

# 负弯矩区钢-混凝土组合梁腹板开洞处钢筋受力性能研究

陈 静, 廖文远, 刘德稳, 蒋 伟, 谢 鑫

(西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 655024)

**摘要:** 为了解负弯矩区腹板开洞钢-混凝土组合梁的内部受力钢筋的力学性能, 对多个腹板开洞组合梁试件进行了试验研究和有限元分析, 研究重点是洞口区域混凝土板内的钢筋受力特点和规律。试验及分析结果表明: 负弯矩作用下, 腹板开洞组合梁的破坏发生在洞口区, 而不是弯矩最大处, 洞口区混凝土板裂缝开展迅速并最终断裂, 洞口处发生了明显的空腹破坏, 洞口四角出现了次弯矩; 在次弯矩作用下, 洞口区混凝土板内的受力钢筋一部分受压, 一部分受拉, 钢筋的抗拉作用并没有充分发挥, 其中洞口左端的上层钢筋受拉最为明显, 抗拉作用较好; 在合适的位置添加附加钢筋可以限制洞口上方混凝土板的裂缝开展, 能够有效的提高试件的承载力和变形能力, 其中在距离中心轴 65 mm 处添加直径为 8 mm 的附加钢筋时, 试件的承载力和变形能力的提高效果最好。

**关键词:** 组合梁; 腹板开洞; 负弯矩区; 板内钢筋; 附加钢筋

中图分类号: TU3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0014-09

## Study on stress properties of steel-concrete composite beams with web openings in negative bending moment zone

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

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

**Abstract:** In order to understand the mechanical properties of the internal stressed reinforcement of the steel-concrete composite beam with openings in the web in the negative bending moment area, experimental research and finite element analysis were carried out on a number of composite beam specimens with openings in the web. The research focused on the stress characteristics and laws of the steel bars in the concrete slab in the opening area. The test and analysis results show that, under the action of negative bending moment, the failure of composite beams with web openings occurs in the opening area, not at the place with the maximum bending moment. The cracks in the concrete slab in the opening area develop rapidly and eventually break, with obvious hollow damage occurring at the opening and secondary bending moments appearing at the four corners of the opening. Under the action of the secondary bending moment, part of the stressed reinforcement in the concrete slab in the opening area are compressed and part are strained, and the tensile effect of the reinforcement is not fully exerted, among which the upper reinforcement at the left end of the opening is most obviously strained and the tensile effect is better. Adding additional steel bars in appropriate positions can limit the development of cracks in the concrete slab above the opening, and effectively improve the bearing capacity and deformation capacity of the specimen. Among them, the addition of additional steel bars with a diameter of 8 mm at 65 mm from the central axis has the best improvement effect on the bearing capacity and deformation capacity of the specimen.

**Key words:** composite beam; web opening; negative moment region; in-plate reinforcement; additional reinforcement

钢-混凝土组合梁<sup>[1-4]</sup>作为一种受力合理的结构形式, 被广泛应用于多、高层建筑结构中。为了满足现代建筑的使用功能, 楼层中需要设置纵横

穿越的管线设备(水、电、暖通等), 通过在组合梁的腹板上开洞<sup>[5-7]</sup>让这些管线设备穿过, 可以减少管线设备对空间的占用, 有效降低层高、节约

收稿日期: 2022-08-15

修回日期: 2022-11-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808467); 云南省教育厅科学研究基金项目(2022Y609)

第一作者: 陈 静(1997—), 女, 硕士生, 主要研究方向为组合结构。E-mail: cj19970816@163.com

通信作者: 廖文远(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为组合结构。E-mail: lwy065@123.com

空间, 从而降低工程造价, 带来可观的经济效益。但腹板开洞导致了组合梁的刚度、承载力下降, 原本由腹板承受的剪力大量转移至洞口上部的混凝土板中, 这就使混凝土板和板内钢筋的受力情况更为复杂。

与开洞钢梁相比, 腹板开洞钢-混凝土组合梁的研究开展较晚, 20 世纪 80 年代开始出现了较多的试验研究成果。国外学者首先对洞口的高度、宽度、偏心位置, 栓钉的数量、布置方式, 混凝土板厚度等主要参数进行了研究<sup>[8-10]</sup>, 分析这些参数对腹板开洞组合梁受力性能的影响, 并在已有规范的基础上推导了腹板开洞组合梁的承载力计算公式<sup>[11-13]</sup>。国内学者对已有腹板开洞组合梁的承载力计算方法进行了总结<sup>[14]</sup>, 研究内容也扩展到了刚度、滑移等方面<sup>[15-17]</sup>, 研究成果不仅包括开洞后的变形计算方法<sup>[18]</sup>、腹板开洞连续组合梁的受力性能<sup>[19]</sup>, 还对腹板开洞钢-混组合梁的极限承载力影响因素<sup>[20]</sup>和补强方法进行了研究<sup>[21-22]</sup>。

