

# 不同洞口类型对腹板开洞钢 - 混凝土组合梁 受力性能影响分析

邓其升

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年6月18日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月17日

## 摘要

通过研究不同洞口类型对腹板开洞钢 - 混凝土组合梁受力的影响, 选择合适的洞口形状及洞口位置以降低开洞造成的不利影响; 在已有试验基础上, 利用ABAQUS对洞口设置在弯剪区段且洞口形状不同的组合梁进行力学性能分析, 研究了洞口形状对承载力、变形能力的影响。结果表明: 钢 - 混凝土组合梁腹板开洞会导致刚度、极限承载力下降; 组合梁因洞口形状和位置不同, 极限变形有不同程度增强; 洞口的形状和位置对梁的极限承载力产生显著影响, 在不同的洞口形状对比实验中, 当腹板开设双圆形洞口时, 相比于双正方形洞口, 其承载力的下降幅度相对较小; 当洞口之间的间距增大时, 梁的承载力会有所提高。特别是当右侧洞口距离加载点的距离减小时, 这种承载力的增加效应尤为明显; 另外, 洞口形状及位置对腹部开洞组合梁的变形能力影响较大。

## 关键词

组合梁, 腹板开洞, 洞口形状, 受力性能

# Analysis of the Influence of Different Opening Type on the Stress Performance of Steel-Concrete Composite Beams with Web Openings

Qisheng Deng

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

By studying the influence of different types of openings on the stress of steel-concrete composite beams with web openings, appropriate opening shapes and positions are selected to reduce the adverse effects caused by openings; on the basis of existing experiments, Abaqus was used to analyze the mechanical properties of composite beams with different shapes of openings set in the bending shear section, and the influence of opening shape on bearing capacity and deformation capacity was studied. The results show that opening holes in the web of steel-concrete composite beams can lead to a decrease in stiffness and ultimate bearing capacity; the ultimate deformation of composite beams is enhanced to varying degrees due to different shapes and positions of openings; the shape and position of the opening have a significant impact on the ultimate bearing capacity of the beam. In comparative experiments with different opening shapes, when the web plate has a double circular opening, the decrease in bearing capacity is relatively small compared to the double square opening; when the spacing between openings increases, the bearing capacity of the beam will be improved. Especially when the distance between the right side opening and the loading point decreases, the effect of increasing the bearing capacity is particularly significant; in addition, the shape and position of the opening have a significant impact on the deformation capacity of the abdominal opening composite beam.

## Keywords

Composite Beams, Abdominal Plate Opening, The Shape of the Opening, Force Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢-混凝土组合梁的特点是其截面尺寸较小、自身重量较轻[1]，并且结构和抗震性能出色，因此被广泛用于多层或高层建筑结构。在多层和高层建筑内部，为了实现特定的设计功能，设计时经常会在梁的管道和设备之间进行穿越。这种设计中采用腹板开洞方式，不仅确保了建筑的内部空间得到充分的利用，还为建筑创造了更加吸引人的外观，增强了整体的美感。但腹板开洞会导致钢混组合梁的刚度以及承载力下降，在洞口位置，应力会产生显著的集中，使得原先主要由腹板产生的剪切力大量转向了洞口上方的混凝土翼缘板。这样的情况将促使混凝土翼缘板更容易产生裂缝，并加速其破坏进程。根据洞口的不同形态和其所在的具体位置，应力集中度会有所不同，这也会导致其组合梁的承载能力也有所区别。因此，研究不同的洞口形状和位置，以缓解应力集中和减少开洞对组合梁承载能力下降的负面影响。

白永生等[2]总结了关于三种腹板开洞组合梁的承载力的计算手段；张伟等[3]深入讲解了美国土木工程师学会(ASCE)以及欧洲规范(EC4)中关于腹板开洞简支组合梁的弯曲和抗剪切的设计技巧，并分享了一些实用的计算案例；Chen等[4]的实验以及有限元的分析方法，提出了一种全新的计算腹板开孔梁在负弯矩的影响下承载能力的技巧；寇立亚等[5][6]探究了腹板开洞组合梁的承载极限影响因子，同时也为洞口处的混凝土有效宽度提供了计算公式；王鹏等[7]-[9]对五根带有加固肋的腹板开洞组合梁进行了实验研究，并据此导出了这些梁具备的承载力计算公式；Ellobody等[10]成功构建了大量压型钢腹板开洞组合梁的有限元分析模型，并从材料的力学强度、不同的加载方法和洞口形态等多个角度进行了极限荷载的

