

H 型钢柱撞击全过程力学性能分析与损伤评估*

颀宗旺^{1,2}, 王蕊^{1,2}, 王宇恒^{1,2}, 赵晖^{1,2}, 李倩^{1,2}

(1. 太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024;

2. 土木工程防灾减灾与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: H 型钢柱在工业厂房、停车场等应用时容易遭受吊装荷载和车辆撞击作用。基于上述背景, 在前期试验研究基础上, 通过有限元开展 H 型钢柱撞击下及撞击后力学性能全过程分析。首先通过机理分析, 获得不同轴压比响应下试件的变形特征、应力与耗能发展。结果表明, 侧向撞击下 H 型钢柱以整体变形为主, 上翼缘与腹板分别发生局部凹陷与平面外屈曲; 撞击力时程曲线呈现明显的平台段, 预加轴力明显削弱试件的抗撞能力。其次, 建立 108 个参数分析模型, 重点研究荷载参数 (撞击质量 m 、撞击速度 v 与轴压比 n)、材料参数 (屈服强度 f_y) 与几何参数 (截面积 A 与试件长度 L) 对撞击力、撞击变形和剩余承载力的影响规律。最后, 基于响应面法提出了多因子交互影响的撞击下整体与局部变形及撞击后剩余承载力预测公式, 可用于 H 型钢柱撞击全过程损伤评估与设计。

关键词: H 型钢; 抗撞性能; 剩余承载力; 有限元分析; 撞击力平台值; 全过程分析

中图分类号: TU391 国际学科代码: 13015 文献标志码: A

Analysis of mechanical performance and damage evaluation of H-section steel columns during whole impact process

XIE Zongwang^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, WANG Yuheng^{1,2}, ZHAO Hui^{1,2}, LI Qian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024 China;

2. Shanxi Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control, Taiyuan 030024, China)

Abstract: H-section steel columns have been widely employed in industrial buildings and parking lots, etc., which are vulnerable to crane-loading or vehicle collisions. Based on above background, the lateral impact model and residual load-carrying capacity model were established using Abaqus finite element software to analyze the performance of H-section steel columns during and after impact loading, following previous experimental studies. Firstly, the working mechanism, including the deformation characteristics, stress evolution and energy dissipation, was analyzed. Results indicate that under impact loading, the deformation pattern is mainly dominated by the global deformation, with the local deformation of the upper flange and out-of-plane buckling of web. The time history curve of impact force presents an obvious plateau phase, and the existence of the pre-axial loading obviously reduces the impact resistance of the specimens. In general, H-section steel columns exhibit favorable ductility performance during impact loading. Subsequently, a total of 108 parametric models were developed, and the influences of load parameters (impact mass, impact velocity and axial load ratio), material parameter (steel yield strength) and geometric parameters (sectional area and specimen length) on the impact force, deformation, and residual load-carrying capacity were emphatically studied. The results show that as the impact mass, impact velocity, and pre-axial loading ratio increased, both the global and local deformations of H-section steel column increased, while the residual bearing capacity decreased. Finally, by considering the

*收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-07-23;

基金项目: 国家自然科学基金(52108162); 山西省基础研究计划项目(20210302124674)

第一作者: 颀宗旺(1999-), 男, 硕士研究生, Xzw191212@163.com;

通讯作者: 赵晖(1988-), 男, 博士, 副教授, zhaohui01@tyut.edu.cn。

multi-factor interactions, the formulas for predicting global deformation and local deformation during impact and the residual load performance after impact were presented by using response surface method. Results show that pre-axial loading is a key factor affecting global deformation, while the impact velocity affect local deformation. In addition, both the pre-axial loading and impact velocity significantly interact with other parameters. The proposed formulas can be employed for the damage evaluation and design of H-section steel columns during the whole impact process.

Keywords: H-section steel; impact-resisting performance; residual load-carrying capacity; finite element (FE) analysis; the plateau impact force; whole process analysis

H 型钢构件具有强重比高、抗弯能力强、易于连接等优点，已在工业厂房和高层建筑中得到广泛应用。然而，其在实际应用中容易遭受厂房吊装荷载和车辆等撞击作用。因此，有必要开展 H 型钢柱抗撞性能分析及撞后损伤评估。

基于上述背景，Huo 等^[1]和 Dantimo 等^[2]通过开展落锤试验对 H 型钢梁侧向撞击下的力学性能进行了研究。结果表明，随着撞击能量的提升撞击持续时间增长，试件的局部屈曲愈加明显。Al-Thairy 等^[3-6]对 H 型钢柱在侧向撞击下的动态响应进行了有限元分析，重点研究了撞击能量、撞击位置和轴向荷载对试件损伤模式的影响。研究发现，预加轴力状态下 H 型钢柱的抗撞性能随着轴压比的增大而显著降低。Xiang 等^[7]对 H 型钢柱开展了水平撞击试验，分析了二次撞击下 H 型钢柱损伤模式和动态响应，并给出了考虑残余能量的损伤后 H 型钢柱评估方法。王蕊等^[8, 9]开展了 H 型钢撞击后剩余承载力试验，研究了撞击能量、局部变形以及轴压比对试件撞击后剩余承载性能的影响。结果表明，试件剩余承载力随着局部变形和轴压比的增大而降低。2020-2023 年，Zhao 等^[10, 11]先后开展了 16 根 H 型钢柱在轴力和撞击耦合作用下的抗撞性能和撞后剩余承载性能试验研究。发现，撞击下试件损伤模式表现为整体与局部变形，其中撞击整体变形是影响撞击后剩余承载力的主要因素。综上所述，目前研究主要集中在 H 型钢撞击下的动态响应，针对撞击后试件的损伤评估较少。此外，现有分析范围仅限于单因子影响下的抗撞力学性能，尚无考虑多因子交互作用下全过程分析及撞击下变形与撞击后剩余承载力预测方法。

为此，本文基于前期试验，采用 Abaqus 软件建立考虑轴力影响的 H 型钢柱撞击和剩余承载力有限元模型并进行机理分析。重点探讨荷载、材料与几何参数对试件抗撞性能和剩余承载力的影响。最后，基于响应面分析法 (RSM)，使用 Design Expert 预测多因子交互影响下的 H 型钢撞击下变形和撞击后剩余承载力。

1 试验概况

本文对 H 型钢柱撞击全过程力学性能分析基于前期完成的试验，文献[11]开展了侧向撞击和剩余承载力试验，撞击全过程加载路径如图 1 所示，其中 N_0 与 N_f 分别代表试件的初始承载力和撞击后剩余承载力。试验主要研究落锤释放高度和轴压比的影响，试件截面尺寸如图 2 所示， B 、 H 、 t_w 与 t_f 分别代表 H 型钢截面宽度、高度、腹板厚度以及翼缘厚度。试件参数和钢材力学性能分别如表 1 和表 2 所示。试验获得了 H 型钢柱撞击下及撞后的破坏模式及荷载与挠度曲线。

