

DOI: 10.7672/sgjs2025200153

自攻钉集块连接节点抗拉性能研究*

董宏英¹, 徐天临¹, 曹万林¹, 杨兆源², 秦 玉¹, 仲湘珺¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

[摘要] 为探究装配式混凝土夹心剪力墙中自攻钉集块连接节点抗拉性能,设计并制作 16 个自攻钉集块抗拉连接试件,研究自攻钉位置、抗拉钢筋面积、自攻钉数量及剪拉比对其抗拉性能的影响。研究表明:自攻钉集块连接节点抗拉性能受自攻钉布置方式影响较小;当破坏模式由钢筋断裂主导时,受拉钢筋面积增加 33%,自攻钉集块连接节点抗拉承载力平均提高 47%;当破坏模式由自攻钉剪断主导时,自攻钉数量增加 1 倍,自攻钉集块连接节点抗拉承载力提高 30%。受拉钢筋面积和自攻钉数量的增加均可有效提升自攻钉集块连接节点中后期刚度。当自攻钉集块连接节点采用细而密的自攻钉群连接时,抗拉承载力略有提高。采用有限元软件 ABAQUS 建立分析模型并进行参数分析,当剪拉比为 0.51~0.76 时,自攻钉集块连接节点处于临界破坏状态。

[关键词] 装配式;剪力墙;连接节点;自攻钉集块;抗拉性能;试验;有限元分析

[中图分类号] TU398

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0153-07

Tensile Performance Research of Self-tapping Screw Cluster Connection Joints

DONG Hongying¹, XU Tianlin¹, CAO Wanlin¹, YANG Zhaoyuan²,
QIN Yu¹, ZHONG Xiangjun¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the tensile performance of self-tapping screw cluster connection joint in prefabricated concrete sandwich shear wall, 16 self-tapping screw cluster tensile connection components were designed and fabricated. The study examined the effects of screw arrangement, tensile reinforcement area, self-tapping screw quantity and shear-to-tension ratio on their tensile performance. The research shows that the tensile performance of the self-tapping screw cluster connection joint is not significantly affected by the layout of the screws. For the failure mode dominated by tensile reinforcement fracture, a 33% augmentation in reinforcement area elevates the mean tensile capacity of screw cluster joints by 47%. In contrast, under screw-dominated failure mechanisms, a 100% increment in screw quantity provides a 30% capacity gain. Increasing the area of tensile reinforcement and the number of self-tapping screws can both effectively enhance the stiffness during the mid-to-late stages. When the self-tapping screw cluster connection joint adopts dense and fine self-tapping screw clusters, the tensile load-bearing capacity exhibits a slight improvement. The finite element software ABAQUS was used to establish an analytical model and to conduct parametric analysis. The self-tapping crew cluster connection joints enter a critical failure state when the shear-to-tensile ratio ranges between 0.51 and 0.76.

Keywords: prefabrication; shear wall; connection joint; self-tapping screw cluster; tensile performance; tests; finite element analysis

0 引言

在现代建筑中,装配式夹心复合剪力墙因兼具

保温与承重功能被广泛应用,但其钢筋网密集且内置保温层的结构特性,使传统连接方式面临显著挑战。例如,灌浆套筒连接存在内部质量难控、增大墙体厚度等问题;螺栓连接需穿透保温层,导致热损失。此外,2 种方式均需较高拼接精度,因此该类

* 国家自然科学基金(52378116)

[作者简介] 董宏英,教授,E-mail: donghy@bjut.edu.cn

[通信作者] 曹万林,教授,E-mail: wlcao@bjut.edu.cn

[收稿日期] 2025-04-20

墙体亟需一种更简便可靠的连接方式。装配式钢结构体系连接方式在不断革新,其提出的自攻钉节点连接方式具有施工简便、承载力高、连接刚度好等优点。为此,将自攻钉应用于装配式混凝土夹心复合剪力墙的连接^[1],提出一种装配式自攻钉集块的节点连接方式。该节点由自攻钉、连接钢板、上下传力钢板、集块区钢筋网和集块区混凝土组成(见图 1)。连接流程为:在内、外叶墙体连接处焊接传力钢板,然后浇筑内、外叶混凝土并预留凹槽,待混凝土硬化后将预制墙体对齐,使用连接钢板和自攻钉进行连接。自攻钉集块连接节点在装配式混凝土中可满足基本构造要求,便于安装并减少了冷桥效应,对装配式夹心复合剪力墙的连接具有重要实际应用价值。

