

# 腹板开六边形与圆形孔的钢梁冲击动力响应 对比研究

陈华艳<sup>1</sup>, 刘用滨<sup>1</sup>, 罗才松<sup>1\*</sup>, 傅佳铭<sup>1</sup>, 王枫轩<sup>2</sup>, 付朝江<sup>1</sup>, 祁 皑<sup>2</sup>, 王碧珍<sup>3</sup>

(1. 福建理工大学 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350116; 3. 福建省中霖工程建设有限公司, 福建 南平 353599)

**摘要:** 为了对比不同开孔形式对腹板开孔钢梁抗冲击性能的影响, 比较了腹板开六边形与圆形孔的钢梁在孔间距和孔高不同时的等效抗弯刚度, 开展了落锤冲击试验和有限元分析。在试验过程中采集了落锤冲击力、位移以及孔周围应变的数据, 主要对开孔形式、冲击能量、孔间距、孔高和冲击作用位置进行参数分析。结果表明: 相较于圆形腹板开孔钢梁, 六边形腹板开孔钢梁在落锤冲击作用下产生变形更大; 圆形腹板开孔钢梁的冲击力平台值更大, 抵抗冲击作用的能力和能量耗散能力更强; 圆形腹板开孔钢梁产生的最大位移为六边形腹板开孔钢梁最大位移的86.49%。有限元数值模型可以较为准确地模拟腹板开孔钢梁在冲击作用下的动力响应。两种腹板开孔钢梁的冲击最不利位置均在距离梁端大约1/4计算长度处。冲击作用在梁端附近产生的位移最小, 且受开孔形式的影响较小。

**关键词:** 腹板开孔钢梁; 动力响应; 开孔形式; 有限元数值模拟; 抗冲击性能

**中图分类号:** TU392.1, TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2025)03-0055-11

**DOI:** 10.13969/j.jzgjgz.20230927001

## Comparative Study on Impact Dynamic Response of Steel Beams with Hexagonal and Circular Web Openings

CHEN Huayan<sup>1</sup>, LIU Yongbin<sup>1</sup>, LUO Caisong<sup>1\*</sup>, FU Jiaming<sup>1</sup>, WANG Fengxuan<sup>2</sup>,  
FU Chaojiang<sup>1</sup>, QI Ai<sup>2</sup>, WANG Bizhen<sup>3</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;  
3. Fujian Zhonglin Engineering Construction Co., Ltd., Nanping 353599, China)

\*Corresponding author: 0716jpu@163.com

**Abstract:** In order to compare the influences of different opening forms on the impact resistance of steel beams with web openings (SBWO), the equivalent flexural stiffnesses of steel beams with hexagonal and circular openings in the web at different opening spacings and opening heights were compared, and drop weight impact tests and finite element analysis were carried out. The main parameters analyzed are the opening form, impact energy, spacing between

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(5227080392), 福建省自然科学基金(2022J01928), 福建省住建厅科技项目(2022-K-305, 2022-K-71)

作者简介:

陈华艳(1980—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事桥梁工程防撞击、结构工程抗冲击性能方面的研究。E-mail: kxchy@163.com。

刘用滨(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁工程防撞击、结构工程抗冲击性能方面的研究。

通信作者:

罗才松(1980—), 男, 博士, 正高级实验师, 主要从事防灾减灾方面的研究。E-mail: 0716jpu@163.com。

openings, opening height, and impact position. The drop weight impact force, displacement, and strain around web opening were collected during the test. The results show that the buckling deformation of the steel beam with hexagonal web opening (SBHWO) is larger than that of the steel beam with circular web opening (SBCWO) under the impact of the drop weight. The SBCWO exhibits a larger impact plateau value, stronger ability to resist the impact, and better energy dissipation capacity. The maximum displacement produced by the SBCWO is 86.49% of that of the SBHWO. The finite element numerical model can more accurately simulate the dynamic response of SBWO under impact. The most unfavorable impact position of both SBWO is about 1/4 of the calculated length from the beam end. The impact position near the beam end is more favorable, and the displacement generated here is the smallest. It is less affected by the opening form.

**Keywords:** steel beam with web opening; dynamic response; opening form; finite element numerical simulation; impact resistance

腹板开孔钢梁是一种腹板上规则且重复开孔的工字形钢梁;因其在保证抗弯承载力几乎不降低的同时能够显著减轻自重,并满足大开间体系的跨度要求,腹板开孔钢梁被广泛应用于现代商业和工业建筑等领域<sup>[1-2]</sup>。大量学者对腹板开孔钢梁进行了深入研究<sup>[3-5]</sup>,目前与其相关的理论和试验研究成果较丰富。除了腹板开孔钢梁在静力荷载下的力学性能、破坏模态和屈曲分析值得关注外,其在灾害下的性能也成为了研究重点。JUSTINO等<sup>[6]</sup>提出了火灾情况下六边形腹板开孔钢梁的孔间腹板剪切屈曲强度半经验实用计算式。TSAVDARIDIS等<sup>[7]</sup>通过有限元方法分析了圆形腹板开孔梁的滞回性能。然而目前关于非常规动态荷载对腹板开孔钢梁影响的研究十分不足。

工程结构在服役期限内有可能遭受意外的爆炸、滚石冲击、高空抛物、地震时上部结构部件断裂后冲击下层结构构件等一系列极端冲击作用,因此结构构件在冲击作用下的力学性能被广泛关注。霍静思等<sup>[8]</sup>通过落锤冲击试验研究了热轧H型钢梁的动态抗冲击力学性能及悬链线效应的形成机理和影响规律。D'ANTIMO等<sup>[9]</sup>通过试验和有限元方法研究了钢梁在冲击作用下的动力响应。WANG等<sup>[10]</sup>开展了不同钢梁-柱连接节点在冲击荷载作用下的试验,研究了结构渐进倒塌的动力特性。目前关于腹板开孔钢梁的冲击动力响应研究较少。为此,本文通过落锤冲击试验和有限元方法研究六边形和圆形腹板开孔钢梁的冲击动力响应,为更直观地对比两种不同开孔形式的腹板开孔钢梁,采取吴炎海等<sup>[11]</sup>对有量纲参数进行参数分析的方法,研究了开孔形式、冲击能量、孔间距、孔高和冲击作用位置等参数对抗冲击性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

从冲击能量 $E$ 、孔间距 $S$ 和孔高 $D$ 这三个方面对比两

种腹板开孔钢梁受冲击后的力学性能,所有试件的截面尺寸均为 $300\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,计算长度 $L_0=2\ 120\text{ mm}$ 。六边形<sup>[12]</sup>和圆形<sup>[13]</sup>腹板开孔钢梁试件共设计8个,几何尺寸参数的示意如图1所示。为了简化腹板开孔钢梁的制作过程,采用了在腹板切割成孔的方式,具体步骤如下:先按照截面尺寸切割出腹板和翼缘,然后按表1中的开孔尺寸在腹板上根据设定的位置切割出孔洞,最后将腹板和翼缘进行焊接连接。为了方便区分试件对其进行编号,以试件H-E1-S310-D180为例解释其含义,字母H表示六边形腹板开孔,字母C表示圆形腹板开孔;E1表示冲击能量为16 500 J;S310表示孔间距为310 mm;D180表示孔高为180 mm。所有试件的设计参数如表1所示。试件制作所采用的钢材牌号均为Q235,进行准静态荷载作用的拉伸试验后结果如表2所示。

