

FRP-UHPC复合加固锈蚀RC柱抗侧向冲击性能研究

张孝朴, 刘涛, 王萌月

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年5月2日; 录用日期: 2026年5月24日; 发布日期: 2026年6月3日

摘要

在海洋等侵蚀环境中, 钢筋混凝土(RC)柱易发生钢筋锈蚀, 从而在轴压与侧向冲击耦合作用下表现出显著的性能退化。然而, 关于FRP格栅-UHPC复合加固锈蚀RC柱在冲击荷载下的动力响应及破坏机制仍缺乏系统研究。本文基于冲击试验结果, 建立并验证了未加固及FRP格栅-UHPC加固RC柱的有限元模型, 并进一步引入考虑钢筋截面削弱、黏结退化及锈胀效应的锈蚀模拟方法。系统分析了锈蚀率、加固形式、冲击速度及FRP格栅层数对构件动力响应及破坏机制的影响。结果表明: 钢筋锈蚀会加剧柱底损伤集中, 使破坏模式由弯剪主导向压剪主导转变。UHPC加固层可提高局部刚度与抗剪能力, 减轻原混凝土损伤; FRP格栅增强加固层的拉力传递能力, 从而提高整体协同受力及耗能能力。与单独UHPC加固相比, FRP格栅-UHPC复合加固可使构件总内能提高约8%。随着冲击速度增加, 损伤范围扩大且峰值与残余位移增大; 增加FRP层数虽能改善变形控制能力, 但对总耗能提升有限。研究成果可为侵蚀环境中RC柱抗冲击性能评估及加固设计提供参考。

关键词

锈蚀RC柱, FRP格栅-UHPC复合加固, 冲击性能, 破坏机制

Study on the Lateral Impact Resistance of Corroded RC Columns Strengthened with FRP-UHPC Composite

Xiaopu Zhang, Tao Liu, Mengyue Wang

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: May 2, 2026; accepted: May 24, 2026; published: June 3, 2026

Abstract

In corrosive environments such as marine regions, reinforced concrete (RC) columns are susceptible to reinforcement corrosion, which results in significant deterioration in structural performance under the coupled action of axial compression and lateral impact loading. However, systematic studies on the dynamic response and failure mechanisms of corroded RC columns strengthened with FRP grid-UHPC composites under impact loading remain limited. Based on impact test results, finite element (FE) models of unstrengthened and FRP grid-UHPC strengthened RC columns were established and validated in this study. A corrosion simulation approach considering reinforcement cross-sectional reduction, bond degradation, and rust expansion effects was further incorporated into the FE models. The effects of corrosion rate, strengthening scheme, impact velocity, and number of FRP grid layers on the dynamic response and failure mechanisms of the specimens were systematically investigated. The results indicate that reinforcement corrosion aggravates damage concentration at the column base, causing the failure mode to shift from flexure-shear dominated failure to compression-shear dominated failure. The UHPC strengthening layer enhances local stiffness and shear resistance, thereby mitigating damage to the original concrete. Moreover, the FRP grid enhances the tensile force transfer capacity of the strengthening layer, thereby improving the overall composite action and energy dissipation capacity. Compared with UHPC strengthening alone, FRP grid-UHPC composite strengthening increases the total internal energy of the member by approximately 8%. With increasing impact velocity, the damage region expands, and both peak and residual displacements increase significantly. Increasing the number of FRP grid layers improves deformation control capability, although its contribution to the enhancement of total energy dissipation is limited. The findings of this study can provide a reference for the impact resistance assessment and strengthening design of RC columns in corrosive environments.

Keywords

Corroded RC Columns, FRP Grid-UHPC Composite Strengthening, Impact Performance, Failure Mechanism

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

海洋、盐雾及除冰盐等侵蚀环境下的钢筋混凝土(RC)柱和桥墩易受到氯盐侵蚀作用,导致钢筋截面削弱、力学性能降低、锈胀开裂以及钢筋与混凝土黏结退化[1]-[3]。锈蚀导致的性能退化不仅削弱 RC 构件的耐久性和承载能力,还会破坏钢筋与混凝土之间的黏结性能,降低构件整体协同受力性能[4][5]。近年来,车辆碰撞、船舶撞击等偶然侧向冲击作用已成为影响桥墩服役安全的重要因素,RC 柱在冲击作用下易出现局部混凝土压碎、斜裂缝快速扩展及弯剪耦合破坏[6]-[8]。因此,亟需提出有效的加固方法,以改善锈蚀 RC 柱在侧向冲击作用下的抗冲击性能。

作为竖向承重构件,RC 柱在服役状态下通常承受轴向压力,其侧向冲击响应受冲击质量与速度、轴压水平、配箍率、边界条件及构件尺寸等因素共同影响[9]-[11]。轴向压力会改变柱底受压区应力水平和冲击损伤演化路径,使 RC 柱呈现复杂的压弯剪耦合破坏特征[12][13]。然而,现有研究多以完好 RC 柱为对象,对锈蚀 RC 柱在轴压与侧向冲击耦合作用下的动力性能退化和破坏机制仍缺乏系统认识[14]-[16]。

为提高 RC 结构的抗冲击性能, 外贴钢板和粘贴 FRP 片材等加固方式广泛应用于 RC 构件加固[17]-[19]。而外贴钢板在腐蚀环境下易发生二次锈蚀[20], 而 FRP 板会出现粘结剂老化现象[21]。UHPC 具有高抗压强度、高韧性、良好的裂缝控制能力, 已被用于 RC 构件修复和加固。然而仅 UHPC 加固在冲击作用下会出现拉伸开裂[22]-[24]。因此, 将 FRP 格栅嵌入 UHPC 层, 可同时发挥 UHPC 的高强、高韧和耐久性优势以及 FRP 格栅的抗拉、抗裂和约束作用, 从而改善加固层的协同受力能力。现有研究表明 FRP 格栅-UHPC 复合加固体系能够改善 RC 柱的抗冲击性能[25], 但对锈蚀 RC 柱在轴压与侧向冲击共同作用下的加固效果和损伤机制仍关注不足。

