

秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁抗弯性能有限元分析

胡宜, 刘靖依, 郝向炜, 杨玉莹, 孟作权, 杨海旭*

(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 以冷弯薄壁型钢和秸秆板为主要材料, 采用秸秆板包裹冷弯薄壁型钢的连接方式构建新型箱形截面秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁。运用有限元软件 ABAQUS 建立 7 组共 25 根组合梁模型, 分析连接方式、秸秆板厚度、型钢厚度、型钢高度、腹板螺栓排数、腹板螺栓间距和梁跨度对组合梁抗弯性能的影响, 探讨组合梁在抗弯破坏时的破坏模式及破坏机理。结果表明, 在有限元模拟加载过程中, 秸秆板下翼缘先于上翼缘达到抗拉强度, 导致组合梁跨中区域出现弯曲裂缝并发生弯曲破坏, 下翼缘秸秆板在荷载增大过程中发生局部压弯与顺纹剪切破坏。各参数对组合梁抗弯性能均有不同程度影响, 其中秸秆板厚度、型钢厚度、型钢高度对抗弯性能的影响最为显著。综合考虑抗弯承载力高及挠度变形小的情况下, 得到组合梁的最优组合参数, 采用胶黏连接方式, 秸秆板厚度为 48 mm, 型钢厚度为 2.5 mm, 型钢高度为 200 mm; 腹板螺栓采用两排布置, 间距为 150 mm, 整体跨度为 1 800 mm, 经试验验证符合预期。将冷弯薄壁型钢与秸秆板 2 种材料组合, 可有效发挥各自优势, 显著提高组合梁的抗弯承载能力。

关键词: 组合梁; 秸秆板; 冷弯薄壁型钢; 抗弯性能; 有限元分析

中图分类号: TU398+6

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.009

Finite Element Analysis of Bending Performance of Straw-Cold-Formed Thin-Walled Steel Combined Beam

HU Yi, LIU Jingyi, HAO Xiangwei, YANG Yuying, MENG Zuoquan, YANG Haixu*
(College of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Taking cold-formed thin-walled steel and straw board as the main materials, a new type of box-section straw-cold-formed thin-walled steel combined beam was constructed by using the connection method of straw board wrapped with cold-formed thin-walled steel. The finite element software ABAQUS was used to establish 7 groups of 25 combined beam models to analyze the effects of connection method, straw board thickness, steel thickness, steel height, web bolt rows, web bolt spacing and beam span on the flexural performance of the combined beams, and to explore the damage modes and damage mechanisms of the combined beams in the case of flexural damage. The results showed that the lower flange of the straw board reached the tensile strength before the upper flange in the finite element simulation loading process, which led to bending cracks and bending damage in the mid-span region of the combined beam, and the lower flange of the straw board underwent localized compression bending and conformal shear damage in the process of load increase. Each parameter had a different degree of influence on the flexural performance of the combined beams, among which the thickness of the straw board, the thickness of the steel and the height of the steel had the most significant influence on the flexural performance. The optimum combination parameters of the combined beams were as follows, with high bending load capacity and small deflection deformation, using adhesive connection, 48 mm thickness of straw board, 2.5 mm thickness of steel, and 200 mm height of steel. The web bolts were arranged in two rows with a spacing of 150 mm, and the overall span was 1800 mm, which was verified to be in line with the expectation by the test. The combination of cold-formed thin-walled steel and straw board can effectively utilize their respective advantages and sig-

收稿日期: 2024-12-31

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024FRD05109); 大学生创新创业训练计划项目(202410225269)。

第一作者简介: 胡宜, 硕士研究生。研究方向为组合结构。E-mail: huyihy2024@163.com

* **通信作者:** 杨海旭, 博士, 副教授。研究方向为钢筋混凝土结构抗震设计与隔震研究。E-mail: yhxcmu@163.com

引文格式: 胡宜, 刘靖依, 郝向炜, 等. 秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁抗弯性能有限元分析[J]. 森林工程, 2026, 42(1): 90-102.

HU Y, LIU J Y, HAO X W, et al. Finite element analysis of bending performance of straw-cold-formed thin-walled steel combined beam[J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 90-102.

nificantly improve the flexural load capacity of the combined beam.

Keywords: Combined beam; straw board; cold-formed thin-walled steel section; bending performance; finite element analysis

0 引言

近年来,随着建筑行业对可持续发展的关注不断增加,绿色建筑材料的需求日益增长。建筑领域逐渐从传统材料向更加环保、可再生的材料转变,以减少对环境的影响,并推动资源的循环利用^[1-3]。在这一背景下,基于竹、木和秸秆等农林废弃物的材料开发与应用逐渐成为研究热点。这类材料不仅兼具环保性和经济性,还能够实现废弃资源的高效利用,为绿色建筑的发展提供了新的可能性和发展方向^[4-8]。秸秆作为一种可再生资源,具有轻质、高强、储量丰富、隔音隔热性能良好等优点,通过在玉米秸秆、小麦秸秆原料添加异氰酸酯制成的秸秆板,力学性能几乎与人造木质胶合板相当,被广泛应用于木材的替代品^[9-11]。

近年来,国内外学者对如何制备高性能的秸秆板材进行了一系列深入研究。例如,Kurokochi等^[12]研究了蒸汽处理对无胶胶合秸秆人造板的自胶接性能的影响,结果发现蒸汽处理能明显提高秸秆板的内结合强度和耐水性,符合日本工业标准对中密度纤维板的要求;Regmi等^[13]将干酒糟及其可溶物(distillers dried grains with solubles, DDGS)作为麦秸刨花板的多功能填料,研究发现随着DDGS含量的增加,刨花板的物理性能显著提高,但力学性能下降,有可能实现以低夹杂量掺入DDGS后,麦秸刨花板具有替代木材刨花板的潜力;Alam等^[14]将水稻秸秆与等量的菠萝冠废料浆混合,并用菠萝冠废料纤维代替稻草板制造工业中使用的黏合剂化学品,最终制得与麦秸板性能相近的板材,满足印度标准A级和B级草板要求规格。

然而,秸秆板因抗拉强度较弱,难以单独应用于承载结构,需与其他材料结合使用。冷弯薄壁型钢虽具轻质、高强和易施工等优势,但抗局部屈曲和整体稳定性较差,易发生失稳^[15-16]。将秸秆板与冷弯薄壁型钢结合,可发挥材料优势,实现性能互补,不仅充分利用秸秆资源,相较于单独使用秸秆板或冷弯薄壁型钢,显著提升了复合结构的力学性能。Sun等^[17]设计了一种新型轻钢框架秸秆墙体,将环保型秸秆板(包括纸秸秆板和小麦秸秆刨花板)分别用作中间夹层和外墙板,结果表明秸秆板与钢框架之间的空隙有效地减少了通过结构热损失。Xu等^[18]提出了一种新型的秸秆纤维板冷弯薄壁钢复合墙体,通过抗压性能试验证明秸秆板使墙体的破坏模式由秸秆剪切破坏转变为柱钉局部

破坏,并由于秸秆板的约束作用提高了墙体的轴向抗压能力。Zhao等^[19]利用建筑传热理论和有限元分析软件ANSYS分析了冷弯薄壁型钢-秸秆板复合墙体的传热性能,研究结果表明,秸秆板降低了复合墙体的传热系数,有利于提高墙体的保温性能。

