

# GFRP筋增强水泥基复合材料柱的抗侧向冲击性能及残余侧向承载性能试验研究

葛 蓉<sup>1</sup>, 朱启鸣<sup>1</sup>, 刘 涛<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>湖南科技大学土木工程学院, 建筑工业化技术及安全控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年3月13日; 发布日期: 2025年3月25日

## 摘 要

近年来, 船舶撞击桥墩柱的事故时有发生, 在此类撞击作用下钢筋混凝土墩柱易出现损伤或发生破坏, 可能导致桥梁上部结构局部或整体坍塌, 造成惨重的损失。纤维增强复合材料(FRP)筋具有质量轻、抗拉强度高、耐腐蚀性良好等优点, 水泥基复合材料(CBC)具有较高的强度、良好的致密性以及优异的抗裂性能等特点。FRP筋增强水泥基复合材料组合结构的抗冲击性能与设计是值得关注的的问题。因此, 本文针对这一问题开展研究, 以玻璃纤维(GFRP)筋增强水泥基复合材料柱为研究对象, 通过摆锤冲击试验和侧向静力加载试验相结合的方法, 研究了组合柱的抗侧向冲击性能和冲击致损后的侧向残余承载能力。结果表明: 相比于GFRP筋增强普通混凝土柱, GFRP筋增强水泥基复合材料柱具有更好的抗冲击性能, 能够降低35%左右的峰值位移, 而在静力承载方面, 具有更大的侧向刚度和侧向承载力, 其静态承载力提升了43%。

## 关键词

FRP, 水泥基复合材料, 抗侧向冲击, 残余承载能力, 动力响应

# Residual Lateral Load-Bearing Capacity of GFRP-Reinforced Cement-Based Composite Columns after Impact Damage

Rong Ge<sup>1</sup>, Qiming Zhu<sup>1</sup>, Tao Liu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of Building Industrialization Technology and Safety Control, School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

\*通讯作者。

文章引用: 葛蓉, 朱启鸣, 刘涛. GFRP 筋增强水泥基复合材料柱的抗侧向冲击性能及残余侧向承载性能试验研究[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 443-453. DOI: 10.12677/hjce.2025.143050

## Abstract

In recent years, ship collisions with bridge piers have occurred frequently. Under such impact loads, reinforced concrete piers are prone to damage or failure, which may lead to partial or complete collapse of the bridge superstructure, resulting in devastating losses. Fiber-reinforced polymer (FRP) bars offer advantages such as light weight, high tensile strength, and excellent corrosion resistance, while cement-based composites (CBC) exhibit high strength, good compactness, and superior crack resistance. The impact resistance and design of FRP-reinforced cement-based composite structures are therefore important issues worthy of attention. To address this, this study focuses on glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bar-reinforced cement-based composite columns. Through a combination of pendulum impact tests and lateral static loading tests, the lateral impact resistance and residual lateral load-bearing capacity of the composite columns after impact damage were investigated. The results indicate that, compared to GFRP-reinforced normal concrete columns, GFRP-reinforced cement-based composite columns demonstrate better impact resistance, reducing peak displacement by approximately 35%. In terms of static load-bearing capacity, they exhibit greater lateral stiffness and lateral load-bearing capacity, with a 43% increase in static load-bearing capacity.

## Keywords

FRP, Cement-Based Composite, Lateral Impact Resistance, Residual Load-Bearing Capacity, Dynamic Response

Copyright © 2025 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

随着经济社会的快速发展,现代交通基础设施(如跨海大桥、高速铁路桥等)向大跨径和重载化方向快速发展[1][2]。然而,作为关键承重构件的桥墩柱,频繁遭受车辆撞击、船舶撞击等突发冲击事件,传统钢筋混凝土(RC)结构在抵抗冲击荷载时面临巨大挑战。桥梁墩柱一旦受损,极易引发局部结构失稳,甚至整体坍塌,从而造成严重经济损失和社会影响。因此,提高桥梁墩柱的抗冲击性能,成为了保障交通基础设施安全的关键。

纤维增强复合材料(FRP)筋具有质量轻、抗拉强度高、耐腐蚀性好等优势,在土木工程领域具有广泛的应用前景[3]-[8]。高性能混凝土(HPC)、活性粉末混凝土(RPC)、工程水泥基复合材料(ECC)、超高性能混凝土(UHPC)等水泥基复合材料,具有较高的强度、良好的致密性以及优异的抗裂性能[9]-[12]。将FRP筋与水泥基复合材料相结合所形成的复合结构,不仅能够提供良好的耐久性和耐腐蚀性,还能显著提升承载性能,为桥梁墩柱提供更可靠的性能保障,成为学术界和工程界共同关注的研究热点。

在静力性能方面,研究人员对FRP筋增强普通混凝土(NC)柱进行了大量探索,采用轴心受压试验、低周往复荷载试验等方法,深入研究了不同类型FRP筋柱的抗压强度、协同工作性及抗震性能。研究表明:在轴压荷载下,碳纤维(CFRP)筋约束混凝土柱的极限承载力较玻璃纤维(GFRP)筋柱提升约18%,且两者均显著优于传统RC柱[13];龚永智等[14]通过低周往复荷载试验,明确轴压比和体积配箍率是影响

