

• 装配式乡村住宅 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202500097



本刊网刊

侧向冲击下新型分层装配式格构柱动态响应试验

褚云朋^{1,2}, 李勤¹, 古松^{1,2}, 张春涛^{1,2}, 张海川¹

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要:为研究新型装配式格构柱在低速大质量体撞击下的抗冲击性能和破坏机理,考虑不同冲击质量、冲击高度、冲击点位等因素,对两组共计9个试件开展侧向冲击试验,得到试件的冲击力、应变和损伤变形的时程曲线。试验结果表明:1)冲击能量达5 000 J时,格构柱腹杆的螺栓会因抗剪强度不足而发生剪断,冲击点位远离固支端时抗冲击能力更弱;2)冲击点位远离固支端时格构柱冲击力平台值更离散,冲击质量和冲击速度分别对冲击持续时间和冲击力峰值影响明显;3)相同冲击能量下,冲击点位离固支端近损伤变形小,但侧向位移峰值更大;4)残余变形量与冲击能量间呈线性关系,通过线性回归得到格构柱的残余变形量与冲击量间的拟合方程,经验证,拟合误差小于6.00%。

关键词:装配式格构柱;侧向冲击;试验研究;损伤变形;动力响应

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)05-0014-10

滚石灾害的破坏力极强,且难提前预测^[1-3]。拦石栅栏、柔性防护网等被动防护手段可有效拦截落石或消耗落石动能,避免人员伤亡和财产损失^[4-5]。装配式格构钢柱作为被动防护的支挡结构在防治落石灾害中具有独特优势^[6]。钢材具备优异的能量吸收与延展性能^[7-9]。格构式设计实现负载均衡分布,增强整体抗冲击能力^[10]。模块化构造便于适应复杂环境,缩短施工周期,同时利于灾后高效抢修^[11-12]。

目前,已有学者对冲击荷载作用下钢柱等构件的动态响应及损伤机理进行了研究。尹小莉等^[13]对不同规格的缀板和缀条格构柱进行数值模拟,发现缀板格构柱主要吸能部件为柱肢,缀条格构柱主要吸能部件为缀条。崔娟玲等^[14]对格构式钢柱进行侧向撞击试验,发现其通过局部屈曲变形和整体挠曲变形来耗散冲击能量,表现出较好的延性。张国平^[15]对不同撞击损伤的试件和完整试件进行承载力试验,发现撞击产生的局部变形和整体变形对剩余承载力均有影响。王秀丽等^[16]对钢构格栅坝进行模拟分析,得出冲击动力响应与冲击位置、构件刚度等因素相关。崔凯等^[17]通过数值模拟分析了冲击作用下格构式钢柱的动态响应,发现冲击位置越高抗冲击能力越差,冲击能量越大,冲击力峰值越高、冲击力持续时

间越长。赵雷等^[18]对不同跨数、冲击位置的被动柔性防护网进行模拟分析,发现边跨冲击最不利,易导致边柱屈曲。李华东等^[19]对多落石冲击下的被动柔性防护体系进行模拟,得出其位移、冲击力与能量变化规律。Chen等^[20]对再生骨料混凝土填充钢管柱进行落锤冲击试验并建立有限元模型,分析了冲击速度、冲击质量和横截面含钢量等参数对动力响应的影响,并建立了损伤曲线。Prakash等^[21]采用数值模拟研究了钢混凝土组合梁在落石冲击下的动力行为,预测了落石下组合梁的破坏模式。Xiang等^[22]对钢结构停车库的角柱及中柱进行多次冲击,发现能量合理分配能减少钢柱的损伤。Wang等^[23]研究了钢结构框架中梁-柱连接节点在冲击荷载下的动态响应,发现采用FEMA350标准过焊孔构造的节点能够显著提高连接节点的结构延性、冲击韧性和能量耗散能力。国内外学者对钢柱尤其是装配式格构钢柱的抗冲击性能研究相对缺乏。开展节段拼装式钢格构柱的抗冲击试验,研究冲击作用下结构的受力性能及破坏模式,对工程运用具有重要参考意义。

本文针对提出的新型分层装配式格构钢柱,考虑不同冲击质量、冲击高度、冲击点位等因素,对两组共9个试件开展落锤试验,获得冲击作用下结构的破坏模式及

收稿日期:2025-02-16 修回日期:2025-03-21 网络出版日期:2025-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52268029);四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0381)

作者简介:褚云朋(1979—),男,教授。研究方向:结构工程。E-mail:chuyunpeng@swust.edu.cn

受力性能,探究不同冲击参数对试件冲击力时程曲线、应变时程曲线及位移时程曲线的影响规律,揭示其损伤机理和抗冲击性能,并通过拟合得到残余变形与冲击能量的线性关系,为工程应用提供数据支撑。

1 试件设计

试件应用相似理论^[24-25]采用原型结构的材料,以1:5的缩尺比制作模型,如图1所示。根据相似原理第二定理和量纲分析,考虑尺度比为1:5时,力学性能*F*表示为:

$$F(E, \mu, \sigma, \zeta, L, P, W, I) = 0 \quad (1)$$

式中,*E*为弹性模量, μ 为泊松比, σ 为应力, ζ 为应变,*L*为墩长,*P*为碰撞力,*W*为截面抗弯模量,*I*为截面惯性矩。

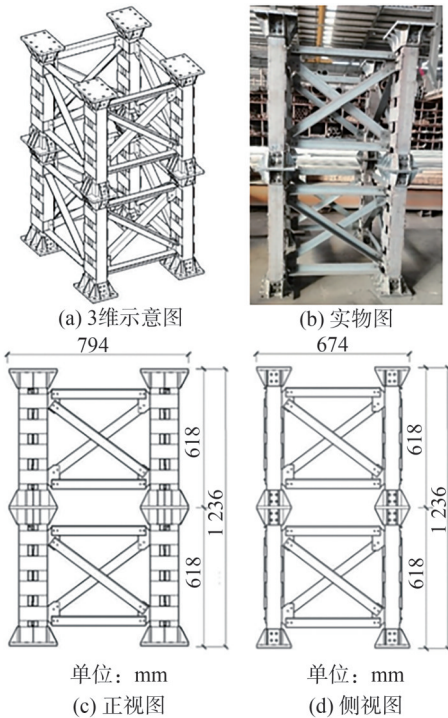


图1 新型装配式格构柱试件

Fig. 1 New prefabricated lattice column specimen

建立量纲方程函数 π 为:

$$\pi = E^{b_1} \mu^{b_2} \sigma^{b_3} \zeta^{b_4} L^{b_5} P^{b_6} W^{b_7} I^{b_8} \quad (2)$$

