

爆炸荷载作用下 RC 框架动态响应与破坏模式

郑剑锋^{1,2,3}

(1. 平潭综合实验区交通与建设局, 福建 平潭 350401; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

3. 平潭综合实验区创新研究院, 福建 平潭 350401)

摘 要: 我国既有建筑面积达 800 亿 m^2 , 钢筋混凝土结构应用广泛, 建筑面临爆炸荷载风险较高。提升结构抗爆性能是土木工程可持续发展及“一带一路”建设的迫切需求。针对现有研究缺乏 RC 框架抗爆性能分析方法的现状, 利用有限元软件 LS-DYNA 建立三层三跨 RC 框架模型, 分别对底层角柱及边柱施加 20 kg 炸药爆炸荷载(起爆点距构件几何中心 1 m), 分析其动态响应。结果表明: 相同爆炸条件下, 角柱与边柱受荷均会导致框架结构严重破坏。

关键词: RC 框架; 动态响应; 破坏模式; 损伤指数; 爆炸荷载

中图分类号: TU312^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0291-03

Dynamic Response and Failure Mode of RC Frame under Explosion Load

ZHENG Jianfeng^{1,2,3}

(1. Transportation and Construction Bureau of Pingtan Comprehensive Experimental Zone, Pingtan 350401, China; 2. College of Civil

Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Innovation Research Institute of Pingtan Comprehensive Experimental

Zone, Pingtan 350401, China)

Abstract: The existing building area in China amounts to 80 billion square meters. Reinforced concrete structures are widely used, and buildings are at a relatively high risk of explosion loads. Enhancing the explosion resistance of structures is an urgent need for the sustainable development of civil engineering and the construction of the Belt and Road Initiative. In view of the current situation that existing research lacks an analysis method for the explosion resistance of RC frames, a three-story, three-span RC frame model is established by using the finite element software LS-DYNA. The explosion loads of 20 kg of explosives are respectively applied to the bottom corner columns and side columns (the starting point is 1 m away from the geometric center of the component), and the dynamic responses are analyzed. The result shows that under the same explosion conditions, the loading on both corner columns and side columns will cause severe damage to the frame structure.

Keywords: RC frame; dynamic response; failure mode; damage index; explosion load

0 引言

随着世界政治经济失衡及文化冲突加剧, 恐怖主义活动与工业操作事故导致的爆炸事件频发, 其产生的强烈冲击波不仅直接威胁生命安全, 更对周边建筑造成结构性破坏, 引发巨大财产损失。为应对这一挑战, 学术界对爆炸荷载的研究日益深化, 抗爆抗冲击领域成果丰硕, 众多学者为此作出重要贡献。

针对爆炸波的传播特性, Smith 等^[1-3]通过城市街道爆炸模拟研究, 证实环境特征对冲击波扩散具有

显著影响; Rose 团队^[4]利用 Air3D 软件构建数值模型, 揭示了街道宽度与建筑高度对荷载冲击力的关键作用。在材料抗爆性能分析方面, XU^[5]借助 LS-DYNA 模拟了钢筋混凝土板爆炸碎片化过程, Zhuo 等^[6]则通过混凝土塑性损伤模型评估其动力响应机制。结构可靠性评估领域, Low 等^[7-8]基于单自由度体系, 系统分析了钢筋混凝土板在爆炸荷载下的剪切与弯曲破坏模式。

构件抗爆试验研究同样取得突破: Aoude 等^[9]通过 RPC 柱抗爆实验验证了等效单自由度法的有效性, Liu 等^[10]进一步运用该方法解析 CFRP 加固柱的动态响应。Baylot 与 Bennis^[11]的框架缩尺试验表明, 填充墙结构可显著降低爆炸超压对框架柱的动态冲击。Wu 等^[12]结合近距离爆炸试验与参数回归分析,

收稿日期: 2025-07-17

作者简介: 郑剑锋(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事建筑工程管理工作。

提出残余轴压承载力计算公式;Cui等^[13]通过数值模拟揭示了钢筋混凝土柱在近爆荷载下的破坏机理。师燕超^[14]利用AUTODYN软件,深入分析了爆炸冲击下混凝土柱的动态损伤过程。

此外,方秦团队^[15-19]采用有限差分与分层梁方法,明确指出影响钢筋混凝土梁破坏模式的核心因素。总体而言,当前研究已对构件级爆炸响应形成系统认知,但针对建筑结构整体在爆炸荷载下的动态响应机制,仍需进一步深化探索。