目前,针对秸秆板与冷弯薄壁型钢组合构件的研究多集中于复合墙体,而对组合梁构件的研究相对较少,尤其是在其抗弯性能方面,尚缺乏系统的研究方法与设计指导。此外,有限元分析作为一种高效的数值模拟手段,在结构性能评估中的应用日益广泛。因此,深入研究秸秆板与冷弯薄壁型钢组合梁的抗弯性能及其影响因素,探索秸秆板作为替代天然木材的可行性,为现有钢木组合结构提供一种具有可持续性和经济性的替代方案。通过建立合理的有限元分析方法,不仅能够优化组合构件的设计,还能够推动秸秆资源的高值化利用,为实现绿色建筑和节能减排目标作出贡献,具有重要的理论与实践意义。

基于以上背景,提出一种新型秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁,在四点弯曲试验的基础上,使用ABAQUS有限元分析软件进行建模,对比分析各组试件的荷载-挠度曲线、极限荷载以及抗弯刚度,并通过有限元模拟进一步探究连接方式、秸秆板厚度、型钢厚度、型钢高度、腹板螺栓排数、腹板螺栓间距和跨度等参数对组合梁抗弯力学性能的影响。研究结果将为秸秆复合材料的高效利用和绿色建筑的发展提供科学依据。

1 组合梁模型设计

1.1 模型构造设计

本研究设计的组合梁由2根冷弯薄壁C型钢以“背对背”的形式组合,腹板通过螺栓形成I形钢骨架。为防止试件先出现剪切破坏,在上翼缘两端至加载点处加设盖板,盖板通过高强螺栓与组合梁受压上翼缘相连,盖板尺寸为780 mm×176 mm×12 mm。上下翼缘处秸秆板与型钢分别采用环氧树脂胶、螺栓和自攻螺钉3种连接方式,型钢卷边处通过环氧树脂胶与秸秆板进行界面胶结。组合梁的跨中截面形式如图1所示,梁端至加载点截面形式如图2所示。为确保支座位置不会最先发生破坏,在支座处设置加劲件,所用材料为同批次的Q235级钢板,尺寸为200 mm×65 mm×40 mm×2.5 mm,长度为195 mm,加劲件位置及尺寸如图3所示。最终形成全封闭的箱型组合梁。

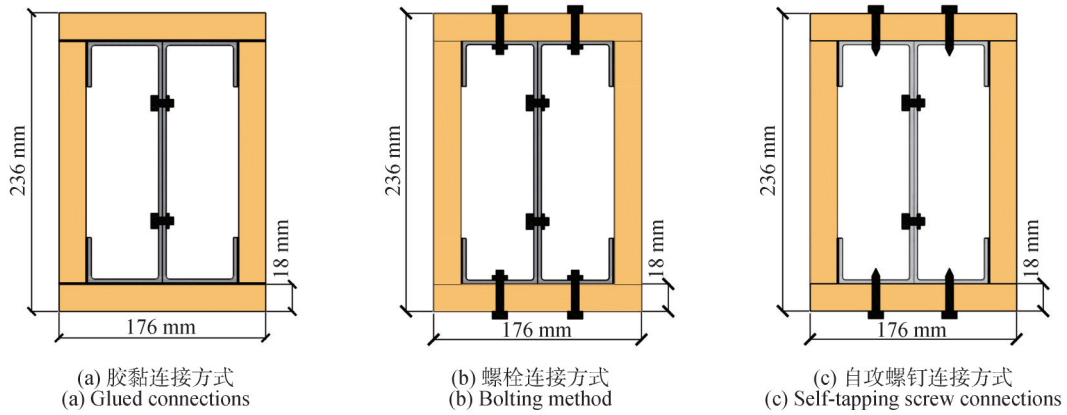


图1 组合梁跨中截面形式

Fig. 1 Combined beam mid-span cross-section form

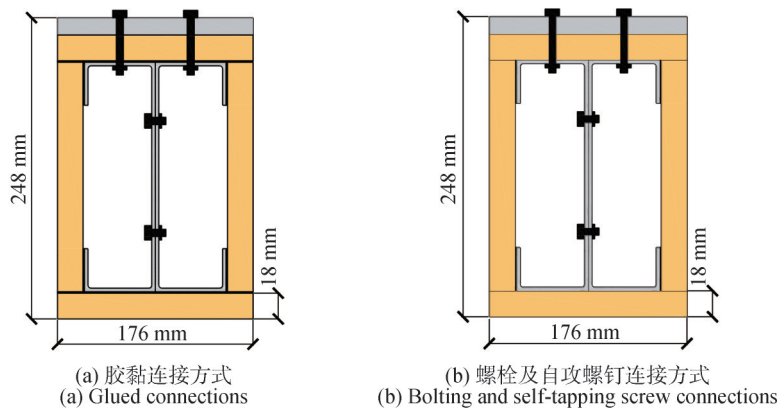


图2 组合梁梁端至加载点截面形式

Fig. 2 Cross-section form of combined beam end to loading point



图3 加劲件位置及尺寸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the location and dimensions of the stiffeners

I形钢骨架腹板孔洞和使用抗剪连接件连接的型钢下翼缘孔洞的螺栓直径都为5 mm,相邻孔洞间距为150 mm。因连接方式的不同,型钢上翼缘孔洞位置存在差异,孔洞位置示意图如图4所示。

