

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241114002

爆炸荷载下基于子结构的RC框架抗连续倒塌分析*

蒋 认^{1,2}, 师燕超², 黄 宏¹, 张 季¹, 董晶亮¹, 庄海洋¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354)

摘要: 结合建筑结构爆炸灾害调查和精细化数值仿真手段, 对钢筋混凝土框架结构爆炸损伤范围和连续倒塌分析计算效率进行研究。基于LS-DYNA建立RC框架结构数值模型的正确性, 提出了爆炸荷载下基于子结构的钢筋混凝土框架抗倒塌分析方法, 包括从爆炸损伤区域中选取子结构和计算子结构的边界条件。通过对典型的5层钢筋混凝土框架结构与提出的子结构方法在爆炸荷载进行抗倒塌分析, 比较提出的子结构方法的有效性和高效性。研究表明: 提出的子结构方法能准确地预测给定爆炸荷载下RC框架结构的损伤范围和倒塌性能, 同时子结构方法的计算时间相比较钢筋混凝土框架结构减少了72.7%。

关键词: 爆炸荷载; 钢筋混凝土子结构; 数值模型; 连续倒塌; 计算效率

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0271-11

A Substructure Based Analysis of Progressive Collapse Resistance for RC Frame Structures Under Blast Loading

JIANG Ren^{1,2}, SHI Yanchao², HUANG Hong¹, ZHANG Ji¹, DONG Jingliang¹, ZHUANG Haiyang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: This study investigated the blast damage range and computational efficiency of progressive collapse analysis for reinforced concrete (RC) frame structures by combining investigations of blast damage to building structures with refined numerical simulations. The validity of the RC frame structure model based on LS-DYNA was verified, and a substructure-based method for collapse resistance analysis of RC frame structure under blast loading was proposed, including selecting substructures from blast-damaged regions and properly calculating their boundary conditions. By conducting collapse resistance analysis on a typical 5-story RC frame structure under blast loading using full-structure and the proposed substructure methods, the effectiveness and efficiency of the proposed substructure method were examined. The results showed that the proposed substructure method could accurately predict

* 收稿日期: 2024-11-14; 修回日期: 2025-02-18

基金项目: 江西省自然科学基金(20242BAB25307)、国家自然科学基金(52468070)资助

作者简介: 蒋认(1987—), 男, 讲师, 博士。主要从事钢筋混凝土结构抗爆炸连续倒塌分析研究。

E-mail: jiangren@tju.edu.cn

通信作者: 师燕超(1982—), 男, 教授, 博士。主要从事建筑结构抗爆分析与防连续倒塌设计研究。

E-mail: yanchaoshi@tju.edu.cn

the damage range and collapse behavior of RC frame structures under given blast loading, while reducing computational time by 72.7% compared with the full-structure method.

Keywords: blast loading; reinforced concrete substructure; numerical model; progressive collapse; computational efficiency

0 引言

近年来,生活生产疏忽等原因引起的爆炸事件频繁发生。一旦建筑结构发生爆炸,不仅会造成财物和人民生活损失,而且爆炸产生的应力波会进一步引起周围构件局部损伤甚至毁坏^[1-2]。例如,1995年在汽车炸弹袭击下美国俄克拉何马州的P. Murrah联邦大楼外墙结构柱的破坏与周围构件的损伤引发结构的连续倒塌^[3]。2001年美国纽约世贸中心遭到民航客机恐怖袭击,两栋建筑结构发生局部损伤甚至坍塌^[4]。2015年天津港瑞海公司危险品仓库发生火灾爆炸,瑞海公司钢筋混凝土(RC)框架结构综合楼损伤严重且局部发生垮塌。鉴于建筑结构因爆炸后发生局部破坏甚至倒塌的事故频繁发生,如何考虑建筑结构中局部子结构在爆炸荷载下发生损伤破坏时对建筑结构损伤破坏的影响以及爆炸荷载后建筑结构的抗倒塌分析,成为工程结构领域亟待解决的难题。

自从美国公共事务管理局(GSA)^[5]和美国国防部(DoD)^[6]在建筑结构连续倒塌分析和设计指南中使用了替代传力路径(ALP)法,ALP法在RC结构连续倒塌分析中深受国内外学者的青睐。J. Yu等^[7-8]通过对8个缩尺为1/2的平面RC双跨梁子结构在拆除中柱后进行抗倒塌静力试验,揭示了梁的配筋率和高跨比等参数对结构抗倒塌性能的影响。K. Qian等^[9-10]对空间RC子结构进行了一系列的抗倒塌静力试验,通过拆除子结构内柱和角柱以及考虑楼板对子结构抗倒塌性能的影响。张望喜等^[11-12]对一系列缩尺为2/3的RC子结构进行连续倒塌试验,包括空间子结构、平面框架子结构和悬臂子结构。W. J. Yi等^[13-14]对缩尺为1/2的平面3层4跨的RC框架结构进行抗倒塌静力分析。综上所述,在ALP方法下对建筑结构进行抗倒塌分析,由于没有考虑拆除构件的原因,导致对爆炸荷载下建筑结构的抗倒塌性能的预测不准确。

针对ALP方法存在的不足,一些学者提出了改进的ALP方法。J. Liu等^[15]提出在拆除结构柱的顶

部通过施加向下的力来扩大建筑结构的竖向动力效应,结果证明了改进后的ALP方法可以更为准确的对框架结构响应的进行预测。Y. C. Shi等^[16]通过考虑框架结构中相邻构件在爆炸荷载下的初始损伤,提出了一种新的RC框架结构连续倒塌分析方法。A. Kazemi-Moghaddam等^[17]采用ALP法分析了美国联邦政府大楼在爆炸荷载下的连续倒塌过程,结果表明该结构仅移除G20柱没有发生连续倒塌破坏,然而在爆炸荷载下G20柱失效的同时其相邻构件发生严重的损伤导致了结构发生局部倒塌。S. Gerasimidis等^[18-19]提出了一种分布损伤的方法,将爆炸荷载对建筑结构产生的损伤通过损伤因子引入相邻构件中,可以合理对建筑结构进行抗倒塌分析。总之,改进ALP方法有效地提高了爆炸荷载下建筑结构抗连续性倒塌分析的准确性,但改进的ALP使用起来较为复杂,未真实反映爆炸荷载下相邻构件的损伤破坏。