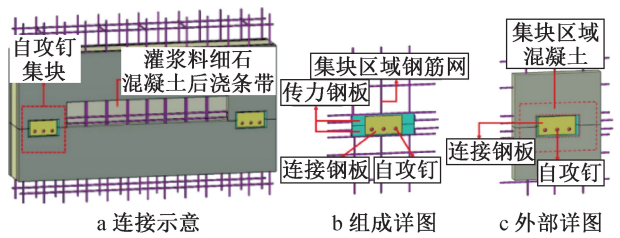


图 1 自攻钉集块连接节点

Fig. 1 Self-tapping screw cluster connection joint

关于自攻钉集块连接节点的受力性能,现有研究主要聚焦于冷弯薄壁型钢结构和装配式钢结构体系。研究表明,连接节点的抗拉性能主要取决于自攻钉抗剪性能。Ye 等^[2]通过试验研究证明,边距对连接剪切能力的影响比螺钉直径或螺柱厚度大,应被视为主要因素。郭曜祯等^[3]对自攻钉在金属屋面系统中的连接性能进行试验研究,结果表明,自攻钉抗剪承载力应适当提高安全系数以避免自攻钉发生脆性断裂而失效。卢林枫等^[4]根据试验现象及数据分析得出以下结论:影响自攻钉抗剪承载力的主要因素是自攻钉数量和间距,钢材厚度次之,自攻钉排布方式对其抗剪承载力影响最小。在实际应用中,自攻钉工作效果不仅受到抗剪强度的影响,还受到连接板材性能的影响。黄川^[5]通过对单颗自攻钉连接厚度 2mm 以下钢板构件的试验发现,影响节点刚度和承载力的主要因素为自攻钉数量和连接板厚度,并建议在实际连接中考虑非线性影响。Lennon 等^[6]对英国冷弯薄壁型钢连接规范中提出的 4 种机械连接方式进行试验研究,结果表明,当连接板厚度<1mm 时,试件初始刚度较低,但仍具有一定变形能力。杨亚龙等^[7]针对自攻钉连接超薄壁钢板进行的试验研究发现,超薄壁板材主要由螺孔扩大后自攻钉被拔出而发生破坏,并给出

合理自攻钉间距宜取 4~5 倍自攻钉直径结论。在自攻钉连接节点抗拉承载力方面,刘雁等^[8]研究了自攻钉连接冷弯薄壁型钢节点抗拉承载力,并基于试验结果得到相应荷载-位移曲线及对应的多项式公式。李盼龙^[9]在试验基础上得出自攻钉群连接冷弯方钢管节点的抗拉承载力计算式。Wang 等^[10]进行的试验研究表明,自攻钉连接冷弯方管时,自攻钉间距和数量的变化对抗拉承载力起着关键作用。在自攻钉群工作效果方面,王身伟等^[11]提出在使用多颗自攻钉连接时需考虑“群体折减效应”。卢林枫等^[4]在对比试验数据后,针对自攻钉群所产生的“群体折减效应”给出了效率系数分布范围。

综上所述,目前研究仍存在以下问题:①现阶段对自攻钉抗拉性能研究往往集中于单颗自攻钉的拉拔性能及厚度 2mm 以下的薄钢板,对自攻钉群连接厚钢板的整体抗拉性能试验研究较少;②对自攻钉群工作时的受力性能变量的研究较为单一,且对适用于装配式混凝土夹心剪力墙是自攻钉集块连接节点研究较少。针对上述问题,有必要对提出的装配式自攻钉集块连接节点抗拉性能进行深入研究。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

为研究自攻钉集块连接的抗拉力学性能,以自攻钉位置及数量、受拉钢筋面积、剪拉比为参数,设计 16 个自攻钉集块连接节点,试件设计如图 2 所示。

传力钢板尺寸为 140mm×120mm×4mm,连接钢板尺寸为 100mm×80mm×4mm,采用 ST4.8、ST6.3mm 型号自攻钉,按居中、距外边缘 10mm 或距外边缘 5mm 方式布置,钢筋直径统一采用 4mm,长度为 230mm,钢筋数量为 2 根或 3 根。试件编号及参数如表 1 所示,如 S6.3/2-J1(D10)-3,6.3 表示自攻钉直径,2 表示自攻钉数量,D10 表示自攻钉孔壁排列位置为距外边缘端距 10mm,J1 表示自攻钉单排居中放置,3 表示钢筋数量为 3。

1.2 材料力学性能

试件所用自攻钉采用钻尾自攻螺栓,ST4.8×19,ST6.3×19 型自攻钉抗剪强度分别为 347、394MPa,抗拉强度分别为 553、545MPa。钢材力学性能试验结果如表 2 所示。

