

负弯矩下钢-混凝土蜂窝组合梁力学性能研究

贾连光,唐康,焦禹铭,孙博文

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究负弯矩及弯剪作用下钢-混凝土蜂窝组合梁的破坏形态,分析不同参数对蜂窝组合梁力学性能的影响. 方法 在集中荷载作用下对一根蜂窝组合梁和一根蜂窝梁进行静力试验,研究在负弯矩和剪力共同作用下,钢-混凝土蜂窝组合梁的受力状态和破坏模式. 以蜂窝组合梁静力性能试验为基础,建立有限元模型,将模拟结果与试验结果对比以验证模型合理性,进而研究腹板高厚比、翼缘宽厚比以及是否设置混凝土板等影响因素对蜂窝组合梁受力性能的影响. 结果 设置混凝土板,对于蜂窝组合梁负弯矩下的承载力有相应的提高,混凝土板对承载力的贡献为7%左右;在混凝土板受拉情况下,减小腹板高厚比和翼缘宽厚比对蜂窝组合梁的承载力均有提高,增大钢筋纵向配筋率可以提高蜂窝组合梁的开裂荷载. 结论 腹板高厚比、翼缘宽厚比以及混凝土板纵向配筋率对蜂窝组合梁力学性能均有明显影响,设置混凝土板可以小幅提高组合梁承载力.

关键词 蜂窝组合梁;负弯矩;静力试验;腹板高厚比;有限元模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on Mechanical Properties of Steel-Concrete Honeycomb Composite Beam under Negative Bending Moment

JIA Lianguang, TANG Kang, JIAO Yuming, SUN Bowen

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The failure modes of steel-concrete honeycomb composite beams under the action of negative bending moment and bending shear are studied. The effects of different parameters on mechanical properties of honeycomb composite beams are analyzed. The static tests of a honeycomb composite beam and a honeycomb beam under concentrated load were carried out to study the stress state and failure mode of the steel-concrete honeycomb composite beam under the action of negative bending moment and shear force. Based on the static performance test of honeycomb composite beam, the finite element model was established, and the simulation results

收稿日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51578346)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,主要从事钢结构设计与计算理论等方面研究.

were compared with the test results to verify the rationality of the model, and then the influences of factors such as the height to thickness ratio of web, the width to thickness ratio of flange and whether to set concrete slabs on the mechanical performance of honeycomb composite beam were studied. The bearing capacity of honeycomb composite beam under negative bending moment was improved by setting concrete slab, and the contribution of concrete slab to bearing capacity was about 7%. In the case of concrete slabs under tension, the bearing capacity of honeycomb composite beams can be improved by reducing the ratio of web height to thickness and the ratio of flange width to thickness, and the cracking load of honeycomb composite beams can be increased by increasing the ratio of longitudinal reinforcement. The ratio of web height to thickness, the ratio of flange width to thickness and the ratio of longitudinal reinforcement of concrete slabs have obvious effects on the mechanical properties of honeycomb composite beams.

Key words: honeycomb composite beam; negative bending moment; static test; web height to thickness ratio; finite element simulation

在蜂窝组合梁作为连续梁的应用中,蜂窝结构由于腹板开孔,会对腹板造成一定的削弱,在负弯矩和剪力共同作用下,蜂窝组合梁将会出现更加复杂的受力状态和破坏形式^[1-4],需要深入研究和探讨.国外针对组合梁的负弯矩研究开展较早,D. Sonck^[5]与 P. WANG^[6]提出在实际工程中,在组合梁负弯矩段开孔,支座的第一洞口可能为破坏的最不利截面,需要在设计中着重注意. R. P. Johnso^[7-8]、M. A. Bradford 等^[9]通过对两跨连续梁施加集中荷载的方式进行试验,提出负弯矩下受弯承载力主要受腹板高厚比的影响.廖文远等^[10-11]通过对腹板单一开孔组合梁在负弯矩下进行试验,得出腹板开孔组合梁的承载力和刚度会由于腹板开孔太大而降低,开孔截面将不满足平截面假定,翼板厚度可以提高负弯矩下腹板开孔组合梁承载力的结论.刘洋等^[12-13]对8根钢-混凝土组合梁进行了负弯矩下的试验,研究了腹板高厚比、端部弯矩比、栓钉连接度、受压翼缘侧向长细比以及加劲肋对负弯矩下钢-混凝土实腹组合梁力学性能的影响.马宏伟^[14]对4根悬臂梁蜂窝组合梁进行了研究,得出在负弯矩下蜂窝组合梁扩张比小于1.3时,蜂窝组合梁在第一个孔会发生弯曲破坏的结论,并得出扩张比对蜂窝组合梁在负弯矩的作用下影响较大.彭刚^[15]对钢-混凝土连续组合

梁进行了有限元模拟,对影响钢-混凝土连续组合梁的腹板高厚比、混凝土内钢筋配筋率以及钢材的强度等因素展开研究,并根据已有简化塑性理论,提出了负弯矩作用下钢-混凝土连续组合梁的抗弯承载力公式,针对栓钉的抗剪连接度也进行了相应的折减.黄峥等^[16]对蜂窝梁孔洞处的剪力以及剪力产生的次弯矩对蜂窝梁挠度的影响进行了研究,得出了蜂窝梁的挠度公式.王文思^[17]通过实际工程作为算例,研究变高度蜂窝梁的受力情况.张艳霞等^[18]通过计算大量实例,研究了孔高比、距高比和跨高比对蜂窝梁挠度的影响.