上述研究成果主要针对的是洞口在正弯矩区的腹板开洞组合梁, 在一些实际工程中, 也需要在连续组合梁的负弯矩区设置洞口, 而目前对于负弯矩区腹板开洞组合梁的研究相对较少, 已有成果主要针对其破坏模式和抗剪性能等宏观受力表现<sup>[23-25]</sup>, 缺少针对洞口区受力钢筋等局部位置的研究内容, 已有补强措施主要是在洞口区设置加劲肋, 缺少针对开洞区钢筋补强效果的研究。对于负弯矩作用下的无洞钢-混凝土组合梁, 混凝土由于受拉而退出工作, 板内受力钢筋发挥着关键的抗拉作用, 在腹板开洞后, 组合梁洞口区的传力机制变得更复杂, 为此有必要对洞口区的钢筋受力性能进行研究, 掌握钢筋在洞口区的受力特点及影响因素, 分析是否可以通过添加附加钢筋来补偿开洞造成的不利损失。本文通过试验和有限元方法对负弯矩区腹板开洞组合梁进行了研究, 重点分析洞口区板内受力钢筋的受力特点和规律, 为工程实际设计提供一定的参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验设计了 4 根编号为 A1~A4 的腹板开洞组合梁试件, 变化参数为钢筋配筋率, 其中腹板未开洞的试件 A1 为对比试件; A2~A4 均为负弯矩区腹板开洞组合梁试件, 洞口中心线与钢梁形心轴重合。4 根组合梁试件全部按完全剪切连接设计, 剪切连接件栓钉以等间距 100 mm 沿全梁均

匀布置, 栓钉采用  $\Phi 19$ , 长度 70 mm; 钢筋采用 HRB235 级, 横向钢筋采用  $\Phi 8$ , 间距为 200 mm 沿全梁分布; 试件采用 C30 混凝土浇筑, 钢材采用 Q235B 热轧 H 型钢。试件的断面尺寸、几何尺寸见图 1、图 2。各试件的基本参数如表 1 所示, 试件的各项材料属性如表 2 所示。

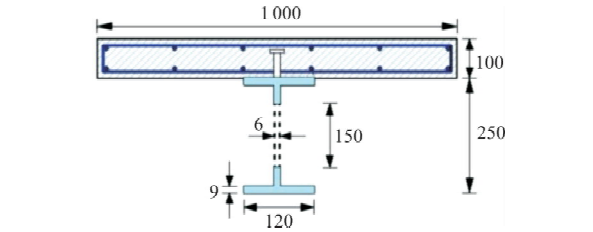


图 1 组合梁试件断面尺寸示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of sectional size of composite beam specimen

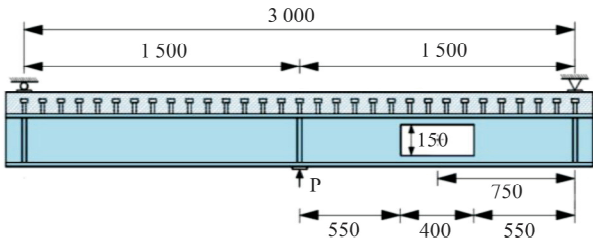


图 2 组合梁试件几何尺寸示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of composite beam specimen geometry size

表 1 试件参数变化					
Tab. 1 Variation of specimen parameters					
编号	开洞情况/mm		纵向钢筋布置	纵向配筋率/%	研究要点
	洞宽	洞高			
A1	-	-	12 $\Phi 10@190$	0.8	对比
A2	400	150	12 $\Phi 10@190$	0.8	-
A3	400	150	12 $\Phi 12@190$	1.2	配筋率
A4	400	150	14 $\Phi 10@155$	1.6	配筋率

表 2 材料属性/MPa							
Tab. 2 The material properties/MPa							
材料	钢梁		钢筋			栓钉	混凝土
	翼缘	腹板	$\phi 8$	$\phi 10$	$\phi 12$	$\phi 19$	C30 $f_{cu}$
$f_y$	247.2	316.8	362.2	399.1	442.2	370.6	39.12
$f_u$	314.8	421.4	499.2	555.4	590.5	478.8	

注:  $f_y$  为钢材屈服强度;  $f_u$  为钢材极限强度;  $f_{cu}$  为混凝土抗压强度。

1.2 加载装置与测点

本次试验采用 YAW-1000KN 微机控制电液伺服压力试验机进行加载。试验将组合梁试件倒置进行加载, 使组合梁试件洞口区完全处于负弯矩区。试验在两端支座处设置了刚性垫板防止在加载过程中支座处混凝土板出现应力集中。在支座垫板下分

别放置压力传感器,自动记录加载过程中支座反力的变化情况.加载装置示意图如图3所示.

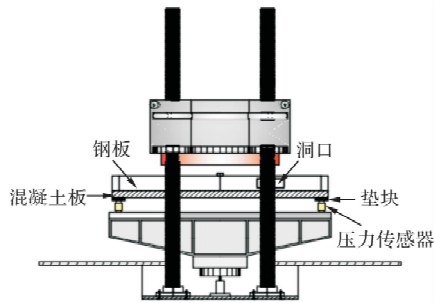


图3 加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading device

试验的研究重点为洞口区混凝土板内的钢筋受力情况,所以在洞口上方纵向钢筋内布置了多个应变测点,考虑到纵向钢筋布置的对称性,只测量混凝土板一侧的钢筋.应变测点布置如图4所示,上层纵向钢筋测点为a11~a33,下层测点为b11~b33,依次布置在洞口左、中、右.

