

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0192

连续两次侧向冲击下格构式钢构件的力学性能研究*

陈鹏程¹, 尹小莉¹, 王琳², 路国运¹, 焦晋峰³

(1. 太原理工大学土木工程学院, 山西太原 030024;
2. 山西二建集团有限公司, 山西太原 030013;
3. 吕梁学院建筑系, 山西吕梁 033001)

摘要: 建筑结构在冲击载荷下的防护性能评价和优化设计是国防、土木等军民领域关心的重点问题。格构柱常作为工程结构中主要承重构件, 工程服役环境下不可避免地受到其他意外荷载的撞击。本文对格构柱沿不同冲击方向进行了 1:2 缩比二次冲击实验, 每次冲击能量相同, 并与相同总能量下的单次冲击格构柱进行了对比, 分析了格构柱在冲击荷载下的受力和变形特点。随后, 基于实验验证的有限元模型对足尺格构柱进行连续二次冲击模拟, 得到了在总能量不变的情况下遭受两次连续冲击的格构柱动力响应结果, 分析了不同能量分配对冲击力、残余位移和残余动能的影响。结果表明: 在相同总能量下, 单次冲击作用下格构柱的位移大于二次冲击, 通过数值模拟得到的最优能量分配可以将沿不同方向冲击的构件残余位移减少约 12%; 当格构柱第一次受到越大比例能量或第二次受到越小比例冲击能时, 柱子吸收的总能量越小。最终, 基于试验与数值模拟结果, 提出受损柱能承受第二次冲击的最大冲击速度, 研究结果可为此类荷载条件下格构钢柱的设计方法提供参考。

关键词: 格构柱; 二次冲击; 动力响应; 能量分配;

中图分类号: TU392.1

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Analysis of lattice steel columns under lateral continuous twice-impact

Chen Pengcheng¹, Yin Xiaoli¹, Wang Lin², Lu Guoyun¹, Jiao Jinfeng³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanxi Second Construction Group Co., Ltd
3. Department of Architecture, Lyuliang University, Lyuliang 033001, China)

Abstract: The evaluation of the protective performance and optimization of the design of the building structure under impact loading is a key issue of concern in the fields of national defense, civil engineering, and other military and civilian use. Lattice columns are often used as the main load-bearing components in engineering structures, and are inevitably impacted by other unintentional loads under engineering service environments. In this paper, 1:2 scaled-down secondary impact experiments were carried out on lattice columns along different impact directions with the same impact energy each time, and compared with single-impact lattice columns under the same total energy, to analyze the force and deformation characteristics of the lattice columns under the impact loads. Subsequently, based on the experimentally verified finite element model, a continuous secondary impact

*收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-11-19;

基金项目: 国家自然科学基金(12172244); 山西省基础研究计划资助项目

(202103021223105、202203021211184、202203021212256); 山西省住建厅科学技术计划项目(K20220319)

第一作者: 陈鹏程(1989-), 男, 博士, 讲师. E-mail: chenpengcheng@tyut.edu.cn;

通信作者: 路国运(1973-), 男, 博士, 教授. E-mail: luguoyun@tyut.edu.cn.

simulation was carried out on the foot-foot lattice column, and the results of the dynamic response of the lattice column subjected to two consecutive impacts with the same total energy were obtained, and the effects of different energy distribution on the impact force, residual displacement and residual kinetic energy were analyzed. The results show that under the same total energy, the displacement of lattice columns under a single impact is larger than that of a secondary impact. The optimal energy distribution obtained by numerical simulation can reduce the residual displacement of members impacted along different directions by about 12%; when the lattice column is subjected to a larger proportion of energy for the first time or a smaller proportion of impact energy for the second time, the total energy absorbed by the column is smaller. Finally, based on the results of experiments and numerical simulations, the maximum impact velocity at which the damaged column can withstand a second impact is proposed, and the results of the study can provide a reference for the design method of lattice steel columns under such loading conditions.

Keywords: Lattice columns; Secondary impact; Dynamic response; Energy distribution;

格构柱具有自重轻、抗弯抗扭性能好、稳定性高及空间布置更灵活的优点^[1, 2], 常作为工程结构中主要承重构件, 主要用于有重型吊车的厂房和大型公共建筑等场合。除了承受静力荷载外, 结构在其整个生命周期内会不可避免地受到其他意外荷载的作用, 如在工厂中可能会遭遇起吊物的碰撞^[3]、立体车库车辆的撞击^[5]、桥墩的意外撞击等^[6]。而在实际工程中, 同一承重柱受到类似的撞击可能不止一次^[7], 因此, 评估撞击后柱子的受损情况并制定相应的处理方法显得尤为重要。对于撞击轻微变形的构件, 其力学性能几乎没有变化, 往往没有必要进行更换重建, 但若撞击对构件造成了一定的破坏, 结构产生非线性大变形, 且不断积累损伤, 其后续承载力受到严重影响甚至可能发生连续倒塌。故而, 对冲击荷载下结构构件的动力性能进行研究, 进一步对结构进行合理化设计, 以提高结构抗连续倒塌能力就显得尤为重要。

太原理工大学的李世强等人^[8]通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元计算软件, 对遭受爆炸荷载的格构式钢柱的动态行为进行了数值模拟分析。该模拟考虑了应变率效应、引入了失效准则, 探究了不同缀板高度对格构柱变形形态和破坏模式的影响。结果显示在爆炸冲击下, 钢柱端部易发生塑性变形和剪切破坏; 增加缀板高度可以提高格构柱抗爆能力, 但也可能导致焊缝失效。崔凯等^[9]使用 Abaqus/Explicit 有限元软件对一端固支一端自由的缀板格构柱进行侧向冲击, 分析了冲击位置和冲击能量对格构柱抗冲击性能的影响。结果表明, 冲击位置较高时, 格构柱易发生弯曲破坏, 冲击位置较低时, 格构柱易发生剪切破坏; 且冲击位置越靠近自由端, 格构柱的变形越大, 抗冲击能力越弱。崔玲娟等^[10, 11]进行了不同冲击能量下缀板格构柱的侧向冲击试验, 试验结果显示冲击能量由格构柱冲击区局部变形及构件整体变形耗散, 残余变形、冲击力峰值和持续时间随冲击能量增大而增大, 而冲击力平台值受影响较小; 之后运用有限元软件进行了参数化分析, 冲击能量、冲击位置、边界条件和轴压比对缀板格构柱的冲击性能有显著影响; 平台冲击力 (F_{plateau}) 和能量吸收能力 (EAC) 可作为评估缀板格构钢柱在横向冲击下性能指标。

