

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602010

典型建筑目标薄弱部位识别与爆炸毁伤验证

盛嘉贝¹, 易华辉^{1*}, 徐翔云², 焦钰欣¹, 朱 鹏¹, 张 贤¹, 李小天¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 西安 710021;

2. 军事科学院, 北京 100036)

摘 要: 为解决建筑目标薄弱部位带来的潜在风险难以评估的问题, 提出通过对建筑物的部位与功能耦合, 分析并预测其薄弱部位。首先, 选取建筑物的关键构件, 通过静力分析计算出不同构件对整体的承载比例因子; 然后, 基于某高层建筑物易损性评估模型以及框架-剪力墙结构建筑物拆除构件仿真计算结果赋予构件关联度系数, 加权得出构件贡献因子、房间贡献因子, 通过对房间使用功能及其所处空间相对位置加权得到最不利楼层, 预测该建筑整体的薄弱部位为二层中心房间; 最后, 通过建立有限元模型验证所提方法的有效性。仿真实验结果表明: 100、200、300、400 kg 4种当量下, 案例中二层中心房间的毁伤指标均为同当量下不同位置的最大值, 证明了通过贡献因子判别薄弱部位的方法具有可靠性。

关键词: 建筑物; 贡献因子; 薄弱部位; 整体毁伤评估

中图分类号: TU375; TJ410

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)02-0102-12



建筑目标作为承担定点防御、通信中枢等重要职能以及大量政治经济活动的载体, 是现代战争中的主要打击目标之一^[1]。随着我国综合国力的持续增强, 众多具有国际影响力的会议及大型活动在我国主要城市举办, 在此背景下, 建筑物安全防护的重要性日益凸显。对典型建筑目标薄弱部位展开研究能够指导建筑设计及施工, 通过优化结构布局、材料选择和连接方式可以实现更高的建筑安全性和抗打击能力^[2]。

目前, 国内外学者针对 RC 梁^[3-6]、板^[7-9]、柱^[10-11]等构件在爆炸荷载下的力学响应与损伤机制已开展大量研究。在整体结构层面, 周旭^[12]构建了导弹毁伤效能试验与评估体系, 为建筑毁伤评估提供了基础框架。刘家琦^[13]针对桥梁、建筑物和机场跑道3类目标的实际功能特性, 对功能性毁伤的指标参数和评估算法进行了深入研究。将功能性毁伤评估结果与物理性毁伤评估结果相结合, 得到毁伤评估的综合等级。成赞凌^[14]利用有限元

软件 ABAQUS 提出了刚架拱桥薄弱部位识别理论, 指出结构重要性系数局部峰值即为薄弱部位, 但其方法更适用于桥梁结构, 对建筑结构的适配性不足。孙晨昊^[15]以毁伤面积的加权值即毁伤因子作为评价标准, 划定了轻、中、重3个破坏等级, 为爆炸毁伤验证提供了可操作的量化标准, 但未融入功能权重。张贤^[16]通过对框架建筑目标的结构特性和功能特性共同分析选定爆炸装置起爆位置, 由柱位置重要性系数和房间功能重要性系数共同决定最优或最不利的摆放楼层。综合来看, 国内外学者更多关注的是建筑物中关键构件或单一结构类型的毁伤情况, 而对框剪结构这类建筑研究较少。

基于现有研究基础, 针对框剪结构建筑的特性与实际需求, 开展典型建筑目标薄弱部位识别与爆炸毁伤验证研究。以建筑物主要承载构件的承载力为参量, 将承载比例因子与关联度系数结合, 得到构件贡献因子, 进而计算出房间贡献因

收稿日期: 2025-10-21

修回日期: 2026-01-30

录用日期: 2026-02-09

第一作者: 盛嘉贝 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事毁伤评估研究。E-mail: 1197195156@qq.com

***通信作者:** 易华辉 (1977—), 男, 教授, 主要从事毁伤评估研究。E-mail: yihuahui1977@126.com

引用格式: 盛嘉贝, 易华辉, 徐翔云, 等. 典型建筑目标薄弱部位识别与爆炸毁伤验证[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (2): 102-113. SHENG Jiabei, YI Huahui, XU Xiangyun, et al. Identification of weak parts of typical building targets and verification of explosion damage [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (2): 102-113.

子, 通过对房间使用功能及其所处空间位置加权得到最不利楼层, 从而预测建筑整体的薄弱部位, 最终通过有限元数值仿真验证识别结果的可靠性。研究成果可以更好地评估建筑物潜在风险, 从而设计出更加安全的建筑, 减少潜在的人员伤亡和财产损失。

1 典型建筑目标薄弱部位识别

1.1 构件贡献因子

多数建筑物在重力荷载的作用下, 建筑物的各个构件均产生一定的内力, 当某个构件失效后, 其所承担的内力会由其他构件承担, 因此, 构件的内力大小反映了构件对结构体系的贡献能力^[12], 其计算表达式为

$$G_k = g_l \cdot g_c \quad (1)$$

式中: G_k 为关键构件 k 的贡献因子; g_l 为构件承载比例因子; g_c 为结构体系关联度系数。

构件承载比例因子的物理含义是构件承受的重力荷载与建筑结构体系所承担的重力荷载之比。由于构件的类型与组成方式不同, 其所采用的力学指标也有较大区别, 需要根据结构体系类型给出具体的构件承载比例因子表达式^[12]。

框架结构体系中框架梁的 g_l 表达式为

$$CEB_i = \frac{Vb_i}{\sum_{i=1}^n Vb_i + \sum_{j=1}^p Nc_j} \quad (2)$$

框架柱的 g_l 表达式为

$$CEC_j = \frac{Nc_j}{\sum_{i=1}^n Vb_i + \sum_{j=1}^p Nc_j} \quad (3)$$

式中: n 为框架结构体系中框架梁总数; p 为框架结构体系中框架柱总数; CEB_i 为框架梁构件影响系数; CEC_j 为框架柱构件影响系数; Vb_i 为梁的剪力; Nc_j 为柱的轴力。

剪力墙结构体系中剪力墙的 g_l 表达式为

$$CEW_i = \frac{NW_i}{\sum_{i=1}^m NW_i} \quad (4)$$

式中: m 为剪力墙结构体系中剪力墙总数; NW_i 为剪力墙轴力; CEW_i 为剪力墙构件影响系数。

框剪结构中主要承重构件为剪力墙、柱构件; 连梁和框架梁通常作为结构抵抗外界荷载的第一道防线, 是主要耗能构件, 作为一般构件; 次要构件为楼板和填充墙^[17]。在框剪结构简化分析中,