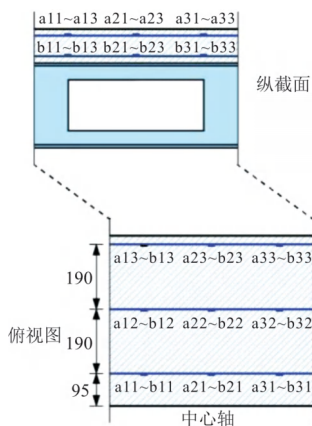


图4 纵向钢筋应变测点布置

Fig. 4 Arrangement of longitudinal reinforcement strain measuring points

## 2 试验结果与分析

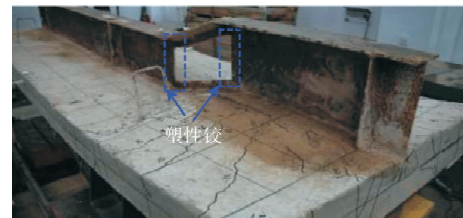
### 2.1 试验结果

试件A1是无洞对比组合梁,当荷载接近

$0.35P_u$ 时,加载点即弯矩最大处混凝土板表面开始出现裂缝;当荷载达到 $0.85P_u$ 时,混凝土板裂缝宽度明显增加,并开始出现明显变形;最终试件的钢梁腹板和下翼缘在加载点处出现了屈曲变形,如图5(a)所示.



(a) 试件A1



(b) 试件A2

图5 试件破坏形态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of specimen failure pattern

试件A2~A4的配筋率依次增加,主要破坏过程和试验现象都很相似(图5(b)),洞口区域都出现了破坏,跨中最大弯矩处未破坏.以试件A2为例:荷载达到 $0.27P_u$ 时,洞口区混凝土板开始出现小裂缝;荷载达到 $0.6P_u$ 时,洞口开始发生变形,对应的混凝土板裂缝也明显增加;荷载达到 $0.78P_u$ 时,洞口变形明显,呈平行四边形,挠度也显著增加;荷载达到极限荷载 $P_u$ 时,洞口区混凝土板出现部分断裂,栓钉滑脱,试件失去承载力.由于洞口位于弯剪区段,虽然洞口区域的混凝土板具有剪切破坏的特征,但在弯矩和剪力共同作用下,洞口区不仅发生了剪切变形,角部还出现了塑性铰,因此从整体上看各开洞组合梁试件的破坏形态以空腹破坏为主.各试件的承载力、挠度如表3所示.

表3 组合梁试件承载力及破坏形态

Tab. 3 Bearing capacity and failure mode of composite beam specimens

编号	洞口 $a_0 \times h_0$	板厚 $h_c/\text{mm}$	纵向配 筋率/%	屈服荷载 $P_y/\text{kN}$	屈服位移 $d_y/\text{mm}$	极限荷载 $P_u/\text{kN}$	极限位移 $d_u/\text{mm}$	$P_y/P_u$	$d_y/d_u$	整体破坏形态
A1	无	100	0.8	153.2	12.2	193.8	63.7	0.79	5.2	弯曲破坏
A2	$400 \times 150$	100	0.8	60.4	8.4	103.1	28.9	0.59	3.4	空腹破坏
A3	$400 \times 150$	100	1.2	57.6	7.1	108.2	48.2	0.53	6.8	空腹破坏
A4	$400 \times 150$	100	1.6	73.6	6.4	112.5	54.5	0.65	8.5	空腹破坏

## 2.2 配筋率的影响

配筋率变化时试件 A1~A4 组合梁的荷载-挠度曲线如图 6 所示, 由图 6 及表 3 中数据可得: 当配筋率相同时, 试件 A2 和未开洞的试件 A1 相比, 承载力降低了 46.80%, 变形能力降低了 54.63%。可见负弯矩区组合梁在腹板开洞后, 承载力和变形能力都有很大的降低。

当配筋率为变化参数时, 试件 A3、A4 与试件 A2 作对比, 洞口大小相同, 配筋率分别提高了 0.4% 和 0.8%, 其承载力提高了 4.95% 和 9.12%, 变形能力则提高了 66.78% 和 88.58%。可见增加纵向钢筋配筋率可以提高负弯矩区腹板开洞组合梁的变形能力, 但对其承载力的提高则很小, 原因是开洞组合梁的破坏主要是由洞口四个角的截面强度决定, 而洞口四个角出现了方向不同的次弯矩(图 8), 使得洞口区域的钢筋只有一部分能有限发挥抗拉的作用。

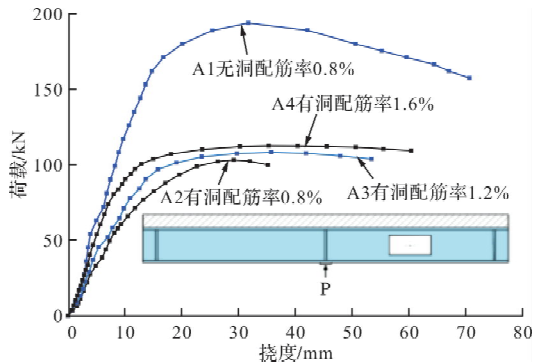
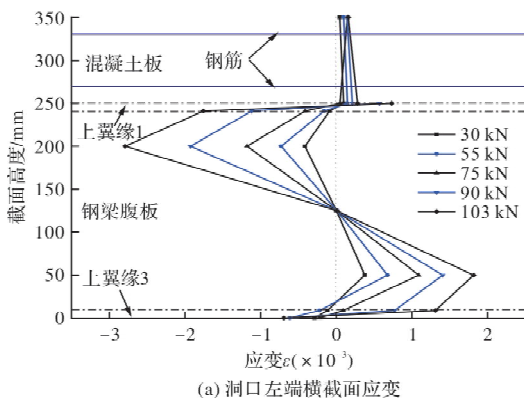