CFRP 筋混凝土柱抗震性能的关键因素,并给出相应评价指标和模型计算方法。这些研究不仅丰富了 FRP-NC 结构设计规范,也验证了 FRP 筋对钢筋的可替代性。

然而,对于 FRP 增强 CBC 柱的静力性能研究,尽管已有一定进展,但仍不完善。研究人员通过轴压、偏压、拉拔等试验[15]-[20],分析了长细比、配筋率、纤维类型等因素对其承载力、粘结性能的影响。如 Manoharan 等[15]通过轴压试验发现,GFRP 筋增强 HPC 柱承载力比钢筋增强 HPC 柱高 2~6 个百分点;Zhao 等[20]通过拉拔试验发现,ECC 强度与 FRP 筋粘结强度成正相关,高肋 FRP 筋粘结强度更高。不过,FRP 筋与水泥基复合材料的粘结性能研究仍是研究的薄弱环节,亟需进一步深入探讨。在抗冲击性能研究领域,对 FRP-NC 柱动力性能的研究为 FRP 增强水泥基复合材料柱的抗冲击研究奠定了基础。通过冲击试验,学者们明确了纵向配筋率、混凝土强度、轴压比等因素对 FRP-NC 柱的破坏模式和抗冲击能力的影响[21]-[24]。Pham 等[21]的研究发现,GFRP 筋-RC 柱的纵向配筋率对其破坏模式和抗冲击能力有显著影响,而高强度混凝土的使用可能因脆性导致剥落破坏,反而不利于抗冲击性能的提升。同时,对于 UHPFRC、UHPC 等水泥基复合材料柱在低速冲击下的动力性能,也进行了大量研究,提出了一些基于能量吸收、变形特征等参数构建的抗冲击性能评价指标,并初步量化了这类材料在冲击荷载下的响应。然而,现有的结构设计方法仍较为有限,缺乏系统全面的理论体系,难以满足实际工程中多样化的设计需求。目前,FRP 增强水泥基复合材料结构的抗冲击性能研究主要集中于 RC 结构加固领域,因其成本较高、应用范围有限。但随着桥梁墩柱碰撞风险和钢筋锈蚀问题的日益严重,传统 RC 结构难以满足抗冲击需求。因此,深入研究 FRP 筋增强水泥基复合材料柱抗冲击性能具有重要意义。本文重点研究了冲击致损后 GFRP 筋增强水泥基复合材料柱的残余承载性能,并通过试验和理论分析探究了其影响因素和作用机制,为实际工程提供理论与实践支持。

## 2. 试验方案

### 2.1. 试件设计

为了研究 GFRP 筋增强水泥基复合材料(CBC)柱冲击致损后的残余侧向承载性能,本文对 8 个冲击致损复合柱进行了原位侧向静力加载试验,以冲击角度与混凝土类型为变量,分别包括 4 根 GFRP 增强普通混凝土柱(GFRP-NC)和 4 根 GFRP 增强水泥基复合材料柱(GFRP-CBC)。各试件的具体参数见表 1,表中字母 G 表示 GFRP 筋;字母 N 和 C 分别表示普通混凝土和水泥基复合材料;数字 0、30、45 和 75 分别表示不同的冲击角度(0°为纯静力侧向单调加载);字母 M 表示该试件开展了重复冲击试验,30M-1 表示每次摆锤提升角度均为 30°,冲击次数为 1 次,其最大撞击次数为 7 次;例如试件 G-C-30 表示 GFRP 筋增强水泥基复合材料柱试件,先遭受 30°冲击角度的摆锤侧向冲击,然后进行原位残余侧向静力加载。

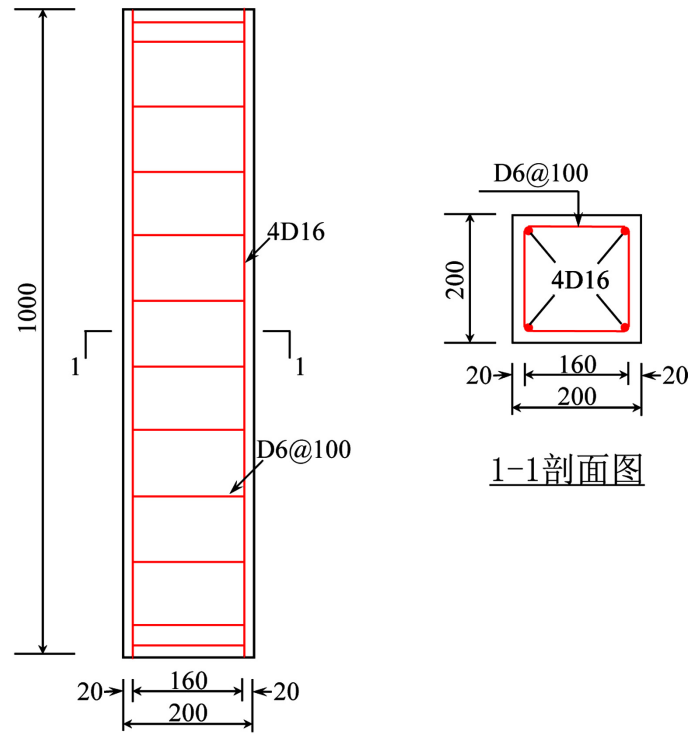
RC 方柱的总高度为 1000 mm,截面边长为 200 mm,纵筋保护层厚度为 20 mm,如图 1 所示。试件的基体材料采用两种类型:普通混凝土(强度等级为 C40)和水泥基复合材料(由湖南固力工程新材料有限公司提供)。每根试件中均匀布置 4 根直径 16 mm 的 GFRP 筋,配筋率为 1.15%;箍筋采用直径为 6 mm 的 GFRP 筋,间距为 100 mm,配箍率为 0.28%。柱端部设置相邻箍筋,间距为 20 mm,以防止柱端部处 GFRP 筋与混凝土发生滑移脱离。本文所使用的普通混凝土和水泥基复合材料混凝土的实测立方体抗压强度平均值分别为 35、56 MPa。16 mm 直径 GFRP 筋的极限强度和拉伸弹性模量分别为 793.7 MPa 和 44.3 GPa,6 mm 直径 GFRP 筋的极限强度和拉伸弹性模量分别为 978 MPa 和 42.1 GPa。

