

引用本文:蒋伟,廖文远,刘德稳,等. 洞口形状对腹板开洞钢-混凝土组合梁的受力性能影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 61-69.

JIANG Wei, LIAO Wenyuan, LIU Dewen, et al. Analysis of influence of opening shape on mechanical performance of steel-concrete composite beams with web openings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 61-69.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01075

洞口形状对腹板开洞钢-混凝土组合梁的受力性能影响分析

蒋伟, 廖文远, 刘德稳, 陈静, 谢鑫

(西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 655024)

摘要:通过研究洞口形状对腹板开洞钢-混凝土组合梁受力的影响,选择合适的洞口形状以降低开洞造成的不利影响;在已有试验基础上,利用 ANSYS 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、变形能力以及内力重分布和传力机制的影响。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;非正方形洞口组合梁因洞口形状不同,极限变形有不同程度增强;洞口形状会影响洞口处混凝土、钢梁承担的剪力比例,混凝土占总剪力的 46%~59%,而钢梁占总剪力的 41%~54%;极限变形与洞口处塑性铰的面积大小有关;栓钉会对周围的混凝土产生一定预压力,对混凝土应力重分布有影响,洞口处混凝土的剪力有明显的剪力差,洞口下方钢梁所承受的剪力大于洞口上方钢梁;洞口形状会影响组合梁内部传力机制,长方形、正方形洞口试件在洞口区域以次弯矩传递力,非长方形、正方形洞口试件在洞口区域以主弯矩传递力;在结构设计时应该考虑洞口位置的偏心、主应力方向与洞口边缘的夹角。

关键词:组合梁;腹板开洞;洞口形状;受力性能

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)03-0061-09

Analysis of influence of opening shape on mechanical performance of steel-concrete composite beams with web openings

JIANG Wei, LIAO Wenyuan, LIU Dewen, CHEN Jing, XIE Xin

(College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 655024, Yunnan, China)

Abstract: By studying the influence of opening shape on the stress of steel-concrete composite beams with web openings, selecting an appropriate opening shape to reduce the adverse effects caused by opening. Based on existing experiments, ANSYS was used to analyze the mechanical performance of composite beams with different shapes of openings in the bending shear section. The influence of opening shape on bearing capacity, deformation capacity, internal force redistribution, and force transmission mechanism was studied. The results show that web opening of steel concrete composite beams can lead to a decrease in stiffness and ultimate bearing capacity. The ultimate deformation of composite beams with non square openings is enhanced to

收稿日期:2022-01-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51808467);云南省科技厅青年项目(2017FD107)

作者简介:蒋伟(1998-),男,工学硕士研究生,E-mail:jw3477@126.com.

通信作者:廖文远(1987-),男,工学博士,副教授,E-mail:lwy065@126.com.

varying degrees due to different shapes of openings. Shapes of openings will affect the proportion of shear force borne by concrete and steel beams at the opening. Concrete accounts for 46%-59% of the total shear force, while steel beams account for 41%-54% of the total shear force. The ultimate deformation is related to the area of the plastic hinge at the opening. Studs will exert a certain pre-pressure on the surrounding concrete and have an impact on the redistribution of stress in the concrete. There is a significant difference in shear force in the concrete at the entrance, and the shear force borne by the steel beam below the entrance is greater than that of the steel beam above the entrance. The shape of the opening will affect the internal force transfer mechanism of the composite beam. The rectangular and square opening specimens transmit force through secondary bending moment in the opening area, while the non rectangular and square opening specimens transmit force through primary bending moment in the opening area. In structural design, consideration should be given to the eccentricity of the opening position and the angle between the direction of the main stress and the edge of the opening.

Key words: composite beam; web opening; opening shape; mechanical performance

0 引言

钢-混凝土组合梁具有截面尺寸小、自重轻、延性好、抗震能力好等优点^[1],广泛应用于多层、高层建筑结构中。随着经济的发展和水平的提高,人们对建筑物使用功能要求不断提高,在多、高层建筑中设置的给排水管道、煤气管道、通风与空调管道等设备管线也越来越多,通过在腹板上开洞,让设备管线通过洞口,既能有效利用建筑空间,也有利于管线设备的布置。腹板开洞导致了组合梁的刚度、承载力下降,在洞口处出现明显的应力集中,将原本主要由腹板承受的剪力大量转移至洞口上部的混凝土翼板中,这就加速了混凝土翼板的开裂和破坏。不同形状的洞口,应力集中程度不同,因此可以通过选择合适的洞口形状来减少应力集中,缓解开洞造成的不利影响。

目前国内外已有的关于腹板开洞组合梁的研究主要针对矩形洞口的情况,对不同形状洞口的研究还是比较少。白永生等^[2]总结了3种腹板开洞组合梁承载力的计算方法;张伟等^[3]介绍ASCE和EC4关于腹板开洞简支组合梁的抗弯和抗剪设计方法并给出了算例;Chen等^[4]通过试验与有限元方法,提出了一种计算负弯矩下腹板开孔梁承载力的方法;寇立亚等^[5-6]分析了腹板开洞组合梁极限承载力因素,拟合了洞口处混凝土有效宽度计算公式;王鹏等^[7-9]做了5根腹板开洞组合梁试验并提出了带加劲肋腹板开洞组合梁的承载力公式;Ellobody等^[10]建立了大量关于压型钢板腹板开洞组合梁的有限元模型,从材料强度、加载方式、洞口形状来分析其极限荷载,发现钢材的强度对压型钢板腹板开洞组合