针对现有ALP方法下建筑结构连续倒塌分析,未能清楚的揭示爆炸荷载下建筑结构关键构件的损伤破坏对周围构件造成的影响。因此,一些学者对RC结构在爆炸荷载下进行动力响应研究。例如,高超等^[20]对3层RC框架结构在不同比例距离($Z=R/M^{1/3}$)下进行野外爆炸试验,研究了RC框架结构在爆炸荷载下的破坏机理和动力响应行为。J. E. Crawford等^[21-22]对四层RC框架结构进行野外爆炸试验。M. Sasasi等对一系列的RC框架结构进行现场爆炸试验,包括Crowne Plaza Hotel^[23]、Hotel San Diego^[24-25]和University of Arkansas Medical Center dormitory^[26],研究了这些框架结构的动力行为。综上所述,爆炸荷载下RC关键构件发生损伤破坏的同时,与其相邻的节点、梁和楼板等均发生了不同程度的破坏。

考虑到现场爆炸荷载下建筑结构的试验较为匮乏,以及爆炸试验场地限制和能进行试验研究结构的数量有限,获得的试验数据有限。因此,采用数值有限元方法不仅能很好的获得试验中无法捕捉到的试验数据,而且不需要考虑试验的安全性和昂贵的试验费用。现今精细化数值模型被广泛用

来研究RC结构的动力响应和抗倒塌性能,包括梁柱子结构^[27]、平面子结构^[28-30]和空间子结构^[31]。但由于精细化数值有限元模型存在计算效率低和占用存储资源大的特点,较难满足对大型建筑结构和大规模结构进行数值模拟计算。因此,在爆炸荷载下对建筑结构进行连续倒塌过程中有必要提出一种简化分析方法,同时也要考虑对建筑结构在爆炸荷载下连续倒塌分析结果的精度和计算效率。

本文通过考虑爆炸荷载对RC框架结构损伤范围的影响,提出了爆炸荷载下基于子结构的RC框架抗倒塌分析方法,包括选取子结构的方法和计算子结构边界条件,以及利用爆炸损伤区域子结构来预测RC框架结构的损伤破坏和抗倒塌性能。基于建立RC框架结构精细化有限元模型的正确性,通过对某5层RC框架结构在爆炸荷载下进行抗倒塌静力分析,证实了RC框架结构基于子结构方法的有效性和高效性。

1 钢筋混凝土框架结构数值模型验证

1.1 试验结构描述

为了验证建立的爆炸荷载下RC框架结构模型的正确性,S.C.WOODSON等^[32]和师燕超等^[33]采用LS-DYNA软件对爆炸荷载下两层两跨RC框架结构试验进行模拟和比较分析。试验RC框架结构爆炸场景示意,如图1所示。该结构在X和Y方向的跨度均为1.524 m,层高层为0.914 m,楼板的厚度为41 mm。结构的底层中柱(目标柱)纵向布置8根纵筋,每根纵筋面积为32.2 mm²,沿纵向每隔100 mm布置1.6 mm箍筋。试验中将7.1 kg TNT炸药位于RC框架结构目标柱的正前方距离柱1 070 mm且距离地面的高度为22.86 mm。RC框架结构更为详细的尺寸参数,见表1。

1.2 材料模型

利用LS-DYNA中现有的塑性损伤材料模型CONCRETE_DAMAGE_REL3(MAT_72R3)对混凝土进行建模,并用MAT_ADD_EROSION关键字来考虑混凝土材料的最大主应变和剪应变作为混凝土材料的侵蚀准则。材料模型MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY(MAT_024)用于钢筋的建模。钢筋和混凝土的材料特征,见表2~4

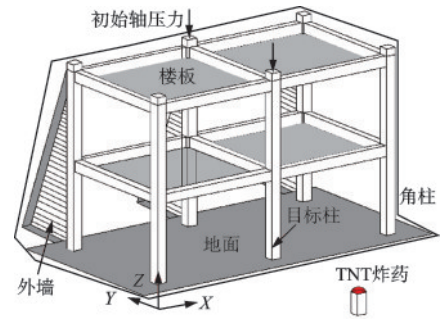


图1 RC框架结构试验模型

Fig.1 Test model of RC frame structure

表1 试验框架结构模型尺寸

Table 1 Dimensions of frame structure test model

单位:mm

试件	角柱 截面	中柱 截面	柱高	横向 跨度	纵向 跨度	板厚
NO.2	170×170	89×89	910	1 520	1520	41

所示。采用CEB和K&C模型^[34]的模型分别计算爆炸荷载下混凝土和钢筋的动力放大系数(DIF),如图2、图3所示。

表2 混凝土的材料参数

Table 2 Material parameters of concrete

密度/(g·mm ⁻³)	抗压强度/MPa	泊松比	拉应变	剪应变
0.002 45	42	0.2	0.15	0.9

表3 纵筋的材料参数

Table 3 Material parameters of longitudinal reinforcement

密度/ (g·mm ⁻³)	弹性模量/ (N·mm ⁻²)	屈服 强度/ MPa	极限 强度/ MPa	泊松 比	剪切模量/ (N·mm ⁻²)	失效 应变
0.007 85	218 000	450	510	0.3	83 846	0.15

表4 箍筋的材料参数

Table 4 Material parameters of stirrups

密度/ (g·mm ⁻³)	弹性 模量/ (N·mm ⁻²)	屈服 强度/ MPa	极限 强度/ MPa	泊松 比	剪切模量/ (N·mm ⁻²)	失效 应变
0.007 85	192 000	400	610	0.3	73 846	0.18