框剪结构简化计算可聚焦于剪力墙和框架柱以捕捉核心力学行为, 因剪力墙主要提供抗侧刚度, 框架柱主要承担竖向荷载及部分侧向力, 此种简化兼顾计算效率与工程精度, 可实现计算效率与模型精度的平衡^[18]。因此, 本文仅选定柱构件与剪力墙为特征构件, 对框剪结构建筑中的框架柱承载比例因子与剪力墙承载比例因子的表达式进行改进。

改进后的框架柱承载比例因子的表达式为

$$g_c = \frac{Nc_j}{\sum_{i=1}^m NW_i + \sum_{j=1}^p Nc_j} \quad (5)$$

改进后的剪力墙承载比例因子的表达式为

$$g_w = \frac{NW_i}{\sum_{i=1}^m NW_i + \sum_{j=1}^p Nc_j} \quad (6)$$

以某地区电力大楼为例展开研究。电力大楼局部等效模型为5层5跨的框剪结构, 层高为3.6 m, 框架柱截面尺寸为600 mm×600 mm, 梁尺寸为400 mm×600 mm, 纵向柱距为6 m, 横向柱距分别为6 m和3 m, 分为三跨。框架-剪力墙结构采用现浇钢筋混凝土施工工艺, 梁、板、柱及剪力墙均采用强度等级为C40的混凝土, 采用HRB400级热轧带肋钢筋作为主要受力钢筋。建筑物立面示意如图1所示。

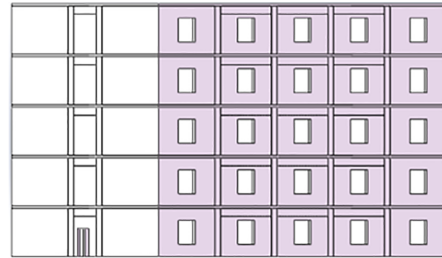


图1 典型框剪结构建筑物

Fig. 1 Typical frame-shear structure building

建筑物一楼的底视图如图2所示, 由于建筑物沿长度和宽度方向均为轴对称结构, 因此, 选取其中1/4结构内的5个柱构件进行分析^[19], 分别按照图中的命名规则定义其编号为1至5号, 剪力墙为L形, 对应的房间编号为1-1、1-2、1-3。

建筑物各层柱构件、剪力墙所承载的结构质量如表1所示, 其中, 五楼构件承载重力是顶楼的楼板和梁构件的重力之和^[20], 为 2.73×10^6 N; 四楼相比于五楼多承载了一层建筑物的重力, 即整层建筑物重力 5.79×10^6 N; 同理, 三楼、二楼和一楼的构件也依次比上一层多承载了 5.79×10^6 N。

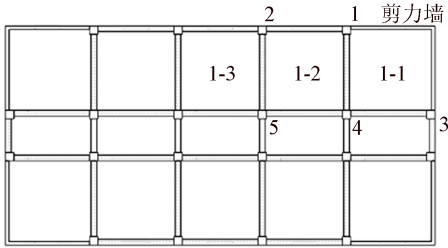


图 2 建筑物一楼构件编号规则

Fig. 2 Component numbering rules of the first layer of the building

表 1 各层关键构件承载的结构质量

Table 1 Structural quality of the key components of different layers

构件位置	五楼	四楼	三楼	二楼	一楼
承载结构重力/ ($\times 10^6$ N)	2.73	8.52	14.31	20.10	25.89

通过 SOLIDWORKS 软件对该框架-剪力墙结构施加自重荷载, 得到各楼层柱构件与剪力墙的应力分布情况, 相关分析结果如图 3 所示。在此过程中, 基于框架-剪力墙结构以框架柱、剪力墙为主要承重构件, 因此, 当研究各楼层柱构件承载力、剪力墙承载力时, 移除了该层的填充墙构件以排除非关键构件对受力分析的干扰。通过自重静力分析所获取的各层 1~5 号柱构件底面中心的应力值、各层剪力墙的应力值如表 2 所示。可以看出, 结构自重作用下的应力分布与楼层相关。其中, 五楼柱构件应力、剪力墙应力为最小值, 随着楼层降低, 柱构件应力、剪力墙应力呈递增趋势, 一楼柱构件应力、剪力墙应力达到最大值。

表 2 关键构件应力分布

Table 2 Stress distribution of key components

构件位置	关键构件应力/MPa					
	1 号柱	2 号柱	3 号柱	4 号柱	5 号柱	剪力墙
五楼	0.31	0.41	0.23	0.50	0.48	0.14
四楼	0.47	0.96	0.30	0.94	1.10	0.29
三楼	0.73	1.51	0.50	1.31	1.59	0.50
二楼	1.00	2.01	0.72	1.70	2.03	0.71
一楼	1.27	2.45	0.98	2.11	2.45	0.92

该典型工况中框架柱截面积为 0.36 m^2 , 基于上述柱截面面积及各个框架柱底部中心的应力值, 计算可得其承载力。同理, 该工况中 L 形剪力墙底面面积为 2.79 m^2 , 计算得出各层剪力墙的承载力, 结果如表 3 所示。结果表明, 对比同一楼层柱构件, 可以看出 2 号柱构件的承载力大于 1 号柱构