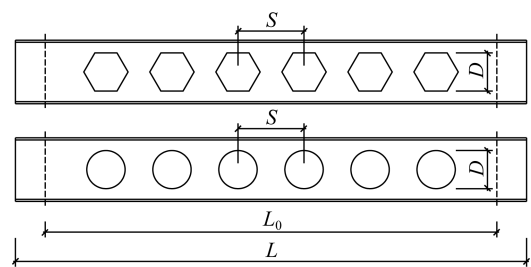


图1 腹板开孔钢梁的几何参数

Fig. 1 Geometrical parameters of steel beams with web openings

### 1.2 试验方案

为了对腹板开孔钢梁施加冲击荷载,使用的试验设备为与文献[13]一样的超高重型落锤试验机,如图2所示,详细的试验条件参考文献[13]。测试内容如下:落锤冲击力;梁下翼缘 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 处的位移,如图3所示,相邻位移计的间隔长度为一个孔间距的长度;六边形和圆形腹板开孔钢梁的孔O3处周围应变片布置位置如图4所示。

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	S/mm	D/mm	V/(m·s <sup>-1</sup> )	M/kg	E/J
H-E1-S310-D180	310	180	10	330	16 500
H-E2-S310-D180	310	180	10	430	21 500
H-E3-S310-D180	310	180	10	530	26 500
H-E4-S310-D180	310	180	12	430	30 960
H-E2-S290-D180	290	180	10	430	21 500
H-E2-S330-D180	330	180	10	430	21 500
H-E2-S310-D160	310	160	10	430	21 500
H-E2-S310-D200	310	200	10	430	21 500
C-E1-S310-D180	310	180	10	330	16 500
C-E2-S310-D180	310	180	10	430	21 500
C-E3-S310-D180	310	180	10	530	26 500
C-E4-S310-D180	310	180	12	430	30 960
C-E2-S290-D180	290	180	10	430	21 500
C-E2-S330-D180	330	180	10	430	21 500
C-E2-S310-D160	310	160	10	430	21 500
C-E2-S310-D200	310	200	10	430	21 500

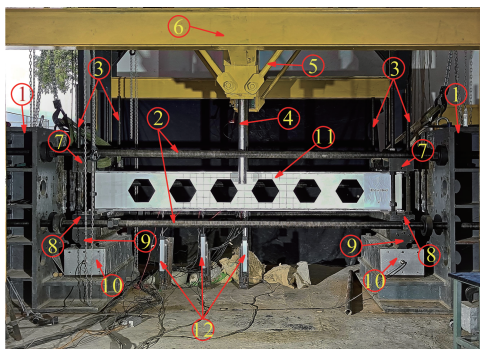
注:V为落锤冲击速度;M为落锤冲击质量。

表2 钢材材性

Table 2 Material properties of steel

部位	$f_y$ /MPa	$f_u$ /Mpa	$E_s$ /GPa	伸长率/%
腹板	304.43	442.88	199.47	40.84
翼缘	329.49	464.50	200.36	39.37

注: $f_y$ 、 $f_u$ 、 $E_s$ 分别为屈服强度、极限强度、弹性模量。



① 反力墩 ② 张拉螺杆 ③ 固定螺杆 ④ 导轨  
⑤ 导轨支撑 ⑥ 刚性横梁 ⑦ 刚性压梁 ⑧ 刚性支撑梁  
⑨ 铰 ⑩ 刚性支座 ⑪ 试件 ⑫ 位移计

图2 试验现场

Fig. 2 Test site

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冲击后变形形态

试件完成落锤冲击试验后的变形形态如图5所示。

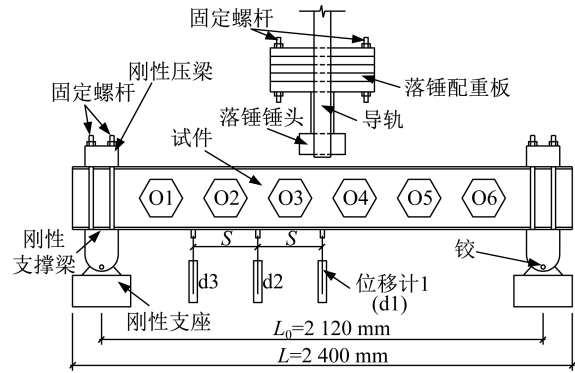


图3 试验设备

Fig. 3 Test equipment

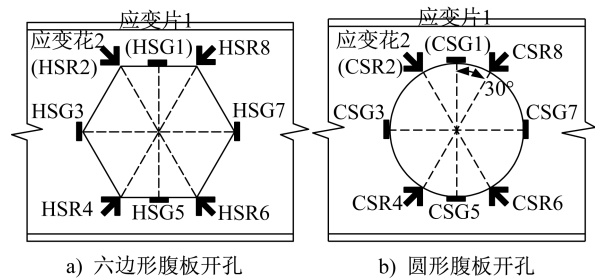


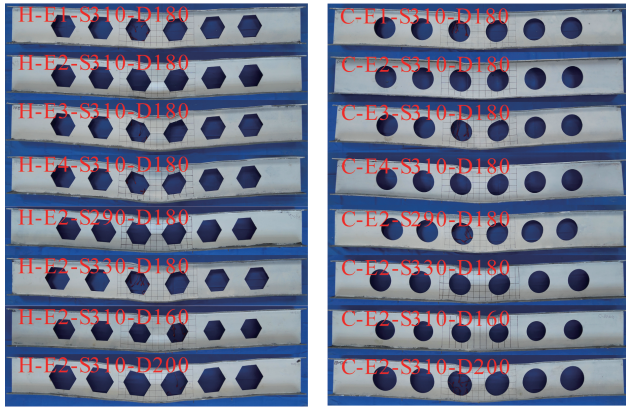
图4 孔O3处应变传感器布置

Fig. 4 Arrangement of strain gauges at opening O3

所有钢梁的上翼缘部位受落锤冲击后出现凹陷,跨中的孔间腹板(相邻孔之间的腹板)发生侧向凸曲,其两侧的孔洞发生压缩变形,而远离冲击区域的腹板基本上不发生变形。在相同的冲击能量作用下,相较于圆形腹板开孔钢梁,六边形腹板开孔钢梁的整体变形更大,上翼缘凹陷的程度更深。当冲击能量达到26 500 J时,六边形腹板开孔钢梁的跨中孔间腹板处靠近落锤冲击作用位置处的孔角发生开裂,六边形孔O3的裂缝长度 $L_c$ 为8.53 mm,最大裂缝宽度 $b_c$ 为1.45 mm,如图6a)所示。然而,所有的圆形腹板开孔钢梁都没有出现开裂的现象。这表明六边形腹板开孔钢梁在受到较大的冲击能量作用后容易开裂,而且产生的变形比圆形腹板开孔钢梁产生的变形更大。随着冲击能量的增加,两种腹板开孔钢梁产生的整体变形均逐渐增加。在相同冲击能量的作用下,随着孔间距的增加,二者的整体变形均逐渐减小,这是因为孔间腹板的宽度(即相邻开孔之间边缘的最小距离)增加,增强了其对冲击的抵抗能力。随着孔高的增加,二者的整体变形均逐渐增大,该问题出现的主要原因是孔间腹板的宽度减小以及上、下孔边缘与翼缘之间的距离减小,使得其抵抗冲击力的能力降低。

