

爆炸荷载下考虑初始损伤的SRC框架多维连续倒塌研究综述

张芝瑜

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年8月3日

摘要

钢筋混凝土(SRC)框架兼具型钢与钢筋混凝土材料优势, 承载力、变形能力与抗震性能突出, 广泛应用于高层民用建筑及关键公共基础设施。但爆炸等突发偶然荷载易造成底层边柱等竖向承重构件受损或局部失效, 结构传力路径被迫重分布, 进而引发损伤持续扩散, 最终产生与初始破坏程度严重不匹配的大范围整体坍塌, 即连续倒塌现象。现阶段国内外针对爆炸作用下结构抗连续倒塌的研究持续增多, 但现有成果多围绕普通钢筋混凝土框架或纯钢框架展开, 针对多材料耦合受力的SRC体系研究仍较为有限; 尤其缺少结合爆炸真实损伤形态、多维耦合倒塌全过程的系统性分析, 相关基础科学问题仍有待进一步完善。基于此, 本文系统梳理爆炸荷载下SRC框架连续倒塌相关研究进展, 总结现有分析手段、损伤演化规律、结构鲁棒性评价方法, 指出当前研究存在的短板, 明确后续研究重点, 为SRC结构抗爆、抗连续倒塌精细化设计提供理论参考。

关键词

钢筋混凝土框架, 爆炸荷载, 连续倒塌, 初始损伤, 结构鲁棒性

Review on Multi-Dimensional Progressive Collapse of SRC Frames with Initial Damage under Blast Loads

Zhiyu Zhang

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: July 1, 2026; accepted: July 22, 2026; published: August 3, 2026

Abstract

Steel reinforced concrete (SRC) frames integrate the material advantages of section steel and reinforced concrete, with excellent bearing capacity, ductility and seismic performance, which have been widely adopted in high-rise buildings and vital infrastructure. Nevertheless, accidental extreme loads such as explosions may lead to local damage or failure of vertical load-bearing components (e.g., bottom edge columns), triggering internal force redistribution and continuous damage propagation, and eventually induce catastrophic progressive collapse disproportionate to the initial local failure. In recent years, scholars have paid increasing attention to the progressive collapse resistance of structures under blast loads. However, most existing studies focus on reinforced concrete (RC) frames or pure steel frames, while investigations on SRC structures with complex composite mechanical behaviors are insufficient. In particular, systematic research considering realistic blast-induced initial damage and multi-dimensional coupled collapse mechanisms remains insufficient, and many key scientific problems need to be further explored. This paper comprehensively reviews the research progress of progressive collapse of SRC frames subjected to blast loads, summarizes mainstream analysis methods, damage evolution rules and structural robustness evaluation systems, identifies the deficiencies of current research, and puts forward prospective research directions. The review can provide theoretical support for refined anti-blast and anti-progressive collapse design of SRC structures.

Keywords

Steel Reinforced Concrete Frame, Blast Load, Progressive Collapse, Initial Damage, Structural Robustness

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1968 年英国伦敦 Ronan Point 公寓燃气爆炸坍塌事故发生后, 建筑结构抵御偶然荷载引发连续倒塌的相关研究正式成为土木工程防灾减灾领域的重要研究方向[1]。爆炸荷载峰值高、作用时长极短, 动力放大效应显著, 同时荷载作用范围集中、发生时机无法预判; 冲击波冲击作用极易造成框架柱等竖向核心承重构件破坏, 结构原有传力体系中断, 在动力效应驱动下发生连锁坍塌[2] [3]。

SRC 框架依靠内置型钢与外包钢筋混凝土协同受力, 兼顾钢结构高延性、高承载力与混凝土结构高刚度、耐火性能优良的特点, 在高层、重载工程中应用广泛[4]。但型钢、钢筋、混凝土多材料耦合作用的力学特性更为复杂, 爆炸冲击波冲击、破片侵彻以及后续倒塌演化阶段的损伤发展规律、内力重分布路径与最终破坏形式, 均与单一材料的 RC、纯钢框架存在明显区别。目前工程领域常用的抗连续倒塌设计手段, 如美国国防部 UFC 4-023-03 规范给出的拉结力法、瞬时拆除构件法等, 大多依托简化静力计算开展分析, 且默认承重构件完全丧失承载能力, 无法还原爆炸冲击造成构件局部破损、残余承载力尚存的真实工况, 也难以完整捕捉损伤演化、内力重分配耦合的动态倒塌全过程[5] [6]。