综合国内外的研究,组合梁负弯矩的研究主要集中在实腹梁或单一开孔梁,针对连续开孔的蜂窝梁相对较少.基于此,笔者对一根蜂窝梁和一根蜂窝组合梁进行静力试验,分析蜂窝组合梁在负弯矩和剪力共同作用下的破坏形态和变形特征,并以试验为基础进行有限元建模,分析腹板高厚比、翼缘宽厚比以及混凝土板内纵向配筋率等影响因素对其力学性能的影响,为钢-混凝土蜂窝组合梁作为连续梁的设计提供参考.

1 试验

1.1 试件设计与制作

试验共设计了两类蜂窝梁,蜂窝梁开孔

形状均为正六边形,开孔率为50%。两类蜂窝梁梁长均为3 586 mm,其中梁高×翼缘宽×腹板厚度×翼缘厚为500 mm×250 mm×8 mm×14 mm。其中一根为纯钢蜂窝梁,一根是布置有混凝土板的蜂窝组合梁,采用C30混凝土,板厚为100 mm。浇筑前混凝土板内设置双层受力钢筋,受力钢筋采用

直径10 mm的HRB400钢筋,间距为160 mm,上下各6根,箍筋为直径8 mm的HRB400钢筋,栓钉采用Φ19,长度为80 mm。试件具体参数如图1所示。试验所用钢材均采用Q345钢材,材料力学性能见表1,其中混凝土抗压强度为34.48 MPa。

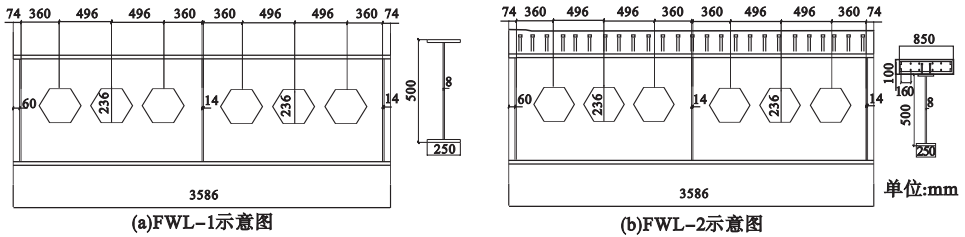


图1 蜂窝梁试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of honeycomb beam specimen

表1 材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of material MPa

材料	屈服强度 f_y	极限强度 f_u
钢梁翼缘 14 mm	323.9	450.7
钢梁腹板 8 mm	305.4	451.1
Φ8 钢筋 HRB400	408.9	401.4
Φ10 钢筋 HRB400	577.7	559.8
Φ19 栓钉	221	228

1.2 加载方案与测点设置

试验加载装置如图2所示。为保证试件与加载装置间接触良好,检查设备仪表是否

可以正常工作,需要在正式加载前先进行预加载,预加载约为极限荷载的10%。试件屈服前由荷载控制加载,每级荷载增加50 kN,到达加载值后持载3 min等待荷载的传递,观测试件各部分局部变形后,再进行下一级加载。在试件曲线到达拐点后,通过跨中位移计观察示数,改为由位移控制的连续加载,直到试件破坏。

为研究孔间墩板和孔洞周围位置的应力变化情况,在孔角应力集中关键位置处布置应变花BX120-3CA,在孔上桥板位置、墩板位置、下翼缘跨中位置布置应变片BX120-3AA,在混凝土板表面布置混凝土应变片BX120-100AA,具体应变片布置图如图3和图4所示,位移计布置如图5所示。为便于试验现象的描述,将试件各孔及各孔角进行编号,具体编号如图6所示,图中标注为面向试件方向。