图 6 配筋率变化时的荷载-挠度曲线

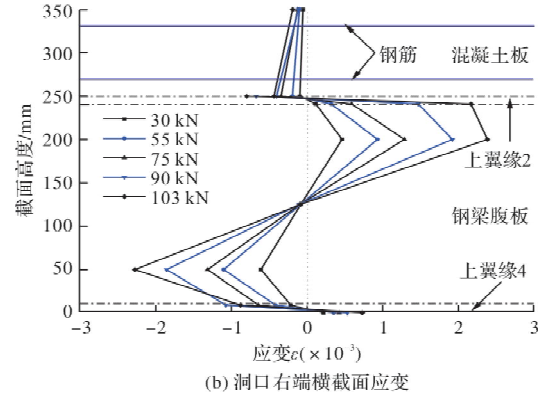
Fig. 6 The load-deflection curve with the change of reinforcement ratio

## 2.3 截面分析

试验对负弯矩区腹板开洞组合梁试件洞口两侧进行了应变测量, 结果大体相似, 以试件 A2 为例分析并研究负弯矩区腹板开洞组合梁洞口区的截面受力情况, 如图 7 所示。



(a) 洞口左端横截面应变



(b) 洞口右端横截面应变

图 7 A2 试件洞口区横截面应变分布

Fig. 7 Strain distribution in cross-section of A2 specimen hole area

试验表明: 组合梁腹板开洞后, 洞口处截面应变呈 S 型分布, 不再符合平截面假定; 由图 7 (a) 看出, 在洞口左端上部截面中, 翼缘顶部受拉、腹板受压, 在下部截面中则是翼缘底部受压、腹板受拉; 洞口右端截面的受力情况与洞口左端截面刚好相反, 如图 7 (b) 所示。根据上述结果, 得出了洞口截面的内力分布情况, 如图 8 所示, 图中 M1~M6 为洞口截面上的次弯矩, 可以看出, 洞口左端截面的混凝土明显受拉, 这部分的纵向受力钢筋能有效的发挥作用。

## 2.4 钢筋受力性能

通过试验发现开洞组合梁试件 A2~A4 的纵向受力钢筋受力情况相似, 以试件 A2 为例, 说明负弯矩区腹板开洞组合梁洞口区纵向受力钢筋的应变规律, 图 9 为洞口区域的纵向受力钢筋应变图。

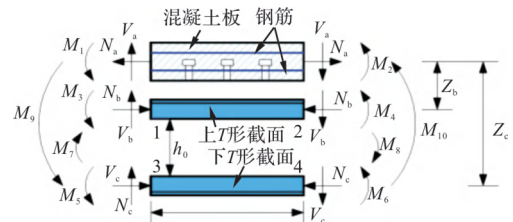


图 8 负弯矩作用下洞口区域内力分布

Fig. 8 The internal force distribution of the hole under the action of negative bending moment

从图 9 可看出: 洞口区域左、中、右三个截面上纵向钢筋的应变规律各不相同。对于洞口右端截面, 上层纵筋受压, 下层纵筋受拉, 这与负弯矩作用下洞口区域的内力分布情况是一致的(见图 8), 说明洞口右端上部钢筋周围的一部分混凝土受压, 下部钢筋周围的混凝土则受拉开裂退出工作, 拉力由纵向钢筋承担, 使得这部分钢筋的拉



应力较大,洞口左端截面的纵向钢筋受力情况则刚好相反,并且洞口左端截面的上部纵向钢筋应变值最大,其抗拉效果最为明显;图9(b)可看出

洞口中部的部分钢筋随着荷载的增加从受压区过渡到受拉区,而且上层钢筋的应变值均大于下层钢筋。

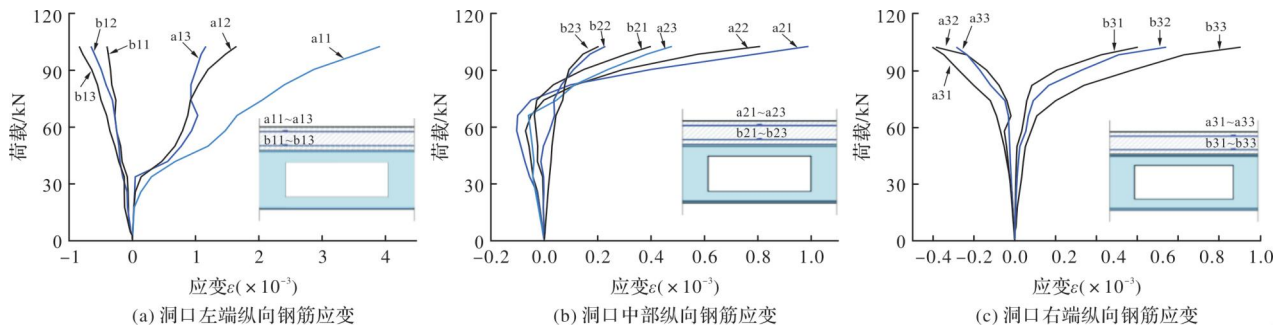


图9 洞口区域纵向钢筋应变(试件 A2)

Fig. 9 Longitudinal reinforcement strain in the hole area (Specimen A2)

图10、图11为洞口区板内纵向受力钢筋应变沿混凝土翼板宽度方向的分布规律,以试件A2为例进行分析:从加载开始到 $0.7P_u$ 前,试件洞口各截面上的纵向钢筋应变沿着混凝土板宽度分布比较均匀,表明此阶段纵向钢筋协同工作性能良好;但随着荷载的继续增加,纵向钢筋的应变分布差异开始增大,协同工作性能开始变差。同时

发现,对于受拉力作用的同一排钢筋,越靠近混凝土板中点(即洞口)其应变值越大(图10(a)),原因是混凝土板在拉力作用下退出工作,这部分拉力由钢筋承担,又由于开洞造成的刚度下降使得靠近洞口的钢筋受到的拉力更大,因此需要对这部分受拉钢筋进行针对性的加强。

