

内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁受弯性能研究

潘志宏¹, 郑建强¹, 司 启^{1*}, 王云庆², 李 航¹

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100;

2. 广东一浦莱斯精密技术有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要: 基于锁铆连接传力可靠、强度优异的特征, 提出了一种新型的内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁。以底部铆钉间距、截面宽度为变量, 对内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁开展了四点弯曲试验, 考察了该组合梁的破坏特征、承载性能和延性指标, 试验结果表明: 新型组合梁受弯时表现出良好的延性性能; 底部铆钉间距小的组合梁延性较差; 增大截面宽度可提高组合梁的极限承载力。采用ABAQUS有限元软件对该组合梁进行参数分析, 重点探究五大关键参数对其力学性能的影响: 有无混凝土包裹、混凝土强度、顶部铆钉间距、底部钢板厚度及截面高度, 结果表明: 在C型钢腹板处包裹混凝土可有效提高试件的刚度和承载力; 随着混凝土强度、底部钢板厚度、截面高度的增加以及顶部铆钉间距的减小, 组合梁的受弯承载力随之增大。采用全截面塑性准则对组合梁的极限承载力进行计算, 计算值与试验结果的误差在10%以内, 表明全截面塑性准则可以较为准确地反映内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的极限承载力。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 组合梁; 铆接开孔; 受弯承载力; 延性

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0010-12

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240614001

Research on Flexural Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel-Concrete Composite Beams with Built-in Riveted Openings

PAN Zhihong¹, ZHENG Jianqiang¹, SI Qi^{1*}, WANG Yunqing², LI Hang¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. Guangdong Yipules Precision Technology Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

*Corresponding author: siqi@just.edu.cn

Abstract: Based on the advantages of reliable force transfer and high strength of lock riveted joint, a new type of cold-formed thin-walled steel-concrete composite beam with built-in riveted openings is proposed. A four-point bending test was carried out to investigate the failure characteristics, bearing capacity and ductility of the thin-walled steel-concrete composite beams with built-in riveted openings, taking the distance of rivet at the bottom and the width of section as variables. The test results show that the new composite beams exhibit good ductility properties under bending. The ductility of composite beams with small rivet spacing at the bottom is slightly poor. The ultimate bearing capacity of

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 镇江市重点研发计划-产业前瞻与共性关键技术项目(GY2023028), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_2561)

作者简介:

潘志宏(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震、新型工业化(预制装配)结构体系方面的研究。

E-mail: zhhpan@just.edu.cn。

郑建强(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型工业化(预制装配)结构体系方面的研究。

通信作者:

司 启(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail: siqi@just.edu.cn。

composite beams can be improved by increasing the section width. ABAQUS finite element software was used to analyze the effects of concrete encasement, concrete strength, rivet distance at the top, thickness of steel plate at the bottom, and section height on the performance of the composite beams. The results show that the stiffness and bearing capacity of the specimens can be effectively improved by pouring concrete around the C-shaped steel web. With the increase of the concrete strength, the thickness of the bottom steel plate, the height of the section and the decrease of the rivet distance at the top, the flexural capacity of the composite beam increases. The error between the calculated value and the test results is less than 10%, which indicates that the full section plastic criterion can accurately reflect the ultimate bearing capacity of the composite steel and concrete beams with built-in riveted openings.

Keywords: cold-formed thin-walled steel; composite beam; riveting opening; bending capacity; ductility

锁铆连接作为一种机械连接,被广泛应用于汽车、航空领域的薄板连接中,其具有承载力高、刚度大、连接效率高及抗疲劳性能好等特点^[1],锁铆连接的技术原理是通过冲头下压将铆钉刺入需要铆合的板材,铆钉刺入板材的过程中会向四周张开并与板材共同形成内锁机构,使工件不能从铆钉上脱出,从而将板材紧紧连接在一起^[2]。与传统自攻螺钉连接相比,锁铆连接省略了钢板夹紧、钻孔、拧螺钉等步骤,可有效提高冷弯型钢构件的连接效率。为了将锁铆技术引入到冷弯薄壁型钢结构中,YAN等^[3]、谢志强等^[4-6]开展了锁铆连接及自攻螺钉连接的抗剪性能、抗拉性能对比试验,研究表明:锁铆连接结构的抗拉性能指标及抗剪承载力、抗剪刚度、剪切延性均优于自攻螺钉连接结构的对应参数值,且抗剪刚度优势显著,这表明锁铆技术在冷弯薄壁型钢结构中具有广泛的应用前景。

冷弯薄壁型钢结构的构件设计中,冷弯薄壁型钢拼合截面构件应用广泛,拼合截面构件具有承载力高、双轴对称、抗扭性能良好等优点^[7-8],但由于其宽厚比较大,在外部荷载作用下容易发生局部屈曲和畸变屈曲,导致截面无法充分发挥其承载能力^[9-12]。为充分发挥冷弯薄壁型钢拼合截面梁的承载能力,学者们提出在冷弯薄壁型钢拼合截面梁翼缘与腹板间隙填筑混凝土,以防止其过早发生局部屈曲,进而形成部分包裹混凝土组合梁^[13-16]这一构造形式。楚留声等^[17-18]对不同截面高度、翼缘厚度、截面空腹率的部分包覆钢-混凝土钢筋桁架空腹组合梁进行了四点弯曲试验。肖锦等^[19]、李炜等^[20]针对不同剪跨比、翼缘宽厚比、混凝土类型及连杆形式的部分包裹混凝土组合梁进行了静力试验。在冷弯薄壁型钢与混凝土黏结滑移性能方面,杨勇等^[21]开展了开孔钢板连接件的推出试验,基于变形协调条件分析了孔内混凝土榫对单孔连接件极限承载力的贡献。邹杨等^[22]、ZOU等^[23]基于试验研究和数值模拟,提出了考虑纵向钢筋配筋率影响的混凝土榫抗剪承载力折减系数。OGUEJIOFOR等^[24]以孔洞数目、孔洞间距及混凝土强度为参数,建立了考虑孔中混凝土榫抗剪切作用的开孔钢板连接件承载力公式。

综上,为解决传统组合梁中螺栓及自攻螺钉连接工序多、效率低的问题,本文将具有承载力高、刚度大、连接

效率高及抗疲劳性能好等特点的锁铆连接技术应用到组合梁中,并结合混凝土榫的概念,提出一种内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁,该组合梁采用锁铆连接来代替工序多、效率低的自攻螺钉连接;对内置的C型钢腹板处做开孔处理,腹板两侧混凝土通过开孔贯通连接,在孔洞处形成混凝土榫,以提高二者之间的界面抗剪性能。为探究内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的受弯性能,设计了4组新型组合梁试件,并对其开展四点弯曲试验;还采用有限元软件ABAQUS建立了内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的精细化数值模型,并对其开展了参数分析;最后基于全截面塑性准则对内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的承载力进行了理论计算。