类似的桁架结构在动态荷载下的行为研究国外学者也取得了部分进展, Jones 等人^[12]对固支的矩形截面的金属格栅结构进行横向撞击。Shen 和 Jones^[12]提出了一种近似的理论分析方法, 分析了固支梁格栅结构被横向撞击后的动态塑性响应, 并将刚塑理论预测结果与大质量块撞击格栅的最新实验结果以及准静态分析方法的预测结果进行了比较。Kormi 等^[14]利用 ABAQUS 有限元软件对金属 (铝和钢) 梁格栅结构在冲击载荷作用下的响应进行了数值研究, 考虑两种不同类型的模型, 一种使用空间梁, 另一种使用三维实体单元。Dac Dung Truong 等^[15]对格栅结构进行了重复冲击试验, 还提出了一种简单的分析方法来预测格栅结构在受到重复质量冲击时的损坏演变。

上述文献针对缀板式格构柱及桁架结构在冲击 (爆炸) 荷载作用下的失效模式和变形形态进行初步研究, 而对缀条式格构柱冲击响应研究较少, 鉴于格构式钢柱的使用场景, 越来越多的该类结构由

于多次碰撞引发安全问题，因此有必要对其多次撞击性能展开系统性研究。本文对格构柱进行了单次及连续两次同位置的侧向冲击试验，得到了柱子的变形模式和响应过程。随后，通过已验证的有限元模型分析在总能量不变的情况下遭受两次连续冲击的格构柱动力响应，并讨论了不同能量分配对冲击力、残余位移和残余动能的影响，最后，基于试验与数值模拟结果，提出受损柱能承受第二次冲击的最大冲击速度。

1. 试验概况

本试验选用缀条角钢格构柱，采用 1: 2 缩比试验，柱肢型号 L 30×4，缀条型号 L 20×3，试件截面宽度 180mm，总长度 1800mm，有效计算长度 1200mm，上、下端板均采用 20mm 厚方形钢板，尺寸为 220mm×220mm，共设计 4 个试件：试件钢材采用 Q235B，缀条与柱肢之间为满焊，焊接方法采用电弧焊，E43 型焊条，焊接连接形式为角焊缝，焊脚尺寸 3mm。柱肢与端板满焊，最小焊脚尺寸 6mm。试件的形式如图 1 所示。

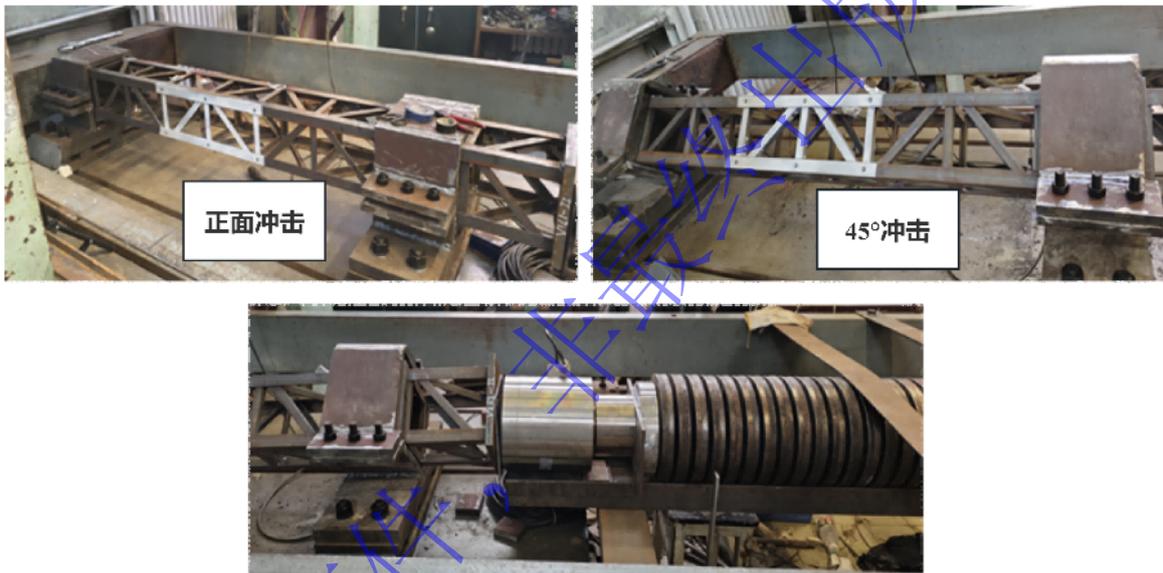


图 1 格构柱尺寸及示意图

Fig. 1 Lattice Column Dimensions and Diagram

进行试验之前，初步计算了合理的落锤高度，以防止立柱的损坏太小而无法观察，或在第一次冲击中太严重而无法承受下一次冲击。两次冲击总高度为 2m，冲击总能量为 5096J，设置两次冲击速度相同，即第一次落锤高度为 1m，第二次落锤高度为 1m，并与单次冲击高度 2m 的试件进行比较，冲击位置分为正面冲击和沿 45° 侧面冲击，如图 2 所示。详细信息在表 1 列出。试件编号规则如下：以 V1L1-II 为例：V 代表该试件的冲击速度，后面数字 1 为 4.43m/s、3 为 6.26m/s，L 代表冲击位置，后面数字 1 为正面、2 为沿 45° 方向，II 代表连续两次冲击，如果没有该罗马数字则为单次冲击。

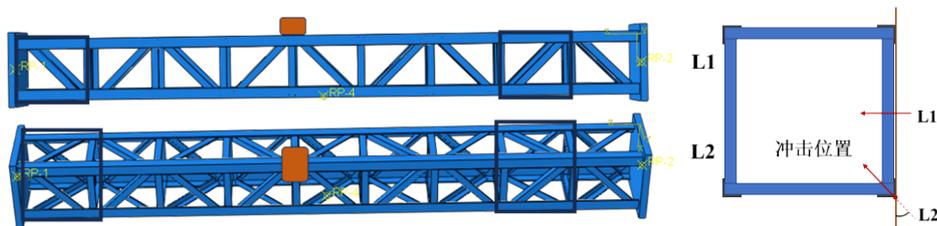


图2 撞击位置示意图

Fig. 2 Schematic of impact location

表1 试件连续二次冲击试验条件

Table 1 Continuous secondary impact test conditions of specimens

试件编号	落锤质量/kg	每次冲击高度/m	冲击位置	冲击能量/J	每次冲击速度/(m/s)	轴压比
V1L1-II	260	1.0-1.0	正面	2548	4.43-4.43	0.25
V3L1	260	2.0-0.0	正面	5096	6.26-0.00	0.25
V1L2-II	260	1.0-1.0	侧面	2548	4.43-4.43	0.25
V3L2	260	2.0-0.0	侧面	5096	6.26-0.00	0.25