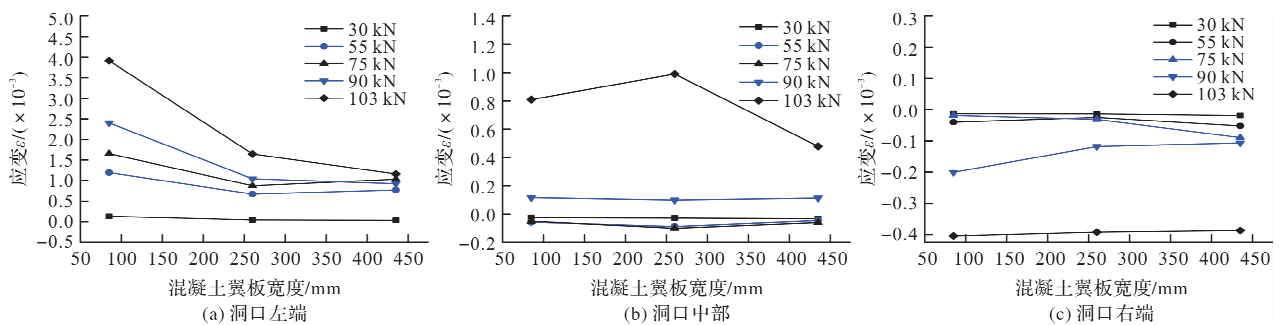


图10 洞口区上层纵向钢筋应变沿宽度的分布

Fig. 10 The longitudinal reinforcement strain distribution along the width of the upper layer of the entrance area

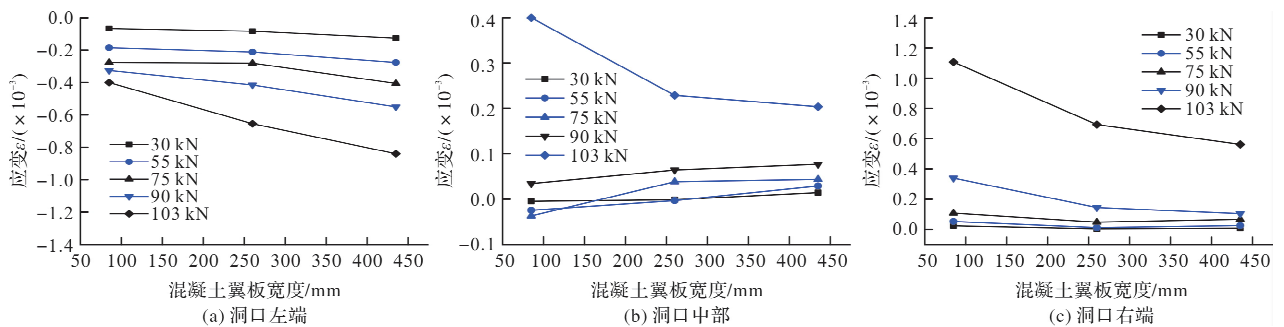


图11 洞口区下层纵向钢筋应变沿宽度的分布

Fig. 11 Distribution of longitudinal reinforcement strain along width in the lower layer of the entrance area

### 3 有限元分析

由于受到测点数量和测试方法的限制,试验所得数据还不够全面,可以通过有限元分析对试

验结果进行补充,从而更全面地分析钢筋在开洞处的受力特点及影响因素,并通过参数分析研究附加钢筋的补强效果。

3.1 模型建立

为了对负弯矩作用下的腹板开洞组合梁进行非线性分析, 采用 ANSYS 有限元软件模型对试验试件进行模拟, 有限元模型及单元选择如图 12 所示. 混凝土采用多线性随动强化模型(Mkin), 钢材均采用双线性等向强化模型(Biso). 为了防止应力集中造成收敛困难, 在加载点和支座处设置了刚性垫板.

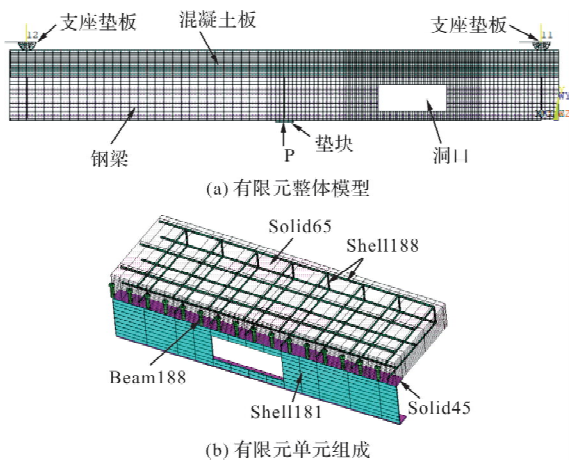


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

3.2 试验结果与有限元结果对比

将有限元结果与试验结果进行了对比, 如图 13、表 4 和表 5 所示.

