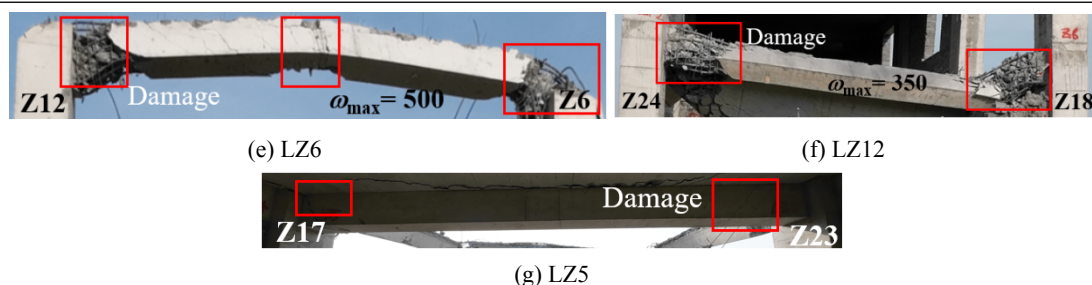


图 13 框架梁破坏模式 (单位: mm)

Fig.13 Failure models of RC beams (unit: mm)



图 14 框架板破坏模式

Fig.14 Failure models of RC slabs

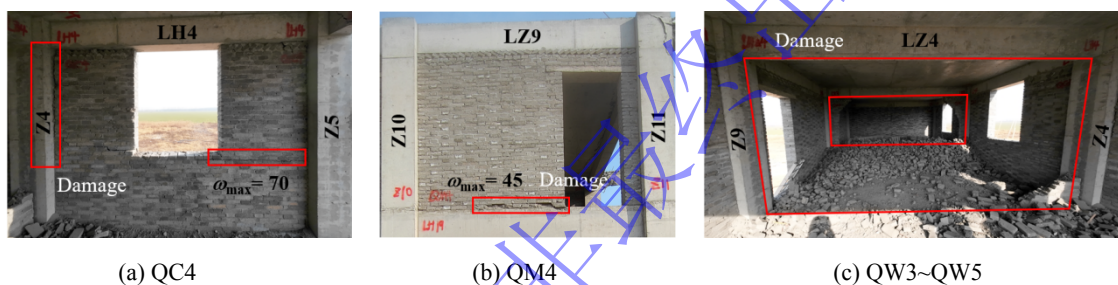


图 15 填充墙破坏模式 (单位: mm)

Fig.15 Failure models of masonry walls (unit: mm)

(d) 试验四

图 16~20 分别给出了试验四整体结构和各构件的破坏模式。图 16 可以得出, 整体结构损伤集中于爆源房间 F9 和竖向相邻房间 F4。其中, 房间 F9 楼板和填充墙整体抛出, 损伤严重。如图 17 所示, 爆源房间 F9 框架柱 Z16、Z17、Z22 和 Z23 由于楼板 B9 的变形膜力拉伸作用, 在柱-梁-板节点处局部混凝土剥落, 并伴有少量裂纹产生。竖向相邻房间 F4 框架柱 Z5 和 Z11 由于楼板 B4 的拉伸作用, 柱顶局部混凝土剥落, 部分钢筋外露。框架柱 Z4 和 Z10 由于相邻构件的约束作用, 损伤程度小于 Z5 和 Z11, 未见混凝土剥落和裂纹产生。

图 18 给出了试验中框架梁的破坏模式。可以得出: 爆源房间 F9 框架梁 LZ11 毁伤效应最为显著, 端部距离梁-柱节点约 500mm 内混凝土完全破碎, 大量钢筋外露。框架梁 LH14 和 LH19 损伤较轻, 接近梁-柱节点位置处出现多条贯穿裂纹, 并伴有少量混凝土剥落, 竖向最大挠度 w_{max} 分别为 20mm 和 10mm。框架梁 LZ10 由于相邻结构的约束作用, 损伤最小, 仅在节点连接处局部混凝土剥落和少量裂纹产生。竖向相邻房间 F4 框架梁 LZ5 端部发生剪切位移, 剪切带上混凝土完全破碎, 钢筋外露。框架梁 LH4 和 LH9 受楼板 B4 的拉伸作用, 发生扭转变形, 梁中部和端部局部混凝土剥落, 并伴随贯穿裂纹产生。框架梁 LZ4 由于房间 F3 各构件的约束作用, 未见混凝土剥落和裂纹产生。其余框架梁未见明显变形。

对于结构板, 如图 19 所示, 爆源房间 F9 楼板 B9 发生整体冲切破坏, 柱-梁-板节点处混凝土破碎, 钢筋断裂。楼板 B9 整体向外抛出后落回地面, 损伤破坏严重。楼板 B4 由于 B9 的冲击碰撞作用, 向上隆起, 楼板与梁柱连接处混凝土破碎, 钢筋外露, 出现多条贯穿裂纹。对于砌体填充墙, 如图 20 所示, 爆源房间 F9 填充墙 QW10、QW11、QC9 和 QM9 发生整体冲切破坏, 墙体大部分坍塌,

砖块最远抛掷距离约 50m。竖向相邻房间 F4 填充墙 QC4 在墙体与框架连接处产生最大横向位移，约 150mm，部分砖块破碎，损伤程度较大。填充墙 QM4 局部墙体坍塌，剩余墙体最大位移约 150mm。水平方向相邻房间 F8 填充墙 QW9 全部倒塌，QC8 和 QM8 未见裂纹产生，仅少量砖块剥落，墙体可正常使用。房间 F7 仅填充墙 QW8 由于 QW9 和 QW10 抛掷砖块的冲击作用发生大面积倒塌。房间 F6 填充墙 QW7 由于抛掷砖块的冲击作用产生少量横向位移，其余墙体未见明显裂纹和砖块破碎。

