

爆炸荷载下 CFRP 加固混凝土子结构的抗连续倒塌性能评价

蒋认^{1,2}, 彭楚凡¹, 陈祺涛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: 爆炸荷载下重要构件的损伤破坏易引发建筑结构连续倒塌, 造成财产损失的同时会危及人民生命安全。现常采用纤维增强复合材料来加固钢筋混凝土 (RC) 结构, 但缺乏定量评价 FRP 加固对 RC 结构抗爆炸倒塌性能退化的研究。考虑到爆炸试验安全性差和费用高, 本文基于 LS-DYNA 软件利用橡胶垫块通过落锤试验机在落锤冲击速度 1m/s 至 10m/s 范围内建立预测结构表面爆炸荷载的经验公式。通过已有文献中的实验数据验证了基于 LS-DYNA 平台的混凝土子结构有限元数值模型的正确性, 提出采用能量法来评价 CFRP 加固对混凝土子结构抗爆炸倒塌性能的贡献。研究结果表明: 相比较 CFRP 未加固混凝土子结构, 采用 CFRP 加固对剪切模型和弯曲模型抗爆炸倒塌的贡献分别提高了 38.3% 和 40.9%。同时, 爆炸荷载下 CFRP 加固梁后能显著提高 RC 子结构在压拱阶段的竖向承载力, 为实际工程 CFRP 加固抗爆设计提供了理论依据。

关键词: 爆炸荷载; 橡胶垫块; 混凝土子结构; 精细化数值模型; 连续倒塌

中图分类号: TU375.4 文献标识码: A

Assessment on Progressive Collapse Resistance Performance of CFRP Reinforced Concrete Substructures under Explosion Loads

JIANG Ren^{1,2}, PENG Chufa¹, CHEN Qitao¹

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

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

Abstract: The damage of important components under blast loads can easily lead to the progressive collapse of reinforced concrete (RC) structures, causing property losses and endangering people's lives and safety. Fiber reinforced polymer (FRP) materials are commonly used to enhance RC structures, but there is a lack of quantitative assessment on the FRP reinforcement to the collapse blast-resistant performance degradation of RC structures. From the perspective of the poor safety and low cost of explosion testing, based on the LS-DYNA software, the rubber pad to simulate the explosion loads acting on the surface of the structure through the drop hammer testing machine is proposed in the range of drop hammer impact velocities from 1m/s to 10m/s, which further established an empirical formula for predicting the explosion loads on the surface of the structure. The experimental data from existing literature have verified the correctness of the concrete substructure finite element numerical model based on the LS-DYNA platform, then the energy method is used to assess the contribution of CFRP reinforcement to the collapse blast-resistant performance of concrete substructures. The research results indicate that, compared to the unreinforced concrete substructure using CFRP, the contribution of CFRP to the shear model and bending model increased by 38.3% and 40.9%, respectively. At the same time, CFRP reinforced beams can significantly improve the vertical bearing capacity of RC substructures in the CAA stage under explosive loads, which will provide a theoretical basis for practical engineering CFRP reinforced blast resistant design.

Key words: Blast load; Rubber pad; Concrete substructure; Refined numerical model; Progressive collapse

收稿日期: 2025-9-16

基金项目: 江西省交通运输厅青年科技项目 (2025QN002); 江西省自然科学基金 (20242BAB25307)

近些年来，世界范围内因战争和恐怖袭击引起的爆炸事件频繁发生，尤其是 2001 年美国世贸大楼爆炸倒塌后，到 2024 年以色列加沙持续的战争造成了大量人员伤亡和财产损失；同时，爆炸产生的冲击波会进一步引起爆源附近的建筑结构发生不同程度的损伤和倒塌破坏。虽然我国对炸药使用实行严格管制，然而爆炸引起建筑结构连续倒塌的事件时常发生。例如，2020 年 10 月 29 日，江西赣州经开区香溢华府小区 4 号住宅楼发生的爆炸事故，造成 4 人死亡和 18 人受伤，直接经济损失约 861.9 万元。2023 年 6 月 21 日，宁夏银川富洋烧烤店人员的疏忽而引起的爆炸事件，造成 31 人死亡和 7 人受伤。因此，爆炸不仅会引起结构不同程度的损伤，还可能会引发建筑结构连续倒塌，危及人民生命的同时会对社会造成灾难性的影响。

纤维增强复合 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 材料因其具有高强度和质量轻及施工速度快等优点而深受国内外学者的青睐。现今国内外学者对 FRP 在 RC 构件抗爆加固领域取得了丰硕的成果^[1-2]。Crawford 等人^[3]对未加固柱和 FRP 加固柱进行野外爆炸试验对比，结果表明爆炸后未加固底层柱发生了斜剪破坏，然而在相同的爆炸荷载下碳纤维 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 加固后柱未发生剪切破坏且柱跨中的变形显著降低。Lee 等人^[4-5]通过对 1 根未加固柱和 8 根 FRP 加固柱进行爆炸试验。结果表明未加固柱出现典型的剪切破坏而采用 CFRP 加固柱表现出弯曲破坏，同时施加相同爆炸荷载后加固柱表现出更好地抗倒塌破坏能力。Hu 等人^[6]对 RC 柱进行近距离爆炸试验，研究了柱轴压比和 CFRP 厚度等对爆炸后 RC 柱剩余承载力的影响，并利用爆炸后 RC 柱剩余轴向承载力建立了抗爆加固的预测公式。另外，诸多学者^[7-9]在不考虑轴压比的条件下进行 FRP 加固 RC 柱的爆炸试验，进一步揭示了爆炸后 RC 柱的损伤破坏形态和动力响应行为。通过总结上述 FRP 抗爆加固 RC 构件的研究发现，国内外学者对 FRP 种类和加固方式等在爆炸荷载下 RC 柱的动态响应行为和损伤破坏形态进行了深入的研究，然而对 FRP 加固结构抗爆性能的研究相对匮乏。