### 2.2 刚度差异分析

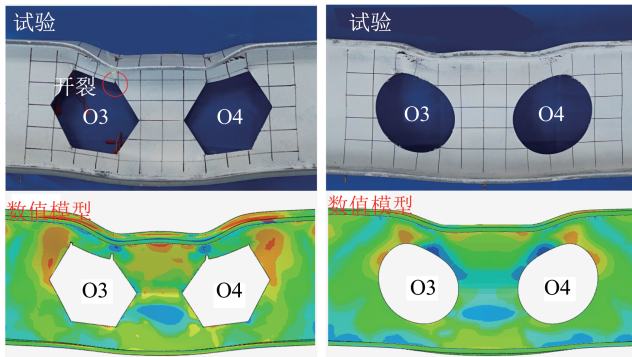
由于缺乏动力荷载作用下腹板开孔梁等效刚度的求



a) 六边形腹板开孔钢梁 b) 圆形腹板开孔钢梁

图5 腹板开孔钢梁的变形形态

Fig. 5 Deformation modes of steel beams with web openings



a) 六边形腹板开孔钢梁 b) 圆形腹板开孔钢梁

图6 腹板开孔钢梁的局部变形

Fig. 6 Local deformation of steel beams with web openings

解方法,本节采用静力荷载作用下腹板开孔梁等效抗弯刚度的求解方法,分析在不同开孔形式下不同孔高与孔间距对试件抗冲击性能的影响。为此,采用周朝阳等<sup>[14]</sup>提出的由翼腹刚度组合表达的腹板开孔钢梁等效抗弯刚度计算式,如式(1)所示;六边形孔和圆孔腹板开孔梁腹板刚度折减系数的半理论半经验计算式,如式(2)~(3)所示。

$$B = E_f I_f + k E_w I_w \quad (1)$$

$$k_h = \left[ 1 - 0.264 \left( \frac{U}{h} \right)^3 \right] \left[ 1 - 0.406 \frac{\left( \frac{U}{h} \right)^3}{1 + \frac{s}{U}} \right] \quad (2)$$

$$k_c = \left[ 1 - 0.528 \left( \frac{d}{h} \right)^4 \right] \left[ 1 - 0.589 \frac{\left( \frac{d}{h} \right)^3}{1 + \frac{s}{d}} \right] \quad (3)$$

式中: $B$ 为蜂窝梁的等效抗弯刚度; $E_f$ 、 $E_w$ 分别为翼缘和腹板的弹性模量; $I_f$ 和 $I_w$ 分别为实腹梁的翼缘和腹板的惯性矩; $k$ 为刚度折减系数; $k_h$ 、 $k_c$ 分别为六边形和圆形腹板开孔钢梁的刚度折减系数; $U$ 为正六边形孔对角距离即外接圆直径; $s$ 为孔洞净距离。

通过式(1)计算得到不同孔高和孔间距下六边形和圆形腹板开孔钢梁的等效抗弯刚度,不同孔高和孔间距与等效抗弯刚度的关系如图7所示,曲线编号中字母H和C分别表示六边形和圆形腹板开孔钢梁; $B_s/B_0$ 为腹板开孔钢梁与实腹钢梁的等效抗弯刚度的比值。六边形和圆形腹板开孔钢梁的等效抗弯刚度随着孔间距的增大有所提升,但提升幅度并不明显。当孔高从160 mm增加到200 mm时,六边形腹板开孔梁的等效抗弯刚度提升了0.3%,而圆形腹板开孔梁的等效抗弯刚度则提升了2.9%。相比于孔间距,孔高对构件等效抗弯刚度影响更为明显。值得注意的是,圆形腹板开孔梁的等效抗弯刚度对孔高变化表现得更为敏感。

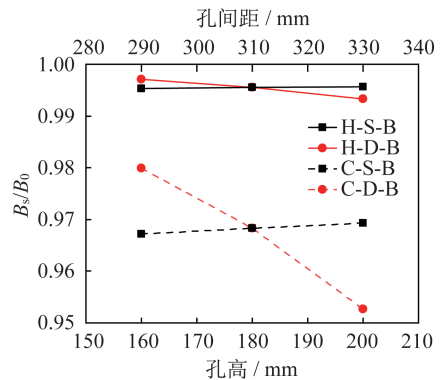


图7 等效抗弯刚度随孔高和孔间距的变化趋势

Fig. 7 Trend of equivalent flexural stiffness with opening spacing and opening height

### 2.3 冲击力响应

试验采集了所有试件的冲击力时程曲线,选取冲击能量分别为16 500 J、30 960 J作用下的冲击力时程曲线进行分析,如图8所示。冲击力的发展过程为:落锤冲击腹板开孔钢梁后大约0.250 ms时冲击力达到峰值,将该峰值定义为冲击力峰值 $F_{max}$ 。随后冲击力迅速减小并出现幅度较大的振荡波动,这是因为落锤对腹板开孔钢梁的冲击导致其突然具有了一个向下的加速度,腹板开孔钢梁的速度从0开始快速增大使得其与落锤之间的速度差减小,二者之间的接触作用减弱,冲击力迅速减小。然而腹板开孔钢梁因两端受到约束,在获得向下加速度后速度提升时间极短。随着与落锤的接触作用减弱,钢梁加速度减小,跨中位置的向下速度小于落锤速度。此时

落锤与钢梁的接触作用再度增强,导致冲击力再次迅速增大。冲击后大约 2.038 ms 时冲击力逐渐趋于稳定,此时冲击过程进入平台阶段,定义平台阶段内冲击力对时间的积分与时间的比值为冲击力平台值  $F_p$ 。此后由于腹板开孔钢梁持续耗散冲击能量,使得冲击力减小,且当落锤与腹板开孔钢梁的向下速度共同达到 0 之后,腹板开孔钢梁将冲击过程中储存的弹性势能释放,推动落锤向上运动,而且此时其与落锤的接触作用逐渐减弱,冲击力呈波浪式或滑坡式逐渐减小至 0。