件, 5 号柱构件大于 2 号柱构件, 在建筑物长度方向和宽度方向, 呈现出越靠近建筑物外侧承载力越小的特点。

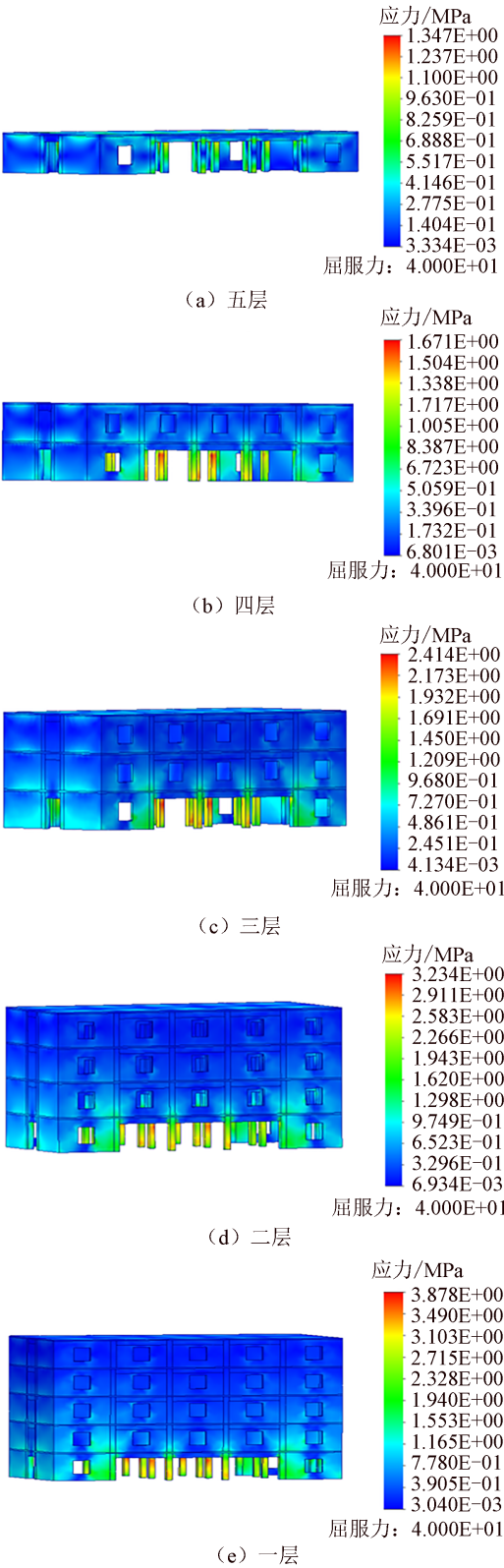


图 3 各层关键构件应力分布

Fig. 3 Stress distribution of key components of different layers

表 3 关键构件底面中心的承载力
Table 3 Bearing capacity of bottom center of key components

构件位置	关键构件承载力/($\times 10^6$ N)					
	1号柱	2号柱	3号柱	4号柱	5号柱	剪力墙
五楼	0.11	0.15	0.08	0.18	0.17	0.39
四楼	0.17	0.35	0.11	0.34	0.40	0.81
三楼	0.26	0.54	0.18	0.47	0.57	1.39
二楼	0.36	0.72	0.26	0.61	0.73	1.98
一楼	0.46	0.88	0.35	0.76	0.88	2.56

基于承载力参数，通过式（5）、（6）计算得出柱构件的承载比例因子 g_c 以及剪力墙的承载比例因子 g_w ，结果如表4所示。

表 4 关键构件承载比例因子
Table 4 Load ratio factors of key components

构件位置	关键构件承载比例因子					
	1号柱	2号柱	3号柱	4号柱	5号柱	剪力墙
五楼	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.006
四楼	0.002	0.005	0.002	0.005	0.006	0.012
三楼	0.004	0.008	0.003	0.007	0.008	0.020
二楼	0.005	0.010	0.004	0.009	0.011	0.029
一楼	0.007	0.013	0.005	0.011	0.013	0.037

基于黄咏政等^[21]提出的高层建筑物易损性评估模型以及框架-剪力墙结构建筑物拆除构件仿真计算结果，可以得出对于不同平面位置的构件，拆除该构件导致的倒塌楼板面积从大到小顺序为内部柱、长边柱、短边柱、角部L形剪力墙。基于此，赋予关键构件关联度系数，如表5所示。