式中, $b_1 \sim b_8$ 为各物理量的幂次。

以长度和力为基本量纲,相应的量纲矩阵为:

$$\begin{matrix} E & \mu & \sigma & \zeta & L & P & W & I \\ L & [-2 & 0 & -2 & 0 & 1 & 0 & 3 & 4] \\ F & [1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0] \end{matrix} \quad (3)$$

根据量纲和谐可得:

$$[L]: -2b_1 - 2b_3 + b_5 + 3b_7 + 4b_8 = 0 \quad (4)$$

$$[F]: b_1 + b_3 + b_6 = 0 \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $[]$ 为量纲符号。

以 b_5, b_6 为基本未知量得:

$$b_5 = 2b_1 + 2b_3 - 3b_7 - 4b_8 \quad (6)$$

$$b_6 = -(b_1 + b_3) \quad (7)$$

则 π 函数为:

$$\pi = \left(\frac{EL^2}{P} \right)^{b_1} \left(\frac{\sigma L^2}{P} \right)^{b_3} \left(\frac{W}{L^3} \right)^{b_7} \left(\frac{I}{L^4} \right)^{b_8} = \pi_1^{b_1} \pi_2^{b_3} \pi_3^{b_7} \pi_4^{b_8} \quad (8)$$

$$\text{式中, } \pi_1 = \frac{EL^2}{P}, \pi_2 = \frac{\sigma L^2}{P}, \pi_3 = \frac{W}{L^3}, \pi_4 = \frac{I}{L^4} \circ$$

根据相似第三定理确定以下相似条件:

$$\begin{cases} \frac{S_E S_L^2}{S_P} = 1, \\ \frac{S_\sigma S_L^2}{S_P} = 1, \\ \frac{S_W}{S_L} = 1, \\ \frac{S_L^3}{S_L^3} = 1, \\ \frac{S_I}{S_L^4} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, S_E 为弹性模量比, S_L 为几何尺寸相似比, S_σ 为应力相似比, S_P 为荷载相似比, S_W 为截面抗弯模量相似比, S_I 为截面惯性矩相似比。

由此可推导出本试验的相似常数,包括几何尺寸、集中荷载及应力等。以1:5的缩尺比制作试件时,集中荷载按1:25的比例缩小,以确保应力1:1,与实际情况相符。

1.1 试件分组

试验参考文献[26-29]并考虑山区滚石冲击常见变量,共设计两组9个不同冲击质量、冲击高度和冲击点位的新式分层装配式格构柱试件。试件编号及试验设计参数如表1所示。TW和TP系列试件分别在S1和S2位置进行冲击。TW-1~TW-3及TP-1~TP-3的冲击高度均为4 m,考察不同冲击质量对试件动态响应的影响;TW-3~TW-5及TP-3、TP-4的冲击质量均为100 kg,考察不同冲击高度对试件动态响应的影响。冲击质量和冲击高度不同会影响落锤对试件的冲击能量。滑轨摩擦力影响甚微,可忽略不计。

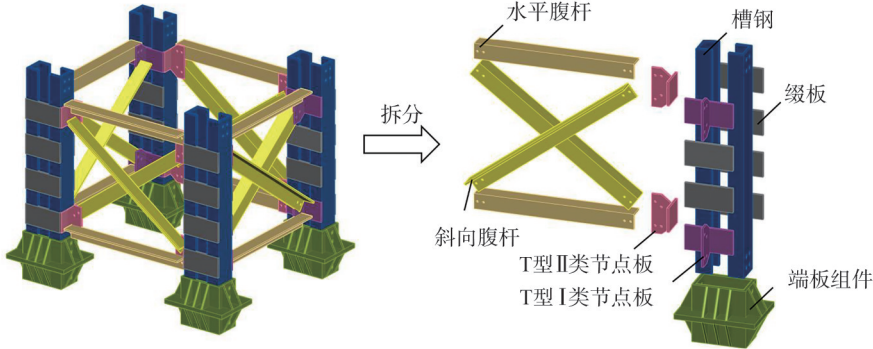
表1 试件编号及试验设计参数

Tab. 1 Numbers and design parameters of the specimens

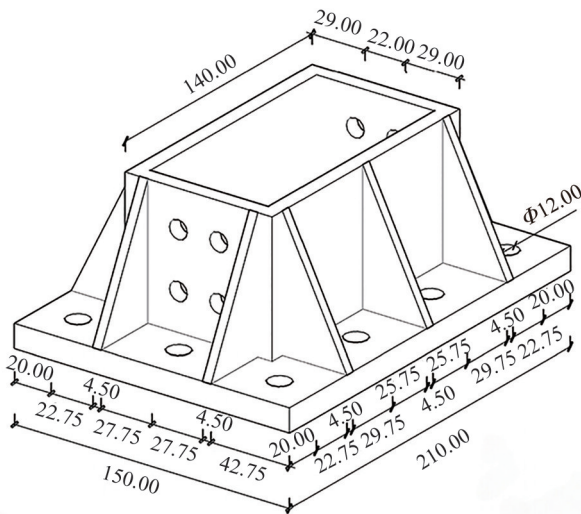
组号	试件编号	冲击质量/kg	冲击高度/m	冲击能量/J	冲击位置
第1组	TW-1	60	4	2 400	S1
	TW-2	80	4	3 200	
	TW-3	100	4	4 000	
	TW-4	100	3	3 000	
	TW-5	100	5	5 000	
第2组	TP-1	60	4	2 400	S2
	TP-2	80	4	3 200	
	TP-3	100	4	4 000	
	TP-4	100	5	5 000	

缩尺后试件长 794 mm, 宽 674 mm, 每段高 618 mm, 总高度为 1 236 mm。试件分解的基本部件(构件)如图 2 所示。图 2 中, 柱肢采用 63.0 mm×40.0 mm×4.8 mm 的槽钢, 缀板为 123.0 mm×64.0 mm×4.5 mm 的矩形钢板, 水平腹杆和斜向腹杆均采用型号 L40×40×4 的等边角钢, 底