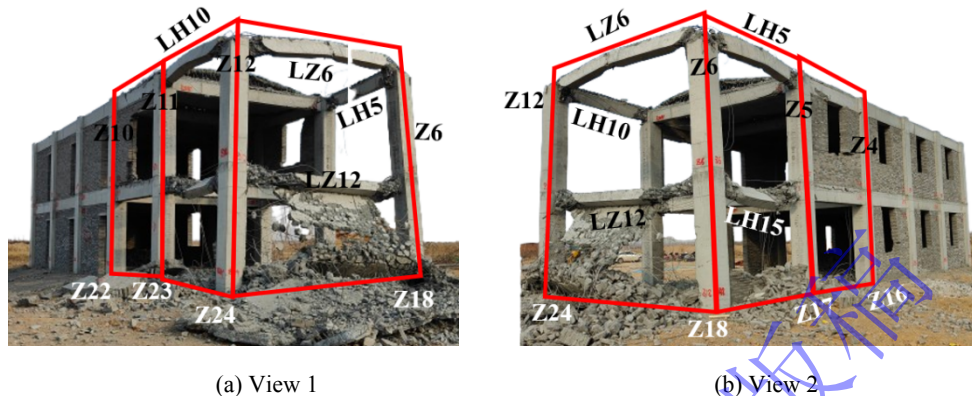


图 16 框架结构整体破坏模式 (试验四)

Fig.16 Failure model of RC structure (Test 4)

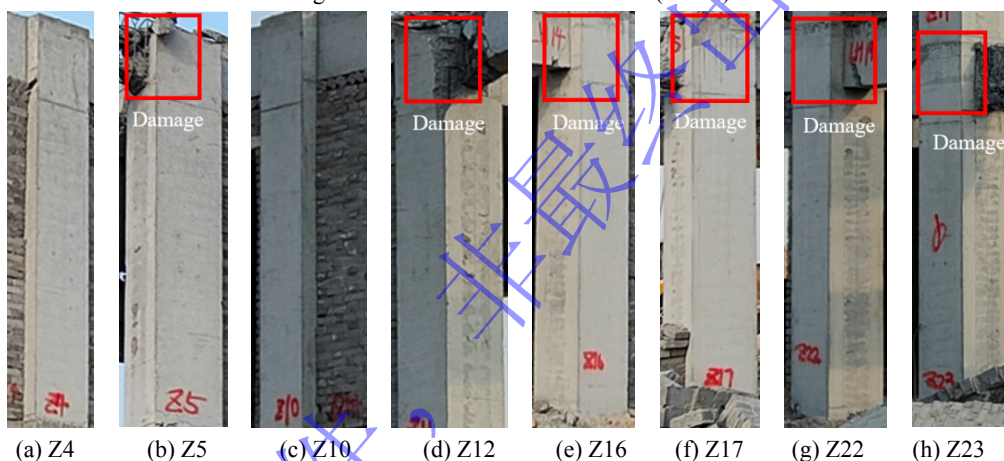


图 17 框架柱破坏模式

Fig.17 Failure models of RC columns

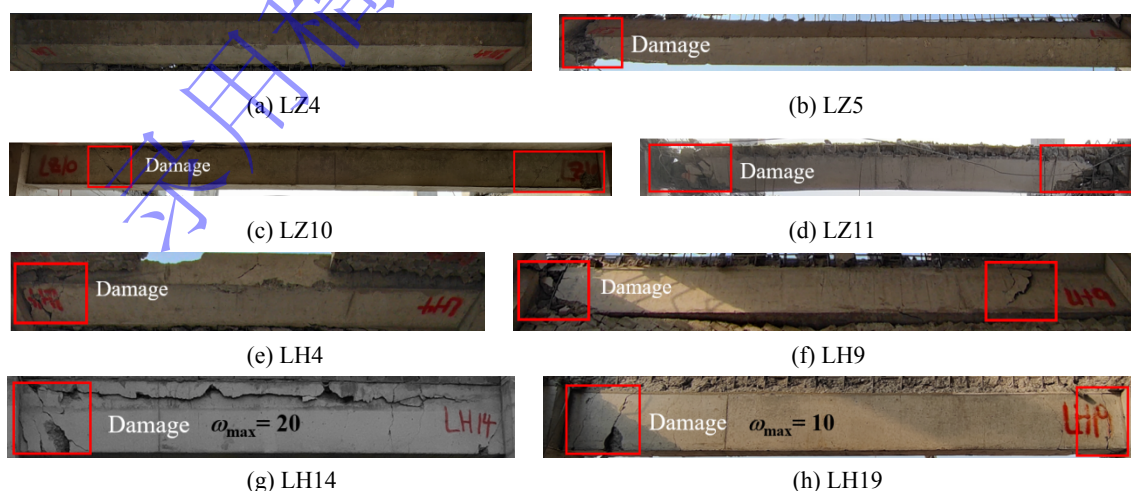


图 18 框架梁破坏模式 (单位: mm)

Fig.18 Failure models of RC beams (unit: mm)