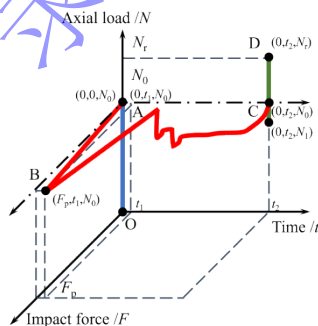


图 1 撞击全过程加载路径

Fig.1 Loading path of the whole impact process

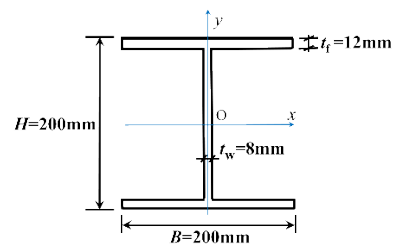


图 2 横截面参数

Fig.2 Cross-sectional parameters

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	轴压比 n	落锤质量 m_0 /kg	落锤速度 v_0 /(m/s)	释放高度 H_0 /m	撞击能量 E /kJ
H-0-a	-	-	-	--	-
H-2.5-0-a	0	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0-b	0	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0-c	0	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0.2-a	0.2	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0.2-b	0.2	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0.4-a	0.4	521	7	2.5	12.8
H-2.5-0.4-b	0.4	521	7	2.5	12.8
H-3-0-a	0	521	7.67	3	15.3
H-3-0-b	0	521	7.67	3	15.3
H-3-0.2-a	0.2	521	7.67	3	15.3
H-3-0.4-a	0.4	521	7.67	3	15.3

注：试件编号中“2.5”与“3”代表落锤释放高度，“0”、“0.2”与“0.4”代表预加轴压比，“a”、“b”与“c”表示同组 3 个重复试件。

表 2 钢材力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

钢材区域	屈服强度 f_y /MPa	弹性模量 E_s /GPa	抗拉强度 f_u /MPa	伸长率 (%)
腹板	290.1	206	421.1	27.0
翼缘	251.6	202	409.8	34.8

撞击和剩余承载力试件的破坏模式如图 3 所示，表现为整体弯曲变形与受撞位置处的局部凹陷。随着轴压比的增大，试件变形加剧，腹板呈现明显平面外屈曲现象。剩余承载力加载结束后，试件沿撞击位置处继续凹陷，跨中翼缘和腹板的局部变形不断扩大，试件整体呈现弯曲破坏模式。



(a) 撞击试件破坏模式



(b) 剩余承载力试件破坏模式

图 3 破坏模式
Fig.3 Failure modes

2 有限元模型

2.1 模型建立

基于 Abaqus/Explicit 模块建立 H 型钢柱在侧向撞击下的有限元模型和剩余承载力模型，钢材采用八节点缩减积分三维实体单元模拟，落锤采用四节点三维壳单元进行模拟^[12]。使用弹簧单元对试件施加轴力，通过“预定义场 (predefined field)”将计算结果导入撞击模型进行轴力-撞击耦合分析。之后将撞击后应力状态导入剩余承载力模型中，采用“耦合 (coupling)”约束对端部施加轴向荷载，当荷载下降至极限荷载的 85%时判定 H 型钢柱失效^[9, 13]。有限元分析流程示意如图 4 所示。

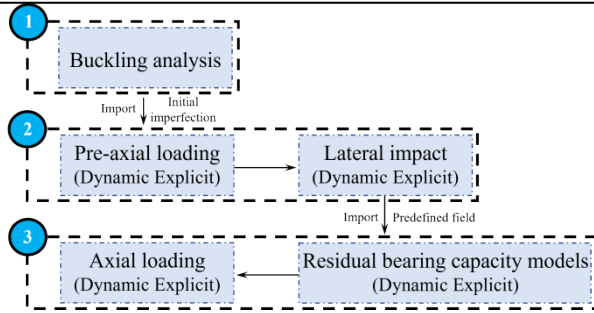


图4 有限元分析流程

Fig.4 FE analysis process

2.2 材料本构

钢材采用五折线模型^[14]，考虑钢材的应变率效应^[15]。采用 Cowper-Symonds 模型^[16]计算钢材的动态屈服强度，如式（1）所示。

$$f_y^d / f_y = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/p} \quad (1)$$

式中： f_y^d 为动态屈服强度； f_y 为静态屈服强度； $\dot{\epsilon}$ 为钢材应变率； D 和 p 为应变率效应参数，其中 $D=6844s^{-1}$ ， $p=3.91$ ^[17]。

2.3 边界、接触及网格划分

图5（a）给出了撞击模型，通过平板较模拟简支边界。落锤简化为离散刚性平面，通过赋予落锤质量与初速度实现撞击荷载的施加，设置落锤与试件切向摩擦系数为0，法向硬接触；图5（b）给出了剩余承载力模型，通过平滑分析步进行轴力加载。对受撞位置两侧各225mm范围进行局部加密，加密区与非加密区网格尺寸分别为试件长度的1/140与1/70。此外，对翼缘与腹板厚度方向网格敏感性进行了分析，如图6所示。整体上厚度方向设置两层网格可保证较高的计算精度和计算效率^[11, 18]。