细致研究。研究结果显示, 钢材的强度具有显著的影响力, 能够有效地影响这种组合梁的极限荷载情况; 童树根等[11]已经考虑到了剪切变形和空腹桁架弦杆的弯曲变形情况, 并因此提出了一个针对腹板开孔组合梁挠度的计算方案; Claen 等[12]对洞口位置的不同种类的应力交互进行了探讨, 并提出了一种新颖的设计策略, 目的是设计更合适的洞口尺寸并判断其可能的破损方式; 贾连光等[13]提出了针对孔蜂窝组合梁的等效抗剪方程, 并且对蜂窝组合梁在受到负弯矩作用时的极限承载能力进行了深入的分析; Du 等[14]对洞口区域配置纵向加强板以及其截面面积与压型钢板腹板开洞复合梁极限承载力的关联进行了探究, 结果表明组合梁的极限承载力是由加强板的截面面积与洞口尺寸面积是否相等所决定的; Li 等[15]成功创建了有限元分析模型, 并从五种不同视角研究了腹板开洞连续组合梁的最佳开孔位置, 发现这些开孔位置及其存在形式会对连续梁产生两次弯矩调幅。

综上所述, 虽然已有研究深入探讨了带有矩形洞口的腹板开洞组合梁的受力特性, 但目前研究尚未包含洞口形态变化及其位置的影响。因此, 深入研究开洞后的洞口形状和位置对腹板开洞组合梁承载力和变形特性的影响至关重要。探讨这些问题有助于了解洞口形态如何影响腹板开洞组合梁的承载特性, 从而为进一步寻找适当的开洞策略, 以减轻开洞带来的负面影响提供依据。

本研究基于现有的试验研究, 采用了非线性有限元方法进行模拟, 对腹板上设计有各种形状的洞口以及其位置的组合梁在受到的力影响方面进行了深入的探究。此次研究详细探讨了洞口的形状和位置如何影响组合梁的承载能力、变形性能, 目标是找出在受力上有优势的洞口形状及洞口位置。

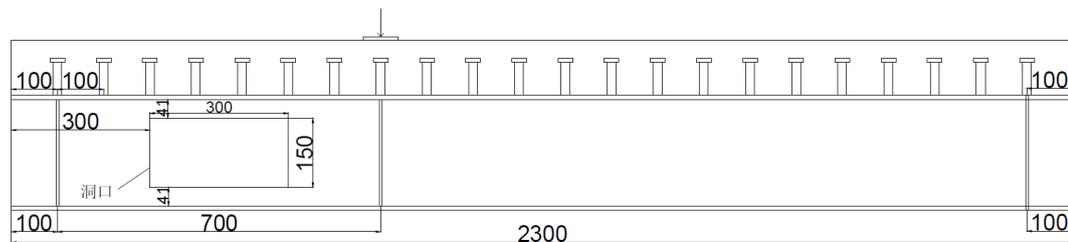
## 2. 有限元模型建立及验证

### 2.1. 建模方法

利用 ABAQUS 软件作为分析工具, 构建了钢-混凝土组合梁的三维细致有限元模型, 该模型还包括组合梁的计算简图以及详细的模型结构, 如图 1 所展示。实体单元采用三维八节点减缩实体单元(C3D8R), 这种单元主要在混凝土、工字型钢和栓钉等材料中使用。钢筋采用三维二节点桁架单元(T3D2)。此模型使用结构化网格的方法来完成网格的划分。钢筋通过内置的方式嵌入混凝土板中, 确保钢筋节点的移动自由度与混凝土板完全匹配, 并实现自动化的自由度耦合, 从而确保钢筋与混凝土板单元能够协同工作。考虑到其他的钢结构与混凝土界面都有化学粘结和摩擦力的存在, 模拟时使用切向罚函数(摩擦系数取 0.3)和法向“硬”接触。在进行加载的过程中, 梁的三分之一位置上表面会出现一个竖直下的位移, 位移的幅度为 20 mm, 按照平滑时间-位移曲线进行加载。