表 5 关键构件关联度系数
Table 5 Correlation coefficient of key components

构件类型	关联度系数
角部L形剪力墙	0.25
短边柱	0.50
长边柱	0.75
内部柱	1.00

通过式（1）可以计算得出关键构件 k 的贡献因子 G_k ，该5层五跨框剪结构各层关键构件的贡献因子如图4所示。

构件贡献因子反映了建筑物不同楼层位置关键构件的重要程度，根据计算结果可知，底层内部框架柱的贡献因子最大，为判断该典型框架-剪力墙结构的薄弱部位提供依据。

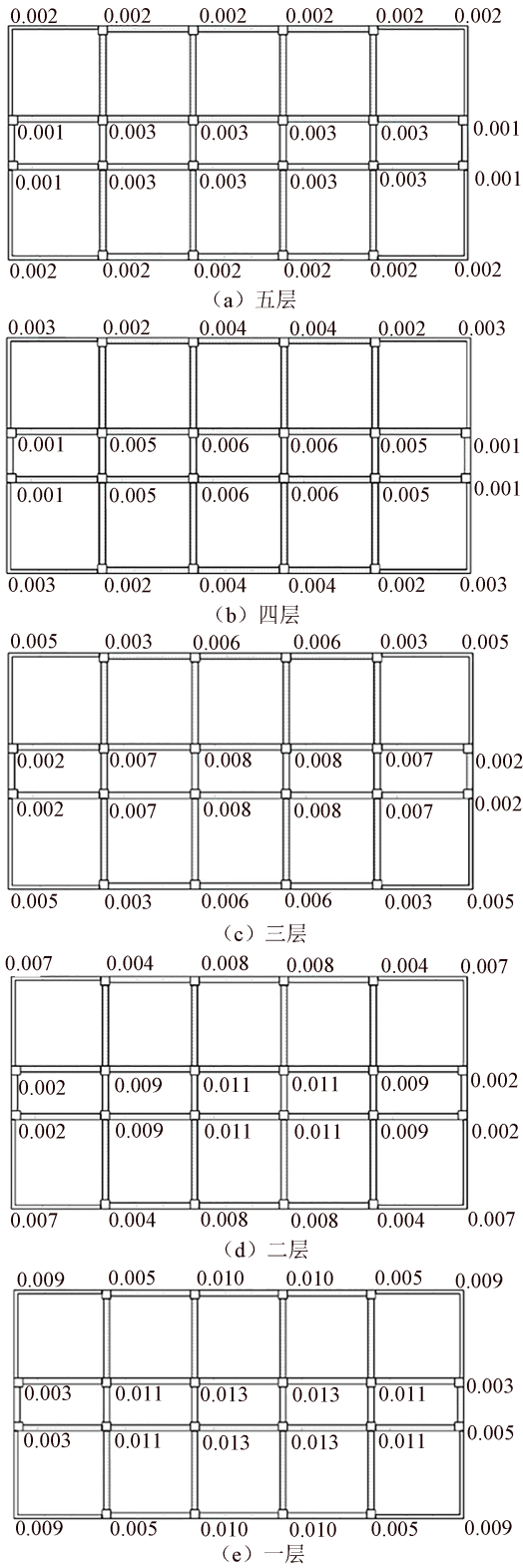


图 4 各层构件贡献因子

Fig. 4 Contribution factors of different layer components

1.2 房间重要性

将原模型的走廊进行等效处理，使其等同于5个小房间，根据各楼层构件贡献因子，可得出每个房间的贡献因子，如图5所示。

对电力大楼功能特性进行分析。典型电力大

楼的主要功能如图 6 所示。

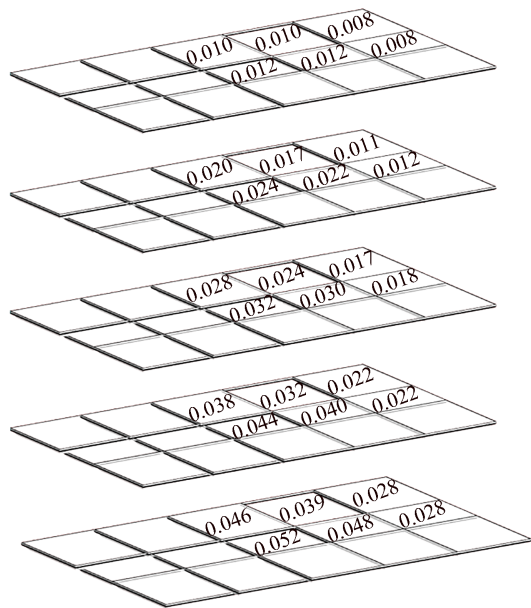


图 5 各层房间贡献因子

Fig. 5 Room contribution factors of different layers

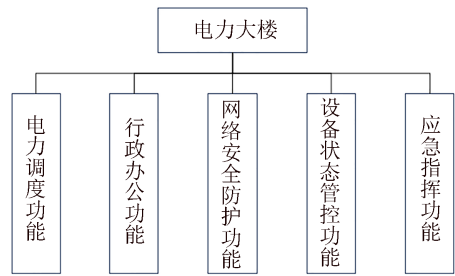


图 6 电力大楼主要功能

Fig. 6 Main functions of the power building

在分析过程中，假定每层所有房间的功能大致相同，在此基础上，通过对不同区域电力大楼已知功能分区情况进行对比分析，归纳共性特征，将电力调度、行政办公、网络安全防护、设备状态管控、应急指挥 5 种功能分别对应到五楼至一楼，以开展后续研究。

对于建筑物的整体功能来说，不同位置的目标构件的重要性不同，即各目标构件在被打击过程中具有不同的命中要害权重。因此，在对建筑物目标进行分析之前，需建立各功能的权重分配体系。由于人工主观判断易引入随机偏差，因此，采用层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）实现权重的客观量化^[22]。

采用萨蒂九级标度法，对选定建筑物的 5 种功能实施两两比较评估，将不同因素之间相对重要性的定性判断转换为定量描述，功能重要性判断矩阵的标度如表 6 所示。

表 6 功能重要性判断标度

Table 6 Judgment scales of functional importance

标度量化值	含义
1	功能 <i>i</i> 与功能 <i>j</i> 相比，具有同样的重要性
3	功能 <i>i</i> 与功能 <i>j</i> 相比，前者比后者稍重要
5	功能 <i>i</i> 与功能 <i>j</i> 相比，前者比后者显著重要
7	功能 <i>i</i> 与功能 <i>j</i> 相比，前者比后者极其重要
9	功能 <i>i</i> 与功能 <i>j</i> 相比，前者比后者强烈重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

a_{ij} 表示功能 i 相对 j 的比较结果，此外， $a_{ii} = 1$ ，功能 j 相对 i 的比较结果 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

将上述 5 个功能分别用 A、B、C、D、E 来表示，对应的判断矩阵如表 7 所示。

表 7 五大功能判断矩阵

Table 7 Judgment matrix of 5 functions

功能	A	B	C	D	E	每行元素的几何平均数
A	1	8	5	3	7	3.84
B	1/8	1	1/4	1/5	1/2	0.32
C	1/5	4	1	1/4	1/3	0.58
D	1/3	5	4	1	3	1.82
E	1/7	2	3	1/3	1	0.78

将判断矩阵的每行元素的几何平均数归一化处理，得到初始权重向量，重复迭代直至收敛。经过多次迭代后，权重会趋于稳定。最终得出电力大楼 A、B、C、D、E 各功能重要性系数 η_1 分别为 0.52、0.04、0.08、0.25、0.11。

在电力大楼的民用建筑功能评估体系基础上，进一步考虑特殊工况下的战时功能转换需求。房间的使用功能重要性主要根据房间功能的毁伤对整体建筑功能的影响程度决定，考虑到不同功能建筑的房间功能差异较大，具体某建筑的房间使用功能重要性系数需要针对具体场景专门分析。基于吕晋贤等^[23]提出的使用功能重要性系数，建立战时状态下的功能权重系数 η_2 ，如表 8 所示。

表 8 使用功能重要性系数

Table 8 Use function importance coefficient

功能重要性	重要性描述	系数 η_2
重要功能	承担指挥、通信、能源功能，重要人员或设备常驻	2.0
常规功能	承担常规办公或住宿任务，一般人员或设备常驻	1.0
次要功能	承担附属或临时功能	0.5

对已有 AHP 权重系数，结合战时使用功能重要性系数，电力大楼中 A、C、D、E 属于重要功能，B 属于常规功能，然后进行加权，将加权值归一化得到新的系数。重新分配后，A、B、C、D、E 各功能对应的加权重要性系数 η_3 分别为 0.53、0.02、0.08、0.26、0.11。

1.3 典型建筑目标薄弱部位

在评估建筑整体结构的薄弱部位时，需要以构件-房间-整体的多层级映射关系为基础，此外，还需要进一步考虑各个房间的使用功能及房间所处位置，进行多指标融合加权分析，最终确定建筑整体结构的薄弱部位。

前文已对建筑目标每层的功能重要性及每个关键构件的位置重要性进行赋值，据此计算出各层构件贡献因子的平均值 $\bar{G}_f$ ，然后，可计算得出影响因子 η 为

$$\eta = \frac{\eta_{3,f} \cdot \bar{G}_f}{\sum_{f=1}^n \eta_{3,f} \cdot \bar{G}_f} \tag{7}$$

式中： n 为楼层； $\eta_{3,f}$ 为第 f 层对应的房间使用功能加权重要性系数。

根据表 8、式（7）可计算得出各楼层影响因子，结果如表 9 所示。

表 9 不同楼层影响因子

Table 9 Influence factors of different floors

楼层	构件贡献因子 平均值 $\bar{G}_f$	房间使用功能 加权重要性系数 η_3	影响因子 η
五楼	0.002 2	0.53	0.267
四楼	0.003 5	0.02	0.016
三楼	0.005 2	0.08	0.096
二楼	0.006 8	0.26	0.406
一楼	0.008 5	0.11	0.215