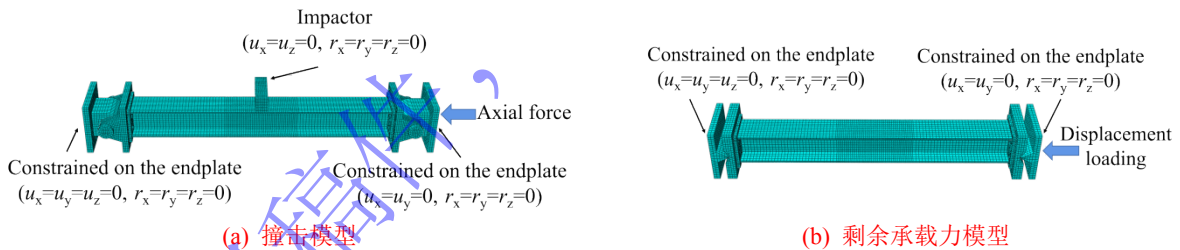


图5 有限元模型
Fig.5 FE models

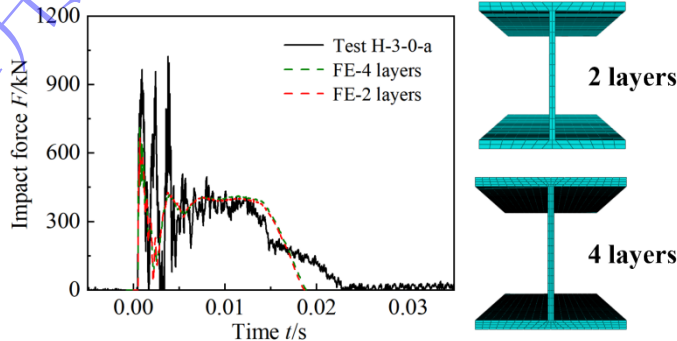


图6 网格敏感性分析
Fig.6 Mesh-sensitivity analysis

2.4 模型验证

为验证模型的可靠性，对文献[11]中共6个模型进行了验证。图7和图8分别为试验和有限元获

得的破坏模式、撞击力与挠度曲线对比。可以看出，撞击过程可以分为振荡、平台与下降段，撞击力迅速上升到峰值后不断振荡并进入相对稳定的平台期，如式(2)所示，其中 t_1 和 t_2 分别代表平台期开始与结束时刻。考虑到撞击力峰值易受撞击能量、撞击角度以及接触面积等因素影响，撞击力平台值 F_m 常用于反映试件在撞击荷载下的抗撞性能^[19-21]。此外，图9给出了撞击力平台值 F_m 、跨中挠度 Δ_g 和剩余承载力 N_r 有限元模拟值和试验值的对比，二者比值的平均值分别为0.92、0.97和1.01，对应的标准值分别为0.003、0.002和0.004。由于试验误差以及材料应变率效应参数的取值并非直接从试验中获得，造成有限元与试验结果存在一定差别。总体上，有限元模型可以较好预测H型钢柱在撞击下的动态响应和撞后剩余承载力。

$$F_m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F(t)dt}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

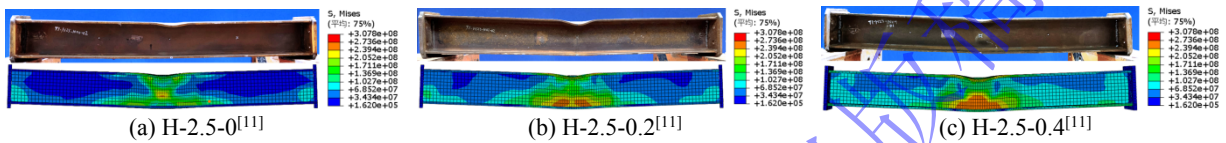


图7 破坏模式对比

Fig.7 Comparison of tested and numerical failure modes

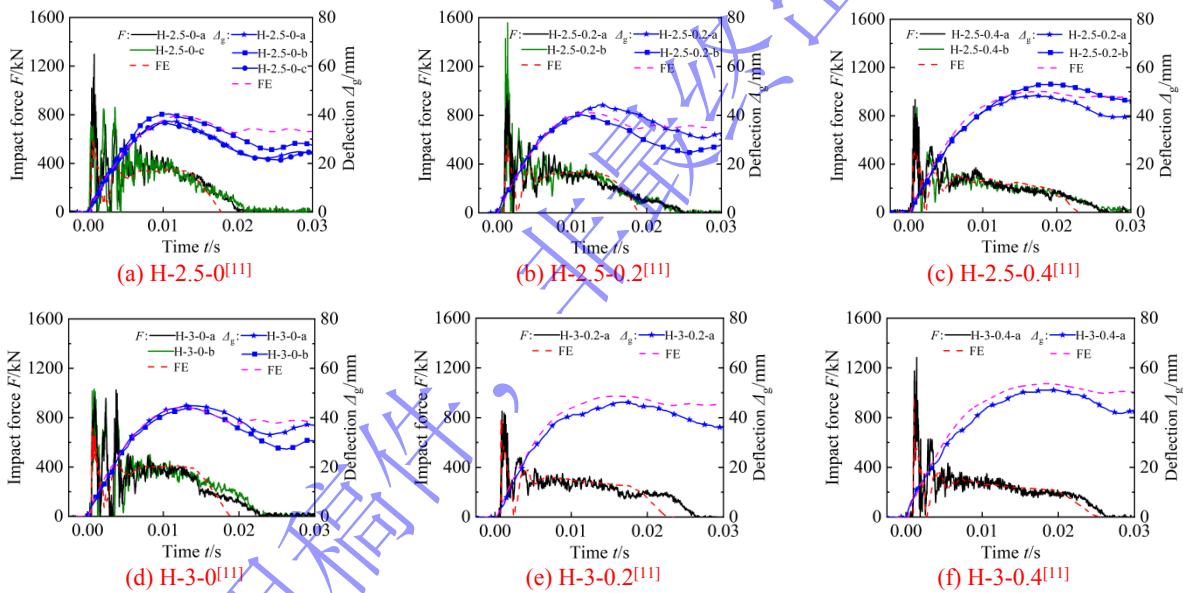
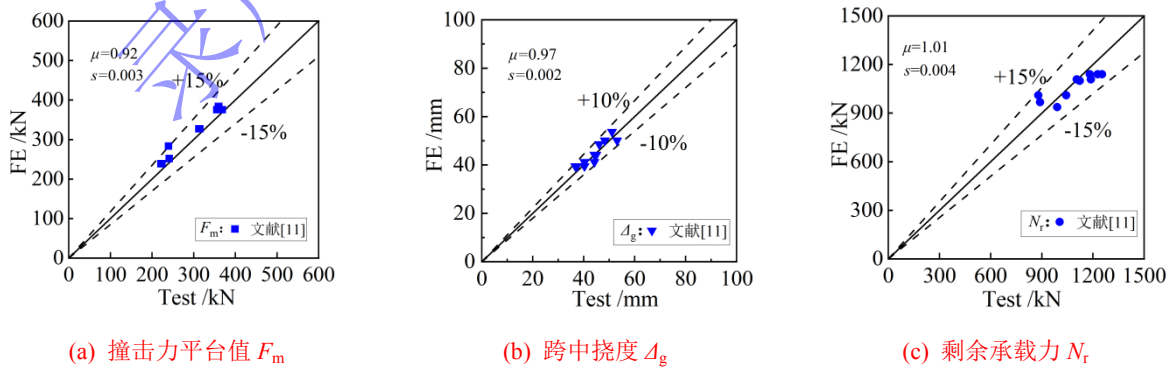


图8 撞击力与挠度曲线对比

Fig.8 Comparison of tested and numerical impact force and deflection curves



(a) 撞击力平台值 F_m

(b) 跨中挠度 Δ_g

(c) 剩余承载力 N_r

图9 试验值和模拟值对比

Fig.9 Comparison between test and FE results

3 抗撞性能机理分析

3.1 撞击全过程

在验证模型可靠性基础上,对试件 H-2.5-0.4 进行侧向撞击全过程分析,图 10 给出了试件撞击力 F 、跨中挠度 Δ_g 、试件跨中速度 v_s 与落锤速度 v_h 的无量纲时程曲线,下标 peak 表示各参数的峰值。撞击过程可分为振荡段 (A-C)、平台段 (C-C') 与下降段 (C'-D)。