### 2.2. 材料本构关系

当混凝土在单一方向上受到压力时, 其本构关系可以参见相应的数学公式。混凝土在上升阶段的形状是二次抛物线, 而在下降阶段则呈现出斜直线(参见图 2)。混凝土的抗压强度标准为  $f_c$ , 达到 26.8 MPa。弹性模量  $E_c$  为  $3.25 \times 10^4$  MPa, 泊松比为 0.2。混凝土峰值应变  $\varepsilon_0 = 0.0002$ , 极限应变  $\varepsilon_{cu} = 0.00038$ 。



(a) 试件几何尺寸

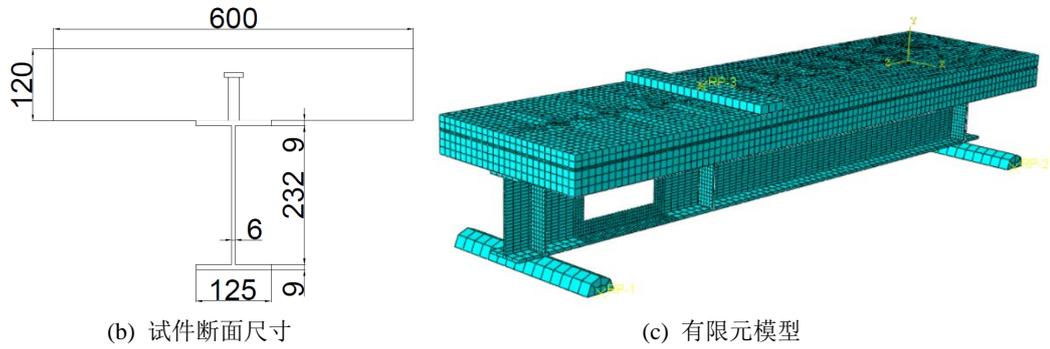


Figure 1. Size of specimen and finite element model (unit: mm)

图 1. 试件尺寸及有限元模型(单位: mm)

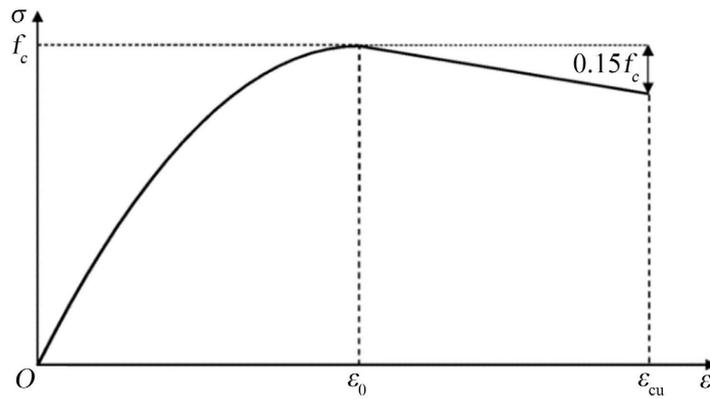


Figure 2. Stress-strain relationship of concrete

图 2. 混凝土的应力 - 应变关系

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[ 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f_c \left( 1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right) & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别为应力、应变。

通过使用多线性等向强化模型, 钢梁、钢筋和栓钉得以强化。图 3 展示了这一模型: 其中, 钢材的弹性模量  $E_s$  为  $2.06 \times 10^5$  MPa,  $f_y$  代表屈服强度,  $\varepsilon_y$  代表屈服应变,  $\varepsilon_h$  是强化应变。  $\varepsilon_h = 12\varepsilon_y$  对于钢材来说, 其强化模量  $E'_s$  是弹性模量的 0.01 倍, 具体的数学表示方式如式(2)所示。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & 0 < \varepsilon < \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_h \\ f_y + E'_s (\varepsilon - \varepsilon_h) & \varepsilon \geq \varepsilon_h \end{cases} \quad (2)$$