### 2.2. 加载及测量方案

由于桥梁墩柱底部的边界条件可视为固支,而顶部未设置盖梁的桥墩其长细比较大,上部结构对柱顶的约束条件较弱,故可视为悬臂结构。此外,考虑到桥墩柱受到上部结构的轴力一般较小,且在冲击

**Table 1.** Details of RC column specimens  
**表 1.** RC 柱试件参数

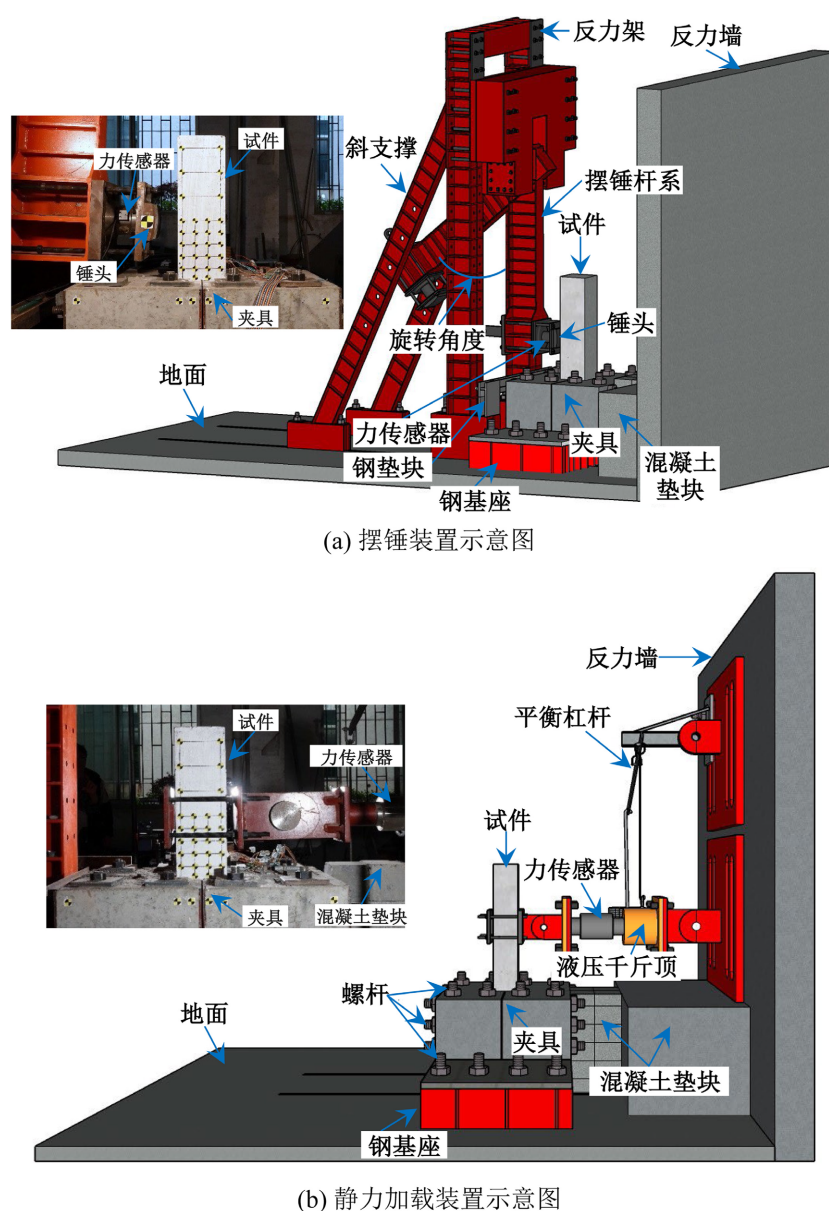
试件编号	筋材 类型	混凝土 类型	$\rho_{sv}$ (%)	摆锤提升 角度(°)	锤头冲击 速度(m/s)	冲击能量 (kJ)	第一峰值 冲击力 (kN)	极限位 移(mm)	残余侧向 力(kN)
G-N-0	GFRP	NC	0	-	-	-	-	22.5	138.1
G-N-30	GFRP	NC	0	30	2.26	0.80	199.3	22.2	122.4
G-N-45	GFRP	NC	0.28	45	3.50	1.93	304.5	17.6	118.9
G-N-75	GFRP	NC	0.28	75	6.00	5.66	685.4	17.6	-
G-C-0	GFRP	CBC	0	-	-	-	-	15.6	193.3
G-C-30M	GFRP	CBC	0	30	2.26	0.80	304.7	-	-
G-C-45	GFRP	CBC	0.28	45	3.50	1.93	199.2	8.3	-
G-C-75	GFRP	CBC	0.28	75	6.00	5.66	221.4	37.5	138.2