梁的极限荷载有显著的影响;童树根等^[11]考虑了剪切变形与空腹桁架弦杆的弯曲变形,提出了一种腹板开孔组合梁挠度的计算方法;Shanmugam等^[12]做了5根矩形洞口组合梁,发现当洞口高度大于0.3倍腹板高度时,组合梁的极限抗剪强度下降显著;Elshaer等^[13]发现洞口尺寸适宜时,腹板开洞连续组合梁的极限变形能力要比未开洞连续组合梁强;Claen等^[14]考虑在洞口处不同类型应力的相互作用,总结了新型设计方法来有效设计洞口尺寸、判断洞口区域破坏形式;贾连光等^[15]提出了孔蜂窝组合梁的等效抗剪公式,还分析了蜂窝组合梁在负弯矩下的极限承载力;Du等^[16]研究了在洞口区域设置纵向加强板类型及其截面面积对压型钢板腹板开洞组合梁极限承载力的影响,发现加固后的组合梁极限承载力取决于加强板截面面积是否达到洞口尺寸面积;Li等^[17]建立了有限元模型,从5个角度对腹板开洞连续组合梁的最佳开孔位置进行研究,发现洞口的存在与开洞的位置对连续梁产生两次弯矩调幅。已有研究成果对矩形洞口的腹板开洞组合梁受力性能进行了全面分析,但没有考虑洞口形状改变产生的影响,需分析洞口形状对腹板开洞组合梁的承载力和变形能力的影响、洞口形状改变对洞口区域内力重分布的影响以及不同洞口形状的传力机制。通过解决这些问题,可以得到洞口形状对腹板开洞组合梁受力性能的影响,从而找到合理的开洞形状来降低开洞造成的不利影响。

本文在已有试验基础上,通过非线性有限元模拟计算,对不同洞口形状的腹板开洞组合梁的受力性能进行研究,重点分析洞口形状对承载力、变形能力以及内力重分布和传力机制的影响,确定受力较

为有利的洞口形状。

1 有限元模型建立及验证

1.1 单元类型

基于 ANSYS 有限元软件,利用横向对称,建立 1/2 钢-混凝土组合梁模型以提高计算效率,并施加相应的约束。混凝土采用 Solid65 单元,同时考虑混凝土的开裂与压碎,破坏准则采用 Willan-Warke 的五参数准则;混凝土中钢筋采用 Link180 单元,不考虑混凝土与钢筋之间的相对滑移,上下翼缘采用 Solid45 单元,腹板采用 Shell43 单元模拟,栓钉采用 Beam188 单元,采用非线性弹簧单元 Combin39 模拟混凝土与钢梁之间界面滑移,弹簧单元的数目与栓钉数目一致,在界面处有 3 个节点重合,将混凝土底部节点与栓钉根部节点合并,再与对应位置处钢梁节点建立弹簧单元,栓钉单元其他节点与周围混凝土节点进行耦合,如图 1 所示,采用单点加载方式,有限元节点数为 10 751,单元数为 8 999。

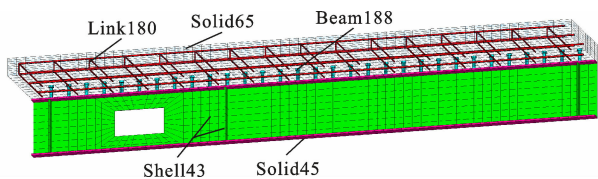


图 1 有限元模拟单元

Fig. 1 Finite element simulation unit

1.2 材料本构关系

混凝土单轴受压时的本构关系见式(1),上升段为二次抛物线,下降段为斜直线(图 2),混凝土抗压强度 $f_c = 26.8 \text{ MPa}$,弹性模量 E_c 为 $3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比为 0.2,混凝土峰值应变 $\epsilon_0 = 0.0002$,极限应变 $\epsilon_{cu} = 0.00038$ 。

$$\sigma = \begin{cases} f_c [2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - (\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2] & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ f_c (1 - 0.15 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0}) & \epsilon_0 < \epsilon \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为应力、应变。

钢梁、钢筋、栓钉采用多线性等向强化模型,如图 3 所示,图 3 中钢材的弹性模量 E_s 为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, f_y 为钢材的屈服强度, ϵ_y 为钢材的屈服应变, ϵ_h 为钢材的强化应变, $\epsilon_h = 12\epsilon_y$,钢材的强化模量 E'_s 取弹性模量的 0.01 倍,数学表达式如式(2)所示。

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

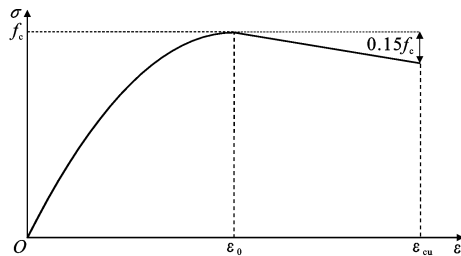


图 2 混凝土的应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of concrete

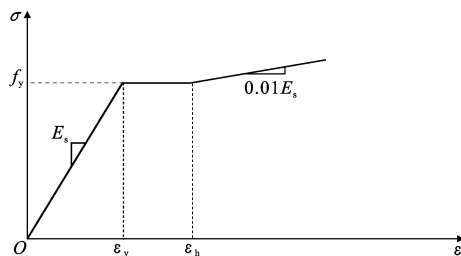


图 3 钢材的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of steel

栓钉的荷载-滑移 ($P-s$) 曲线(图 4)采用 Ollgaard 等^[18]提出的公式,该公式形式简单,如式(3)所示,适用于普通混凝土与轻质混凝土,其中 s_x 、 s_y 、 s_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的相对滑移, A_{sd} 为栓钉截面面积, L_s 为栓钉长度, P_x 、 P_y 、 P_z 为 x 、 y 、 z 方向的荷载, N_c^v 为单个栓钉抗剪承载力, γ 为栓钉抗拉强度最小值与屈服强度之比, f 为栓钉抗拉强度设计值。