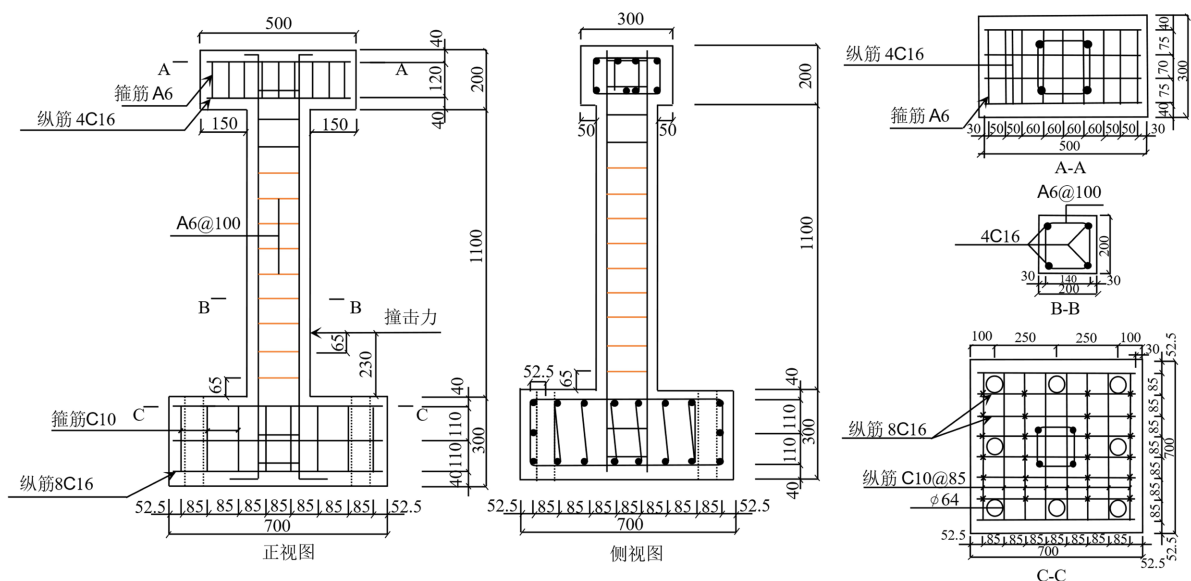
基于上述背景, 本文研究 FRP 格栅-UHPC 复合加固锈蚀 RC 柱在轴压与侧向冲击作用下的动力响应及损伤机制。首先, 基于现有冲击试验研究, 采用 LS-DYNA 建立并验证未加固及 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱有限元模型。随后, 在验证模型中进一步加入锈蚀模拟, 分析复合加固锈蚀 RC 柱的冲击破坏机制; 最后研究了冲击速度和格栅层数参数对冲击行为的影响。

2. 有限元模型建立与验证

本研究基于未加固 RC 柱和 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱在轴压作用下的侧向冲击试验, 分别建立相应有限元模型, 具体建模方法见第 2.2 节。通过冲击力时程、侧向位移时程及破坏形态对比, 验证了有限元模型的可靠性。在此基础上, 引入钢筋锈蚀效应及 NC-UHPC 界面黏结参数, 建立 FRP 格栅-UHPC 复合加固锈蚀 RC 柱有限元模型。

2.1. 试验概括

试件均为方形截面 RC 柱, 柱身截面尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 柱高为 1100 mm , 柱底和柱顶设置扩大端部构件, 以满足加载传力和边界约束要求。柱身配置 4 根直径 20 mm 的纵向钢筋, 箍筋直径为 6 mm 、间距为 100 mm , 保护层厚度为 30 mm , 配筋形式如图 1(a)所示。加固试件在柱底易损区域设置 FRP 格栅-UHPC 复合加固层, 以提高局部刚度、抗压能力和抗裂性能。试验时, 先对试件施加预定轴向压力, 再通过摆锤系统施加侧向冲击荷载, 并记录冲击力、侧向位移和破坏形态, 试验装置如图 1(b)所示。



(a) 试件配筋详图

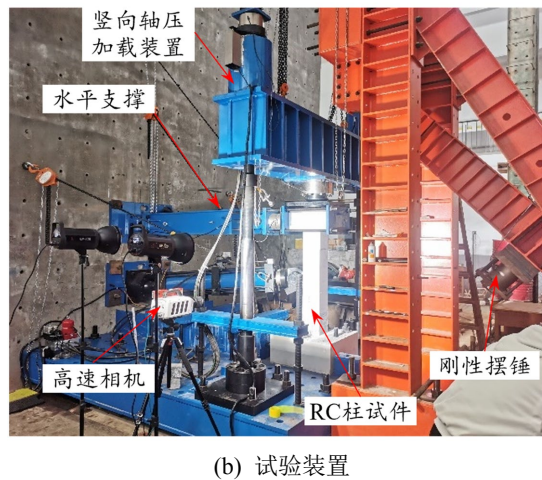


Figure 1. Detailed reinforcement of specimens and experimental setup
图 1. 试件配筋详图和试验装置

2.2. 有限元模型的建立

2.2.1. 几何模型

根据未加固 RC 柱在轴压作用下的侧向冲击试验，建立相应有限元模型。未加固柱有限元模型如图 2(a)所示。在此基础上，结合 FRP 格栅-UHPC 复合加固方案，建立加固 RC 柱侧向冲击有限元模型，如图 2(b)所示。未加固柱和加固柱的几何尺寸、钢筋布置及边界条件均与试验试件保持一致。建模过程中采用了以下简化假设：1) 摆锤装置根据试验装置进行等效简化建模，锤头采用实体单元模拟，其质量通过调整材料密度确定，并通过赋予摆锤初始角速度来实现冲击加载；2) 轴向压力通过柱顶轴压装置施加，柱底基座按试验约束条件固定，以模拟 RC 柱在轴压作用下的侧向冲击过程；3) 纵向钢筋和箍筋均按实际位置布置。模型验证阶段，钢筋与混凝土采用完全黏结处理；在后续锈蚀模型中，则进一步通过黏结-滑移关系考虑纵筋锈蚀引起的黏结性能退化。4) 对于 FRP-UHPC 加固柱，在柱底 600 mm 高度范围内设置 UHPC 加固层，并将 FRP 格栅嵌入 UHPC 层中，用于提高加固区的抗拉和抗裂能力。