**Figure 1.** Dimension and reinforcement details of RC column specimens  
(Unit: mm)

**图 1.** RC 柱试件尺寸及配筋详图(单位: mm)

过程中轴力施加与维持恒定的操作难度较大,同时受试验场地与条件的限制,本文试验未在柱顶施加轴力。试验中采用大型刚性摆锤实验装置进行侧向冲击试验,如图 2(a)所示。该装置由刚性摆杆、冲击锤头、旋转轴承、刚性反力架以及斜撑组成。摆锤通过卷扬机提升至既定高度,形成一定的提升角度,即冲击角度。冲击锤头内嵌力传感器,用于量测冲击力,锤头的冲击面是一个约为 15°的圆弧面,宽度为 200 mm。当摆锤降落至最低点时,冲击面正面与 RC 柱接触,初始冲击能量可以通过调整摆锤的初始提升角度来改变。摆锤锤头冲击时的中心高度与夹具顶面的距离为 250 mm,形成的小剪跨比约为 1.4。



**Figure 2.** Test setup  
**图 2.** 试验装置图

冲击试验结束后, 本文采用侧向静力加载装置对冲击致损的试件进行原位残余侧向静力加载试验, 如图 2(b)所示。该装置主要由液压千斤顶、力传感器、加载板以及平衡杠杆装置组合而成。为确保侧向力的水平加载精度, 加载板与力传感器之间以及液压千斤顶与反力墙连接板之间均通过平面铰连接; 同时, 通过平衡杠杆及配重块对水平加载装置的自重进行平衡, 从而保证千斤顶在整个加载过程中始终保持水平加载状态。试验采用位移控制模式进行水平单调加载, 通过液压千斤顶对试件施加水平侧向荷载, 直至试件发生破坏。

试验中, 摆锤的冲击力与静力试验中施加的荷载分别通过安装在锤头上的应变式力传感器(量程 200 t、采集频率为 51.2 kHz)进行测量。为了全面记录冲击过程, 使用了高速摄像机(帧率为 1000 帧/秒)对冲击过程进行拍摄。此外, 试验还采用 Imetrum 非接触式位移测量系统导出位移与速度数据, Chen 等[25]



通过与位移计数据的对比验证了此套测量系统的有效性。

### 3. 试验结果

#### 3.1. 摆锤侧向冲击试验结果

##### 3.1.1. 损伤特征和失效模式

图 3 为冲击结束后各试件的最终损伤模式。通过对损伤状态的观察与对比分析,发现 GFRP-NC 柱与 GFRP-CBC 柱呈现出不同的损伤特征。对于 GFRP-NC 柱, G-N-30 试件主要表现为弯剪损伤,随着冲击速度的增加, G-N-45 和 G-N-75 试件逐渐呈现明显的剪切损伤,最终导致 GFRP 箍筋断裂并发生剪切破坏。同时,主斜裂缝顶部高度随冲击速度上升而增加,最终达到 200 mm。特别是 G-N-75 试件,在冲击点高度以上的柱身出现对称斜裂缝,表明在高速冲击下,悬臂端受到较大的惯性力作用,边界条件近似于固支状态。此外, G-N-45 试件出现了竖向裂缝,而 G-N-75 试件的混凝土保护层严重剥落,这表明 GFRP 筋与普通混凝土粘结性能随冲击速度增加而降低,尤其是在高速冲击下,粘结滑移现象更加明显,破坏模式逐渐转变为以粘结破坏为主。

对于 GFRP-CBC 柱, G-C-30 试件同样主要表现为弯剪损伤,而 G-C-45 和 G-C-75 试件则表现为剪切损伤,损伤模式随冲击速度的增加逐渐转向剪切损伤。然而, CBC 柱表现出更强的动态抗剪能力,其箍筋仅出现纤维撕裂,未完全断裂,主斜裂缝顶部的高度最终达到 250 mm。与 NC 柱相比, G-C-45 试件未出现竖向裂缝和明显的粘结滑移现象,表明 GFRP 筋与 CBC 粘结性能更好。然而,当冲击能量超过抗冲击极限时,粘结失效现象依然发生, G-C-75 试件主要表现为粘结破坏。

总体而言,在相同冲击速度下, CBC 柱能够承受更大的冲击力,尽管裂缝数量较多,但主斜裂缝宽度较小,表现出更强的裂缝发展控制能力。然而,当冲击速度过大时, CBC 柱与 GFRP 筋之间的粘结失效表现出更明显的脆性特征,且混凝土保护层的剥落更为严重。