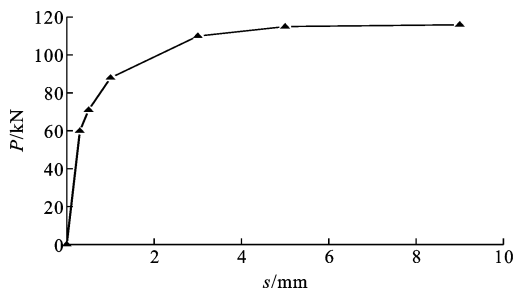


图 4 栓钉荷载-滑移曲线

Fig. 4 Load-slip curve of stud

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

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

1.3 试验现象与有限元结果对比

文献[9]对腹板开矩形洞口的组合梁进行了试验研究,得到了对应的极限承载力以及破坏特性,试件主要参数是混凝土板厚度与配筋率。为了验证有限元模型是否可靠,对全部开洞试验试件(A2~

A4、B1、B2)进行了有限元分析,试验与有限元对比结果见表1,对应的荷载-位移曲线如图5所示。可以看出:有限元结果与试验得到的极限承载力吻合良好,相对误差在5%以内;刚度、变形能力结果与试验相比误差不大,可以满足工程精度要求。

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	178.75	3.6	8.59	8.26	3.8
A3	194.2	187.75	4.8	8.35	9.12	9.2
A4	219.3	212.75	2.9	9.57	10.17	6.2
B1	184.6	190.25	3.0	9.79	10.62	8.4
B2	192.5	198.75	3.2	10.69	11.67	9.1

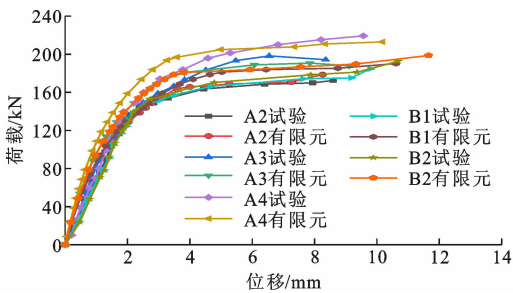


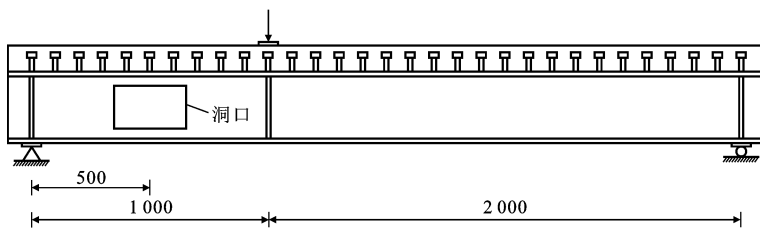
图5 荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of load-displacement curves

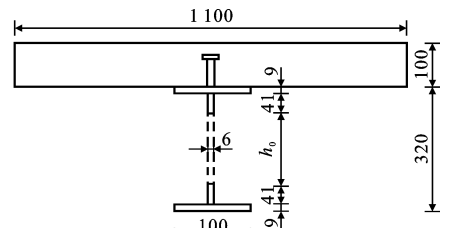
图6为试件A2的破坏形式对比。可以看出:洞口上方混凝土板裂缝开展严重,试验观测的裂缝破坏位置与有限元模拟得到的位置基本一致;在洞口四角都形成了塑性铰,发生了四角空腹破坏,出现了明显的剪切变形,下翼缘变形明显,试验与有限元计算都可以得到类似的破坏形态,由此说明有限元分析结果可靠。

2 试件尺寸及洞口形状参数

为了分析不同形状的洞口对腹板开洞组合梁受力性能的影响,设计了1根无洞对比梁(A0)与6根洞口形状不同的组合梁(A1~A6),洞口形状包括:长方形、正方形、菱形、正六边形、椭圆形、圆形,洞口



(a) 试件几何尺寸



(b) 试件断面尺寸

图7 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 7 Specimen size (unit:mm)

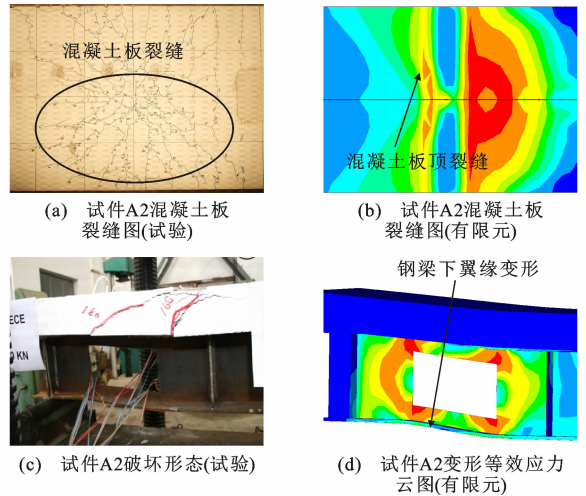


图6 试件A2破坏形式

Fig. 6 Damage forms of specimen A2

面积相等(面积 $A=400\text{ mm}^2$),其他几何参数如图7所示,其中 h_0 为洞口高度,将洞口设置靠近支座附近,使其承受较大的剪力。各试件的有限元模型都在洞口处进行局部网格划分以提高计算精度(图8)。为了保证有限元模型准确性,实体单元采用六面体网格,壳单元采用四边形网格。