本文围绕爆炸荷载作用下 SRC 框架连续倒塌相关研究开展综述, 梳理连续倒塌基础理论、爆炸与结构耦合作用机理、构件损伤演化规律、倒塌抗力机制及结构鲁棒性评价方法, 归纳现有研究存在的局限, 提出后续研究思路, 为 SRC 框架抗爆抗倒塌精细化数值模拟与理论分析奠定文献基础。

2. 连续倒塌基础理论与分析手段

2.1. 连续倒塌定义与核心特征

连续倒塌指结构局部构件出现初始破损或失效后，荷载向周边构件转移并造成相邻构件相继破坏，最终形成破坏规模远大于初始损伤范围的整体坍塌现象(见 图 1)。破坏传播性、损伤与坍塌规模不成比例是连续倒塌最核心的两大特征。爆炸是诱发该类灾害的典型偶然荷载，冲击波除极端工况下直接造成构件完全失效外，更多情况下仅使构件产生局部严重损伤，常见破坏形式包含表层混凝土剥落、内置钢筋局部屈曲、纵向受力钢筋断裂等。受损构件在残余承载力状态下持续受力，整体结构抗力储备大幅下降，极易加速破坏沿结构体系扩散。

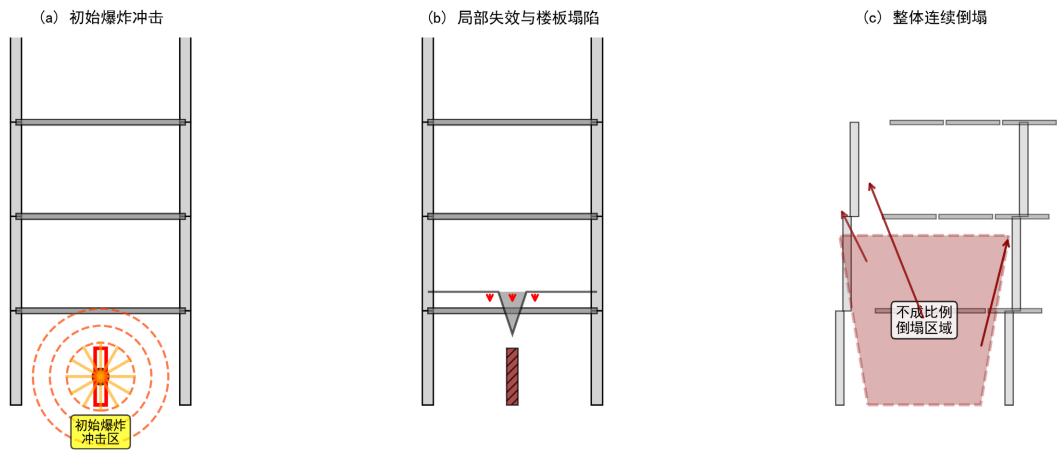


Figure 1. Schematic diagram of typical triggering and propagation process of progressive collapse
图 1. 连续倒塌典型触发与传播过程示意图

2.2. 现有连续倒塌分析手段

现阶段业内开展连续倒塌相关研究，主要依托试验实测、数值仿真、简化理论计算三类路径，多数研究不会单一采用某一种手段，而是多方法交叉对比，以此提升结论可信度(见 图 2)。