1.3 试验装置及量测方案

试件采用拉拔试验方法,通过拉伸试验机上、下夹具夹住试件上、下端板。以 0.5mm/min 速率对上、下端板施加位移使其逐渐分离,使上、下端板焊

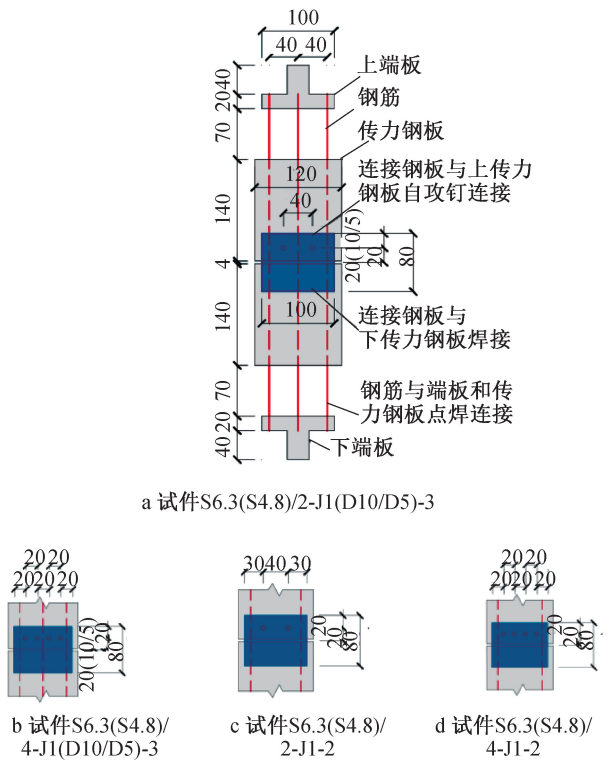


图 2 试件设计详图

Fig. 2 Detailed design of specimens

表 1 试件编号及参数

Table 1 Number and parameters of specimens				
试件编号	自攻钉直径/mm	自攻钉数量/颗	自攻钉位置	钢筋数量/根
S6. 3/4-J1-3	6. 3	4	居中 1 排	3
S6. 3/4-J1-2	6. 3	4	居中 1 排	2
S6. 3/4-D5-3	6. 3	4	距外边缘 5mm	3
S6. 3/4-D10-3	6. 3	4	距外边缘 10mm	3
S6. 3/2-J1-3	6. 3	2	居中 1 排	3
S6. 3/2-J1-2	6. 3	2	居中 1 排	2
S6. 3/2-D5-3	6. 3	2	距外边缘 5mm	3
S6. 3/2-D10-3	6. 3	2	距外边缘 10mm	3
S4. 8/4-J1-3	4. 8	4	居中 1 排	3
S4. 8/4-J1-2	4. 8	4	居中 1 排	2
S4. 8/4-D5-3	4. 8	4	距外边缘 5mm	3
S4. 8/4-D10-3	4. 8	4	距外边缘 10mm	3
S4. 8/2-J1-3	4. 8	2	居中 1 排	3
S4. 8/2-J1-2	4. 8	2	居中 1 排	2
S4. 8/2-D5-3	4. 8	2	距外边缘 5mm	3
S4. 8/2-D10-3	4. 8	2	距外边缘 10mm	3

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel				
钢材类型	直径(厚度) t/mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E/GPa
受拉钢筋	4	732. 12	872. 27	200. 00
连接钢板	4	390. 33	568. 00	201. 00

接的钢筋受拉,并通过传力钢板和连接钢板将拉力传递给自攻钉使其受剪,在下横梁架设电子百分表,测量试件整体位移。以 50ms/次的采集频率采

集试验机荷载及百分表位移值。试验加载装置如图 3 所示。



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading device

2 试验现象与破坏形态

自攻钉集块连接节点整个破坏过程经历 3 个阶段:①第 1 阶段为弹性阶段,试件由自攻钉螺杆与连接钢板传递剪力,钢筋承受拉力,荷载随位移线性增长;②第 2 阶段为弹塑性阶段,荷载随位移增加而非线性增长,增长速率变缓,部分试件连接钢板翘起,自攻钉螺杆发生倾斜;③第 3 阶段为破坏阶段,荷载突然下降,试件发生脆性破坏。试件主要有 2 种破坏形式,即受拉钢筋拉断、自攻钉螺杆剪断。

1) 受拉钢筋拉断。自攻钉数量较大而钢筋面积较小时,试件破坏形式为钢筋断裂。试件 S6. 3/4-J1-3, S6. 3/4-J1-2, S6. 3/4-D5-3, S6. 3/4-D10-3, S6. 3/2-J1-2, S6. 3/2-D5-3, S6. 3/2-D10-3, S4. 8/4-J1-3, S4. 8/4-J1-2, S4. 8/4-D5-3, S4. 8/4-D10-3, S4. 8/2-J1-2 为该破坏模式。试件 S6. 3/4-J1-3 最终破坏形式如图 4 所示。



图 4 试件 S6. 3/4-J1-3 破坏现象

Fig. 4 Failure mode of specimen S6. 3/4-J1-3

2) 自攻钉螺杆剪断。随着荷载不断增加,自攻钉螺杆集块上传力钢板发生弯曲,破坏前试件无明显预兆,试件发出闷响,自攻钉螺杆被剪断。S6. 3/2-J1-3, S4. 8/2-J1-3, S4. 8/2-D5-3, S4. 8/2-D10-3 为该破坏模式。以典型试件 S6. 3/2-J1-3 为例,自攻钉螺杆被剪断,自攻钉并未脱离钢板;传力钢板随着钉尾部沿着受力方向倾斜,连接钢板由于自攻钉螺

母的约束,并未倾斜,最终破坏形式如图 5 所示。



图 5 试件 S6.3/2-J1-3 的破坏现象

Fig.5 Failure mode of specimen S6.3/2-J1-3

3 试验结果及分析

3.1 自攻钉布置方式对试件抗拉性能的影响

不同自攻钉布置的荷载-位移曲线及刚度退化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在相同条件下改变自攻钉位置时,自攻钉集块连接节点的荷载-位移曲线高度重合,而刚度退化曲线仅在加载初期呈现波动,中后期趋于稳定并基本重合。这表明自攻钉排列方式对自攻钉集块连接节点的抗拉承载力及中后期刚度影响有限。