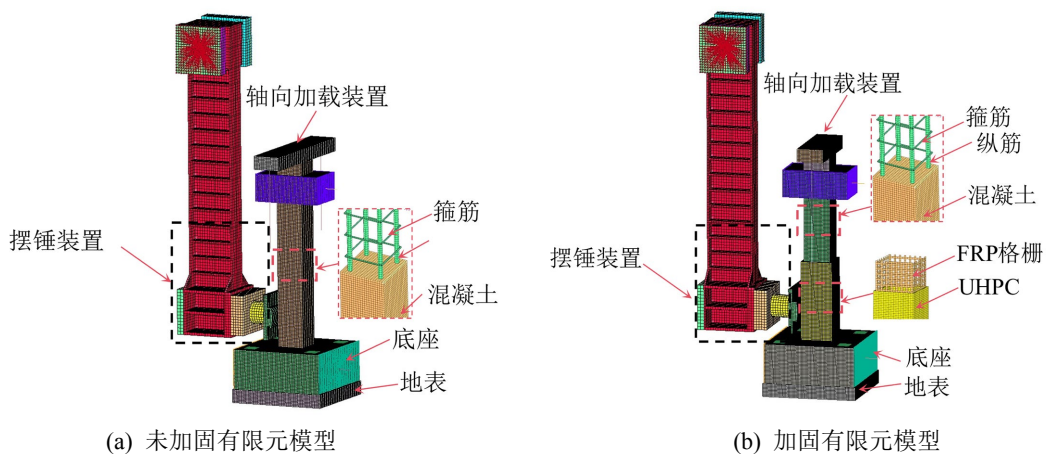


Figure 2. Finite element model of RC columns
图 2. RC 柱有限元模型

摆锤和基座采用单点积分实体单元 SOLID164 建模，纵向钢筋、箍筋及锚固螺栓采用梁单元 BEAM161

模拟。轴向加载构件和地面边界采用弹性体等效处理，以在降低模型复杂度的同时保证荷载传递路径的合理性。试件及锤头接触区域采用 10 mm 均匀网格，以提高冲击接触和局部应力集中区域的计算精度；其余区域根据几何尺寸和受力特征适当放大网格尺寸，以提高计算效率。

2.2.2. 材料模型

普通混凝土与 UHPC 采用 MAT_CSCM 混凝土模型进行模拟，自定义参数见表 1 与表 2 所示。钢筋和箍筋采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 模型进行模拟，CFRP 格栅采用 *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 模型进行模拟。摆锤采用 *MAT_ELASTIC 模型，支座采用 MAT_CSCM 模型与混凝土完全粘结。

Table 1. Concrete material model

表 1. 混凝土材料模型

MID	R0	NPLOT	INCR	IRATE	ERODE	RECOV	ITRETRC
1	2.50e-9	1	0	1	1.1	0.9	0
PRED							
0							
G	K	ALPHA	THETA	LAMDA	BETA	NH	CH
11035.0	14713.0	10.2	0.3460	4.777	0.045	1.0	0.0
ALPHA1	THETA1	LAMDA1	BETA1	ALPHA2	THETA2	LAMDA2	BETA2
0.82	0	0.2407	0.0100	0.76	0.0	0.26	0
R	X0	W	D1	D2			
2.16	87.0	0.065	6.11E-4	2.225E-6			
B	GFC	D	GFT	GFS	PWRC	PWRT	PMOD
100.0	12.5	0.1	0.833	0.833	5.0	1.0	0.0
ETAOC	NC	ETAOT	NT	OVERC	OVERT	SRATE	REPOW
1.440E-4	0.78	9.650E-6	0.36	28.6	28.6	1.0	1.0

2.2.3. 接触算法与锈蚀模拟

在有限元模型中，采用 *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE 定义摆锤等效转动轴，使摆锤仅绕试验旋转轴发生转动。柱底基座底面周边节点通过 *BOUNDARY_SPC_SET 施加全约束，以模拟试验中的地面支承条件。考虑纵向锚固螺栓对基座的夹紧作用，采用 *INITIAL_BEAM_STRESS 对螺杆施加 13 kN 初始轴向力。未锈蚀试件中钢筋与混凝土采用 *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID 进行完全黏结处理。摆锤与试件、试件与地面及试件与轴向加载装置之间的接触均采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 定义，静、动摩擦系数均取 0.3。

根据设定锈蚀率，对柱底纵向钢筋的直径和强度进行折减(2.1)和(2.2)，以考虑钢筋截面损失及力学性能退化。同时，采用 *CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION 和 *LOAD_SEGMENT_SET 对钢筋周围混凝土施加均匀锈胀应力[26](2.3~2.5)，以模拟锈蚀产物膨胀引起的初始损伤，如图 3 所示。为考虑锈蚀导致的黏结退化，结合 *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID 和 *DEFINE_FUNCTION 定义柱底纵筋与混凝土之间的黏结-滑移关系(2.6~2.10)，具体方法见文献[26]-[28]，锈蚀模拟方法已在文献[29]中进行了系统验证，本文不再重复其验证过程。NC-UHPC 界面采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK

模拟，其失效由法向抗拉强度 δ_0 (NFLS)和切向抗剪强度 τ_0 (SFLS)控制。本文将 UHPC-NC 界面平均抗拉强度和抗剪强度分别取为 1.67MPa 和 5.59 Mpa [23]，用于定义 NC-UHPC 失效接触模型中的法向和切向强度参数，基于该参数的界面模型可较好地模拟 UHPC-NC 界面黏结行为[29]。

Table 2. UHPC material model

表 2. UHPC 材料模型

MID	R0	NPLOT	INCRE	IRATE	ERODE	RECOV	ITRETRC
2	2.50e-9	1	0	1	1.05	0.9	0
PRED							
0							
G	K	ALPHA	THETA	LAMDA	BETA	NH	CH
15339.0	20452.0	24.73	0.3323	16.44	0.01330	1.0	0.0
ALPHA1	THETA1	LAMDA1	BETA1	ALPHA2	THETA2	LAMDA2	BETA2
0.82	0	0.2407	0.0058	0.76	0.0	0.26	0.0051
R	X0	W	D1	D2			
1.96	150.0	0.065	6.1100E-4	2.22500E-6			
B	GFC	D	GFT	GFS	PWRC	PWRT	PMOD
100.0	15.5	0.1	0.833	0.833	5.0	1.0	0.0
ETAOC	NC	ETAOT	NT	OVERC	OVERT	SRATE	REPOW
5.7400E-4	0.78	7.67000E-6	0.36	58.13	58.13	1.0	1.0