针对国内外学者对爆炸荷载下 FRP 加固 RC 结构抗爆性能的研究还处于初步阶段。例如，潘金龙等人^[10]通过对 RC 圆柱采用不同的 CFRP 加固方式来研究其抗爆性能。Li 等人^[11]通过建立精细化数值有限元模型来模拟 FRP 加固 RC 柱的抗爆性能，较好地捕捉到 FRP 的断裂破坏和爆炸荷载下 RC 柱承载力的退化过程。Elsanadedy 等人^[12]分析了 CFRP 加固 RC 圆柱在不同爆炸荷载下动力行为。通过总结上述 FRP 抗爆加固 RC 构件的研究发现，在实际工程结构中 RC 结构抗爆炸倒塌分析不能把构件从结构体系中孤立出来，仅考虑构件层次的损伤破坏来考虑结构层面的抗爆炸连续倒塌分析。因此，有必要进一步研究爆炸荷载下 FRP 加固 RC 结构关键构件对相邻构件损伤破坏的影响。

针对现有 FRP 加固 RC 构件抗爆性能分析，未能清楚地揭示爆炸荷载下 FRP 加固关键构件对相邻构件造成的影响。Crawford 等^[13]对四层 RC 框架结构进行野外爆炸试验，爆炸后柱发生损伤破坏同时与失效柱相连的梁也发生混凝土的剥落，但框架结构未发生倒塌。然而，在相同爆炸荷载下通过对 RC 框架结构柱采用 CFRP 加固来进行抗爆研究，研究结果表明 CFRP 加固后柱未发生严重破坏且与柱相邻构件未见明显破坏，证实了采用 CFRP 加固能有效防止结构柱脆性破坏的发生且有助于提高结构柱的抗爆性能。Shin 和 Jeon^[14]采用 FRP 对 RC 框架结构进行加固来研究结构的抗倒塌能力，结果表明 FRP 加固后的 RC 框架结构可最大限度的降低框架柱爆炸面的损伤破坏和框架柱迎爆面的残余位移。Shi 和 Jiang^[15]对爆炸荷载下 CFRP 加固和未加固混凝土子结构柱进行倒塌试验，结果研究表明 CFRP 加固后混凝土子结构柱未发生剪切破坏和弯曲破坏，同时混凝土子结构柱跨中变形和轴向变形均有明显的降低。综上所述表明，对 FRP 加固 RC 结构柱在爆炸荷载下的研究主要集中在对结构动力响应行为和爆炸后引起结构的损伤破坏方面的提高，但仍未彻底解决 FRP 加固 RC 结构关键构件对爆炸后相邻构件的损伤评价和抗力位移关系等存在的问题。因此，急需在开展 FRP 加固 RC 结构关键构件抗爆炸损伤破坏形态的同时，利用抗力位移曲线关系来评价 FRP 加固关键构件对爆炸损伤相邻构件抗连续倒塌性能退化的影响。

本文通过调整落锤质量和冲击速度及橡胶垫块来模拟作用于结构表面的冲击力和持时，建立模拟

作用于结构表面爆炸荷载的预测公式。然后，利用LS-DYNA平台验证试验混凝土子结构有限元数值模型的正确性，进一步探讨了爆炸荷载下CFRP加固RC子结构对相邻构件损伤破坏和抗力位移关系，评价CFRP加固对爆炸荷载下混凝土子结构抗倒塌性能贡献的影响。

1 爆炸荷载模拟加载方法

钢筋混凝土结构发生连续性倒塌主要是由于在外部极端荷载（撞击和爆炸）下导致关键承重构件发生损伤破坏时，结构表面会分布爆炸荷载，如图1所示。因此，将作用在结构表面的爆炸荷载等效转化为由落锤试验机模拟爆炸荷载作用在结构表面，本文利用橡胶将落锤产生的冲击力来模拟爆炸荷载来研究RC结构的动力响应行为和对相邻构件的损伤破坏，如图2所示。

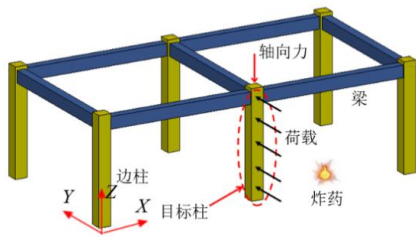


图1 结构表面爆炸荷载

Fig. 1 Structural surface explosion loads

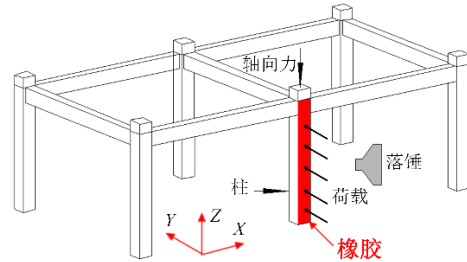


图2 模拟爆炸荷载加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulated explosion loads

在不同爆炸荷载下对结构表面产生的冲击力和持时会有明显的差别，通过在落锤与结构表面之间增设橡胶垫块来调整冲击力峰值和持时^[16-17]。已有研究表明^[18-19]，落锤冲击结构加载中其局部响应由接触刚度来决定，是结构表面冲击力峰值和持时预测的依据。结构的材料和尺寸等决定自身的刚度与抗倒塌能力，是预测结构自由振动所产生的变形和冲击力等响应的依据。因此，冲击力峰值和持时只受冲击能量和橡胶垫块的影响，与结构本身的特性无关。