从表 9 可以看出，最不利楼层为建筑整体第二层。分析二层各房间的贡献因子，根据图 5 可知，二层中心位置的房间贡献因子最大，因此，预测二层中心房间为薄弱部位，并开展进一步研究。

2 典型建筑目标毁伤等级划分

2.1 构件毁伤等级划分

在评估构件毁伤程度时，通常用挠跨比 μ 表征^[24]，其表达式为

$$\mu = \frac{x_d}{L} \tag{8}$$

式中： x_d 为中心挠度； L 为构件跨度。

钢筋混凝土构件损伤判据如表 10 所示。

表 10 钢筋混凝土构件损伤判据

Table 10 Damage criteria of reinforced concrete components

等级划分	损伤判据			
	柱	梁	板	剪力墙
轻度损伤	$0 < \mu \leq 1.5\%$	$0 < \mu \leq 4\%$	$0 < \mu \leq 4\%$	$0 < \mu \leq 1.5\%$
中度损伤	$1.5\% < \mu \leq 2.5\%$	$4\% < \mu \leq 8\%$	$4\% < \mu \leq 8\%$	$1.5\% < \mu \leq 2.5\%$
重度损伤	$2.5\% < \mu \leq 4\%$	$8\% < \mu \leq 12\%$	$8\% < \mu \leq 12\%$	$2.5\% < \mu \leq 4\%$
完全损伤	$\mu > 4\%$	$\mu > 12\%$	$\mu > 12\%$	$\mu > 4\%$

2.2 房间毁伤等级划分

房间毁伤等级的确定需要综合考虑该房间内各构件的贡献因子及毁伤等级^[23]。赋予关键构件不同毁伤等级对应不同的毁伤系数 d ，重度、中度、轻度毁伤对应的构件毁伤等级系数分别取 0.8、0.4、0.1^[16, 23]。将贡献因子和构件毁伤系数加权得出房间结构的毁伤指数 D_R 为

$$D_R = \frac{\sum_{i=1}^n G_{k,i} \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n G_{k,i}} \tag{9}$$

式中： i 为单个房间内关键构件的数量（ n 在式

（9）、（10）中均表示无限）； $G_{k,i}$ 为该房间第 i 个构件的贡献因子； d_i 为该房间第 i 个构件的毁伤等级系数。

基于现有的房间毁伤评估准则^[12]，当 $0.1 \leq D_R < 0.3$ 时，定义为房间轻度毁伤；当 $0.3 \leq D_R < 0.5$ 时，定义为房间中度毁伤；当 $D_R \geq 0.5$ 时，则该房间属于重度毁伤。

2.3 整体结构毁伤等级划分

建筑整体毁伤指标要基于各房间毁伤程度、构件贡献因子等因素来综合考虑。表 11 为框架-剪力墙结构整体毁伤评估准则。

表 11 框架-剪力墙结构整体毁伤评估准则

Table 11 Damage assessment criteria for overall frame-shear wall structures

等级划分	功能毁伤特征	破坏状态描述
轻度毁伤	局部无法正常使用	连梁出现损伤,边缘构件出现一定程度破坏
中度毁伤	无法正常使用	连梁出现大量裂缝形成塑性铰,边缘构件出现钢筋压溃和屈曲,剪力墙出现大量弯曲和剪切裂缝
重度毁伤	丧失使用功能	结构整体出现严重损坏,甚至发生倒塌

房间结构毁伤指数 D_R 由 2.2 节确认,对构件贡献因子与房间功能重要性系数加权得出的各楼层影响因子 η ,一楼至五楼分别取 0.215、0.406、0.096、0.016、0.267。故在此考虑对房间结构毁伤指数与各楼层影响因子进行加权分析,最终得到建筑整体结构毁伤等级。整体结构的毁伤指标 D_w 可表示为

$$D_w = \frac{\sum_{k=1}^n \eta_k \cdot D_{R,k}}{\sum_{k=1}^n \eta_k} \quad (10)$$

式中: η_k 为第 k 个房间所对应的楼层影响因子系数; $D_{R,k}$ 为第 k 个房间的毁伤指标。

参考整体毁伤评估准则^[12]并结合下文数值模拟,规定建筑整体毁伤指标为:当 $0.08 \leq D_w < 0.3$ 时,结构整体呈轻度毁伤;当 $0.3 \leq D_w < 0.5$ 时,结构整体呈中度毁伤;当 $D_w \geq 0.5$ 时,结构整体呈重度毁伤。

3 爆炸作用下薄弱部位识别仿真验证

3.1 有限元模型建立

3.1.1 建模方法

针对所研究的框剪结构建筑模型,采用整体式建模方法。在数值模拟中,模型中涉及的空气、炸药、钢筋混凝土均采用 Solid164 单元,并引入单点积分算法。在有限元模型中,空气和炸药采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法,而混凝土材料采用拉格朗日算法。起爆参数通过 *INITIAL_DETONATION 关键字进行定义,将起爆点设置于炸药几何中心,起爆时间设定为 0 ms。此外,通过 *CONTROL_TERNIMATION 关键字控制计算总时长,将模拟的终止时间设为 80 ms,从而确保模拟结果的有效性。

3.1.2 定义材料类型

1) 混凝土本构模型

对于混凝土的本构模型,本文选择关键字 *MAT_BRITTLE_DAMAGE 作为钢筋混凝土模型,这是一种定义钢筋混凝土复合材料的本构模型,能够较好地反映爆炸载荷下的混凝土响应。此外,可进行配筋率的定义,假定钢筋均匀布置于混凝土中^[25]。该本构模型下各构件的钢筋混凝土材料参数如表 12 所示。

表 12 钢筋混凝土材料参数

Table 12 Reinforced concrete material parameters

参数	意义	参数	意义
RO	材料密度	VISC	体积粘性
E	弹性模量	FRA	钢筋截面配筋率
PR	泊松比	E-RF	钢筋弹性模量
TLIMIT	初始抗拉极限	YS-RF	钢筋屈服应力
SLIMIT	抗剪极限	EH-RF	钢筋硬化模量
FOUGH	断裂韧度	FS-RF	钢筋失效应变
SRETEN	剪切保持力	SIGY	混凝土受压屈服应力