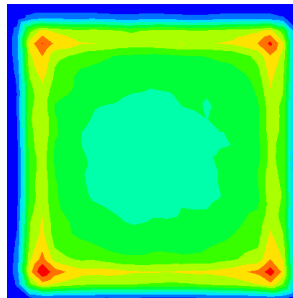


Figure 3. Schematic diagram of rust expansion stress application

图 3. 锈胀应力施加示意图

$$\eta = 1 - \frac{d_c^2}{d_0^2} \quad (2.1)$$

$$f_{yc} = (1 - 0.5\eta) f_{y0} \quad (2.2)$$

式中： η 为锈蚀率， d_0 为钢筋初始直径； d_c 为钢筋锈蚀后的直径， f_{y0} 和 f_{yc} 分别代表钢筋初始屈服应力以及锈蚀后的屈服应力。

$$q = \frac{E_r (1 - \nu_r) r_c^2 + (1 + \nu_r) r_1^2}{r_1 (1 - \nu_r^2) (r_1^2 - r_c^2)} \cdot u \quad (2.3)$$

$$r_1 = r_0 \sqrt{1 + (n-1)\eta} \quad (2.4)$$

$$u = \frac{r_0(n-1)\eta}{2} - \delta \quad (2.5)$$

式中： r_0 、 r_c 分别为钢筋初始半径与锈蚀后剩余半径； E_r 、 ν_r 为钢筋锈蚀产物的弹性模量与泊松比，分别取 15 MPa 和 0.47； n 为锈蚀产物膨胀比，取 3.0； δ 为钢筋与混凝土界面过渡区厚度，取值为 12.5 μm 。

$$\tau = \begin{cases} s \times G, & s \leq s_u \\ 0, & s > s_u \end{cases} \quad (2.6)$$

$$G = 0.0253\varepsilon + 6.15 \quad (2.7)$$

$$\tau_u = 0.081\varepsilon + 52.192 \quad (2.8)$$

$$s_u = \frac{\tau_u}{G} \quad (2.9)$$

其中： τ 为粘结应力； G 为粘结剪切模量； s 为钢筋与混凝土之间的滑移量； τ_u 和 s_u 分别为粘结破坏的极限应力与极限滑移量。

Liu 等[26]提出高应变率下锈蚀钢筋与混凝土粘结退化提出的折减系数 k_c ：

$$k_c = \begin{cases} 1 & \eta = 0\% \\ 1 - 3.637\eta - 0.0015\varepsilon & \eta > 0\% \end{cases} \quad (2.10)$$

随着锈蚀程度与应变率的提升，锈蚀钢筋与混凝土之间的动态粘结应力呈现显著退化趋势。其主要原因在于，较高的锈蚀程度会引发更为严重的锈胀损伤与内部裂缝，使得结构在高应变率动态荷载作用下，更易发生由混凝土劈裂所主导的粘结失效破坏。

2.3. 模型验证

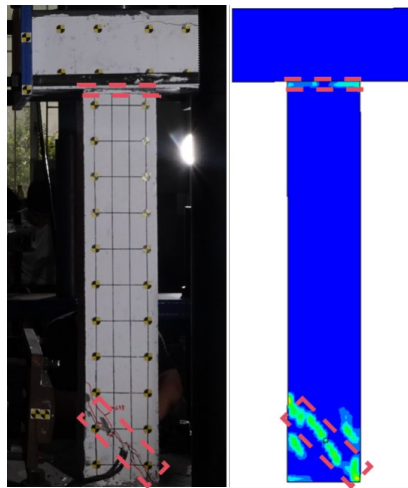
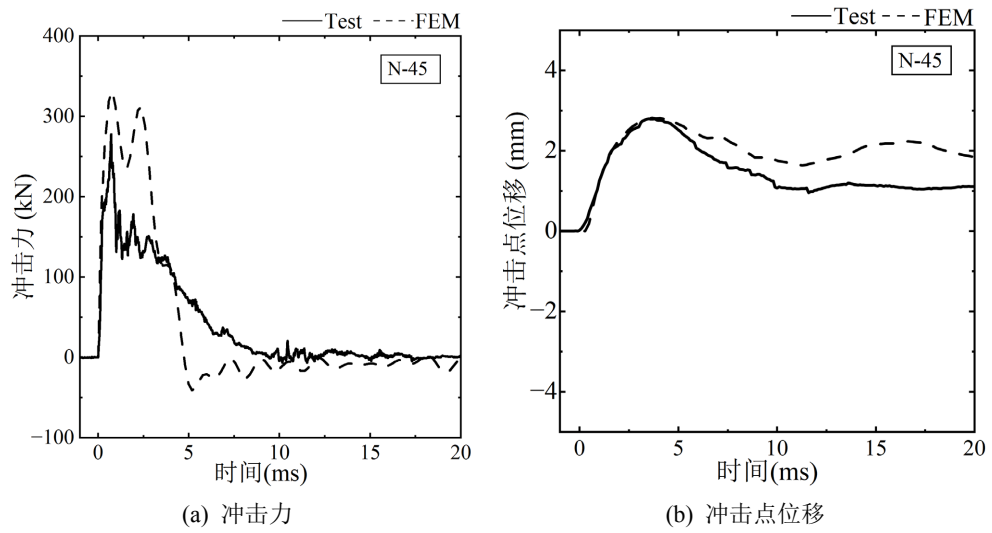
本文对 45°冲击工况下的未加固试件与加固试件进行验证。其中，N-45 表示 45°冲击条件下的未加固试件，N-R-45 表示 45°冲击条件下的加固试件。