为进一步研究落锤质量、冲击速度和橡胶垫块厚度对爆炸压力时程曲线的影响，通过LS-DYNA软件建立数值模型，对落锤质量为1000 kg条件下利用橡胶垫块来模拟作用在结构表面的爆炸荷载。将橡胶垫块在落锤冲击条件下模拟分析获得冲击力峰值（见图3）和持时（见图4）的离散数据。通过拟合曲线得到冲击力和持时曲线分布规律可知，随着橡胶垫块厚度的增加，在相同的速度条件下冲击力峰值通过曲线拟合呈现以指数的形式逐渐减小，持时呈现线性增加。

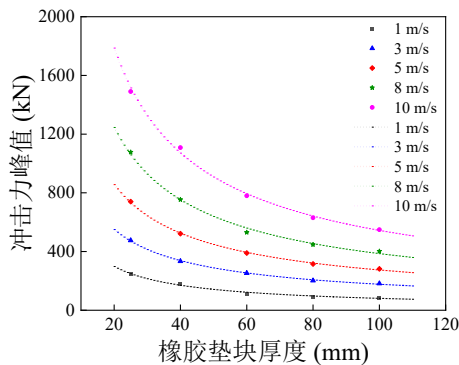


图3 冲击力峰值拟合曲线

Fig. 3 Peak fitted curves of impact force

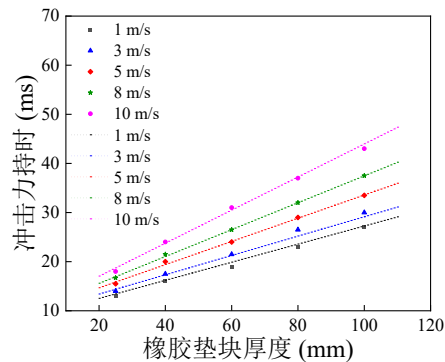


图4 冲击力持时拟合曲线

Fig. 4 Duration fitted curves of impact force

采用数值分析橡胶垫块和冲击速度在落锤冲击作用下的冲击力峰值和持时进行比较分析，得到拟合曲线公式（1）：

$$\begin{cases} F = 2784.5e^{0.176v}d^{-0.72} \\ t = -0.0045vd + 0.2829d + 9.456 \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 为冲击力峰值, t 为冲击力持时, v 为落锤冲击速度, d 为橡胶厚度, F 单位为 kN, t 单位为 ms, v 单位为 m/s, d 单位为 mm。

2 混凝土子结构有限元模型验证

2.1 模型概况

按照我国《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011-2016)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2015)设计某 5 层 4×4 跨钢筋混凝土框架结构。考虑到在恐怖袭击或汽车炸弹爆炸发生后, RC 框架结构周边结构易受到严重破坏。同时由于试验条件的限制, 选取框架结构底层混凝土子结构试件的尺寸和钢筋布置, 试验等更多的细节见作者发表的文献[15]。在落锤冲击过程中首先落锤与钢板接触, 将落锤重力势能转化为动能施加在打击板上, 打击板将落锤传递来的冲击力传递到橡胶垫块, 通过橡胶将集中力均匀传递到子结构柱表面, 该模拟近距离爆炸荷载加载方法已在作者发表的文献[15]中得到验证。需要注意的是, 采用模拟爆炸荷载作用于混凝土子结构柱后, 将子结构的柱直接截去, 然后对剩余双跨梁子结构进行抗倒塌分析。

根据 Jacques 等^[9]提出的柱在爆炸荷载下发生弯曲破坏和剪切破坏有效的 CFRP 加固方法, 来研究 CFRP 加固柱对爆炸荷载下对钢筋混凝土子结构 (RCS) 的影响。根据试验 RCS 1 和 RCS 3 先进行爆炸试验的损伤破坏形态, 对 RCS 4 柱纵向粘贴 1 层 CFRP 条带和环向包裹 1 层 CFRP 布加固, 来考虑对 RCS 4 柱抗剪加固。对 RCS 5 柱纵向粘贴 3 层 CFRP 条带和环向包裹 1 层 CFRP 布加固, 来考虑对 RCS 5 柱抗弯加固。此外, 在加载前对混凝土子结构柱施加的轴压比为 0.2 (等效荷载为 341.2 kN)。

2.2 材料本构关系及应变率效应

本文对爆炸荷载下混凝土子结构均采用 LS-DYNA 平台进行数值模拟分析, 同时爆炸产生的高应变率将导致混凝土、钢筋和 CFRP 材料强度的提高。因此, 在建立的数值模型中需要考虑材料的应变率效应。采用关键字 MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC (MAT_058) 来定义 CFRP 材料的压缩和拉伸强度、剪切强度、压缩和拉伸破坏应变与弹性模量。将 Zhang 等人^[20]提出的 CFRP 材料抗拉强度、弹性模量和断裂应变的动力增大系数 (DIF) 引入到数值模型中, 其计算公式分别为 (1)、(2) 和 (3)。

$$DIF_{CFRP-strength} = \begin{cases} 0.0155\log_{10}(\dot{\epsilon})+1.0508 & \dot{\epsilon}(1 \times 10^{-5}, 35] s^{-1} \\ 0.7268\log_{10}(\dot{\epsilon})-0.0476 & \dot{\epsilon}(35, 260] s^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$DIF_{CFRP-modulus} = \begin{cases} 0.0074\log_{10}(\dot{\epsilon})+1.0193 & \dot{\epsilon}(1 \times 10^{-5}, 43] s^{-1} \\ 0.7493\log_{10}(\dot{\epsilon})-0.1922 & \dot{\epsilon}(43, 260] s^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$DIF_{CFRP-failure\ strain} = \begin{cases} 0.0134\log_{10}(\dot{\epsilon})+1.0461 & \dot{\epsilon}(1 \times 10^{-5}, 43] s^{-1} \\ 0.3056\log_{10}(\dot{\epsilon})+0.5695 & \dot{\epsilon}(43, 260] s^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变率(s^{-1})。