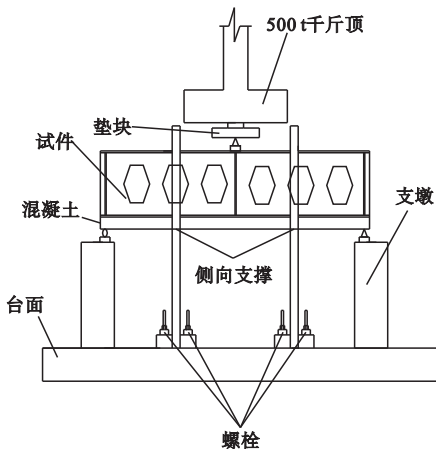


图2 加载装置示意图

Fig. 2 Sketches of setup for pull-out test

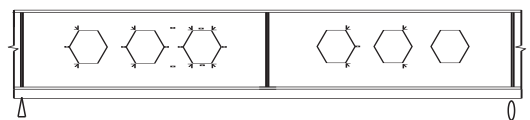


图3 腹板应变片布置

Fig. 3 Web strain gauges arrangement

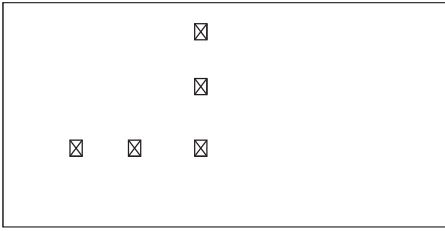


图4 混凝土板应变片布置

Fig. 4 Strain gauges arrangement of concrete slab

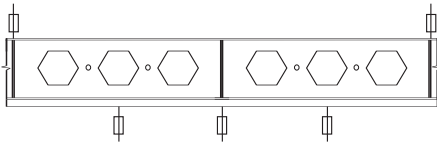


图5 位移计布置

Fig. 5 Displacement gauge layout

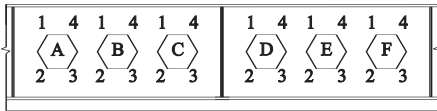


图6 试件孔及孔角编号

Fig. 6 Specimen holes and hole angle number

2 试验现象及性能分析

2.1 试验现象

试件 FWL-1 为六边形孔蜂窝梁,加载初期荷载较小,试件未观察到明显现象,随着荷载的增大,当荷载达到 641 kN 时,可观察到试件跨中位移明显增大,跨中荷载位移曲线出现明显拐点,试件已经进入屈服阶段,改为由位移控制的连续加载,试验测得最终极限荷载为 716 kN. 整体破坏模式如图 7 所示.

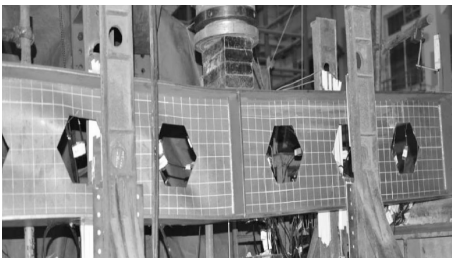


图7 FWL-1 整体破坏

Fig. 7 FWL-1 overall damage

试件 FWL-2 为蜂窝组合梁,当荷载达到 160 kN 时,混凝土板在跨中出现第一条裂缝,随着荷载的增加,混凝土板板底裂缝逐渐增多,当加载到 350 kN 时,混凝土板底跨中位置出现多道沿板宽通长的混凝土裂缝,且混凝土板顶也出现沿宽度方向的裂缝,由此判断跨中混凝土为受拉破坏,已经逐渐退出工作.当荷载达到 708 kN 时,D 孔孔角 4 发生轻微的内凹屈曲,试件进入屈服阶段,当加载到 768 kN 时,荷载不再上升,达到蜂窝组合梁的极限荷载.对比不含混凝土板的试件 FWL-1,可以观察到,蜂窝梁与蜂窝组合梁在混凝土板受拉情况下,均表现为 C 孔孔角因应力集中现象使孔角处钢材屈服,从而导致的梁整体屈服破坏(见图 8).

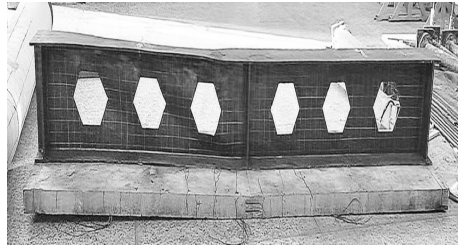


图8 FWL-2 整体破坏

Fig. 8 FWL-2 overall damage

混凝土板破坏情况如图 9 所示.混凝土板跨中位置处主要有 5 条裂缝分布,裂缝沿梁翼缘宽度方向形成被拉碎的贯通区域,同时混凝土板沿梁长度方向也出现了一条裂缝.在最后的荷载下降阶段,梁端混凝土板出现了掀起现象.

试验测得两个试件荷载结果见表 2. 从表中可以看出,在混凝土板受拉情况下,屈服荷载与极限荷载均有相应的提升,FWL2 较 FWL-1 屈服荷载提高了 9.5%,极限荷载提高了 7%.对比文献[19-20]中结论:在混凝土板受压情况下,混凝土板对蜂窝组合梁承载力贡献度为 20%,在混凝土板受拉的情况下,混凝土板对蜂窝组合梁承载力的贡献度要明显减小,混凝土板对蜂窝组合梁承载力的贡献度为 7%.