2.3.1. 未加固 RC 柱有限元验证

如图 4 所示，本文从冲击力时程、冲击点位移时程和破坏形态三个方面对有限元结果与试验结果进行对比。图 4(a)表明，试验与模拟的冲击力时程均表现出冲击初期快速上升、达到峰值后迅速衰减并趋于稳定的特征，说明模型能够较好地捕捉冲击接触阶段的受力过程；数值峰值略高于试验值，可能与材料均匀化假定及接触区局部刚度偏大有关。由图 4(b)可见，有限元结果与试验结果在峰值出现时刻、变化趋势和峰值大小方面吻合较好，表明模型能够较准确地预测构件整体变形响应。图 4(c)显示，试验裂缝主要集中于柱底受冲击区域并呈斜向扩展，有限元高损伤区同样集中于柱底危险截面，损伤分布与裂缝发展趋势基本一致。综上，所建立模型可较合理地模拟未加固 RC 柱在冲击荷载作用下的动力响应和损伤演化。

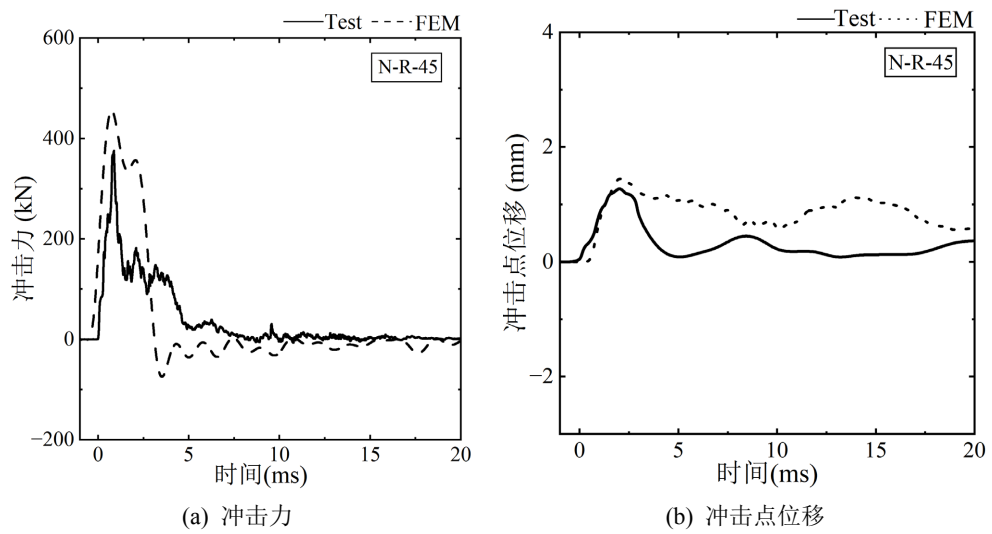
2.3.2. 加固 RC 柱有限元验证

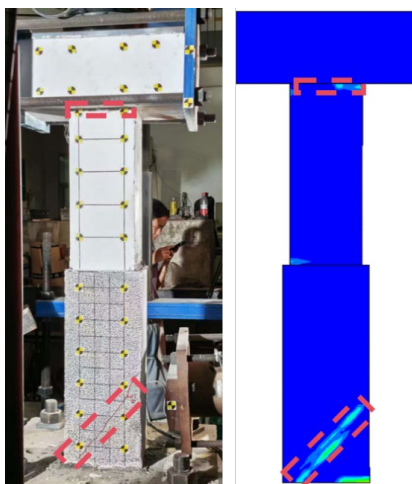
如图 5 所示，本文从冲击力时程、冲击点位移时程和破坏形态三个方面验证 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱有限元模型的合理性。图 5(a)表明，试验与模拟的冲击力时程均呈现冲击初期快速上升、达到峰值后迅速衰减并趋于稳定的特征，说明模型能够较好地模拟加固构件的冲击接触过程。由图 5(b)可见，有限元结果与试验结果在峰值出现时刻及整体变化趋势上吻合较好，表明模型能够较准确地预测加固 RC 柱的侧向变形响应。图 5(c)显示，试验中损伤主要集中于柱底加固区附近，裂缝呈斜向发展；有限元高损伤区同样集中于柱底加固区，损伤带方向与试验裂缝扩展趋势基本一致。综上，所建立模型能够较合理地反映 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱在冲击荷载作用下的动力响应和损伤演化。



(c) 混凝土损伤

Figure 4. Comparative analysis of RC columns
图 4. RC 柱对比分析





(c) 混凝土损伤

Figure 5. Comparative analysis of FRP-UHPC strengthened RC columns
图 5. FRP-UHPC 加固 RC 柱对比

综上所述,所建立的 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱有限元模型能够较准确地预测构件在冲击荷载作用下的动力响应和损伤特征,为后续锈蚀加固 RC 柱抗冲击性能分析提供了可靠基础。

3. 冲击作用下锈蚀柱的破坏机理分析

基于已验证的有限元模型,本节进一步引入钢筋锈蚀模拟方法,建立锈蚀 RC 柱及其加固模型,并分析钢筋锈蚀和加固方式对 RC 柱冲击破坏机制的影响。选取 C0-A0.1、C20-A0.1、C20-U-A0.1 和 C20-GU-A0.1 四种典型工况进行对比,其中 C0 和 C20 分别表示纵向钢筋锈蚀率为 0%和 20%,A0.1 表示轴压比为 0.1,U 和 GU 分别表示 UHPC 加固和 FRP 格栅-UHPC 复合加固。后续从损伤模式、位移响应及能量耗散等方面,揭示钢筋锈蚀对 RC 柱抗冲击性能的劣化作用及 FRP 格栅-UHPC 复合加固的改善机制。

3.1. 损伤模式

由图 6 可见,四种工况的损伤均主要集中于柱底区域,表明柱底是轴压与侧向冲击共同作用下的关键危险部位。不同工况下柱底损伤范围、损伤程度及内部混凝土斜向损伤带存在明显差异,说明钢筋锈蚀、UHPC 加固层和 FRP 格栅均会影响 RC 柱的冲击破坏模式。