在 LS-DYNA 中关键字 MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_072R3) 作为混凝土常用的材料模型, MAT_ADD_EROSION^[21]被用来定义混凝土的最大拉应变值 0.15 和最大剪应变值 0.9 作为失效准则。采用 CEB 模型^[22]来计算混凝土抗压和抗拉强度的应变率动力放大系数关系。钢筋的材料模型常采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003), K&C 模型^[23]被用来计算纵筋和箍筋在不同应变率条件下的动态放大系数。

2.3 单元与边界条件

在 LS-DYNA 中提供了可用于模拟爆炸荷载下 RC 结构的动力响应和抗倒塌静力分析的多种单元类型。采用 SOLID164 单元来模拟混凝土、钢板、落锤、弹簧端质量块、橡胶垫块和分配梁。梁单元 BEAM161

被用来考虑对钢筋的建模，碳纤维和钢板采用 SHELL163 壳单元进行数值模拟，弹簧采用 COMBI165 单元。同时，混凝土子结构有限元模型中的边界条件需要准确地反映试验结构在爆炸荷载下和抗倒塌静力分析中的真实场景，因而在子结构模型边柱的顶部、底部和侧面均设置刚性垫块，水平方向增设弹簧单元，并在弹簧单元的边界处设置集中质量块，如图 5 所示。需要注意的是，混凝土和钢筋单元均采用 25 mm，该网格尺寸在作者发表的文献[21]中已被验证是有效的和准确的。

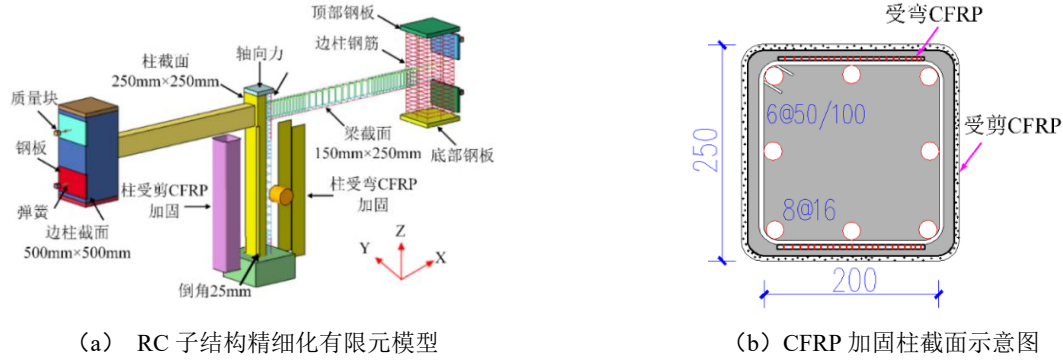


图 5 CFRP 加固混凝土子结构柱示意图

Fig. 5 Schematic diagram of CFRP reinforced concrete substructure column

在 LS-DYNA 平台将子结构边界条件分为横向边界（即 X 轴方向）、纵向边界（即 Y 轴方向）和竖向边界（即 Z 轴方向）来对子结构边界约束条件进行说明^[33]。在 X 轴方向，采用关键字 MAT_NONLINEAR_ELASTIC_DISCRETE_BEAM 来模拟边柱的水平轴向拉/压变形。采用关键字 BOUNDARY_SPC_SET_BIRTH_DEATH 来考虑边界约束条件的起始与停止加载时间。在 Y 轴方向，对混凝土子结构数值模型中在梁柱节点处建立节点集并约束其在 Y 轴方向的平动自由度。在 Z 轴方向，将子结构柱承台的所有自由度进行约束。子结构边柱顶面和底面通过共节点与钢板连接，边柱顶部钢板释放平动和转动自由度，边柱底部钢板约束绕 Z 轴方向的转动和沿 Z 轴方向的平动。需要注意的是，在 CFRP 加固柱前已将子结构柱截面的直角进行倒角处理，倒角半径为 25 mm。

2.4 模型验证

本文选取建立的 RCS 4 数值模型破坏形态和抗力位移曲线与试验子结构^[25]进行对比。图 6a 为 RCS 4 数值模型在模拟爆炸荷载下的损伤破坏形态。图 6b 显示了建立的混凝土子结构数值模型与试验混凝土子结构柱跨中的残余位移相吻合。峰值位移存在偏差的主要原因可能是因为试验中采集时间间隔设置偏大。因此，建立的 CFRP 加固子结构数值模型能够较好地预测试验结构的损伤破坏和变形。