3 结果分析

3.1 极限承载力与变形能力

由于洞口的存在导致腹板截面削弱,造成各试件的刚度、承载力都有明显的降低,如表2所示,其中试件A6(圆形)承载力最大,达到试件A0(无洞)的86.3%,其次是试件A3(菱形),承载力达到试件A0的84.4%,试件A2(正方形)承载力最低,达到试件A0的70.3%,说明洞口的形状对腹板开洞组合梁极限承载力有较大的影响。

从6种不同洞口形状的试件变形能力(表2)来看,各试件变形能力差距明显,除试件A2(正方形)外,其余试件极限变形都大于试件A0,试件A1(长方形)、试件A6(圆形)的极限变形达到试件A0的1.5倍,说明洞口形状对腹部开洞组合梁的变形能

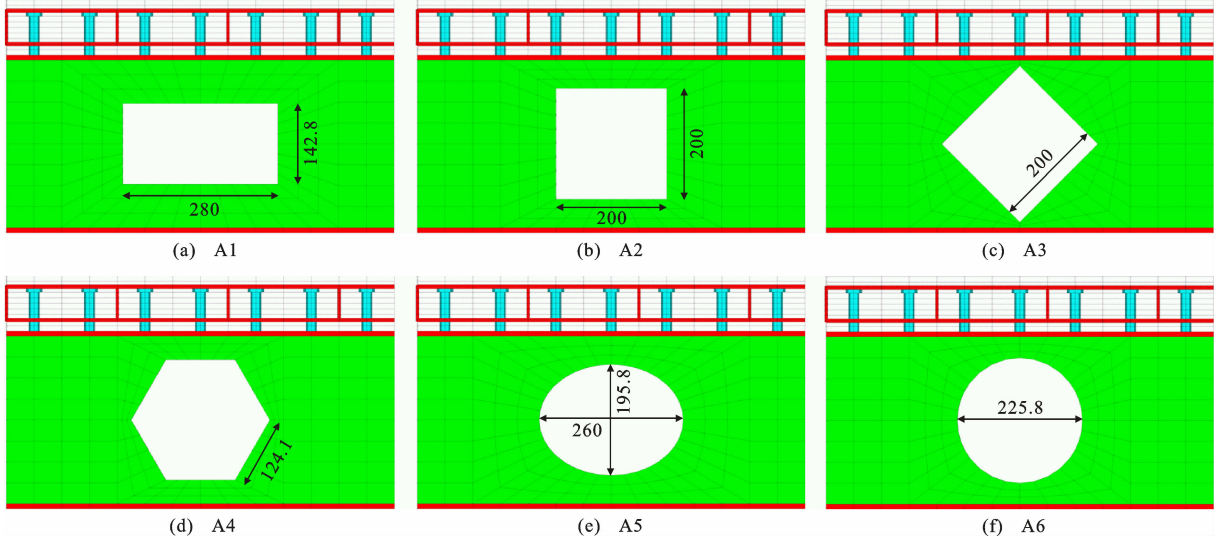


图 8 不同洞口形状局部网格划分(单位:mm)

Fig. 8 Local meshing of different opening shapes (unit:mm)

表 2 不同洞口形状各试件的极限荷载与极限位移对比

Table 2 Comparison of ultimate load and ultimate displacement of each specimen with different opening shapes

试件编号	洞口形状	极限荷载 P_u/kN	P_u/P_{A0}	极限位移 f/mm	f/f_{A0}
A0	无洞	425.00	1.000	5.44	1.00
A1	长方形	327.00	0.769	8.31	1.52
A2	正方形	299.00	0.703	5.02	0.92
A3	菱形	359.00	0.844	6.71	1.23
A4	正六边形	339.00	0.797	5.88	1.08
A5	椭圆形	350.00	0.828	6.86	1.26
A6	圆形	367.00	0.863	8.28	1.52

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

力影响较大,各试件在洞口的 4 个角都形成塑性铰,但长方形、菱形、椭圆形、圆形试件洞口两侧腹板的

塑性铰是由洞口四角处塑性铰逐渐向洞口腹板两侧扩散且包围整个洞口,如图 9 所示,即塑性铰面积大于正方形与正六边形洞口试件,所以试件 A2(正方形)、试件 A4(正六边形)的变形能力差。

当荷载较小时[图 10(a)、(b)],不同洞口形状的组合梁沿梁长方向位移比较平缓,相同位置处的位移差距很小;当荷载达到 300 kN 时[图 10(c)],由于洞口的存在,导致洞口两侧曲线斜率明显增大,曲线斜率增大与洞口形状有关,长方形、正方形洞口斜率大于其他试件,此时洞口附近的变形是以剪切变形为主,而不是弯曲变形。沿梁长开始到洞口左侧附近,不同形状洞口的组合梁在相同位置的位移差距很小;到洞口中心附近时,不同洞口形状的位移差开始逐渐变大;当远离洞口中心时,位移差仍继续