栓钉的荷载 - 滑移( $P$ - $s$ )曲线(图 4 展示)是基于 Ollgaard 等[16]所提出的公式构建的。这些公式如式(3)所示不仅形式简明, 而且适用于各种方向的混凝土, 特别是对于常规混凝土和轻型混凝土。公式中的  $s_x$ 、 $s_y$ 、 $s_z$  代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的滑移相对位置, 而  $A_{sd}$  代表栓钉的横截面面积,  $L_s$  则表示栓钉的长度,  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的荷载。  $N_c$  代表单个栓钉的抗剪承载能力,  $\gamma$  代表栓钉抗拉强度的最低值与屈服强度的比值,  $f$  则是栓钉抗拉强度的设计参数。

$$\begin{cases} P_x = N_c^v (1 - e^{-0.71s_x})^{0.4} \\ P_y = \frac{E_s A_{sd}}{L_s} s_y \\ P_z = N_c^v (1 - e^{-0.71s_z})^{0.4} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_c^v = 0.43 A_{sd} \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7 A_{sd} \gamma f \quad (4)$$

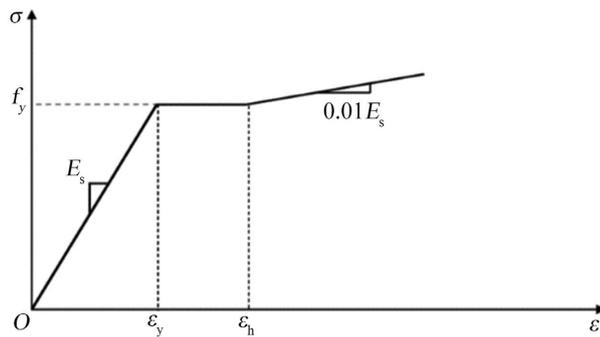


Figure 3. Stress-strain relationship of steel

图 3. 钢材的应力 - 应变关系

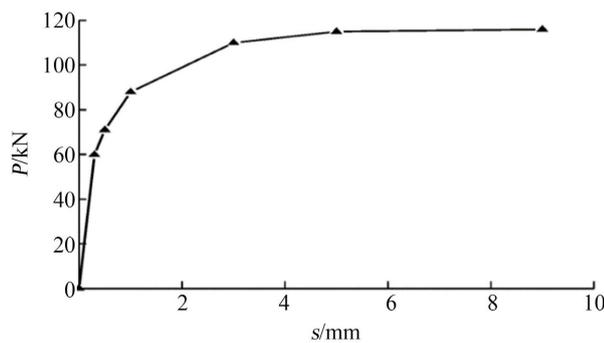


Figure 4. Load-slip curve of stud

图 4. 栓钉荷载 - 滑移曲线

### 2.3. 试验现象与有限元结果对比

文献[9]针对腹板上设置矩形洞口的组合梁进行了实验性的研究，最终得出了相应的极限承载能力和破坏特性。研究涉及的关键试验参数主要囊括了混凝土板的厚度以及其配筋比例。为确保有限元模型的精确性，我们对所有开孔试验样品(A2~A4, B1, B2)进行了详细的有限元分析，并将这些分析成果与实际试验数据进行了深入的比较，具体详情见表 1。从比较数据中，我们发现利用有限元分析得到的最大承载力与实验的结果相当接近，并且误差均控制在 5% 之内；通过对比刚度和变形能力，结果与实验数据显示的误差非常小，完全满足了工程的精确度标准。这一系列结果证实，有限元分析所得出的数据是可靠的。

### 3. 试件洞口形状及位置参数

为深入了解不同洞口形状和位置如何影响腹板开洞组合梁的受力表现，设计了一个无开洞对照梁(A1)与一根长方形开洞的组合梁(A2)，另外还有四根洞口形态和位置各异的组合梁(从 A3 到 A6)，具体信息可参见表 2。其中，洞口设计有正方形和圆形两种形态，(A3)和(A4)两个正方形洞口的面积与(A2)长方形