(a)混凝土板裂缝分布



(b)支座处混凝土破坏

图9 FWL-2 混凝土板破坏

Fig. 9 FWL-2 concrete slab damage

表2 试件结果

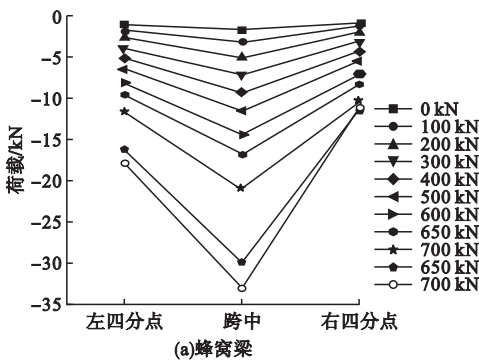
Table 2 Sample results

试件	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
FWL-1	—	641	716
FWL-2	160	708	768

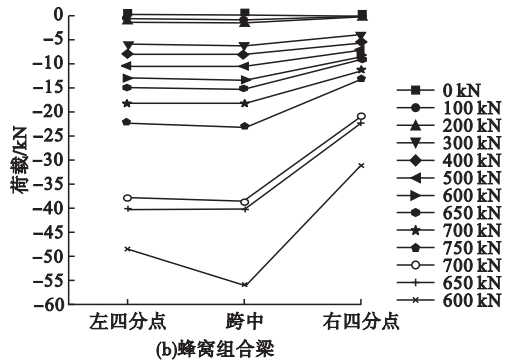
2.2 试件整体变形曲线分析

蜂窝梁与蜂窝组合梁在整个试验加载过程中荷载与位移关键点处的整体变形曲线如图10所示. 笔者通过取左右四分点以及跨中位移进行对比分析, 由整体变形曲线可以看

出, 在加载初期的弹性阶段, 蜂窝梁与蜂窝组合梁的位移是相近的, 梁整体变形较小. 当达到蜂窝梁与蜂窝组合梁各自的屈服荷载后, 各点位移迅速增加. 达到蜂窝梁与蜂窝组合梁的极限荷载时, 对比发现, 在混凝土板受拉情况下, 蜂窝梁在极限荷载时各点位移要明显大于蜂窝组合梁在极限荷载时的各点位移, 可以看出混凝土板对于蜂窝组合梁变形的限制.



(a)蜂窝梁



(b)蜂窝组合梁

图10 试件整体变形曲线

Fig. 10 Overall deformation curves of specimen

蜂窝梁与蜂窝组合梁在达到各自的极限荷载进入荷载下降阶段时, 对比各点处位移可知, 蜂窝组合梁的各点位移明显要大于蜂窝梁的各点位移. 由此也可以得出, 在混凝土板受拉情况下, 带混凝土板的蜂窝组合梁的破坏速度明显快于不带混凝土板的蜂窝梁.

2.3 混凝土板应变分析

在混凝土板跨中区域沿板宽度方向布置

3个混凝土应变片, 应变片分别位于跨中位置, 距板边300 mm位置处, 距板边100 mm位置处. 板跨中沿宽度方向混凝土荷载-应变曲线如图11所示. 由图中可以得出, 在混凝土板跨中区域沿板宽度方向布置的应变片中, 中心位置处的混凝土应变片应变最大, 变化也最明显, 距板边100 mm处的混凝土应变片应变最小, 变化最小. 除中心位置处的混

凝土应变片数值较为突出,其余两个位置处的应变片数值较为接近。在钢梁与混凝土连接处,因为抗剪连接件的存在,使该区域的协同变形最大,距离混凝土边缘越近的区域,其变形也越不协调,这也是FWL-2在混凝土板沿长度方向上出现裂缝的原因。

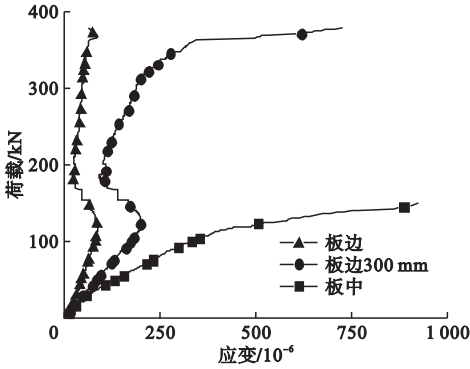


图 11 FWL-2 混凝土板跨中沿宽度方向荷载 - 应变曲线

Fig. 11 FWL-2 concrete slab load-strain curves along the width of the mid-span

沿混凝土板长度方向布置了 3 个应变片,分别在跨中位置处,梁四分点位置处和梁端位置处,荷载 - 应变曲线如图 12 所示。在加载过程中,当荷载加到 150 kN 左右,混凝土板跨中首先出现裂缝,随着荷载的增加,裂缝从跨中沿长度方向向梁端移动,当达到 250 kN 左右时,混凝土板四分点处也出现裂缝。