2) 空气和炸药的本构模型

空气介质采用 *MAT_NULL 材料模型进行定义,该模型通常用于模拟流体介质的动态响应,通过与状态方程联合使用能够有效描述冲击波在空气中的传播过程及荷载传递特性^[26]。同时选用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 线性多项式状态方程,其压力与内能关系满足以下表达式:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2) E_0 \quad (11)$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (12)$$

式中: C_0 至 C_6 为状态方程参数,当相对体积变化量 $\mu < 0$ 时, C_2 和 C_3 项自动置零; E_0 为材料内能; V 为相对体积。具体数值如表 13 所示。

表 13 参数具体数据

Table 13 Numerical values of the parameters

密度/kg·m ⁻³	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/Pa	V_0
1.29	-1E-6	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5E5	1

炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,并联合 *EOS_JWL 状态方程,以准确描述爆炸产物的热力学响应^[26]。其参数如表 14 所示,表达式为

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_V}{V}$$

(13)

式中： P 为爆轰压力；系数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料参数； V 为相对体积； E_V 为初始单位体积内能。

表 14 炸药参数

Table 14 Explosive parameters

密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	爆速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	爆压/ GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_V / $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$
1 630	6 930	21	373.8	3.747	4.15	0.9	0.35	7E+9

3.2 数值模拟验证

前文 1.3 节确认二层为最不利楼层，二楼中心位置为薄弱部位。因此，以 TNT 在框剪结构二层中心位置爆炸为例，展开有限元仿真验证。当 TNT 当量为 100 kg 时，毁伤效果如图 7 所示。

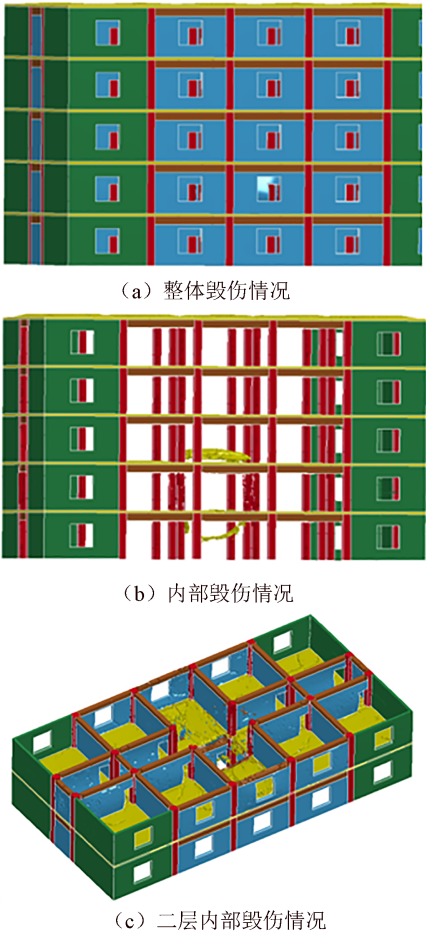


图 7 100 kg 当量下毁伤示意
Fig. 7 Damage maps under 100 kg equivalent

首先，确定房间各构件的毁伤等级，对于重度、中度、轻度毁伤，对应的构件毁伤等级系数分别取 0.8、0.4、0.1。得出构件毁伤等级后，结合构件贡献因子，根据式（9）得出房间毁伤指数

如表 15 所示。

表 15 二层房间毁伤指数

Table 15 Damage indices of the second floor rooms

房间编号	构件编号	构件毁伤等级系数	构件贡献因子	房间毁伤指数 D_R
R2-1	柱 C1	0.1	0.004	0.10
	柱 C3	0.1	0.002	
	柱 C4	0.1	0.009	
	剪力墙	0.1	0.007	
R2-2	柱 C1	0.1	0.004	0.42
	柱 C2	0.4	0.008	
	柱 C4	0.1	0.009	
	柱 C5	0.8	0.011	
R2-3	柱 C2	0.4	0.008	0.63
	柱 C2	0.4	0.008	
	柱 C5	0.8	0.011	
	柱 C5	0.8	0.011	

由于房间呈对称结构，根据上述计算得出该楼层的毁伤等级，如图 8 所示。

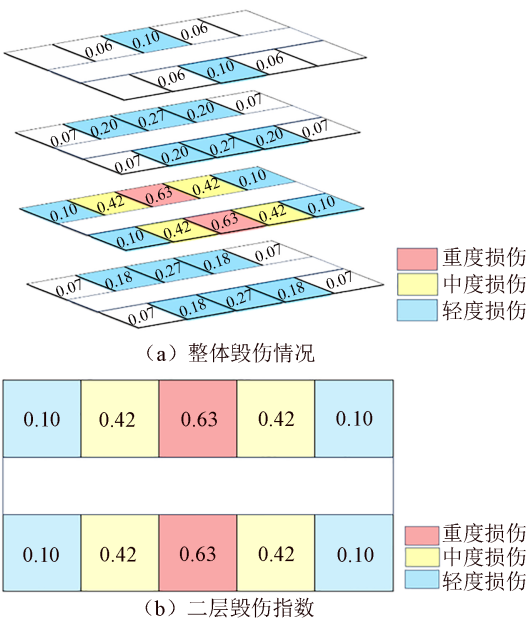


图 8 100 kg 当量下毁伤等级
Fig. 8 Damage degrees under 100 kg equivalent

调整炸药放置点，将炸药分别置于 1 号房间、2 号房间、3 号房间，不同位置的整体毁伤情况如图 9 所示。当量 100 kg 情况下，整体毁伤指标如表 16 所示。