部、顶部连接件和短板组件的套管均采用 140 mm×80 mm×8 mm 的矩形钢管, T 型节点板背部焊接在柱肢上, 尾板上通过螺栓连接水平和斜向腹杆。腹杆与节点板、槽钢与端部连接件和端部连接件与底板分别采用型号为 M4、M8 和 M10 的高强螺栓连接。

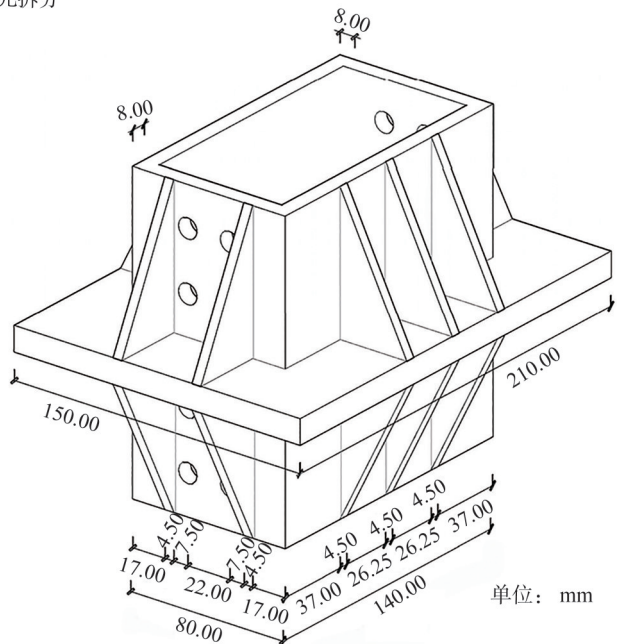


(a) 节段单元拆分



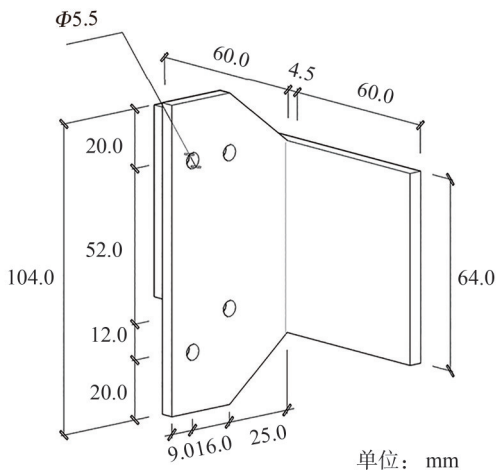
单位: mm

(b) 端部连接件



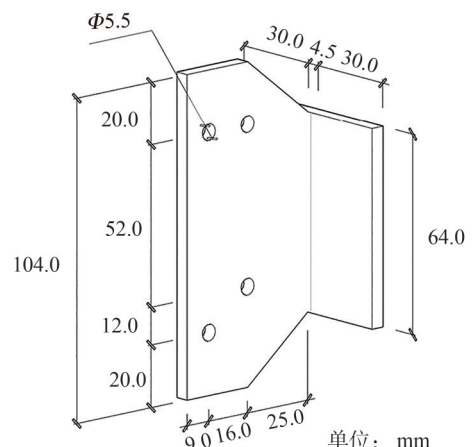
单位: mm

(c) 端板组件



单位: mm

(d) T型节点板 I 类



单位: mm

(e) T型节点板 II 类

图 2 试件基本部件 3 维示意图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of the basic components of the specimens

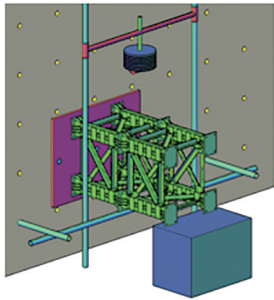
1.2 试验材料的力学性能

考虑到试验为低速冲击,通过钢材拉伸试验获取材料的相关力学性能指标。试件制作依据规范的相关要求^[30],选用Q235B结构钢材,根据材料厚度分成5组。采用电子万能材料试验机以3 mm/min的恒定拉伸速度加载,直至发生破坏。钢材力学性能如表2所示。

表2 钢材力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel

厚度 t / mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /GPa	强屈比	伸长率 δ /%
4.0	271.52	412.71	203.65	1.52	31.68
4.5	273.58	432.26	204.15	1.58	33.52
5.0	288.95	467.27	205.92	1.62	35.91
7.5	282.74	465.68	206.35	1.65	36.51
8.0	287.36	469.53	208.56	1.63	36.17



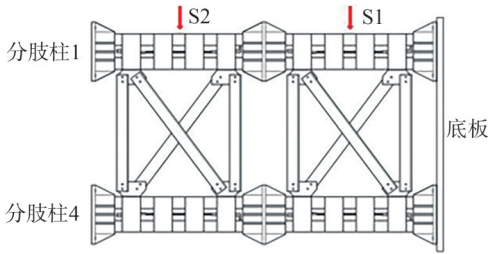
(a) 冲击试验装置3维模型



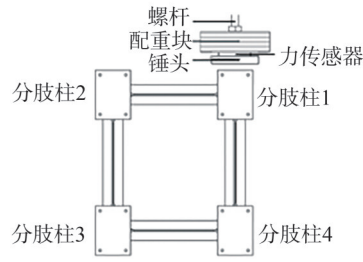
(b) 冲击试验装置



(c) 冲击落锤



(d) 试件侧视图



(e) 冲击截面示意图

图3 冲击试验装置及试件受冲击截面示意图

Fig. 3 Diagrams of the test device and the impact section of the specimen

2.2 测点布置

试件的应变由动态采集系统采集,考虑到冲击荷载下结构主要发生局部破坏,且受冲击点附近会产生明显变形。试件共布置6个应变片,粘贴在分枝柱1上,编号为P1~P6,试件测点布置如图4所示。P1、P2和P3分别用于测试受冲击处背面及其周围的应变,P4、P5和P6分别用受冲击处侧面及周围的应变。

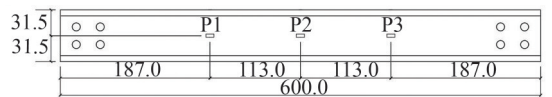
2.3 试验仪器

冲击过程中采用高速摄像机实时拍摄,采集频率为2 000 Hz。冲击力通过石英力传感器获得,灵敏度为1.9 pC/N。冲击力时程和应变时程曲线由频率为256 kHz的DH5902N的动态采集仪采集得到;位移时程曲线通过图像识别法获得,将受冲击点作为标