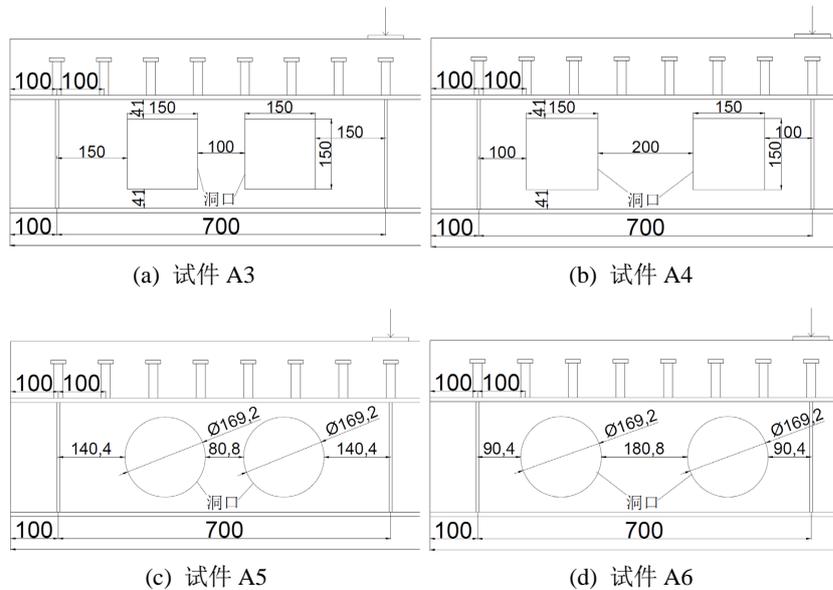
洞口的面积相同, (A4, A5)两个圆形洞口面积亦与(A2)长方形洞口面积相同, (A5, A6)圆孔圆心位置与(A3, A4)正方形孔中心位置分别相同, 详细尺寸见图 5。

**Table 1.** Experimental and finite element comparison results  
**表 1.** 试验与有限元对比结果

试件编号	极限承载力/kN		荷载相对误差/%	极限位移/mm		位移相对误差/%
	试验	有限元		试验	有限元	
A2	172.5	177.75	3.0	8.59	8.24	4.1
A3	194.2	189.25	2.5	8.35	9.03	8.1
A4	219.3	212.25	3.2	9.57	9.98	4.3
B1	184.6	191.25	3.6	9.79	10.42	6.4
B2	192.5	196.25	1.9	10.69	11.29	5.6

**Table 2.** Specimen numbering and characteristics  
**表 2.** 试件编号与特征

试件编号	试件特征
A1	腹板无开孔
A2	腹板长方形开孔
A3	腹板正方形双孔, 孔间距 100 mm
A4	腹板正方形双孔, 孔间距 200 mm
A5	腹板圆形双孔, 孔间距 80.8 mm
A6	腹板圆形双孔, 孔间距 180.8 mm