值反映了腹板开孔钢梁与落锤之间相互作用的稳定性,圆形腹板开孔钢梁在这方面的表现较好,抵抗冲击作用的能力更强。

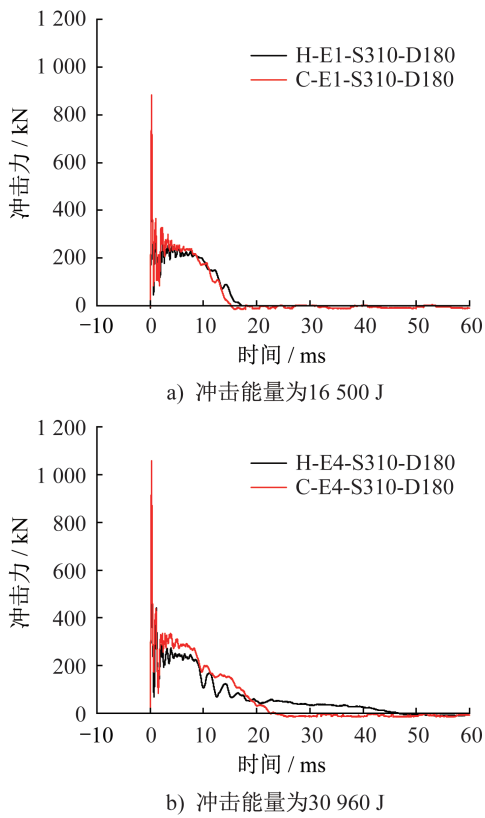


图 8 冲击力时程曲线对比

Fig. 8 Comparison of impact force time-history curves

冲击力峰值和冲击力平台值的定义如图 9 所示。从所有试件的冲击力时程曲线中提取各冲击力峰值和冲击力平台值后,从冲击能量、孔间距、孔高三个方面对比六边形和圆形腹板开孔钢梁,如图 10 所示。六边形腹板开孔钢梁的平均冲击力峰值为圆形腹板开孔钢梁平均冲击力峰值的 88.10%,但当孔间距为 330 mm 和孔高为 160 mm 时,六边形腹板开孔钢梁的冲击力峰值略大于圆形腹板开孔钢梁的冲击力峰值。这表明大多数情况下六边形腹板开孔钢梁在冲击初期的抵抗效果不如圆形腹板开孔钢梁的抵抗效果,但随着孔间腹板的宽度增加,二者在冲击初期的差异逐渐变小。当冲击力发展到平台阶段时,六边形腹板开孔钢梁的平均冲击力平台值为圆形腹板开孔钢梁对应值的 89.92%,冲击力平台

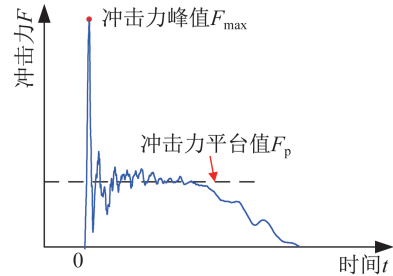


图 9 冲击力峰值和冲击力平台值的定义

Fig. 9 Definition of impact peak value and impact platform value

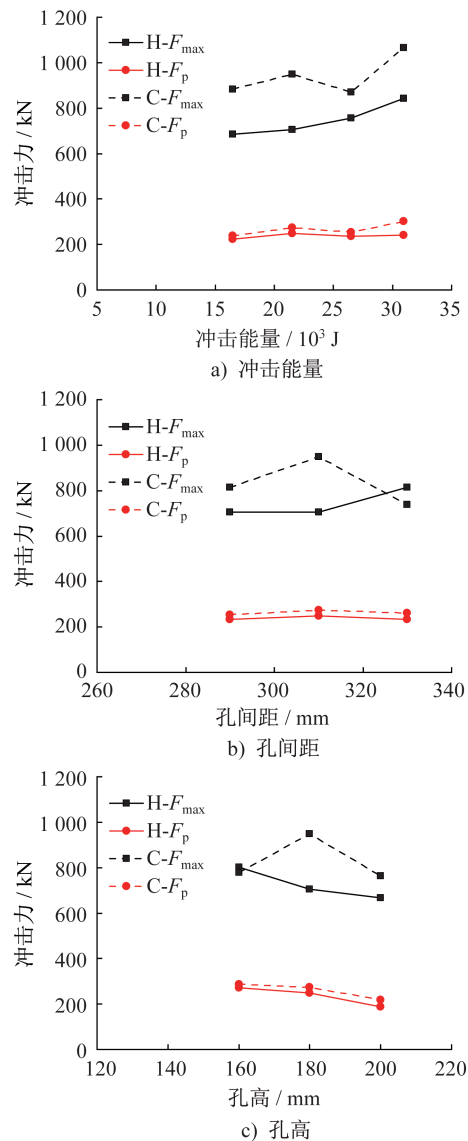


图 10 六边形和圆形腹板开孔钢梁的冲击力对比

Fig. 10 Comparison of impact force of steel beams with hexagonal and circular web openings

## 2.4 位移响应

试验采集了所有试件在位移计d1、d2、d3处的位移时程信号,本文选取各试件在这三处位置所达到的最大位移作为位移特征值,分别用 $d_{1,max}$ 、 $d_{2,max}$ 、 $d_{3,max}$ 表示,从冲击能量、孔间距、孔高这三个方面对比六边形和圆形腹板开孔钢梁,如图11所示。随着冲击能量的增加,两种腹板开孔钢梁的最大位移均逐渐增加;随着孔间距的增加,二者的最大位移均逐渐减小;随着孔高的增加,二者的最大位移均逐渐增加。在相同冲击能量、孔间距和孔高的条件下,圆形腹板开孔钢梁产生的最大位移小于六边形腹板开孔钢梁的最大位移,其平均最大位移为后者的86.49%。而且随着冲击能量的增加,二者最大位移的比值逐渐减小,这表明圆形腹板开孔钢梁抵抗冲击作用的能力更强。在本次试验中,孔间距和孔高并没有引起二者在最大位移响应方面出现一般性规律的变化。

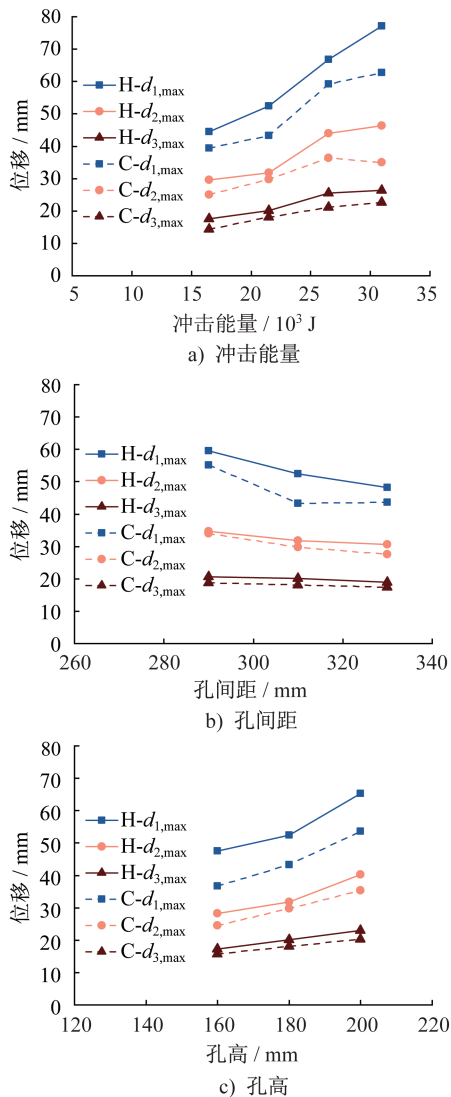


图11 腹板开孔钢梁的位移特征值对比

Fig. 11 Comparison of characteristic values of displacement of steel beams with web openings