1.1 试验结果

1.1.1 变形形态

本小节探究试件(V1L1-II和V1L2-II)在第一次碰撞后,受损格构柱在第二次冲击时的变形。图3显示了高速摄像记录的正面二次冲击和侧面二次冲击的响应过程,当格构柱受到第一次正面冲击后,左侧第一格间受压斜缀条已发生明显屈曲,柱肢发生微小弯曲变形,此时整个柱子损伤较小,未出现明显破坏特征。随着第二次撞击锤体与格构柱冲击面接触,左侧第一格间受压斜缀条屈曲变形逐渐增大,第二格间受拉斜缀条焊接处断裂,冲击区斜缀条开始弯曲变形,柱子整体侧向位移越来越大。

当格构柱受到沿45°侧面冲击时,其损伤表现为明显的局部变形。在第一次碰撞后,观察到受撞击柱肢向冲击方向发生弯曲变形,冲击区斜缀条向内屈曲。在第二次碰撞中,受撞击柱肢局部弯曲变形加剧,出现明显的锤头形状的凹痕,两侧柱肢既有平面内变形也有平面外变形,且伴随着局部的突出或凹陷。柱子整体侧向变形较小,冲击区外的区域受落锤撞击影响较弱,缀条未发生明显拉伸断裂或受压屈曲。

Comment [MG1]: V3 代表什么速度条件?

Comment [2]: 3 为 6.26m/s, 已在文中标出

Comment [MG3]: 此处试件的试验方式与本段描述过程不符! 或者是此处试件编号定义有问题。

Comment [4]: 编号应为 V1L1-II 和 V1L2-II

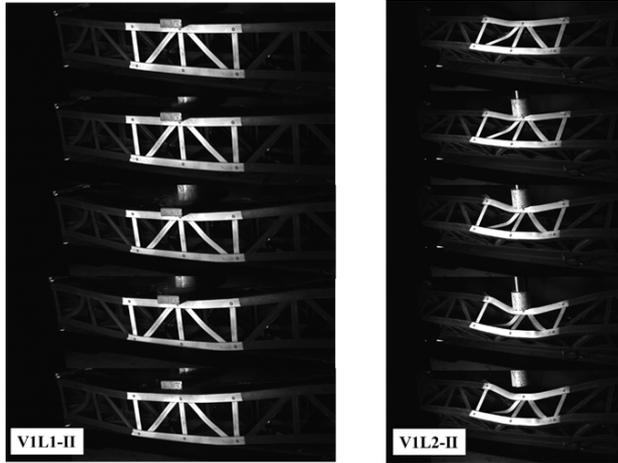


图 3 V1L1-II 和 V1L2-II 二次冲击响应过程

Fig. 3 Secondary impact response process of V1L1-II and V2L1-II

图 4 描绘了单次与二次冲击侧向位移随时间的变化曲线，试件 V1L1-II 两次冲击后总侧向位移为 61.92mm，试件 V3L1 以相同能量单次冲击后侧向位移为 78.36mm；试件 V1L2-II 两次冲击后总侧向位移为 87.28mm，试件 V3L2 以相同能量单次冲击后侧向位移为 91.72mm。可以看出，在相同冲击能量下，单次撞击造成的损伤大于连续两次冲击，因此依据此理论可以简单判断受损柱第二次所能承受的最大冲击能量，避免造成结构破坏。

Comment [MG5]: 此处试件编号与图片中编号不一致!

Comment [6]: 编号应为 V1L1-II 和 V1L2-II

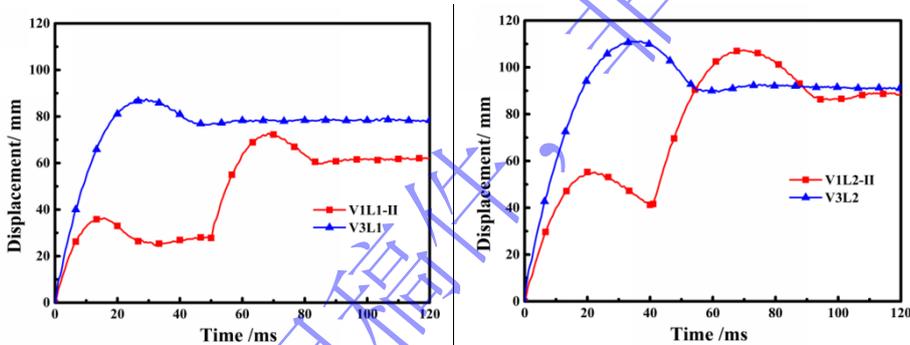


图 4 单次与二次冲击位移时程曲线

Fig. 4 Displacement time history curves of single and secondary impact

1.1.2 试验过程分析

为了便于统一评估冲击响应过程中的冲击力，引入了平均冲击力 F_{ave} ，其计算公式如下：

$$F_{ave} = \frac{I_p}{t_d} \quad (2)$$

$$I_p = \int_0^t F(t) dt \quad (3)$$

其中 I_p 为冲击脉冲，由冲击力-时间曲线得到， t_d 为冲击持续时间，图 5 绘制了 V1L1-II 和 V1L2-II 的冲击力-时间曲线，V1L1-II 和 V1L2-II 两次冲击高度相同，冲击速度均为 4.43m/s。图 5 中的实验结果表明，无论是在第一次碰撞还是第二次碰撞中，V1L1-II 和 V1L2-II 之间的冲击脉冲 I_p 相对接近，分别相差 1.29% 和 3.30%。然而，正面冲击 L1 和侧面冲击 L2 之间的平均冲击力 F_{ave} 显著不同，V1L1-II 第一次撞击平均力比 V1L2-II 高约 5.34%，V1L1-II 第二次撞击平均力比 V1L2-II 高约 10.33%。这是因为正面冲击主要是四个肢件一起消耗吸收冲击能量，柱子的抗弯刚度更强，抗冲击性能更好。这导致了较短的冲击持续时间 (t_d)，得到了较高的平均力。