**Figure 5.** Size of specimen opening (unit: mm)  
**图 5.** 试件开孔尺寸(单位: mm)

#### 4. 极限承载力与变形能力分析

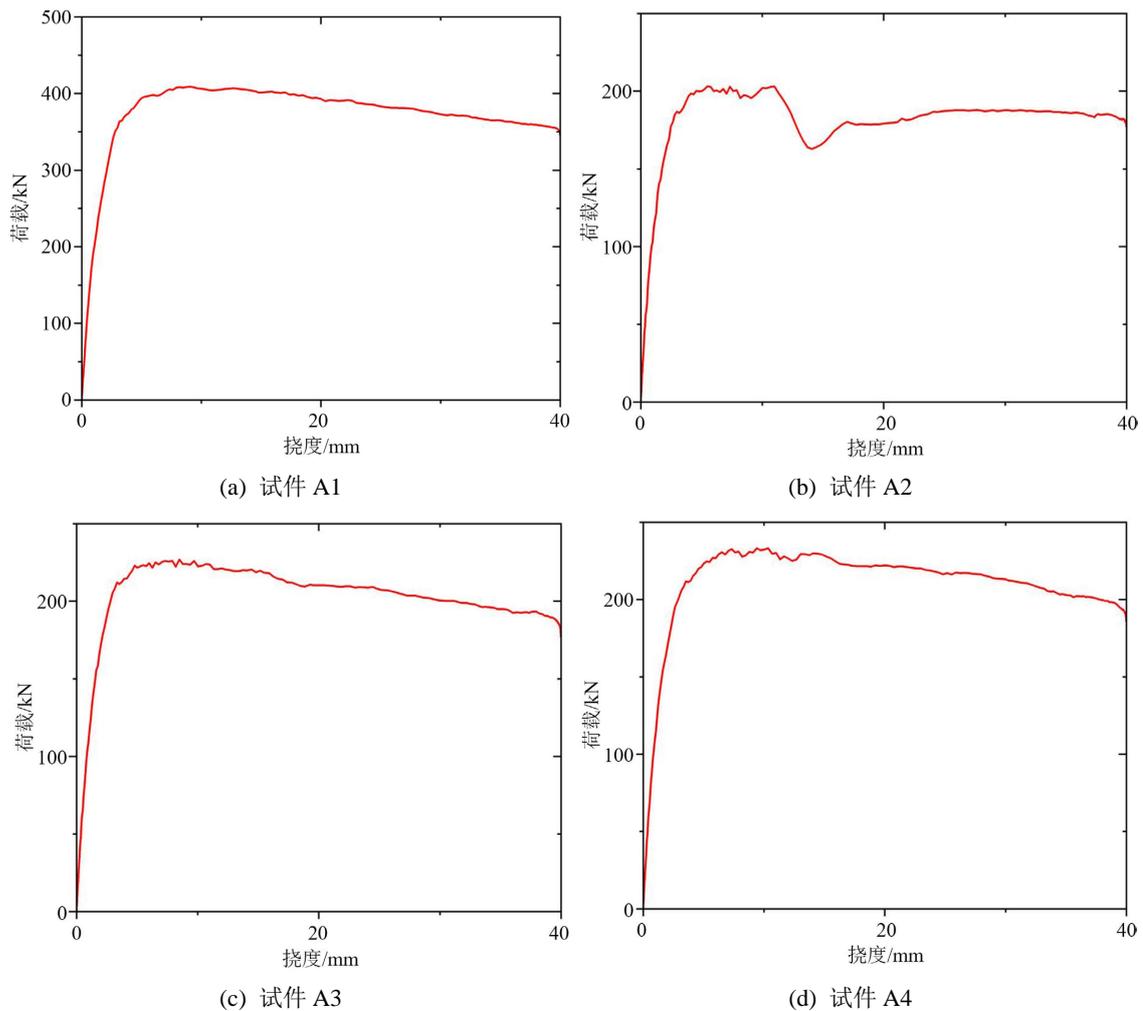
洞口的存在显著减少了腹板截面的结构强度, 从而导致所有试件的刚性和承载能力也都明显下降。由表 3 和图 6 可看出: 首先是试件 A6, 其承载能力最为出色, 达到了试件 A0 的 63.6%; 其次是试件 A4,

其承载力达试件 A0 的 57.0%。试件 A2 承载力最低, 只有试件 A0 的 49.6%。进一步观察发现, 试件 A5 和试件 A6 的承载力都比试件 A4 要大。这些数据表明了洞口的形状对腹板开洞组合梁的极限承载能力产生了显著影响。而在各试件中, A4 和 A6 的承载力都比 A5 强, 这意味着洞口的位置是影响腹板开洞组合梁极限承载力的关键因素。当洞口间距更远时, 右侧洞口与加载点的距离越近, 承载力也就越大。从 6 种不同的试件进行变形能力测试, 如表 3 和图 7 展示的那样, 每一种试件的变形能力表现出明显的差异, 而且所有试件的极限变形均高于试件 A0。

**Table 3.** Comparison of ultimate load and displacement of specimens with different shapes and positions of openings  
**表 3.** 不同洞口形状、位置各试件的极限荷载与极限位移对比

试件编号	极限荷载 $P_u$ /kN	$P_u/P_{A0}$	极限位移 $f$ /mm	$f/f_{A0}$
A1	409.00	1.000	5.27	1.00
A2	203.00	0.496	5.50	1.04
A3	227.00	0.555	8.49	1.61
A4	233.00	0.570	10.35	1.96
A5	251.00	0.614	7.90	1.50
A6	260.00	0.636	10.99	2.08