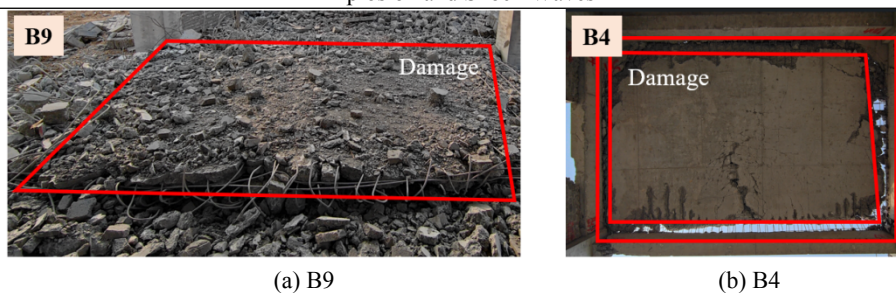


图 19 框架板破坏模式

Fig.19 Failure models of RC slabs

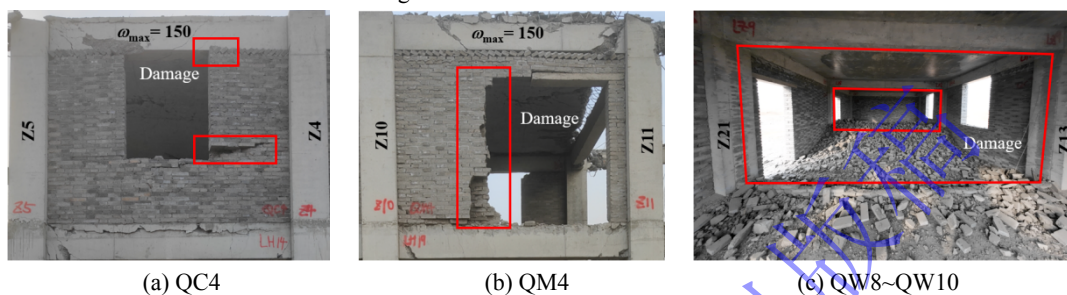


图 20 填充墙破坏模式 (单位: mm)

Fig.20 Failure models of masonry walls (unit: mm)

3 毁伤等级评估

为准确评估单个构件（柱、梁、板和墙）、房间和建筑整体结构的毁伤等级，本节参考相关规范和学者提出的毁伤评估准则^[38-40]，如表 1 至表 3 所示。结合 2.2 节试验结果，对每发试验结束后的构件、房间和整体结构进行毁伤等级确定。

表 1 单个构件毁伤评估标准^[38-40]

Table 1 Damage assessment criteria of structural components

构件	毁伤等级	判别标准
柱	轻度	挠跨比小于 0.9%；构件无明显变形，有不贯通裂缝，少量混凝土保护层剥落，构件满足正常承载要求，可以正常使用
	中度	挠跨比大于 0.9%，小于 2.6%；构件有轻微变形，有少量通裂缝，局部混凝土压碎崩落，钢筋外露，无法满足承载要求，经过修复后还可以继续投入使用
	重度	挠跨比大于 2.6%；构件有明显变形，混凝土大量崩落，部分钢筋屈服或断裂，失去承载能力，无法修复
梁	轻度	挠跨比小于 1.7%；构件无明显变形，有不贯通裂缝，少量混凝土保护层剥落，构件满足正常承载要求，可以正常使用
	中度	挠跨比大于 1.7%，小于 5.3%；构件有轻微变形，有少量通裂缝，局部混凝土压碎崩落，钢筋外露，无法满足承载要求，经过修复后还可以继续投入使用
	重度	挠跨比大于 5.3%；构件有明显变形，混凝土大量崩落，部分钢筋屈服或断裂，失去承载能力，无法修复
板	轻度	挠跨比小于 $1.7\%/\beta$ (β 为支座约束系数)；构件无明显变形，有不贯通裂缝，少量混凝土保护层剥落，可以正常使用
	中度	挠跨比大于 $1.7\%/\beta$ ，小于 $5.3\%/\beta$ ；构件有轻微变形，有少量通裂缝，局部混凝土压碎崩落，钢筋外露，混凝土崩落面积小于 20%，经过修复后还可以继续投入使用
	重度	挠跨比大于 $5.3\%/\beta$ ；构件有明显变形，混凝土大量崩落，混凝土崩落面积大于 20%，大量

		钢筋屈服或断裂，失去承载能力，无法修复
墙	轻度	墙体有微小位移；墙体出现裂纹或变形
	中度	墙体中部有明显位移，与构造柱分离；墙体开裂，出现贯穿裂缝
	重度	墙体大部分或整体倒塌。

表 2 单个房间毁伤评估标准^[38-40]

Table 2 Damage assessment criteria of RC room

毁伤等级	判别标准
完好	没有楼板或墙发生轻度破坏；没有柱构件轻度及以上破坏
轻度	1 个楼板或墙发生轻度破坏
中度	1 个楼板或墙中度及以上破坏；1 个柱构件轻度及以上破坏
重度	2 个楼板或墙中度及以上破坏；1 个柱构件中度及以上破坏

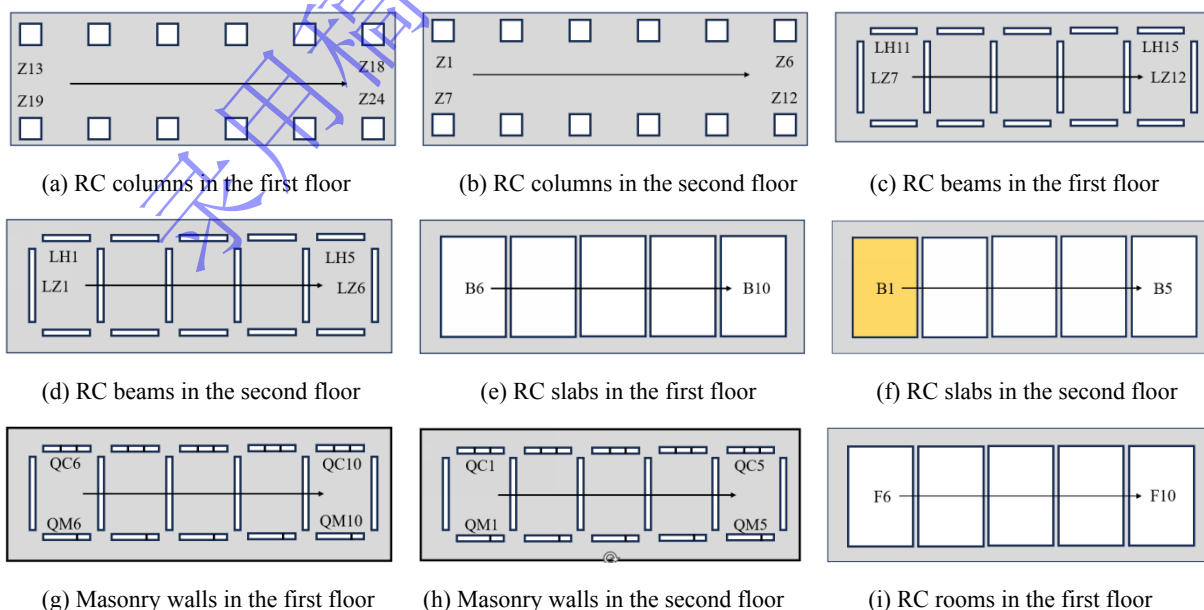
表 3 建筑整体结构毁伤评估标准^[38-40]