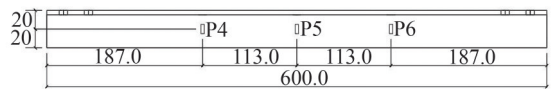
2 冲击试验概况

2.1 冲击试验装置

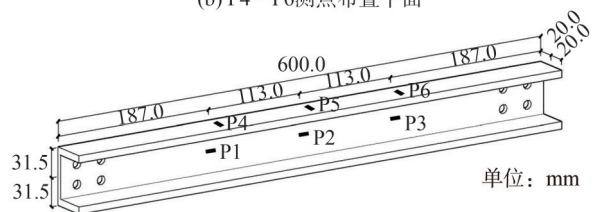
冲击试验装置如图3所示。装置由轨道杆与固定在反力墙上的钢管连接,通过锁扣固定。为降低滑动摩擦,轨道杆表面进行打磨和涂油处理,滑动装置可在轨道上自由滑动,便于在预定位置实现冲击加载。试件底部通过锚栓与底板固支。冲击装置包括锤头、配重块、力传感器和螺杆。冲击质量块包括10 kg和5 kg两种,均呈圆饼状。在锤头与配重块间布置有力传感器。图3(d)和(e)为试验中冲击落锤与试件受冲击点位示意。TW系列的冲击点位为试件分枝柱1的S1位置,TP系列的冲击点位为试件分枝柱1的S2位置。



(a) P1~P3测点布置平面



(b) P4~P6测点布置平面



(c) P1~P6测点布置3维图

图4 试件测点布置图

Fig. 4 Arrangement of measuring point

记点,采用棋盘格标定将像素坐标转换为物理坐标,取受冲击瞬间前后各 20~30 ms 的图像,逐帧标记点的中心坐标。

3 冲击试验结果分析

3.1 试验现象分析

3.1.1 冲击过程

通过高速摄像机拍摄到的试验现象如下:以破坏最严重的 TP-4 为例,落锤接触到冲击点位时分肢柱 1 产生小幅位移,在第 1 次冲击结束后落锤回弹并发生二次撞击,然后试件在多次撞击下发生自由振荡,直至稳定。落锤与试件接触后主要发生的能量转换为:分肢柱 1 先吸收落锤冲击的动能,并通过腹杆将能量传递给其他柱肢;部分冲击动能转化为结构振动的动能,主要体现在试件受冲击后的自由振动上;另一部分则转化为塑性变形能,主要表现在分肢柱 1 的塑性变形和试件破坏上。随阻尼作用增加,振动幅度降低,能量从振动能转换为热能散失。最终在不同冲击质量、冲击高度和冲击点位下,试件出现不同程度损伤。大多试件在冲击时产生一定变形,有利于吸收冲击能量,表现出较强的抗冲击能力。

3.1.2 TW 系列破坏

TW 系列的冲击点位在离固支端较近的节段,试件受冲击点位均出现了局部凹陷变形,受冲击柱肢两侧缀板出现略微外凸(图 5)。随落锤冲击能量增大,损伤情况加重,冲击点位处塑性应变区逐渐扩展。发现 TW4 凹陷处略微偏离预设冲击点位,推测是滑动装置与导轨间存在间隙导致。TW-5 因受冲击能量最大,破坏最严重,柱肢 1 下方连接板的螺栓被剪断,腹杆脱落。冲击能量达 5 000 J 时,腹杆处受到冲击力已超过螺栓抗剪强度,试件发生严重破坏。