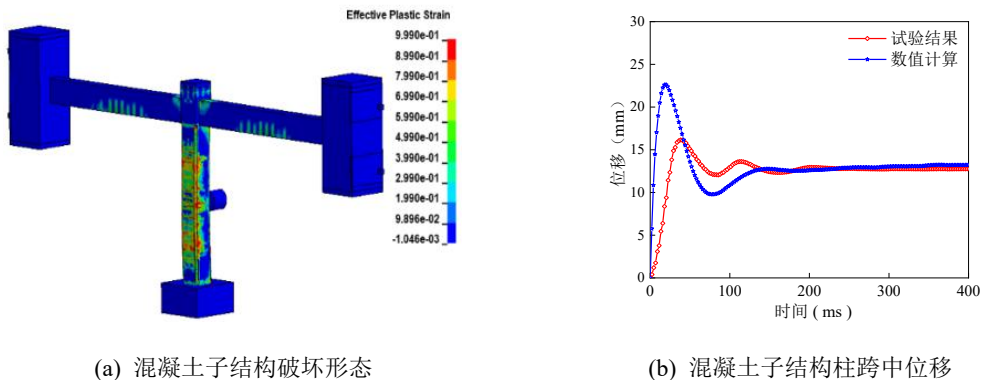


图 6 RCS 4 分析结果

Fig. 6 RCS 4 analysis results

图 7 为 CFRP 加固 RCS 4 数值模型抗力位移曲线和试验结果。根据结构竖向抗力位移曲线的发展

规律，将抗力位移曲线主要分为两个阶段，即压拱（CAA）阶段和悬链线（TCA）阶段。由图可知数值模型和试验结果在 CAA 和 TCA 阶段的抗力峰值力和失效位移分别为 47.1 kN 和 47.3 kN、81.7 kN 和 80.2 kN、486.9 mm 和 492.3 mm。对比结果表明，数值模拟结果能够准确地反映试验子结构竖向反力位移曲线中的初始刚度、承载力峰值和极限位移，同时竖向抗力位移曲线的走势也能被较好地模拟，说明建立的数值模型对试验子结构的结果分析是有效的和可靠的。

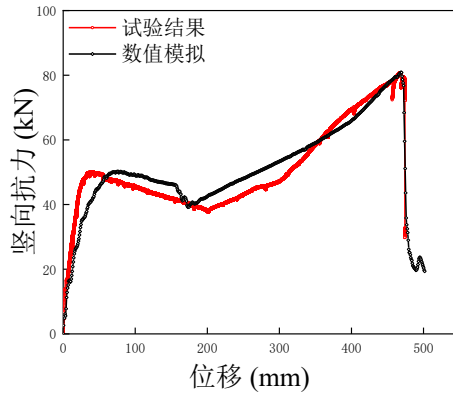
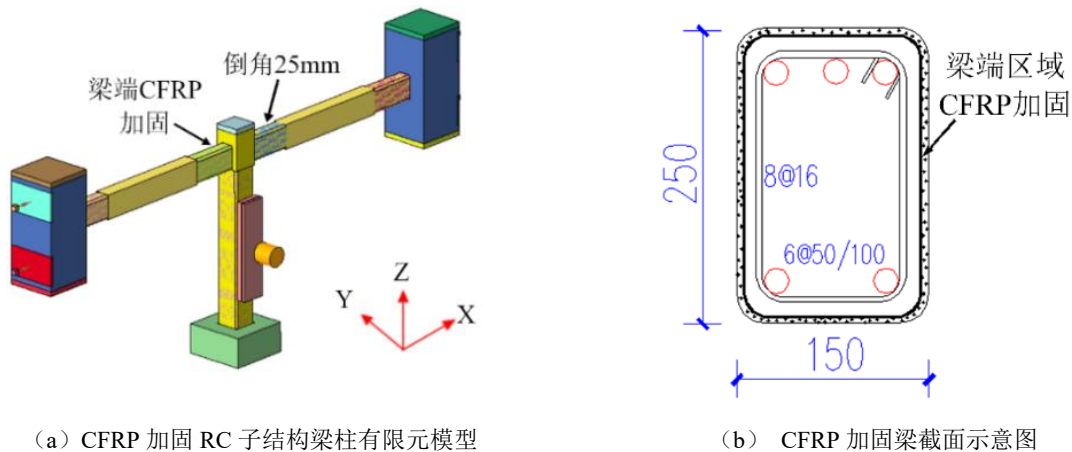


图 7 竖向抗力位移曲线[15]

Fig. 7 Vertical resistance displacement curves [15]

3 爆炸荷载下CFRP加固RC子结构抗连续倒塌性能分析

根据 Shi 和 Jiang^[15]对爆炸荷载下混凝土子结构进行连续倒塌试验分析，结果表明爆炸荷载下混凝土子结构的损伤破坏主要集中在柱和梁端塑性铰区域。为进一步揭示爆炸荷载下 CFRP 加固梁端区域对 RC 子结构抗倒塌性能退化的影响，采用上文已验证的钢筋混凝土子结构有限元模型，分别在 CFRP 加固混凝土子结构柱剪切破坏和弯曲破坏的基础上对梁端塑性铰区^[24] 500 mm 区域进行 3 层 CFRP 环向加固（分别简称：混凝土子结构剪切模型和混凝土子结构弯曲模型），用以评价 CFRP 加固对爆炸荷载下 RC 子结构连续倒塌性能的贡献，如图 8 所示。同时，每个混凝土子结构试件加载的工况，如表 1 所示。需要注意的是，根据前文计算结果，采用落锤为 1000 kg 和落锤冲击速度为 5 m/s 和 8 m/s，等效 TNT 炸药分别为当量 $m=216$ kg、比例距离为 $Z=0.3$ m/kg^{1/3} 和 TNT 炸药当量 $m=343$ kg、比例距离为 $Z=0.45$ m/kg^{1/3} 的爆炸荷载工况。



(a) CFRP 加固 RC 子结构梁柱有限元模型

(b) CFRP 加固梁截面示意图

图 8 CFRP 加固混凝土子结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of CFRP reinforced concrete substructure