## 2.5 腹板孔O3处的应力应变分析

根据图4的应变传感器布置方案采集各试件对应位置的应变数据,选取最小冲击能量 $E$ 为16 500 J和最大冲击能量 $E$ 为30 960 J时,六边形和圆形腹板开孔钢梁的孔O3处应变时程曲线进行对比分析,如图12所示。在冲击能量为16 500 J和30 960 J时,六边形腹板开孔钢梁在受到冲击后的0.5 ms内,测点HSR2、HSR4、HSR6和HSR8位置的应变迅速激增(正、负方向),平均应变率分别为 $-89.630 \text{ s}^{-1}$ 、 $55.053 \text{ s}^{-1}$ 、 $-75.499 \text{ s}^{-1}$ 、 $69.474 \text{ s}^{-1}$ ,如图12a)~b)所示,这四处位置为六边形孔上、下边两端的孔角。然而,在冲击能量为16 500 J时,圆形腹板开孔钢梁在测点CSR2、CSR4、CSR6和CSR8位置的应变增长并不是都大幅增加。测点CSR8靠近落锤冲击作用位置处的应变在冲击后0.5 ms内的应变率为 $27.546 \text{ s}^{-1}$ ,但是之后趋于稳定或几乎停止发展。在测点CSR4处的应变率为 $16.035 \text{ s}^{-1}$ ,但应变增长在0.7 ms后出现了停滞,如图12c)所示;而冲击能量为30 960 J时,测点CSR4处的应变率为 $84.218 \text{ s}^{-1}$ 。这表明在冲击能量较小时,圆形腹板开孔钢梁跨中两侧的孔并不会产生较大的屈曲,但是六边形腹板开孔钢梁在相同冲击能量作用下,该冲击区域附近孔产生的屈曲程度加剧。

六边形和圆形腹板开孔钢梁在冲击荷载下O3、O4孔洞周围的应力分布情况,如图13所示,其中红色区域为拉应力区,黄色区域为压应力区。相比于圆形腹板开孔梁,六边形腹板开孔梁在冲击荷载下存在更为严重的应力集中现象,在拉应力作用下腹板开孔处的拐角可能会出现裂纹,而圆形腹板开孔梁的应力分布相对均匀且未产生裂缝,如图6a)所示。在冲击荷载下,随着裂缝的拓展,六边形腹板开孔梁的完整性和连续性被破坏,抗弯刚度的减小导致构件整体刚度的降低。此外六边形孔的开孔面积比圆形孔的开孔面积更大,这同样会使六边形孔产生较大的刚度损失,导致六边形腹板开孔梁的抗冲击性能低于圆形腹板开孔梁的抗冲击性能。

## 2.6 冲击位置处孔的变形

由图5可知,冲击位置处的孔间腹板产生的变形最大,且两侧的孔随着落锤的向下冲击而发生压缩变形,并朝着冲击作用位置的方向发生转动,如图14所示。因此本文只针对冲击作用位置的孔变形进行分析,对孔间腹板两侧孔受冲击后的侧向投影进行面积积分,得到变形后侧向投影面积 $A_{b1}$ 和 $A_{b2}$ ,采用式(4)计算冲击位置处孔面积减小率 $\delta$ 。

$$\delta = [0.5(2A_0 - A_{b1} - A_{b2})/A_0] \times 100\% \quad (4)$$

式中: $A_0$ 为冲击前的孔侧向投影面积; $A_{b1}$ 和 $A_{b2}$ 分别为跨中孔间腹板左、右侧的孔受冲击作用后发生变形的侧向投影面积。

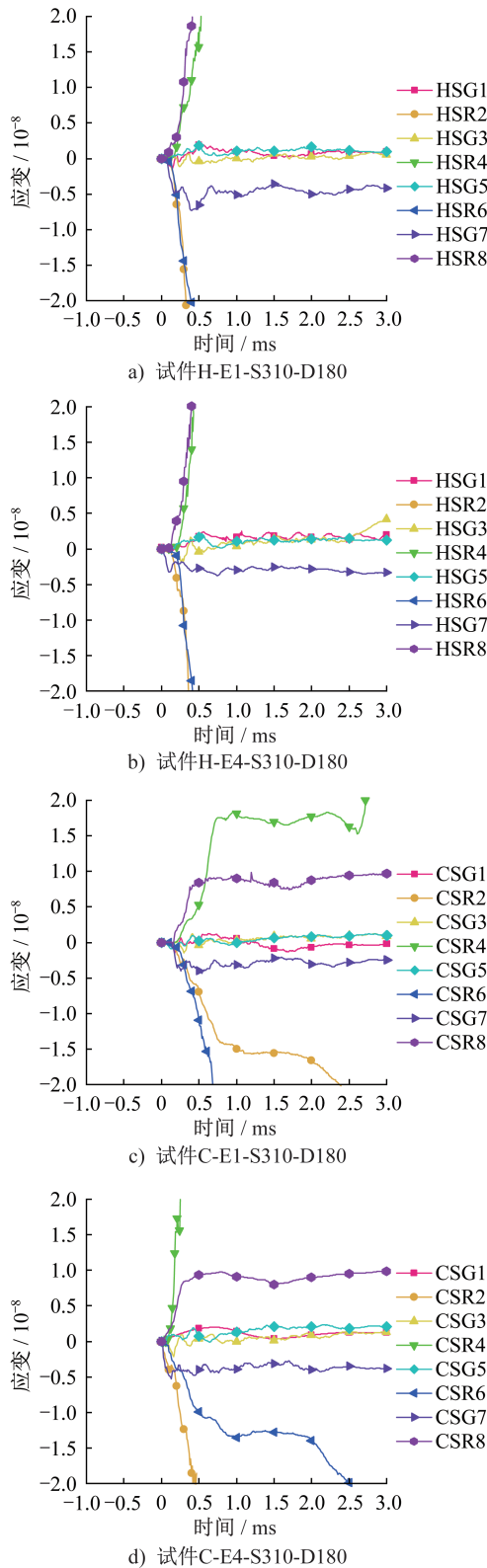


图12 孔O3处的应变时程曲线

Fig. 12 Strain time-history curves at opening O3

由式(1)计算得到不同冲击能量作用下,六边形和圆形腹板开孔钢梁在跨中处的孔投影面积减小率,投影面积减小率和冲击能量的关系如图15所示。随着冲击能量的增加,两种腹板开孔钢梁的投影面积减小率均增大,

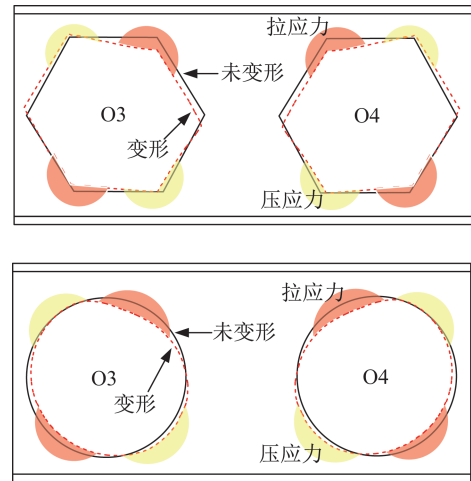


图13 应力分布

Fig. 13 Stress distribution

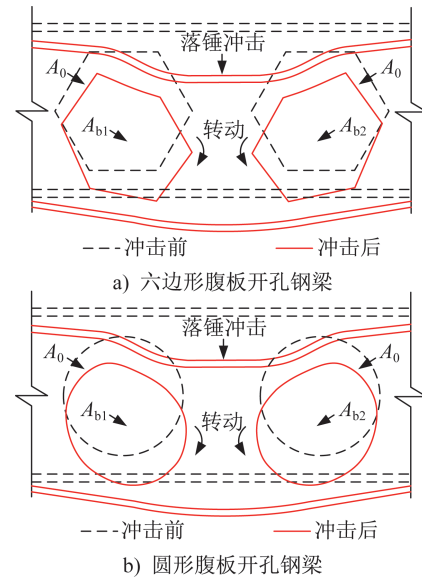


图14 孔受冲击后的变形简化模型

Fig. 14 Simplified model of opening deformation after impact

而六边形腹板开孔钢梁的增长幅度更大。当冲击能量为16 500 J时,六边形腹板开孔钢梁的投影面积减小率为圆形腹板开孔钢梁投影面积减小率的1.13倍,随着冲击能量逐渐增加,前者的投影面积呈线性增长,而后者在冲击能量较小时的增量很小,但增长速率逐渐增加。当冲击能量为21 500 J时,二者投影面积减小率的比值达到了6.94;而冲击能量达到30 960 J时,该比值为3.95。这表明在相同的冲击能量作用下,圆形腹板开孔钢梁产生的孔变形比六边形腹板开孔钢梁产生的孔变形更小。