1.3 单元与边界条件

在LS-DYNA中采用实体单元SOLID 164和梁单元BEAM 161对混凝土和钢筋进行建模,梁单元和实体单元之间进行共节点连接。混凝土网格划分为三维八节点实体六面体单元,钢筋网格划分为Hughes-Liu梁单元。混凝土和钢筋均采用10

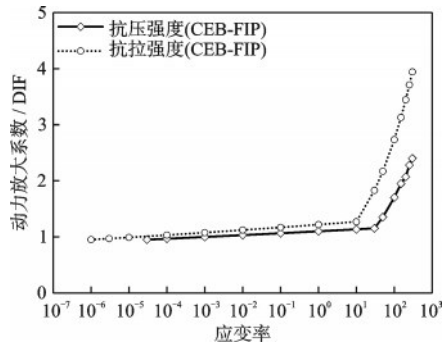


图2 混凝土的动力放大系数
Fig.2 DIF of concrete

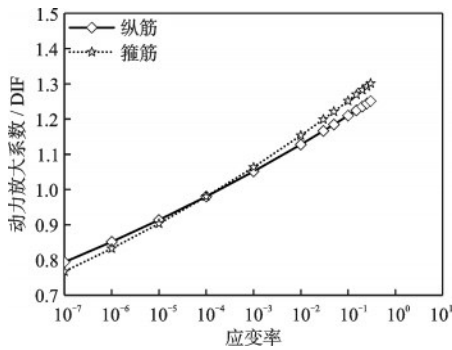


图3 钢筋的动力放大系数
Fig.3 DIF of steel reinforcement

mm单元建模,已有研究表明^[35]该网格尺寸在RC结构的分析中已经被证明是足够好的。

为了准确模拟RC框架结构的边界条件,提高RC框架结构边界条件的真实性。在数值模型(图4)中对RC框架结构柱的平动和转动进行约束。在Y轴方向,针对试验结构的尾部由翼墙支撑,在RC框架结构模型中是通过约束结构柱背面节点的平动来实现。在Z轴方向,对RC框架结构中柱施加等效轴向应力(2.1 MPa)。因此,所建立的RC框架结构数值模型与试验结构的边界条件相同。

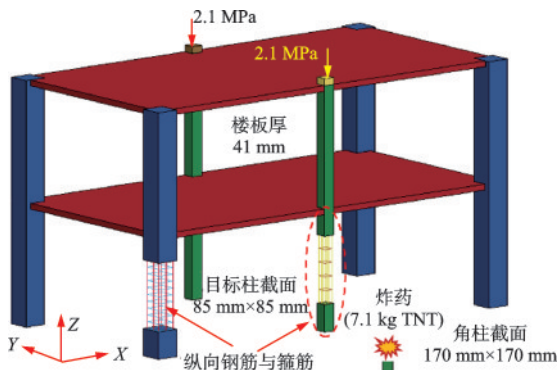


图4 RC框架结构有限元模型
Fig.4 Finite element model of RC frame structure

1.4 模型验证

在LS-DYNA分析中,首先对RC框架结构施加初始轴压力,待RC框架结构达到静力平衡后,利用LOAD_BLAST_ENHANCED施加爆炸荷载。将数值模拟结果与爆炸试验结果^[32-33]进行比较,如图5所示。由图5可知,数值模拟结果与试验结果吻合较好。主要原因为:(1)本文建立的数值有限元模型较好的考虑了试验结构的边界条件,真实地还原了爆炸荷载作用于RC框架结构的场景;(2)较好地考虑了RC框架结构的材料模型和单元网格;(3)本文的数值模拟结果得到的RC框架结构的周期存在一定时间的滞后,这可能是由于数值模型忽视了钢筋与混凝土单元之间的粘结滑移。但通过本文的数值模拟方法可以准确的模拟爆炸荷载下RC框架结构试验结果。

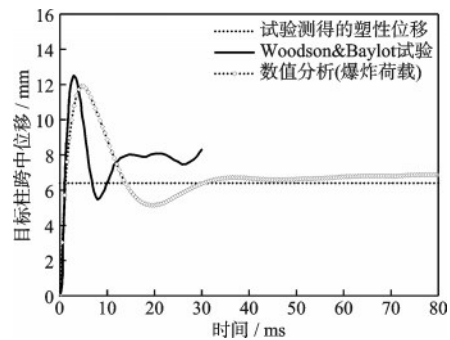


图5 结构试验与数值模型结果比较
Fig.5 Comparison between test and numerical model results of structure

2 爆炸荷载下基于子结构的RC框架抗倒塌分析

由于RC框架结构在爆炸荷载下进行抗倒塌分析会明显降低数值分析的计算效率,造成计算资源和存储空间的浪费。因此,将RC框架结构爆炸后受损的部分从框架结构中提取出来划分为爆炸损伤区域,通过爆炸荷载影响区域(直接影响区域)的子结构来揭示框架结构的动态行为和连续倒塌性能,而非爆炸荷载影响区域(间接影响区域)的构件通过设置弹簧用来考虑其对直接影响区域的平动和转动约束作用。