表 1 试件加载条件

Tab. 1 Test specimen loading conditions

试件	加固方式	爆炸荷载类型	落锤质量(kg)	落锤高度(m)	冲击速度(m/s)
RCS 1	未加固	落锤、橡胶	1000	1.25	5
RCS 4	柱抗剪加固	落锤、橡胶	1000	1.25	5
剪切模型	梁柱加固	落锤、橡胶	1000	1.25	5
RCS 3	未加固	落锤、橡胶	1000	3.2	8
RCS 5	柱抗弯加固	落锤、橡胶	1000	3.2	8
弯曲模型	梁柱加固	落锤、橡胶	1000	3.2	8

3.1 CFRP 抗剪加固

在落锤质量为 1000 kg 和净高为 1.25 m 的条件下对 CFRP 加固子结构梁柱模型进行连续倒塌分析，获得竖向抗力中间节点位移 (MJD) 曲线，如图 9 所示。根据竖向荷载 MJD 曲线的变化特征，将其划分为 CAA 和 TCA 阶段。同时，表 2 记录了试验 RCS 1 和 RCS 4 及 CFRP 加固子结构剪切模型在各阶段关键点的竖向抗力峰值和对应的 MJD，其中包括 CAA 阶段、TCA 阶段和失效位移。

需要注意的是，在作者发表的文献[25]已说明 RCS 1 试件的破坏模式。同时，在 RCS 4 柱的最终破坏形态中未观察到 CFRP 布有撕裂的现象，表明 CFRP 布的包裹提高了柱的刚度以及 CFRP 布具有较强的抗拉能力。相比较 RCS 1 柱，在相同落锤质量和高度下 RCS 4 采用 CFRP 布加固后具有良好的抗弯曲剪切破坏的能力，说明了 CFRP 加固 RCS 4 柱的方法是有效的。

由图 9 (a) 可知，爆炸后对混凝土子结构进行抗倒塌分析，未观察到梁跨中间区域有明显的裂缝分布，同时梁端接近边柱端附近未见 CFRP 发生断裂破坏，说明 CFRP 加固梁端塑性铰区保持较好地变形能力。由图 9 (b) 可知，从开始加载试验 RCS 1 和 RCS 4 及 CFRP 加固子结构剪切模型的竖向抗力位移曲线发展趋势存在差异，这是因为爆炸后受损子结构自身的初始刚度发生退化。CFRP 加固子结构梁柱模型的斜率最大，其次是 RCS 4 和 RCS 1，这是因为 CFRP 加固混凝土子结构提高了自身的刚度。随着荷载 MJD 曲线走势继续增长，达到 CAA 阶段的峰值后开始缓慢下降。在这一阶段，结构的竖向抗力主要由梁端混凝土材料和配筋特性共同决定。其中，CFRP 加固子结构梁柱模型竖向抗力峰值最大，其分别大于 RCS 1 和 RCS 4 的 36.7 % 和 26.4 %，这是由于相同爆炸荷载下 CFRP 加固梁端增强了子结构的 CAA 效应。在 TCA 阶段，随着混凝土子结构梁的纵筋将发挥悬链线效应直到试验加载结束。由表 1 可知，RCS 4 和 RCS 1 在 TCA 阶段的竖向抗力峰值分别比 CFRP 加固子结构剪切模型抗力峰值低 5.3% 和 11.9%。这可能是因为爆炸后混凝土子结构竖向抗力主要由钢筋决定，但 CFRP 加固梁有利于钢筋和混凝土之间的咬合力从而略微增强梁的悬链线效应。此外，CFRP 加固子结构梁柱模型的失效位移为 517.7 mm，其次是 RCS 4，RCS 1 失效位移最小。

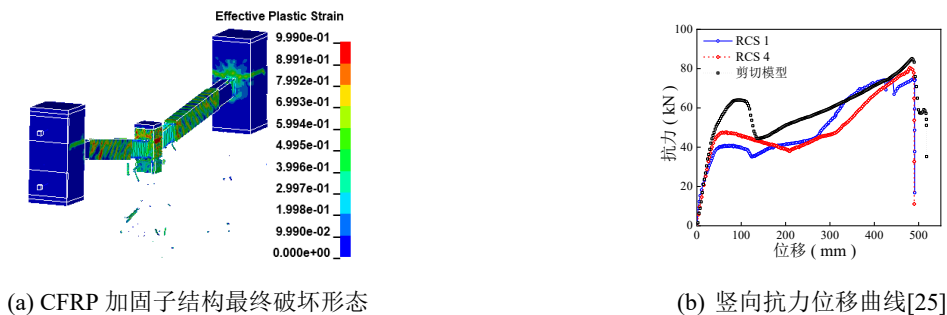


图 9 对比 CFRP 加固混凝土子结构剪切模型和试验结果

Fig. 9 Comparison shear model and test results of CFRP enhanced concrete substructure

表 2 比较竖向抗力位移曲线关键点数值

Tab. 2 Comparison the vertical resistance displacement curves at critical points value

试件	峰值荷载 (kN)		关键点位移 (mm)		位移 (mm)
	CAA	TCA	CAA	TCA	
RCS 1	40.7	74.6	71.7	478.8	491.5
RCS 4	47.3	80.2	73.2	459.2	492.3
剪切模型	64.3	84.7	84.8	485.2	517.7