对比 C0-A0.1 和 C20-A0.1 可知,钢筋锈蚀后柱底高损伤区明显扩大,并向柱身上部发展,内部混凝土斜向损伤带更加明显,表明锈蚀使构件破坏由局部弯剪损伤向更明显的压剪损伤发展。这主要是由于锈蚀导致纵筋截面削弱、钢筋与混凝土黏结退化及锈胀损伤,从而降低柱底区域的抗弯与抗剪能力;同时轴压作用提高了柱底受压区应力水平,进一步强化了压剪破坏特征。

对比 C20-A0.1 和 C20-U-A0.1 可见,设置 UHPC 加固层后,柱底高损伤区明显减小,损伤向上扩展受到抑制,说明 UHPC 加固层可提高柱底区域的局部刚度和抗剪能力,并促使冲击荷载在加固层与原 RC 基体之间重新分配,从而减轻原构件损伤。但内部混凝土仍存在斜向损伤带,表明单一 UHPC 加固下压剪损伤仍未完全消除。进一步对比 C20-U-A0.1 和 C20-GU-A0.1 可知,配置 FRP 格栅后,外部高损伤区和内部斜向损伤带均进一步减轻,损伤主要局限于柱底危险区。说明 FRP 格栅能够约束 UHPC 裂缝发展,延缓加固层刚度退化,并增强加固层与原 RC 柱之间的协同传力作用,从而提高构件抗冲击性能。

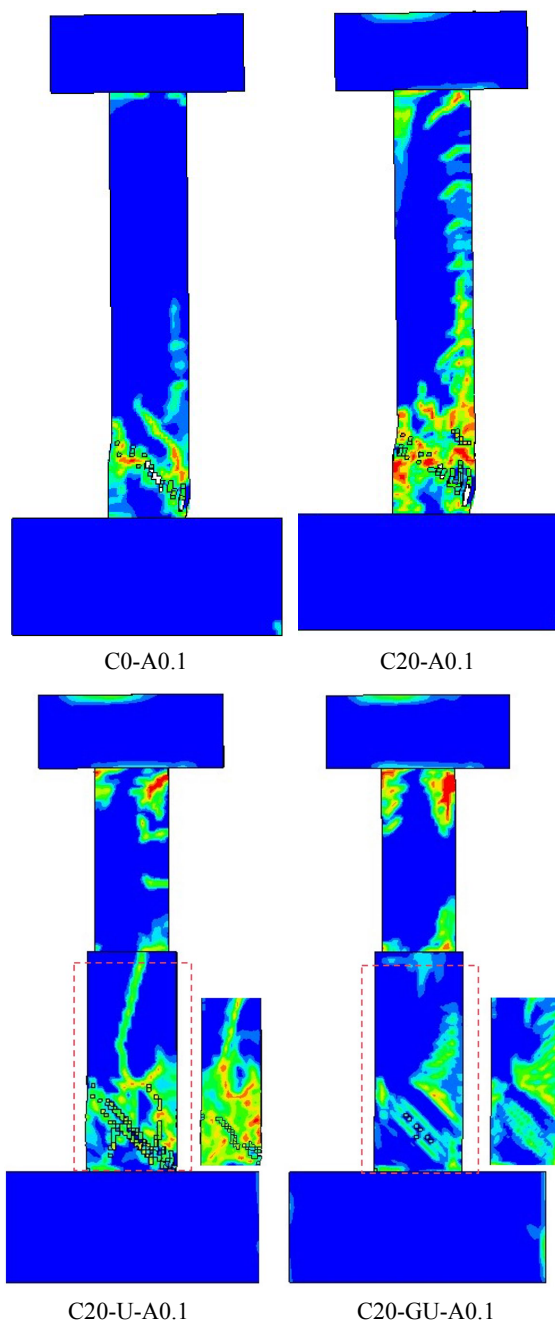


Figure 6. Damage modes of specimens under different loading conditions
图 6. 不同工况下试件的损伤模式

3.2. 位移响应

图 7 给出了四种工况下的冲击点位移时程曲线。各工况位移响应均表现为冲击后迅速增大、达到峰值后回弹并逐渐稳定的特征，但峰值位移和残余位移差异明显，说明钢筋锈蚀和加固方式对 RC 柱冲击变形响应具有显著影响。

与 C0-A0.1 相比，C20-A0.1 的峰值位移和残余位移均明显增大，表明钢筋锈蚀降低了构件整体刚度和变形恢复能力，使冲击后不可恢复变形增加。其主要原因在于，锈蚀导致纵筋截面削弱、钢筋与混凝

土黏结退化及初始损伤发展,从而削弱构件抗侧向变形能力。与 C20-A0.1 相比, C20-U-A0.1 和 C20-GU-A0.1 的峰值位移和残余位移均明显降低,说明加固层可有效限制柱底部局部变形并改善构件冲击后恢复能力。进一步对比可知,配置 FRP 格栅后位移响应继续减小,表明 FRP 格栅能够约束 UHPC 裂缝发展,延缓加固层刚度退化,并增强加固层与原 RC 柱之间的协调变形能力。总体来看,FRP-UHPC 复合加固可有效改善锈蚀 RC 柱的冲击变形响应。