2.1 RC子结构选取方法的确定

爆炸荷载下RC框架结构会发生不同程度损伤

破坏或倒塌,然而Y.C.Shi等^[36]仅考虑近距离爆炸荷载下框架结构的影响区域。本文通过合理考虑爆炸荷载对框架结构的影响范围,将爆炸影响区域子结构从RC框架结构中提取出来,从而进一步提高整体

$$\begin{cases} P_0=1000 \left[0.007 \exp\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.069 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.034 \exp\left(\frac{f'_c}{30}\right) - 0.835 \ln\left(\frac{H}{4.0}\right) + \left(\frac{h}{0.6}\right)^{1.804} + 0.067 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 0.168 \right] \\ I_0=1000 \left[0.053 \exp\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.107 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.021 \exp\left(\frac{f'_c}{30}\right) + \left(\frac{H}{4.0}\right)^{-0.207} + 1.203 \exp\left(\frac{h}{0.6}\right) - 0.943 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 2.686 \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_0 为柱损伤程度 D 等于0.2时的超压荷载,单位为kPa; I_0 为柱损伤程度 D 等于0.2时的冲量荷载,单位为kPa/ms; f'_c 为混凝土的轴向抗压强度,单位为MPa; ρ_s 为箍筋的配筋率; ρ 为纵筋配筋率; H 、 b 、 h 分别为柱高、柱宽、柱深,均以m为单位。

(2)根据步骤(1)中确定的损伤柱的 P_0 和 I_0 值,计算柱在损伤程度为0.2时的临界超压(P)冲量(I)曲线^[35],计算公式可表示为:

$$(P - P_0)(I - I_0) = 12(P_0/2 + I_0/2)^{1.5} \quad (2)$$

式中, P 为超压荷载; I 为冲量荷载。

(3)在给定爆炸荷载下由TM-1500^[36]和UFC(4-340-02)^[37]确定RC框架中每根柱的超压 P 和冲量 I 值。然后根据步骤(2)来判断RC框架中每根柱的损伤程度是否超过柱的损伤程度0.2。如柱的 D 大于0.2,即在选定的子结构中必须考虑该柱及与其相连构件的损伤。反之,如柱在爆炸荷载下的 D 小于0.2,则假定柱及与其相连构件被假定为弹性。

根据步骤(3)中确定某框架结构爆炸损伤区域。然后,将爆炸损伤区域从整体结构中提取出来为子结构,以便达到提高计算效率和节省计算资源的目的。此外,爆炸荷载下从RC框架结构中确定计算子结构的程序,如图6所示。

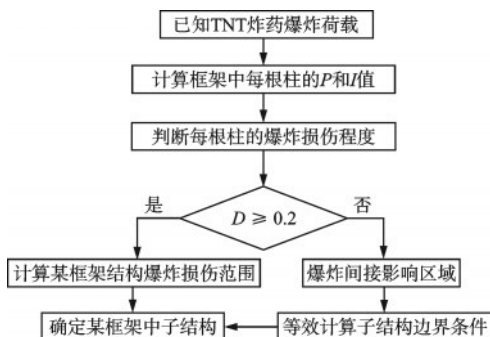


图6 计算子结构的步骤

Fig.6 Steps for calculation substructure

结构的计算效率。子结构选取的方法如下:

(1)基于Y.C.Shi等^[35]提出柱损伤程度等于0.2的预测公式,计算已知框架结构模型中柱的超压荷载和冲量荷载。计算公式如下:

2.2 RC子结构边界条件的提出

爆炸荷载下对直接影响区域RC框架结构进行抗倒塌静力分析会发生不同程度的变形,而间接影响区域的构件主要起到对直接影响区域的约束作用。因此,可以将间接影响区域的构件的刚度等效为弹簧刚度施加在子结构边界上,来考虑间接影响区域结构对子结构约束的影响。根据子结构在框架结构中的位置,保证子结构的变形与间接影响区域结构的变形相协调,将间接影响区域结构的边界平动和转动约束条件准确的添加到子结构。需要注意的是,选择的子结构柱的竖向轴力等效为其上部构件的恒荷载和活荷载。

假定图7中阴影部分为选择子结构的示意图,选择的子结构模型位于框架结构中黑色阴影部分。子结构的水平边界约束采用弹簧等效作用于边柱的侧面,即平动约束和转动约束弹簧的刚度^[38]用来模拟子结构边界约束。

考虑到Y.C.Shi等^[36]疏忽了间接影响区域对直接影响区域转动刚度的影响。本文进一步考虑间接影响区域梁柱转动刚度会影响子结构的转动约束,转动弹簧的刚度可以通过梁柱的转动刚度计算如下:

$$K_r = 2S_c + S_b \quad (3)$$

式中, S_c 和 S_b 分别表示间接影响区域柱和梁的转动刚度。

将子结构边柱梁端的末端假定为固定的,则相邻梁柱构件的转动刚度可表示为:

$$S_b = 4 \frac{E_{cs} I_b}{L_b} \quad (4)$$

$$S_c = 4 \frac{E_{cs} I_c}{L_c} \quad (5)$$

式中, I_b 和 I_c 分别为间接影响区域梁和柱截面的惯性矩。

水平约束弹簧的刚度由以下公式计算确定。

$$K_d = K_{c1} + K_{c2} = 2.12E_{cs}I_c/L_c^3 \quad (6)$$

式中, I_c 为柱截面的惯性矩; L_c 为柱的高度; E_{cs} 为柱截面的抗弯刚度^[39]。

需要注意的是, 在 Y 轴方向上, 子结构 Y 轴方向边界刚度计算与 X 轴方向刚度计算的方法相同。在 Z 轴方向上, 根据子结构柱所处框架结构楼层的位置, 从上部结构传递到子结构柱的竖向轴力可根据上部构件的数量, 将恒荷载和活荷载等效施加在子结构上。同时, 间接影响区域随着梁开间或进深数量的增加, 水平约束和转动约束弹簧的刚度分别由增加的梁或柱相应的累加, 将间接影响区域水平或旋转约束弹簧的总刚度添加到子结构表面。