1 试验概况

1.1 试件设计

内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的主要组成部分包括:开孔冷弯薄壁C型钢、顶部钢板与底部钢板、铆钉及混凝土。将两个冷弯薄壁C型钢采用锁铆连接组合到一起,且在C型钢的顶部和底部上沿梁跨方向设置了顶部钢板和底部钢板,并在内置的C型钢腹板处做开孔处理,腹板两侧混凝土通过开孔贯通连接,在孔洞处形成混凝土榫,以提高二者之间的界面抗剪性能。组合梁的总长为1500 mm,铆钉型号为EP-K5.3×5-00,冷弯薄壁C型钢选用Q235级钢,型号为C90 mm×30 mm×10 mm×1.5 mm,腹板孔洞直径为50 mm,孔间距为112.5 mm,腹板铆钉间距为112.5 mm,顶部铆钉间距为100 mm,具体尺寸如图1所示。

文献[25]基于轻钢铆接桁架组合楼板的弯曲试验指出:当铆钉间距设置为150 mm时,受弯过程中底部钢板与钢桁架会出现相对滑移,导致铆钉发生剪坏破坏,据此建议进一步减小铆钉间距,以实现更好的组合。本文将组合梁底部铆钉间距、截面宽度作为试验参数,设计了两组共4根内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁试件,其组合梁截面高度均为93 mm。试件B-1(截面宽度100 mm,底部铆钉间距100 mm)作为标准件;为研究底部铆钉间距的影响,设置了底部铆钉间距为

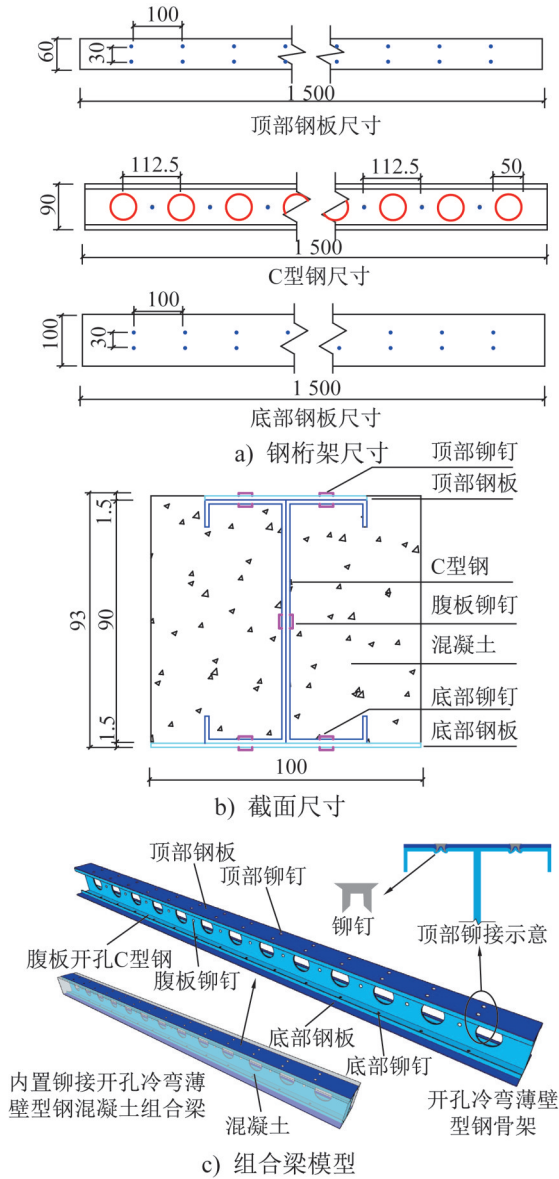


图1 组合梁模型及具体尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Composite beam model and specific dimensions (unit: mm)

75 mm的试件B-2和间距为50 mm的试件B-3;此外,还设置了试件B-4(截面宽度120 mm, 铆钉间距100 mm)以分析截面宽度变化的影响,设计参数如表1所示。

表1 组合梁试件设计参数

Table 1 Design parameters of composite beam specimens

试件编号	组合梁截面 $b \times h/mm$	底部铆钉间距/mm	备注
B-1	100×93	100	标准件
B-2	100×93	75	改变底部铆钉间距
B-3	100×93	50	改变底部铆钉间距
B-4	120×93	100	改变截面宽度

1.2 材料性能

为获取组合梁关键组成材料的力学性能参数,试验采用微机控制电液伺服万能试验机,依据《金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[26]和《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[27]分别开展钢材拉伸试验和混凝土抗压强度试验,试验测得普通混凝土的立方体抗压强度为32.2 MPa,试验中所用钢材力学性能如表2所示,进行材料性能测试的微机控制电液伺服万能试验机如图2所示。

表2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

钢材类别	钢材牌号	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa
钢板	Q235	275.4	397.1
C型钢	Q235	271.5	379.7



图2 微机控制电液伺服万能试验机

Fig. 2 Microcomputer controlled electro-hydraulic servo universal testing machine

1.3 试验装置及加载方案

试验加载装置如图3所示,在组合梁侧面涂刷白漆并画上边长为30 mm的方格,以便观察荷载作用下裂缝的开展情况。加载过程采用位移加载控制模式,加载速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当出现下列某一情况时可认为试件发生破坏:(1) 受压区混凝土出现压溃现象;(2) 荷载下降到极限荷载的85%。

位移计、应变片布置及编号如图4所示,在梁侧面位置处布置混凝土应变片,用于测试混凝土沿梁高的应变发展情况;下部受拉钢板的跨中和加载点处布置应变片D1~D5用于测量钢板应变,得到组合梁的屈服荷载;跨中冷弯薄壁型钢骨架的上翼缘内侧、腹板孔洞上方及下方布置应变片N1~N3用于测量内置冷弯薄壁型钢的应