1.2 模拟方案设计

本试验提出3种连接方式,将25个组合梁分成7组模型进行有限元模拟,重点考察连接方式、秸秆板厚

度、型钢厚度、型钢高度、型钢腹板螺栓排数、型钢腹板螺栓间距和梁跨度对组合梁抗弯性能的影响。具体组合梁试件参数见表1。

本试验采用单调静力四点弯曲法,能够清晰反映组合梁的抗弯性能,聚焦于纯弯段的受力特点。模拟加载方式如图5所示。

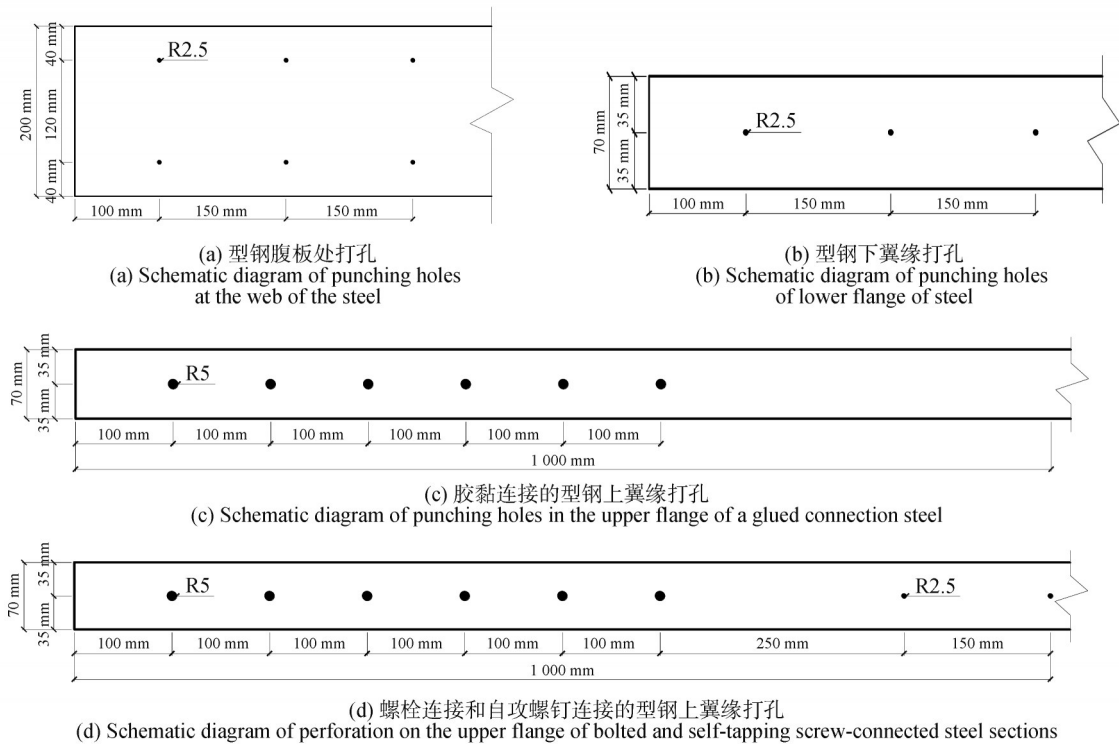


图 4 孔洞位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hole location

2 有限元模型建立

2.1 单元类型选取

本模型为展现出更好的视觉效果,将所有部件均设置为实体单元进行建模。ABAQUS 中根据积分方式,将单元类型分为线性完全积分(CPS4、C3D8)、二次完全积分(CPS8、C3D20)、线性减缩积分(CPS4R、C3D8R)、二次减缩积分(CPS8R、C3D20R)、非协调模式单元(CPS4I、C3D8I)、线性三角形和四面体单元、二次三角形和四面体单元、修正的二次三角形和四面体单元以及杂交单元。其中,C3D8R 单元(8 节点线性六面体单元)计算的时间成本更低,结果更容易收敛,所以本研究所建立的模型均采用 C3D8R 单元来模拟构件受力情况。

2.2 材料本构关系设置

根据《结构用人造板力学性能试验方法》(GB/T 31264—2014)^[20]规定的试验方法,对秸秆板材标准试件进行材性试验,抗拉、抗压试件破坏现象如图 6 所示,抗拉、抗压强度值和弹性模量见表 2。

本研究使用的秸秆板是直接工厂采购的均质复合材料,根据厂家提供的数据,其力学性能在很大程度上可以近似为各向同性,密度为 600 kg/m^3 。同时,秸秆板属于脆性材料,其主要表现为弹塑性特性,在应力

达到一定极限后有一定塑性变形。因此,采用各向同性弹塑性模型可以很好地捕捉秸秆板的主要力学行为,满足模拟的精度需求。根据材性试验结果取秸秆板弹性模量为 $2\ 714 \text{ MPa}$,抗拉强度为 8.67 MPa ,泊松比为 0.28 。秸秆板的本构关系曲线如图 7(a)所示。图 7(a)中的 f_{tu} 、 ε_{tu} 、 f_{cu} 、 ε_{cu} 分别为秸秆板的抗拉强度、拉伸应变、抗压强度和压缩应变。

模拟所用钢材均为 Q235 级,采用理想弹塑性本构模型。根据规范《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[21]中的规定,对钢材试件进行单轴拉伸力学性能试验,得到型钢的弹性模量为 $2.00 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.3 ,屈服应力为 243.47 MPa ,抗拉强度为 382.19 MPa 。型钢的本构关系曲线如图 7(b)所示。图 7(b)中的 f_y 、 ε_y 分别为钢材的屈服强度和屈服应变。

抗剪连接件的抗拉强度和屈服强度接近,因此螺栓和自攻螺钉选用理想弹塑性模型进行模拟。取螺栓的抗拉强度为 456.42 MPa ,弹性模量为 $2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$;自攻螺钉的抗拉强度为 432.31 MPa ,弹性模量为 $2.04 \times 10^5 \text{ MPa}$;泊松比都为 0.3 。垫块的变形可忽略不计,视为刚性体,选用线性弹性材料模型模拟,取弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.3 。

表 1 组合梁设计参数
Tab. 1 Design parameters of combined beams

组号 Group number	编号 Model number	连接方式 Connection method	秸秆板/mm Straw board thickness	型钢尺寸/mm Dimensions of steel	螺栓排数 Bolt rows	螺栓间距/mm Bolt spacing	跨度/mm Beam span
I	A-1	胶黏连接 Glued connection					
	A-2	螺栓连接 Bolting connection	18	200 × 70 × 20 × 2.5	2	150	1 800
	A-3	自攻螺钉连接 Self-tapping screw connection					
II	B-1		18				
	B-2	胶黏连接 Glued connection	28	200 × 70 × 20 × 2.5	2	150	1 800
	B-3		38				
	B-4		48				
III	C-1			200 × 70 × 20 × 1.5			
	C-2			200 × 70 × 20 × 2.0			
	C-3	胶黏连接 Glued connection	18	200 × 70 × 20 × 2.5	2	150	1 800
	C-4			200 × 70 × 20 × 3.0			
	C-5			200 × 70 × 20 × 3.5			
IV	D-1			200 × 70 × 20 × 2.5			
	D-2	胶黏连接 Glued connection	18	180 × 70 × 20 × 2.5	2	150	1 800
	D-3			160 × 70 × 20 × 2.5			
V	E-1				2		
	E-2	胶黏连接 Glued connection		200 × 70 × 20 × 2.5	3	150	1 800
	E-3		18		4		
VI	F-1					100	
	F-2	胶黏连接 Glued connection		200 × 70 × 20 × 2.5	2	150	1 800
	F-3		18			200	
	F-4					300	
VII	G-1						1 800
	G-2	胶黏连接 Glued connection	18	200 × 70 × 20 × 2.5	2	150	2 100
	G-3						2 400