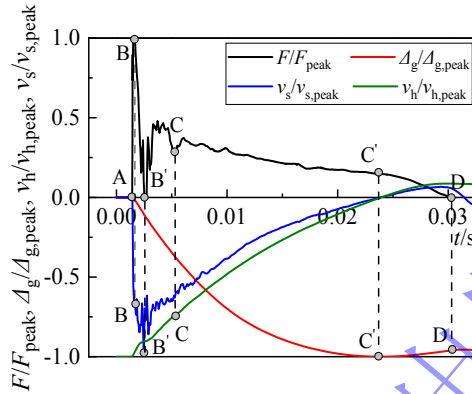


图 10 撞击下试件 H-2.5-0.4 无量纲时程曲线

Fig.10 Dimensionless time history curves of specimen H-2.5-0.4 under impact

落锤接触试件时,试件获得能量并以一定速度向下变形,撞击力迅速达到峰值 (B 点);随后落锤与试件短暂分离,撞击力在 2ms 内不断减小直至降为 0 (B'点),在此过程中试件速度 v_s 达到最大后经过短暂波动后不断降低;随后落锤与试件再次接触,撞击力第二个峰值出现,经历短暂振荡后进入平台阶段,试件变形持续增大;18ms 后,平台期在 C'时刻结束,跨中挠度达到最大, v_s 与 v_h 稳定减小至 0; C'点后撞击力迅速降低, v_s 与 v_h 方向发生变化,试件开始回弹向上运动,跨中挠度有所减小。试件与落锤共同运动 7ms 后达到 D 时刻,此时二者完全脱离,跨中挠度达到稳定。

3.2 撞击时程曲线与撞后荷载-挠度曲线

图 11 给出了不同轴压比下试件撞击力 F 、整体变形 Δ_g 与局部变形 Δ_l 时程曲线。整体上看,轴压比的变化对撞击力峰值影响较小。随着轴压比的增大,撞击力平台值降低,撞击持时增加,这主要是由于施加轴力引起的 $P-\Delta$ 效应降低了试件抗弯承载力。撞后轴向力作用下的荷载-挠度曲线如图 12 所示,荷载与挠度在达到极限承载力之前呈线性变化,产生较小的侧向位移。超过极限荷载后下降较平缓,表现出较好的延性。此外,试件的剩余承载力随着轴压比的增大而降低。

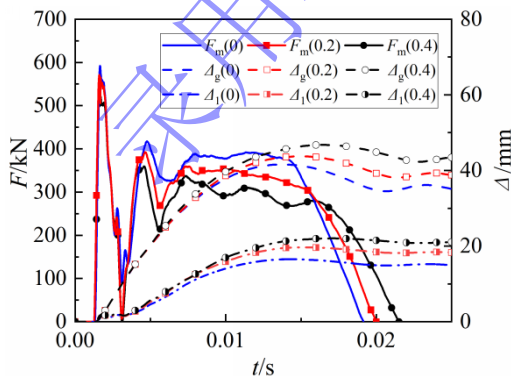


图 11 撞击时程曲线

Fig.11 Time history curves under impact

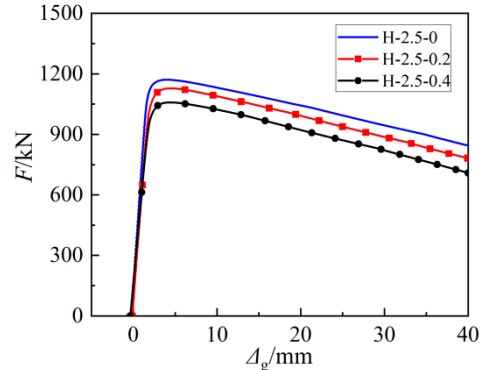


图 12 撞后荷载-挠度曲线

Fig.12 Axial load-deflection curves after impact

3.3 轴向应力状态与耗能

图 13 为试件 H-2.5-0.4 在不同撞击时刻下的轴向应力状态。当撞击力达到峰值 (B 点), H 型钢

柱受撞区域应力较大，端部应力变化不显著，这主要是由于H型钢在纵向受力较小，应力波在纵向扰动小，导致压缩和拉伸幅值较小。当撞击力下降至波谷（B'点），应力逐渐向两端传递，试件下翼缘位置出现明显的受拉屈服现象。试件挠度达到峰值（C'点），上下翼缘应力达到最大，同时上翼缘屈曲加剧。撞击力降为零（D点），跨中挠度随着试件回弹变形减小，应力水平降低。

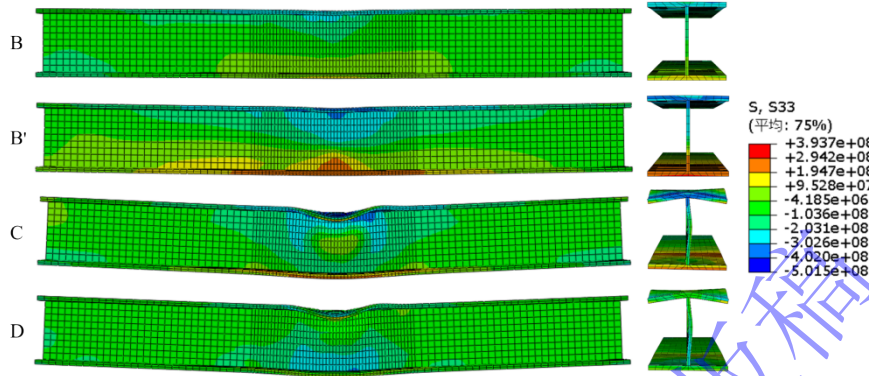
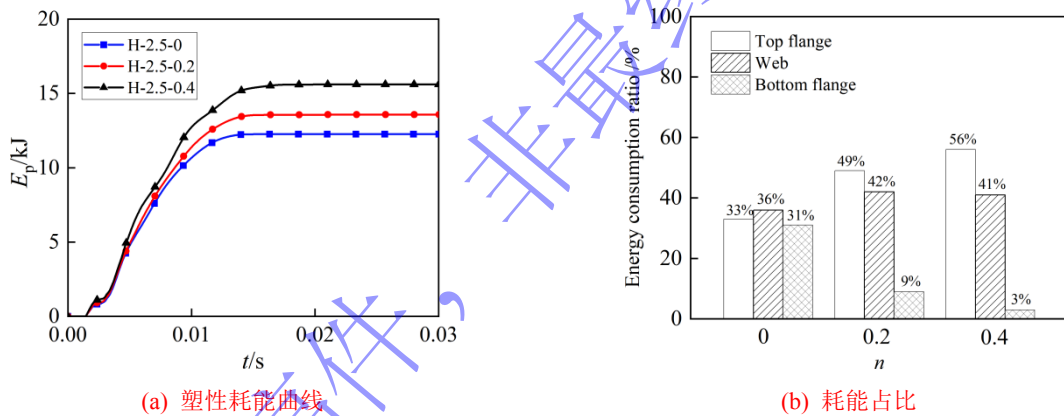