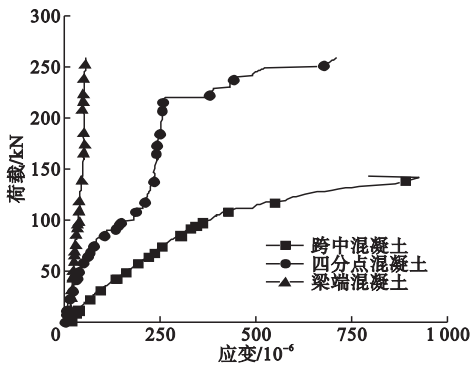


图 12 FWL-2 混凝土板沿长度方向荷载 - 应变曲线

Fig. 12 FWL-2 concrete slab load-strain curves along length direction

2.4 蜂窝孔孔角应变分析

C 孔作为跨中孔,可以直接反应蜂窝孔孔角应变,笔者选取 C 孔作为分析对象。图 13、图 14 分别为蜂窝梁与蜂窝组合梁 C 孔孔角 1 荷载 - 应变曲线,对比分析可知,由于混凝土板的存在,限制了蜂窝组合梁的竖向位移,所以蜂窝组合梁 C 孔孔角 1 较蜂窝梁 C 孔孔角 1 出现了较大的横向压应变,且蜂窝组合梁 C 孔孔角 1 的竖向应变明显小于蜂窝梁 C 孔孔角 1 的竖向应变。

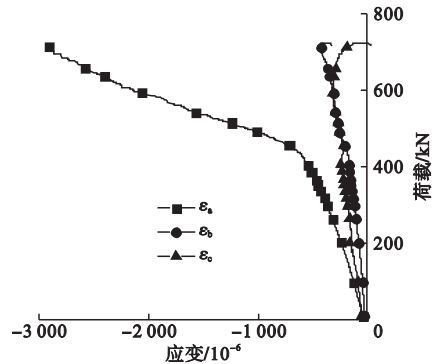


图 13 FWL-1C 孔孔角 1 荷载 - 应变曲线

Fig. 13 FWL-1C hole Angle 1 load strain curves

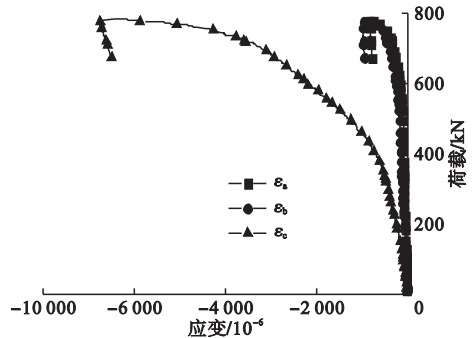


图 14 FWL-2C 孔孔角 1 荷载 - 应变曲线

Fig. 14 FWL-2C hole Angle 1 load strain curves

2.5 翼缘应变分析

图 15 为蜂窝梁与蜂窝组合梁靠近混凝土板一侧跨中翼缘的荷载 - 应变曲线。从图中可以直观地看到蜂窝组合梁中和轴的移动。FWL-2 在加载初期,混凝土受拉,中和轴在梁中心轴的下侧,导致 A 孔左侧应变片出现了受压的情况,当荷载 150kN 时,混凝土板受拉已经逐步退出工作,中和轴逐渐向上移动,A 孔左侧应变片显示受拉,当试件加载

到屈服荷载时,由于梁刚度的下降,使A孔附近呈现出局部受压的趋势,最终跨中处D孔失稳,导致梁整体退出工作。同时对比两者翼缘荷载-应变曲线可知,在相同荷载作用下,蜂窝梁的应变要明显小于蜂窝组合梁的应变,可见在混凝土板受拉情况下,设置混凝土板对于翼缘的边缘约束作用明显提高。

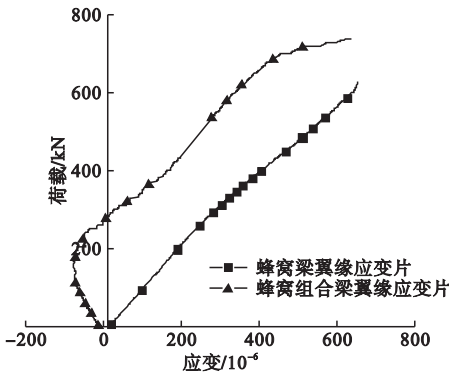


图15 A孔左孔角荷载-应变曲线

Fig. 15 The load-strain curves of the left hole of Hole A

3 有限元分析

3.1 建立模型

钢-混凝土蜂窝组合梁模型中,栓钉与钢梁均采用C3D8R实体单元建立,并通过合并的方式使栓钉和蜂窝梁形成整体。栓钉内置于混凝土板中。混凝土板采用C3D8R实体单元建立。板内钢筋通过T3D2三维桁架单元内置于混凝土板中。为了充分考虑混凝土板在结构中的受力,混凝土采用损伤塑性模型,钢材均采用3折线模型,并考虑材料非线性。试件有限元模型见图16。

3.2 有限元模拟结果

图17分别为蜂窝梁与蜂窝组合梁有限元破坏模型图。通过试验结果与有限元模拟的对比发现,钢-混凝土蜂窝组合梁的破坏模态吻合状态良好,均为靠近固定铰支座一端发生破坏,分析原因是由于固定铰支座横