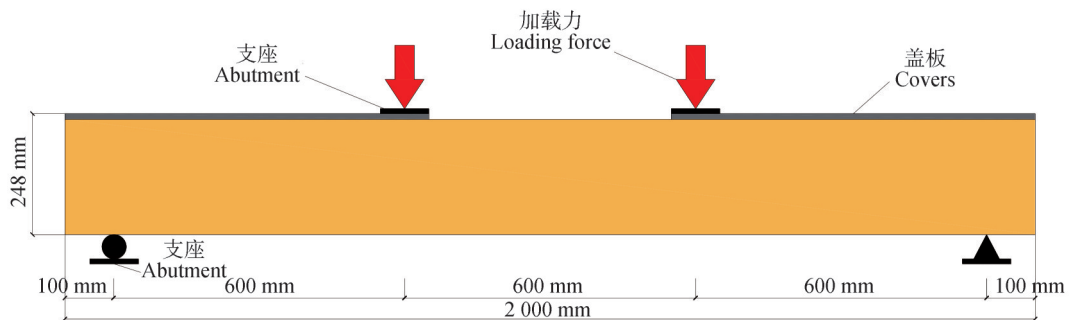
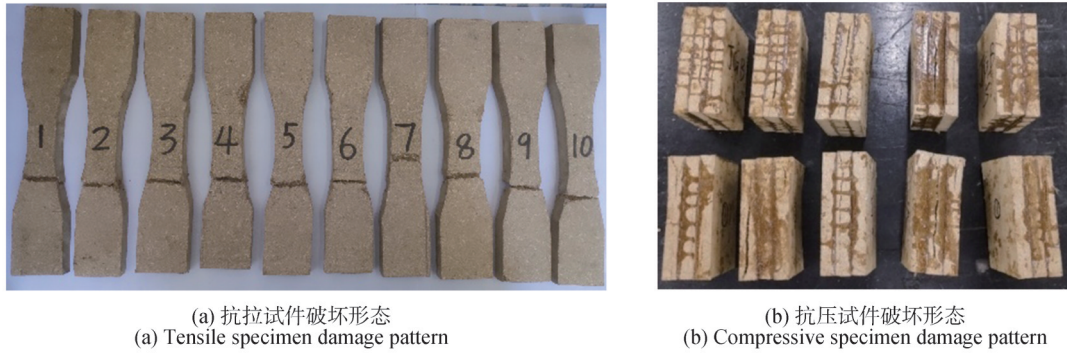


图 5 模拟加载图
Fig. 5 Simulated loading diagram



(a) 抗拉试件破坏形态
(a) Tensile specimen damage pattern

(b) 抗压试件破坏形态
(b) Compressive specimen damage pattern

图 6 材性试验试件破坏

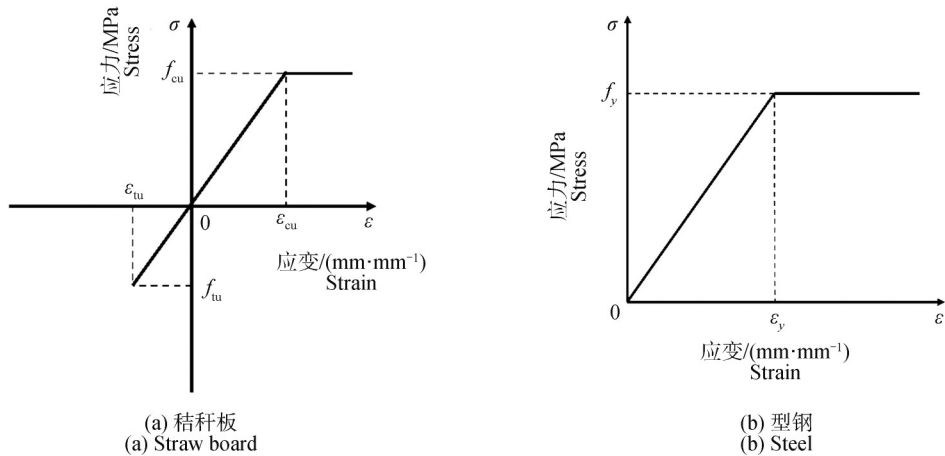
Fig. 6 Damage diagram of test specimens for mechanical properties of materials

表 2 材性试验结果

Tab. 2 Material mechanical properties test specimen results

试件编号 Specimen number	抗拉强度 Tensile strength	抗压强度 Compressive strength	抗拉弹性模量 Tensile modulus of elasticity	抗压弹性模量 Compressive modulus of elasticity
1	8.79	10.56	2 855	2 545
2	7.48	12.13	2 672	2 795
3	9.64	13.88	2 730	2 916
4	10.52	16.97	2 645	3 250
5	9.40	16.98	2 747	3 254
6	8.12	16.12	2 958	3 207
7	10.72	10.37	2 655	2 538
8	7.58	12.17	2 637	2 801
9	6.69	11.40	2 592	2 671
10	7.78	12.03	2 652	2 754
平均值 Average value	8.67	13.26	2 714	2 873

MPa



(a) 秸秆板
(a) Straw board

(b) 型钢
(b) Steel

图 7 材料本构关系曲线

Fig. 7 Material intrinsic relationship curve

2.3 相互作用及边界条件

所有的螺栓及自攻螺钉均设置“Embedded Region”埋置在组合梁内;螺栓与螺母之间在试验中未发现松动现象,在模型中将螺栓与螺母之间设置为“Tie”;加劲件与型钢之间设置为“Tie”;垫块与组合梁试验中未发生移动现象,在模型中将垫块与下秸秆板和盖板之间的约束设置为“Tie”。在实际构件中钢材-秸秆板接触的表面需要涂刷环氧树脂胶,在模型中通过定义“Surface-to-Surface”模拟胶黏效果,切向行为采用“罚”函数进行定义,摩擦系数设置为0.4,法向行为采用“硬”接触。

组合梁两端支座分别设置一个参考点,并进行耦合,一端支座形成固定铰支座($U_1=U_2=U_3=U_{R2}=U_{R3}=0$, U_1 、 U_2 和 U_3 分别对应 X 、 Y 和 Z 方向上的线位移; U_{R1} 、 U_{R2} 和 U_{R3} 分别对应 X 、 Y 和 Z 方向上的转角位移,使其等于“0”表示该方向被约束。软件中是通过勾选需要约束的自由度为0来实现支座设置的。),另一端形成滑动支座($U_1=U_2=U_{R2}=U_{R3}=0$),荷载采用位移控制,对 U_2 方向施加位移。

2.4 网格划分及基本假定

为保证计算的收敛性,秸秆板和型钢网格划分的尺寸保持一致,网格尺寸均设置为15 mm。盖板的网格尺寸划分为20 mm。螺栓及自攻螺钉尺寸较小,因此在进行划分网格时,应先对部件进行“分区”,对不规则的区域进行切割,之后将M5×20的螺栓、螺母和自攻螺钉的网格尺寸设置为1.5 mm, M10×50的螺栓和螺母网格尺寸设置为2.5 mm。加劲件为非研究重点,因此将加劲件的网格尺寸设置为25 mm。垫块同样是非研究重点,将垫块尺寸设置为30 mm。模型整体网格划分,如图8所示。

使用ABAQUS软件进行建模时,所建立的模型均为理想化状态,与真实的试验存在误差,因此在建立模

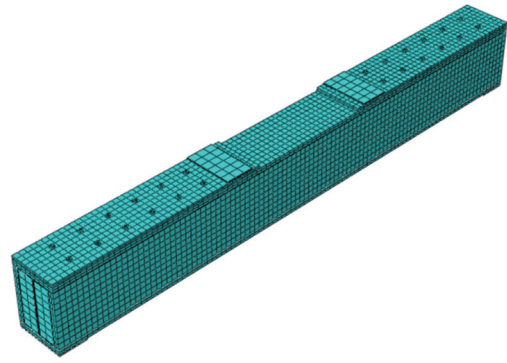


图8 模型整体网格划分

Fig. 8 Overall meshing of the model

型时,应采用如下基本假定。

- 1) 忽略因加工、运输、搬运及存储过程中引起的秸秆板内部细微开胶情况。
- 2) 忽略钢板裁剪、装配精度等加工误差。
- 3) 忽略打孔时因钻头滑动带来的误差。