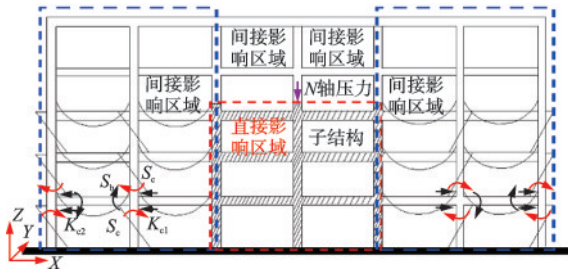


图7 计算子结构示意图

Fig.7 The schematic diagram of calculation substructure

2.3 爆炸荷载下 RC 结构抗连续倒塌分析

为验证提出的子结构方法能准确预测爆炸荷载下 RC 框架结构的损伤破坏模式和抗倒塌性能, 需要对爆炸受损子结构和框架结构进行 Pushdown 静力分析。本文将爆炸荷载下 RC 结构 Pushdown 静力分析过程分为三个阶段: 静力平衡阶段、爆炸荷载作用阶段和 Pushdown 静力作用阶段, 步骤如下:

(1) 静力平衡阶段: 对建立 RC 框架结构和子结构模型施加恒载和活载, 以模拟实际 RC 结构承受的竖向荷载, 直至结构达到静力平衡状态。

(2) 爆炸荷载作用阶段: 在 RC 子结构和整体结构的前表面施加爆炸荷载, 爆炸荷载通过 LS-DYNA 中的关键字 LOAD_BLAST_ENHANCE 作用于结构上, 分析子结构和整体结构的动力行为和损伤破坏。值得注意的是, 结构所有节点的速度小于 0.1 m/s 时^[35], 则可认定结构已经达到静力平衡。

(3) Pushdown 静力作用阶段: 在 LS-DYNA 中通过重启动分析对爆炸荷载后子结构和框架结构进行 Pushdown 静力分析。将 RC 结构所有节点设置为

节点集, 采用关键字 CHANGE_VELOCITY_NODE_ONLY 将节点集的速度都强制设置为零。通过关键字 LOAD_SEGMENT 对子结构和框架结构施加竖向荷载进行 Pushdown 分析直至结构倒塌, 即结构丧失承载力表明结构发生倒塌^[36], 得到子结构和框架结构爆炸后的抗力位移曲线。

3 基于子结构的 RC 框架抗倒塌分析有效性验证

3.1 RC 结构有限元模型的建立

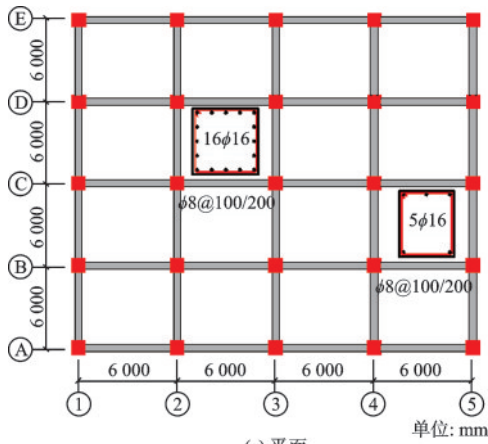
按照《建筑结构抗震设计规范》^[40]和《混凝土结构设计规范》^[41]设计了某 5 层 4×8 跨的 RC 框架结构, 层高均为 3.0 m, 跨度为 5.0 m, 楼板厚度为 150 mm, 柱和梁截面尺寸分别为 500 mm × 500 mm 和 300 mm × 500 mm。框架结构顶层和标准层楼面恒载分别为 3.3 kN/m² 和 3.0 kN/m², 标准层活荷载为 2.0 kN/m²。设计资料包括: 采用 PK-PM 设计的 RC 框架结构混凝土等级为 C30, 基本风压: 0.4 kN/m², 地面粗糙度: C 类, 不考虑雪荷载。设计地震动分组: 第 1 组; 设计场地类别: II 类; 场地特征周期: 0.35 s, 不考虑抗震设防。爆炸荷载 (288 kg TNT) 位于底层中柱正前方为 3 m 且距离地面净高 1.5 m。RC 框架结构平面图的一半, 如图 8(a) 所示。采用 LS-DYNA 软件建立 RC 框架结构数值模型, 如图 8(b) 所示。混凝土和钢筋材料信息分别见表 5 和表 6。

由于爆炸荷载下 RC 框架结构迎爆面易接近性是最脆弱的, 而且 RC 框架结构的进深 (Y 轴) 方向由于有楼板和梁的约束且刚度较大。因此, 本文采用迎爆面 RC 框架结构进行抗爆炸倒塌性能分析。

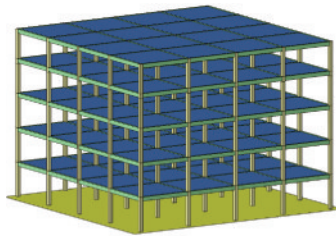
3.2 爆炸荷载下 RC 结构动力响应和连续倒塌分析比较与验证

3.2.1 爆炸荷载下 RC 框架结构抗倒塌分析

考虑到 RC 框架结构关于中柱对称, 爆炸荷载下一半 RC 框架结构抗倒塌分析的有效塑性应变, 如图 9 所示。在 $t=0.2$ s 时施加爆炸荷载, 仅观察到底部三层中柱和中柱两侧边柱损伤最为严重, 如图 9(a) 所示。当 $t=0.5$ s 时, 底层中柱呈出弯曲破坏模式, 结构梁端混凝土出现不同程度的损伤, 但受拉裂缝未贯穿梁截面, 如图 9(b) 所示。进入压拱 (CAA) 阶段, 梁端混凝土被压碎, 并且梁端裂缝向梁跨中间位置延伸, 如图 9(c) 所示。随着竖向外荷



(a) 平面



(b) 精细化数值模型

图8 RC框架结构模型

Fig.8 Schematic diagram of RC frame structure

表5 混凝土的特征

Table 5 Properties of concrete

强度等级	密度/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	泊松比	最大拉 应变	最大主剪 应变
C40	0.002 45	0.2	0.15	0.9