3.2 受拉钢筋面积对试件抗拉性能的影响

不同钢筋配筋率的荷载-位移曲线及刚度退化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,改变受拉钢筋面积时,荷载-位移曲线趋势大致相同,极限承载力发生显著变化,当受拉钢筋面积增加 33%时,极限承载力平均提高 47%。同时,钢筋面积较大的试件在中后期刚度退化速率明显减缓,整体刚度稳定性优于钢筋面积较小的试件。由此可见,当钢筋受拉破坏时,增大受拉钢筋面积可显著提高自攻钉集块连接节点的抗拉承载力和中后期刚度。

3.3 自攻钉数量对试件抗拉性能的影响

不同数量自攻钉的荷载-位移曲线及刚度退化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,当自攻钉直径为 4.8mm 时,增加其数量可使抗拉极限承载力提高近 30%,且中后期刚度略微提升。由此可见,当自攻钉受剪破坏时,增大自攻钉数量可提高自攻钉集块连接节点抗拉承载力和中后期刚度。

3.4 剪拉比对试件抗拉性能的影响

将自攻钉抗剪承载力与钢筋抗拉承载力的比值定义为自攻钉集块连接节点的剪拉比,各自攻钉集块连接节点剪拉比及破坏形式如表 3 所示。由表 3 可知,对于直径为 4.8mm 的自攻钉集块钢构件,当剪拉比为 0.4 时,发生自攻钉螺杆剪断;当剪拉比>0.6 时,发生钢筋拉断。对于直径为 6.3mm 的自攻钉集块钢构件,当剪拉比>0.8 时,发生钢筋拉断。

在钢筋数量不变的情况下,S4.8/4 与 S6.3/2 剪拉比均相同。对该类自攻钉集块连接节点进行分组分析(见图 9),得到剪拉比和排列方式相同时的荷载-位移曲线。由图 9 可知,相较于 S6.3/2(粗而疏的自攻钉),当采用 S4.8/4(细而密的自攻钉)时,自攻钉集块钢构件极限承载力提升较小,约为 2.5%,同时中后期刚度提升不显著。

4 有限元模拟

4.1 模型建立

为简化模型,利用有限元软件 ABAQUS,将钢筋、钢板、自攻钉设置为实体单元,钢板采用四阶段本构^[12],自攻钉采用理想弹塑性本构,钢筋采用双折线强化本构,为自攻钉和钢筋添加金属柔性损伤

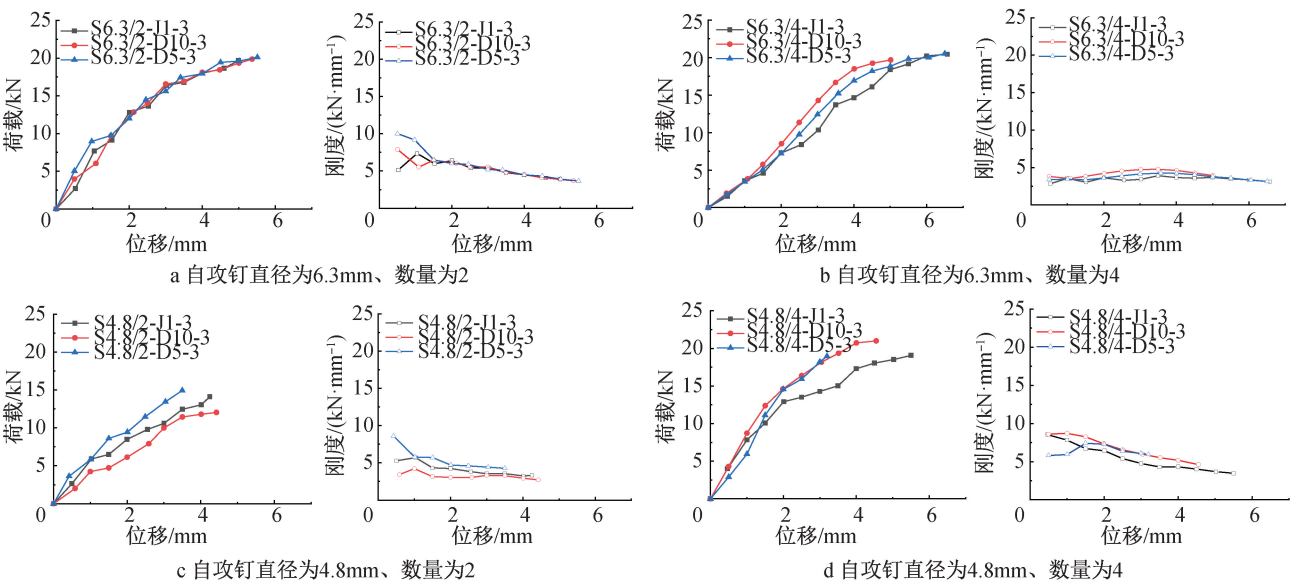


图 6 不同自攻钉布置下荷载-位移曲线及刚度退化曲线

Fig.6 Load-displacement and stiffness degradation curves under different self-tapping screw arrangements