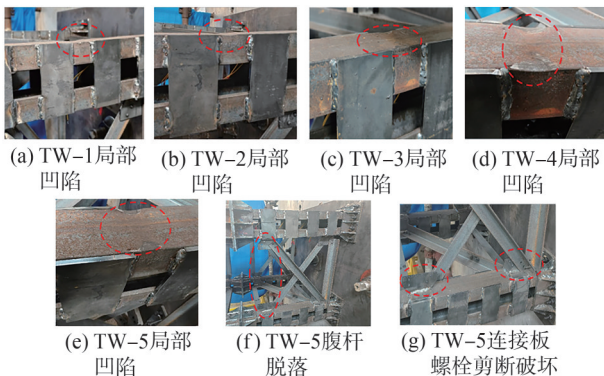


图 5 TW 系列破坏现象

Fig. 5 Damage phenomenon of TW series

3.1.3 TP 系列破坏

TP 系列的冲击点位在离固支端较远的节段,随冲击质量和高度增大,试件受冲击点位出现逐渐扩大的局部凹陷变形(图 6)。TP-4 为此组中受冲击能量最大试件,破

坏尤为严重:因冲击能量过大导致连接腹杆的螺栓剪断,多个腹杆发生脱落并弯曲变形,受冲击的柱肢发生整体倾斜,TP-4 较相同能量下的 TW-5 出现更严重破坏。

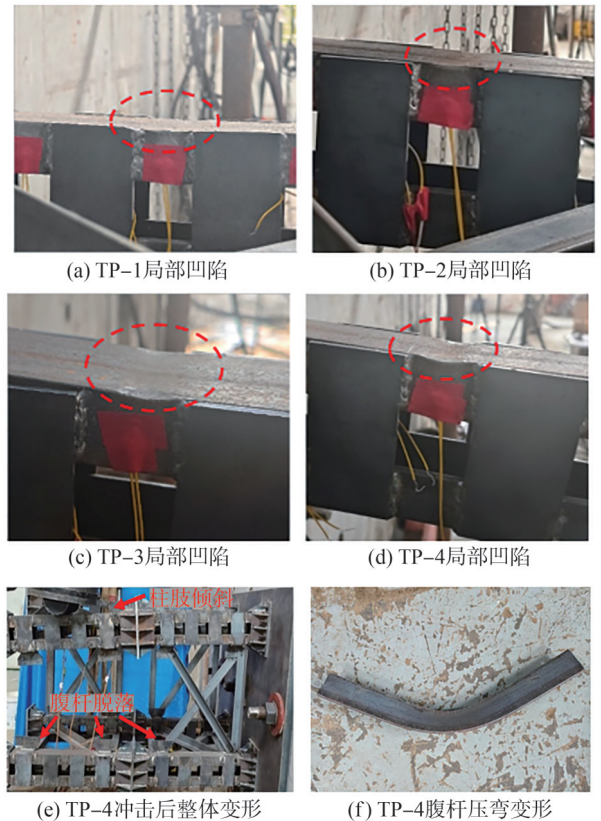


图 6 TP 系列损伤现象

Fig. 6 TP series damage phenomenon

3.2 试验数据分析

3.2.1 冲击力

冲击力时程曲线如图 7 所示。图 7 可分为 4 个阶段:1)峰值阶段(OA),冲击力由 0 上升至峰值;2)振荡阶段(AB),冲击力由峰值下降至一定范围后上下波动;3)平台阶段(BC),冲击力逐渐趋于稳定,即振荡后的第一个波谷点到开始下降段起点,取该阶段冲击力平均值为冲击力平台值;4)下降阶段(CD),冲击力由平台值下降至 0。数据结果如表 3 所示。由表 3 可知:1)除 TW-5 外, TW 系列的冲击力平台值均在 40~50 kN 之间, TP 系列的冲击力平台值较离散;2)TW-1~TW-3 的冲击力峰值分别为 187.58、192.35、200.81 kN,持续时间分别为 11.44、15.99、20.47 ms,说明随冲击质量增加,冲击力峰值及受冲击持续时间都增加,但对冲击的持续时间影响更为明显,TP-1~TP-3 也出现了类似情况。3)TW-4~TW-5 的冲击力峰值分别为 177.21、231.77 kN,持续时间分别为 16.01、22.16 ms,说明落锤冲击高度增大,冲击力峰值及冲击持续作用时间均增加,但对冲击力峰值的影响更明显;TP-3、TP-4 也出现类似情况。

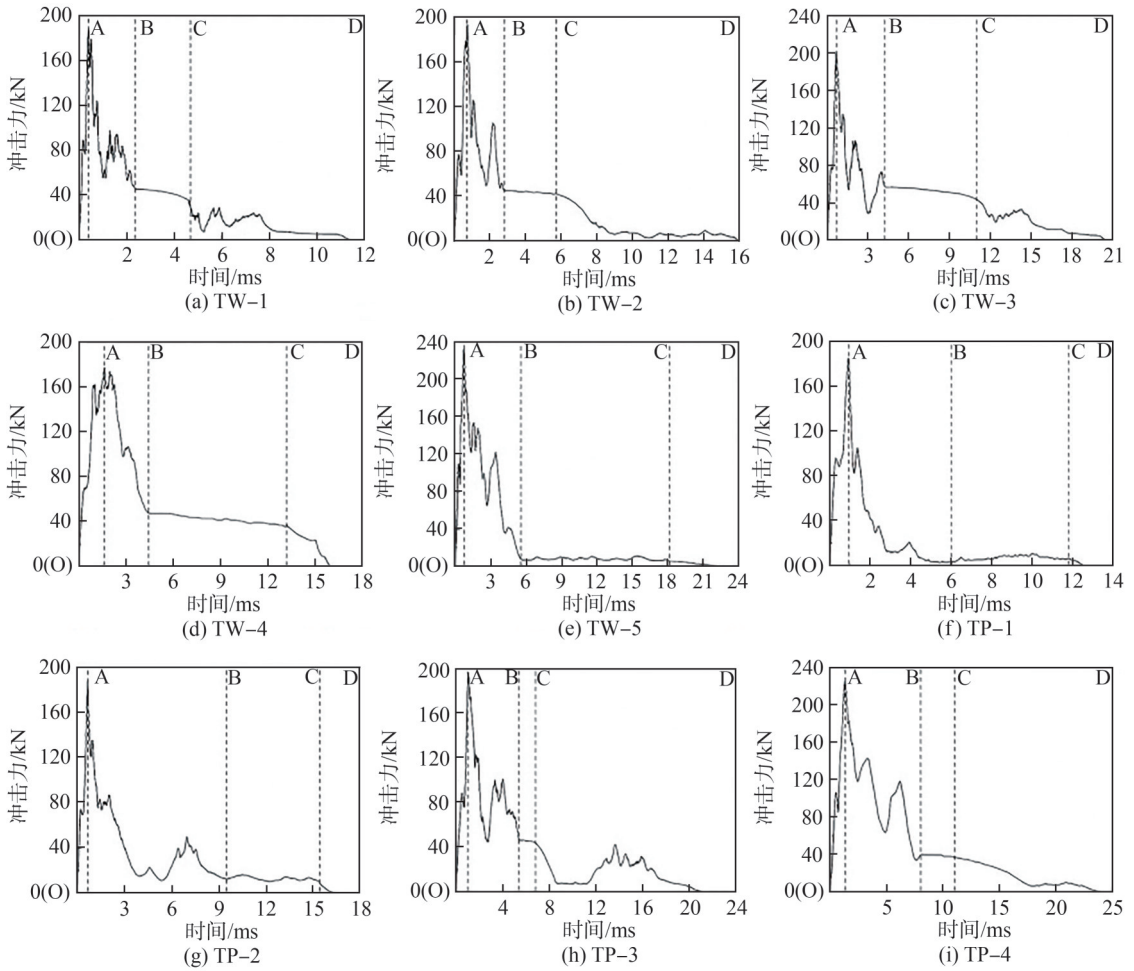


图 7 冲击力时程曲线

Fig. 7 Time history curves of impact force

表 3 冲击力测量结果

Tab. 3 Impact measurement results

试件编号	冲击力峰值/kN	冲击力平台值/kN	冲击持续时间/ms
TW-1	187.58	40.39	11.44
TW-2	192.35	41.98	15.99
TW-3	200.81	47.85	20.47
TW-4	177.21	41.86	16.01
TW-5	231.77	11.32	22.16
TP-1	184.85	10.16	12.54
TP-2	188.07	12.61	16.68
TP-3	196.48	45.43	21.26
TP-4	225.59	35.29	24.08

3.2.2 应变

在 P2 测点能较准确地测量冲击处的应变,对 TW 系列试件 P2 测点所得数据进行对比,应变时程曲线如图 8 所示,数据如表 4 所示。由图 8、表 4 可知,随冲击能量增大,冲击点位的峰值应变呈增大趋势, TW-5 的峰值应变增加幅度最大,达 $3\ 977.82 \times 10^{-6}$,