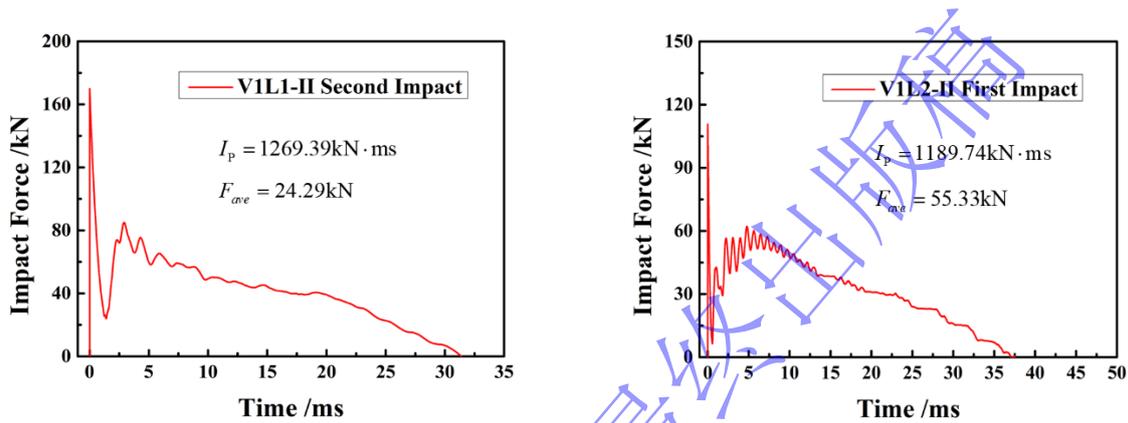
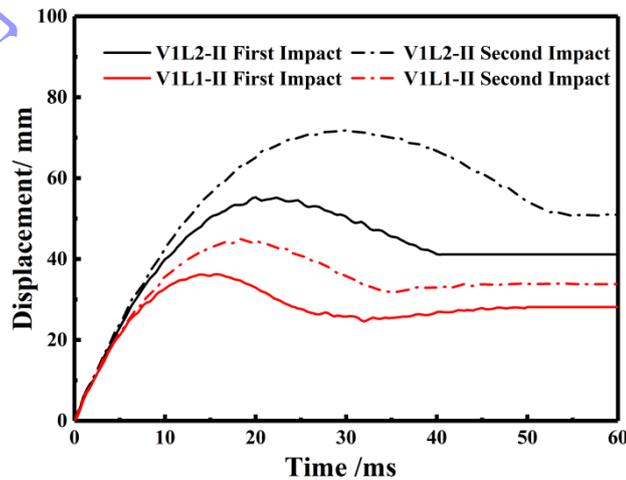


图 5 V1L1-II 和 V1L2-II 冲击力时程曲线

Fig. 5 Impact force time history curves of V1L1-II and V2L1-II

第二次撞击与第一次撞击相比，冲击脉冲相近，而冲击响应时间显著增加，平均增加 10s 左右，这是由于第一次碰撞造成的变形损伤削弱了格构柱的刚度，在吸收相同的冲击能量时，动态响应时间增加，侧向位移增大，如图 6 所示。两个试件有相同的变化规律，即第二次冲击后测得的侧向位移比第一次冲击的要大。这是由于形状变化削弱了局部刚度，虽然第一次冲击会导致材料的应变硬化，但格构柱在本试验特定条件下此效应弱于形状改变带来的负面影响，增加了残余变形。试件 V1L1-II 第二次碰撞侧向位移较第一次增加 6.46mm，增幅为 23.35%；试件 V1L2-II 第二次碰撞侧向位移较第一次增加 11.19mm，增幅为 26.71%，这表明侧面冲击时，第一次撞击导致的局部变形损伤使得第二次冲击的能量消耗更集中在局部区域，会造成第二次撞击更严重的动态响应。



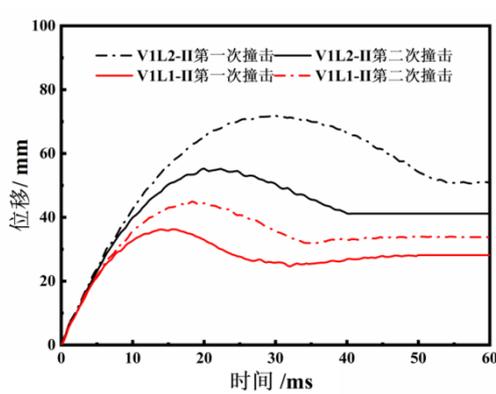


图 6 V1L1-II 和 V1L2-II 位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time history curves of V1L1-II and V2L1-II

Comment [MG7]: 此处得到的位移时程曲线是指代沿落锤竖向冲击方向的位移? 还是总体位移合成曲线?

1.2 有限元结果与试验结果对比

1.2.1 模型建立

格构柱建模采用三维八节点六面体 C3D8R 单元, 选择线性减缩积分, 不易发生剪切自锁现象。同时应克服沙漏问题, 沙漏能量即伪应变能不能超过内能的 10%。边界条件通过参考点应用, 使用“点-面耦合”与端板连接。为了更好的模拟落锤冲击试验中的边界条件, 建立格构柱两端夹具模型, 夹具约束条件采用完全固定来限制柱子 X 与 Y 方向位移, 未施加轴力的一端约束 Z 方向平移自由度及所有旋转自由度, 以实现一边固支一边滑动的边界条件, 如图 7 所示。为了提高计算结果的准确性和计算速度, 将格构柱模型网格细化, 并进行收敛性分析以此得到合适的网格尺寸, 缀材 15mm 的网格尺寸和柱肢 15mm 的网格尺寸可以得到可靠的结果和合理的计算时间。材料模型考虑应变率效应, 由于 C-S 模型概念明确, 以较为简单的形式考虑了应变率的影响, 在工程领域低速碰撞中广泛使用。因此, 本研究钢材应变率采用 C-S 模型, 表达式如 (3) 所示, D 和 P 分别取 $6844s^{-1}$ 和 $3.91^{[16]}$ 。

$$\sigma_{dl} = \sigma_{st} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{D} \right)^P \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

二次冲击采用设置格构柱初始状态实现。初始状态的导入需要前序分析的 res. 文件作为输入, 而该文件是重启 (Restart) 设定后的输出结果。设定完重启参数后进行第一次冲击, 得到 res. 文件。复制前序模型, 以保证所有节点、单元信息一致, 初始状态的导入可以一一对应。在荷载 (Load) 模块中设置预定义场, 找到初始状态, 并设定前序 Job 分析的特定分析步和对应增量作为导入。这样第二次冲击时初始状态对应第一次冲击后的结果。