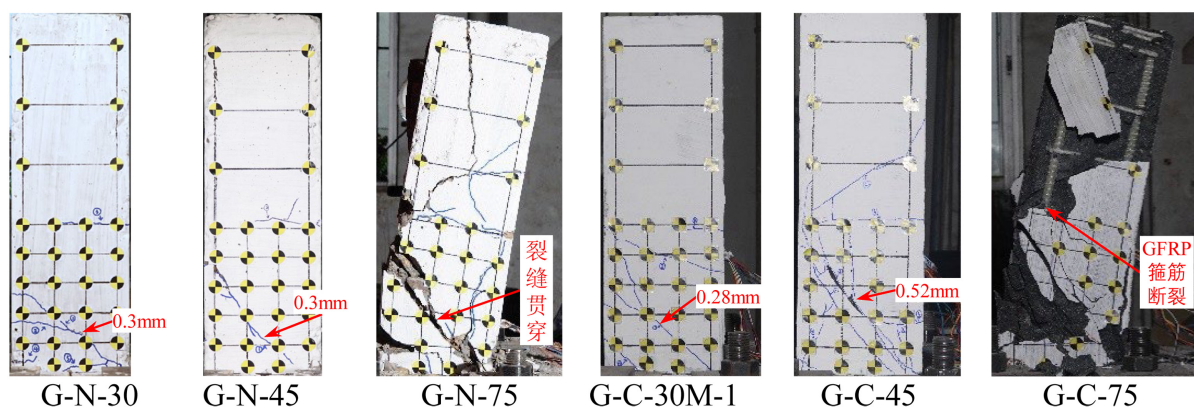


Figure 3. Final failure modes of the columns after impacts

图 3. 冲击后的最终损伤模式

##### 3.1.2. 摆锤冲击力时程

图 4 给出了各试件的摆锤冲击力时程曲线。对于 NC 柱, 3 个试件冲击力时程曲线呈现出相似的三阶段特征: 首先迅速从零增加至第一峰值后立即下降, 随后回升至第二峰值再下降, 最后进入震荡阶段并逐渐归零。试验结果表明, 摆锤提升角度对第一峰值具有显著影响: G-N-30 柱的第一峰值为 199.3 kN, 而 G-N-45 和 G-N-75 分别增至 304.5 kN 和 685.4 kN, 增幅分别达到 52% 和 244%; 相比之下, 摆锤提升角度对第二峰值影响较小, 三个试件的第二峰值分别为 112.2 kN、189.5 kN 和 245.0 kN, 增幅分别为 69%

和 118%。在冲击初始阶段(0~2 ms 内), G-N-30 柱出现明显裂缝, G-N-45 柱主斜裂缝开始出现并扩展, G-N-75 柱的主斜裂缝显著扩展, 而此时 3 个柱试件冲击力均已完成第一阶段的变化, 说明第一峰值对 GFRP-NC 柱裂缝影响较大。

对于 CBC 柱, 冲击力时程曲线同样出现三阶段特征, 但其响应特性与 NC 柱存在明显差异。摆锤提升角度对第一峰值影响表现为: G-C-30M-1 柱的第一峰值 304.7 kN, G-C-45 和 G-C-75 柱分别增至 523.5 kN 和 727.4 kN, 增幅分别为 72% 和 139%, 整体增幅小于 NC 柱; 对与第二峰值, G-C-30M-1 柱为 131.8 kN, G-C-45 和 G-C-75 分别提升至 199.2 kN 和 221.4 kN, 增幅分别是 51% 和 68%, 同样小于 NC 柱的增幅。这表明, NC 柱的冲击力峰值对冲击速度变化更为敏感。在 0~2 ms 的初始冲击阶段, G-C-45 及 G-C-75 柱的主斜裂缝开始开展, 3 个柱的冲击力均已完成第一阶段的变化。然而, 由于操作失误, 导致 G-C-30M 试件的高帧视频数据丢失, 无法获取其损伤发展信息, 这在一定程度上限制了对该试件损伤演化过程的深入分析。

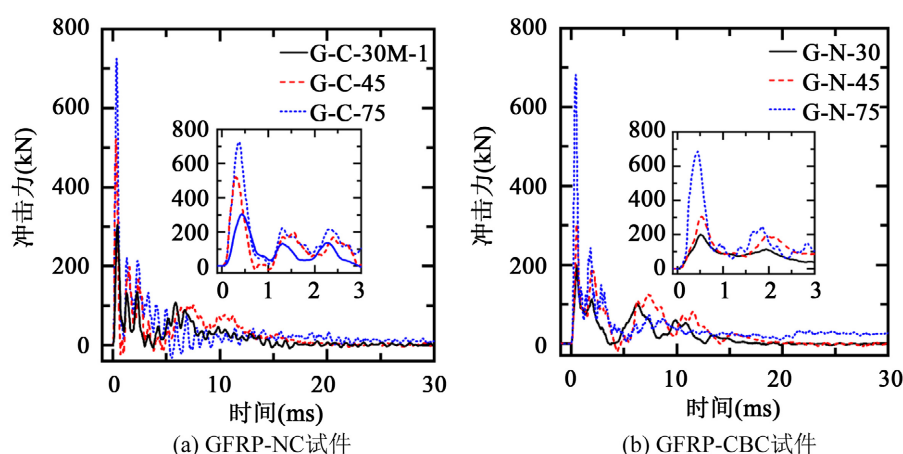


Figure 4. Impact force time histories for each specimen under impact loading

图 4. 各试件在冲击加载下的冲击力时程曲线

### 3.1.3. 位移时程分析

图 5 展示了各试件的冲击点高度位移时程曲线。试验结果表明, 对于 NC 柱, 随着冲击速度的提升, 柱的峰值位移和残余位移呈现同步增长趋势。具体而言, G-N-30 柱的峰值位移为 6.4 mm, 而 G-N-45 与 G-N-75 柱分别增至 12.0 mm 和 56.6 mm, 增幅分别达到 87% 和 784%。对于 CBC 柱, G-C-30M-1 柱因操作失误导致测点位移数据缺失, G-C-75 试件则因冲击速度过高致使测点脱落, 造成后期数据部分缺失。尽管如此, 现有数据仍能反映出 CBC 柱的位移响应规律。随着冲击速度的增加, CBC 柱冲击点高度的峰值位移和残余位移同样呈现上升趋势, 其中 G-C-45 试件的位移峰值为 7.8 mm, G-C-75 试件则达到 37.5 mm, 增幅为 381%, 这一增幅与 NC 柱在相同条件下 372% 的增幅基本相当。在重复冲击实验中, 虽然 G-C-30M 试件的部分数据缺失, 但仍可观察到, 随着总输入能量的增加, 试件的峰值位移和残余位移逐渐上升。值得注意的是, 当总输入能量接近 75°摆锤直接输入的能量时, 与 G-C-75 试件相比, G-C-30M 试件的峰值位移和残余位移分别下降了 70% 和 90%, 这表明在相同能量条件下, 重复冲击造成的位移变形更小, 柱体损伤主要集中在局部区域。