图 13 撞击下试件 H-2.5-0.4 轴向应力发展

Fig.13 Axial stress development of specimen H-2.5-0.4 under impact

图 14 为试件在撞击作用下塑性耗能 E_p 时程曲线和各部位耗能占比。可以看出，轴压比的提高导致试件整体变形增大，塑性耗能提高。此外，试件上翼缘与腹板耗能占比上升，下翼缘的耗能占比明显下降，这主要与施加轴力导致试件局部变形加剧不利于荷载的传递有关。



(a) 塑性耗能曲线

(b) 耗能占比

图 14 耗能分析

Fig.14 Energy dissipation analysis

4 参数影响分析

在验证模型可靠性基础上，本节开展更广泛范围的参数影响分析，共建立 108 个有限元模型，重点分析荷载参数 (m 、 v 与 n)、材料参数 (f_y) 与几何参数 (A 与 L) 对 H 型钢柱抗撞性能与撞后剩余承载力的影响。基本模型参数为： $m=5000\text{kg}$ ， $v=4\text{m/s}$ ， $n=0.2$ ， $f_y=420\text{MPa}$ ， $A=17400\text{mm}^2$ ， $L=5\text{m}$ ，参数具体取值如表 3 所示。

表 3 参数取值

Table 3 Parameter values

截面 $H \times B \times t_w \times t_f$ mm	荷载参数			材料参数		几何参数	
	撞击质量 m/kg	撞击速度 $v/(\text{m/s})$	轴压比 n	屈服强度 f_y/MPa	截面面积 A/mm^2	试件长度 L/m	
300×300×10×15	4000	3	0	355	11700	4	
350×350×12×19	5000	4	0.2	420	17400	5	
400×400×13×21	6000	5	0.4	460	20154	6	

4.1 荷载参数

图 15 (a) -15 (c) 分别给出了撞击质量 (m)、撞击速度 (v) 与轴压比 (n) 对撞击力平台值 F_m 、整体变形 Δ_g 、局部变形 Δ_l 和剩余承载力 N_r 的影响。对比发现, 随着撞击能量的增加, F_m 、 Δ_g 与 Δ_l 均呈增长趋势。这主要是由于撞击能量的增加使试件变形速率增大, 动态荷载下材料的强度得到提高。当 n 增大, F_m 下降明显, 这与轴力产生的 $P-\Delta$ 效应降低了试件的抗弯承载力有关。此外, N_r 随着 m 、 v 与 n 的增大而降低, 这主要与撞击荷载作用下产生较大变形有关。

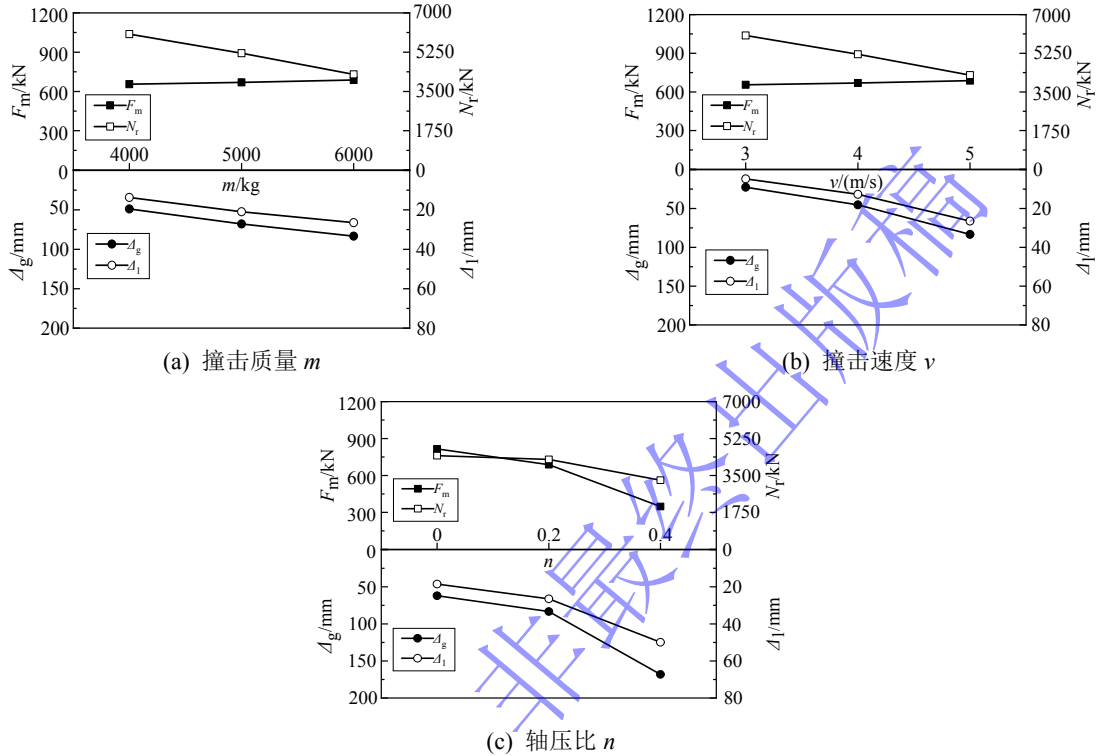


图 15 荷载参数影响

Fig.15 Influence of load parameters

4.2 材料参数

图 16 为钢材的屈服强度 f_y 的影响。可以发现, 随着 f_y 的增大, F_m 与 N_r 增大, Δ_g 与 Δ_l 减小。当 f_y 从 355MPa 提升到 460MPa 时, N_r 提高了 31%-38%, f_y 的增加对试件的抗撞性能有利。

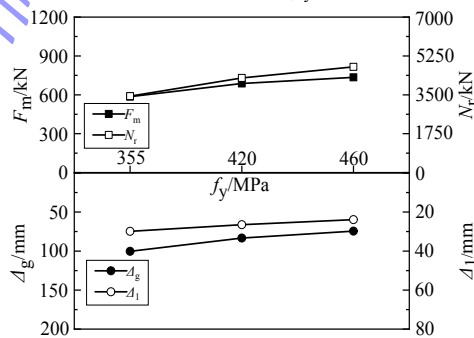


图 16 屈服强度影响 (f_y)