综合图 9、表 16 可以看出，4 种摆放位置对建

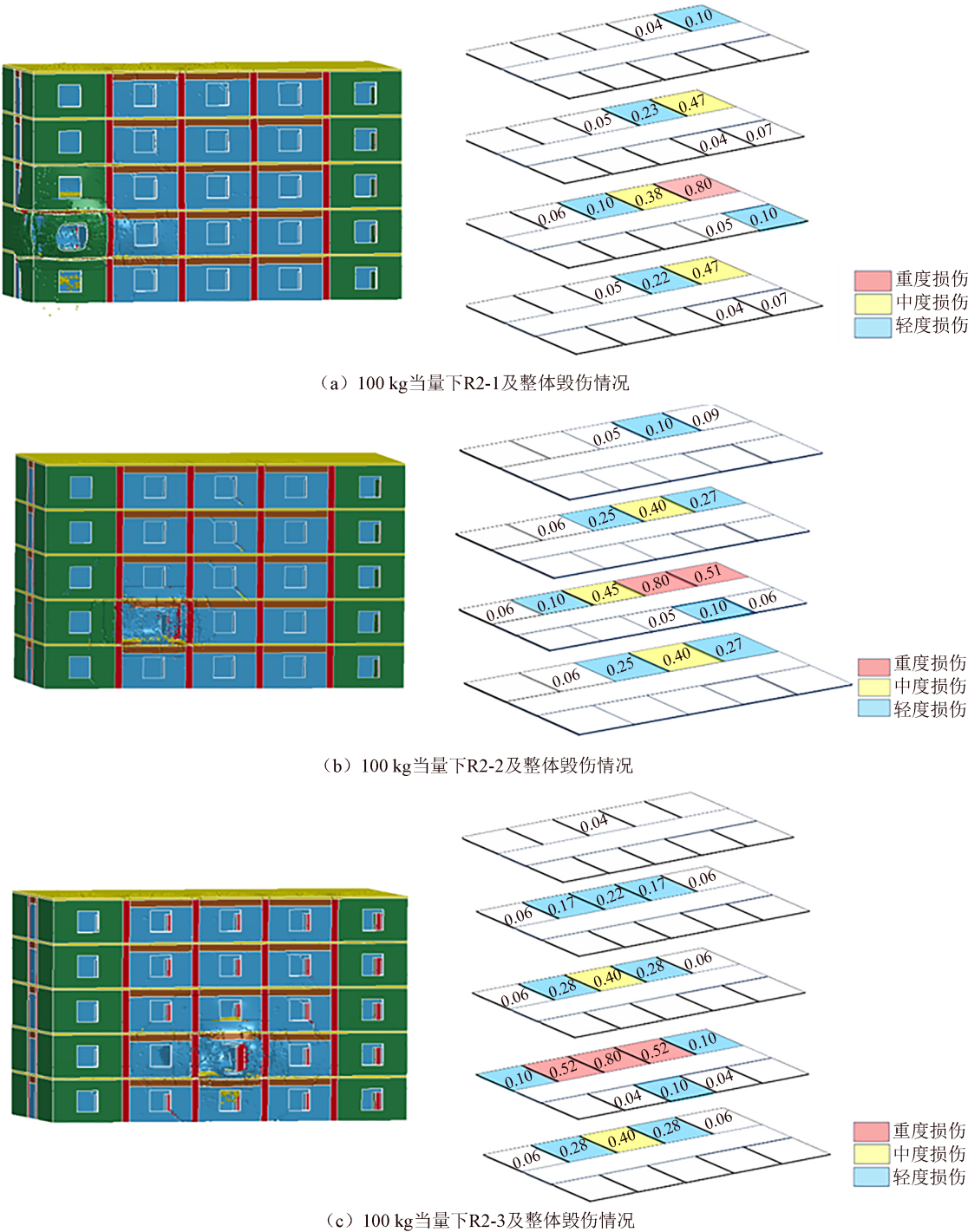


图 9 炸药位置不同时二层整体及各房间毁伤

Fig. 9 Damages of overall the second layer and each room at different explosive positions

筑物整体造成的毁伤指标，均属于轻度毁伤。当炸药在中心位置放置时，造成的毁伤指数最大；当炸药在 R2-3 房间时，爆炸影响范围最大；因此，考虑将炸药放置于三层中心房间与 R3-3 房间进一步研究整体毁伤指数。

经计算，三层中心房间与 R3-3 房间整体毁伤指数分别为 0.121、0.102，均小于二层相同房间的毁伤指标。下面依据相同流程，调整 TNT 当量。

表 16 不同炸药位置下建筑整体毁伤指标

Table 16 Overall damage indices of the building at different explosive positions

TNT 当量	炸药位置	整体毁伤指标 D_w
100 kg	R2-1	0.087
	R2-2	0.117
	R2-3	0.126
	中心	0.180

对 200、300、400 kg TNT 当量下整体毁伤指标进行分析，具体结果如表 17 所示。

表 17 不同当量爆炸作用下建筑整体毁伤指标
Table 17 Overall building damage indices under explosions with different equivalent charge levels

TNT 当量/ kg	炸药位置	整体毁伤 指标 D_w	整体毁伤等级
200	R2-1	0.130	轻度毁伤
	R2-2	0.167	轻度毁伤
	R2-3	0.198	轻度毁伤
	中心	0.309	中度毁伤
300	R2-1	0.175	轻度毁伤
	R2-2	0.222	轻度毁伤
	R2-3	0.256	轻度毁伤
	中心	0.414	中度毁伤
400	R2-1	0.232	轻度毁伤
	R2-2	0.280	轻度毁伤
	R2-3	0.357	中度毁伤
	中心	0.514	重度毁伤

由表 17 可以看出，不同 TNT 当量的毁伤规律一致，炸药处于中心房间时整体毁伤等级最严重。随着 TNT 当量从 200 kg 提升至 400 kg，同一爆炸位置的整体毁伤指标均呈持续递增趋势，当 TNT 位于中心房间，且当量达到 400 kg 时，整体毁伤等级达到重度毁伤。

4 结论

为解决建筑目标薄弱部位带来的潜在风险难以评估的问题，提出通过对建筑物的部位与功能耦合分析其薄弱部位，所得主要结论如下。

1) 对比同一楼层柱构件，在建筑物长度方向和宽度方向，呈现出越靠近建筑物外侧承载力越小的特点。在重力荷载作用下，每层中间框架柱的构件承载比例因子值最大。

2) 同一楼层中，中心房间的贡献因子大于相邻房间，离中心房间越远，房间贡献因子越小。以二楼为例，中心房间贡献因子为 0.044，相邻的 R2-3 房间为 0.038，R2-2 房间为 0.032，R2-1 房间仅 0.022。对比不同楼层的同一个房间，一楼至五楼中心房间贡献因子分别为 0.052、0.044、0.032、0.024、0.012，楼层越低，房间贡献因子则越大。

3) 对于所研究的典型建筑目标，即五层框剪

结构的电力大楼，在相同当量下，100 kg 炸药位于中心房间、R2-3、R2-2 和 R2-1 位置时，整体毁伤指标 D_w 分别为 0.180、0.126、0.117、0.087。当 TNT 当量达到 400 kg 时，整体毁伤指标 D_w 分别为 0.514、0.357、0.280、0.232。所造成的整体毁伤指数递减，变化趋势与房间贡献因子变化规律一致。

4) 经计算结果与数值模拟相互验证，100、200、300、400 kg 4 种当量下，二层中心房间的毁伤指标均为同当量下不同位置的最大值，证明了通过贡献因子判别薄弱部位的方法具有可靠性。

参考文献

[1] 周阳. 空地导弹对典型建筑物毁伤效能评估方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 1-6.