### 2.7 冲击能量吸收

CHEN等<sup>[15]</sup>通过冲击力-位移曲线与横、纵坐标轴围成的面积估算试件在冲击作用下的吸收能量 $E_p$ 。本文

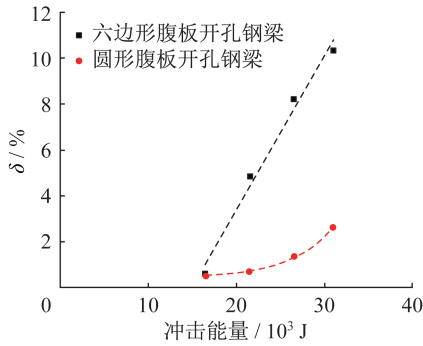


图 15 孔投影面积减小率与冲击能量的关系

Fig. 15 Relationship between area reduction ratio of opening projected area and impact energy

根据式(5)对试验过程中采集的冲击力  $F$  和跨中位移  $d$  进行积分得到各试件的吸收能量,由此评估试件的耗能能力。六边形和圆形腹板开孔钢梁的吸收能量和冲击能量的关系如图 16 所示,前者的平均冲击能量吸收率(冲击能量/吸收能量)为 51.56%,而后者为 57.63%,表明圆形腹板开孔钢梁对冲击的耗能能力更强。

$$E_p = \int Fdd \quad (5)$$

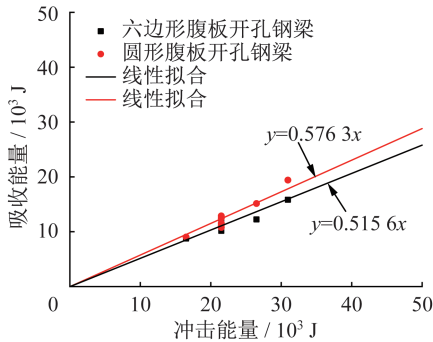


图 16 吸收能量和冲击能量的关系

Fig. 16 Relationship between absorbed energy and impact energy

### 3 有限元分析

#### 3.1 数值模型建立

采用刚性单元模拟落锤,采用实体单元 C3D8R 模拟腹板开孔钢梁,如图 17 所示。通过平衡计算精度和效率来确定各部件的网格划分:采用默认的网格划分落锤;由于冲击对腹板开孔钢梁造成的变形主要集中在跨中,因此采用尺寸为 5 mm 的网格划分跨中附近的翼缘和腹板,而其他部分采用尺寸为 10 mm 的网格进行划分;将翼缘和腹板的网格在厚度方向上划分为两层以提高模拟的精度。在试验中翼缘和腹板之间的焊缝并未出现开裂现象,因此数值模型采用简化处理的方法,将翼缘和腹板之间的连接设置为绑定。落锤与上翼缘之间的法向接触为硬接触,切向接触选用库仑摩擦模型,摩擦系数设置为

0.2。数值模型中腹板开孔钢梁的长度为试件的计算长度,翼缘和腹板的厚度根据表 2 中尺寸进行设置。梁两端截面分别耦合到两个参考点,并设置为铰约束,即不可发生任何方向上的位移,只可发生绕  $z$  轴方向的转动。

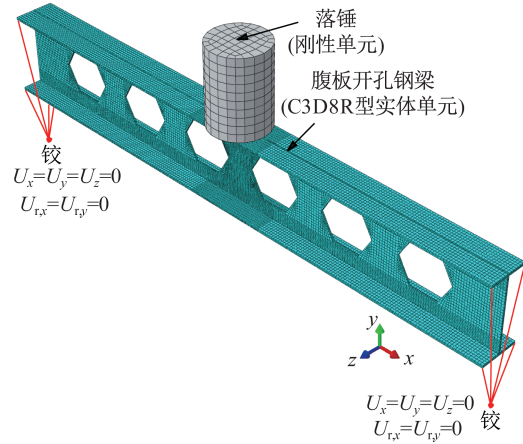


图 17 腹板开孔钢梁的数值模型

Fig. 17 Numerical model of steel beam with web openings

翼缘和腹板的屈服强度、极限强度、弹性模量根据表 2 进行设置。当钢材经历碰撞、爆炸、火灾等事件时,塑性将受到材料应变率敏感性的影响<sup>[16-17]</sup>。数值模型模拟这一现象最简单的方法是采用动态放大系数  $D_{IF}$ ,这是一个用于量化结构单元材料在动态加载条件下的抵抗因子<sup>[18]</sup>。冲击作用下需要考虑钢材的应变率效应,因此采用 Cowper-Symonds 模型。 $D_{IF}$  通过式(6)进行计算,其中参数  $D = 40$  和  $q = 5$ <sup>[15]</sup>。

$$D_{IF} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (6)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率; $D$ 、 $q$ 为 Cowper-Symonds 模型的参数。

为了准确地模拟六边形孔角的开裂,需要选择合适的材料断裂模型。RICE 等<sup>[19]</sup>简化了断裂模型并分析了断裂应变与应力三轴度的关系, JIA 等<sup>[20]</sup>进一步改进了模型。根据现有的断裂模型考虑钢材的延性破坏和剪切破坏<sup>[21]</sup>,该模型考虑了断裂应变和应力三轴度之间的关系,如式(7)~(8)所示。

$$\frac{\epsilon_{fd}}{\epsilon_u} = \begin{cases} 1.13 & T^\sigma \leq -1/3 \\ 0.04 + 0.86\exp(-0.7T^\sigma) & -1/3 < T^\sigma \leq 10/3 \\ 0.12 & 10/3 < T^\sigma \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_u} = \begin{cases} 0.43 & T^\sigma \leq 5/3 \\ 0.38 + 0.40\exp[6.69(T^\sigma - 2)] & 5/3 < T^\sigma \leq 2 \\ 0.78 & 2 < T^\sigma \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\epsilon_{fd}$  和  $\epsilon_{fs}$  分别为延性破坏和剪切破坏的初始断裂塑性应变； $\epsilon_u$  为极限塑性应变； $T^*$  为应力三轴度。

在大变形情况下，由于材料的非线性行为与断裂现象，在数值模拟中经常出现收敛困难的问题，因此本文采用动力显式求解方法以提高计算效率。

### 3.2 数值模型验证

在数值模型中定义了断裂模型后，可以模拟六边形腹板开孔钢梁受落锤冲击后孔角的开裂，如图 6a) 所示。数值模型中受落锤冲击的上翼缘部位出现凹陷，位于冲击区域附近的腹板发生变形，而远离冲击区域的腹板基本不发生变形，这与试件的变形模式相一致。在冲击能量为 16 500 J 和 30 960 J 的情况下，对比六边形和圆形腹板开孔钢梁的数值模拟结果与试验结果，如图 18 所示，冲击力峰值、冲击力平台值和最大跨中位移值的误差均不超过 10%。这表明数值模型可以较为准确地模拟腹板开孔钢梁在冲击作用下的动力响应。