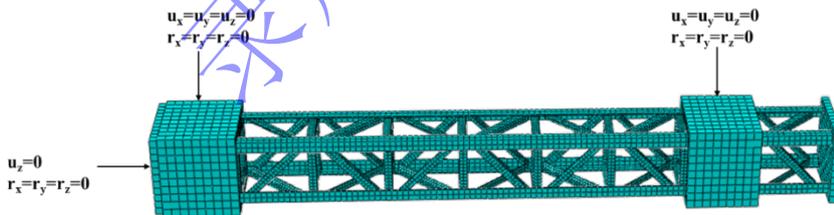


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

1.2.1 结果对比

图8显示连续二次冲击后数值模拟与试验的试件变形形态对比。可以观察到无论是VIL1-II还是VIL2-II模拟试件变形特征与试验结果相同。如图9模拟与试验冲击力-时间曲线和冲击点位移-时间曲线所示,数值计算的冲击力峰值与冲击力平台值相比试验结果普遍较大,冲击点侧向位移更小,冲击持续时间更短。VIL1-II冲击力平均值实验结果与数值结果的比率约为0.88,位移实验结果与数值结果差值约为4mm;VIL2-II平台冲击力实验结果与数值结果的比率约为0.85,位移冲击力实验结果与数值结果的差值约为5mm。冲击力值与落锤与格构柱接触刚度有关,模拟与试验结果充分说明试验试件刚度较小,这是由于试验试件有加工误差、支座约束误差、测量误差等。除此之外,相同速度的第二次冲击模拟与试验的差值明显大于第一次冲击的结果,说明上述误差可以在第二次冲击中累积。然而数值分析中试件二次冲击的失效模式和响应仍与试验结果一致,这表明使用数值模拟来预测格构柱二次冲击结果是可以接受的。

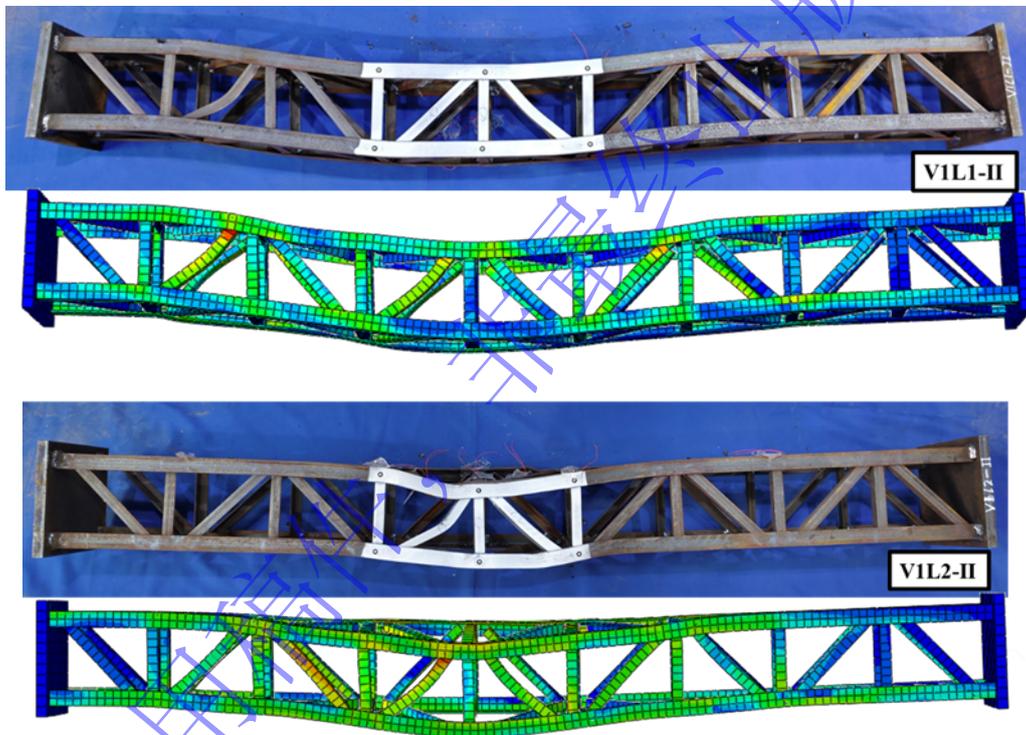


图8 连续二次冲击后模拟与试验变形对比

Fig. 8 Comparison of deformation between simulation and test after continuous secondary impact

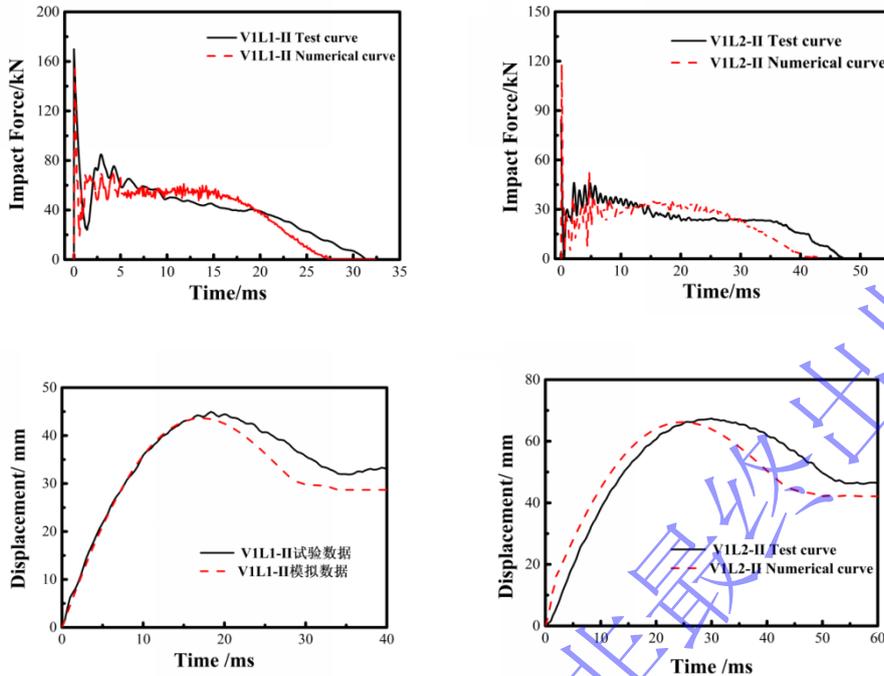


图9 第二次冲击模拟与试验结果对比

Fig. 9 The comparison between the second impact simulation results and the test results

Comment [MG8]: 此处试验得到的位移时程曲线与图5中相应试件的位移时程曲线是否是同一条曲线? 两者似乎存在差异。

2. 不同能量分配的连续两次冲击柱的数值模拟

本节将进一步研究格构柱在同一位置两次冲击下的抗冲击性能。采用上述模拟方法对某一厂房的足尺格构柱进行建模。格构柱的柱肢和缀材由等边角钢制成，柱肢、斜缀条和横缀条尺寸分别为80mm×7mm、50mm×5mm、63mm×3mm，钢柱的横截面尺寸为750mm×750mm，钢柱高度为10m，上下端板由厚25mm方钢板制成，钢板尺寸为1000mm×1000mm。一般来说，冲击能量直接影响冲击柱的损伤程度。本研究在总能量不变的情况下对两次冲击进行了数值评估，揭示了能量分配对格构柱损伤的影响机制，并提出了受损格构柱的评估方法。在本节中，格构柱模型的冲击条件和结果见表2，其中CS表示正面冲击，CL表示侧面45°冲击。以CS-F10-S90为例，“F10”代表占总能量10%的第一次冲击，“S90”代表占总能量90%的第二次冲击。数值分析中使用的总能量根据试件尺寸与实验中使用的能量成正比增大，并且通过改变冲击速度来调整每次碰撞的能量分配。