[2] 高伟亮, 孙桂娟, 陈力, 等. 地面建筑毁伤评估技术研究[J]. 防护工程, 2019, 41(2): 48-53.

Gao Weiliang, Sun Guijuan, Chen Li, et al. Research on damage assessment technology of ground buildings[J]. Protective Engineering, 2019, 41(2): 48-53.

[3] Yao Shujian, Zhang Duo, Lu Fangyun, et al. Damage features and dynamic response of RC beams under blast[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 62: 103-111.

[4] 王辉明, 刘飞, 晏麓晖, 等. 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12): 37-45.

Wang Huiming, Liu Fei, Yan Luhui, et al. Local damage effects of reinforced concrete beams under contact explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12): 37-45.

[5] Zhang Duo, Yao Shujia, Lu Fangyun, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 33: 497-504.

[6] 汪维, 刘瑞朝, 吴飏, 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.

Wang Wei, Liu Ruichao, Wu Biao, et al. Damage criterion of reinforced concrete beams under blast loading[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1421-1429.

[7] 李天华. 爆炸荷载下钢筋混凝土板的动态响应及损伤评估[D]. 西安: 长安大学, 2012: 91-111.

Li Tianhua. Dynamic response and damage assessment of reinforced concrete slabs subjected to blast loading[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012: 91-111.

- [8] 裘智昊. 冲击载荷作用下混凝土靶板响应特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 43-67.
Qiu Zhihao. Study on the response characteristics of concrete target plate with impact loading[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 43-67.
- [9] 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.
Yan Shi, Zhang Liang, Wang Dan. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21(3): 177-180.
- [10] 母华龙. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的破坏概率分析[D]. 天津: 天津大学, 2021: 57-80.
Mu Hualong. Failure probability analysis of reinforced concrete columns under blast load[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021: 57-80.
- [11] Zhang Chunwei, Abedini M. Time-history blast response and failure mechanism of RC columns using Lagrangian formulation[J]. Structures, 2021, 34: 3087-3098.
- [12] 周旭. 导弹毁伤效能试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 133-175.
- [13] 刘家琦. 基于功能特性分析的目标毁伤评估算法研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 36-70.
Liu Jiaqi. Research and implementation of target damage assessment algorithm based on functional characteristics analysis[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013: 36-70.
- [14] 成赞凌. 刚架拱桥薄弱部位识别理论及加固技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 55-61.
Cheng Yunling. Research on weak parts recognition theory and reinforcement technology of the rigid frame arch bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013: 55-61.
- [15] 孙晨昊. 爆炸荷载作用下目标毁伤快速评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023: 21-23.
SUN Chenhao. Research on rapid assessment method of target damage under explosion load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023: 21-23.
- [16] 张贤. 基于关键构件 $P-I$ 曲线的典型框架结构整体损伤评估研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025: 72-75.
Zhang Xian. Study on overall damage assessment of typical frame structures based on critical component $P-I$ curves[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025: 72-75.
- [17] 易清金. 钢筋混凝土框架剪力墙结构在巨震作用下的倒塌行为分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 18-19.
Yi Qingjin. Study on collapse behavior of reinforced concrete frame-shear wall structures subjected to mega earthquake[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 18-19.
- [18] 李从林, 程耀芳. 几种高层建筑结构简化分析统一的连续-离散化方法[J]. 建筑结构, 1997(6): 45-47.
- [19] 陈旭光. 建筑物在侵爆作用下的累积毁伤评估[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 122-126.
Chen Xuguang. Cumulative damage assessment of buildings under penetration and explosion[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 122-126.
- [20] 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.
Shi Yanchao, Li Zhongxian. Dynamic response and failure modes of RC columns under blast loading[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 112-117.
- [21] 黄咏政, 梁子晗, 王森钠, 等. 主要设计参数对规则RC框架结构抗连续倒塌性能的影响[J]. 工程力学, 2023, 40(S1): 184-190.
Huang Yongzheng, Liang Zihan, Wang Senna, et al. Influence of primary design parameters on progressive collapse resistance of regular RC frame structures[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(S1): 184-190.
- [22] 魏庆栋, 王忠, 江光德, 等. 导弹打击目标的毁伤效果评估方法研究综述[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 76-88.
Wei Qingdong, Wang Zhong, Jiang Guangde, et al. Review of damage effect evaluation method of missile attacking target[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 76-88.
- [23] 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(1): 135-152.
Lyu Jinxian, Wu Hao, Lu Yonggang, et al. High-efficiency assessment method of damage for building structures under explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(1): 135-152.
- [24] UFC 3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions[S].
- [25] 李祥龙, 杨阳, 栾龙发, 等. 基于整体式模型的钢筋混凝土结构爆破拆除定向倒塌数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(12): 1220-1223.
Li Xianglong, Yang Yang, Luan Longfa, et al. Numerical simulation of reinforced concrete structure directional collapse by blasting demolition based

on integral model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(12): 1220-1223.
[26] Hallquist J. LS-DYNA Keyword User's Manual,

Version: 970[M]. Livemore: Livemore Software Technology Corporation, 2003.

Identification of Weak Parts of Typical Building Targets and Verification of Explosion Damage

SHENG Jiabei¹, YI Huahui^{1*}, XU Xiangyun², JIAO Yuxin¹,
ZHU Peng¹, ZHANG Xian¹, LI Xiaotian¹

(1. School of civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Academy of Military Sciences, Beijing 100036, China)

ABSTRACT: To overcome the difficulty in evaluating the potential risks caused by the weak parts of a building target, the weak parts of a building were analyzed by coupling the location and function of the building. First, the key components of the building were selected, and the bearing ratio factors of different components were calculated using static analysis. Subsequently, the component correlation coefficients were obtained through the vulnerability assessment model of highrise buildings and the simulation results of the demolition and construction of frame-shear wall structures. The component and room contribution factors were obtained by weighting the correlation coefficients. The most unfavorable floor was obtained by weighting the room use function and its spatial location, and it was predicted that the weak part of the whole building was the second-floor central room. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by establishing a finite element model. The simulation results show that under equivalent charge levels of 100, 200, 300, and 400kg, the damage index of the center room on the second floor is the maximum value at different positions. It is proven that the method of identifying weak parts using contribution factors is reliable.

KEYWORDS: building; contribution factors; weak parts; overall structural damage assessment

(编辑: 于福兴)