表6 钢筋的特征

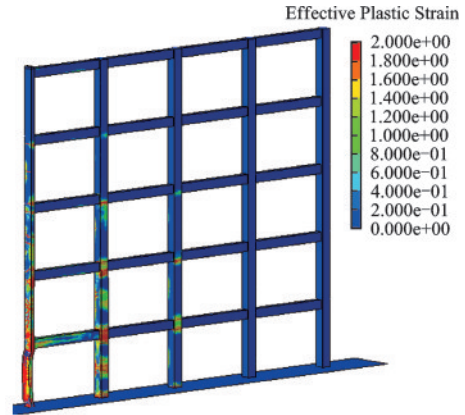
Table 6 Properties of steel reinforcement 单位: MPa

纵筋 等级	箍筋等级	纵筋屈 服强度	纵筋极 限强度	箍筋屈 服强度	箍筋极 限强度
HRB400	HPB300	400	520	300	420

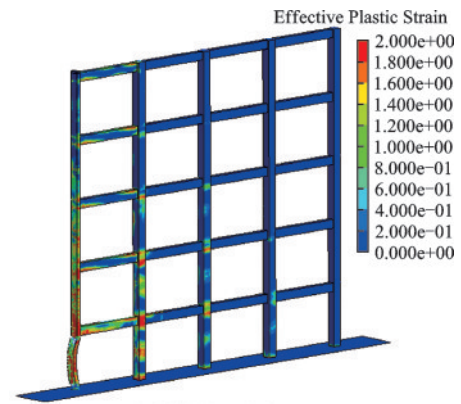
载继续增加,进入悬链线(TCA)阶段,靠近间接影响区域梁端纵筋被拉断,导致RC框架结构丧失抗倒塌能力发生破坏,如图9(d)所示。

3.2.2 爆炸荷载下基于子结构的RC框架抗倒塌分析

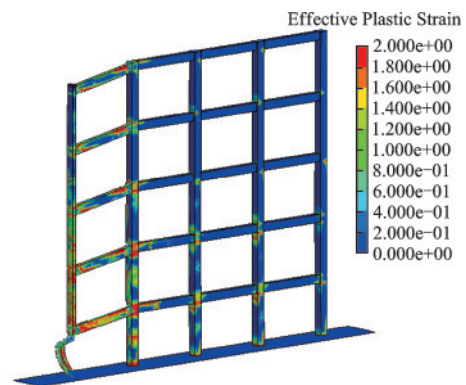
爆炸荷载(288 kg TNT)下RC框架中柱最大 P 和 I 以及损伤程度临界值等于0.2时结构柱的 $P-I$ 曲线(即黑色虚线),如图10所示。由图10可知,有三颗黑色五角星(即与中柱相邻的边柱)位于 $P-I$ 曲线的右上方,说明RC框架结构底部三层中柱和与中柱相邻边柱的损伤程度均大于0.2。两个黑色方块为第四层中柱和与底层边柱相邻跨的柱损伤程度均小于0.2。



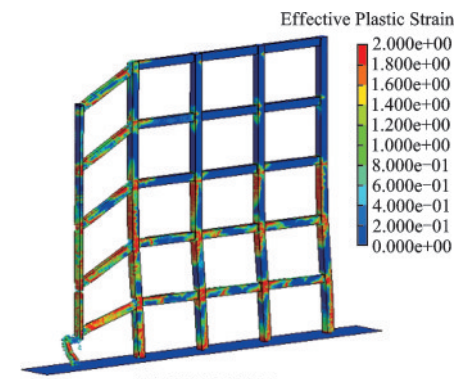
(a) 框架结构损伤传播 ($t = 0.2 \text{ s}$)



(b) 框架结构角柱失效 ($t = 0.5 \text{ s}$)



(c) 框架梁CAA效应 ($t = 1.0 \text{ s}$)



(d) 框架结构失效模式 ($t = 1.2 \text{ s}$)

图9 爆炸荷载下RC框架抗倒塌分析的数值结果

Fig.9 Numerical results of collapse resistance analysis for RC frame under blast loading

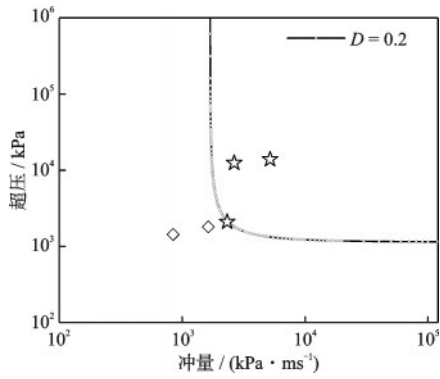


图10 柱超压冲量曲线

Fig.10 Pressure-impulse curve of columns

根据提出的子结构方法,建立的子结构有限元模型,如图11所示。根据3.2节定义的子结构边界条件,将间接影响区域的刚度添加到子结构边界上。计算得到子结构第一层、二层和三层的平动刚度和转动刚度分别为237 kN/m和403 kN/m²,105 kN/m和207 kN/m²,78 kN/m和123 kN/m²。

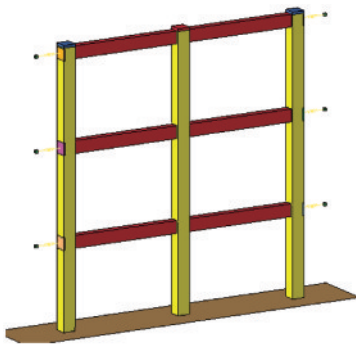
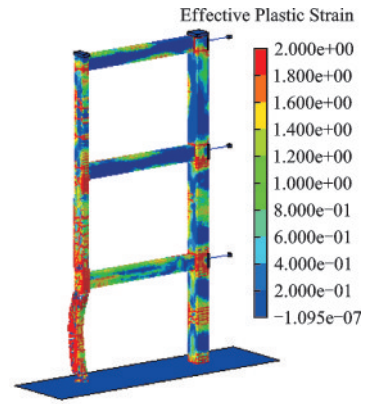