表2 不同能量分配数值模拟结果

Table 2 Numerical simulation results of specimens with different energy distribution

试件编号	$E_{1st}(kJ)$	$E_{2nd}(kJ)$	$v_{1st}(m/s)$	$v_{2nd}(m/s)$	$T_{1st}(ms)$	$T_{2nd}(ms)$	$F_{1st}(kN)$	$F_{2nd}(kN)$	$w_{res1}(mm)$	$w_{res2}(mm)$
CS-F0-	0	154.57	0	5.56	0	165.38	0	425.46	0	260.51

S100										
CS-F10-S90	15.46	149.11	1.76	5.46	87.00	154.83	275.77	420.91	35.00	254.35
CS-F25-S75	38.64	115.93	2.78	4.82	108.38	149.50	335.38	418.96	79.40	243.84
CS-F50-S50	77.29	77.29	3.93	3.93	132.50	133.00	380.89	403.80	142.99	238.74
CS-F75-S25	115.93	38.64	4.82	2.78	150.50	111.00	406.92	356.24	199.51	237.88
CS-F90-S10	149.11	15.46	5.46	1.76	163.00	97.50	415.33	294.04	226.36	229.15
CL-F0-S100	0	154.57	0	5.56	0	183.75	0	392.92	0	277.46
CL-F10-S90	15.46	149.11	1.76	5.46	111.00	179.25	225.09	381.63	41.85	266.90
CL-F25-S75	38.64	115.93	2.78	4.82	134.00	165.00	283.03	367.59	90.70	254.62
CL-F50-S50	77.29	77.29	3.93	3.93	159.00	144.75	329.92	352.96	157.31	249.15
CL-F75-S25	115.93	38.64	4.82	2.78	175.00	127.50	352.35	323.04	211.04	244.72
CL-F90-S10	149.11	15.46	5.46	1.76	184.38	116.25	372.81	266.41	238.61	242.79

注: E_{1st} 、 E_{2nd} 分别是第一次和第二次冲击的动能; v_{1st} 、 v_{2nd} 分别是第一次和第二次冲击的速度; T_{1st} 、 T_{2nd} 分别是第一次和第二次冲击的持续时间; F_{1st} 、 F_{2nd} 分别是第一次和第二次冲击的平均力, w_{res1} 、 w_{res2} 分别是第一次和第二次冲击的沿x方向位移。

2.1 能量分配对冲击力的影响

图 10 显示了 CS 和 CL 的冲击力-时间曲线, 第一次和第二次碰撞的平均冲击力 F_{1st} 和 F_{2nd} 在表 2 中列出。CS 和 CL 在不同程度的损伤下的平均冲击力变化规律相同, 以 CS-F90-S10 和 CL-F90-S10 为例进行比较, 格构柱受到总能量 10% 的冲击能量作为第二次冲击时, 即在此冲击之前已受损, 格构柱的平均冲击力显著增加。CS 平均冲击力从 275.77kN 增加到 294.04kN, 增幅为 6.6%; CL 平均冲击力从 225.09kN 增加到 266.41kN, 增幅为 18.4%。虽然钢材在损伤后硬化, 但严重的撕裂和变形仍然会削弱局部刚度, 材料应变硬化对柱子局部刚度的影响大于其形状变化的负面影响, 最终导致平均冲击力增加。这种现象也出现在 CS 和 CL 的其他计算情况中。不同的是, CL 第二次平均冲击力增幅较 CS 大, 说明 CL 在第二次冲击其抗冲击性能优于 CS 时。然而 CS 两次冲击力值均大于 CL, 根据 CL 和 CS 冲击力时程曲线变化趋势可以得到 CS 位置抗冲击性能较好, 这种差异是由于柱的不同变形模式造成的。

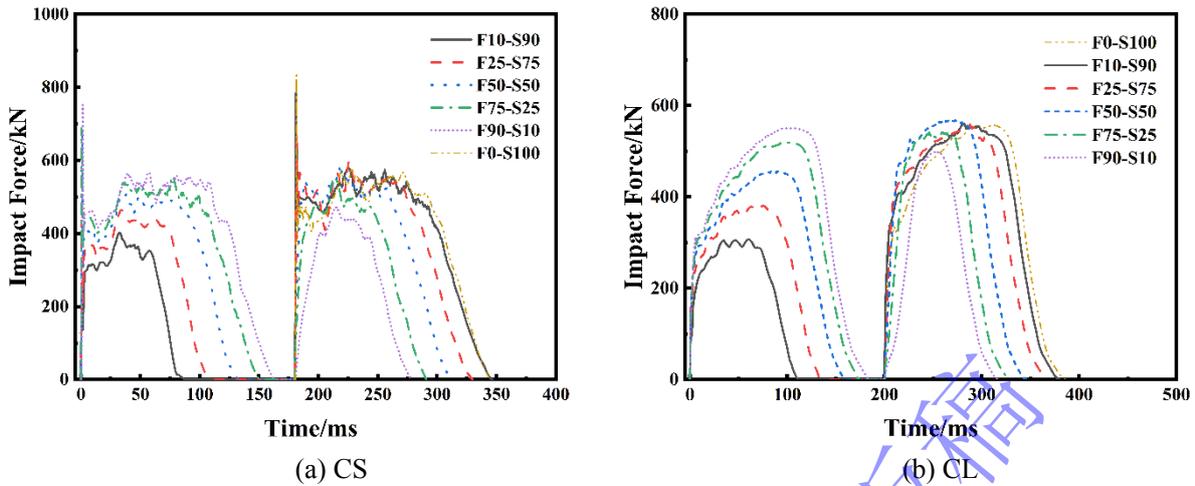


图 10 CS 和 CL 的冲击力-时间曲线
Fig. 10 The impact force-time curves of CS and CL

2.2 能量分配对位移的影响

图 11 显示了 CS 和 CL 的位移-时间曲线。相同冲击总能量下，首次冲击能量分配越大，二次冲击后的残余位移越小。同时在 CS-F90-S10 和 CL-F90-S10 中观察到，第二次碰撞造成的永久位移分别为 2.79mm 和 4.18mm，即第二次碰撞引起的位移在碰撞结束时几乎全部恢复。这种现象被称为伪安定，其他学者在关于钢板、钢梁、钢桁架反复冲击的研究中也观察到了这种现象^[7, 17]。随着第一次冲击能量的增大，格构柱的变形在增大，二次吸收的塑性能在减小，当碰撞次数达到一定量且碰撞能量小于柱子能够储存的最大弹性能时，格构柱的挠度将不会继续增大，即出现伪安定现象。所以，当无损伤柱第一次承受相同的冲击能量（10%）时，发生的位移不会完全恢复，例如 CS-F10-S90 和 CL-F10-S90。上述情况表明，格构柱受到刚体冲击后，结构塑性变形增加，其针对下一次冲击的可恢复性得到改善。如图 11 所示，承受相同比例冲击能量时，第二次碰撞产生的永久位移小于第一次碰撞产生的永久位移。这进一步表明，在总能量不变的情况下，合理分配冲击能量可以减轻柱体的最终损伤。根据表 2 中的数据，最优分配可以将 CS 和 CL 的残余位移减少约 12%。