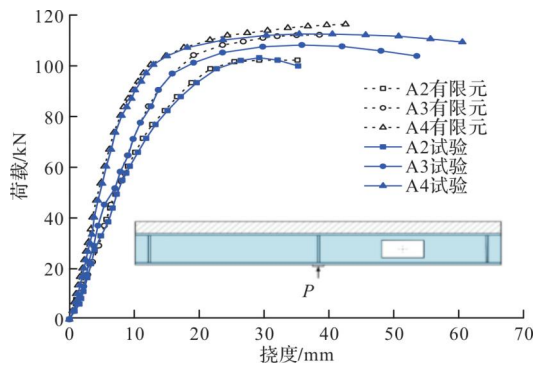


图 13 试验与有限元模拟荷载-挠度曲线对比

Fig. 13 Load-deflection curves of test and FEM simulation

图 13 是开洞组合梁试件的试验与有限元荷载-挠度曲线, 可以看出: 有限元曲线和试验曲线在弹性阶段、弹塑性阶段都吻合良好, 极限承载力也相差不大; 但试件 A3、A4 在破坏阶段的最大挠度值有一定偏差, 原因是试件 A3、A4 的配筋率相对较高, 试验得到的荷载-挠度曲线的下降段较长, 而有限元分析采用了 Newton-Raphson 迭代算法, 难以计算出曲线下降段, 此外洞口区混凝土开裂也造成了计算收敛的困难.

表 4、表 5 为试验和有限元得到的钢筋应变及试件极限承载力数值对比, 可以看出: 有限元与试验得到的钢筋应变误差在 10% 以内, 极限承载力的误差在 5% 以内, 满足工程要求, 验证了有限元模型的准确性.

表 4 靠近洞口区的钢筋应变(A2)/ $\times 10^{-3}$

Tab. 4 Reinforcement strain near the hole area(A2)/ $\times 10^{-3}$

编号	洞口上层钢筋			洞口下层钢筋		
	左	中	右	左	中	右
试验	1.161	0.809	-0.387	-0.401	0.399	1.107
有限元	1.065	0.735	-0.362	-0.541	0.365	1.003
误差/%	8.3	9.2	6.5	7.4	8.7	9.4

表 5 组合梁极限承载力试验与有限元结果对比

Tab. 5 Comparison of ultimate bearing capacity test and finite element results of composite beams

编号	极限承载力/kN		误差/%
	试验	有限元	
A1	193.8	197.6	2
A2	103.1	102.2	1
A3	108.2	112.2	3.7
A4	112.5	116.3	3.4

3.3 钢筋受力分析

普通的钢-混凝土组合梁在负弯矩作用下, 拉力主要由板内纵向钢筋承担, 对于腹板开洞组合梁, 由试验可以发现洞口处的钢筋受力情况更为复杂, 只有部分纵向钢筋可以发挥抗拉作用, 通过有限元分析可以得出更全面的受力情况, 洞口区钢筋受力情况如图 14 所示, a1~a3 为上层钢筋, b1~b3 为下层钢筋, a1、b1 距离洞口最近, 其余依次远离洞口.

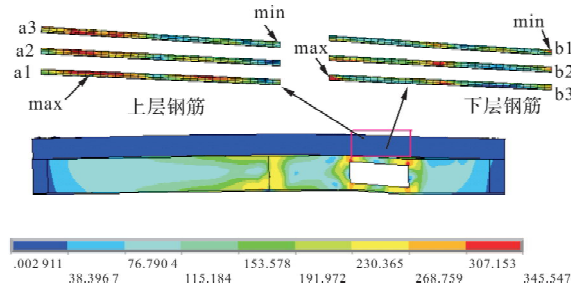


图 14 开洞区纵向钢筋应力图(A2)

Fig. 14 Stress diagram of longitudinal reinforcement in open area(A2)

由图 14 可知: 洞口上层钢筋靠近洞口处的钢筋 a1~a3 的左中右分别处于受拉区、受拉区、受压区, 离洞口最近的钢筋 a1 受力最大, 远离洞口的钢筋 a3 受力最小, 与试验现象吻合; 洞口区下

层钢筋( $b_1 \sim b_3$ )在洞口左侧受压、右侧受拉,并且下层钢筋的整体受力比上层钢筋要小,与试验现象吻合;洞口区只有一部分钢筋能够发挥抗拉作用,对这部分钢筋进行加强可以改善洞口区混凝土板的受力性能。

### 3.4 添加附加钢筋

在洞口区添加附加钢筋,分析改进后的试件,设计了5根组合梁试验,其他参数不变,附加钢筋的直径和距离中心轴的长度为变化参数,其结果如表6所示。添加附加钢筋的位置如图15所示。

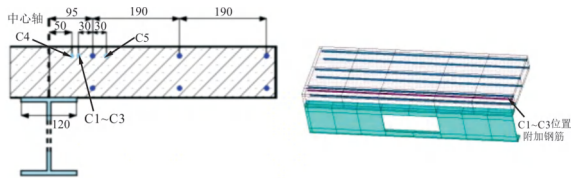


图15 附加钢筋位置图

Fig. 15 Additional reinforcement diagram

表6 受拉钢筋变化参数及有限元结果

Tab. 6 Variation parameters and finite element results of tensile reinforcement

试件	距离中心轴 的长度/mm	钢筋 直径/mm	极限荷载 $P_u$ /kN	极限位移 $d_u$ /mm
C1	65	6	106.32	38.24
C2	65	8	110.53	42.99
C3	65	10	107.35	38.70
C4	50	8	103.25	35.26
C5	125	8	108.43	40.52

C1~C5试件的荷载挠度如图16所示,结果表明: C1~C3试件在距离中心轴65 mm的位置添加附加钢筋后,对应的承载力分别提高了4.01%、8.13%、5.01%,变形能力分别提高了8.44%、21.91%、9.74%。可见添加附加钢筋可以提高负弯矩区腹板开洞组合梁的承载力和变形能力,附加钢筋直径为8 mm时,对承载力和变形能力的提高效果最好。当附加钢筋直径增加时,导致两根钢筋之间的距离变小,与混凝土之间的粘结力不足,导致效果下降。C4试件附加钢筋在距离中心轴50 mm的位置,处于钢梁翼缘下,完全处于受压区不能发挥钢筋受拉的优势,对承载力和变形能力的提高没有明显效果。C5试件附加钢筋在距离中心轴125 mm的位置,承载力和变形能力分别提高了6.07%、14.93%,可见在此处添加附加钢筋可以提高负弯矩区腹板开洞组合梁的承载力和变形能力,但效果没有在65 mm处明显。