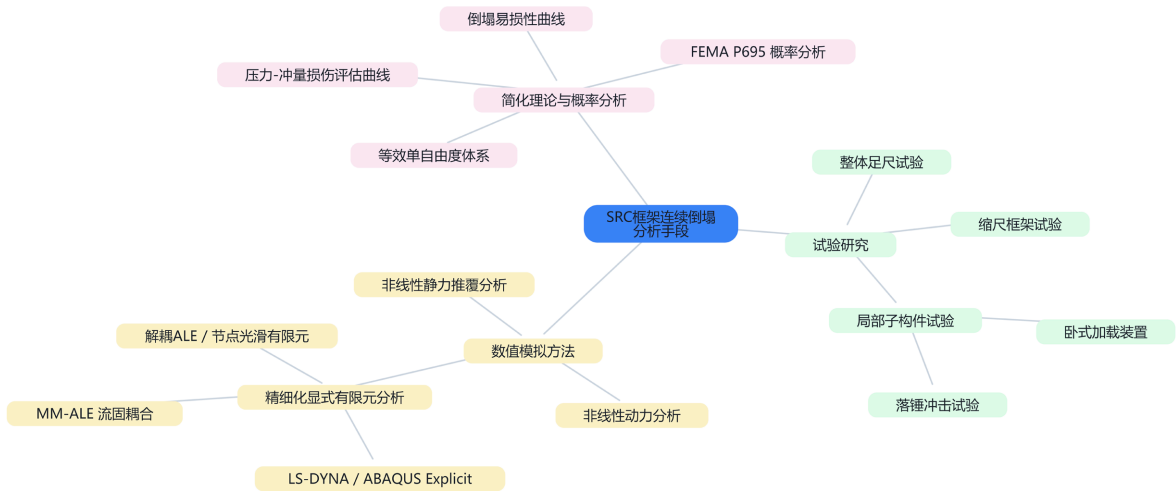


Figure 2. Classification of analysis methods for blast-induced progressive collapse of SRC frames
图 2. SRC 框架爆炸连续倒塌分析手段分类

(1) 试验研究

试验是还原结构真实倒塌全过程最直观的手段,按照试件规模可分为整体足尺试验、缩尺框架试验、局部子构件试验三类。足尺试验数据贴合工程实际,但试验场地、耗材、加载设备成本极高,国内相关案例较少;采用梁-柱子结构、平面框架的缩尺模型则成本可控,是学界挖掘压拱、悬链线等抗倒塌受力机制的主流方案。近几年试验加载装置不断优化,通过卧式加载装置能够复刻建筑外围边柱侧向约束偏弱的实际工况;也有学者采用落锤冲击梁柱节点,模拟构件失效后下落带来的附加冲击荷载,试验工况更贴近爆炸后的真实受力状态。

(2) 数值模拟方法

有限元仿真凭借工况可调、可完整输出全过程损伤数据、试验成本低等优势,现已成为该领域最常用研究工具,主流分析思路分为三类。

第一类是非线性静力推覆分析,操作流程简单,仅需在模型中瞬时移除目标构件后开展静力加载,但完全忽略倒塌过程中的动力放大效应,计算结果整体偏保守,一般仅用于初步定性判断;

第二类是非线性动力分析,通过瞬时删除竖向承重构件并施加时变荷载完成全过程计算,能够还原倒塌阶段动力响应特征,短板在于模型迭代计算耗时较长;

第三类是精细化显式有限元分析,LS-DYNA、ABAQUS/Explicit 这类显式动力学求解器常被用于精细化有限元计算,可同步捕捉高速冲击下材料应变率强化、结构大变形几何非线性以及构件接触、脱开等复杂力学行为[7]。模拟爆炸作用时,MM-ALE 多物质耦合算法可实现空气冲击波与建筑构件的流固耦合求解,是还原爆炸损伤演化过程的主流手段[8]。但模型进入大变形阶段后易出现网格扭曲,造成计算中断;为此业内相继提出解耦 ALE、节点光滑有限元等改进方案,在保障计算精度的基础上改善模型计算稳定性。

(3) 简化理论与概率分析方法

工程简化手段包含等效单自由度体系动力计算、压力-冲量损伤评估曲线两类,可快速判定不同爆炸工况下构件的损伤等级,适用于前期快速评估。以 FEMA P695 规范为代表的概率分析思路,能够纳入材料强度、构件尺寸、爆炸荷载等随机参数,定量计算极端荷载下结构整体倒塌概率,多用于建筑整体防灾风险评估工作[9]。

2.3. 分析手段在 SRC 结构中的适用性挑战与修正

现有的连续倒塌分析手段在应用于 SRC 结构时面临显著挑战。在试验研究中,由于 SRC 构件内部型钢与外包混凝土的协同受力复杂,缩尺模型试验存在显著的尺寸效应,特别是型钢与混凝土界面的粘结滑移行为以及剪力连接件的受力机制难以在缩尺比例下准确模拟,导致试验结果向足尺原型推演时存在不确定性。在数值模拟方面,传统宏观单元(如纤维梁单元)难以准确捕捉爆炸高应变率下型钢局部屈曲与混凝土剥落的耦合破坏过程;而精细化实体有限元模型虽能反映界面行为,但计算成本极高,难以用于整体框架全过程的连续倒塌分析。因此,针对 SRC 结构,需对现有数值模型进行修正:一方面需引入考虑高应变率效应的动态粘结-滑移本构模型,以反映钢-混凝土界面的退化;另一方面,应开发多尺度建模方法,即对爆炸直接作用区和关键节点采用实体单元精细建模,对远离爆源区域采用梁单元,在保证计算效率的同时准确捕捉组合界面的力学退化过程。