图11 选择的子结构模型

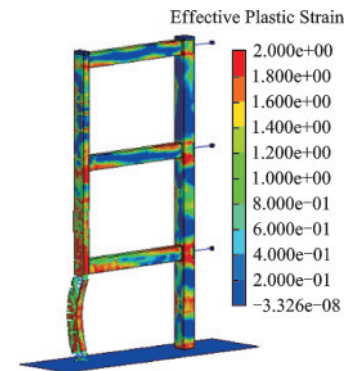
Fig.11 Selected substructure model

图12为288 kg TNT爆炸后子结构进行抗倒塌静力分析的损伤应力云图。在 $t=0.2$ s时施加爆炸荷载,子结构在爆炸后的损伤分布如图12(a)所示。在竖向外荷载作用下,子结构柱发生弯曲破坏。进入CAA阶段,梁端混凝土损伤较为严重,随着梁端混凝土单元被删除,CAA效应消失。在 $t=1.2$ s时,子结构发生失效。对比框架结构(图9),子结构数值结果说明了爆炸后子结构的损伤状态与框架结构保持相同。

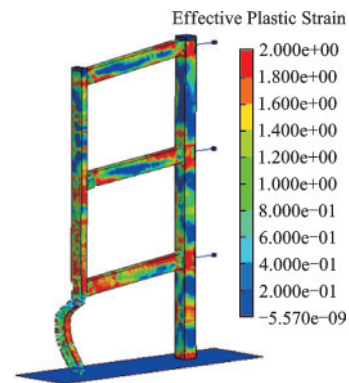
通过对RC结构进行Pushdown静力分析,分别得到了RC框架结构和RC框架子结构的抗力位移曲线,如图13所示。由图13可知,在CAA阶段子结构的抗倒塌能力与框架结构接近相同。进入TCA阶段后,RC框架结构和子结构之间的峰值抗



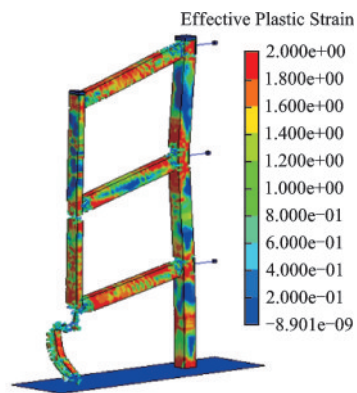
(a) 结构损伤传播 ($t=0.2$ s)



(b) 子结构柱失效 ($t=0.5$ s)



(c) 梁CAA效应 ($t=1.0$ s)



(d) 破坏模式 ($t=1.2$ s)

图12 爆炸荷载下选择子结构倒塌过程的数值结果

Fig.12 Numerical results of collapse progression for selected substructure under blast loading

力相差为9.2%，这是因为子结构边界弹簧刚度没有较好地考虑间接影响区域构件的塑性变形，导致TCA阶段子结构边界刚度偏大所致。然而，从子结构和RC框架结构的抗力曲线变化趋势和竖向抗力位移角度比较，采用提出的子结构方法能较好的反映RC框架结构抗倒塌能力。

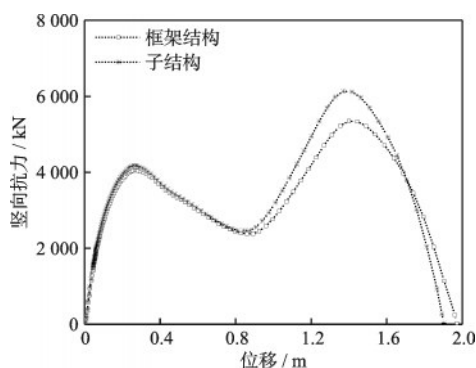


图13 子结构和框架结构竖向抗力曲线比较

Fig.13 Comparison of vertical resistance-displacement curves between substructure and frame structure

综上所述，采用所提出的子结构方法导出的子结构模型可以预测RC框架结构的损坏破坏和倒塌性能。同时，证实了提出的基于子结构的框架结构选取方法的有效性，以及定义的子结构边界条件是可靠的。

3.3 计算效率比较

提出的子结构方法可以显著降低RC框架结构的单元数量和自由度，需进一步对子结构和RC框架结构的计算效率进行比较。本文数值计算均从具有3.2 GHz CPU频率和8 G内存的台式计算机上模拟完成的。对于爆炸工况下RC框架结构和子结构进行Pushdown静力分析的计算时间分别为23小时6分钟和6小时18分钟。相比较RC框架结构，RC子结构的计算时间减小了72.7%。

4 结 论

本文利用LS-DYNA软件对爆炸荷载下RC结构进行Pushdown静力分析，提出了爆炸荷载下RC框架结构选取子结构的方法和定义了子结构的边界约束，进一步验证了提出的子结构方法的有效性和高效性，主要的结论如下：

(1)提出了爆炸荷载下基于子结构的框架结构抗倒塌分析方法，包括对子结构的选取和子结构边界约束条件的定义。

(2)采用RC框架子结构的抗倒塌分析方法，在爆炸工况下对某5层RC框架结构损伤破坏和抗倒塌性能进行比较，RC框架结构和子结构之间仅TCA阶段峰值抗力相差为9.2%。同时，提出的子结构方法能有效预测爆炸荷载下RC框架结构的损伤破坏范围和破坏模式。