Fig.16 Influence of yield strength (f_y)

4.3 几何参数

几何参数 A 与 L 的影响如图 17 所示。可以看出, 截面面积 A 的增大显著提高了试件的抗撞性能。此外, 随着试件长度 L 的增大, F_m 与 N_r 均呈下降趋势, 试件抗撞性能降低。 L 的增加导致由撞击引起的初始弯矩与轴力引起的附加弯矩增大, 二阶效应对抗撞性能的削弱影响增大。

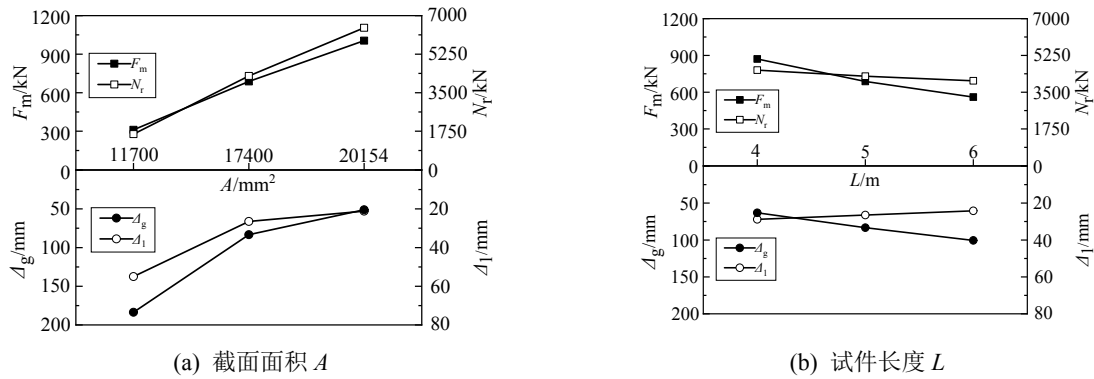


图 17 几何参数影响

Fig.17 Influence of geometric parameters

5 基于响应面分析法的预测公式

响应面分析法 (RSM) 可用于反映多因子交互影响下目标值的变化趋势^[22-25]。本文基于参数分析结果, 采用 Design Expert 分别对撞击下试件变形和撞后剩余承载力结果进行预测, 通过二阶多项式 (3) 预测公式并绘制响应面:

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq i}^k \alpha_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

5.1 整体与局部变形预测公式

采用 Box-Behnken 响应面法 (BBD-RSM) 共设计 54 组试验样本以考虑多因子交互作用对试件撞击下整体和局部变形的影响。以 Δ_g 与 Δ_l 为目标响应, m 、 v 、 n 、 f_y 、 A 与 L 为试验因子进行响应面设计, 各因子设计值与表 3 参数取值保持一致, 二阶响应面模型如式 (4) 和 (5) 所示。

$$\Delta_g = p_1 + p_2 n + p_3 v + p_4 L + p_5 A + p_6 f_y + p_7 m + p_8 n v + p_9 n L + p_{10} n A + p_{11} v L + p_{12} v A + p_{13} v f_y + p_{14} v m + p_{15} L A + p_{16} A f_y + p_{17} A m + p_{18} n^2 \quad (4)$$

$$\Delta_l = p_1 + p_2 n + p_3 v + p_4 L + p_5 A + p_6 f_y + p_7 m + p_8 n v + p_9 n A + p_{10} v A + p_{11} v m + p_{12} L m + p_{13} A m + p_{14} L^2 + p_{15} A^2 \quad (5)$$

式中: $p_1 \sim p_{18}$ 为多项式中各分项系数。

显著性分析结果如表 4 所示, 在响应面分析中, 判定系数模型 F 通常用于评价模型中各项因子的关联性^[25]。 F 值越大, 表示该模型中各因子关联性越强, 反之越弱。整体和局部变形公式的判定系数模型 F 分别 115.01 和 60.51, 模型 $P < 0.0001$, 模型极显著。决定系数 R^2 分别为 [0.982、0.956] > 0.90 , 校正决定系数 $Adj R^2$ 分别为 [0.973、0.940] > 0.90 , 两者差值小于 0.2, 模型精度较高。

表 4 分析结果
Table 4 Analysis results

分项系数	整体变形 Δ_g / mm	局部变形 Δ_l / mm
p_1	-290.887	-10.191
p_2	-234.702	-10.049
p_3	64.379	11.284
p_4	12.956	-14.257
p_5	0.017	9.56×10^{-4}
p_6	-0.094	0.014
p_7	13.725	6.897
p_8	43.800	15.494
p_9	49.390	-0.002

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

p_{10}	-0.013	-9.92×10^{-4}
p_{11}	5.770	2.420
p_{12}	-0.004	-1.183
p_{13}	-0.086	-4.24×10^{-4}
p_{14}	4.472	1.866
p_{15}	-0.002	1.26×10^{-7}
p_{16}	1.8×10^{-5}	-
p_{17}	-1.13×10^{-3}	-
p_{18}	403.832	-
F	115.01	60.51
P	<0.0001	<0.0001
R^2	0.982	0.956
$Adj R^2$	0.973	0.940

图 18 与图 19 分别给出了交互作用对 Δ_g 和 Δ_l 影响下的响应面及等高线图。可以看出, n 是影响 Δ_g 的关键因子, $n \times A$ 与 $n \times L$ 的交互作用较强, F 值分别为 51.22 和 43.69, $P < 0.0001$ 。此外, 以 v 为关键因子的交互项 $v \times A$ 与 $v \times n$ 的 F 值分别为 58.27 和 29.21, P 值均小于 0.0001, 对模型影响显著。