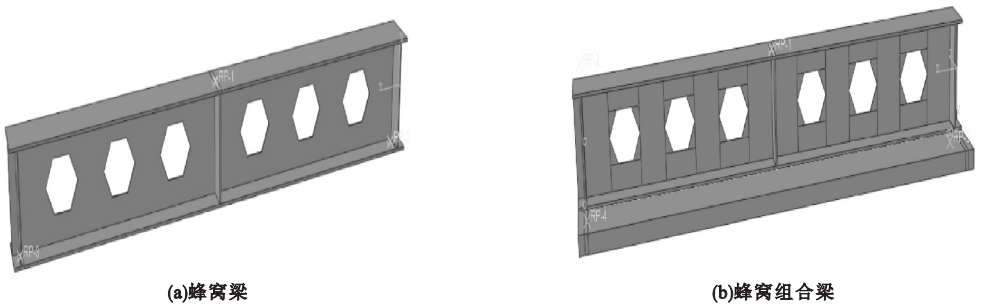


图16 试件有限元模型

Fig. 16 Finite element models of specimen

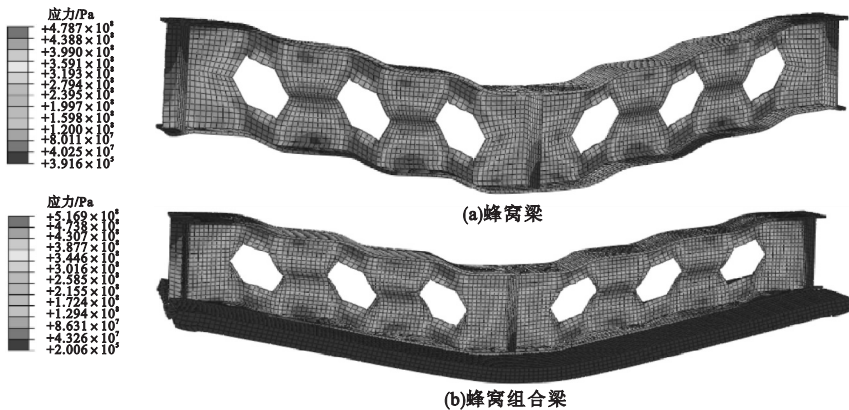


图17 有限元破坏模型图

Fig. 17 Finite element model diagram

向位移的限制,使梁趋向于在固定铰支座一端破坏.同时对比图18中跨中荷载-位移曲线可知,两个曲线虽然不完全重合,但是曲线各点走向是相互接近的,且基本相互吻合.有限元模型得到的FWL-1的极限承载力为743 kN,试验得到的极限承载力为716 kN,误

差为3.60%,有限元FWL-2的极限承载力为796 kN,试验得到的极限承载力为768 kN,误差为3.51%.由于试验存在初始缺陷,模拟的极限荷载存在误差,且都在合理范围内,故依据此模型进行有限元分析有较高可靠性,满足研究要求.

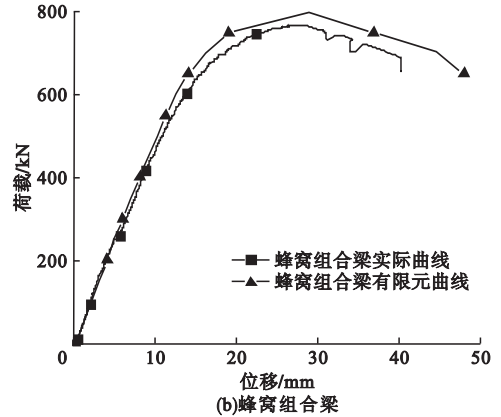
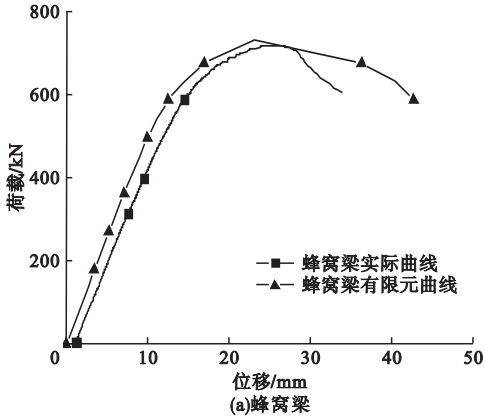


图18 跨中荷载-位移曲线

Fig. 18 Contrast of load displacement curves

4 蜂窝组合梁在负弯矩下性能参数分析

4.1 腹板高厚比与翼缘宽厚比对蜂窝组合梁力学性能影响

对蜂窝梁以及蜂窝组合梁有限元模型,通过改变相应参数,研究在不同腹板高厚比和翼缘宽厚比影响因素下,对蜂窝组合梁力学性能上的影响.结合文献[21]中对于板件宽厚比等级和限制的规定,笔者选取截面宽厚比等级S2,即试件可达全截面塑性作为蜂窝梁和蜂窝组合梁的设置等级.根据计算,Q345钢材腹板高厚比限值为59.4,翼缘宽厚比限值为9.07.在限值内研究混凝土板受拉情况下,腹板高厚比及翼缘宽厚比对于蜂窝组合梁承载力的影响,进而研究蜂窝组合梁在混凝土板受拉情况下的塑性发展能力.