3 有限元模拟结果分析

3.1 组合梁破坏模式分析

在有限元模拟中,秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁的破坏模式表现为3个主要特征。首先,钢骨架在加载点下方的腹板以及上翼缘由于受压应力集中而屈服,成为结构局部失效的起始点,如图9(a)所示;其次,秸秆板的应力分布显示在加载点及跨中区域存在显著集中,这些关键受力位置在弯矩和剪力作用下逐渐达到材料极限,导致局部损伤,如图9(b)所示;最后,在采用抗剪件连接的组合梁中,螺栓和自攻螺钉在钢骨架与秸秆板连接界面处发生明显的塑性变形,如图9(c)和9(d)所示,表明连接件是荷载传递的重要环节,但也可能成为薄弱点。

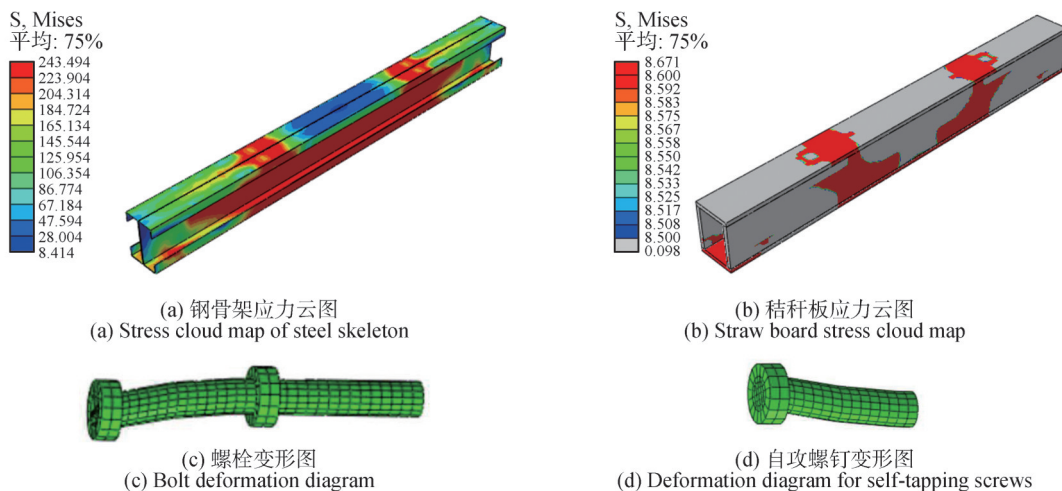


图9 组合梁模型应力云图

Fig. 9 Stress cloud map of combined beam model

因此组合梁的破坏模式主要包括钢骨架的翼缘局部屈服、秸秆板的应力集中破坏以及连接件的塑性变形。这表明优化构件截面参数和连接件设计是提升组合梁整体性能的关键。

3.2 抗弯性能影响因素分析

根据有限元模拟结果,影响组合梁承载力的主要因素可归纳为材料属性和抗剪连接件的设置。为更直观地分析不同参数对组合梁抗弯性能的影响,设置一根纯钢梁 GL 进行对比,并对各参数进行分组分析,绘制组合梁的荷载-挠度曲线。

3.2.1 连接方式的影响

不同连接方式下组合梁的荷载-挠度关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知,组合梁处于弹性变形阶段,此时连接方式对组合梁的承载力影响较小,各组曲线斜率接近,表明不同连接方式的组合梁在低荷载下具有类似的刚度表现。随着荷载的逐步增大,曲线斜率显著下降,逐渐接近水平,但直到加载结束,也未出现下降段,表明组合梁进入了塑性阶段。与纯钢梁 GL 相比,各组合梁的抗弯承载力均有显著提升,组合梁 A-1、A-2 和 A-3 的抗弯承载力分别提高 228.13%、169.87% 和 139.97%,说明冷弯薄壁型钢-秸秆板组合梁的组合形式使材料间协同受力更加高效,显著提升了结构的整体抗弯性能。不同连接方式的组合梁在承载力方面出现明显分化。采用胶黏的组合梁 A-1 承载力最高,分别比螺栓连接 A-2 和自攻螺钉连接 A-3 的组合梁承载力提高 21.59% 和 36.74%,而采用螺栓连接 A-2 的组合梁承载力又比采用自攻螺钉连接 A-3 的组合梁承载力提高 12.46%。分析是因为螺栓和自攻螺钉连接仅依靠螺杆固定型钢与秸秆板,形成部分组合行为,并因孔洞破坏了组合梁整体性,导致初始缺陷加剧。随着荷载增加,连接处发生滑移和应力集中,钢材与秸秆板的协同性降低,承载力下降。而胶黏连接实现完全组合行为,能够均匀分布应力,协调钢材与秸秆板的变形,使二者形成整体受力,显著提高刚度和承载力。因此,胶黏连接的组合梁性能优于螺栓和自攻螺钉连接。

3.2.2 秸秆板厚度的影响

不同秸秆板厚度的组合梁的荷载-挠度关系曲线如图 11 所示。由图 11 可知,与纯钢梁 GL 相比,组合梁 B-1、B-2、B-3 和 B-4 的抗弯承载力分别提高 228.13%、303.77%、357.82% 和 386.64%。秸秆板厚度越大,组合梁的抗弯承载力越高。秸秆板厚度为 48 mm 的组合梁分别比秸秆板板厚为 18、28、38 mm 的组合梁承载力高出 48.31%、20.52%、6.30%,但随着

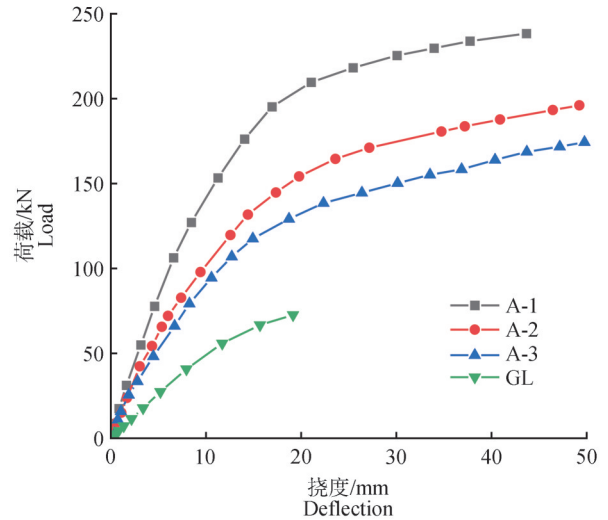


图 10 不同连接方式的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 10 Load-deflection curves of combined beams with different connections

秸秆板厚度的增大,承载力的增长幅度逐渐减小。分析是因为秸秆板厚度增加后,截面惯性矩增大,使组合梁的抗弯刚度和承载能力得到提升。然而,随着秸秆板厚度进一步增加,其对承载力的增益效果逐渐减弱,主要原因在于厚度增大带来的惯性矩增幅逐渐降低,组合梁自重增加限制了钢材与秸秆板之间的协同性能,秸秆板自身的强度也不会随着厚度增加无限增大。