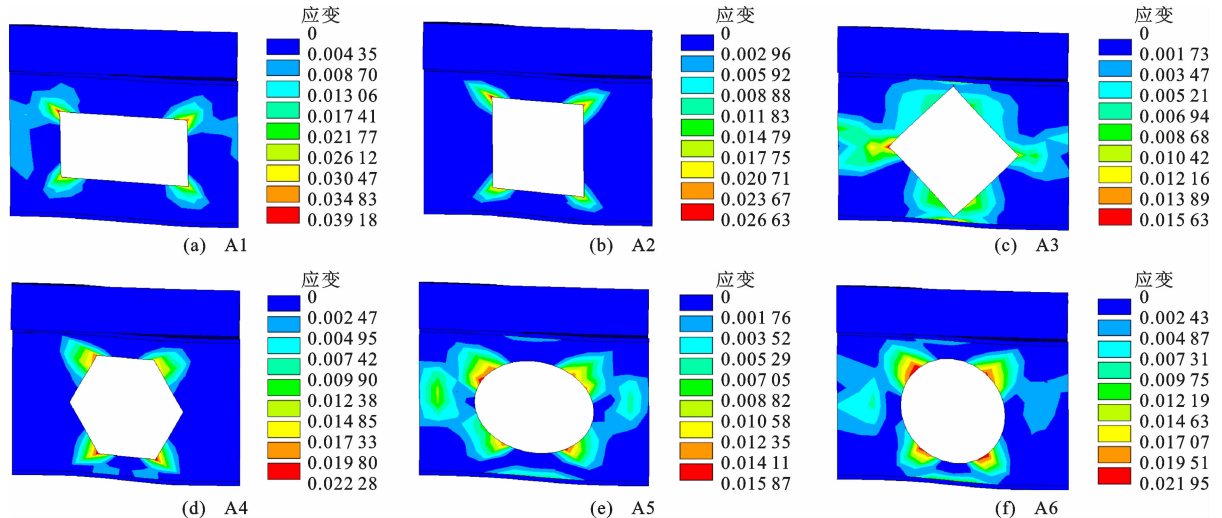


图 9 不同洞口形状各试件的塑性应变

Fig. 9 Plastic strain of each specimen with different opening shapes

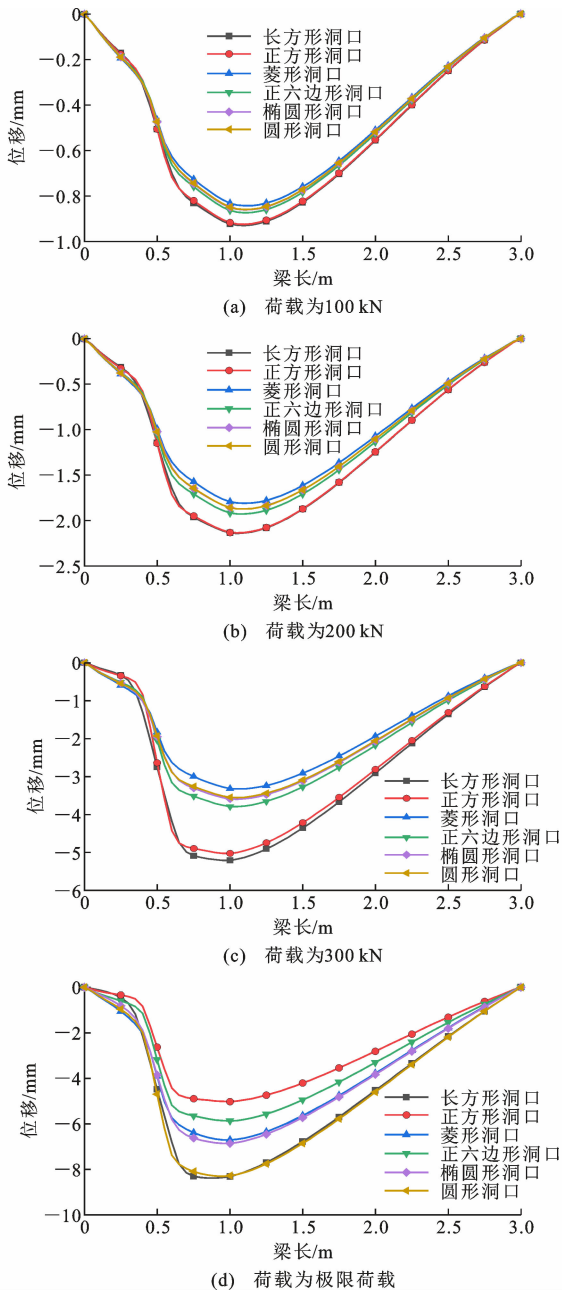


图 10 不同荷载时沿梁长方向位移

Fig. 10 Displacement along beam length under different loads

表 3 洞口处截面承担的剪力值

Table 3 Value of shear force borne by section at opening

试件编号	洞口形状	V_g/kN	V_c/kN	V_s/kN	V_b/kN	V_c/V_g	V_s/V_g	V_b/V_g
A0	无洞	283.04	43.08	240.32		0.15	0.85	
A1	长方形	216.09	115.04	44.46	56.59	0.53	0.20	0.25
A2	正方形	199.07	117.45	34.00	47.62	0.59	0.17	0.24
A3	菱形	239.44	110.24	60.93	68.27	0.46	0.25	0.29
A4	正六边形	224.67	118.53	48.63	57.51	0.53	0.21	0.26
A5	椭圆形	232.98	112.34	55.71	64.93	0.48	0.24	0.28
A6	圆形	245.02	124.35	56.21	64.46	0.50	0.23	0.27