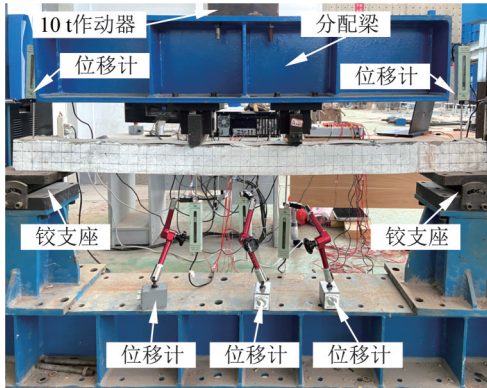


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading setup

变。跨中、加载点及支座上方布置位移计,以便测得支座位移、加载点挠度和跨中挠度。

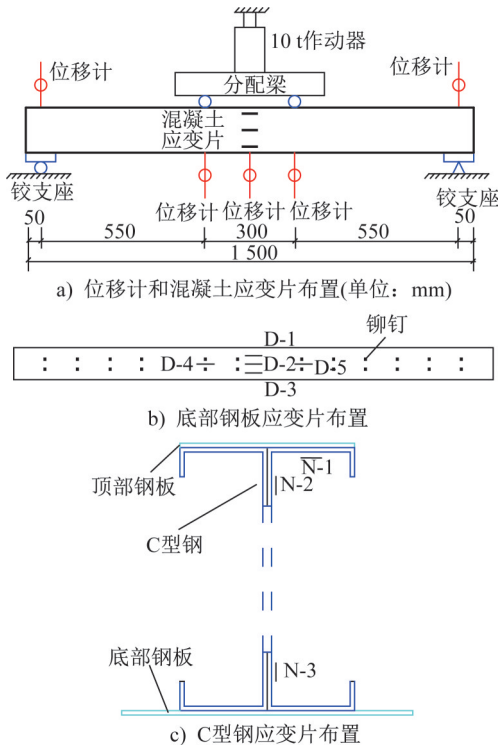


图 4 位移计、应变测点布置

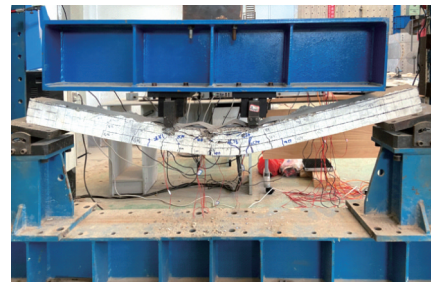
Fig. 4 Arrangement of displacement meters and strain measuring points

2 试验结果及分析

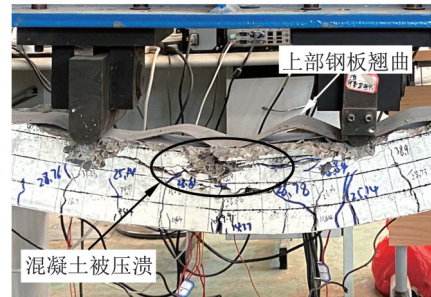
2.1 试验现象及破坏形态

试验过程中所有试件的破坏形态大致相同,均发生延性破坏。以试件 B-1 为例,加载初期试件处于弹性阶段,无明显裂缝产生,组合梁工作性能完好;当荷载加载至 4.5 kN 时,组合梁的正反面纯弯段开始出现细微裂缝,组合梁开始进入带裂缝工作阶段;当荷载加载至 10.3 kN 时,组合梁上部的钢板开始发生翘曲;当荷载加载至 19.16 kN 时,组合梁不再产生新裂缝,但已出现的裂

缝开始缓慢变宽,随后,通过观察发现底部钢板达到屈服应变,组合梁进入屈服阶段。随着荷载逐渐增加至接近极限荷载 29.74 kN 时,组合梁上部的钢板发生较大翘曲,同时上部受压区混凝土开始压溃,此时组合梁跨中挠度达到 59.2 mm ($l_0/24$, l_0 为组合梁净跨),考虑到组合梁采用 C 型钢内置于混凝土的构造特征,整体延性较好,因此继续施加荷载时,试件承载力不再有明显提高,且组合梁弯剪段出现少量斜裂缝,最终试件 B-1 的承载力下降至 22.50 kN,约为极限承载力的 75%,由此试验加载宣告结束,试件 B-1 的最终破坏形态如图 5 所示。



a) 试件整体破坏形态



b) 试件跨中纯弯段破坏形态

图 5 试件 B-1 破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimen B-1

为观察试件跨中位置处内部型钢的破坏情况,将试件 B-2、B-3 跨中位置凿开,发现试件 B-2 内部 C 型钢的上翼缘和顶部钢板发生翘曲,顶部和底部钢板与 C 型钢铆接牢靠,未出现铆钉破坏;试件 B-3 内部 C 型钢的下翼缘开裂,破坏情况如图 6 所示。

由图 6 可以看出:由于铆钉间距过小,内置 C 型钢下翼缘处分布着大量铆钉,当组合梁承受荷载时,这些密集的铆钉会使 C 型钢在铆钉连接处产生较大局部应力,进而引发局部裂纹,随着裂纹持续扩展,最终导致 C 型钢发生破坏。

2.2 荷载-跨中挠度曲线

各组合梁试件的荷载-跨中挠度曲线如图 7 所示,整体而言,组合梁的受力大致呈现出两个阶段:(1) 弹性工作阶段:在试件受拉区混凝土开裂前,组合梁处于弹性工作阶段,此时材料的应力、应变较小,初始刚度由混凝土和内置型钢共同提供,刚度较高;当荷载增加至 $0.15F_{u0}$

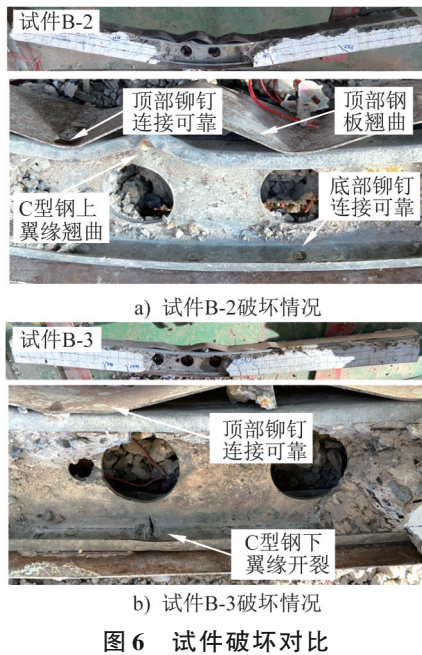


图6 试件破坏对比

Fig. 6 Failure comparison of specimens

(F_{u0} 为试验所得极限承载力)左右,受拉区混凝土开始出现裂缝,开裂处混凝土所承受的拉应力转至钢材,进而导致梁的刚度下降。(2)非线性工作阶段:随着荷载逐步增加,底部钢板率先开始屈服,试件随之进入非线性阶段;在此阶段内,试件挠度快速增大,中和轴同时持续上移,随后试件达到极限承载力,此时荷载停止增长,而挠度仍保持持续增加的趋势。由图7可以看出:4根试件的非线性工作阶段均表现出良好的延性。

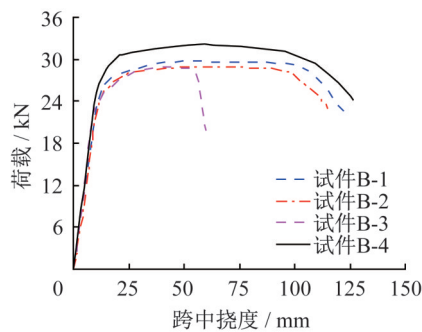


图7 试件荷载-跨中挠度曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-midspan deflection curves of specimens

对比研究试件B-1、B-2、B-3底部铆钉间距对试件受弯性能的影响,可见底部铆钉间距对试件的抗弯刚度和极限承载力影响不大,但随着底部铆钉间距的减小,试件的延性变差。