通过对比分析可以发现, 在不同冲击速度下, CBC 柱冲击点高度的位移响应均显著优于 NC 柱。具体表现为: 在 45° 和 75° 冲击加载条件下, CBC 柱的峰值位移分别降低了 35% 和 34%, 且在 75° 冲击时的残余位移也更小。这些数据充分证明, GFRP-CBC 柱具有更强的抵抗冲击位移变形能力。此外, 随着冲

击速度的增加, CBC 柱在减少残余位移方面的效果更为显著, 同时其完成位移周期的时间更短, 表现出更大的刚度特性。

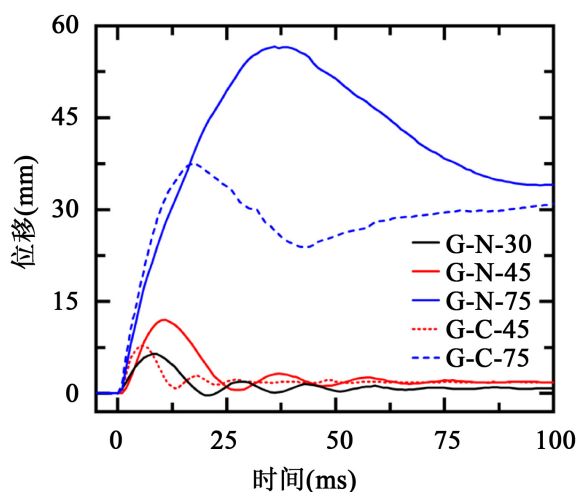


Figure 5. Displacement time histories of the height of each specimen at the impact point

图 5. 各试件冲击点高度位移时程曲线

### 3.2. 静力加载试验结果

#### 3.2.1. 水平侧向力 - 位移曲线

图 6 展现了 5 根试件在静力加载条件下的荷载-位移曲线。由图可知, 对于 NC 试件, 随着初始冲击损伤程度的加剧, 试件的侧向刚度与侧向静态承载力呈现明显的下降趋势。在纯静力加载条件下, NC 柱的峰值荷载为 135 kN, 而在经过 30° 和 45° 冲击加载后, 其峰值荷载分别降至 122.4 kN 和 118.3 kN, 降幅分别为 9% 和 12%。其中, G-N-45 试件的峰值荷载较 G-N-30 试件进一步降低了 3%, 且侧向刚度也有所减小。值得注意的是, 只进行纯静力试验的柱 G-N-0 在达到峰值荷载后, 仍维持了短暂的承载阶段, 并继续加载约 10 mm 位移, 表现出延性破坏特性。由此可见, 随着冲击速度的提升, GFRP 增强 NC 柱的侧向刚度和残余承载力逐渐减弱。

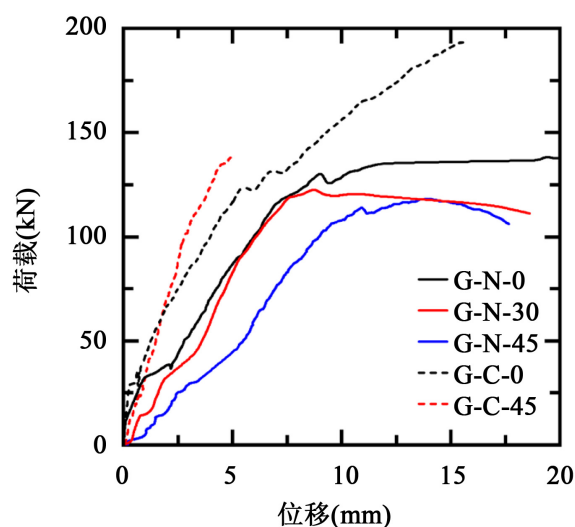
对于 CBC 试件, 由于试验过程中 G-C-45 试件的加载速率控制失误, 导致其在加载后期出现荷载快速上升现象。从图 6 中可以看出, 在相同位移条件下, CBC 柱的承载能力显著高于 NC 柱, 表明 CBC 柱具有更大的侧向刚度。然而, 在遭受 45° 冲击加载后, 其初始侧向刚度明显下降, 静力承载力从纯静力加载下的 193.3 kN 降至 138.2 kN, 降幅为 28%。这表明, 尽管 CBC 材料具有较高的初始刚度, 但其对冲击损伤的敏感性较强, 抗冲击性能相对较弱。