注: V_g 为总剪力; V_c 为混凝土板承担的剪力; V_s 为洞口上截面钢梁承担的剪力; V_b 为洞口下截面钢梁承担的剪力。

增大,这是由于洞口处腹板的削弱且集中力靠近洞口右侧附近,所以不同形状洞口的试件在洞口左侧的位移差距不大,洞口右侧的位移差距则较大。随着荷载继续增加至极限荷载[图 10(d)],非正方形洞口试件两侧曲线斜率突增,尤其圆形洞口试件右侧的位移增量远大于洞口左侧的位移增量,而长方形洞口由于长轴比较长,比其他试件提前发生洞口曲线斜率增大的现象。

3.2 洞口区域截面内力分析

由于腹部开洞后,原本腹部承受的剪力转移至混凝土板中,混凝土板承担了部分剪力,占总剪力的 46%~59%,而钢梁承受的剪力比重为 41%~54%,如表 3 所示。对比试件 A0(无洞)可以看出,混凝土板对抗剪承载力有很大的贡献,但也导致混凝土板提前开裂破坏。承载力相对较小的试件 A1(长方形)、A2(正方形),其混凝土承担的剪力比重比其他试件大,说明混凝土板承受的剪力与洞口形状有关。

以试件 A1(长方形)、A6(圆形)为例分析洞口处上方混凝土受力情况(图 11)。混凝土中的栓钉随荷载增加,对周围的混凝土产生一定预压力,从梁宽方向分析,相邻栓钉会增强预压力效果,使混凝土板中受压区与受拉区分界线沿板宽方向变化,且受拉区发生在混凝土板端处;当试件 A1(长方形)荷载为 250 kN,试件 A6(圆形)荷载为 300 kN 时,混凝土板内部发生应力重分布,在受压区出现零星的受拉区,当达到极限荷载时,受拉区形状为 n 形。从梁长方向分析,栓钉位置的混凝土受到的剪力大于附近没有栓钉的混凝土,出现剪力不连续的情况且剪力峰值出现在栓钉附近。无论洞口形状如何,洞口右上角的钢梁都会受到向下的剪力,洞口右上角处的混凝土会受到向上的剪力,与周围的混凝土形成明显剪力突变,这就加速混凝土剪切破坏,导致洞口右侧钢梁承受大部分的剪力,所以最终发现位移的