对比研究试件B-1、B-4截面宽度对试件受弯性能的影响,可以发现增大试件的截面宽度可以提高其极限承载力,但对其刚度和延性的影响均较小。

2.3 应变分析

将试件B-1测得的应变进行均值处理,得到其跨中截面应变沿高度方向的分布情况,如图8所示。由图8可以看出:试件在达到屈服承载力之前,即试件处在弹性阶段时,截面应变沿高度方向呈直线的趋势变化,符合平截面假定;随着荷载的逐渐增加,试件的受拉区混凝土开裂,截面的中和轴开始上移。

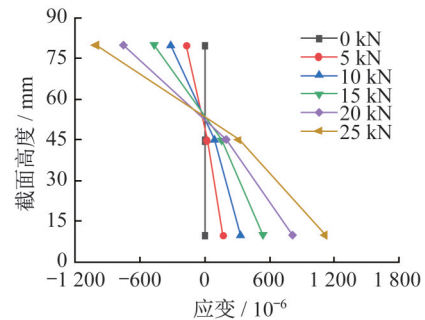


图8 试件B-1跨中截面应变沿高度分布情况

Fig. 8 Distribution of specimen B-1 mid-span cross section strain along height

将每个试验组所测得的荷载和应变进行均值处理,绘制各试件钢材不同测点位置的荷载-应变曲线如图9所示。由图9可以看出:随着荷载的增加,钢材的应变也随之增大,位于腹板孔洞上方型钢的测点N1、N2均为负值,位于腹板孔洞下方型钢的测点N3、底部钢板D2、D5测点均为正值,且在加载后期均达到屈服。对比试件B-1、B-2、B-3的底部钢板D2、D5测点加载后期的应变,可观察到随着底部铆钉间距的减小,应变随荷载的变化速率越快。

由图6与图9可以看出:铆钉在连接区域中的分布间距影响着荷载的传递,铆钉间距过小使得铆钉分布密集,进而导致荷载主要集中在铆钉周围,形成局部应力集中现象,从而使C型钢在铆钉连接区域的变形明显,引发不均匀变形。在这种高应力区域,C型钢容易产生局部裂纹,随着裂纹的扩展会导致材料发生破坏,从而使试件B-3的变形能力明显小于其他试件的变形能力。

2.4 延性分析

各试件的屈服位移 Δ_y 采用文献[28]中的方法进行计算,结果如表3所示。极限位移 Δ_u 取试件破坏时对应的位移,延性系数 μ 由极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 之比确定。

试件B-1、B-2、B-3、B-4的延性系数如表4所示,其延性系数处于4.51~7.99之间,均满足《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[29]中延性系数大于3的要求,表明组合梁具有良好的变形能力。

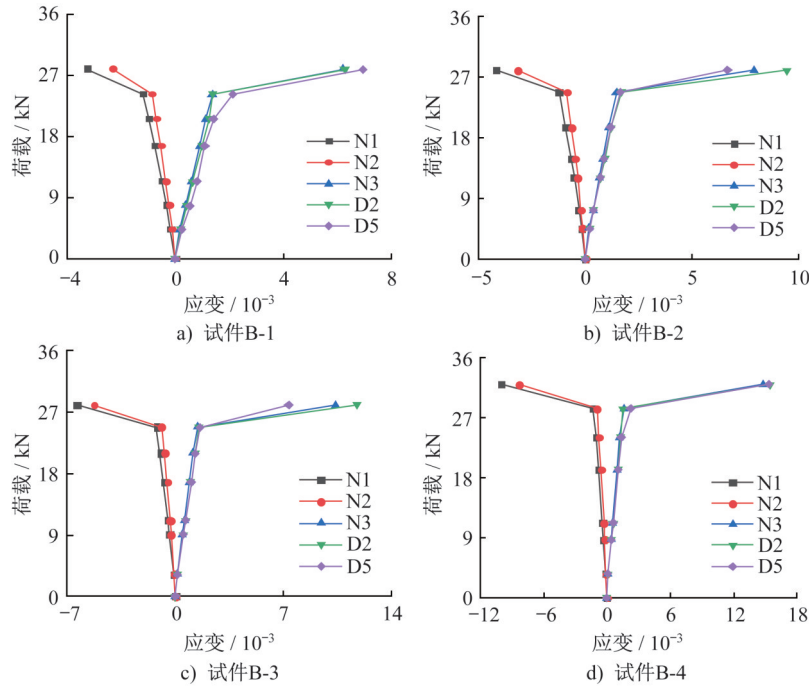


图 9 钢材荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of steel

表 3 各试件屈服位移

Table 3 Yield displacements of specimens mm

试件	几何图形法	等效弹塑性能量法	R.Park法	平均值
B-1	17.75	13.00	16.30	15.68
B-2	16.27	13.16	16.49	15.30
B-3	12.80	11.07	15.00	12.96
B-4	15.41	12.62	16.40	14.81

表 4 各试件延性系数

Table 4 Ductility coefficients of specimens

试件	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
B-1	26.84	15.68	29.74	121.92	7.49
B-2	25.81	15.30	28.98	115.03	7.32
B-3	24.73	12.95	28.97	59.83	4.51
B-4	28.41	14.81	32.22	126.52	7.99

3 有限元分析

3.1 材料本构模型

在 ABAQUS 有限元分析软件中,材料本构模型定义了材料在不同应力状态下的力学行为,为获得准确的分析结果,本文的混凝土本构模型采用 ABAQUS 材料库中自带的混凝土损伤塑性模型 (concrete damage plasticity model),其应力-应变关系取《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[29]中建议的混凝土单轴受压、受拉应力-应

变关系曲线,如图 10 所示,混凝土塑性损伤模型参数^[30]建议取值如表 5 所示。

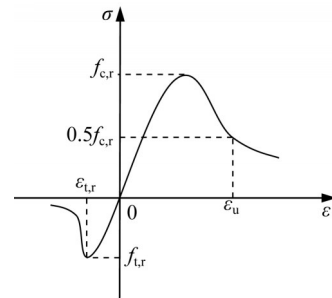


图 10 混凝土单轴应力-应变曲线

Fig. 10 Uniaxial stress-strain curve of concrete

注: $f_{t,r}$ 为单轴抗拉强度代表值; $\epsilon_{t,r}$ 为相应的混凝土峰值拉应变; $f_{c,r}$ 为单轴抗压强度代表值; ϵ_u 为应力应变曲线下降段应力等于 $0.5f_{c,r}$ 时的混凝土压应变。