1 RPC-RC抗爆有限元模型

利用LS-DYNA有限元显示动力分析软件对RC框架在爆炸荷载作用下的动态响应进行分析。

1.1 模型建立

基于有限元动力分析软件LS-DYNA构建RC框架结构三维数值模型,模型几何构型及单元划分如图1所示。框架设计为三层三跨结构,沿 x 方向布置三跨, y 方向为单跨布置,各层层高均设定为3.5 m。结构构件尺寸参数如下:钢筋混凝土柱截面尺寸为400 mm×400 mm,梁截面尺寸为400 mm×300 mm,楼板厚度150 mm,标准尺寸为3 m×6 m。配筋设计方面,楼板、梁及柱的纵向配筋率分别为2%、2%及1.6%。

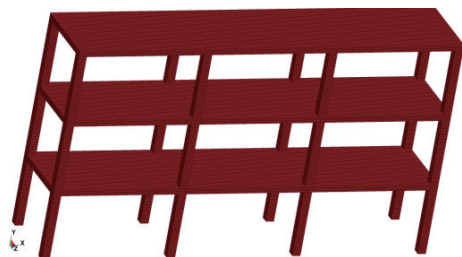


图1 RC柱有限元模型

如图2所示,建模策略采用分离式模型(segregated model),混凝土材料选用SOLID164实体单元离散化,钢筋则通过BEAM161梁单元模拟。网格划分时,混凝土与钢筋单元均采用50 mm均匀网格尺寸,需在计算精度与效率间权衡——网格细化可提升模拟分辨率,但会显著增加计算时间与硬件资源消耗。

材料本构模型方面,混凝土选用LS-DYNA内置MAT_CONCRETE_DAMAGE损伤模型,该模型可准确预测材料在单轴/双轴/三轴复杂应力状态下的非线性响应。钢筋则采用MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY分段线性弹塑性模型,该模型可表征材料的应变率强化效应(strain rate hardening)及动态加载下的各向同性塑性流动特性,适用于爆炸冲击等

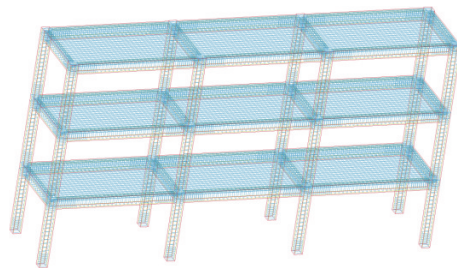


图2 RPC柱有限元模型

瞬态荷载下的结构动力响应分析。

1.2 施加荷载

根据GSA导则要求,钢筋混凝土框架模型在爆炸荷载施加前需先施加恒载与部分活载,荷载组合遵循式(1):

$$\text{Load} = \text{DL} + 0.25\text{LL} \quad (1)$$

式中:DL为结构自重恒载,LL为活载。鉴于连续倒塌工况下活载满布概率较低,仅计入25%活荷载。具体取值:楼屋面恒载5 kN/m²,活载4 kN/m²。加载完成后,模型在100 ms时刻达到静力平衡状态。随后通过*LOAD_BLAST关键字将空气爆炸荷载直接作用于结构,该命令基于输入炸药质量、起爆位置等参数自动生成超压时程曲线,启动框架动态响应模拟分析。

2 施加爆炸荷载后的动态响应

2.1 对框架底层角柱施加爆炸荷载后的动态响应

当炸药起爆位置位于钢筋混凝土框架底层角柱正前方1 m处、炸药量为20 kg时,结构在爆炸作用下的损伤破坏及连续倒塌过程如图3和图4所示。 $t=100$ ms时,框架在DL+0.25LL荷载组合下达到静力平衡状态; $t=200$ ms时,底层角柱受爆炸荷载作用产生局部损伤,混凝土因达到预设的侵蚀应变阈值而被移除,同时相邻上层角柱启动动力响应机制; $t=500$ ms时,角柱塑性变形加剧,节点区梁板构件出现剪切裂缝并伴随显著沉降(见图3); $t=1\,000$ ms时,角柱轴向承载力完全丧失,形成塑性铰机制,导致相邻构件位移激增; $t=1\,500$ ms时,结构发生整体倾覆破坏,角柱及关联构件彻底坍塌(见图4)。分析表明,底层角柱作为关键传力路径,其爆炸荷载下的渐进式损伤破坏直接触发了结构的连续倒塌机制,最终造成灾难性破坏。