### 3.3 冲击作用位置

从理论上来说，腹板开孔钢梁受到冲击的位置是很难被预测的，冲击作用可以发生在沿梁长度方向的任何位置，因此需要探究不同作用位置受到冲击作用后的动力响应。本文采用有限元方法分析冲击作用位置对六边形和圆形腹板开孔钢梁的影响，冲击位置共设置 6 处（用 P1~P6 表示，各相邻作用位置之间间隔 155 mm，包括跨中截面、孔中心线截面和非跨中处孔间腹板中心线截面），冲击速度为  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，冲击质量为 430 kg。六边形和圆形腹板开孔钢梁受到冲击作用后的变形形态如图 19 所示。随着冲击作用位置从 P1 向 P6 移动，两种腹板开孔钢梁的局部变形由跨中向支座移动，远离冲击作用位置的其余部位并不会产生较大的变形。总体而言，圆形腹板开孔钢梁的变形比六边形腹板开孔钢梁的变形更小。

根据 2.2 节中冲击力特征值的定义，两种腹板开孔钢梁在不同冲击作用位置的冲击力特征值如图 20 所示。当冲击作用在 P1 位置时，两种腹板开孔钢梁的冲击力峰值均最低；冲击作用位置从 P1 向 P6 移动的过程中，在 P4 位置时二者的冲击力峰值均有较大幅度的减小。由于力的作用是相互的，腹板开孔钢梁在受落锤冲击的过程中产生的冲击力峰值越大，可以反映出其在抵抗冲击的初期具有越好的强度。而 P1 和 P4 位置的冲击力峰值较小，表明这两处在冲击力峰值阶段可能受到不利影响，但圆孔腹板开孔钢梁的抵抗效果略好一些。冲击作用进入冲击平台阶段后，平台值可反映冲击抵抗过程中腹板开孔钢梁与落锤之间相互作用的稳定性。当冲击作用位置为 P6 时，冲击力平台值有很大幅度的提升。这表明该位

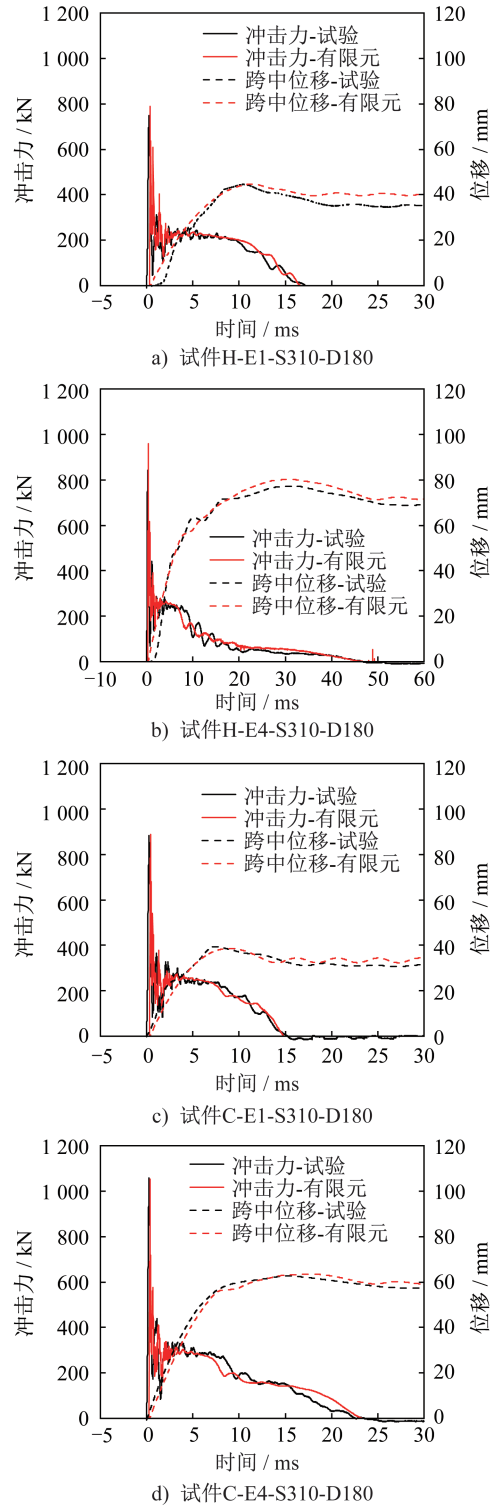


图 18 冲击力和跨中位移时程曲线对比

Fig. 18 Comparison of time-history curves of impact force and mid-span displacement

置在冲击平台阶段抵抗冲击作用的强度较高。

上述 6 处冲击作用位置受到冲击后整根梁产生的最大位移  $d_{max}$ ，如图 21 所示。六边形腹板开孔钢梁在 P1 和 P4 位置受到冲击后产生的位移较大，表明这两处位置是冲击不利位置，其中 P4 位置产生的位移最大。然而，相

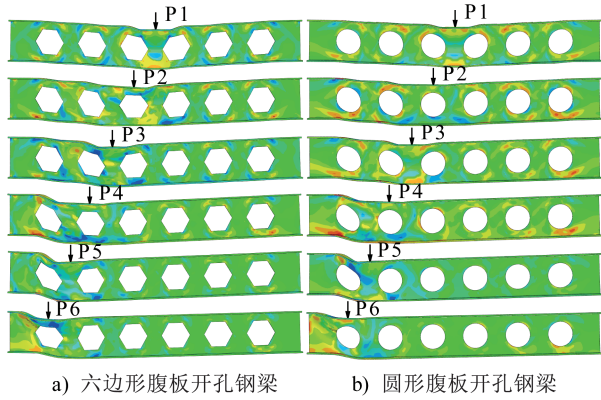


图 19 不同位置受到冲击作用后的变形形态  
Fig. 19 Deformation modes after impact of different positions

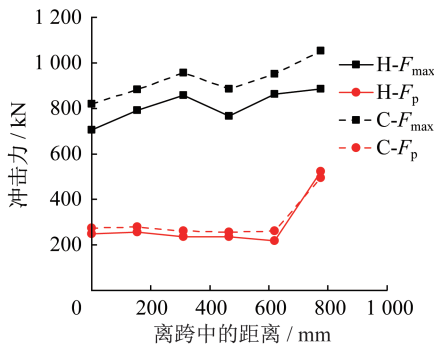


图 20 不同冲击作用位置的冲击力峰值和冲击力平台值  
Fig. 20 Impact peak value and impact platform value of different impact positions