(3)相比较RC框架结构，提出的子结构方法在爆炸荷载下进行抗倒塌静力分析过程中的计算时间缩短了72.7%。

参考文献：

- [1] Choi J H, Chang D K. Prevention of progressive collapse for building structures to member disappearance by accidental actions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6):1016-1019.
- [2] Yu H, Izzuddin B A, Zha X X. Progressive collapse of steel-framed buildings: influence of modelling approach [J]. Advanced Steel Construction, 2010, 6 (4) : 932-948.
- [3] Longinow A, Mniszewski K R. Protecting buildings against vehicle bomb attacks[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1996, 1 (1) : 51-54.
- [4] Shi Y C, Jiang R. Experimental investigation on progressive collapse performance of RC substructures under blast loading [J]. Structures, 2024, 70: 107803.
- [5] General Services Administration. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance[S]. Washington, D C: General Services Administration, USA, 2013.
- [6] Department of Defense. Unified facilities criteria, design of buildings to resist progressive collapse [S]. Washington, D C: Department of Defense, U.S. Army Corps of Engineering, 2010.
- [7] Yu J, Tan K H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages [J]. Engineering Structures, 2013, 55: 90-106.
- [8] Yu J, Tan K H. Special detailing techniques to improve structural resistance against progressive collapse [J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140 (3) : 04013077.
- [9] Qian K, Liu Y, Yang T, et al. Progressive collapse resistance of posttensioned concrete beam-column sub-assemblages with unbonded posttensioning strands [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144 (1) :

- 04017182.
- [10] Qain K, Weng Y H, Fu F, et al. Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behavior of multi-story RC frames [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101636.
- [11] 张望喜,王雄,刘精巾,等. 现浇与装配整体式混凝土空间框架子结构的抗连续倒塌性能试验对比研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(7): 81-90.
- Zhang W X, Wang X, Liu J J, et al. Experimental Comparative study on progressive collapse resistance behavior of cast-in-place and monolithic precast concrete spatial frame substructures [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(7): 81-90. (in Chinese)
- [12] 张望喜,吴昊,张瑾熠,等. 装配整体式混凝土框架子结构防连续倒塌空间受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(5): 42-64.
- Zhang W X, Wu H, Zhang J Y, et al. Experimental test on progressive collapse resistance of the spatial behavior of integrated precast concrete frame substructures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53 (5) : 42-64. (in Chinese)
- [13] Yi W J, He Q F, Xiao Y, et al. Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(4): 433-439.
- [14] Yi W J, He Q F, Xiao Y. Experimental study on collapse resistance of reinforced concrete frame structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28 (5) : 104-109.
- [15] Liu J, Tian Y, Orton S L, et al. Resistance of flat-plate buildings against progressive collapse I: modeling of slab-column connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015: 04015053.
- [16] Shi Y C, Li Z X, Hao H. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (6): 1691-1703.
- [17] Kazemi-Moghaddam A, Sasani M. Progressive collapse evaluation of Murrah Federal Building following sudden loss of column G20 [J]. *Engineering Structures*, 2015, 89: 162-171.
- [18] Gerasimidis S, Sideri J. A new partial-distributed damage method for progressive collapse analysis of steel frames [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 119: 233-245.
- [19] Sideri J, Mullen C L, Gerasimidis S, et al. Distributed column damage effect on progressive collapse vulnerability in steel buildings exposed to an external blast event [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31 (5): 04017077.
- [20] 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(7): 9-20.
- Chao G, Zong Z H, Wu J. Experimental study on progressive collapse failure of RC frame structures under blast loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(7): 9-20. (in Chinese)
- [21] Crawford J E, Magallanes J M. The effects of modeling choices on the response of structural components to blast effects [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(2): 231-266.
- [22] Crawford J E, Wu Y, Magallanes J M, et al. The importance of shear dilatancy behaviors in RC columns [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2013, 4 (3): 341-377.
- [23] Sasani M, Kazemi A, Sagioglu S, et al. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to severe initial damage[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137 (9): 893-902.
- [24] Sasani M, Sagioglu S. Progressive collapse resistance of hotel san diego [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 478-488.
- [25] Sasani M. Response of a reinforced concrete infilled-frame structure to removal of two adjacent columns[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30: 2478-2491.
- [26] Sasani M, Sagioglu S. Gravity load redistribution and progressive collapse resistance of 20-story reinforced concrete structure following loss of interior column[J]. *ACI Structural Journal*, 2010, 107(6): 636-644.
- [27] Tan Z, Zhong W H, Tian L M, et al. Research on the collapse-resistant performance of composite beam-column substructures using multi-scale models [J]. *Structures*, 2020, 27: 86-101.
- [28] Li Z X, Liu H K, Shi Y C, et al. Experimental investigation on progressive collapse performance of prestressed precast concrete frames with dry joints [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 113071.
- [29] Ren J, Shi Y C, Bo Z, et al. Numerical investigation on degradation mechanism of reinforced concrete structures under close-in explosion[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2025: 13694332251313865.
- [30] Jiang R, Shi Y C, Cui J. A novel beam-column component Macro model for degradation mechanism analysis of rc structures subjected to blast loading[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2025, 39 (3) : 04025014

- [31] 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: 101-109.
- [32] Woodson S C, Baylot J T. Structural collapse: quarter-scale model experiments[J]. US Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center, 1999, 23(1): 1-8.
- [33] 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 Y C. Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete structures under blast loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.(in Chinese)
- [34] Shi Y C, Jiang R, Li Z X, et al. A new Macro-model of beam-column joints for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures under blast loading[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 22(1): 2250008.
- [35] Shi Y C, Hao H, Li Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(11): 1213-1227.
- [36] Shi Y C, Jiang R, Li Z X, et al. A substructure based method for damage assessment of RC frame structures under close-in explosion [J]. *Engineering Structures*, 2022, 272: 115017.
- [37] Sudeep K, Rao V N. Structures to resist the effects of the accidental explosions [J]. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2019, 3(3): 1528-1530.
- [38] Xu M, Gao S, Guo L H, et al. Study on collapse mechanism of steel frame with CFST-columns under column-removal scenario [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 141: 275-286.
- [39] 屈铁军, 徐建, 石云兴. 不同受力状态的钢筋混凝土构件的等效弹性模量[J]. *混凝土*, 2016(11): 119-122.
Qu T J, Xu J, Shi Y X. Equivalent elastic modulus of reinforced concrete members under different stress state [J]. *Concrete*, 2016(11): 119-122 (in Chinese).
- [40] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [41] 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.

(本文编辑: 张艺)