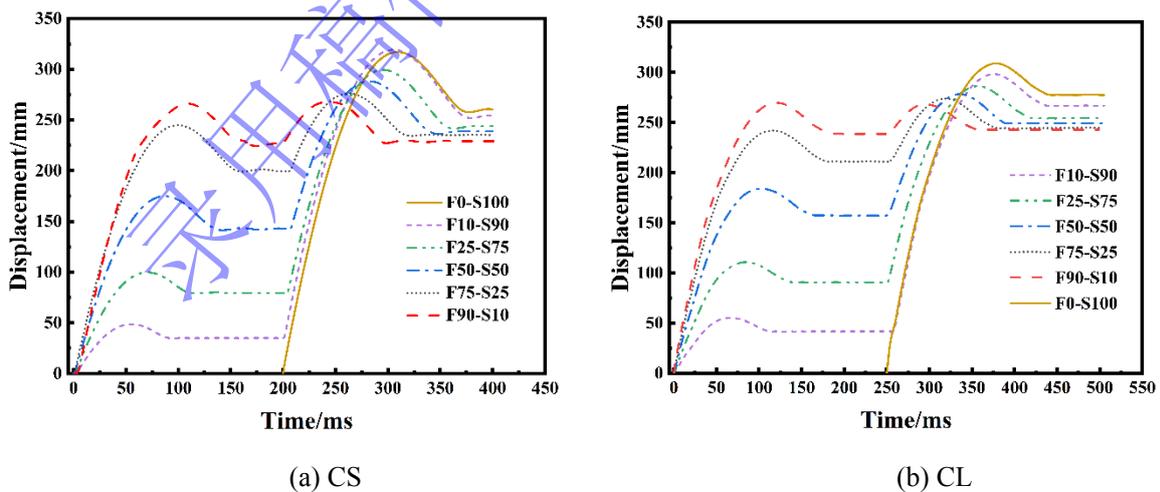


图 11 CS 和 CL 的侧向位移-时间曲线
Fig. 11 The lateral displacement-time curves of CS and CL

2.3 能量分配对格构柱吸能能力的影响

当格构柱没有被完全破坏时，刚体在碰撞柱子后会发生反弹，这是由柱子的弹性变形恢复引起的。这种现象说明冲击结束时，能量系统中仍存在一些残余动能。刚体的残余动能可以反映格构柱结构吸收冲击能的效率，刚体初始动能与残余动能的差值就是格构柱在冲击过程所吸收的总能量，较高的残余动能意味着柱子的能量消耗效率较低，反之亦然。图 12 分别列出了两次碰撞后柱子吸收的冲击能，CS 和 CL 总吸收能量相差很小，且当总能量以单次冲击输入时，吸收能量最高。第一次冲击能占比越高，柱子吸收的总能量越小。对于 CS-F90-S10，两次撞击吸收总能量为 137kJ，占总能量的 88.4%，当只有一次碰撞（CS-F0-S100）时，柱子吸收总能量为 144kJ，其占 92.9%。对于 CL-F90-S10 和 CL-F0-S100，吸收能量分别占总能量的 89.0%和 94.2%。同时相同的比例冲击能，作为第一次冲击时，格构柱吸收能量较大，即碰撞后，柱子吸收能量能力会下降。综上所述，在总冲击能量不变的情况下，柱子遭受严重碰撞后，后续碰撞次数的增加可能会导致吸收能量的能力降低。

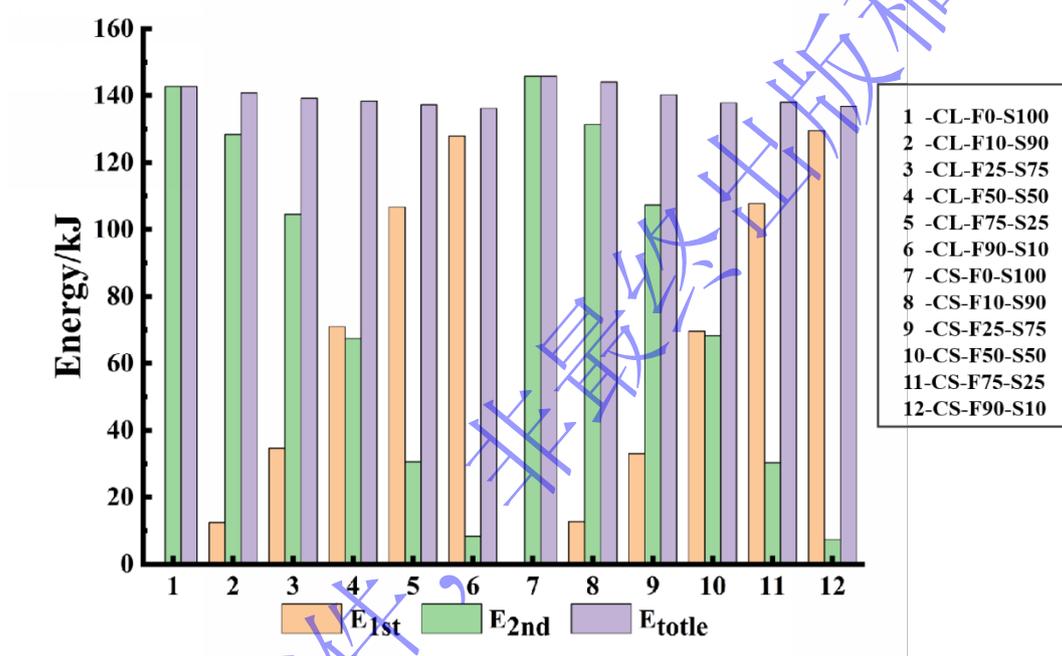


图 12 CS 和 CL 两次撞击吸收的能量

Fig. 12 The energy absorbed by the double impact of CS and CL

2.4 受损格构柱的评估方法

从上述连续二次冲击试验可以得到，相同能量单次冲击造成的格构柱侧向位移大于连续二次冲击，正面冲击与侧面冲击差值分别是 16.44mm 和 4.44mm。后续连续二次冲击足尺格构柱数值模型进一步分析得到，第二次冲击时，格构柱的平均冲击力显著增加，且两次冲击之间的能量分配可以减少永久位移约为 2.4%至 12.0%。这是由于第一次冲击后格构钢柱发生形状变形、材料硬化。由于柱子未完全破坏，刚体二次冲击之后仍有部分动能，总撞击能量相同时，单次撞击柱子吸收的能量大于两次撞击柱子吸收的能量。因此，当两次冲击的冲击能量之和小于单次冲击的冲击能量时，就可以确保两次冲击造成的格构柱损伤程度小于单次冲击的损伤程度。可通过以下公式表示：