3. 爆炸荷载下 SRC 构件动力响应与损伤演化

3.1. 爆炸冲击波荷载特征及流固耦合作用

爆炸产生的高压冲击波与建筑结构相互作用属于复杂流固耦合动力学问题,冲击波峰值超压、冲量、

正压持续时间直接决定构件损伤程度。工程中常采用经验公式、计算流体动力学、MM-ALE 耦合算法获取结构表面冲击波时程曲线。对于 SRC 竖向承重柱，外包混凝土直接承受冲击波作用，混凝土开裂、剥落会直接改变内部型钢受力边界，进一步影响构件整体抗爆能力。

自由场爆炸超压时程常采用改进 Friedlander 方程描述[10]，结合 Brode 经验公式可依据 TNT 当量、爆炸距离求解峰值超压与正压持续时间，比例距离 Z 是控制冲击波强度的核心参数[11]。

3.2. SRC 构件爆炸损伤受力特性

相较于普通 RC 构件，针对爆炸作用下 SRC 柱力学性能的研究成果相对匮乏。内置型钢可显著提升构件抗弯、抗剪承载力与变形能力，有效抑制混凝土大面积破碎剥落，维持构件受损后的残余承载能力，是 SRC 构件抗爆性能优于 RC 构件的核心原因[12] [13]。但爆炸属于高应变率动力荷载，型钢与混凝土界面粘结滑移性能、剪力连接件受力性能会出现明显退化，二者协同工作能力下降，这也是 SRC 结构抗爆分析区别于单一材料结构的关键难点。

分析 SRC 构件抗弯性能时，多采用三段式弯矩 - 曲率简化模型，将受力全过程划分为弹性阶段、塑性强化阶段与承载力下降阶段，清晰展现构件从屈服到极限失效的力学变化规律。目前有关 SRC 抗爆性能的研究大多借鉴钢筋混凝土、钢管混凝土构件的已有成果，针对 SRC 内部栓钉、角钢等组合连接件，开展动力荷载下受力特性的系统性试验与数值模拟仍十分有限(见图 3)。

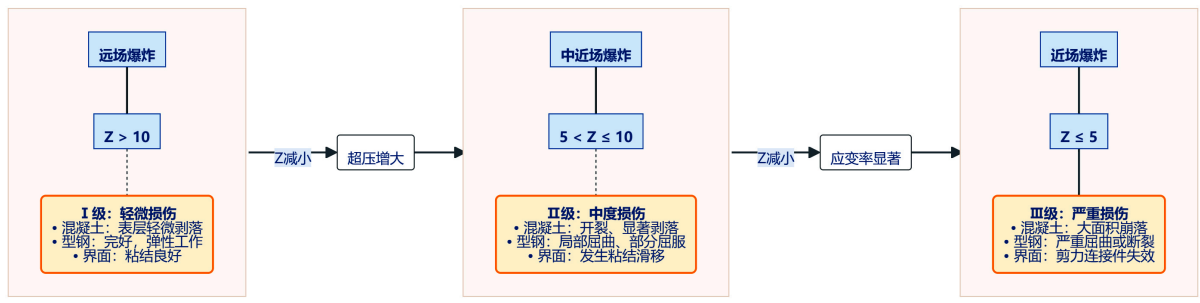


Figure 3. Typical graded damage modes of SRC columns under different scaled distances Z
图 3. 不同比例距离 Z 下 SRC 柱的典型分级损伤模式

3.3. 初始损伤：从构件完全移除到真实破损建模的研究转变

传统连续倒塌分析普遍采用拆除构件法，假定关键竖向构件瞬间完全丧失承载力，简化计算流程的同时也与真实爆炸损伤工况存在明显偏差。近年大量试验与数值研究证实，爆炸冲击大多仅造成构件不同程度局部损伤，而非整体失效。侯健团队通过框架子结构试验系统研究边柱受损后的倒塌响应，结果表明构件残余承载力下降 30%、65%等不同损伤工况下，框架整体抗倒塌性能存在显著差异：构件损伤程度越高，悬链线受力阶段峰值抗力越低；当损伤造成柱承载力大幅衰减时，外围边柱侧向支撑能力不足，结构未充分发挥悬链线作用即发生破坏，结构塑性破坏区域也会由梁柱节点转移至柱底受损区段[14]。