综上所述, GFRP-NC 复合柱的力学性能退化与冲击累积损伤密切相关, 而 CBC 材料虽然具有更高的初始刚度, 但其抗冲击损伤能力较差。

#### 3.2.2. 试件最终破坏形态

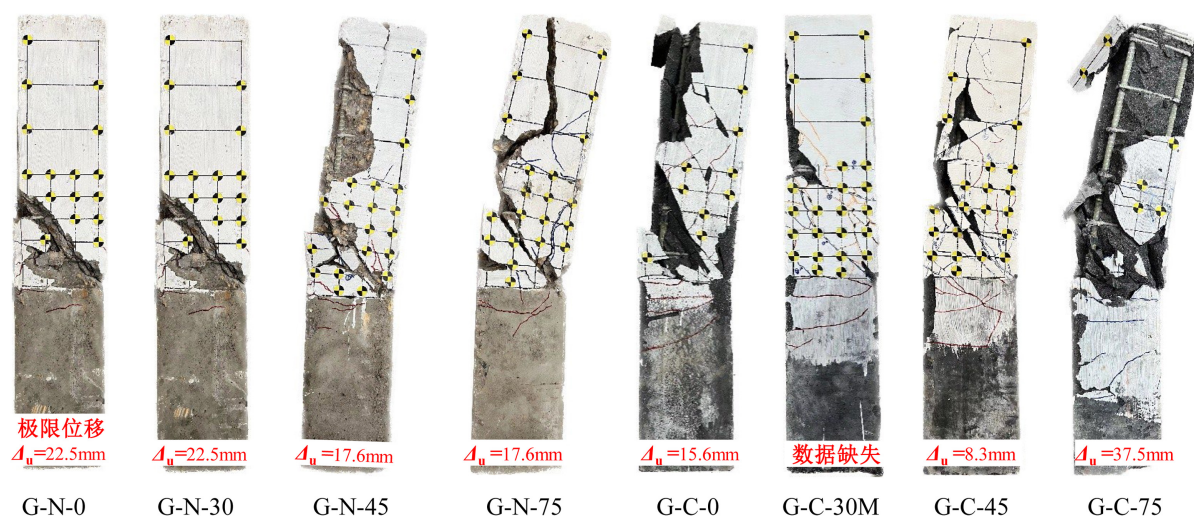
纯静力和残余侧向静力单调加载试验结束后, 各试件从锚固区夹具移出后的最终整体破坏形态如图 7 所示。由图可知, GFRP-NC 柱在纯静力加载、冲击加载以及冲击后静力加载三种模式下, 其最终破坏模式具有一定的相似性, 均表现为整体剪切破坏, 主斜裂缝位于柱加载面右侧面左侧 200 mm 高度与右下角之间, 且在 150 mm 高度处, GFRP 箍筋断裂。然而, 随着冲击速度变化, 破坏模式表现出明显的差异: 在纯静力或低速度冲击后静力加载条件下, 试件仅表现为单一的剪切破坏; 而在高速度冲击后静力





**Figure 6.** Load-displacement curves of each specimen under static loading

**图 6.** 各试件在静力加载下的荷载 - 位移曲线



**Figure 7.** The final failure mode of each specimen

**图 7.** 各试件最终破坏模式

加载或高速度直接冲击加载条件下, 除出现明显的剪切破坏以及主要剪切裂缝宽度增加外, 还伴随混凝土保护层严重剥落和粘结破坏, 且粘结失效呈脆性。这表明, 冲击速度的增加会导致 GFRP 筋与普通混凝土之间粘结性能下降, 破坏模式从单一剪切破坏转变为剪切与粘结破坏的复合模式。

对于 GFRP-CBC 柱, 在三种加载模式下的最终破坏模式同样表现出相似性, 即以整体剪切破坏为主并伴随明显的粘结破坏, 主斜裂缝分布于柱加载面右侧面左侧 250 mm 高度处, 且向右下角延展。值得注意的是, 在纯静力加载条件下, CBC 柱破坏时未出现箍筋纤维束大量撕裂或断裂的现象, 这与 NC 柱的破坏特征存在明显的差异。在 45° 冲击后静力加载下, 试件静态抗剪能力下降, 粘结破坏时箍筋部分纤维撕裂; 而在 75° 直接冲击后, 箍筋出现大量纤维撕裂, 抗剪能力几乎完全丧失。对于遭受低能量重复冲击的 CBC 柱, 当总输入能量接近 75° 时的直接冲击能量时, 主要表现为冲击区域局部严重损伤, 而未出现明显的剪切或粘结破坏。

总体而言,冲击速度的增加导致 GFRP-CBC 柱静态抗剪能力下降,但由于其具有较高的侧向残余承载力,在静力加载下的最终破坏模式表现为伴随粘结破坏的剪切破坏,且剪切破坏程度相对较轻。另一方面,从柱身整体损伤情况来看,被夹具夹持的柱底部区域出现少量小宽度水平和斜向裂缝。

#### 4. 结论

本研究通过摆锤侧向冲击试验和原位残余侧向静载荷试验,系统地研究了冲击致损后 GFRP 筋增强水泥基复合材料柱(GFRP-CBC)的动力响应、冲击损伤和残余横向承载能力。主要结论如下:

1) 与 GFRP-NC 柱相比, GFRP-CBC 柱具有更优异的抗冲击性能,表现为更大的刚度、更强的动态抗弯和抗剪能力以及更好的裂缝控制能力。CBC 柱能够降低约 35% 的峰值位移,并在高速冲击下更有效地降低残余位移。此外, CBC 与 GFRP 筋之间的粘结性能在冲击荷载下表现更优,但在高速冲击时仍会逐渐下降。

2) 随着冲击速度的增加, GFRP-NC 和 GFRP-CBC 柱的损伤模式从弯剪损伤向剪切损伤转变,并在高速冲击下伴随 GFRP 筋的粘结破坏。低能量重复冲击主要引发局部损伤,整体损伤与位移变形较单次冲击在相同总能量下更小,表明能量输入方式对损伤模式具有显著影响。