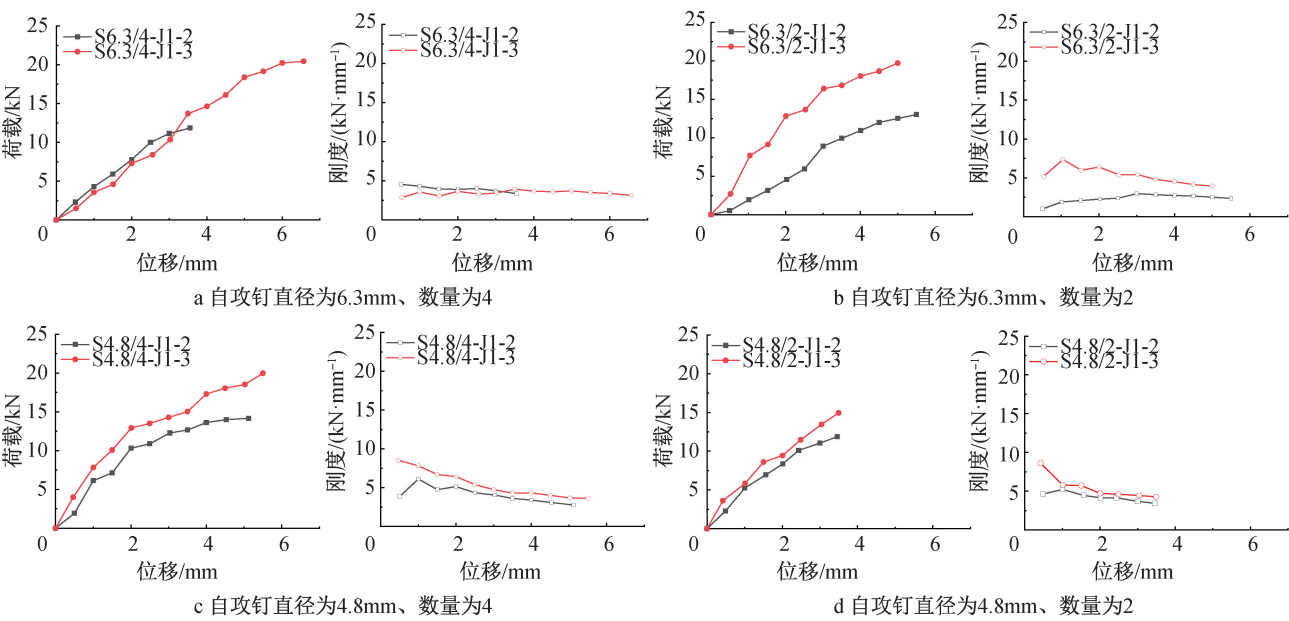


图 7 不同钢筋配筋率下荷载-位移曲线及刚度退化曲线

Fig. 7 Load-displacement and stiffness degradation curves under different reinforcement ratios

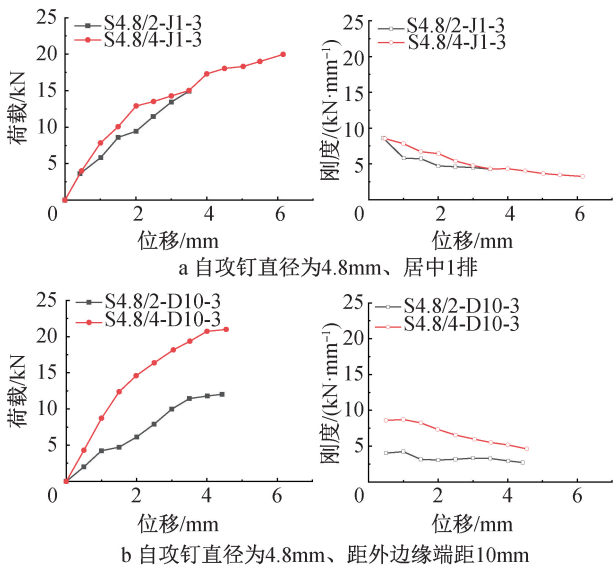


图 8 不同数量自攻钉下荷载-位移曲线及刚度退化曲线

Fig. 8 Load-displacement and stiffness degradation curves under different number of self-tapping screws

特性以模拟自攻钉和钢筋的脆性断裂^[13]。连接钢板、传力钢板和自攻钉采用 C3D8R 钢实体单元,为简化建模,钢筋采用边长为 4mm 的方形截面 C3D8R 实体单元模拟,接触面法向采用硬接触,摩擦系数为 0.3,切向采用罚函数。实际节点中连接钢板一侧焊接于传力钢板,数值模拟中采用绑定 (Tie) 连接。自攻钉网格尺寸设置为 2mm,所有钢板及钢筋网格尺寸设置为 5mm,有限元模型如图 10 所示。