该结论打破了“构件完好/完全失效”二元简化假设，证明考虑爆炸造成的分级初始损伤，是准确预判 SRC 框架倒塌全过程的必要前提。

3.4. SRC 构件真实损伤建模的挑战与界面退化修正

在评估 SRC 构件爆炸损伤时，直接沿用 RC 或纯钢构件的损伤准则存在明显局限。SRC 构件的爆炸损伤不仅包含混凝土开裂剥落，还伴随型钢局部屈曲及剪力连接件的脆性断裂，这使得单一材料的 P-I 曲

线无法准确描述其多阶段破坏特征。此外，高应变率下型钢与混凝土界面的粘结性能退化会导致构件由全截面协同受力向部分截面受力转变。因此，需对现有损伤评估模型进行修正：应引入反映钢-混凝土界面相对滑移和剪力连接件失效的附加损伤变量，建立基于多材料耦合破坏的修正 P-I 曲线；在后续连续倒塌分析的初始条件导入中，不能仅考虑截面的刚度折减，还需将界面剥离区域的传力路径中断作为分级初始损伤的重要特征，以准确还原 SRC 构件带残余承载力且内部传力路径受损的复杂工况。

4. SRC 框架连续倒塌全过程演化机理

4.1. 竖向构件失效后的抗力传递机制

当框架竖向承重柱受损退出工作后，原有竖向荷载会在剩余构件间重新分配，依靠多重受力机制协同抵御大范围坍塌，两类核心抗力机制分阶段发挥作用。

变形较小时，失效柱上方框架梁双向受弯，截面受压区形成内部压力拱，为结构提供初始抗倒塌承载力，业内称其为压拱作用，是小变形阶段最主要的抗力来源[4] [15]。

当结构竖向位移持续增大、进入大变形阶段，梁内纵向钢筋与内置型钢受拉形成悬链受力体系，依靠轴向拉力承担竖向荷载，是阻止整体坍塌的最后一道受力防线[16]。对比普通 RC 框架，SRC 梁内内置型钢能大幅提升悬链线阶段承载力与变形延性，有效拓宽结构安全储备区间。

除此之外，楼板具备一定面内刚度，荷载可沿楼板平面实现空间扩散，形成薄膜效应，对三维空间框架整体抗倒塌能力起到辅助提升作用。

4.2. 水平-竖向混合多维倒塌模式

现有多数研究仅围绕竖向沉降主导的连续倒塌展开分析，较少关注建筑外围边柱受损引发的水平、竖向耦合坍塌现象。侯健、刘秉峰团队依托平面框架试验，发现一种危险性更高的混合倒塌机制，该破坏形式多出现于侧向约束不足的外围框架区域[17]。爆炸造成边柱局部破损后，结构除产生竖向沉降外，还会发生明显侧向偏移与整体倾斜，水平、竖向变形同步发展。试验结果显示，该混合倒塌工况下结构峰值抗力仅为纯竖向倒塌工况的 28%，损伤扩散范围更大、灾害后果更严重，塑性损伤主要集中在受损边柱底部，而非常规研究重点关注的梁柱节点[18]。该结论对外围 SRC 框架抗爆设计具备重要指导作用，数值建模时必须充分考虑柱侧向变形特征，以及相邻跨梁、楼板带来的空间约束作用。

4.3. 构件失效带来的动态冲击效应

爆炸冲击不会让柱构件瞬间完全失效，受损柱体自重下落会对下方梁柱节点施加瞬时冲击荷载，进一步放大结构动力响应程度。落锤冲击对比试验结果表明，冲击速度会直接改变子结构最终破坏形态：低速冲击作用下，梁端以弯曲塑性铰破坏为主；冲击速度提升后，节点核心区极易发生剪切冲切破坏，动力放大效应不可忽略[7]。现有动力学控制方程能够描述冲击荷载下子结构整体响应规律，但针对 SRC 体系中型钢、混凝土、钢筋多材料耦合界面的冲击损伤演化规律，现有研究仍存在较多空白，有待进一步细化。

4.4. 多材料耦合对多维倒塌机制演化的挑战与修正

在 SRC 框架中，压拱与悬链线机制的转变比普通 RC 框架更为复杂。由于内置型钢的高延性和屈服后强化特性，SRC 梁在进入大变形悬链线阶段时，型钢能提供额外的轴向拉力储备，但这同时也要求节点具备更强的锚固与抗剪能力。若爆炸冲击导致节点区混凝土严重破碎或剪力连接件失效，型钢与混凝土可能发生剥离，导致悬链线机制无法充分发挥，抗力在压拱向悬链线转换的过渡阶段可能出现急剧跌