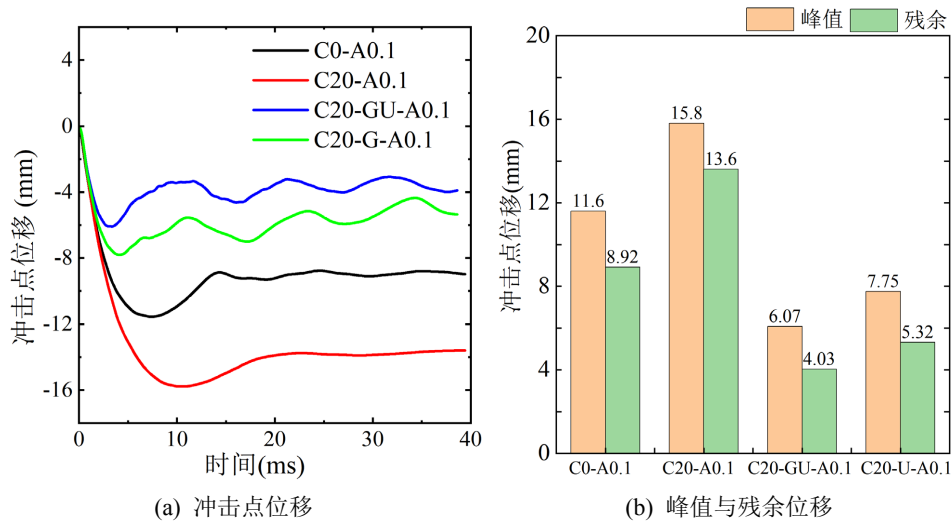


Figure 7. Displacement responses under impact loading
图 7. 冲击作用下的位移响应

3.3. 能量耗散

图 8 给出了不同工况下构件总内能及各组分耗能分配。C0-A0.1 和 C20-A0.1 的总内能分别为 4.34 kJ 和 4.29 kJ, 差异较小, 表明 20% 锈蚀率对构件总耗能影响有限, 但会改变内部耗能分配。与未锈蚀构件相比, C20-A0.1 中普通混凝土耗能增加、钢筋耗能降低。这主要是由于钢筋锈蚀削弱了纵筋有效截面和钢筋与混凝土黏结性能, 降低了钢筋传力与耗能能力, 使冲击能量更多通过柱底混凝土开裂和压碎耗散。

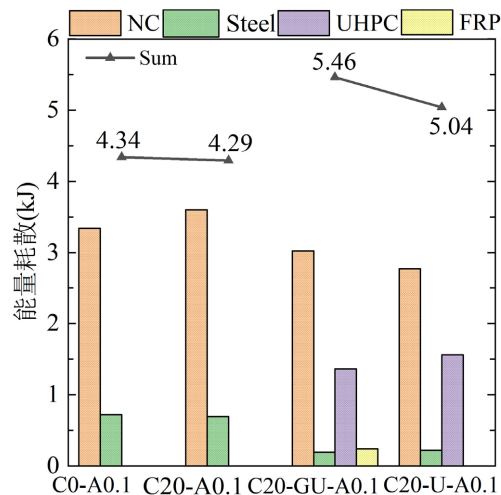


Figure 8. Energy dissipation of each component and total energy under impact loading
图 8. 各组成部分的能量耗散及其总和

与 C20-A0.1 相比, 设置加固层后构件总内能明显提高, 其中 C20-U-A0.1 和 C20-GU-A0.1 的总内能分别为 5.04 kJ 和 5.46 kJ, 表明加固层提高了锈蚀 RC 柱的冲击耗能能力。其原因在于 UHPC 加固层提高了柱底局部刚度和抗剪能力, 使冲击能量由原 RC 基体单独耗散转变为原构件与加固层共同耗散。进一步对比可知, FRP-UHPC 复合加固总内能较 UHPC 单独加固提高约 8%。这是由于 FRP 格栅可约束 UHPC 裂缝发展, 并在 UHPC 开裂后继续参与拉力传递, 从而改善 UHPC、FRP 与原 RC 柱之间的协同耗能机制。

4. 结论

本文建立了 FRP 格栅-UHPC 复合加固锈蚀 RC 柱在轴压与侧向冲击作用下的有限元模型, 并分析了钢筋锈蚀、加固方式、冲击速度及 FRP 格栅层数对构件冲击响应和损伤机制的影响。主要结论如下:

1) 所建立的有限元模型能够较好地预测未加固及 FRP 格栅-UHPC 加固 RC 柱在侧向冲击下的动力响应和破坏模式。数值结果与试验结果在冲击力、位移响应及损伤形态方面吻合较好, 验证了模型用于锈蚀加固 RC 柱抗冲击性能分析的可靠性。

2) 钢筋锈蚀显著削弱 RC 柱的抗冲击性能。锈蚀后柱底高损伤区扩大, 内部斜向损伤加剧, 破坏模式由局部弯剪损伤向压剪损伤发展。同时, 锈蚀降低了构件局部接触刚度和剪力传递能力, 导致峰值位移和残余位移增大。

3) FRP 格栅-UHPC 复合加固可有效改善锈蚀 RC 柱的冲击响应和耗能机制。UHPC 加固层提高了柱底局部刚度和抗剪能力, 分担部分冲击能量并减轻原 RC 基体损伤; FRP 格栅进一步约束 UHPC 裂缝发展, 增强加固层与原构件的协同受力和耗能作用, 与 UHPC 单独加固相比, FRP-UHPC 复合加固构件总耗能提高约 8%。

基金项目

湖南省研究生科研创新项目资助(CX20240865), 湖南省自然科学基金(2024JJ9066)。

参考文献

- [1] Syll, A.S. and Kanakubo, T. (2022) Impact of Corrosion on the Bond Strength between Concrete and Rebar: A Systematic Review. *Materials*, **15**, Article 7016. <https://doi.org/10.3390/ma15197016>
- [2] Ali, M., Shams, M.A., Bheel, N., Almaliki, A.H., Mahmoud, A.S., Dodo, Y.A., et al. (2024) A Review on Chloride Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures: Lab and *in Situ* Investigation. *RSC Advances*, **14**, 37252-37271. <https://doi.org/10.1039/d4ra05506c>
- [3] Bajić, P., Leporace-Guimil, B., Andrade, C., Tošić, N. and de la Fuente, A. (2025) Chloride-Induced Corrosion Effects on the Structural Performance of Concrete with Rebar and Fibres: A Review. *Applied Sciences*, **15**, Article 6457. <https://doi.org/10.3390/app15126457>
- [4] Aminulai, H.O., Robinson, A.F., Ferguson, N.S. and Kashani, M.M. (2023) Impact of Corrosion on Axial Load Capacity of Ageing Low-Strength Reinforced Concrete Columns with Different Confinement Ratios. *Construction and Building Materials*, **384**, Article ID: 131355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131355>
- [5] Matthews, B., Palermo, A. and Scott, A. (2023) Overview of the Cyclic Response of Reinforced Concrete Members Subjected to Artificial Chloride-Induced Corrosion. *Structural Concrete*, **24**, 100-114. <https://doi.org/10.1002/suco.202200365>
- [6] Chen, A., Liu, Y., Ma, R. and Zhou, X. (2023) Experimental and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Columns under Lateral Impact Loading. *Buildings*, **13**, Article 708. <https://doi.org/10.3390/buildings13030708>
- [7] Fu, J., Wang, W., Wang, X., Zhao, W., Zhou, R. and Lu, Z. (2024) Fragility Assessment of RC Bridge Piers Subjected to Vehicle Collision Based on Residual Load-Bearing Capacity. *Structures*, **68**, Article ID: 107103. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107103>
- [8] Jiang, J. and Sorensen, A.D. (2025) Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Bridge Piers under Sequential Vehicle Impact and Seismic Loads: Case Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*