$$E_{1st} + E_{2nd} < E_{totle} \quad (4)$$

其中 E_{1st} 和 E_{2nd} 分别为格构柱承受的第一次和第二次冲击能量； E_{totle} 为格构柱能承受的最大单次冲击能量。所以当柱子已经受到第一次冲击并损坏时，可以根据柱子能承受的最大单次冲击能计算出第二次冲击柱子能承受的最大冲击速度：

$$v_{2nd} = \sqrt{\frac{2(E_{totle} - E_{1st})}{m}} \quad (5)$$

如果下一次冲击能量小于设计的第二次冲击能量 E_{2nd} ，则可以保证结构安全。

3. 结论

本文对格构柱进行连续二次冲击试验，冲击位置分别为正面和侧面 45° ，并与同能量下的单次冲击进行了对比。之后使用有限元软件 Abaqus 模拟，验证数值模拟方法的有效性。除此之外，分析了在相同冲击能量下，连续两次冲击对格构柱冲击力、位移以及能量吸收的影响。得出以下结论：

(1) 进行格构柱连续二次落锤冲击试验，第二次冲击时柱子的变形特征及破坏模式与第一次冲击具有相同的变化规律。相同比例能量冲击第二次冲击力降低，侧向位移增大，这是由于形状变化削弱了局部刚度，虽然第一次冲击会导致材料的应变硬化，但格构柱在本试验特定条件下此效应弱于形状改变带来的负面影响，增加了残余变形。相比于正面冲击，沿 45° 侧面冲击时，第一次撞击导致的局部变形使得第二次冲击的能量消耗更集中在局部区域，会造成第二次撞击更严重的损伤。对比第二次冲击试验与模拟结果，误差可以在第二次冲击中累积。然而数值分析中试件二次冲击的失效模式和响应仍与试验结果一致，这表明使用数值模拟来预测格构柱二次冲击结果是可以接受的。

(2) 进行足尺格构柱数值模拟分析，可以得到格构柱的冲击平均力显著增加，虽然钢材在损伤后硬化，但严重的撕裂和变形仍然会削弱局部刚度，材料应变硬化对柱子局部刚度的影响大于其形状变化的负面影响，最终导致平均冲击力增加。冲击力的变化受第一次冲击的形状变形、材料硬化和受冲击柱的截面特性等因素影响，承受相同比例冲击能量时，第二次碰撞造成产生的永久位移小于第一次碰撞造成产生的永久位移。

(3) 试验与模拟结果都得到，在相同总能量下，单次冲击的位移大于二次冲击。且在数值模拟中观察到“伪安定”现象，最优分配可以将 CS 和 CL 的残余位移减少约 12%。总能量以单次冲击输入时，吸收能量最高。当格构柱第一次受到越大比例能量或第二次受到越小比例冲击能时，柱子吸收的总能量越小。此外，基于试验与数值模拟结果，提出受损柱能承受第二次冲击的最大冲击速度，为后续柱子加固或更换提供参考依据。

参考文献

- [1] El Aghoury M A, Salem A H, Hanna M T, et al. Experimental investigation for the behaviour of battened beam-columns composed of four equal slender angles[J]. Thin-Walled Structures. 2010, 48(9): 669-683.DOI: 10.1016/j.tws.2010.03.007
- [2] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土格构柱发展和研究[J]. 福州大学学报(自然科学版). 2008(04): 585-591.
- [3] Ferrer B, Ivorra S, Segovia E, et al. Tridimensional modelization of the impact of a vehicle against a metallic parking column at a low speed[J]. Engineering Structures. 2010, 32(8): 1986-1992.DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.032
- [4] Gilbert B P B G, Rasmussen K J R. Determination of accidental forklift truck impact forces on drive-in steel

- rack structures[J]. *Engineering Structures*. 2011(No.5): 1403-1409.DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.10.022
- [5] Zhou X, He Y, Xiang S, et al. Experimental and numerical studies on structural response of steel garage subjected to vehicular collision[J]. *Structures*. 2022, 37: 933-946.DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2022.01.068
- [6] 郭玉旭, 席丰, 谭英华, 等. 超高车辆与箱梁立交桥碰撞简化计算模型评估分析[J]. *爆炸与冲击*. 2023, 43(3): 100-114.
- [7] Xiang S, He Y, Zhou X, et al. Continuous twice-impact analysis of steel parking structure columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021, 187: 106989.DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.106989
- [8] 李世强, 贾昊凯, 吴桂英. 格构式钢柱在爆炸荷载下的动力响应及破坏模式: 第十届全国冲击动力学学术会议[Z]. 中国山西太原: 2011.
- [9] 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(04): 1551-1557.
- [10] Cui J, Wang R, Zhao H, et al. Built-up batten steel columns under impact loading: Experimental and numerical analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021: 106515.DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106515
- [11] 崔娟玲, 郭昭胜, 王蕊. 格构式钢柱抗侧向撞击性能的试验研究[J]. *振动与冲击*. 2015, 34(21): 129-135.
- [12] Jones N, Liu T, Zheng J J, et al. CLAMPED BEAM GRILLAGES STRUCK TRANSVERSELY BY A MASS AT THE CENTER[J]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF IMPACT ENGINEERING*. 1991(No.3): 379-399.
- [13] Qin S W, Jones N. Dynamic response of a grillage under mass impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 1993(No.4): 555-565.
- [14] Kormi K, Shaghouei E, Duddell D A. Finite element examination of the dynamic response of clamped beam grillages impacted transversely at their centres by a rigid mass[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 1994(No.5): 687-697.
- [15] Truong D D, Shin H K, Cho S. Repeated lateral impacts on steel grillage structures at room and sub-zero temperatures[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 2018(No.0): 40-53 .DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.007
- [16] Abramowicz W, Jones N. Dynamic axial crushing of square tubes[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 1984, 2(2): 179-208.
- [17] Xu He A B, C. Guedes Soares A B. Experimental study on the dynamic behavior of beams under repeated impacts[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 2021(No.0): 103724.DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103724