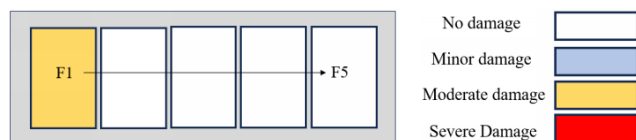
Table 3 Damage assessment criteria of RC frame structure

毁伤等级	判别标准
完好	中度及以上毁伤房间数为 0%
轻度	中度及以上毁伤房间数占比 0~20%
中度	中度及以上毁伤房间数占比 20~50%
重度	中度及以上毁伤房间数占比 50~80%
摧毁	中度及以上毁伤房间数占比大于 80%

3.1 外爆炸试验工况

结合 2.2 节试验一、二中的结构破坏模式，可以得出：试验一中仅楼板 B1 发生贯穿孔洞，满足表 1 中孔洞面积小于 20%，毁伤等级为中度，其余构件毁伤等级为完好。针对单个房间，房间 F1 包含一面中度毁伤楼板，地面有少量混凝土碎块，毁伤等级为中度；房间 F2~F10 内部各构件均无明显损伤，不影响房间正常使用，毁伤等级为完好。框架整体结构共 0 间房间重度毁伤，1 间房间中度毁伤，0 间房间轻度毁伤，9 间房间完好，即满足表 3 中 20% 以下房间达到中度毁伤，因此由表 3 得出整体结构毁伤等级为轻度。各构件和房间毁伤等级如图 21 所示。





(j) RC rooms in the second floor

图 21 构件和房间的毁伤等级 (试验一)

Fig.21 Damage level of structural components and rooms (Test 1)

在试验一结果基础上, 进一步分析试验二的构件和结构毁伤等级。可以得出: 轻度毁伤柱包含 Z13 和 Z18; 轻度毁伤梁为 LZ12; 中度毁伤填充墙为 QW12。针对单个房间, 房间 F10 包含 1 面中度毁伤填充墙 (QW12), 毁伤等级为中度; 房间 F2~F9 各构件均无明显损伤, 不影响房间正常使用, 毁伤等级为完好。房间 F1 毁伤等级为中度 (试验一)。综上, 试验二中框架整体结构共 0 间房间重度毁伤, 2 间房间中度毁伤, 0 间房间轻度毁伤, 8 间房间完好, 即满足表 3 中 20%~50% 房间达到中度毁伤, 因此由表 3 得出整体结构毁伤等级为中度。各构件和房间毁伤等级如图 22 所示。

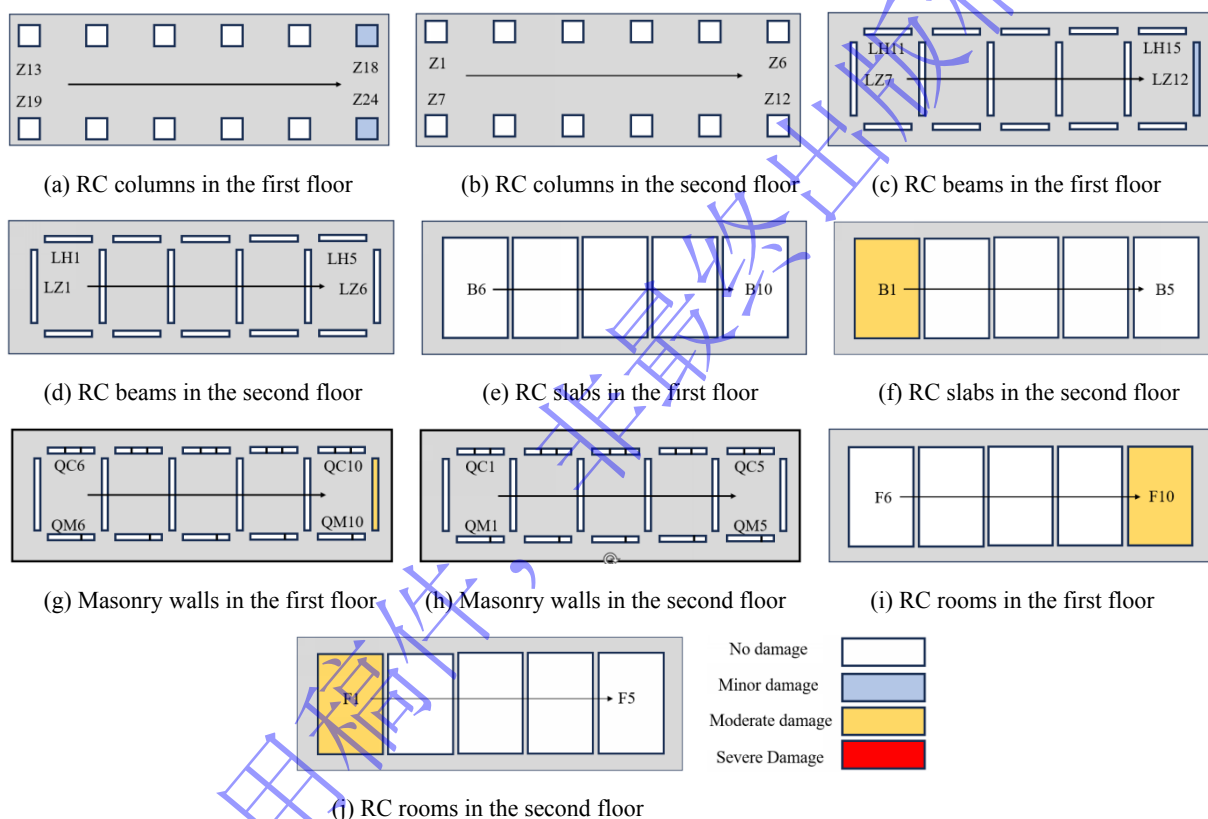


图 22 构件和房间的毁伤等级 (试验二)