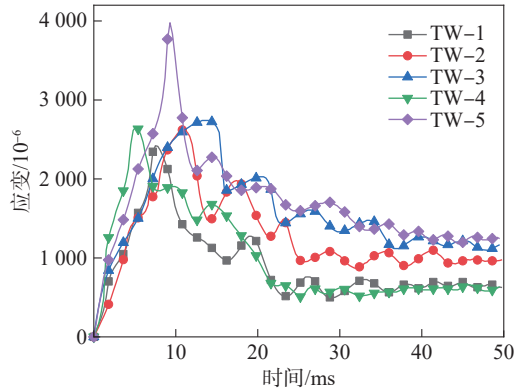


图 8 P2 测点的应变时程曲线

Fig. 8 Time history curves of strain at P2

表 4 P2 测点应变值测量结果

Tab. 4 Strain measurement results of point P2

试件编号	应变峰值/ 10^{-6}	塑性应变/ 10^{-6}
TW-1	2 421.15	625.36
TW-2	2 620.07	992.83
TW-3	2 740.54	1 167.57
TW-4	2 657.29	634.58
TW-5	3 977.82	1 244.03

冲击能量过大,导致腹杆螺栓被剪断,产生了更大峰值,应变冲击点位最终产生的塑性应变也随冲击能量增大而增加。对比 TW-1、TW-2 及 TW-4 发现,冲击能量增加了 33% 和 25% 后,塑性应变仅增加 58% 和 1%。TW-4 的塑性应变增量极小,主要是因为滑动装置与导轨间存在间隙, TW-4 的 P2 应变片与冲击点位存在微小偏离。

3.2.3 损伤变形

试验中捕获了冲击点位的位移时程曲线,如图 9 所示,试件冲击点的变形测量结果,如表 5 所示。位移的发展分上升、下降和稳定 3 个阶段。随冲击高度增加,冲击点位的残损变形均增加,试件最大横向位移峰值达 6.21 mm,冲击点位残余位移峰值达 5.27 mm。相同冲击能量下,两组试件最大侧向位移接近,但 TW-1、TW-2、TW-3 及 TW-5 的残余位移始终略高于 TP-1、TP-2、TP-3 及 TP-4,原因是 TW 系列试件冲击点位离固支端较近,冲击能量吸收主要集中于塑性变形,而 TP 系列试件冲击点离固支端较远,更多能量通过振动耗散,塑性变形相对减小。

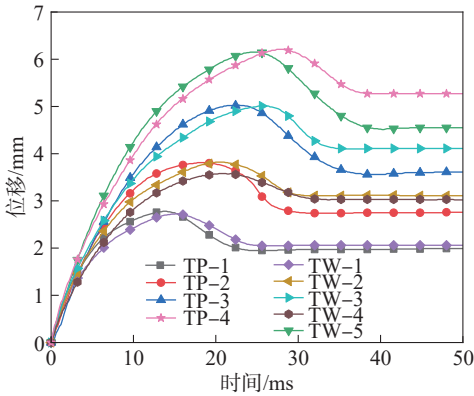


图 9 试件冲击点的位移时程曲线

Fig. 9 Time history curves of displacement at impact point of specimen

表 5 试件冲击点的变形测量结果

Tab. 5 Deformation measurement results of impact points on specimens

试件编号	最大侧向位移/mm	残余位移/mm
TW-1	2.73	2.06
TW-2	3.82	3.11
TW-3	5.01	4.11
TW-4	3.58	3.02
TW-5	6.15	5.27
TP-1	2.78	1.99
TP-2	3.81	2.76
TP-3	5.03	3.61
TP-4	6.21	4.55

3.3 残余变形-冲击能量

不同冲击能量下的残余变形如图 10 所示。由图 10 可知,试件受冲击时,其冲击点位的残余变形与冲击能量间存在线性关系。冲击能量在 2 400~5 000 J 范围内时, TW-2、TW-3、TW-5 相较于 TW-1、TW-2、TW-3 在 S1 处的残余变形分别增加了 50.97%、32.15%、28.22%; TP-2、TP-3、TP-4 相较于 TP-1、TP-2、TP-3 在 S2 处的残余变形分别增加了 38.69%、30.80%、26.04%。

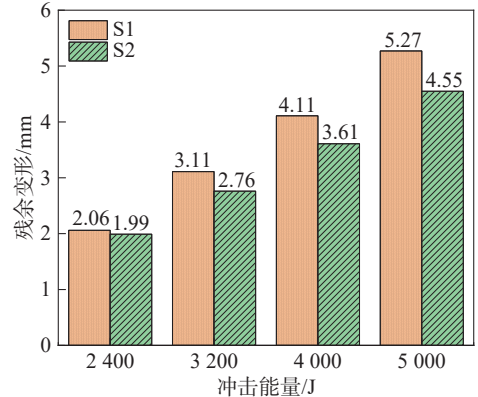


图 10 不同冲击能量下的残余变形

Fig. 10 Residual deformation under different impact energy

对 S1、S2 冲击点的两组数据进行线性拟合,分别得式(10)和(11):

$$y = 0.0012x - 0.71 \quad (10)$$

$$y = 0.001x - 0.42 \quad (11)$$

式(10)、(11)中, x 为冲击能量, y 为残余变形。

利用式(10)、(11)对残余变形进行拟合,试验值与拟合值如图 11 所示。残余变形的试验值与拟合值对比如表 6 所示。由表 6 可知,拟合误差小于 6.00%,表明拟合方程合理。TW-1 和 TW-4 的拟合误差相对较大,分别为 5.34% 和 -4.30%,原因是试验中滑动装置与导轨间存在间隙,冲击点位精准度略微不同,导致试验值有一定偏差。