表 5 混凝土塑性损伤模型参数取值

Table 5 Parameter values of concrete plastic damage model

膨胀角/ $^\circ$	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.667	0.001

注: f_{b0}/f_{c0} 为双轴受压与单轴受压极限强度之比; K 为受拉子午线与受压子午线常应力的比值。

钢材的本构模型均采用双折线强化本构模型,如图 11 所示,其中,屈服强度取试验值,弹性模量 E_s 取 2×10^5 MPa。

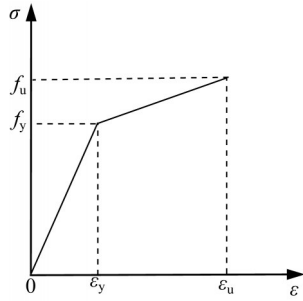


图 11 钢材应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of steel

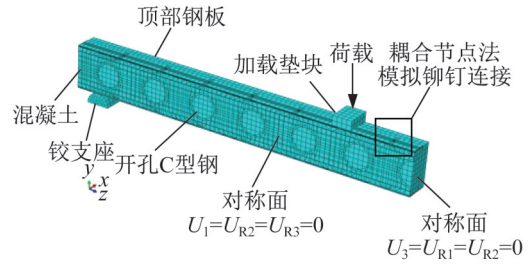


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

3.2 有限元模型建立

对钢板、C型钢和混凝土建立有限元模型,其各部件均采用八节点六面体线性减缩积分单元C3D8R模拟,网格尺寸为10 mm,鉴于试件和荷载均呈对称性,为减少运算量、加快计算时间,采用ABAQUS软件建立1/4模型,如图12所示。由于试验过程中铆钉均未发生破坏,表明该连接可靠,为减少运算量,采用耦合节点法^[31-32]来简化铆钉,具体方法为:首先在铆钉处挖孔,将孔周围的截面采用连续分布耦合到孔的中心,再创建运动耦合来连接两个孔的中心,如图13所示。

在试验过程中,C型钢、底部钢板与混凝土之间未发生相对滑移,故在有限元模型中开孔C型钢与混凝土之间以及底部钢板与混凝土之间均采用绑定约束,不考虑二者之间的相对滑移。模型支座的边界条件设定为简支,对称面边界条件如图12所示。

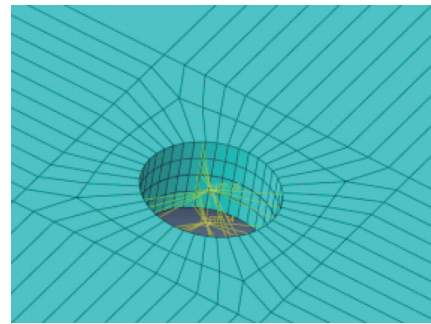


图 13 耦合节点法

Fig. 13 Coupling node method

3.3 模型验证

根据上述的建模方法,对4根组合梁试件进行有限元模型分析,有限元模拟与试验的荷载-跨中挠度曲线对比如图14所示,有限元模拟与试验的极限承载力对比如表6所示。

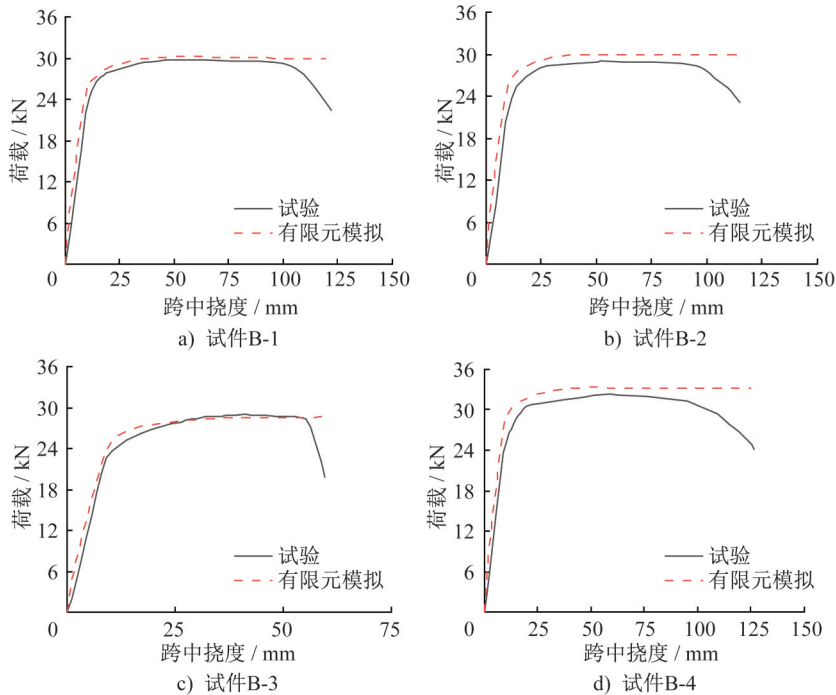


图 14 有限元模拟与试验的荷载-跨中挠度曲线对比

Fig. 14 Comparison of load-midspan deflection curves between finite element simulation and test

表 6 有限元模拟与试验的屈服承载力和极限承载力对比
Table 6 Comparison of yield bearing capacity and ultimate bearing capacity between finite element simulation and test

试件编号	F_{y1}/kN	F_{y0}/kN	F_{u1}/kN	F_{u0}/kN	F_{y1}/F_{y0}	F_{u1}/F_{u0}
B-1	26.46	26.84	30.20	29.74	0.99	1.02
B-2	26.32	25.81	29.96	28.98	1.02	1.03
B-3	25.25	24.73	28.62	28.97	1.02	0.99
B-4	29.44	28.41	33.26	32.22	1.04	1.03

由图 14 可以看出:模拟得到的前期刚度相较于试验刚度偏大,其原因在于有限元模型中的接触均处于理想状态;但随着荷载的增加,试件的试验结果和有限元模拟的荷载-位移曲线基本吻合,且趋于平缓。将有限元模拟所得的屈服承载力 F_{y1} 、极限承载力 F_{u1} 与试验所得的屈服承载力 F_{y0} 、极限承载力 F_{u0} 进行对比,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出:试验和有限元模拟的屈服承载力和极限承载力误差均在 10% 以内;表明通过上述方法建立的有限元模型能较好地模拟内置开孔冷弯薄壁型钢铆接桁架组合梁的受弯性能。

试验与有限元模拟所得的破坏形态与试验结果对比如图 15 所示。由裂缝开展情况的对比可以看出:试件的裂缝大部分集中于跨中区域,以竖直形态为主、均从底部起始,贯穿受拉区向受压区延伸,其余部分裂缝沿梁体全长均匀分布;由混凝土受拉损伤系数可以看出,混凝土受拉区全部达到抗拉强度,进而发生损伤失效,此刻拉力由内部型钢承担;由型钢应力分布情况可以看出,当试件达到极限承载力时,腹板孔洞上方的型钢区域受压并达到屈服状态,孔洞下方的型钢区域受拉并同样达到屈服状态,同时,型钢的应力由梁中心向两端逐渐减小。可见,该有限元模型的计算结果与试验结果在混凝土开裂位置、型钢屈服位置的表现吻合度较高,表明有限元模型可较为准确地反映出试件的破坏形态与应力分布特征。

3.4 参数分析

考虑混凝土强度、顶部铆钉间距、底部钢板厚度、截面高度 4 种参数对组合梁受弯性能的影响,对应编号分别为 A 组、B 组、C 组、D 组(分别表示混凝土强度、顶部铆钉间距、底部钢板厚度、截面高度这 4 种参数)。为进一步研究包裹混凝土对组合梁承载力的影响,设置纯冷弯薄壁型钢组(无混凝土组),并以不同混凝土强度为变量开展对比分析;当顶部铆钉间距为 100 mm 时,顶部钢板发生翘曲,为改善这一现象,故进一步缩小其间距;保持内部冷弯薄壁 C 型钢尺寸不变,加大底部钢板厚度;采用高度分别为 90 mm、120 mm、150 mm 的 C 型钢,研究不同截面高度下组合梁的受弯性能,主要参数变量如表 7 所示。