Fig.22 Damage level of structural components and rooms (Test 2)

两发外爆炸试验得出, 近距离爆炸 (包括接触爆炸) 作用下, 建筑构件更容易表现出局部冲切破坏。此外, 由于框架板和填充墙可以有效衰减传播至房间内部的冲击波载荷, 因此外爆炸载荷对整体结构毁伤等级影响相对较小。

3.2 内爆炸试验工况

在前两发外爆炸试验结果基础上, 结合 2.2 节试验结构破坏模式, 进一步分析试验三后的构件和结构毁伤等级。可以得出: (1) 构件层次: 中度毁伤柱包含 Z6 和 Z12, 轻度毁伤柱包含 Z5、Z11、Z17、Z23、Z18 和 Z24; 重度毁伤梁包含 LH5、LZ6、LZ12、LH10、LH15 和 LH20, 中度毁伤梁包含 LZ5; 重度毁伤板包含 B5 和 B10, 轻度毁伤板包含 B4; 重度毁伤填充墙包含 QW3~QW6、QC5、QM5、QW12、QC10、QM10、QC4 和 QM4, 轻度毁伤填充墙包含 QW2 和 QW11; (2) 房间层次: 房间 F5 包含 2 根中度毁伤柱、6 根重度毁伤梁、2 面重度毁伤板和 4 面重

度毁伤填充墙，为重度毁伤；房间 F4 包含 1 根中度毁伤梁、4 面重度毁伤填充墙，为重度毁伤；房间 F3 包含 2 面重度毁伤填充墙，为重度毁伤；房间 F2 包含 1 面重度毁伤填充墙，为中度毁伤；房间 F10 包含 3 根重度毁伤梁和 3 面重度毁伤填充墙，为重度毁伤；F9 包含 1 面轻度毁伤填充墙，为轻度毁伤。房间 F1 包含一面中度毁伤板和一面轻度毁伤填充墙，毁伤等级为中度（试验一），其余房间各构件未见明显损伤，毁伤等级为完好；（3）结构层次：框架整体结构共 4 间房间重度毁伤，2 间房间中度毁伤，1 间房间轻度毁伤，3 间房间完好，满足表 3 中 50%~80% 房间达到中度毁伤，因此整体结构为重度毁伤等级。各构件和房间毁伤等级如图 23 所示。

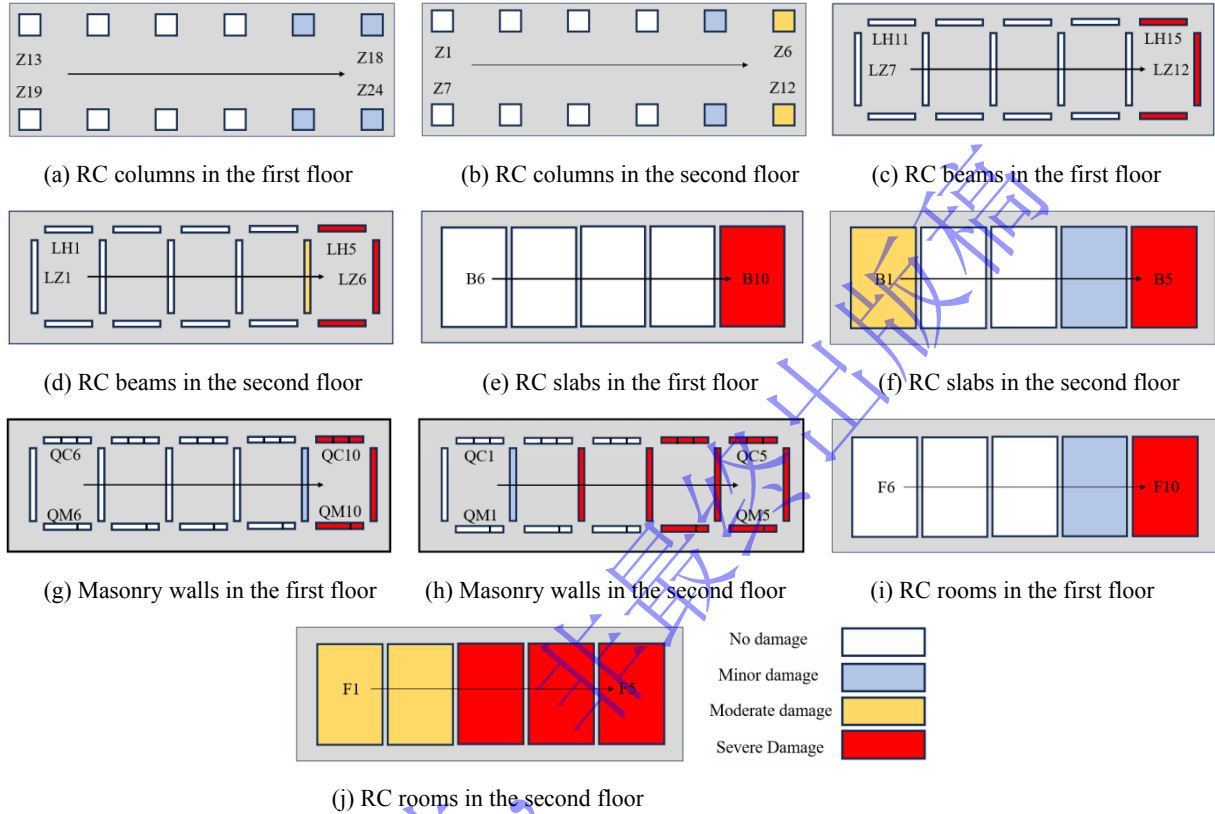
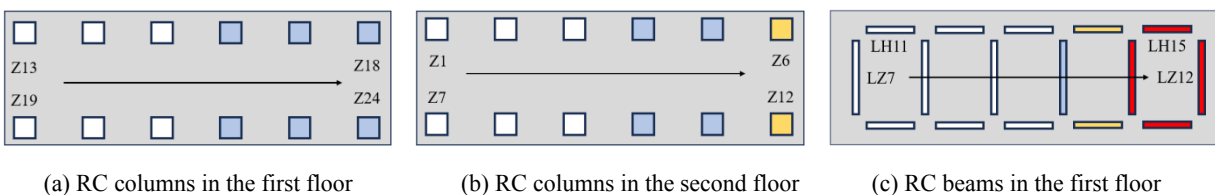