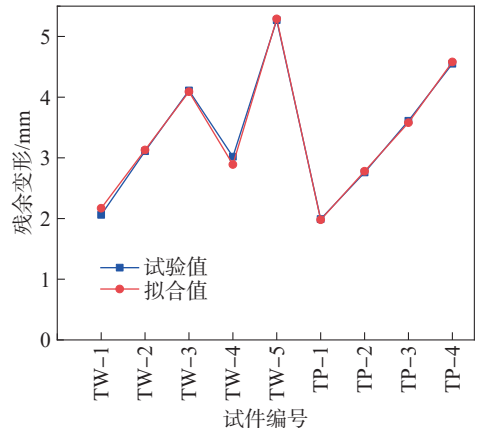


图 11 残余变形的试验值与拟合值

Fig. 11 Test and fitting values of residual deformation

表6 残余变形的试验值与拟合值对比

Tab. 6 Comparison of experimental and fitting values of residual deformation

试件	残余变形/mm		拟合误差/%
	试验值	拟合值	
TW-1	2.06	2.17	5.34
TW-2	3.11	3.13	0.64
TW-3	4.11	4.09	-0.49
TW-4	3.02	2.89	-4.30
TW-5	5.27	5.29	0.38
TP-1	1.99	1.98	-0.50
TP-2	2.76	2.78	0.72
TP-3	3.61	3.58	-0.83
TP-4	4.55	4.58	0.66

4 结 论

对新型分层装配式格构柱试件进行侧向冲击试验,得到抗冲击性能及破坏模式,主要结论如下。

1) 格构柱在冲击作用后的主要残余变形为局部凹陷,破坏时腹杆被压弯,腹杆两端螺栓被剪断。在相同冲击能量下,冲击点位在S2时新型格构柱的抗冲击能力减弱,该节段破坏更严重。

2) 当冲击点位远离固支端,冲击力平台值较离散,改变冲击质量对冲击持续时间影响明显,而改变冲击高度对冲击力峰值影响明显。

3) 受冲击点位影响,在相同冲击能量下,冲击点位近固支端会产生更大的残余位移,最大残余位移达5.27 mm。冲击点位远离固支端会产生更大的侧向位移,最大侧向位移达6.21 mm,而冲击能量耗散更多,产生残余变形较小。

4) 格构柱受冲击截面残余变形随冲击能量的增加而增大,且残余变形量与冲击能量间呈线性关系。通过线性回归得到残余变形量与冲击能量的拟合方程,经试验验证,拟合误差小于6.00%,说明拟合方程合理。

参考文献:

[1] Schumacher I, Strobl E. Economic development and losses due to natural disasters: The role of hazard exposure[J]. *Ecological Economics*, 2011, 72: 97–105.

[2] Gao Liang, Chang Yide, Zhang Junfa. Experimental study on energy dissipation and buffering of rigid flexible laminated protective structure of pier under rockfall impact[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023, 36(4): 1113–1124. [高亮, 常懿德, 张俊发. 落石冲击下桥墩刚柔叠层防护结构的缓冲耗能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2023, 36(4): 1113–1124.]

[3] Sun Keqin, Xu Jie, Tian Yongding. Dynamic behavior inves-

tigation of reinforced concrete bridge under multi-hazard effect of rockfall impact and material corrosion[J]. *Structures*, 2023, 58: 105557.

[4] Xu Hu, Gentilini C, Yu Zhixiang, et al. An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers[J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 831–852.

[5] Gentilini C, Gottardi G, Govoni L, et al. Design of falling rock protection barriers using numerical models[J]. *Engineering Structures*, 2013, 50: 96–106.

[6] Wu Hao, Wu Yifan, Ma Liangliang. Design of passive flexible barrier against rockfall impact with 8 000 kJ energy level[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(3): 170–190. [吴昊, 吴逸凡, 马亮亮. 抗8 000 kJ能级落石冲击被动柔性防护网设计[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(3): 170–190.]

[7] Lin Li, Huang Bo, Xiao Xinke, et al. Behavior of dynamic material Q355B steel based on the Johnson–Cook model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(18): 231–237. [林莉, 黄博, 肖新科, 等. Q355B钢动态材料性能研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(18): 231–237.]

[8] Yu Wenjing, Shi Jianyong, Zhao Jincheng. Research of dynamic mechanical behavior of Q345 steel[J]. *Building Structure*, 2011, 41(3): 28–30. [于文静, 史健勇, 赵金城. Q345钢材动态力学性能研究[J]. *建筑结构*, 2011, 41(3): 28–30.]

[9] Guo Zitao, Gao Bin, Guo Zhao, et al. Dynamic constitutive relation based on J–C model of Q235 steel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 804–810. [郭子涛, 高斌, 郭钊, 等. 基于J–C模型的Q235钢的动态本构关系[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 804–810.]

[10] Gilbert B P, Rasmussen K J R. Determination of accidental forklift truck impact forces on drive-in steel rack structures[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(5): 1403–1409.

[11] Liu Yang, Lin Xinyu, Chen Zhihua, et al. Experimental research and numerical simulation of a modular composite steel frame structure[J]. *Structures*, 2025, 71: 107914.

[12] Nadeem G, Safiee N A, Abu Bakar N, et al. Experimental and numerical study of self-locking adaptable inter connection for modular steel structures[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105723.

[13] Yin Xiaoli, Yan Xiaoyan, Chen Pengcheng, et al. Research on lateral impact resistance of steel lattice columns[J]. *China Sciencepaper*, 2024, 19(3): 292–299. [尹小莉, 闫晓彦, 陈鹏程, 等. 钢结构格构柱抗侧向冲击性能研究[J]. *中国科技论文*, 2024, 19(3): 292–299.]

[14] Cui Juanling, Guo Zhaosheng, Wang Rui, et al. Tests for behavior of a hot rolled H-shaped steel column under lateral impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(18): 133–139. [崔娟玲, 郭昭胜, 王蕊, 等. 热轧H型钢柱侧向冲击试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(18): 133–139.]