表 3 各试件剪拉比及破坏形式				
Table 3 Shear-tension ratios and failure modes				
for each specimen				
试件编号	自攻钉抗剪承载力/kN	钢筋抗拉承载力/kN	剪拉比	破坏形式
S6. 3/4-J1-3	49. 13	32. 87	1. 5	钢筋拉断
S6. 3/4-J1-2	49. 13	21. 92	2. 4	钢筋拉断
S6. 3/4-D5-3	49. 13	32. 87	1. 5	钢筋拉断
S6. 3/4-D10-3	49. 13	32. 87	1. 5	钢筋拉断
S6. 3/2-J1-3	24. 56	32. 87	0. 8	自攻钉剪断
S6. 3/2-J1-2	24. 56	21. 92	1. 1	钢筋拉断
S6. 3/2-D5-3	24. 56	32. 87	0. 8	钢筋拉断
S6. 3/2-D10-3	24. 56	32. 87	0. 8	钢筋拉断
S4. 8/4-J1-3	25. 12	32. 87	0. 8	钢筋拉断
S4. 8/4-J1-2	25. 12	21. 92	1. 1	钢筋拉断
S4. 8/4-D5-3	25. 12	32. 87	0. 8	钢筋拉断
S4. 8/4-D10-3	25. 12	32. 87	0. 8	钢筋拉断
S4. 8/2-J1-3	12. 56	32. 87	0. 4	自攻钉螺杆剪断
S4. 8/2-J1-2	12. 56	21. 92	0. 6	钢筋拉断
S4. 8/2-D5-3	12. 56	32. 87	0. 4	自攻钉螺杆剪断
S4. 8/2-D10-3	12. 56	32. 87	0. 4	自攻钉螺杆剪断

4.2 模型验证

以 J1 类型试件为代表进行模拟,将试件 S6. 3/2-J1-3, S6. 3/2-J1-2, S4. 8/2-J1-3, S4. 8/2-J1-2 有限元计算结果与试验结果进行对比。试件 S6. 3/2-J1-3 应力如图 11 所示,荷载-位移曲线对比如图 12 所示。

4.3 设计参数分析

装配式自攻钉集块连接节点有限元分析和试验结果吻合良好,可认为有限元模型具有较好的可靠性。在抗拉试件 S4. 8/2-J1-3, S6. 3/2-J1-3 基础

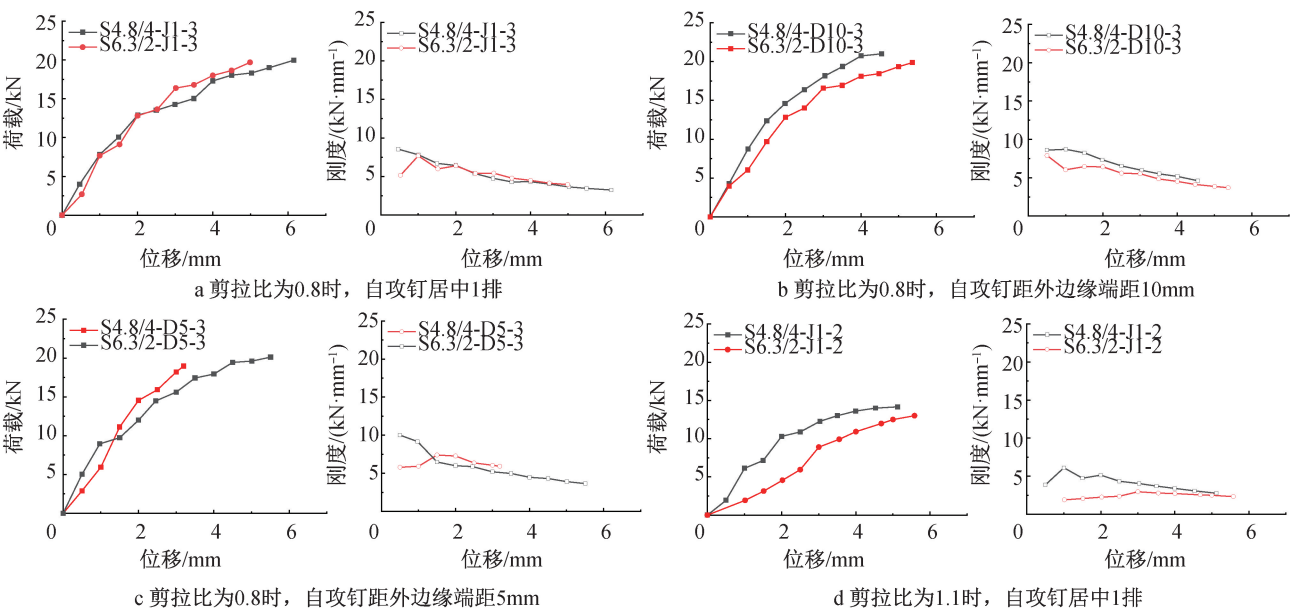


图 9 不同剪拉比下荷载-位移曲线及刚度退化曲线

Fig. 9 Load-displacement and stiffness degradation curves under different shear-tension ratios