图 23 构件和房间的毁伤等级（试验三）

Fig.23 Damage level of structural components and rooms (Test 3)

进一步在试验三基础上，结合 2.2 节结构破坏模式，分析试验四后的构件和结构毁伤等级。可以得出：（1）构件层次：轻度毁伤柱包含 Z4、Z16、Z22 和 Z10；重度毁伤梁包含 LZ11，中度毁伤梁包含 LZ5、LH4、LH9、LH14 和 LH19，轻度毁伤梁包含 LZ10 和 LZ4；重度毁伤板包含 B4 和 B9，轻度毁伤板包含 B3 和 B8；重度毁伤填充墙包含 QW8~QW12、QC9 和 QM9，轻度毁伤填充墙包含 QW7、QC8 和 QM8；（2）房间层次：房间 F9 包含 1 根重度毁伤梁，2 根中度毁伤梁，1 面重度毁伤板和 4 面重度毁伤墙，为重度毁伤；房间 F4 包含 1 根重度毁伤梁、5 根中度毁伤梁、4 面重度毁伤填充墙，为重度毁伤；房间 F7 和 F8 包含 2 面重度毁伤填充墙，为重度毁伤；房间 F6 包含 1 面重度毁伤填充墙，为中度毁伤。试验一至试验三中，房间 F1 为中度毁伤，房间 F2 为中度毁伤，房间 F3~F5、F10 为重度毁伤；（3）结构层次：框架整体结构共 7 间房间重度毁伤，3 间房间中度毁伤，0 间房间轻度毁伤，0 间房间完好，满足表 3 中 80% 及以上房间达到中度毁伤，即整体结构毁伤等级为摧毁。各构件和房间毁伤等级见图 24 所示。



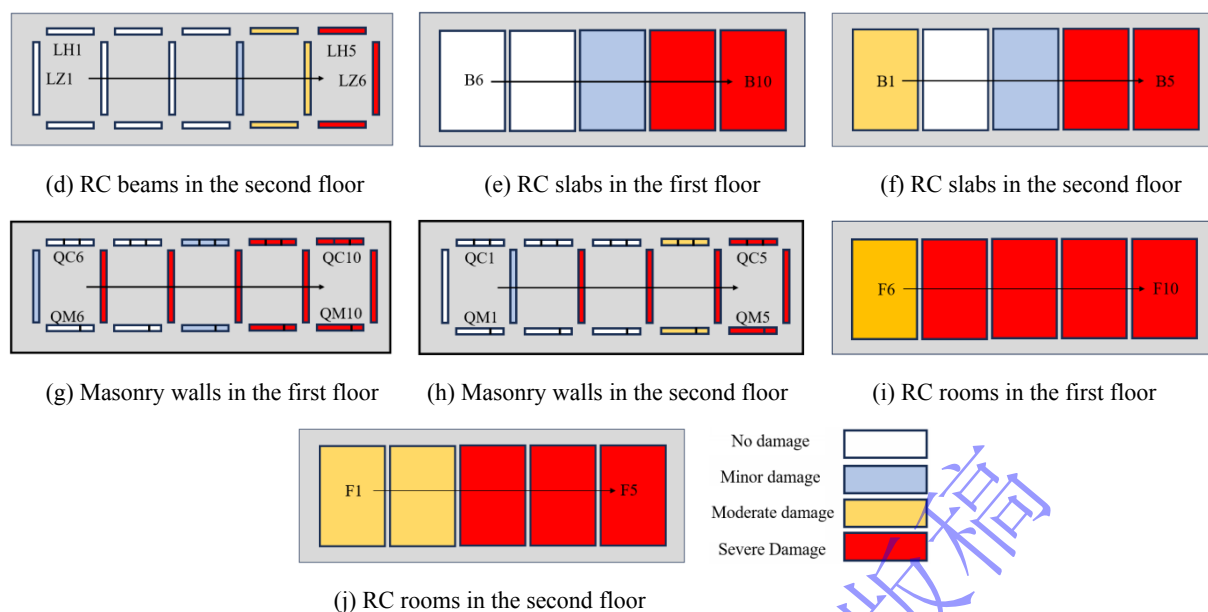


图 24 构件和房间的毁伤等级 (试验四)

Fig.24 Damage level of structural components and rooms (Test 4)