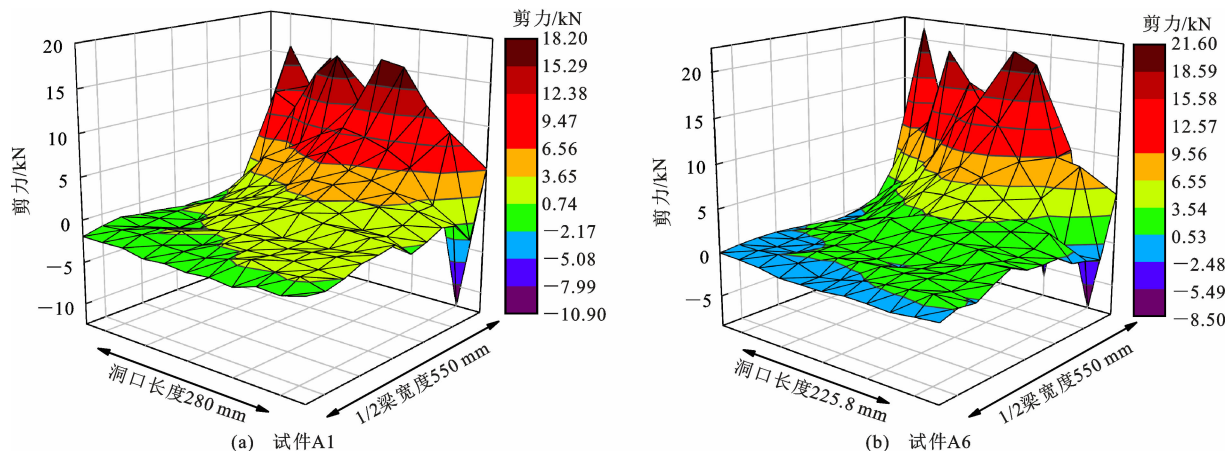


图 11 长方形、圆形洞口处混凝土剪力

Fig. 11 Concrete shear force at rectangular and circular openings

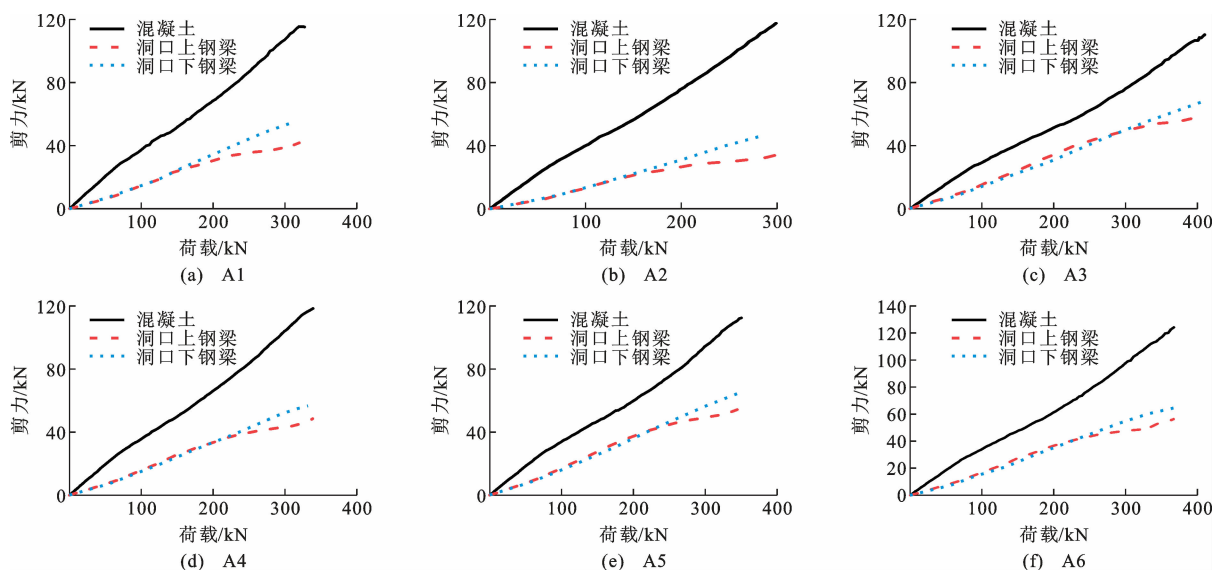


图 12 洞口处各部分剪力

Fig. 12 Shear force of each part at opening

最大值发生在洞口右侧钢梁处。

洞口处各部分的剪力分布如图 12 所示,可以看出:虽然各试件混凝土板承受的剪力差距不大,但能明显看出试件 A1(长方形)、A2(正方形)中混凝土剪力增长的速度大于其他试件。从整体来看,当试件处于弹性阶段,洞口上、下方钢梁所承受的剪力差距不大,当荷载继续增加时,洞口处发生内力重分布,洞口下方钢梁所承受的剪力大于洞口上方钢梁,因此在洞口形状和尺寸保持不变时,可以将洞口的位置向上偏移,让洞口下方截面面积大于洞口上方截面,便于其承受更多的剪力。

3.3 洞口区域截面应力分析及传力机制

主应力主要是由轴力、剪力与弯矩所引起的,由于受到剪力的作用,其与梁轴线形成了一定的夹角,主应力迹线的方向可以判断剪力的传递路径。通过

洞口区域主应力迹线可以更加深入分析不同洞口形状的组合梁传力机制。以试件 A1(长方形)、A6(圆形)为例分析组合梁桁架传力机制(图 13)。可以看出,在组合梁内部会形成两种不同桁架结构传力机制,混凝土截面形心处为桁架上弦压杆(虚线),钢梁下翼缘处为桁架下弦拉杆(实线),从主应力迹线的方向可以知道洞口上方的剪力主要由混凝土板与洞口处上方的钢梁承受,集中力产生的弯矩引起一部分的主拉应力从洞口右侧通过钢梁传递到洞口左侧,另一部分的主拉应力通过与栓钉的组合作用,从洞口右侧通过混凝土板传递到洞口左侧,以主压应力传递到支座。洞口下方的剪力主要是通过下方的钢梁传递,以主压应力从洞口右侧通过钢梁传递到洞口左侧,最终以主拉应力传递到支座。试件 A1(长方形)在洞口处形成小桁架模型,以次弯矩形式

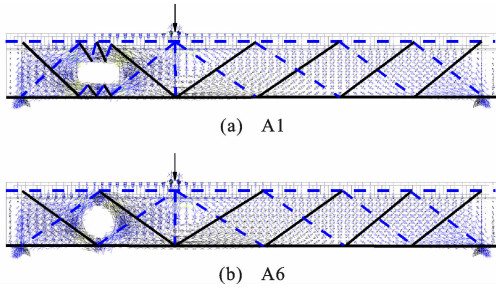


图 13 组合梁桁架传力机制

Fig. 13 Force transmission mechanism of composite beam truss

在洞口附近传递力,薄弱处为洞口四角,这就造成洞口附近出现严重剪切变形;试件 A6(圆形)在洞口处能够形成大桁架模型,以主弯矩形式在洞口附近传递力,次弯矩的影响很小,其薄弱处集中于洞口中部。

除了试件 A1(长方形)、A2(正方形),其余试件对应力集中都有不同程度的减缓作用,应力集中区域随着荷载的增加从洞口四角向洞口外扩散至腹板与翼缘交接处,再从交接处向洞口左右腹部处扩散;达到极限荷载时,菱形与椭圆形洞口应力峰值较小,长方形、正方形洞口的应力峰值最大,其应力平均值远远小于应力峰值,应力集中现象尤为明显(图

14),所以其承载力下降也比较大。跨中集中力产生的主应力与梁轴线方向夹角为 45° ,通过腹板向两侧支座传递,试件长方形、正方形洞口右侧边缘类似墙的作用[图 14(a)、(b)],阻碍了主应力的转递,隔断了腹板内的桁架传力机制,使得主应力第一次与梁轴线方向夹角发生明显变化,呈 60° 角向洞口右侧两角方向传递,靠角区域的主应力方向因不能与洞口边缘保持平行,所以主应力第二次与梁轴线方向夹角发生变化,呈 30° 角向洞口附近上、下 T 形截面方向传递,从主应力迹线长度看出,第二次传递过程中发生主应力局部不连续的情况;菱形、正六边形、椭圆形、圆形洞口右侧边缘产生类似缓坡作用[图 14(c)~(f)],将腹板中间的主应力沿洞口右侧边缘向两边分流,主应力方向能与洞口边缘保持平行,所以菱形、正六边形、椭圆形、圆形洞口的应力第一次与梁轴线方向夹角改变很小。菱形洞口上下截面面积小,主应力第二次与梁轴线方向夹角不变,依旧呈 45° 角,正六边形洞口上下边缘平直,主应力第二次与梁轴线方向夹角改变很小,但也出现主应力局部不连续的情况,椭圆形与圆形洞口上下边缘是弧形,主应力方向依旧与洞口边缘保持平行,