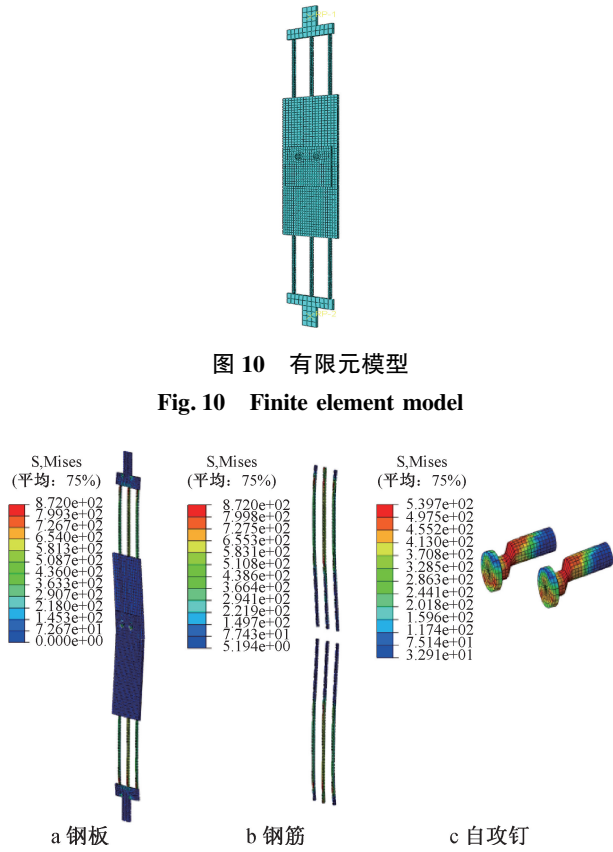


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

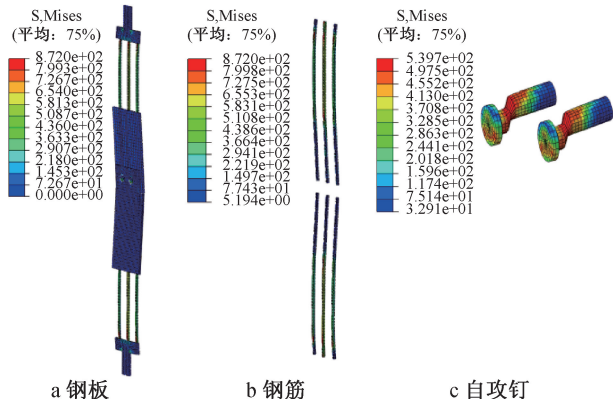


图 11 试件 S6.3/2-J1-3 应力云图(单位:MPa)

Fig. 11 Stress for specimen S6.3/2-J1-3(unit:MPa)

上,分析临界破坏剪拉比取值。

取自攻钉数量为 2 颗、钢筋数量为 3 根,连接钢板屈服强度 400MPa,改变自攻钉强度(200 ~ 450MPa)和钢筋抗拉强度(732 ~ 1 100MPa),维持剪拉比为 0.3~0.8,剪拉比与破坏模式间关系如图

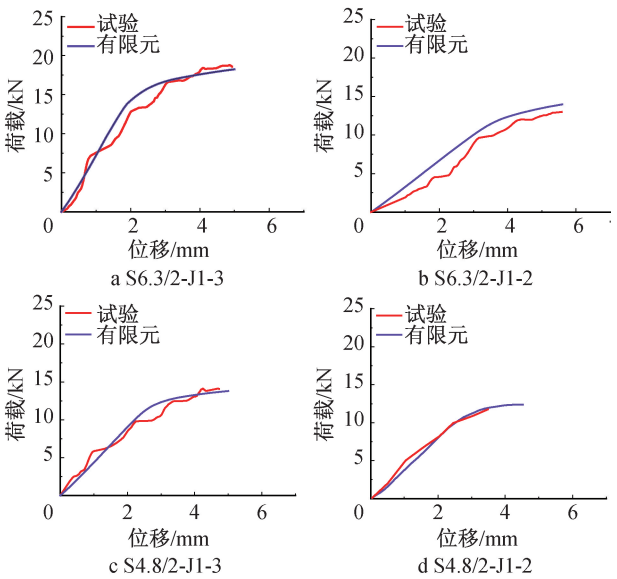


图 12 荷载-位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of load-displacement curves

13 所示。

由图 13 所示模拟数据可知,当试件剪拉比 ≤ 0.51 时,发生自攻钉螺杆剪断破坏;当剪拉比 ≥ 0.76 时,发生钢筋拉断破坏;当剪拉比为 0.51 ~ 0.76 时,2 种破坏模式均可能发生。故试件临界剪拉比为 0.51~0.76。在实际工程设计时,可优先控制剪拉比避开该临界区间,以明确破坏模式并提升节点可靠性。