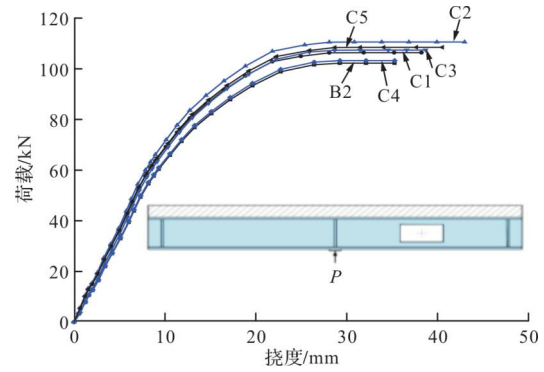


图16 参数变化时荷载-挠度曲线

Fig. 16 Load deflection curve with parameter variation

从图17可以看出: 试件C2与试件A2相比,洞口上方混凝土板的裂缝明显减少,说明增加附加钢筋能有效减少混凝土板中的裂缝,原因是试件C2的附加钢筋直径适中,且设置在了洞口截面的主要受拉区域,能够分担截面拉力从而限制混凝土的裂缝开展。

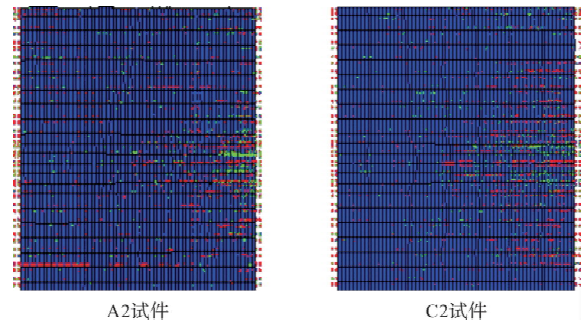


图17 洞口区混凝土裂缝对比图

Fig. 17 Comparison of concrete cracks in the entrance area

## 4 结论

(1)负弯矩作用下钢-混凝土组合梁在腹板开洞后,其承载力和变形能力会显著降低,增加纵向钢筋配筋率可以提高试件的承载力和变形能力(图6),但并不是所有纵向钢筋都能在洞口区发挥出抗拉作用(图9);

(2)洞口区域钢筋受力复杂,只有部分纵向钢筋发挥了抗拉作用,其中,洞口左端的上部钢筋抗拉效果最为明显(图9、图10),建议对该部分钢筋进行重点补强;

(3)在洞口区主要受拉截面处(洞口左端上部截面)设置附加钢筋可以提高负弯矩区组合梁的承载力和变形能力,提高幅度分别达到了4.01%~8.13%和8.44%~21.91%;

(4)附加钢筋的直径、设置的位置对试件的承载力和变形能力的提高效果有明显的影响,在距

离中心轴 65 mm 处设置直径为 8 mm 附加钢筋时可以获得最佳的提高效果。

## 参考文献 References

- [1] YOSHIDA Shoji, HANDA Ko, HASEGAWA Kazuo. On the strength of steel-concrete composite structures for floating construction[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1980, 148: 294-302.
- [2] 聂建国, 余志武. 钢混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.  
NIE Jianguo, YU Zhiwu. Research and practice of composite steel-concrete beams in china[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 3-8.
- [3] 王灿灿, 梁旭东, 朱培红, 等. 圆形高强中空夹层钢管混凝土构件轴压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 366-378.  
WANG Cancan, LIANG Xudong, ZHU Peihong, et al. Study on the axial compression behavior of circular high strength concrete-filled double skin steel tubular members[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 336-378.
- [4] 门进杰, 熊礼全, 雷梦珂, 等. 楼板对钢筋混凝土柱-钢梁空间组合体抗震性能影响研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 69-77, 87.  
MEN Jinjie, XIONG Liquan, LEI Mengke, et al. Seismic performance of reinforced concrete column-steel beam subassemblies considering effect of RC slab [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 69-77, 87.
- [5] REDWOOD R G, SHRIVASTAVA S. Design recommendations for steel beams with web holes[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1980, 7(4): 642-650.
- [6] 周东华, 赵惠敏, 王明锋, 等. 带腹板开洞组合梁的非线性计算[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(2): 21-24.  
ZHOU Donghua, ZHAO Huimin, WANG Mingfeng, et al. Nonlinear calculation of a tested composite beam with web opening[J]. Building Science Research of Sichuan, 2004, 30(2): 21-24.
- [7] 陈涛, 李华, 顾祥林. 负弯矩区腹板开洞钢-混凝土组合梁承载力试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 63-71.  
CHEN Tao, LI Hua, GU Xianglin. Experimental study and theoretical analysis on load carrying capacity of steel-concrete composite beams with web openings under negative moment[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 63-71.
- [8] FAHMY E H. Analysis of composite beams with rectangular web openings[J]. Journal of constructional steel research, 1996, 37(1): 47-62.
- [9] DAVID Darwin, DONAHEY RC. LRFD for composite beams with unreinforced web openings[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114: 535-552.
- [10] FELIPE Piana V F, CARLOS H M, SILVANA D N. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172, 106182.
- [11] CLAWSON W C, DARWIN D. Strength of composite beams at web openings[J]. Journal of structural Engineering, 1982, 108(3): 623-641.
- [12] PARK J W, KIM C H, YANG S C. Ultimate strength of ribbed slab composite beams with web openings[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6): 810-817.
- [13] ERDAL F, SAKA M P. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 355-368.
- [14] 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.  
BAI Yongsheng, JIANG Yongsheng, LIANG Shuting, 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.
- [15] 聂建国, 吴洪, 周建军, 等. 混凝土翼板开洞钢-混凝土组合梁的试验研究及刚度分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 31-35.  
NIE Jianguo, WU Hong, ZHOU Jianjun, et al. Experimental study and rigidity analysis on composite steel-concrete beams with openings in concrete flange [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 3-8.
- [16] 王富岭, 王玉田, 姜福香, 等. 循环荷载作用下 CFRP-混凝土界面粘结-滑移关系研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 223-228, 253.  
WANG Fuling, WANG Yutian, JIANG Fuxiang, et al. Study on the bond-slip relationship of CFRP-concrete interface under cyclic loading[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(2): 223-228, 253.
- [17] 刘少华. 钢-混组合梁负弯矩区受力分析与设计方法[J]. 城市道桥与防洪, 2021, 2: 37-40.  
LIU Shaohua. Analysis and design methods on stress of hogging moment zone of steel-concrete composite girder[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2021, 2: 37-40.
- [18] ZHOU Donghua, LI Longqi, SCHNELL Jürgen, et al. Elastic deflections of simply supported steel i-beams with a web opening[J]. Procedia Engineering, 2012, 31: 315-323.