较于六边形腹板开孔钢梁,圆形腹板开孔钢梁在P1位置的最大位移降低了18.69%,有效地改善了六边形腹板开孔钢梁在P1位置的不利情况;同时,在P4位置的最大位移也降低了14.26%,表明冲击最不利位置P4的位移有所减小。相较于P1和P3位置,六边形腹板开孔钢梁的P2位置受冲击产生的最大位移有所减小,原因为P2位置受到冲击作用后,冲击力会由该位置两侧的孔间腹板共同承担,传力效果比P1和P3位置由单个孔间腹板承担冲击作用的传力效果更好。而P4位置与P2位置虽然具有相同的开孔构造,但是由于P4位置距离跨中更远,其受力情况与P2位置的受力情况不同。P4位置处的腹板开孔钢梁受到的弯矩较小,而剪力较大,因此其变形产生的主要原因为剪切效应。随着冲击点向左移动,结构的变形逐渐向左倾斜,冲击点两侧的剪力差逐渐增大,靠近支座一侧的剪力会明显大于靠近跨中一侧的剪力。这导致P4位置的剪力主要由其左侧的单个孔间腹板承担,这与P1位置的传力效果类似,从而使P4位置和P1位置成为腹板开孔钢梁的冲击不利位置。相较于其他位置,冲击作用在P5和P6位置时,两种腹板开孔钢梁产生的最

大位移最小且二者的最大位移比较接近,这是因为左侧剪力一部分由支座承担,这表明冲击作用在梁端附近时比较有利。

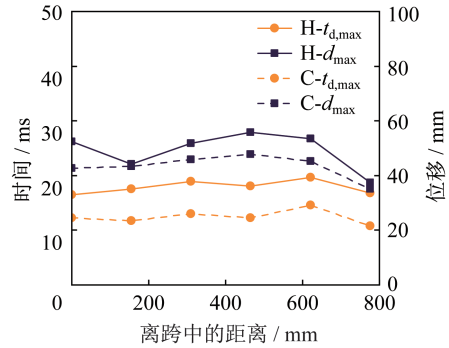


图 21 不同冲击作用位置的最大位移

Fig. 21 Maximum displacement of different impact positions

#### 4 结论

(1) 相较于圆形腹板开孔钢梁,六边形腹板开孔钢梁受到落锤冲击作用后,与之接触的上翼缘发生凹陷的程度更深,跨中孔间腹板发生的侧向凸曲更大,其两侧孔洞的压缩变形更大,且靠近落锤冲击作用位置处的孔角发生开裂。

(2) 大多数情况下六边形腹板开孔钢梁在冲击初期的抵抗效果不如圆形腹板开孔钢梁在冲击初期的抵抗效果,但随着孔间腹板的宽度增加,二者在冲击初期的抵抗效果差异逐渐减小。圆形腹板开孔钢梁的冲击力平台值更大,抵抗冲击作用的能力更强,对冲击的耗能能力更强。

(3) 随着冲击能量的增加,两种腹板开孔钢梁的最大位移均逐渐增加;随着孔间距的增加,二者的最大位移均逐渐减小;随着孔高的增加,二者的最大位移均逐渐增加。圆形腹板开孔钢梁产生的平均最大位移为六边形腹板开孔钢梁对应值的86.49%。

(4) 有限元软件建立的数值模型可以较为准确地模拟腹板开孔钢梁在冲击作用下的动力响应,二者的冲击最不利位置均位于距离梁端大约1/4计算长度处。冲击作用在梁端附近时比较有利,产生的位移最小。

#### 参考文献:

[ 1 ] ZIRAKIAN T, SHOWKATI H. Distortional buckling of castellated beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(9) : 863-871. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2006. 01.004.  
[ 2 ] ZAINAL ABIDIN A R, IZZUDDIN B A. Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings[J].

- Engineering Structures, 2013, 50: 197-206. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.10.006.
- [ 3 ] DE OLIVEIRA J P, CARDOSO D C T, SOTELINO E D. Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: explicit equations and FE parametric study [J]. Engineering Structures, 2019, 186: 436-445. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.02.034.
- [ 4 ] 罗烈, 蔡剑男, 张和平. 简支蜂窝钢梁桥区截面正应力改进算法[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 342-348. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.S1.048.
- LUO Lie, CAI Jiannan, ZHANG Heping. Improved algorithm for normal stress of simply supported honeycomb steel beam bridge area [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (Suppl. 1) : 342-348. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.S1.048. (in Chinese)
- [ 5 ] 王培军, 王旭东, 马宁. 圆角多边形孔蜂窝梁间腹板屈曲承载力研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 145-152. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0978.
- WANG Peijun, WANG Xudong, MA Ning. Web-post buckling of castellated steel beam with fillet corner web openings [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (4) : 145-152. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0978. (in Chinese)
- [ 6 ] JUSTINO L G, RIBEIRO J C L, DE SOUZA VERÍSSIMO G, et al. Shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams in fire [J]. Engineering Structures, 2020, 209: 109960. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109960.
- [ 7 ] TSAVDARIDIS K D, PAPADOPOULOS T. A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 116: 92-113. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.046.
- [ 8 ] 霍静思, 张晋清, 陈柏生, 等. 冲击荷载作用下热轧H型钢梁力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 242-249. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.12.028.
- HUO Jingsi, ZHANG Jinqing, CHEN Baisheng, et al. Dynamic behaviors of hot-rolled steel beams under drop weight impact loading [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 242-249. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.12.028. (in Chinese)
- [ 9 ] D'ANTIMO 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.
- [ 10 ] WANG H T, HUO J S, ELCHALAKANI M, et al. Dynamic performance of retrofitted steel beam-column connections subjected to impact loadings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 183: 106732. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106732.
- [ 11 ] 吴炎海, 周凯敏. 孔洞参数对钢筋混凝土开孔梁受力性能的影响 [J]. 工程力学, 2008, 25(增刊1): 179-183.
- WU Yanhai, ZHOU Kaimin. The effect of opening parameter on the mechanical behaviors of RC beams with large rectangular openings [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (Suppl.1): 179-183. (in Chinese)
- [ 12 ] WANG F X, FU C J, CHEN H Y, et al. Effect of impact loading on the dynamic response of steel beams with hexagonal web opening [J]. Thin-walled Structures, 2022, 180: 109896. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109896.
- [ 13 ] 罗才松, 王枫轩, 付朝江, 等. 冲击荷载下圆孔蜂窝梁动力响应及孔间腹板屈曲研究 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 132-142. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0632.
- LUO Caisong, WANG Fengxuan, FU Chaojiang, et al. Study on dynamic responses and buckling of web-post of castellated beam with circular web openings under impact load [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(1): 132-142. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0632. (in Chinese)
- [ 14 ] 周朝阳, 周云峰. 蜂窝梁等效抗弯刚度的确定方法 [J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 102-106, 115.
- ZHOU Chaoyang, ZHOU Yunfeng. Confirm method of equivalent bending rigidity of castellated beams [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25 (1) : 102-106, 115. (in Chinese)
- [ 15 ] CHEN Y, HUO J S, CHEN W S, et al. Experimental and numerical assessment of welded steel beam-column connections under impact loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 106368. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106368.
- [ 16 ] CHEN K, ZHANG Y, TAN K H. Behaviour of steel beam-column joints subjected to quasi-static and impact loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 183: 106721. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106721.
- [ 17 ] JONES N. Structural impact [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 327-376.
- [ 18 ] FU Q N, YANG B, HU Y, et al. Dynamic analyses of bolted-angle steel joints against progressive collapse based on component-based model [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117: 161-174. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.10.010.
- [ 19 ] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17(3): 201-217. DOI: 10.1016/0022-5096(69)920033-7.
- [ 20 ] JIA L J, KUWAMURA H. Ductile fracture model for structural steel under cyclic large strain loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 106: 110-121. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.12.002.
- [ 21 ] YANG B, WANG H, YANG Y, et al. Numerical study of rigid steel beam-column joints under impact loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 62-73. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.004.