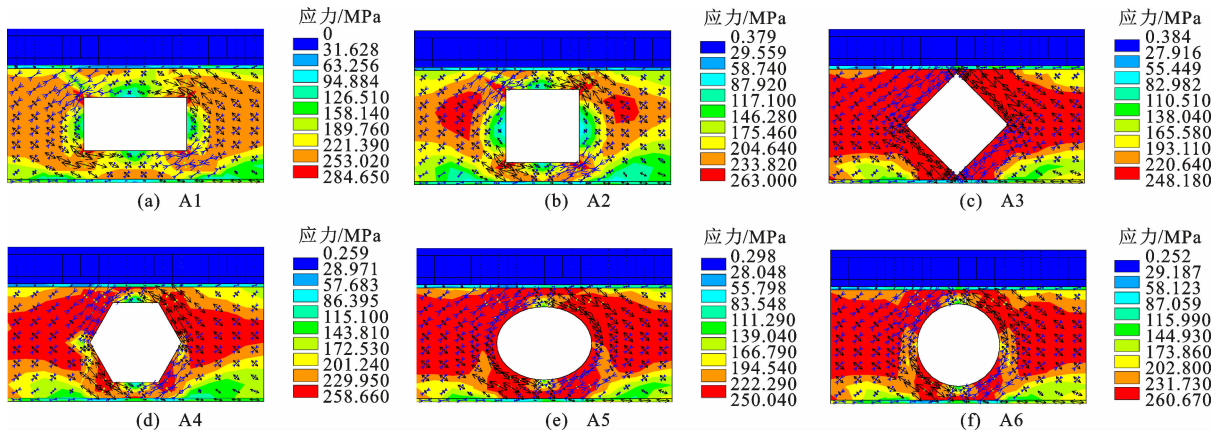


图 14 不同洞口形状的各试件主应力迹线分布

Fig. 14 Distribution of main stress traces for each specimen with different opening shapes

夹角变化很小。

4 结语

(1)钢-混凝土组合梁腹板开洞会导致刚度、极限承载力下降,但极限变形会增强。

(2)栓钉会影响混凝土板内应力分布情况,板内受压区与受拉区分界线沿板宽方向变化。极限荷载时,洞口下方钢梁所承受的剪力大于洞口上方钢梁。

(3)长方形、正方形洞口试件在洞口处形成小桁架模型,非长方形、正方形洞口试件在洞口处形成大

桁架模型。

(4)对洞口设计时,应该考虑洞口边缘与主应力传递方向是否平行,也可以将洞口位置向上偏移。本文只考虑了一种剪跨比,在后续的研究工作中将对不同形状洞口组合梁的洞口位置以及带尖洞口补强措施进行研究。

参考文献:

References:

- [1] FERREIRA F, MARTINS C H, NARDIN S D. Advances in composite beams with web openings and

- composite cellular beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 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.
BAI Yongsheng, JIANG Yongsheng, LIANG Shu ting, et al. Exploration and summarization of method of computing bearing capacity of steel-concrete composite beams with web opening[J]. Industrial Construction, 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.
ZHANG Wei, HU Xiamin. Bending and shear capacity of composite steel-concrete beams with web openings[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(5): 25-30.
- [4] CHEN T, GU X L, LI H. Behavior of steel-concrete composite cantilever beams with web openings under negative moment[J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(1): 39-49.
- [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.
KOU Liya, HU Xiamin, ZHANG Yunling. Analysis of influence factors of bearing capacity of steel-concrete composite beams with web opening[J]. Steel Construction, 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.
KOU Liya, HU Xiamin. FEM analysis of bearing capacity of steel-concrete composite beams with web opening considering concrete slab[J]. Sichuan Building Science, 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.
WANG Peng, ZHOU Donghua, WANG Yonghui, et al. Nonlinear FEM analysis on steel-concrete composite beam with web opening[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 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.
WANG Peng, ZHOU Donghua, WANG Yonghui, et al. Theoretical study on ultimate bearing capacity of composite beams with reinforced web opening[J]. Engineering Mechanics, 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.
WANG Peng, ZHOU Donghua, WANG Yonghui, et al. Experimental study on shear strength of steel-concrete composite beams with web opening[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 297-305.
- [10] ELLOBODY E, YOUNG B. Behaviour and design of composite beams with stiffened and unstiffened web openings[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(6): 893-918.
- [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.
TONG Genshu, CHEN Di. Deflection calculation of composite beams with web openings[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 168-178.
- [12] SHANMUGAM N E, DAREHSHOURI S F, OSMAN S A. Experimental study on composite plate girders with web opening[J]. Structures and Buildings, 2014, 167(12): 704-717.
- [13] ELSHAER M A. Structural analysis of a composite continuous girder with a single rectangular web opening[J]. HBRC Journal, 2017, 13(2): 152-162.
- [14] CLAEN M, KURZ W, SCHFER M, et al. A mechanical design model for steel and concrete composite members with web openings[J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109417.
- [15] 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.
JIA Lianguang, LI Pengyu, JIAO Yuming. Study on equivalent shear stiffness of hexagonal cellular composite beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(1): 11-18.
- [16] DU H, HU X, SHI D, et al. Effect of reinforcement on the strength of the web opening in steel-concrete composite beam[J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112038.
- [17] LI L Q, LIAO W Y, HUO B Y. Finite element modeling and nonlinear analysis on the optimum opening location for continuous composite beams with web openings[J]. Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette, 2021, 28(3): 891-897.
- [18] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete[J]. Engineering Journal of American of Steel Construction, 1971, 8(2): 55-64.