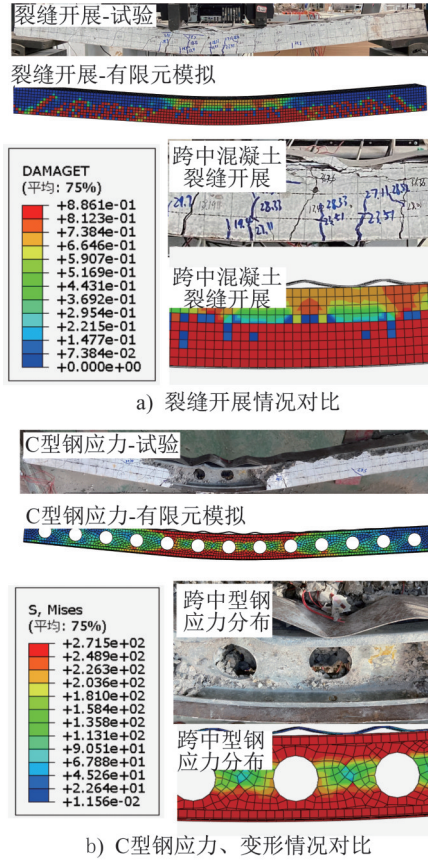


图 15 有限元模拟与试验的破坏形态对比(单位:MPa)
Fig. 15 Comparison of failure modes between finite element simulation and test (unit: MPa)

表 7 组合梁主要参数分析

Table 7 Analysis of main parameters of composite beams

模型	混凝土强度等级	顶部铆钉间距/mm	底部钢板厚度/mm	截面高度/mm
A1	无混凝土			
A2	C30	100	1.5	93
A3	C40			
A4	C50			
B1		无顶部钢板		
B2	C30	100	1.5	93
B3		75		
B4		50		
C1			1.5	
C2	C30	100	3.0	93
C3			4.5	
D1				93
D2	C30	100	1.5	123
D3				153

在有限元模型验证时,通过有限元模拟与试验的荷载-跨中挠度曲线对比可以看出:当组合梁挠度达到75 mm后,其承载力趋于平缓,为节省计算资源、缩短计

算耗时,因此在变参数分析中,所有模型的挠度均控制在75 mm,组合梁荷载-跨中挠度数值模拟曲线对比如图16所示。

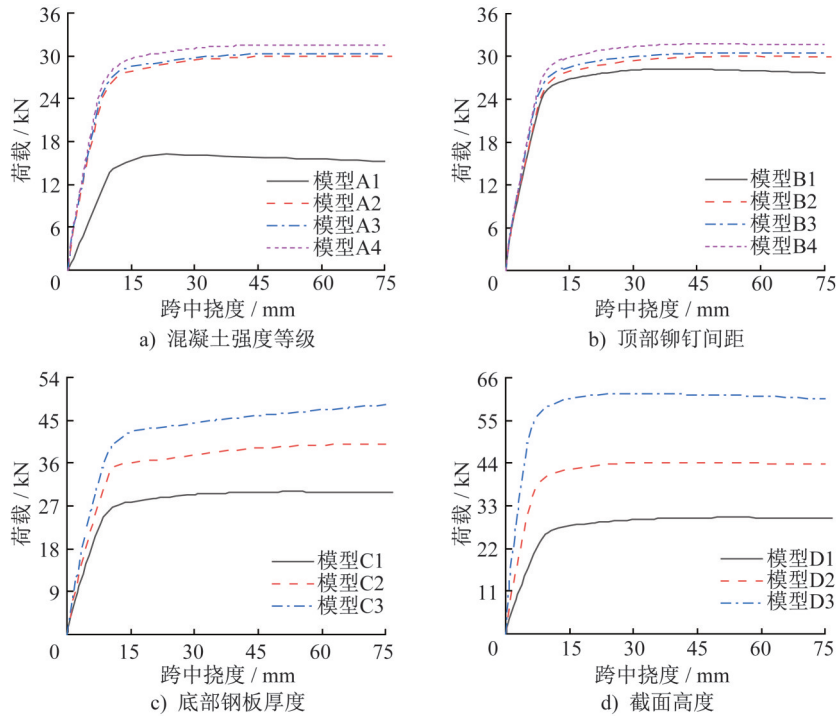


图16 各模型荷载-跨中挠度数值模拟曲线对比

Fig. 16 Load-midspan deflection curves by numerical simulation of models

由图16a)可以看出:C型钢腹板处有混凝土包裹的组合梁其屈服承载力、极限承载力明显高于无混凝土包裹的组合梁对应值,且刚度有明显提高;提高混凝土强度等级,可增加组合梁的刚度、屈服承载力和极限承载力;由图16b)、c)、d)可以看出:通过顶部铆接钢板,并调整关键参数(减小顶部铆钉间距、增加底部钢板厚度与截面高度),试件的刚度、屈服承载力以及极限承载力均随之提升,其中,截面高度的影响最为显著,底部钢板厚度的影响次之,顶部铆钉间距的影响最小。

有混凝土包裹和无混凝土包裹的组合梁其变形对比如图17所示。从图中可以看出:无混凝土包裹的C型钢上部受压翼缘发生了局部屈曲,钢材未能充分发挥其性能;有混凝土包裹的C型钢在荷载作用下,被混凝土牢牢包裹,未发生屈曲;但由于顶部钢板与C型钢上翼缘采用铆接的形式连接,在荷载作用下,顶部钢板均发生了翘曲,为避免此现象发生,可通过减小上部铆钉间距的方式来减小其翘曲,进而提高组合梁的承载力。

4 承载力计算

采用全截面塑性准则来计算内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁极限承载力 M_u 。假定受压区型钢和受拉区型钢均到达屈服,不考虑混凝土受拉,且受压区混

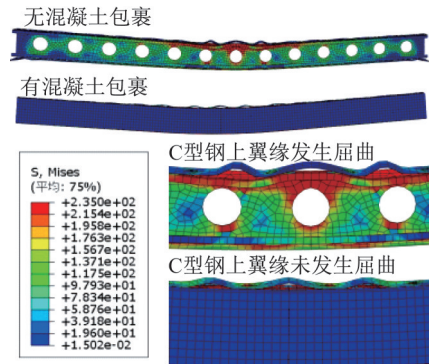


图17 组合梁变形后应力云图对比(单位:MPa)

Fig. 17 Comparison of stress contours after deformation of composite beams (unit:MPa)