两发内爆炸试验结果可以得出：（1）内爆炸作用下沿冲击波传播方向填充墙（如试验三中填充墙 QW3 和 QW4，试验四中填充墙 QW8）的毁伤等级高于其余填充墙（如试验三中填充墙 QC3 和 QM3，试验四中填充墙 QC7 和 QM7），其主要原因在于沿冲击波传播方向填充墙除了受到传播至房间内部的冲击波载荷，还受到爆源房间墙体砖块碎片的抛掷碰撞作用，而其余填充墙仅受到冲击波载荷。因此，在进行建筑结构毁伤评估时，需要综合考虑传播至房间内部的冲击波载荷以及爆源房间墙板碎片抛掷对相邻房间构件的毁伤增强效应；（2）内爆炸冲击波在含填充墙 RC 框架结构中较难向外自由扩散，多次反射叠加后加剧了结构破坏，其毁伤等级高于外爆炸试验结果。框架板和填充墙受力面积较大且抗爆能力较为薄弱，在内爆炸作用下其毁伤等级高于框架柱和梁。此外，与自由场爆炸工况下楼板弯曲破坏不同，由于本研究中内爆炸 TNT 当量较大，楼板未见明显弯曲破坏，而是沿柱-梁-板节点处发生整体冲切破坏，钢筋全部拉断。这表明内爆炸作用下，角隅处的冲击波载荷大于楼板中心载荷。因此，对于内爆炸工况，加强楼板与梁柱连接位置以及节点处混凝土和钢筋强度，可有效提升框架结构的抗爆性能，防止楼板整体冲切破坏。

4 结论

本文设计并建造了一栋两层含填充墙原型 RC 框架结构，并开展了 11.573kg 和 20kg 等效 TNT 当量下的四发结构外爆炸和内爆炸毁伤试验研究，分析了不同工况下的爆炸载荷特征以及构件-房间-结构的破坏模式和毁伤等级，为 RC 框架结构的快速毁伤评估和工程防护设计提供了原型试验数据支撑。主要结论有：

（1）外爆炸作用下，填充墙和楼板的损伤破坏能够消耗大部分爆炸能量，大幅衰减传播至房间内部的冲击波载荷，本文试验中峰值超压平均衰减约 84.75%，从而有效降低整体结构的毁伤等级；

（2）内爆炸作用下，角隅处的载荷汇聚效应导致填充墙和楼板呈现整体冲切破坏。同时，受冲击波载荷和墙板碎片的冲击碰撞，相邻房间沿冲击波传播方向的填充墙和楼板毁伤等级较高。因此，进行建筑结构快速毁伤评估时，不能忽视爆源房间墙板碎片抛掷对相邻房间构件的毁伤增强效应。加强楼板与梁柱连接位置以及节点处混凝土和钢筋强度，可有效提升框架结构的抗爆性能；

（3）由于框架板和填充墙对爆炸冲击波的反射与叠加，导致爆炸能量无法自由扩散，显著加剧了整体结构的损伤程度，因此内爆炸工况下整体结构的毁伤等级和范围高于外爆炸工况。

值得注意的是，本次四发爆炸试验均在同一原型建筑结构上依次开展。受试验成本高、结构破坏

不可逆等客观条件限制, 后续试验结果存在一定的累积损伤效应。特别是试验三结束后, 建筑结构毁伤等级为重度, 其边界约束条件发生显著变化, 导致试验四结构毁伤实际为本次爆炸载荷与前序试验累积毁伤共同作用的结果。后续将采用精细化数值仿真对本文试验工况进行复现, 并开展有/无初始毁伤下的结构爆炸数值仿真研究, 定量分析多次爆炸下的建筑结构累积毁伤效应。

参考文献

- [1] AHMET IT, YASAR A, HAKAN Y, et al. An experimental evaluation on structural performance level of corroded reinforced concrete frames [J]. *Engineering Structures*, 2025, 325: 119479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119479.
- [2] WANG SN, CHENG XW, LI Y, et al. Assessing progressive collapse regions of reinforced concrete frame structures using Graph Convolutional Networks [J]. *Engineering Structures*, 2025, 322: 119076. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119076.
- [3] Federal Emergency Management Agency (FEMA). The Oklahoma City bombing: improving building performance through multi-hazard mitigation [R], FEMA-277. Washington, DC: Building Performance Assessment Team, 1996.
- [4] SUDOYO H, WIDODO PT, SURYADI H, et al. DNA analysis in perpetrator identification of terrorism-related disaster: Suicide bombing of the Australian Embassy in Jakarta 2004 [J]. *Forensic Science International: Genetics*, 2008, 2(3): 231–237. DOI: 10.1016/j.fsigen.2007.12.007.
- [5] 百度百科. 孟买爆炸案 [EB/OL]. (2024-01-17) [2025-6-11]. https://baike.baidu.com/item/孟买爆炸案/3660635?fr=ge_ala.
- [6] 搜狐网. 澳大利亚驻印尼大使馆附近发生爆炸. <https://news.sohu.com/20040909/n221964932.shtml>.
- [7] 腾讯网. 拦截失败! 导弹 2 倍音速穿透乌决策中心大楼 [EB/OL]. (2023-06-23) [2025-6-11]. <https://new.qq.com/rain/a/20230623A06Z9E00#>.
- [8] 彭琦, 吴昊, 方秦, 等. 长持时平面爆炸波作用下 RC 梁动力响应研究 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(03): 87-101. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0751.
PENG Q, WU H, FANG Q, et al. Dynamic responses of RC beams under long-duration near-planar blast waves [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(03): 87-101. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0751.
- [9] 马亮亮, 吴昊. 爆炸作用下预应力 RC 梁桥的损伤评估 [J]. *工程力学*, 2025, 42(11): 159-172. DOI: 1000-4750(2025)11-0159-14.
MA LL, WU H. Damage assessment of prestressed RC girder bridge under explosion [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(11): 159-172. DOI: 1000-4750(2025)11-0159-14..
- [10] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸载荷作用下的毁伤效应及评估方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2012.
- [11] DUA A, BRAIMAH A, KUMAR M. Contact explosion response of RC columns: Experimental and numerical investigation [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. 2020, 173, 799–820, DOI:10.1680/jstbu.18.00223.
- [12] CHEN D, WU H, CHENG YH. Dynamic behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted brick masonry infill walls under blast loads: Shock tube test and analyse [J]. *International Journal of Impact Engineering* 2024, 190: 104975. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2024.104975.
- [13] CHEN D, WU H, FANG Q. Simplified micro-model for brick masonry walls under out-of-plane quasi-static and blast loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 174: 104529. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2023.104529.
- [14] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: II. Numerical Studies [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2012, 3(1): 61–79. DOI: 10.1260/2041-4196.3.1.61.
- [15] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90: 46-60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.001.
- [16] EDRI I, FELDGUN V R, KARINSKI Y S, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: III. Afterburning effect [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2012, 3(3): 311-331. DOI: 10.1260/2041-