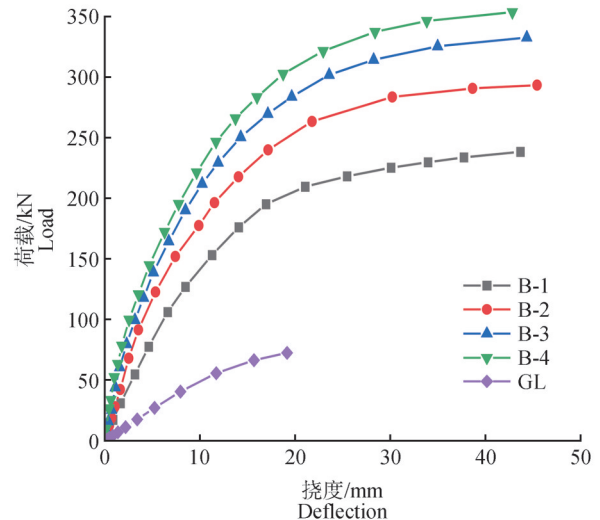


图 11 不同秸秆板厚度的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 11 Load-deflection curves of combined beams with different straw board thicknesses

3.2.3 型钢厚度的影响

不同型钢厚度的组合梁的荷载-挠度关系曲线如图 12 所示。由图 12 可知,与纯钢梁 GL 相比,组合梁

C-1、C-2、C-3、C-4和C-5的抗弯承载力分别提高166.93%、213.01%、228.13%、295.14%和322.74%。型钢厚度越大,组合梁的抗弯承载力越高。型钢厚度为3.5 mm的组合梁分别比型钢厚度为1.5、2.0、2.5、3.0 mm的组合梁承载力高出58.37%、35.06%、28.81%、6.96%。从用钢量角度分析,每增加1%的用钢量,承载力平均提升幅度为14.07%。但随着型钢厚度的增大,承载力的增长幅度逐渐减小。分析是因为型钢厚度的增加同样会显著提高组合梁的截面惯性矩,但当型钢厚度增加到一定程度后,其刚度显著大于秸秆材料,这种刚度差异会削弱两者之间的协同作用,导致局部屈曲或界面破坏的风险增加,使得型钢的增厚不能充分转化为整体承载力的提升。

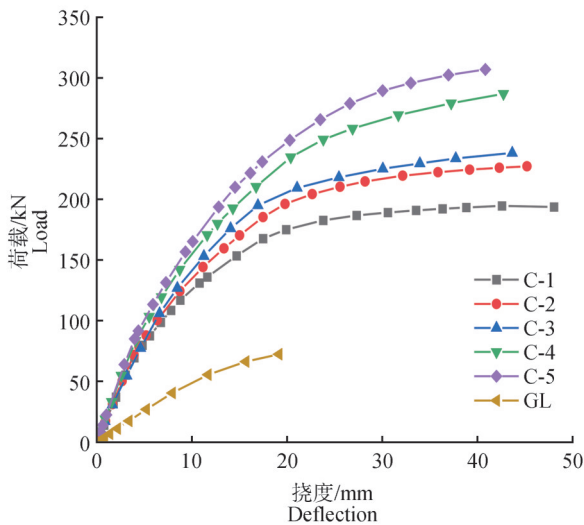


图12 不同型钢厚度的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 12 Load-deflection curves of combined beams with different steel thicknesses

3.2.4 型钢高度的影响

不同型钢高度的组合梁的荷载-挠度关系曲线如图13所示。由图13可知,与纯钢梁GL相比,组合梁D-1、D-2和D-3的抗弯承载力分别提高了228.13%、193.44%和153.41%。型钢高度越大,组合梁的抗弯承载力越高。型钢高度为200 mm的组合梁分别比型钢高度为160、180 mm的组合梁承载力高出29.48%、11.82%。从用钢量角度分析,每增加1%的用钢量,承载力平均提升幅度为15.83%,增大型钢高度对承载力的提升效果优于增大型钢厚度。分析是因为型钢高度的增大会直接增加梁的截面惯性矩,且截面惯性矩与型钢高度的三次方成正比,与型钢厚度仅呈线性关系。因此,在用钢量相同的条件下,通过增大型钢高度,能够更显著地提升组合梁的抗弯刚度,从而显著提高承载力。

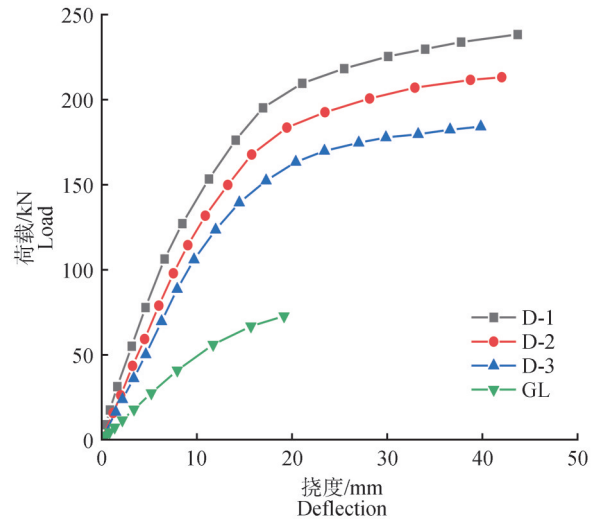


图13 不同型钢高度的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 13 Load-deflection curves of combined beams with different steel heights

3.2.5 腹板螺栓排数的影响

不同型钢腹板螺栓排数的组合梁的荷载-挠度关系曲线如图14所示。由图14可知,与纯钢梁GL相比,组合梁E-1、E-2和E-3的抗弯承载力分别提高228.13%、256.63%和268.70%。腹板螺栓排数对组合梁的抗弯承载力的提高影响很小,当腹板螺栓由2排增加到3排和4排时,组合梁的承载力只提高8.69%和12.36%。分析是因为腹板螺栓仅起到连接作用,而不是直接提供抗弯能力。采用2排螺栓连接型钢时,连接刚度和剪力传递能力已经接近饱和,进一步增加螺栓排数仅能带来局部性能的微弱改善,导致承载力提升幅度较小。

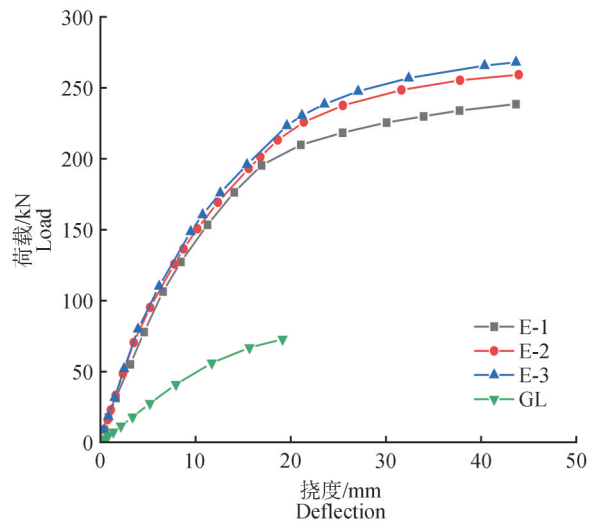


图14 不同腹板螺栓排数的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 14 Load-deflection curves of combined beams with different web bolt rows