凝土达到其极限抗压强度;认为腹板孔洞上方型钢受压,腹板孔洞下方型钢受拉,不考虑其他腹板处型钢对组合梁受弯承载力的贡献。内部C型钢拉压分区如图18所示,组合梁截面参数和应力分布如图19所示,计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$M_u = \alpha_1 f_c b x h_c + f'_{y2} A'_{s2} h_s \quad (1)$$

$$\alpha_1 f_c b x + f'_{y2} A'_{s2} = f_{y1} A_{s1} + f_{y2} A_{s2} \quad (2)$$

式中: f_{y1} 、 A_{s1} 分别为底部钢板屈服强度、截面面积; f'_{y2} 、 A'_{s2} 和 f_{y2} 、 A_{s2} 分别为腹板孔洞上方C型钢屈服强度、受压区

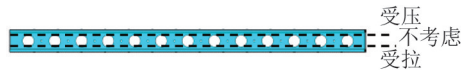


图 18 C 型钢拉压分区

Fig. 18 Tension and compression zone of C section steel

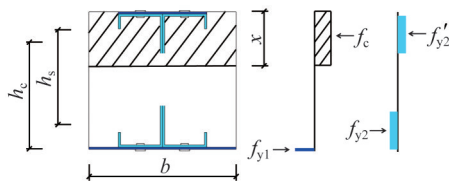


图 19 组合梁截面参数和应力分布

Fig. 19 Section parameters and stress distribution of composite beam

面积和腹板孔洞下方 C 型钢屈服强度、受拉区面积; h_c 为受压区混凝土形心到底部钢板形心的距离; h_s 为受压区 C 型钢形心到受拉区 C 型钢形心的距离; α_1 为受压区混凝土矩形应力图的应力值与混凝土轴心抗压强度的比值; f_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为组合梁截面宽度; x 为受压区混凝土高度。

计算结果与试验结果对比如表 8 所示, 由于只考虑腹板孔洞上方部分型钢的受压, 腹板下方部分型钢的受拉, 未考虑其他腹板对试件受弯承载力的贡献, 所以计算值偏于安全。总体上, 对比计算所得试件受弯承载力与试验结果的差值基本在 10% 左右, 表明理论计算结果与试验结果吻合较好。

表 8 试件受弯承载力计算值与试验值对比

Table 8 Comparison of the bending capacity of specimens between calculated and test results

试件编号	计算值 $M_{ul}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	试验值 $M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M_{ul}/M_u
B-1	7.18	8.18	0.88
B-2	7.18	7.97	0.90
B-3	7.18	7.96	0.90
B-4	7.86	8.86	0.89

5 结论

本文提出了一种新型内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁, 对其进行了四点弯曲试验, 采用 ABAQUS 有限元软件对其进行了数值模拟与参数分析, 并对该新型组合梁的受弯承载力进行了理论计算, 具体结论如下:

(1) 试验中所有试件均未发生铆钉的连接破坏, 表明铆钉间距为 100 mm 及以下时可保证冷弯薄壁 C 型钢与底部钢板的连接。

(2) 组合梁具有很好的延性, 其延性系数位于 4.51~7.99 之间, 铆钉间距对试件的延性存在影响, 底部铆钉间

距小的, 其延性稍差, 但均满足结构抗震设计规范延性系数大于 3 的要求。

(3) 所有试件的破坏形态大致相同, 皆因材料强度达到极限而失效, 减小底部铆钉间距对其承载力、刚度的影响较小; 增大试件的截面宽度可提高组合梁的屈服承载力和极限承载力。

(4) 组合梁的数值模拟与参数分析的结果表明: C 型钢腹板处包裹混凝土能有效提高试件的刚度和承载力, 减小顶部铆钉间距或增大混凝土强度、底部钢板厚度和截面高度可增加组合梁的抗弯刚度、屈服承载力和极限承载力。

(5) 采用全截面塑性准则所得到的极限承载力计算值与试验值的差值在 10% 左右, 说明基于全截面塑性准则计算内置铆接开孔冷弯薄壁型钢混凝土组合梁的极限承载力具有较好的精度。

参考文献:

- [1] 宋林琳, 闫维明, 张学明, 等. 装配式轻钢结构锁铆连接适用性分析[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 33-41. DOI: 10.11936/bjtxb2018080009.
- [2] 邢保英. 自冲铆连接机理及力学性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [3] XING Baoying. Study on mechanism and mechanical properties of self-piercing riveting connection [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] YAN W M, XIE Z Q, YU C, et al. Experimental investigation and design method for the shear strength of self-piercing rivet connections in thin-walled steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 231-240. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.02.022.
- [5] 谢志强, 闫维明, 慕婷婷, 等. 锁铆连接在模块化装配式冷弯薄壁型钢结构中应用可行性研究[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(1): 104-111. DOI: 10.11936/bjtxb2017030028.
- [6] XIE Zhiqiang, YAN Weiming, MU Tingting, et al. Feasibility research on self-piercing rivet connections used in structure prefabricated modularly with cold-formed thin-walled steel [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(1): 104-111. DOI: 10.11936/bjtxb2017030028. (in Chinese)
- [7] 谢志强, 张爱林, 闫维明, 等. 薄壁钢板自冲铆接受剪性能及承载力计算方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(6): 234-245. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.12.0793.
- [8] XIE Zhiqiang, ZHANG Ailin, YAN Weiming, et al. The shear behavior and calculation method of self-piercing riveted connections on thin-walled steel sheets [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(6): 234-245. DOI: 10.6052/j.issn.1000-