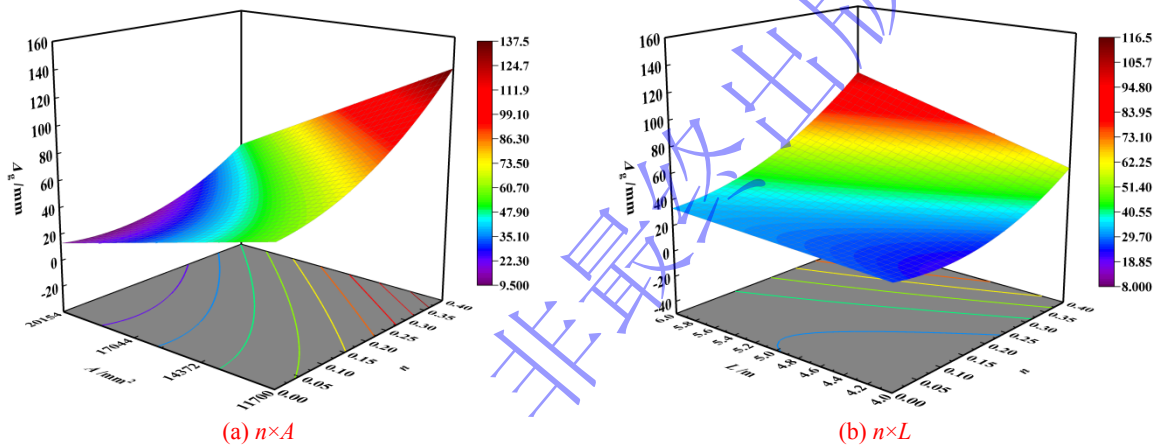


图 18 交互作用对整体变形影响
Fig.18 Influence of interaction on global deformation

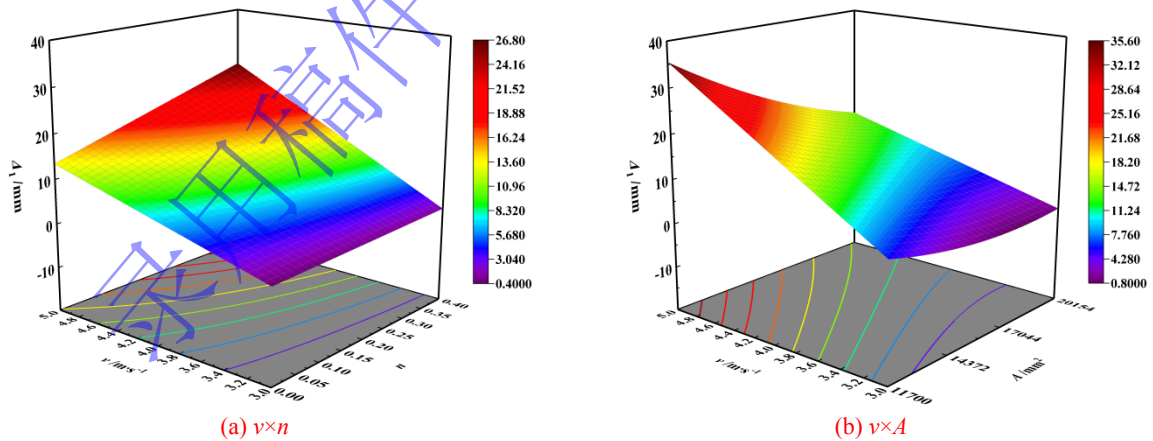


图 19 交互作用对局部变形影响
Fig.19 Influence of interaction on local deformation

图 20 给出了整体和局部变形公式预测值与有限元模拟值对比结果。可以看出, 二者之比的均值 μ 分别为 0.96 与 0.98, 标准差 s 分别为 0.018 与 0.062, 该模型可较好地预测试件撞击下整体和局部变形。

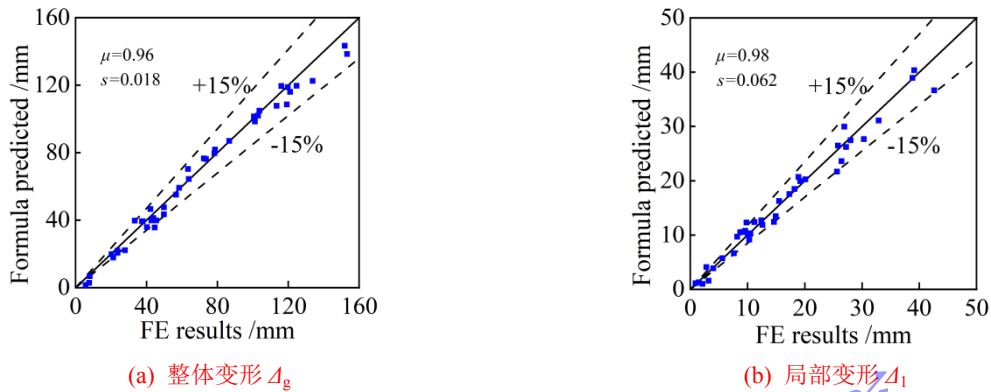


图 20 公式预测值与有限元模拟值对比

Fig.20 Comparison of the formula predicted and FE results

5.2 剩余承载力预测公式

基于撞击后试件的整体变形 Δ_g 和局部变形 Δ_l 引入相对损伤模型^[26], 分别定义剩余承载力系数 $RSI=N_r/N_0$ 、位移系数 $d=\Delta_g/L$ 和凹陷系数 $\delta=\Delta_l/H$, 建立 RSI 与 d 、 δ 的二阶多项式, 如式 (6) 所示, 相关系数见表 5。

$$RSI=p_1+p_2d+p_3\delta+p_4d^2+p_5\delta^2 \quad (6)$$

表 5 剩余承载力预测公式相关系数

Table 5 Coefficients of the prediction formulas for the residual bearing capacity

系数值						
p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	R^2	$Adj R^2$
1.024	-24.235	-0.749	301.344	3.865	0.957	0.951

图 21 所示为 d 与 δ 对 RSI 的拟合曲面。从图中可知, RSI 随 d 和 δ 的增大而降低, 当 d 从 0.01 增加到 0.03 时, RSI 下降了 28.9%, 当 δ 从 0.025 增加到 0.1 时, RSI 下降了 37.7%。撞击后剩余承载力系数 RSI 公式预测值和有限元模拟值对比如图 22 所示, 均值 μ 与标准差 s 分别为 1.04 与 0.069, 公式可较合理地预测试件剩余承载力系数。

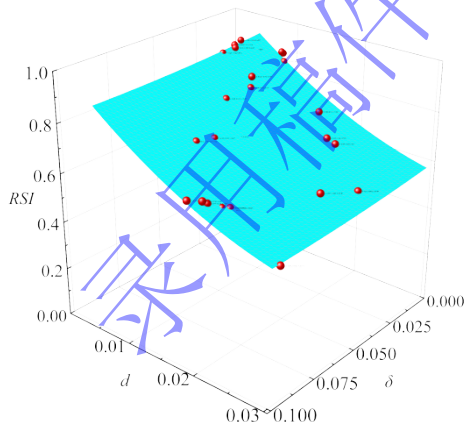


图 21 d 和 δ 交互作用对 RSI 的影响

Fig.20 Influence of interaction between d and δ on RSI

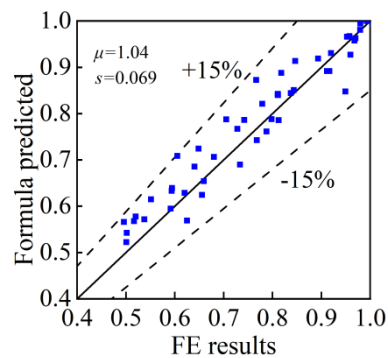


图 22 RSI 公式预测值与有限元模拟值对比

Fig.21 Comparison of RSI formula predicted and FE results

6 结论

本文对 H 型钢柱侧向撞击下力学性能和撞后剩余承载力开展了全过程分析, 主要结论如下:

- (1) 撞击下, H 型钢柱破坏模式主要以整体变形与受撞区域局部变形为主; 剩余承载力加载过

程中试件沿受撞区域继续凹陷, 整体变形加剧。

(2) 撞击力时程曲线呈现明显的平台段, 轴向力的存在降低了试件的抗撞能力, 撞击持时增大, 这主要与预加轴力引起的 $P-A$ 效应有关。随着轴压比的增大, 试件的塑性耗能增大, 同时上翼缘与腹板的耗能占比提升。在撞后轴向加载阶段, 荷载与挠度在达到极限承载力之前呈线性变化, 超过极限荷载后下降较平缓, 试件表现出较好的延性。

(3) 随着撞击质量、撞击速度与轴压比的增大, H 型钢柱的整体和局部变形增大, 剩余承载力降低。此外, 钢材强度的提高有效增强了试件抗撞性能。

(4) 通过响应面法分析发现, 轴压比和撞击速度分别是影响整体和局部变形的关键因子, 并与其他因子交互作用显著。此外, 剩余承载力系数随整体和局部变形的增大而降低。考虑荷载、材料与几何多参数交互影响提出的公式可较好地预测 H 型钢柱撞击下变形和撞后剩余承载力。

参考文献:

- [1] HUO J S, ZHANG J Q, LIU Y Z, et al. Dynamic behaviour and catenary action of axially-restrained steel beam under impact loading[J]. Structures, 2017, 11: 84-96. DOI: 10.1016/j.istruc.2017.04.005.
- [2] DANTIMO M, LATOUR M, RIZZANO G, et al. Experimental and numerical assessment of steel beams under impact loadings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158: 230-247. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.029.
- [3] AL-THAIRY H, WANG Y C. A numerical study of the behaviour and failure modes of axially compressed steel columns subjected to transverse impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38: 732-744. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.03.005.
- [4] AL-THAIRY H, WANG Y C. An assessment of the current Eurocode 1 design methods for building structure steel columns under vehicle impact[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88: 164-171. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.013.
- [5] AL-THAIRY H, WANG Y C. Simplified FE vehicle model for assessing the vulnerability of axially compressed steel columns against vehicle frontal impact[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 102: 190-203. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.07.005.
- [6] AL-THAIRY H A B, WANG Y C. Behaviour and design of steel columns subjected to vehicle impact[M]. Trans Tech Publications Ltd, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.566.193.
- [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] 王蕊, 郭昭胜, 裴畅. 局部屈曲变形损伤对 H 型钢柱竖向剩余承载力影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(21): 17-22. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.21.004.
WANG R, GUO Z S, PEI C. Experimental study on vertical residual bearing capacity of H-shaped steel column with local buckling deformation[J]. Building Structure, 2014, 44(21): 17-22. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.21.004.
- [9] BAI Y, WANG R, CUI J L. Residual bearing capacity numerical simulation and theoretical analysis of H-shaped steel column impacted under different axis pressure[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1065-1069: 1097-1100. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.1097.
- [10] ZHAO H, WANG R, Li Q M, et al. Experimental and numerical investigation on impact and post-impact behaviours of H-shaped steel members[J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110750. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110750.
- [11] WANG R, YANG X, ZHAO H, et al. Damage evaluation of axial-loaded H-section steel columns during and after impact loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107426. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107426.
- [12] MAKAREM F S, ABED F. Nonlinear finite element modeling of dynamic localizations in high strength steel columns under impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 52: 47-61. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.006.
- [13] CHEN Y, WAN J, WANG K, et al. Residual axial bearing capacity of square steel tubes after lateral impact[J]. Journal of

- Constructional Steel Research, 2017, 137: 325-341. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.06.019.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2016: 68-77.
HAN L H. Theories and experiment of concrete filled steel tubular structures[M] 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [15] 侯川川. 低速横向冲击荷载下圆钢管混凝土构件的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
HOU C C. Study on performance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) members under low velocity transverse impact[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [16] COWPER G R, SYMONDS P S. Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams[R]. Brown Univ Providence Ri, 1957.
- [17] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of square tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(2): 179-208. DOI: 10.1016/0734-743X(84)90005-8.
- [18] DAI X H, WANG Y C, BAILEY C G. Numerical modelling of structural fire behaviour of restrained steel beam-column assemblies using typical joint types[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2337-2351. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.009.
- [19] ZHAO H, MEI S Q, WANG R, et al. Round-ended concrete-filled steel tube columns under impact loading: Test, numerical analysis and design method[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 191: 111020. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111020.
- [20] ZHAO H, XIE Z W, YANG B H, et al. Impact resistance performance of precast reinforced concrete barriers with grouted sleeve and steel angle-to-plate connections[J]. Engineering Structures, 2024, 316: 118533. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118533.
- [21] WANG R, HAN L H, HOU C C, et al. Behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) members under lateral impact: Experiment and FEA model[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 188-201. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.003.
- [22] 孔祥韶, 杨豹, 周沪等. 基于响应面法的纤维金属层合板抗弹性能优化设计[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(04): 84-96. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0146.
KONG X S, YANG B, ZHOU H, et al. Optimal design of ballistic performance of fiber-metal laminates based on the response surface method[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(04): 84-96. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0146.
- [23] 樊伟, 孙洋, 申东杰等. 带主梁的简化模型与响应面联合的桥梁船撞易损性分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(03): 34-43+135. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2021.03.004.
FAN W, SUN Y, SHEN D J, et al. Vessel-collision vulnerability analysis method of bridge structures based on simplified model with girders and response surface[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(03): 34-43+135. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2021.03.004.
- [24] 樊伟, 毛薇, 庞于涛等. 钢筋混凝土柱式桥墩抗车撞可靠度分析研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(02): 162-176. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.006.
FAN W, MAO W, PANG Y T, et al. Reliability Analysis of reinforced concrete column bridge piers subjected to vehicle collisions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(02): 162-176. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.006.
- [25] HAMMOUDI A, MOUSSACEB K, BELEBCHOUCHE C, et al. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 425-436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119.
- [26] 郭金龙, 潘爽, 付诗琦. 侧向冲击作用后圆中空夹层钢管混凝土长柱的竖向剩余承载性能研究[J]. 工程力学, 2024, 1-13.
GUO J L, PAN S, FU S Q. Study on the vertical residual bearing behaviors of circular concrete-filled double-skin steel tubular long columns after lateral impact[J]. Engineering Mechanics, 2024, 1-13.