3.2.6 腹板螺栓间距的影响

不同型钢腹板螺栓间距的组合梁荷载-挠度关系曲线如图 15 所示。由图 15 可知,与纯钢梁 GL 相比,组合梁 F-1、F-2、F-3 和 F-4 的抗弯承载力分别提高 243.78%、228.13%、213.03% 和 195.38%。腹板螺栓排数对组合梁的抗弯承载力的提高影响并不显著,当腹板螺栓间距由 300 mm 减小到 200、150、100 mm 时,组合梁的承载力分别提高了 5.98%、11.09%、16.39%。分析因为是间距越小,螺栓数量增加,界面连接的可靠性提高,型钢和秸秆板的协同工作效应逐步提升。但界面的剪应力传递效率并不能直接影响抗弯性能,因此减小腹板螺栓间距并不是提高组合梁的抗弯承载力的最优途径。

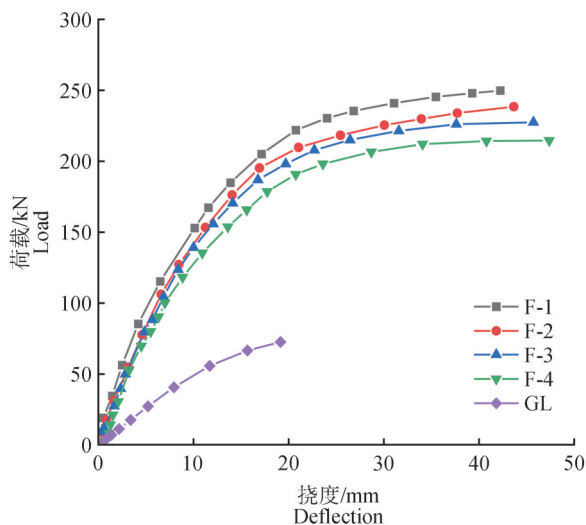


图 15 不同腹板螺栓间距的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 15 Load-deflection curves of combined beams with different web bolt spacing

3.2.7 跨度的影响

不同跨度组合梁的荷载-挠度关系曲线如图 16 所示。由图 16 可知,与纯钢梁 GL 相比,组合梁 G-1、G-2 和 G-3 的抗弯承载力分别提高 228.13%、212.35% 和 188.93%。组合梁跨度越大,抗弯承载力越小。当组合梁跨度由 1 800 mm 增加到 2 100 mm 和 2 400 mm 时,承载力降低 5.05% 和 13.57%。分析是因为跨度的增加会导致组合梁在相同荷载作用下产生的最大弯矩值增大,组合梁的抗弯刚度减弱,对应挠度值显著增加,长细比增加使结构的整体稳定性下降,从而导致组合梁的抗弯承载力减小。随着跨度的进一步增大,这些不利因素的叠加效应更加显著,因此承载力的降低幅度呈现出逐渐增大的趋势。

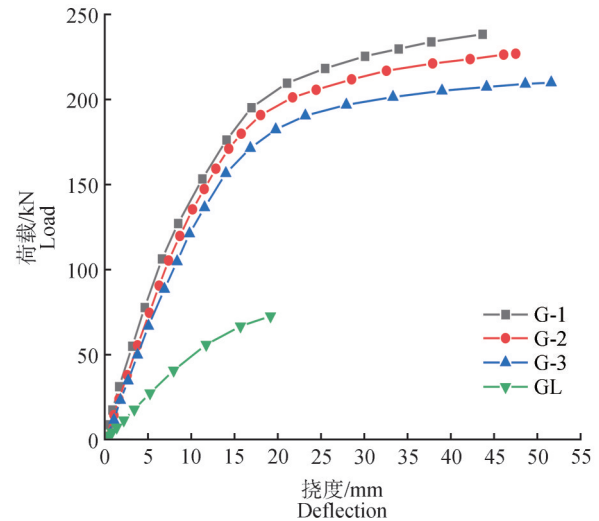


图 16 不同跨度的组合梁荷载-挠度曲线
Fig. 16 Load-deflection curves of combined beams with different spans

3.3 组合梁最优组合参数

为实现组合梁在承载力和变形挠度之间的最佳平衡,得到秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁的最优参数组合形式,各组合梁模型的抗弯承载力、跨中挠度值及其比值见表 3。由表 3 可知,综合考虑抗弯承载力高及挠度变形小的情况下,组合梁的最优组合形式为组合梁 B-4,即采用胶黏连接方式,秸秆板厚度为 48 mm、型钢厚度为 2.5 mm、型钢高度为 200 mm、腹板螺栓为 2 排、腹板螺栓间距为 150 mm、跨度为 1 800 mm 的组合梁。这种组合参数对应的抗弯承载力与跨中挠度值的比值较大,说明组合梁在达到最大承载力时表现出较小的挠度,具有良好的抗变形能力。

基于组合梁的最优参数组合形式,进行四点弯曲试验,试验加载装置如图 17 所示。抗弯承载力模拟值与试验值对比见表 4。由表 4 可知,数值模拟结果与试验结果吻合良好,误差小于 10%。这验证本研究所建立的有限元模型能够较为准确地模拟组合梁在荷载作用下的变形全过程,设置的材料属性参数及相互作用关系设置具有准确性和可靠性,为进一步研究组合梁的力学性能提供了有效的数值分析基础。

4 结论

采用 ABAQUS 对 7 组共 25 个秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁进行有限元分析,模拟四点弯曲试验,研究组合梁的破坏机理与抗弯性能影响因素,可得出以下结论。

1) 在四点弯曲加载下,秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁的破坏模式表现为钢管架的局部屈服失效、秸秆板的局部损伤以及连接件的塑性变形。这 3 种特征相互

表 3 组合梁模型抗弯承载力、跨中挠度值及其比值

Tab. 3 Combined beam model bending capacity, mid-span deflection values and their ratios

模型编号 Model number	抗弯承载力(F)/kN Bending capacity	跨中挠度值(ϵ)/mm Mid-span deflection	F/ ϵ	模型编号 Model number	抗弯承载力(F)/kN Bending capacity	跨中挠度值(ϵ)/mm Mid-span deflection	F/ ϵ
A-1	238.42	43.68	5.46	D-1	238.42	43.68	5.46
A-2	196.09	49.23	3.98	D-2	213.21	42.02	5.07
A-3	174.36	49.77	3.50	D-3	184.13	39.82	4.62
B-1	238.42	43.68	5.46	E-1	238.42	43.68	5.46
B-2	293.38	45.44	6.46	E-2	259.13	43.97	5.89
B-3	332.65	44.35	7.50	E-3	267.90	43.6	6.14
B-4	353.59	42.84	8.25	F-1	249.79	42.26	5.91
C-1	193.95	48.07	4.03	F-2	238.42	43.68	5.46
C-2	227.43	45.23	5.03	F-3	227.45	45.75	4.97
C-3	238.42	43.68	5.46	F-4	214.62	47.41	4.53
C-4	287.11	42.76	6.71	G-1	238.42	43.68	5.46
C-5	307.16	40.86	7.52	G-2	226.95	47.52	4.78
				G-3	209.94	51.62	4.07