落。因此,在分析 SRC 框架抗力传递机制时,不能简单叠加钢与混凝土的抗力,而需建立考虑界面退化和大变形下材料非线性的动态抗力评估模型,修正传统抗力机制转换临界点的判定方法。此外,在水平-竖向混合多维倒塌模式下, SRC 外围边柱的侧向偏移会因型钢的存在而表现出不同的塑性铰分布特征,数值建模时需针对组合截面开展二维或三维塑性铰特性的专门标定。

5. 结构鲁棒性评价与关键构件识别

5.1. 鲁棒性定义与量化评价指标

结构鲁棒性用以评判结构遭遇局部损伤后,限制破坏持续扩散、规避不成比例大范围坍塌的综合能力,也是衡量结构抗连续倒塌性能的核心指标[19]。目前学界常用量化评价体系分为三类,适用场景各有区别。

第一类为基于变形与承载力的确定性性能指标,主要包含构件失效后框架最大竖向位移、剩余承载力系数、塑性变形耗散总能量等,可直观反映构件受损后的整体承载储备水平,计算便捷,适合常规参数分析。

第二类指标以风险评估为核心,倒塌易损性曲线、抗倒塌安全储备系数 CMR 是其中代表性参数。已有研究证明,长持时荷载会明显降低 CMR 数值、增大倒塌风险,这一规律也可作为爆炸短时冲击工况分析的参考依据。

第三类为基于可靠度理论的概率指标,综合考量材料强度、构件尺寸、爆炸荷载的随机波动,计算局部构件受损后整体结构发生倒塌的条件概率,多用于重要建筑的防灾风险评估工作。

能量型鲁棒性指标 RI 工程应用广泛,通过对比结构塑性变形耗散总能量与爆炸输入总能量评判结构鲁棒性水平, RI 数值越高,结构吸收冲击能量、阻碍损伤持续蔓延的能力越强[20] (见图 4)。

5.2. 关键承重构件识别方法

提前识别对整体鲁棒性影响显著的高危构件,是开展针对性抗爆加固、优化结构平面布置的基础工作,目前主流识别手段分为三类:

- 1) 参数敏感性分析:依次移除不同楼层、不同位置框架柱,对比各组模型的位移、承载力、最终破坏模式差异,以此筛选高风险受力构件;
- 2) 传力路径拓扑分析:梳理结构竖向主力传递通道,筛选承担大部分竖向荷载的核心承重构件;
- 3) 构件力学指标判别:依托轴压比、梁柱内力分配系数、塑性发展程度划分构件重要等级;针对 SRC 结构,还需结合型钢配钢率、梁柱节点连接构造开展综合评判[21]。

5.3. 提升 SRC 框架鲁棒性的设计措施

现有改善结构抗连续倒塌性能的技术手段可分为三大类,分别对应方案设计、局部构件加固、智能化优化三个层面:

- 1) 概念设计优化:布置多重冗余传力路径,选用整体性更强的梁柱节点构造,充分发挥悬链线受力机制;高层建筑可增设加强层、腰桁架提升整体受力冗余度;
- 2) 关键构件局部加固:针对识别出的底层边柱、角柱等高危构件,采用外包钢套、粘贴 FRP 等抗爆加固方案,增设钢支撑改善侧向刚度与空间约束条件[22];
- 3) 智能优化技术:机器学习算法可依托大量仿真数据完成组合结构性能预测、加固方案优化,未来有望应用于爆炸工况下快速识别关键构件、预判倒塌演化路径,简化工程设计阶段评估流程[18]。

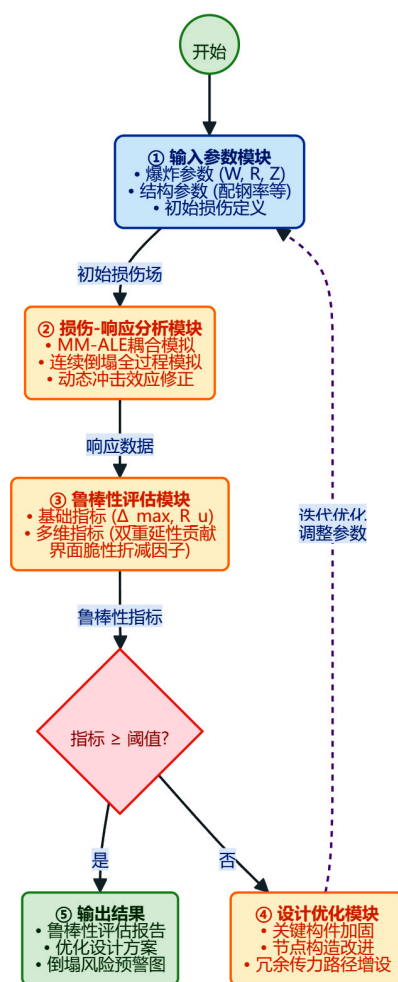


Figure 4. Technical route for robustness assessment of SRC frames under blast loads