3) 在静力加载条件下, GFRP-CBC 柱表现出更大的侧向刚度和承载力,其静态承载力较 GFRP-NC 柱提升了 43%。然而,冲击致损后, GFRP-CBC 柱的侧向残余承载力出现显著下降,主要原因是冲击作用下 GFRP 筋与 CBC 之间的粘结性能退化速度较快。

#### 基金项目

湖南省自然科学基金项目(2024JJ9066, 2023JJ70006)。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 单亦石, 毛可佳. 我国海洋工程的发展现状及远景展望[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(8): 77-81.
- [3] 王文伟, 李果. 纤维增强塑料(FRP)在混凝土结构中的研究与应用[J]. 混凝土, 2001(10): 37-39.
- [4] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [5] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋在混凝土结构中的应用[J]. 工业建筑, 1999, 29(2): 20-22+29.
- [6] Liu, T., Xiao, Y., Yang, J. and Chen, B.S. (2017) CFRP Strip Cable Retrofit of RC Frame for Collapse Resistance. *Journal of Composites for Construction*, **21**, Article ID: 04016067. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000722](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000722)
- [7] Liu, T. and Chen, L. (2019). Numerical Simulation of Vehicle Collision with Reinforced Concrete Piers Protected by FRP-Foam Composites. In: *Structures Congress 2019*, American Society of Civil Engineers, 70-81. <https://doi.org/10.1061/9780784482247.007>
- [8] 刘涛, 马健超, 陈林, 等. 侧向冲击下 CFRP 缠绕加固 RC 悬臂柱动态响应的有限元分析[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 139-149.
- [9] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 45-60.
- [10] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
- [11] Liu, T., Zhang, L., An, X. and Chen, L. (2022) Experimental and Numerical Investigation on Collapse Behavior of Precast Reinforced Concrete Beam-Column Sub-Assemblages with Cast-in-Place ECC Joints. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01421. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01421>
- [12] 张龙, 刘涛, 陈林, 等. ECC 后浇节点装配式混凝土梁-柱子结构倒塌试验[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 209-219.
- [13] 张新越, 欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(4): 467-472+485.
- [14] 龚永智, 张继文, 蒋丽忠, 等. 高性能 CFRP 筋混凝土柱的抗震性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1506-1513.

- 
- [15] Mohamed, H.M., Afifi, M.Z. and Benmokrane, B. (2014) Performance Evaluation of Concrete Columns Reinforced Longitudinally with FRP Bars and Confined with FRP Hoops and Spirals under Axial Load. *Journal of Bridge Engineering*, **19**, Article ID: 04014020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000590](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000590)
- [16] Hales, T.A., Pantelides, C.P. and Reaveley, L.D. (2017) Analytical Buckling Model for Slender FRP-Reinforced Concrete Columns. *Composite Structures*, **176**, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.034>
- [17] Hasan, H.A., Sheikh, M.N. and Hadi, M.N.S. (2019) Maximum Axial Load Carrying Capacity of Fibre Reinforced-Polymer (FRP) Bar Reinforced Concrete Columns under Axial Compression. *Structures*, **19**, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.12.012>
- [18] Tarawneh, A. and Majdalaweyh, S. (2020) Design and Reliability Analysis of FRP-Reinforced Concrete Columns. *Structures*, **28**, 1580-1588. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.009>
- [19] Elmesalami, N., Abed, F. and Refai, A.E. (2021) Concrete Columns Reinforced with GFRP and BFRP Bars under Concentric and Eccentric Loads: Experimental Testing and Analytical Investigation. *Journal of Composites for Construction*, **25**, Article ID: 04021003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001115](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001115)
- [20] Zhao, D., Zhou, Y., Xing, F., Sui, L., Ye, Z. and Fu, H. (2021) Bond Behavior and Failure Mechanism of Fiber-Reinforced Polymer Bar-Engineered Cementitious Composite Interface. *Engineering Structures*, **243**, Article ID: 112520. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112520>
- [21] Pham, T.M., Chen, W., Elchalakani, M., Do, T.V. and Hao, H. (2021) Sensitivity of Lateral Impact Response of RC Columns Reinforced with GFRP Bars and Stirrups to Concrete Strength and Reinforcement Ratio. *Engineering Structures*, **242**, Article ID: 112512. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112512>
- [22] Malamiri, R.H. and Tavakoli, D. (2021) Comparison of the Behavior of FRP Rebar with Steel Rebar in Reinforced Concrete Columns under Impact Loading. *Civil Infrastructure Researches*, **7**, 77-91.
- [23] Lai, D., Demartino, C., Xu, J., Xu, J. and Xiao, Y. (2022) GFRP Bar RC Columns under Lateral Low-Velocity Impact: An Experimental Investigation. *International Journal of Impact Engineering*, **170**, Article ID: 104365. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104365>
- [24] Jin, L., Zhang, X., Zhang, R. and Du, X. (2023) Numerical Evaluation of Impact Resistance of Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars under Various Axial Force Ratios and Impact Velocities. *Engineering Structures*, **278**, Article ID: 115501. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115501>
- [25] Zhou, D., Chen, L., Demartino, C., Li, L. and Liu, T. (2024) Internal and External Steel-Tube Strengthened RC Columns: Impact Tests and Numerical Simulations. *Journal of Constructional Steel Research*, **219**, Article ID: 108752. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108752>