注:  $P_{A0}$ 、 $f_{A0}$  分别为试件 A1 的极限荷载和极限位移。



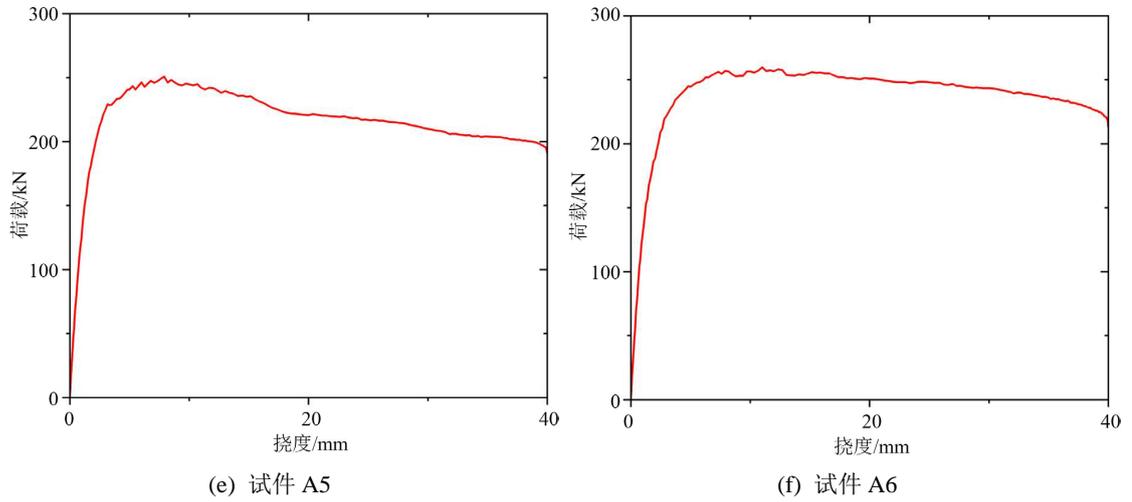


Figure 6. Load deflection curves of each specimen  
图 6. 各试件的荷载 - 挠度曲线

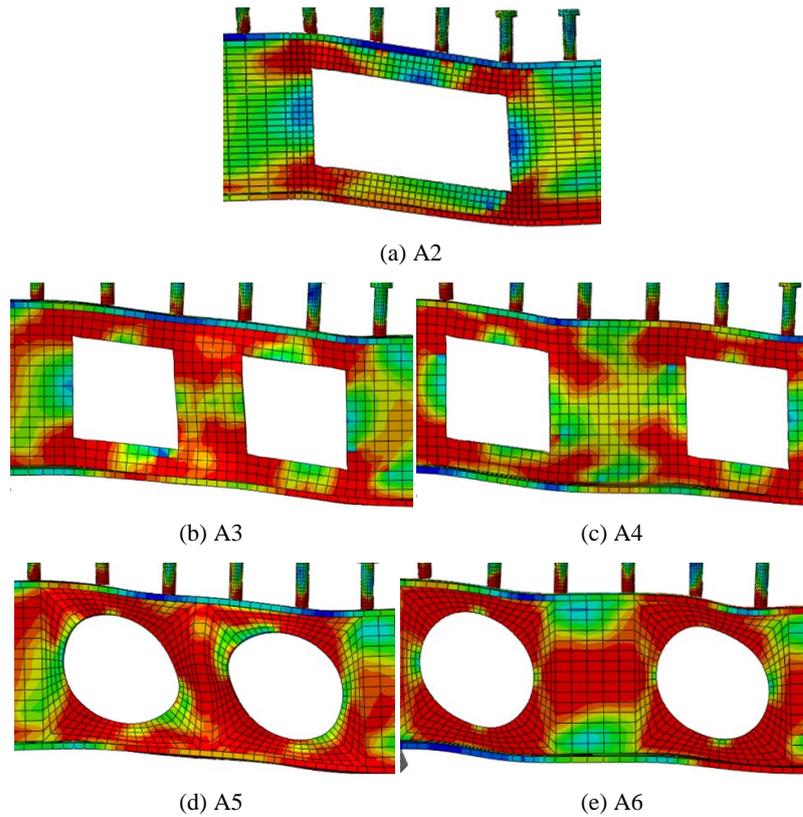


Figure 7. Plastic deformation of each specimen  
图 7. 各试件的塑性形变

## 5. 结语

- 1) 钢 - 混凝土组合梁腹板开洞会导致刚度降低、极限承载力下降, 但是极限变形会得到增强。
- 2) 洞口的形状对腹板开洞组合梁极限承载力有显著的影响, 特别是当采用两个圆形洞口时, 其承载力的减少程度要少于两个正方形洞口的情况。

3) 洞口的位置对腹板开洞组合梁极限承载力有影响, 且洞口之间的距离越大, 右边洞口距离加载点越近, 荷载承受能力随之增强。

4) 洞口的形状和具体位置对腹板开洞组合梁的变形能力有着显著的影响。

综上所述, 钢-混凝土组合梁腹板开洞会使极限承载力下降, 极限变形增强, 而洞口形状和洞口位置的不同均会对钢-混凝土组合梁极限承载力和极限变形有显著的影响。

## 参考文献

- [1] Ferreira, F.P.V., Martins, C.H. and De Nardin, S. (2020) Advances in Composite Beams with Web Openings and Composite Cellular Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, **172**, Article ID: 106182. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106182>
- [2] 白永生, 蒋永生, 梁书亭, 等. 腹板开洞的钢与混凝土组合梁承载力计算方法综述和探讨[J]. 工业建筑, 2004, 34(6): 68-70, 83.
- [3] 张伟, 胡夏闽. 腹板开洞钢-混凝土组合梁的抗弯和抗剪设计[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(5): 25-30.
- [4] Chen, T., Gu, X. and Li, H. (2011) Behavior of Steel-Concrete Composite Cantilever Beams with Web Openings under Negative Moment. *International Journal of Steel Structures*, **11**, 39-49. <https://doi.org/10.1007/s13296-011-1004-8>
- [5] 寇立亚, 胡夏闽, 张允领. 腹板开洞钢-混凝土组合梁极限承载力的影响因素分析[J]. 钢结构, 2012, 27(12): 15-20, 6.
- [6] 寇立亚, 胡夏闽. 考虑混凝土板作用的腹板开洞钢-混凝土组合梁承载力有限元分析[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(6): 65-69.
- [7] 王鹏, 周东华, 王永慧, 等. 腹板开洞钢-混凝土组合梁非线性有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(5): 809-817.