图 4. 爆炸荷载下 SRC 框架鲁棒性评估技术路线图

5.4. 适配 SRC 体系的鲁棒性指标修正与挑战

现阶段鲁棒性量化指标大多针对单一材料结构建立，难以直接反映 SRC 多材料耦合的特点。例如，传统能量型鲁棒性指标 RI 未区分塑性耗能的来源，无法体现型钢与钢筋在变形不同阶段的延性贡献差异。在 SRC 结构中，外包混凝土的脆性剥落与钢-混凝土界面的粘结失效可能导致构件承载力的突然跌落，这种局部脆性破坏会显著降低结构整体吸收冲击能量的能力。因此，修正 SRC 框架鲁棒性指标时，需引入“双重延性贡献系数”以量化型钢与钢筋的协同耗能，同时增加“界面脆性折减因子”，以反映粘结滑移和连接件失效对能量耗散的负面影响。此外，关键构件识别也需进行修正，传统基于截面轴压比或抗弯承载力的判别方法应升级为包含型钢配钢率、界面抗剪裕度等多维参数的综合评估体系，从而更精准地识别在爆炸荷载下因界面失效而提前退出工作的隐患构件。

6. 现有研究存在的局限与本文研究思路

6.1. 当前研究不足

梳理国内外相关文献后不难发现，爆炸荷载作用下 SRC 框架连续倒塌领域仍存在多处明显研究短板，

现有成果难以完整支撑工程精细化设计需求：

- 1) 研究对象针对性偏弱：现有大量试验与数值分析均围绕 RC 框架、纯钢框架开展，专门结合 SRC 多材料复合构造、节点受力特征，完整模拟爆炸倒塌全过程的研究数量偏少，相关机理认知尚不充分；
- 2) 爆炸初始损伤简化程度过高：多数数值模拟依旧采用理想化构件完全移除假设，未定量区分不同爆炸当量、爆炸距离带来的分级真实初始损伤，无法准确还原受损构件带残余承载力持续受力的工程实际；
- 3) 多维耦合倒塌机理研究空白：水平 - 竖向混合倒塌模式仅在 RC 平面框架中得到验证，该破坏形式在 SRC 三维空间框架中的触发条件、演化全过程、控制措施暂无系统研究成果支撑；
- 4) 精细化耦合建模存在技术难点：想要同步实现爆炸流固耦合计算、SRC 材料高应变率损伤演化、大变形接触分析、倒塌全过程演化的高精度数值模型，建模流程繁琐、计算效率偏低，相关建模方法仍需完善；
- 5) 现阶段各类鲁棒性定量指标基本围绕钢筋混凝土结构建立，缺少适配 SRC 复合体系、同时兼顾爆炸初始损伤与多维倒塌特征的专用评价标准，难以精准衡量 SRC 框架自身的抗倒塌安全储备。

6.2. 后续研究重点

针对上述现存研究短板，后续相关研究可围绕四大核心方向系统推进：

- 1) 搭建能够反映爆炸真实损伤的 SRC 精细化数值模型：采用 MM-ALE 流固耦合算法模拟冲击波对 SRC 柱的冲击作用，量化不同爆炸工况下混凝土损伤分布、钢筋屈曲程度、钢混界面滑移发展规律，将分级损伤场作为后续连续倒塌分析的初始计算条件；
- 2) 完整揭示 SRC 框架多维连续倒塌演化机理：依托经过试验验证的有限元模型，完整复现爆炸冲击、局部损伤发展、内力重分配直至整体坍塌的全过程。分析初始损伤程度、柱侧向约束强弱对压拱、悬链线两类抗力机制转换的影响规律，明确混合倒塌模式的临界触发条件；
- 3) 建立适配 SRC 体系的鲁棒性评价与关键构件识别体系：提出可同时体现爆炸损伤、多维倒塌特征的鲁棒性量化指标；通过大规模参数化分析，确定最不利爆炸作用位置、爆炸当量与高危关键构件；构建简化计算模型，满足工程快速评估需求；
- 4) 提出适配 SRC 框架的抗爆抗倒塌优化设计建议：结合机理分析与参数化研究结论，从建筑整体结构布置、关键柱抗爆加固方案、梁柱节点构造优化三个维度，给出可直接落地的结构设计与加固技术措施。