3.2 CFRP 抗弯加固

在落锤以 8 m/s 的速度对 CFRP 加固子结构弯曲模型进行连续倒塌分析, 需要注意的是, 在作者发表的文献[25]已说明 RCS 3 试件的破坏模式。同时, RCS 5 柱跨中位置混凝土被拉裂, 但柱内纵筋未被拉断, 表明落锤冲击速度较大克服了 CFRP 布的抗拉强度。然而, 相比较 RCS 3 柱, 在相同落锤质量和高度下由于对 RCS 5 粘贴 CFRP 布提高了柱的约束刚度, 从而降低了柱的损伤破坏, 说明了 CFRP 加固 RCS 5 柱的方法是有效的。

由图 10 (a) 可知, 未观察到梁跨中间区域有明显的裂缝分布, 同时未观察到梁端接近边柱附近的 CFRP 出现剥离破坏, 说明 CFRP 加固能有效降低梁端塑性铰区的破坏和提高结构竖向变形的能力。图 10 (b) 显示爆炸后混凝土子结构的竖向抗力 MJD 曲线。由图可知, CFRP 加固子结构弯曲模型在 CAA 和 TCA 阶段的荷载峰值分别比 RCS 3 高 37.9% 和 16.3%。同时, CFRP 加固子结构弯曲模型在 CAA 和 TCA 阶段的荷载峰值分别比 RCS 5 高 29.1% 和 4.2%。结果表明在混凝土子结构弯曲模型利用 CFRP 加固梁可有效提高 RCS 3 和 RCS 5 的在 CAA 阶段的竖向抗力, 然而 TCA 阶段的竖向抗力略微有提高。此外, 表 3 记录了试验 RCS 3 和 RCS 5 及 CFRP 加固子结构弯曲模型在 CAA 阶段和 TCA 阶段关键点的竖向抗力峰值与失效位移。

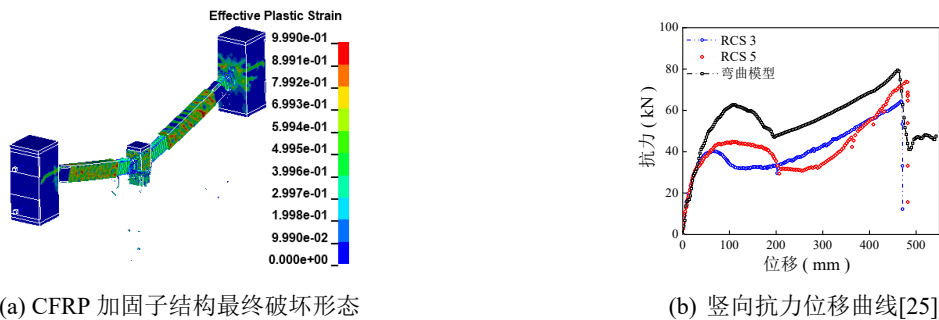


图 10 对比 CFRP 加固混凝土子结构弯曲模型和试验结果

Fig. 10 Comparison flexural model and test results of CFRP enhanced concrete substructure

表 3 比较竖向抗力位移曲线关键点数值

Tab. 3 Comparison the vertical resistance displacement curves at critical points value

试件	峰值荷载(kN)		关键点位移 (mm)		极限位移 (mm)
	CAA	TCA	CAA	TCA	
RCS 3	38.9	66.3	65.3	469.6	474.5
RCS 5	44.5	75.9	80.7	467.5	484.5
弯曲模型	62.7	79.2	108.6	464.5	492.3

3.3 CFRP 加固混凝土子结构爆炸损伤评价

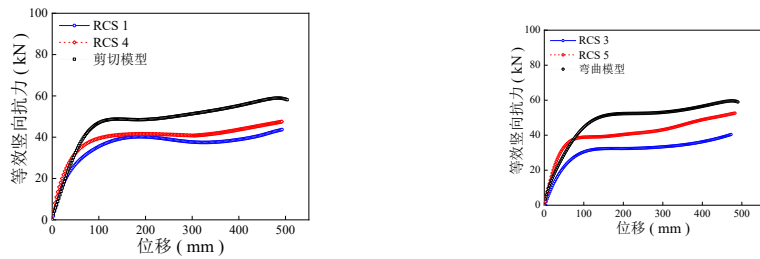
为了定量计算爆炸荷载下 CFRP 加固对混凝土子结构抗倒塌性能的贡献, 采用由 Shi 等人^[34]提出的建筑结构爆炸损伤程度 (D) 计算公式 (4), 计算 CFRP 加固混凝土子结构吸收的能量来评价对结构抗爆炸倒塌性能贡献。

$$D = 1 - \frac{F_r \times S_r}{F_u \times S_u} \quad (4)$$

式中， F_r 和 S_r 在本文中表示为爆炸荷载下未使用CFRP加固RC子结构通过静力分析得到的近似动力曲线中的等效剩余抗力和极限位移； F_u 和 S_u 分别为爆炸荷载下CFRP加固RC子结构通过静力分析得到的近似动力曲线下的等效极限抗力和极限位移。

通过未加固混凝土子结构和CFRP加固子结构柱及CFRP加固子结构数值模型得到其竖向荷载位移曲线，基于能量守恒原理便可计算出未加固混凝土子结构和CFRP加固子结构柱及CFRP加固子结构数值模型的近似动力荷载位移曲线，如图11所示。将结构竖向荷载位移曲线中的失效位移和对应其近似动力曲线中的等效竖向荷载，记录在表4中。