- [8] 王鹏, 周东华, 王永慧, 等. 带加劲肋腹板开洞组合梁极限承载力理论研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 138-146, 152.
- [9] 王鹏, 周东华, 王永慧, 等. 腹板开洞钢-混凝土组合梁抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 297-305.
- [10] Ellobody, E. and Young, B. (2015) Behaviour and Design of Composite Beams with Stiffened and Unstiffened Web Openings. *Advances in Structural Engineering*, **18**, 893-918. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.6.893>
- [11] 童根树, 陈迪. 腹板开孔的钢-混凝土组合梁的挠度计算[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 168-178.
- [12] Classen, M., Kurz, W., Schäfer, M. and Hegger, J. (2019) A Mechanical Design Model for Steel and Concrete Composite Members with Web Openings. *Engineering Structures*, **197**, Article ID: 109417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109417>
- [13] 贾连光, 李鹏宇, 焦禹铭. 六边形孔蜂窝组合梁的等效抗剪刚度研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 11-18.
- [14] Du, H., Hu, X., Shi, D. and Fang, B. (2021) Effect of Reinforcement on the Strength of the Web Opening in Steel-Concrete Composite Beam. *Engineering Structures*, **235**, Article ID: 112038. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112038>
- [15] Li, L.Q., Liao, W.Y. and Huo, B.Y. (2021) Finite Element Modeling and Nonlinear Analysis on the Optimum Opening Location for Continuous Composite Beams with Web Openings. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, **28**, 891-897.
- [16] Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W. (1971) Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete. *Engineering Journal*, **8**, 55-64. <https://doi.org/10.62913/engj.v8i2.160>