- Board*, **2679**, 430-448. <https://doi.org/10.1177/03611981251342232>
- [9] Sun, J., Chen, H., Yi, F., Ding, Y., Zhou, Y., He, Q., *et al.* (2024) Experimental and Numerical Study on Influence of Impact Mass and Velocity on Failure Mode of RC Columns under Lateral Impact. *Engineering Structures*, **314**, Article ID: 118416. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118416>
- [10] Yilmaz, T., Kiraç, N. and Anil, Ö. (2019) Experimental Investigation of Axially Loaded Reinforced Concrete Square Column Subjected to Lateral Low-Velocity Impact Loading. *Structural Concrete*, **20**, 1358-1378. <https://doi.org/10.1002/suco.201800276>
- [11] Zhao, W. and Qian, J. (2020) Resistance Mechanism and Reliability Analysis of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral Impact. *International Journal of Impact Engineering*, **136**, Article ID: 103413. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103413>
- [12] Jia, P.C., Wu, H., Peng, Q. and Ma, L.L. (2024) Dynamic Behaviors of Eccentrically Loaded RC Column under Lateral Low-Velocity Impact. *Engineering Structures*, **309**, Article ID: 118031. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118031>
- [13] Sun, J., Yi, W., Chen, H., Peng, F., Zhou, Y. and Zhang, W. (2023) Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. *Journal of Structural Engineering*, **149**, 1-18. <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-11612>
- [14] Zhang, C., Gholipour, G. and Mousavi, A.A. (2021) State-Of-The-Art Review on Responses of RC Structures Subjected to Lateral Impact Loads. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **28**, 2477-2507. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09467-5>
- [15] Xu, X., Zhang, H., Du, X. and Liu, Q. (2022) Vehicle Collision with RC Structures: A State-Of-The-Art Review. *Structures*, **44**, 1617-1635. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.107>
- [16] Chen, L., Wu, H. and Liu, T. (2021) Vehicle Collision with Bridge Piers: A State-Of-The-Art Review. *Advances in Structural Engineering*, **24**, 385-400. <https://doi.org/10.1177/1369433220953510>
- [17] Zhou, D. and Yang, G. (2025) Shear Stiffness of the Bonding Interface in Concrete Structures Strengthened by Steel Plates. *Structures*, **73**, Article ID: 108384. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108384>
- [18] Kadhim, M.M.A., Jawdhari, A.R., Altaee, M.J. and Adheem, A.H. (2020) Finite Element Modelling and Parametric Analysis of FRP Strengthened RC Beams under Impact Load. *Journal of Building Engineering*, **32**, Article ID: 101526. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101526>
- [19] Kishi, N., Kawarai, T. and Komuro, M. (2025) Assessment of the Static and Impact Resistance Behavior of Flexurally Strengthened RC Beams by Bonding Medium-Elasticity CFRP Sheets. *International Journal of Protective Structures*, **17**, 714-728. <https://doi.org/10.1177/20414196251391441>
- [20] Dong, S., Gu, J., Ouyang, X., Jang, S. and Han, B. (2025) Enhancing Mechanical Properties, Durability and Multifunctionality of Concrete Structures via Using Ultra-High Performance Concrete Layer: A Review. *Composites Part B: Engineering*, **297**, Article ID: 112329. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112329>
- [21] Ortiz, J.D., Khedmatgozar Dolati, S.S., Malla, P., Nanni, A. and Mehrabi, A. (2023) FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-Of-The-Art Review on Durability and Mechanical Effects. *Materials*, **16**, Article 1990. <https://doi.org/10.3390/ma16051990>
- [22] Wei, J., Li, J., Wu, C., Hao, H. and Liu, J. (2023) Experimental and Numerical Study on the Impact Resistance of Ultra-High Performance Concrete Strengthened RC Beams. *Engineering Structures*, **277**, Article ID: 115474. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115474>
- [23] Wei, J., Li, J., Wu, C., Liu, Z. and Fang, J. (2021) Impact Resistance of Ultra-High Performance Concrete Strengthened Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Impact Engineering*, **158**, Article ID: 104023. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104023>
- [24] Wu, M., Pei, B., Zeng, Y., Liu, J. and Du, X. (2023) Performance Analysis of the Ultra High Performance Concrete Composite Beam Subjected to Impact Loads. *Advances in Structural Engineering*, **26**, 1498-1511. <https://doi.org/10.1177/13694332231166195>
- [25] Liu, X., Zheng, Y., Fang, Q., Zhou, C., Yang, Y., Xiang, H., *et al.* (2022) Anti-Collision Performance of RC Columns Strengthened with a Composite of FRP Grid and UHPC. *Structures*, **43**, 1682-1691. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.062>
- [26] Liu, Y., Hao, H., Hao, Y. and Cui, J. (2022) Experimental Study of Dynamic Bond Behaviour between Corroded Steel Reinforcement and Concrete. *Construction and Building Materials*, **356**, Article ID: 129272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129272>
- [27] Liu, Y., Hao, H. and Hao, Y. (2023) Damage Prediction of RC Columns with Various Levels of Corrosion Deteriorations Subjected to Blast Loading. *Journal of Building Engineering*, **80**, Article ID: 108019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108019>

- [28] Liu, Y., Hao, Y., Hao, H. and Zhou, Y. (2026) Fragility Assessment of FRP-Strengthened RC Beams with Chloride-Induced Corrosion Damage under Impact Loads. *Reliability Engineering & System Safety*, **266**, Article ID: 111728. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111728>
- [29] Zhang, X., Liu, T., Wu, N., *et al.* (2026) Dynamic Response and Failure Mechanism of Corroded RC Beams Strengthened with FRP Grid-UHPC Composites under Impact. *Advances in Concrete Construction*, **21**, 301-324.