7. 结语

爆炸荷载诱发 SRC 框架连续倒塌属于交叉学科研究问题，融合爆炸动力学、材料非线性力学、结构动力响应与体系可靠度多领域理论，是现阶段建筑防灾减灾方向的前沿研究内容。该领域研究思路已经出现明显转变，从传统静态拆除构件简化分析，逐步转向兼顾爆炸真实初始损伤、动态冲击效应、水平 - 竖向多维耦合倒塌的精细化全过程仿真分析。但针对 SRC 这类型钢 - 混凝土复合框架的专项研究仍处于起步阶段，在高精度数值建模方法、倒塌内在机理挖掘、结构鲁棒性定量评价等方面，仍存在大量亟待填补的研究缺口。

厘清爆炸初始损伤与 SRC 框架多维倒塌行为的内在关联，搭建高精度数值仿真分析体系，量化不同关键构件对整体抗倒塌性能的贡献程度，能够完善极端偶然荷载下 SRC 结构失效机理的理论体系，为抗连续倒塌设计规范的修订补充试验数据与理论支撑，对提升高层公共建筑、关键基础设施的爆炸防护能力具有实际工程价值。

参考文献

- [1] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 杜修力, 石磊. 爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(7): 986-993.
- [3] 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.
- [4] 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土框架结构力学性能与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] Department of Defense (2016) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. UFC 4-023-03, Washington DC.
- [6] 郑玉芳, 李德. 爆炸荷载作用下钢框架结构的连续性倒塌分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2013, 30(4): 101-105.
- [7] 李易, 陆新征, 叶列平, 等. 混凝土梁柱子结构连续倒塌动力效应的试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 44-52.
- [8] 牛操, 卢永刚, 陶俊林. 钢管混凝土柱对爆炸冲击波影响的数值模拟研究[J]. 西南科技大学学报, 2014, 29(2): 23-28.
- [9] Federal Emergency Management Agency (2009) Quantification of Building Seismic Performance Factors. FEMA P695, Washington DC.
- [10] Friedlander, F.G. (1946) The Diffraction of Sound Pulses I. Diffraction by a Semi-Infinite Plane. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **186**, 322-344.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1946.0046>
- [11] Brode, H.L. (1955) Numerical Solutions for Spherical Shock Blasts. The RAND Corporation, Santa Monica.
- [12] Jayasooriya, R., Thambiratnam, D.P., Perera, N.J. and Kosse, V. (2011) Blast and Residual Capacity Analysis of Reinforced Concrete Framed Buildings. *Engineering Structures*, **33**, 3483-3495.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.011>
- [13] 邓鹏, 肖阳, 张超, 等. 考虑爆源不确定性的钢筋混凝土框架结构爆炸易损性分析[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(2): 1-15.
- [14] Liu, B., Hou, J., Xu, C., Song, L. and Lei, F. (2025) Influence of Various Initial Side-Column Damages on the Horizontal and Vertical Mixed Progressive Collapse Behavior of RC Planar Frames. *Journal of Structural Engineering*, **151**, Article 04025001. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-14970>
- [15] 周育洸, 李易, 陆新征, 等. 钢筋混凝土框架抗连续倒塌的压拱机制分析模型[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 34-42.
- [16] 陆新征, 李易, 叶列平. 基于能量方法的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析II: 悬链线机制[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 22-29.
- [17] 王浩, 李易, 陆新征, 等. 单层钢筋混凝土框架结构水平向连续倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 88-95.
- [18] Liu, B., Hou, J., Zhang, K., Song, L. and Liu, J. (2025) Comparative Study between Horizontal-Vertical Mixed and Vertical Progressive Collapse Responses of RC Planar Frames. *Journal of Structural Engineering*, **151**, Article 04025002. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-14830>
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB 50068-2018 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [20] Tavakoli, H.R. and Afrapoli, M.M. (2017) Robustness Analysis of Steel Structures with Various Lateral Load Resisting Systems under the Seismic Progressive Collapse. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **154**, 23-39.
- [21] 甘艺平, 喻君, 陈隽, 等. 不等跨 RC 框架的抗连续倒塌理论分析及鲁棒性评判指标研究[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 210-222.
- [22] Codina, R., Ambrosini, D. and de Borbón, F. (2017) New Sacrificial Cladding System for the Reduction of Blast Damage in Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Protective Structures*, **8**, 221-236.
<https://doi.org/10.1177/2041419617701571>