表3、表4为在混凝土板受拉情况下,蜂窝梁与蜂窝组合梁在不同腹板高厚比和不同翼缘宽厚比下承载力对比结果.

表3 不同腹板高厚比蜂窝梁与蜂窝组合梁承载力
Table 3 Bearing capacity of honeycomb beams and honeycomb composite beams with different web thickness ratio

高厚比	蜂窝梁承载力/kN	蜂窝组合梁承载力/kN	提高率/%
59.0	743	796	6.66
42.4	778	834	6.71
47.2	819	880	6.93
42.9	860	926	7.13
39.3	897	967	7.23

表4 不同翼缘宽厚比蜂窝梁与蜂窝组合梁承载力
Table 4 Bearing capacity of honeycomb beams and honeycomb composite beams with different flange width ratio

宽厚比	蜂窝梁承载力/kN	蜂窝组合梁承载力/kN	提高率/%
8.6	743	796	6.66
8.1	766	820	6.59
7.6	790	844	6.39
7.1	817	870	6.12
6.7	837	909	6.06

对比表3、表4可知,在混凝土板受拉情况下,减小腹板高厚比与减小翼缘宽厚比均能提升蜂窝梁与蜂窝组合梁的承载力,且对于蜂窝梁的提升程度略大于蜂窝组合梁,表明在混凝土板受拉情况下,由于混凝土板的限制,将影响蜂窝组合梁的塑性发展能力.由于蜂窝组合梁腹板开孔,破坏因孔角的应力集中导致孔角处钢材屈服,从而导致梁整体屈服破坏,以至于在混凝土板受拉情况下,减小腹板高厚比对塑性发展能力的影响也略大于减小翼缘宽厚比对塑性发展能力的影响.

在混凝土板受拉并满足板件宽厚比限值的情况下,随着腹板高厚比的减小,蜂窝组合

表5 不同纵向配筋率蜂窝组合梁承载力

Table 5 Bearing capacity of honeycomb composite beam with different longitudinal reinforcement ratio

试件编号	配筋率/%	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	极限荷载跨中挠度
FZ11	1.42	132	795	24
FZ12	2.22	152	796	33
FZ13	3.19	185	796	39

从表5可以得出,在负弯矩和剪力共同作用下,板纵向配筋率对于开裂荷载的提升是明显的,跨中挠度也得到了相应的提升,但是对于承载力几乎没有影响.分析原因在于蜂窝组合梁在负弯矩作用下混凝土受拉,板内钢筋与混凝土会共同受拉,增大配筋率可以减小前期加载时混凝土板的变形,导致开裂荷载增加,同时其变形能力由于配筋率的增大也相应提高.

5 结论

(1)考虑蜂窝组合梁的组合效应,在混凝土板受拉情况下,蜂窝组合梁的承载力有小幅的提升,混凝土板对承载力的贡献为7%;设置混凝土板可以明显提高钢-混凝土蜂窝组合梁在负弯矩弯剪作用下的屈服荷载,但是对于试件的极限荷载提高效果不明显.

(2)在混凝土板受拉情况下,减小腹板高厚比和减小翼缘宽厚比均能提升蜂窝组合

梁承载力提高趋势略大于蜂窝梁,减小翼缘宽厚比,蜂窝梁承载力提高趋势略大于蜂窝组合梁.减小腹板高厚比与减小翼缘宽厚比均能提高蜂窝组合梁的承载力,但减小翼缘宽厚比将增大混凝土板对于塑性发展能力的限制.

4.2 钢筋纵向配筋率比对蜂窝组合梁力学性能影响

为了研究板内纵向配筋率对钢-混凝土蜂窝组合梁在负弯矩和剪力共同作用下的影响,模型尺寸与原试件相同,通过改变纵向钢筋直径进而改变板内钢筋纵向配筋率.蜂窝组合梁在不同配筋率情况下开裂荷载与承载力结果见表5.

梁的承载力,但减小翼缘宽厚比将增大混凝土板对于塑性发展能力的限制.

(3)蜂窝组合梁在混凝土板受拉情况下,增大混凝土板纵向钢筋配筋率可以有效提高混凝土板的开裂荷载,并小幅提高蜂窝组合梁的变形能力.