- 4196.3.3.311.
- [17] KIM HJ, HWANG K, YOON YH, et al. Numerical analysis of the effect of afterburning on damage to the concrete structure under interior explosion [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022, 16(1): 1-21. **DOI:** 10.1186/s40069-022-00497-w.
- [18] 柏小娜, 李向东, 杨亚东. 封闭空间内爆炸冲击波超压计算模型及分布特性研究 [J]. *爆破器材*, 2015, 44(03): 22-26.
BO XN, LI XD, YANG YD. Calculation model and the distribution of wave pressure under internal explosion in closed space [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(03): 22-26.
- [19] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加分析模型 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(08): 1449-1455. **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
YANG YD, LI XD, WANG XM. An analytical model for propagation and superposition of internal explosion shockwaves in closed cuboid structure [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(08): 1449-1455. **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
- [20] 朱晓伟. 钢筋混凝土框架结构内部爆炸效应研究 [D]. 西南科技大学, 2015.
- [21] CHEN GQ, LU JX, WU H. Dynamic behavior and retrofitting of RC frame building under vehicular bomb explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023: 106925. **DOI:** 10.1016/j.engfailanal.2022.106925.
- [22] 吕晋贤, 吴昊, 卢永刚, 等. 爆炸作用下建筑结构高效毁伤评估方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(01): 135-152. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0053.
LU JX, WU H, LU YG, et al. High-efficiency assessment method of damage for building structures under explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(01): 135-152. **DOI:** 10.11883/bzycj-2024-0053.
- [23] ELSANADEDY HM, ABADEL AA. High-fidelity FE models for assessing progressive collapse robustness of RC ordinary moment frame (OMF) buildings [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 136: 106228. **DOI:** 10.1016/j.engfailanal.2022.106228.
- [24] LINA M. LOPEZ AP, ANASTASIO P, et al. Experimental response and numerical modelling of a full-scale two-span concrete slab frame subjected to blast load [J]. *Engineering Structures*, 2023, 296: 116969. **DOI:** 10.1016/j.engstruct.2023.116969.
- [25] SANTOS AP, CASTEDO R, LOPEZ LM, et al. Reinforced concrete building with IED detonation: test and simulation [J]. *Apply Science*, 2022, 12: 7803. **DOI:** 10.3390/app12157803.
- [26] GUO XK, LI Y, DSNIEL P, et al. A reinforced concrete shear wall building structure subjected to internal TNT explosions: test results and numerical validation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 190: 104950. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2024.104950.
- [27] WOODSON SC, BAYLOT JT. Structural collapse: quarterscale model experiments [R]. Vicksburg: US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Centre, 1999.
- [28] 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(07): 9-20. **DOI:** 10.15951/j.tmgcxb.2013.07.012.
GAO C, ZONG ZH, WU J. Experimental study on progressive collapse failure of RC frame structures under blast loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(07): 9-20. **DOI:** 10.15951/j.tmgcxb.2013.07.012.
- [29] 刘盛. 框架建筑空间内爆炸威力场分布范围研究 [D]. 军事科学院, 2024. **DOI:** 10.27193/d.cnki.gjsky.2024.000036.
- [30] PARK Y, KIM K, PARK SW, et al. Experimental evaluation on blast resistance of reinforced concrete structures under partially confined explosion [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024, 18(1): 11-13. **DOI:** 10.1186/s40069-024-00663-2.
- [31] SHI YC, XIONG W, LI ZX, et al. Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90: 122-131. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.002.
- [32] 柏准, 胡玉涛, 钱秉文, 等. 多次内爆炸荷载下剪力墙累积毁伤破坏试验 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(S1): 50-58. **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.

- BO Z, HU Y T, QIAN B W, et al. Experimental study on cumulative damage of shear wall under multiple internal explosions [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(S1): 50-58. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0768.
- [33] 李军润, 卢永刚, 冯晓伟, 等. RC 箱型结构内爆炸载荷特性和动力行为分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2026, 46(01): 133-153. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0388.
- LI JR, LU YG, FENG XW, et al. Analysis of internal explosion load characteristics and dynamic behavior in RC box structures [J/OL]. *Explosion and Shock Waves*, 2026, 46(01): 133-153. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0388.
- [34] 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [35] 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of buildings: GB 51182-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [36] 钢筋混凝土用钢 第 3 部分: 钢筋焊接网: GB/T 1499.3-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Steel for reinforced concrete - Part 3: Steel bar welded mesh: GB/T 1499.3-2022 [S]. Beijing: China Standards Press. 2016.
- [37] ORLENKO O. 爆炸物理学 (上册) [M]. 孙承纬译, 北京: 科学出版社, 2011, 286-293.
- [38] 周旭. 导弹毁伤效能试验与评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [39] 陈旭光. 建筑物在侵爆作用下的累积毁伤评估 [D]. 国防科技大学, 2019. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.000111.
- [40] UFC3-340-02. Structures to resist the effects of accidental explosions [R]. Washinton D. C.: Department of Defense, 2008.