2.2 对框架底层边柱施加爆炸荷载后的动态响应

当炸药起爆位置位于钢筋混凝土框架底层边柱正前方1 m处、炸药量为20 kg时,结构在爆炸作用下

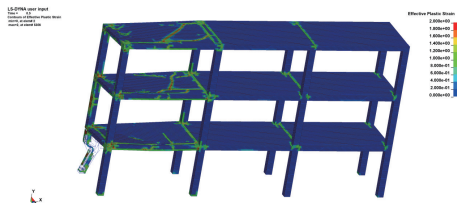


图 3 $t=500\text{ ms}$ 时的应变图

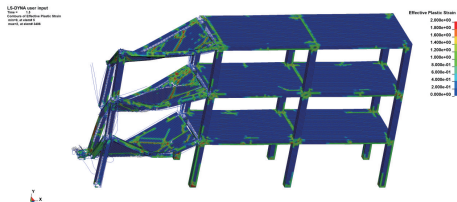


图 4 $t=1500\text{ ms}$ 时的应变图

的损伤破坏及连续倒塌过程如图 5 和图 6 所示。 $t=100\text{ ms}$ 时,框架在 $DL+0.25LL$ 荷载组合下处于静力平衡状态; $t=200\text{ ms}$ 时,爆炸荷载作用于底层边柱,柱中部混凝土因达到预设侵蚀应变阈值而被移除,同时相邻上层边柱启动动力响应过程; $t=500\text{ ms}$ 时,边柱塑性变形加剧,节点区梁板构件出现剪切裂缝并伴随显著沉降(见图 5); $t=1000\text{ ms}$ 时,边柱轴向承载力完全丧失,形成塑性铰机制,导致相邻构件位移激增; $t=1500\text{ ms}$ 时,结构发生整体倾覆破坏,边柱及关联梁板彻底坍塌(见图 6)。分析表明,底层边柱作为关键传力路径,其爆炸荷载下的渐进式损伤破坏直接触发了结构的连续倒塌机制,最终造成灾难性破坏。

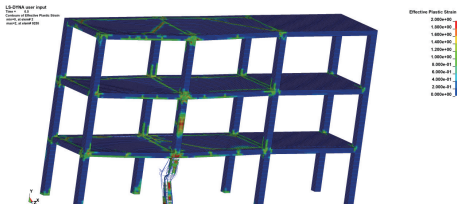


图 5 $t=500\text{ ms}$ 时的应变图

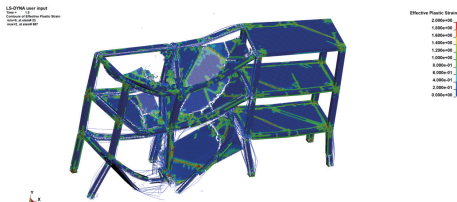


图 6 $t=1500\text{ ms}$ 时的应变图

3 结 论

(1)20 kg 炸药在钢筋混凝土框架底层角柱正前方 1 m 处起爆后,底层角柱直接承受爆炸荷载导致塑性应变急剧增长,在短时间内引发结构失稳并连锁破坏,最终导致框架整体倾斜坍塌。边柱直接承受爆炸荷载导致混凝土快速破坏并倒塌,触发梁板

连锁损伤,结构在短时间内失稳并完全坍塌,边柱在建筑结构抗爆中发挥了重要作用。

(2)相同爆炸条件下,角柱和边柱作为关键传力路径,其破坏均会切断框架结构竖向承载体系,导致框架整体倾覆坍塌(1 500 ms 内),破坏模式高度相似。爆炸荷载下,底层柱表现出渐进式损伤演化机制,分为局部混凝土侵蚀(200 ms)、塑性变形加剧(500 ms)、塑性铰形成(1 000 ms)和整体倾覆(1 500 ms)四个阶段。

(3)柱破坏后,相邻梁板节点区出现剪切裂缝和显著沉降,荷载重分布,引发连锁反应加速了框架结构失效。底层柱抗爆性能决定整体稳定性,底层角柱与边柱的失效直接触发结构连续倒塌机制。

(4)本研究通过 LS-DYNA 研究了 RC 框架受爆连续倒塌机制,后续将从模型精细化、多灾害耦合、防护技术及设计规范等多维度深入探索,量化填充墙对冲击波传播路径、荷载分配及连续倒塌抑制效果的影响,为实际工程抗爆设计以及基础设施抗爆韧性提升提供科学依据。

参考文献:

[1] Smith P D, Rose T A. Blast wave propagation in city streets – an overview. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2006, 8(1): 16–28.

[2] Smith P D, Mays G C, Rose T. A. Small scale models of complex geometry for blast overpressure assessment. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(3): 345–360.

[3] Smith P D, Vismeg P, Teo L C. Blast wave transmission along rough-walled tunnels. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(6): 419–432.

[4] Rose T A, Smith P D. Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(4): 359–376.

[5] Xu K, Lu Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading. *Computers & Structures*, 2006, 84(5–6): 431–438.

[6] Zhou X, Hao H, Kuznetsov V A, *et al.* Numerical calculation of concrete slab response to blast loading. *Transactions of Tianjin University*, 2006, 12(S): 94–99.

[7] Low H Y, Hao H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading *Structural Safety*, 2001, 23(2): 157–178.

[8] Low H Y, Hao H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading. *Engineering Structures*, 2002, 24(2): 189–198.

[9] Aoude H, Dagenais F P, Burrell R P, *et al.* Behavior of ultra-high performance fiber strengthened concrete columns under blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80.

(下转第 314 页)