表 4 抗弯承载力模拟值与试验值对比

Tab. 4 Comparison of simulated and test values of flexural load capacity

模型编号 Model number	抗弯承载力 Bending capacity			挠度 Deflection		
	模拟值/kN Simulated value	试验值/kN Test values	误差/% Error	模拟值/mm Simulated value	试验值/mm Test values	误差/% Error
B-4	353.59	329.47	7.32	42.84	40.41	6.01

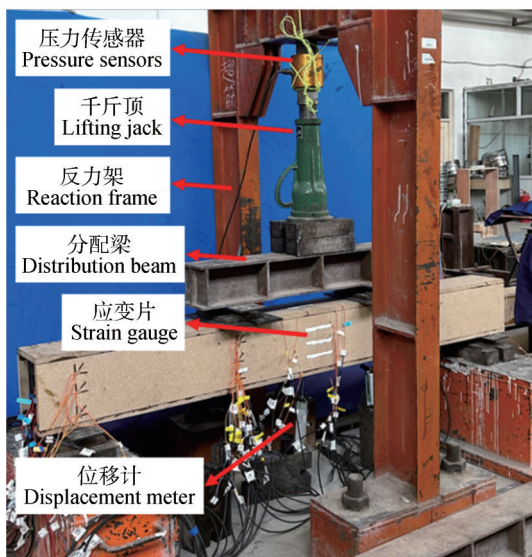


图 17 试验加载装置

Fig. 17 Test loading device diagram

影响,共同构成组合梁的破坏过程,最终导致结构整体承载能力的丧失。

2)通过改变组合梁的连接方式、秸秆板厚度、型钢厚度、型钢高度、腹板螺栓排数、腹板螺栓间距和跨度,分析不同参数对组合梁抗弯承载力的影响。其中,秸秆板厚度、型钢厚度、型钢高度对承载力的影响最明显。从用钢量方面考虑,用钢量每增加1%,型钢厚度和型钢高度对组合梁抗弯承载力的平均提升幅度分别为14.07%和15.83%。在条件允许的情况下,可以优先考虑提高型钢高度的方式提高组合梁承载力。

3)在综合考虑模型参数和材料用量对秸秆-冷弯薄壁型钢组合梁整体性能的影响后,得到抗弯承载力高、挠度变形小的最优参数组合形式;通过试验进行验证,试验值与模拟值之间的误差在10%以内,结果符合预期,证明组合梁在最优组合参数下能实现承载能力和变形性能的最优平衡。

参 考 文 献

- [1] 孙留存, 肖绪文, 朱彤, 等. 中国绿色建造: 发展理念、主导方向与技术创新[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 190-201.
SUN L C, XIAO X W, ZHU T, et al. Green construction in China: Development concept, leading directions and technological innovation [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2024, 26(6): 190-201.
- [2] 戴瑞焯, 王有为, 邓月超. 中国绿色建筑国际化的回顾与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(6): 576-583.
DAI R Y, WANG Y W, DENG Y C. Internationalisation of Chinese green buildings: Review and prospect [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(6): 576-583.
- [3] 向学敏, 郭彦丽. 绿色建筑材料在土木工程施工中的运用[J]. 建筑科学, 2024, 40(1): I0008.
XIANG X M, GUO Y L. Application of green building materials in civil engineering construction [J]. Building Science, 2024, 40(1): I0008.
- [4] 胡玉安, 黄慧, 贺磊, 等. 建筑建材领域“以竹代塑”工程材料研究现状与发展趋势[J]. 林业工程学报, 2024, 9(6): 1-11.
HU Y A, HUANG H, HE L, et al. Research status and development trends of “bamboo as substitute for plastic” in construction and building materials [J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(6): 1-11.
- [5] 任立卓, 许宁. 竹和麻在建筑与设计中的可持续应用: 材料、技术与趋势[J]. 分子植物育种, 2024, 22(12): 4100-4104.
REN L Z, XU N. Sustainable applications of bamboo and hemp in architecture and design: Materials, techniques, and trends [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(12): 4100-4104.
- [6] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30-41.
ZHANG X Q, WANG Z F, SHEN M Y, et al. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(9): 30-41.
- [7] 肖力光, 丁艳波. 秸秆建筑材料的应用及研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1142-1146.
XIAO L G, DING Y B. Application and research progress of straw building materials [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 1142-1146.
- [8] LI H, LUO Z X, XU X D, et al. Assessing the embodied carbon reduction potential of straw bale rural houses by hybrid life cycle assessment: A four-case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303: 127002.
- [9] ZHENG C R, SUN K, CHEN Y X, et al. Mechanical and thermal properties of environmentally friendly straw boards [J]. Construction and Building Materials, 2023, 407: 133493.
- [10] 肖力光, 段振强, 雷潭, 等. 农作物秸秆低碳墙体材料研究现状[J]. 应用化工, 2024, 53(9): 2192-2196.
XIAO L G, DUAN Z Q, LEI T, et al. Research status of low carbon wall material of crop straw [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(9): 2192-2196.
- [11] 赵龙龙, 黄东升, 王骁睿, 等. 秸秆轻质隔墙复合条板工程应用的试验研究[J]. 森林工程, 2016, 32(5): 97-100, 110.
ZHAO L L, HUANG D S, WANG X R, et al. Experimental study of light-weight straw composite panel used in practical engineering [J]. Forest Engineering, 2016, 32(5): 97-100, 110.
- [12] KUROKOCHI Y, SATO M. Steam treatment to enhance rice straw binderless board focusing hemicellulose and cellulose decomposition products [J]. Journal of Wood Science, 2020, 66(1): 7.
- [13] REGMI S, BAJWA D, IGATHINATHANE C, et al. High fiber fraction DDGS - A functional filler for manufacturing low-density particleboards [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 181: 114793.
- [14] ALAM I, KUMAR J, RAVEENDRA, et al. Fabrication of strawboard by a sustainable approach using agricultural waste biomass [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(22): 28741-28751.
- [15] 娄章迪, 童科挺, 吕博, 等. 钢-竹组合箱形梁抗剪性能有限元分析[J]. 森林工程, 2023, 39(4): 170-179.
LOU Z D, TONG K T, LYU B, et al. Finite element analysis of shear behavior of steel-bamboo composite box beams [J]. Forest Engineering, 2023, 39(4): 170-179.
- [16] 许佳乐, 邬沛, 唐政烽, 等. 钢-单板层积材组合工字形梁受弯性能试验[J]. 森林工程, 2024, 40(6): 185-195.
XU J L, WU P, TANG Z F, et al. Experimental study on flexural properties of steel-LVL composite I-beams [J]. Forest Engineering, 2024, 40(6): 185-195.
- [17] SUN K, ZHENG C R, WANG X D. Thermal performance and thermal transmittance prediction of novel light-gauge

- steel-framed straw walls [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 67: 105973.
- [18] XU Z, ZHANG J, CHEN Z, et al. Axial compressive behavior of new HFC-filled CTS composite walls sheathed with straw-fiber boards [J]. *Structures*, 2020, 28: 2582–2595.
- [19] ZHAO C H, ZHANG X H, WANG X L, et al. Study on heat transfer behavior of CFS-PSB composite walls [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105379.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 结构用人造板力学性能试验方法: GB/T 31264—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for mechanical properties of structural wood-based panels: GB/T 31264—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [21] 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, National Standardization Administration. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.