参考文献

- [1] YOUNG K J, SUNG C C, SANG D K. Flexural test of a composite beam using asymmetric steel section with web openings [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 2009, 135(4): 448-458.
- [2] PARK J W, KIM C H, YANG S C. Ultimate strength of ribbed slab composite beams with web opening [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 2003, 219(6): 810-817.
- [3] CHUNG K F, LAWSON R M. Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode4 [J]. Journal of constructional steel research, 2001, 114(3): 135-163.
- [4] ZHAO O, GARDNER L, YOUNG B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending Part 1: Experiments and numerical modelling [J]. Thin-walled structures, 2016,

- 101;231-239.
- [5] SONCK D, BELIS J. Weak-axis flexural buckling of cellular and castellated columns [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 124:91-100.
- [6] WANG P, GUO K, LIU M, et al. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 121:173-184.
- [7] JOHNSON R P, BRADFORD M A. Distortional lateral buckling of unstiffened composite bridge girders [C]. Proceedings of the International conference on instability and plastic collapse of steel structures, London; Granada Publishing Ltd, 1983.
- [8] JOHNSON R P. Distortional lateral buckling of continuous composite beams [C]. Proceedings of the institution of civil engineers, London; Thomas Telford Services Ltd, 1991.
- [9] BRADFORD M A, JOHNSON R P. Inelastic buckling of composite bridge girders near internal supports [C]. Proceedings of the institution of civil engineers, London; Thomas Telford Services Ltd, 1987.
- [10] 廖文远,周东华,李龙起,等.负弯矩作用下腹板开洞组合梁抗剪性能试验研究[J].四川大学学报,2014,46(4):46-52.
(LIAO Wenyuan, ZHOU Donghua, LI Longqi, et al. Experimental study on shear behavior of composite beams with web opening under negative moment [J]. Journal of Sichuan university, 2014, 46(4):46-52.)
- [11] 廖文远,周东华,刘德稳.负弯矩作用下腹板开洞组合梁受力性能试验与有限元分析[J].建筑结构学报,2014,47(4):12-16.
(LIAO Wenyuan, ZHOU Donghua, LIU Dewen. Experimental research and finite element analysis on mechanical behavior of composite beams with web opening under negative moment [J]. Journal of building structures, 2014, 47(4):12-16.)
- [12] 童乐为,刘洋,孙波,等.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(10):1-9.
(TONG Lewei, LIU Yang, SUN Bo, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of steel-concrete composite beams under negative bending [J]. Journal of building structure, 2014, 35(10):1-9.)
- [13] 刘洋,童乐为,孙波,等.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁转动能力计算[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(4):521-528.
(LIU Yang, TONG Lewei, SUN Bo, et al. Rotation capacity calculation for steel-concrete composite beams under negative bending moment [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2015, 43(4):521-528.)
- [14] 马宏伟,刘维亚,林朗,等.负弯矩作用下蜂窝组合梁的承载力[J].华南理工大学学报,2019,47(1):75-84.
(MA Hongwei, LIU Weiya, LIN Lang, et al. Experimental study on the bending capacity of castellated composite beam under negative moment [J]. Journal of south China university of technology, 2019, 47(1):75-84.)
- [15] 彭刚.工字型钢-混凝土连续组合梁受弯性能分析及负弯矩区承载力计算[D].湘潭:湘潭大学,2013.
(PENG Gang. Analysis on flexural behavior of steel-concrete beams and bearing capacity calculation in the negative moment area [D]. Xiangtan: University of Xiangtan, 2013.)
- [16] 黄峥,褚方舟,邱冶,等.考虑剪力和剪力次弯矩影响的蜂窝梁挠度计算式推导与验证[J].钢结构,2018,33(2):8-18.
(HUANG Zheng, CHU Fangzhou, QIU Ye, et al. Derivation and verification of deflection formula of cellular beam considering shear and secondary shear moment [J]. Steel structure, 2018, 33(2):8-18.)
- [17] 王文思.变高度蜂窝梁简化设计方法[J].工业建筑,2018,48(1):168-172.
(WANG Wensi. Simplified calculation model of the castellated beam [J]. Industrial building, 2018, 48(1):168-172.)
- [18] 张艳霞,赵微,李云鹏,等.圆孔型蜂窝梁及其组合梁受力性能研究[J].工业建筑,2019,45(2):136-142.
(ZHANG Yanxia, ZHAO Wei, LI Yunpeng, et al. Research on mechanical behavior of the circular hole cellular beams and steel-concrete composite cellular beam [J]. Industrial buildings, 2019, 45(2):136-142.)
- [19] 贾连光,李庆文,刘永方.蜂窝梁抗剪性能分析与计算[J].工程力学,2012,29:23-30.
(JIA Lianguang, LI Qingwen, LIU Yongfang. Performance analysis and calculation of shear force resistance for cellular beam [J]. Engineering mechanics, 2012, 29:23-30.)
- [20] 贾连光,杜明坎,回峰,等.六边形蜂窝梁与蜂窝组合梁抗剪性能分析[J].工程力学,2016,33:81-87.
(JIA Lianguang, DU Mingkan, HUI Feng, et al. Analysis of shear behavior of hexagon hole cellular beam and cellular composite beam [J]. Engineering mechanics, 2016, 33:81-87.)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)