- [19] 李龙起. 腹板开洞钢-混凝土连续组合梁试验研究与理论分析[D]. 昆明:昆明理工大学, 2014.  
LI Longqi. Experimental research and theoretical analysis of steel-concrete continuous composite beams with web openings[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [20] 寇立亚, 胡夏闵, 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, 12(27): 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, 12(27): 15-20, 6.
- [21] DU Hao, HU Xiamin, SHI Danrong, et al. Effect of reinforcement on the strength of the web opening in steel-concrete composite beam[J]. Engineering Structures, 2021, 235, 112038.
- [22] 王鹏, 周东华, 王永慧, 等. 预应力腹板开洞组合梁非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(2): 72-78.  
WANG Peng, ZHOU Donghua, WANG Yonghui, et al. Nonlinear finite element analysis of prestressed composite beam with web opening[J]. Building Structure, 2018, 48(2): 72-78.
- [23] LIAO Wenyuan, LI Longqi, LIU Dewen, et al. Non-linear FEM analysis on composite beams with web opening under negative bending moment[J]. Tehnički vjesnik, 2018, 25(5): 1546-1552.
- [24] 李聪, 聂建国, 周心怡, 等. 钢-混凝土连续组合梁桥负弯矩区抗裂设计[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 172-178.  
LI Cong, NIE Jianguo, ZHOU Xinyi, et al. Anti-cracking design for hogging moment regions of steel-concrete continuous composite beam bridges[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(3): 172-178.
- [25] 王珊, 张翼, 郝龙. 钢-混凝土组合梁负弯矩区整体稳定性设计方法研究[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(2): 30-36.  
WANG Shan, ZHANG Yi, HAO Long. Research on global stability design method of steel-concrete composite beams of negative moment region[J]. Steel Structure (English and Chinese), 2022, 37(2): 30-36.

(编辑 郑晓龙 沈 波)

(上接第13页)

- [19] 孙尚鹏, 彭刚, 程卓群, 等. 压剪共同作用下混凝土的动态力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(6): 13-16, 21.  
SUN Shangpeng, PENG Gang, CHENG Zhuoqun, et al. Study on dynamic mechanical properties of concrete under combined action of compression and shear[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(6): 13-16, 21.
- [20] 程卓群, 王乾峰, 王普, 等. 双轴受压混凝土动态力学特性及破坏准则研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 101-107.  
CHENG Zhuoqun, WANG Qianfeng, WANG Pu, et al. Study on dynamic mechanical properties and failure criteria of concrete under biaxial compression[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 101-107.
- [21] 张修文, 王乾峰, 彭刚, 等. 水压力下不同孔隙率混凝土的动态力学性能研究[J]. 试验力学, 2020, 35(6): 1129-1135.  
ZHANG Xiwen, WANG Qianfeng, PENG Gang, et al. Study on dynamic mechanical properties of concrete with different porosity under water pressure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6): 1129-1135.
- [22] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1586-1597.  
WANG Zhihang, BAI Erlei, XU Jinyu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of polymer modified carbon fiber reinforced concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1586-1597.
- [23] 白卫峰, 李思蕾, 管俊峰, 等. 再生混凝土的单轴压缩动态力学性能试验研究[J/OL]. 建筑材料学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210514.0920.004.html>  
BAI Weifeng, LI Silei, GUAN Junfeng, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J/OL]. Journal of Building Materials. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210514.0920.004.html>
- [24] 巫绪涛, 胡俊, 谢思发. EPS混凝土的动态劈裂强度和能量耗散[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 369-374.  
WU Xutao, HU Jun, XIE Sifa. Dynamic splitting strength and energy dissipation of EPS concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 369-374.
- [25] 党发宁, 焦凯, 潘峰. 混凝土抗折动强度及其极值研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 422-428.  
DANG Faning, JIAO Kai, PAN Feng. Study on flexural strength and its extreme value of concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 422-428.

(编辑 郑晓龙 沈 波)