[15] Zhang Guoping. Experimental study on the residual mechani-

- cal property of built-up battened steel columns after lateral impact[J]. *Structural Engineers*, 2022, 38(1): 127–133. [张国平. 侧向撞击后格构式钢柱剩余力学性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2022, 38(1): 127–133.]
- [16] Wang Xiuli, Hu Zhiming, Cui Xiaoyan. Dynamic response analysis of steel grille dam under the impact of big stones in debris flow[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(4): 30–36. [王秀丽, 胡志明, 崔晓燕. 泥石流巨石冲击下的钢构格栅坝动力响应分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(4): 30–36.]
- [17] Cui Kai, Zhang Yongsheng, Guo Zhaosheng. Finite element analysis on dynamic behavior of A latticed steel column under impacts[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(4): 1551–1557. [崔凯, 张永胜, 郭昭胜. 格构式钢柱在冲击作用下动态响应的有限元分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(4): 1551–1557.]
- [18] Zhao Lei, Zou Dingfu, Zhang Lijun, et al. Parametric study on the mechanical response of a flexible rockfall barrier [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(12): 8–17. [赵雷, 邹定富, 张丽君, 等. 落石被动柔性防护网冲击力学响应的参数化研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(12): 8–17.]
- [19] Li Huadong, Zuo Mingyu, Li Pu, et al. Dynamic response analysis of passive flexible protection system under impact of rockfalls[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(6): 1297–1305. [李华东, 左明宇, 李浦, 等. 多落石冲击被动柔性防护体系的动力响应分析[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(6): 1297–1305.]
- [20] Chen Guocan, Liu Yongbin, Yu Ziqi, et al. Dynamic response of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns under impact load[J]. *Structures*, 2025, 73: 108477.
- [21] Prakash A, Monika A P, Anandavalli N. Behaviour of Steel-Concrete Composite(SCC) girder under impact due to rock fall[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 177: 106474.
- [22] Xiang Siyu, He Yongjun, Zhou Xuhong, et al. Continuous twice-impact analysis of steel parking structure columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 187: 106989.
- [23] Wang Haitao, Huo Jingsi, Liu Yanzhi, et al. Experimental and numerical study on impact behavior of beam-column substructures of steel frame[J]. *Structures*, 2021, 29: 14–29.
- [24] Xue Shuyou, Hao Hong, Hao Yifei. Numerical investigation of impact response of bridge pier subjected to off-center vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2024, 317: 118624.
- [25] Zhang Renbo, Hao Shaohua, Jin Liu, et al. Scaling effect on impact responses of steel beams and its energy threshold[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 287: 109996.
- [26] Chu Yunpeng, Xia Hui, Zhang Haichuan, et al. Dynamic response analysis of the new layered assembled lattice piers under lateral impact[J]. *Structures*, 2024, 70: 107801.
- [27] Zhu Xiang, Kang Miao, Fei Yifan, et al. Impact behavior of concrete-filled steel tube with cruciform reinforcing steel under lateral impact load[J]. *Engineering Structures*, 2021, 247: 113104.
- [28] Zhang Haichuan. Dynamic Response and protection of lattice pier under rockfall impact[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024. [张海川. 滚石冲击作用下格构式桥墩动态响应及防护研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.]
- [29] Wang Luming, Liu Yanhui, Zhao Shichun, et al. Study on evaluation model and influencing factors for cracking of concrete-filled steel tubular members subjected to lateral low-velocity impact[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(3): 7–17. [王路明, 刘艳辉, 赵世春, 等. 侧向低速冲击作用下钢管混凝土构件开裂评估模型及影响因素研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(3): 7–17.]
- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

Experimental Study on the Dynamic Response of New Layered Prefabricated Lattice Columns Under Lateral Impact

CHU Yunpeng^{1,2}, LI Qin¹, GU Song^{1,2}, ZHANG Chuntao^{1,2}, ZHANG Haichuan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, China)

Abstract:

Objective This study designs a new layered prefabricated lattice column as a protective support structure, which presents unique advantages in preventing and controlling rockfall disasters. Two groups of nine specimens are designed and fabricated for impact testing to investigate the impact resistance and failure mechanisms of the proposed layered fabricated lattice column under low-velocity and high-mass impacts. The influence of impact mass, impact height, and impact position on the dynamic response of the structure is analyzed by comparing the test results. A linear relationship between residual deformation and impact energy is established through curve fitting, providing empirical support for engineering applications.

Methods The dynamic response of a newly developed layered prefabricated lattice column under impact was systematically investigated through experimental testing. The test setup consisted of a track rod, a steel pipe fixed to a reaction wall, and an impact apparatus. A total of 9 specimens were examined under varying impact masses (60, 80, and 100 kg), impact heights (3, 4, and 5 m), and impact positions (near and far from the fixed end). The deformation characteristics and failure modes of the specimens were observed, and the impact time history curve, strain time history curve, and displacement time history curve were recorded using a high-speed camera, dynamic acquisition instrument, and quartz sensor. The influence of different test parameters on the failure mode, impact peak value, impact platform value, impact duration, strain peak value, plastic strain, maximum lateral displacement, and residual displacement was identified through comparative analysis of the experimental results. Finally, a linear relationship between the impact energy and the residual deformation in the range of 2 400 to 5 000 J was established through curve fitting.

Results and discussions The primary residual deformation of the new layered prefabricated columns after impact was local denting. When the specimen failed, the web member bent, and the bolts at both ends of the web member underwent a shear failure. Under identical impact energy conditions, the impact position has a significant effect on the dynamic response. Specimens impacted farther from the fixed end exhibited lower resistance, greater damage severity, and a more dispersed impact plateau value. With the increase in impact mass or impact height, both the impact peak value and impact duration increase. The mass has a more significant effect on the duration of the impact, while the impact velocity has a greater influence on the peak value of the impact. The residual deformation of the specimen increases with a rise in the impact energy. Specimens impacted near the fixed end exhibit larger residual displacements (up to 5.27 mm), whereas impacts away from the fixed end result in greater lateral displacements (up to 6.21 mm), as more energy is dissipated through vibration. The relationship between residual deformation and impact energy was established, with a deviation of less than 6% as determined by further regression analysis.

Conclusions When the impact energy reached 5 000 J, the bolts of the web members undergo shear failure due to insufficient shear strength. Impact point farther from the fixed end reduce impact resistance of structure. Impact mass mainly affects the impact duration, while impact velocity primarily affects the peak impact force. Impacted near the fixed end exhibit larger residual displacements, while impacted farther from the fixed end exhibit larger lateral displacements. The linear relationship between residual deformation and impact energy provides a quantifiable means to assess structural damage, with an error $\leq 6\%$, demonstrating practical applicability in engineering.

Key words: prefabricated lattice column; lateral impact; experimental investigation; damage deformation; dynamic response

(编辑 周璇)

引用格式: Chu Yunpeng, Li Qin, Gu Song, et al. Experimental study on the dynamic response of new layered prefabricated lattice columns under lateral impact[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(5): 14–23. [褚云朋, 李勤, 古松, 等. 侧向冲击下新型分层装配式格构柱动态响应试验[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(5): 14–23.]