- 4750.2019.12.0793.(in Chinese)
- [6] 谢志强,张爱林,闫维明,等.冷弯薄壁型钢自冲铆接受拉性能及设计方法研究[J].建筑结构学报,2020,41(10):150-159.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0709.
- XIE Zhiqiang, ZHANG Ailin, YAN Weiming, et al. Study on tension properties and design method for self-pierce riveting in cold-formed thin-walled steel[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(10):150-159. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0709. (in Chinese)
- [7] 温会平,刘艳芝,邓飞云,等.冷弯薄壁型钢四肢拼合梁柱节点抗弯性能研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(4):1445-1455. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20220771.
- WEN Huiping, LIU Yanzhi, DENG Feiyun, et al. Flexural behavior of cold-formed thin-walled steel quadruple-limb built-up beam-column connections[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4):1445-1455. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20220771. (in Chinese)
- [8] 王卫永,杨竞杰,徐磊,等.冷弯薄壁四肢拼合箱形截面柱抗火性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(8):133-143. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0280.
- WANG Weiyong, YANG Jingjie, XU Lei, et al. Study on fire behavior of cold-formed steel quadruple-limb built-up box-section column[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8):133-143. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0280. (in Chinese)
- [9] 周绪红,管宇,高婷婷,等.双肢拼合冷弯薄壁型钢工字形截面梁受弯性能研究[J].土木工程学报,2016,49(8):16-27, 52. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2016.08.002.
- ZHOU Xuhong, GUAN Yu, GAO Tingting, et al. Study on flexural capacity of cold-formed steel double-limb built-up I-shape beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8):16-27, 52. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2016.08.002. (in Chinese)
- [10] 石宇,周绪红,苑小丽,等.冷弯薄壁卷边槽钢组合工字梁极限承载力计算的有效宽度法[J].土木工程学报,2011,44(6):8-17. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2011.06.009.
- SHI Yu, ZHOU Xuhong, YUAN Xiaoli, et al. Effective width method for load-carrying capacity of cold-formed steel composite I-beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6):8-17. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2011.06.009. (in Chinese)
- [11] 石宇,周绪红,聂少锋,等.冷弯薄壁卷边槽钢组合工字梁极限承载力计算的折减强度法[J].工程力学,2011,28(9):174-182. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2011.06.009.
- SHI Yu, ZHOU Xuhong, NIE Shaofeng, et al. Strength-reduction method for load-carrying capacity of cold-formed steel composite I-beam[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9):174-182. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2011.06.009. (in Chinese)
- [12] DAR M A, SUBRAMANIAN N, DAR A R, et al. Behaviour of partly stiffened cold-formed steel built-up beams: Experimental investigation and numerical validation[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(1):172-186. DOI: 10.1177/1369433218782767.
- [13] 胡夏闽,江雨辰,施悦,等.部分外包混凝土筒支组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(9):37-44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.09.005.
- HU Xiamin, JIANG Yuchen, SHI Yue, et al. Experimental study on flexural behavior of simply supported partially concrete encased composite beams[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9):37-44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.09.005. (in Chinese)
- [14] 伍凯,林诗琪,毛范桑,等.单向往复荷载作用下装配式部分包裹混凝土组合梁受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(8):31-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0201.
- WU Kai, LIN Shiqi, MAO Fanshen, et al. Experimental study on mechanical behavior of fabricated partially encased composite beams under unidirectional cyclic load[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(8):31-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0201. (in Chinese)
- [15] AHN J K, LEE C H. Fire behavior and resistance of partially encased and slim-floor composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 276-285. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.018.
- [16] AHMAD S, MASRI A, ABOU SALEH Z. Analytical and experimental investigation on the flexural behavior of partially encased composite beams[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(3):1693-1712. DOI: 10.1016/j.aej.2017.03.035.
- [17] 楚留声,李烨,李杰,等.部分包覆钢-混凝土钢筋桁架空腹组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2024,45(2):107-115. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0450.
- CHU Liusheng, LI Ye, LI Jie, et al. Experimental study on bending capacity of partially-encased steel-concrete composite reinforcement truss open-web beams[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(2):107-115. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0450. (in Chinese)
- [18] 楚留声,王帅起,李杰,等.部分包覆钢-混凝土组合空腹梁受弯性能试验研究[J].建筑结构,2023,53(14):69-74, 102. DOI: 10.19701/j.jzjg.20210909.
- CHU Liusheng, WANG Shuaiqi, LI Jie, et al. Experimental research on flexural performance of open-web partially-encased composite beam[J]. Building Structure, 2023, 53(14):69-74, 102. DOI: 10.19701/j.jzjg.20210909. (in Chinese)
- [19] 肖锦,李杰,陈以一.T形截面部分包覆钢-混凝土组合梁抗弯刚度及承载力试验研究[J].结构工程师,2020,36(2):149-156. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.02.020.
- XIAO Jin, LI Jie, CHEN Yiyi. Experimental study on flexural rigidity and bearing capacity of T-section partially encased composite beams[J]. Structural Engineers, 2020, 36(2):149-156. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.02.020. (in Chinese)
- [20] 李炜,陈以一.部分包覆钢-混凝土组合梁受弯承载力及变形能力试验研究[J].建筑结构,2021,51(7):30-37. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.07.005.
- LI Wei, CHEN Yiyi. Experimental study on bending capacity and ductility of partially-encased composite steel and concrete beams[J]. Building Structure, 2021, 51(7):30-37. DOI: 10.

- 19701/j.jzjg.2021.07.005.(in Chinese)
- [21] 杨勇,陈阳.PBL剪力连接件抗剪承载力试验研究[J].工程力学,2018,35(9):89-96.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2017.05.0365.
YANG Yong, CHEN Yang.Experimental study on the shear capacity of pbl shear connectors[J].Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 89-96.DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.05.0365.(in Chinese)
- [22] 邹杨,彭洪波,张中亚,等.负弯矩区PBL剪力连接件剪切性能试验研究[J].土木工程学报,2023,56(10):52-66.DOI:10.15951/j.tmgcxb.22050488.
ZOU Yang, PENG Hongbo, ZHANG Zhongya, et al. Experimental study on shear performance of PBL shear connector in negative moment region[J].China Civil Engineering Journal,2023,56(10):52-66.DOI:10.15951/j.tmgcxb.22050488.(in Chinese)
- [23] ZOU Y, DI J, ZHOU J T, et al. Shear behavior of perfobond connectors in the steel-concrete joints of hybrid bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 106217. DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106217.
- [24] OGUEJIOFOR E C, HOSAIN M U. A parametric study of perfobond rib shear connectors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(4): 614-625. DOI: 10.1139/194-063.
- [25] 莫禹凡,潘志宏.新型轻钢铆接桁架组合楼板试验研究[J].科学技术与工程,2023,23(20):8763-8770.DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2023.20.033.
MO Yufan, PAN Zhihong. Experimental research on a new type of light steel riveted truss composite slabs [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8763-8770. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.20.033.(in Chinese)
- [26] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- [27] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.(in Chinese)
- [28] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3):36-46.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.(in Chinese)
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.(in Chinese)
- [30] 王琼与,桑登峰,娄学谦,等.混凝土损伤塑性模型参数选取及应用[J].水运工程,2023(6):26-31,50.DOI:10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20230605.035.
WANG Qiongyu, SANG Dengfeng, LOU Xueqian, et al. Parameter selection and application of concrete damage plasticity model[J].Port & Waterway Engineering, 2023(6): 26-31, 50. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20230605.035.(in Chinese)
- [31] 冯伟干,张建华,朱元夫.圆筒形铆接结构中铆钉的数值模拟[J].强度与环境,2010,37(1):30-34.DOI:10.3969/j.issn.1006-3919.2010.01.005.
FENG Weigan, ZHANG Jianhua, ZHU Yuanfu. The numerical simulation of rivet in riveted joint cylindrical structure [J]. Structure & Environment Engineering, 2010, 37(1): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2010.01.005.(in Chinese)
- [32] 谢志强,石磊磊,张爱林,等.冷弯型钢锁铆连接抗剪性能非线性有限元简化分析方法研究[J].工业建筑,2022,52(5):98-105,146.DOI:10.13204/j.gyjzg22011912.
XIE Zhiqiang, SHI Leilei, ZHANG Ailin, et al. Research on simplified analysis methods of nonlinear finite element for shear performance of self-piercing riveting connections between cold-formed steel sheets[J].Industrial Construction, 2022, 52(5): 98-105, 146. DOI: 10.13204/j.gyjzg22011912.(in Chinese)