5 结语

1) 自攻钉集块连接节点抗拉性能受自攻钉布置方式影响不大,因此自攻钉集块连接构造装配便

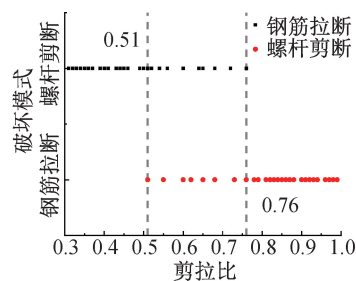


图 13 剪拉比与破坏模式间关系

Fig. 13 Relationship of shear-tension ratios and failure modes

捷、容错率高;当破坏模式由钢筋拉断主导时,钢筋面积增加 33%,自攻钉集块连接节点抗拉承载力平均提高 47%,增加钢筋面积可有效提高试件抗拉能力和中后期刚度;当破坏模式由自攻钉螺杆剪断主导时,自攻钉数量增加 1 倍,自攻钉集块连接节点抗拉承载力提高 30%,增加自攻钉数量可有效提高试件抗拉能力和中后期刚度;当自攻钉集块连接节点采用细而密的自攻钉群连接时,抗拉承载力会略有提高,但中后期刚度提升不显著。自攻钉集块可用于装配式混凝土夹心剪力墙的连接。

2)对自攻钉集块连接节点的抗拉性能进行有限元分析,分析结果与试验结果吻合良好。对不同自攻钉抗剪强度和钢筋抗拉强度进行模拟,研究分析不同剪拉比对自攻钉集块连接节点受力性能的影响。当剪拉比为 0.51~0.76 时,试件处于临界破坏状态,此时 2 种破坏模式均可能发生。

参考文献:

[1] 曹万林,谢晖,杨兆源,等. 自攻钉集块连接混凝土复合剪力墙抗震性能试验[J]. 结构工程师,2024,40(2):136-147.
CAO W L, XIE H, YANG Z Y, et al. Experimental study on seismic performance of concrete composite shear wall with self-tapping nail connection[J]. Structural engineers, 2024, 40(2): 136-147.

[2] YE J H, WANG X X, ZHAO M Y. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing[J]. Journal of constructional steel research, 2016, 121:1-12.

[3] 郭曜楨,潘永超,左亚权,等. 金属屋面自攻螺钉抗剪承载力计算方法的研究与比较分析[J]. 中国建筑防水,2024(8):53-58.
GUO Y Z, PAN Y C, ZUO Y Q, et al. Research and comparative analysis on the calculation method of shearing resistance of self-tapping screw on metal roofs[J]. China building waterproofing,

2024(8):53-58.

[4] 卢林枫,张亚平,方文琦,等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗剪性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):2997-3005.
LU L F, ZHANG Y P, FANG W Q, et al. Experimental investigation on shear-bearing capacity for self-drilling screw connections of cold-formed thin-walled steel[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2013, 44(7):2997-3005.

[5] 黄川. 冷弯薄壁 C 型钢梁柱半刚性节点实验及有限元分析[D]. 重庆:重庆大学,2003.
HUANG C. Experiment and finite element analysis of cold-formed thin-walled C steel beam-column semi-rigid joints[D]. Chongqing:Chongqing University, 2003.

[6] LENNON R, PEDRESCHI R, SINHA B P. Comparative study of some mechanical connections in cold formed steel[J]. Construction and building materials, 1999, 13(3):109-116.

[7] 杨亚龙,姚勇,褚云朋,等. 螺钉端距对自攻螺钉连接抗剪性能的影响研究[J]. 科技信息,2013(23):166-167.
YANG Y L, YAO Y, CHU Y P, et al. Study on the influence of screw end distance on shear performance of self-tapping screw connection[J]. Science & technology information, 2013(23):166-167.

[8] 刘雁,徐远飞,余晨岗. 冷弯薄壁型钢框架剪力墙自攻螺钉节点的试验研究[J]. 钢结构,2011,26(10):25-27,49.
LIU Y, XU Y F, SHE C G. Test research on self-tapping screw joints of cold-formed steel frame shear walls[J]. Steel construction, 2011, 26(10):25-27,49.

[9] 李盼龙. 冷弯方钢管柱自攻螺钉连接拼接节点静力性能研究[D]. 西安:长安大学,2023.
LI P L. Study on static behavior of self-tapping screw connection splicing joints of cold-formed square steel tubular columns[D]. Xi'an:Chang'an University, 2023.

[10] WANG Y Z, ZHOU T H, WANG J Q, et al. Tension performance of joint made in cold-formed square tube with self-tapping screw connections[J]. Structures, 2024, 70:107591.

[11] 王身伟,石宇. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉群连接抗剪承载力计算方法研究[J]. 建筑结构,2013,43(S1):443-447.
WANG S W, SHI Y. Calculation on shear capacity of screws connection in cold-formed thin-wall steel structures[J]. Building structure, 2013, 43(S1):443-447.

[12] TAO Z, WANG Z B, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89:121-131.

[13] CHOUNG J, SHIM C S, SONG H C. Estimation of failure strain of EH36 high strength marine structural steel using average stress triaxiality[J]. Marine structures, 2012, 29(1):1-21.