根据公式5可知，相比较RCS1，RCS4和CFRP加固子结构剪切模型的贡献率分别为0.262和0.383。同时，相比较试验RCS3，RCS5和CFRP加固子结构弯曲模型的贡献率分别为0.283和0.409。结果表明采用CFRP加固梁端能显著提高结构的抗倒塌能力的同时，相比较CFRP加固混凝土子结构柱，CFRP加固梁对混凝土子结构抗爆炸倒塌能力的提高更为有效。另外，相比较RCS1和RCS3，CFRP加固对剪切模型和弯曲模型抗爆炸倒塌的贡献分别提高了38.3%和40.9%。说明相比较CFRP加固剪切模型，CFRP加固弯曲模型对提高结构抗爆炸倒塌的贡献更为有效。



(a) CFRP 抗剪加固混凝土子结构 (b) CFRP 抗弯加固混凝土子结构

图 11 混凝土子结构近似动力分析

Fig. 11 CFRP reinforced concrete substructure numerical model

表 4 混凝土子结构失效位移和等效荷载

Tab. 4 Substructure failure displacement and equivalent loads

试件	RCS1	RCS4	剪切模型	RCS3	RCS5	弯曲模型
失效位移 (mm)	491.5	492.3	517.7	474.5	484.5	492.3
等效荷载 (kN)	38.5	52.1	59.2	37.2	50.8	60.7

4 结论

1) 通过调整落锤质量 (1000 kg) 和冲击速度 (1m/s 至 10m/s) 及橡胶垫块模拟作用在结构表面的冲击力和持时，揭示了模拟爆炸荷载下结构表面冲击力和持时分别呈现指数形式和线性的分布规律，建立了预测结构表面 TNT 炸药爆炸荷载的经验公式。

2) 建立的精细化有限元模型有效预测了试验CFRP加固混凝土子结构在爆炸荷载下子结构的损伤破坏形态和爆炸受损子结构的竖向抗力位移曲线，证实了建立的CFRP加固混凝土子结构有限元模型的正确性。

3) 相比较未加固混凝土子结构RCS1和RCS3，CFRP加固剪切模型和弯曲模型在CAA阶段的竖向承载力分别提高了36.7%和37.9%，同时，CFRP加固对爆炸荷载下剪切模型和弯曲模型抗倒塌性能的贡献分别提高了38.3%和40.9%。

参考文献:

- [1] Chen F, Li B, Li D, et al. Bond stress-slip relationship of CFRP bar-concrete interface of CFRP reinforced concrete subjected to reversed cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 2024, 314: 118231.
- [2] Ribeiro F, Sena C J, Branco F G, et al. Hybrid FRP jacketing for enhanced confinement of circular concrete columns in compression[J]. *Construction and Building Materials*. 2018; 184: 681-704.
- [3] 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): 341-77.
- [4] Lee C S. Modeling of FRP jacketed RC columns subject to combined axial and lateral loads [D]. California: University of California, San Diego; 2006.
- [5] Rodriguez N T, Lee C S, Hegemier G A, et al. Experimental performance of concrete columns with composite jackets under blast loading[J]. *Journal of Structural Engineering*. 2011,138: 81-89.
- [6] Hu Y, Chen L, Fang Q, et al. Study of CFRP retrofitted RC column under close-in explosion[J]. *Engineering Structures*. 2021; 227: 111431.
- [7] Heffernan P, Wight RG, Erki M A. Research on the use of FRP for critical load-bearing infrastructure in conflict zones[J]. *Journal of Composites for Construction*. 2010, 15: 136-45.
- [8] Qasrawi Y, Heffernan P J, Fam A. Performance of concrete-filled FRP tubes under field close-in blast loading[J]. *Journal of Composites for Construction*. 2014,19: 04014067.
- [9] Jacques E, Lloyd A, Imbeau P, et al. GFRP retrofitted reinforced concrete columns subjected to simulated blast loading[J]. *Journal of Structural Engineering*. 2015, 141: 04015028.
- [10] 潘金龙, 罗敏, 周甲佳. 爆炸荷载下 CFRP 加固圆柱的动力响应和破坏机理[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(9): 755-761.
Pan J L, Luo M, Zhou J J. Dynamic Responses and Failure Mechanism of Reinforced Concrete Cylindrical Column Wrapped with CFRP Under Blast Loading [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(9): 755-761.
- [11] Li Z X, Zhang X J, Shi Y C, et al. Finite element modeling of FRP retrofitted RC column against blast loading [J]. *Composite Structures*, 2021, 263: 113727.
- [12] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Abbas H, et al. Effect of blast loading on CFRP Retrofitted RC columns a numerical study[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2011, 8: 55-81.
- [13] 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.
- [14] Shin J, Jeon J S. Retrofit scheme of FRP jacketing system for blast damage mitigation of non-ductile RC building frames[J]. *Composite Structures*. 2019; 228:111328.
- [15] Shi Y C, Jiang R. Experimental investigation on progressive collapse performance of RC structures under blast loading[J]. *Structures*. 2024, 70: 107803.
- [16] Li H W, Chen W S, Hao H. Influence of drop weight geometry and interlayer on impact behavior of RC beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 222-237.
- [17] Chen W, Hao H. Experimental investigations and numerical simulations of multi-arch double-layered panels under uniform impulsive loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 140-157.
- [18] Pham T H, Hao H. Effect of the plastic hinge and boundary conditions on the impact behavior of reinforced concrete beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102: 74-85.
- [19] Pham T H, Hao H. Influence of global stiffness and equivalent model on prediction of impact response of RC beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 88-97.
- [20] Zhang X J, Li Z X, Shi Y C. Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 524-536.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Li Z X, Zhong B, Shi Y C, et al. A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2019, 10 (3): 330-358.
- [24] 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 (01): 2250008.



通讯作者：蒋认（1987—），讲师，男，博士，研究方向为钢筋混凝土结构抗爆炸连续倒塌分析。