

doi: 10. 12068/j. issn. 1005 - 3026. 2025. 20230243

预制型钢混凝土边框柱钢板剪力墙连接及其有限元分析

王连广, 沈泽军, 高海洋, 佟永晨
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了满足预制型钢混凝土边框柱钢板剪力墙(SPSW)连接节点的承载能力和变形要求,设计了法兰板-螺栓连接的新型预制型钢混凝土柱-钢板混凝土节点,分别建立预制和现浇节点的有限元模型,对比二者在同一荷载条件下的承载性能,并分析改变混凝土强度等级、内置钢板强度等级与厚度、法兰板厚度、轴压比和螺栓数量等参数对连接节点承载能力及变形的影响. 结果表明,预制节点和现浇节点的受力性能相似,增加混凝土强度等级、螺栓数量和法兰板厚度均能够提高节点的承载能力,改变内置钢板强度等级与厚度对于节点力学性能影响并不大. 设计时建议采用34个螺栓,20 mm厚的内置钢板,15 mm厚的法兰板,轴压比控制在0.7左右.

关键词: 钢板剪力墙; 预制型钢混凝土; 法兰板-螺栓连接; 有限元分析; 承载力

中图分类号: TU 398 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0115-08

Prefabricated Steel Reinforced Concrete Frame Column Steel Plate Shear Wall Connection and Its Finite Element Analysis

WANG Lian-guang, SHEN Ze-jun, GAO Hai-yang, TONG Yong-chen

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHEN Ze-jun, E-mail: 1269189490@qq.com)

Abstract: In order to meet the bearing capacity and deformation requirements of the joint between the prefabricated steel reinforced concrete frame column and the steel plate shear wall (SPSW), the new flange-bolt connection mode were designed and applied between the prefabricated steel reinforced concrete column and the steel plate shear wall. The flange-bolt connection mode was established the finite element model of the prefabricated and cast-in-place joints respectively, and the bearing performance of the two joints under the same load condition was compared. The effects of concrete strength grade, strength grade and thickness of built-in steel plate, thickness of flange plate, axial compression ratio and number of bolts on the bearing capacity and deformation capacity of the connected joint were analyzed. The results show that the mechanical properties of the prefabricated joints are similar to those of the cast-in-place joints. Increasing the concrete strength grade, the number of bolts and the thickness of the flange plate can improve the bearing capacity of the joints, while changing the strength grade of the built-in steel plate has little effect on the mechanical properties of the joints. It is recommended to use 34 bolts, 20 mm thick built-in steel plate, 15 mm thick flange, and the axial compression ratio is controlled at about 0.7.

Key words: steel plate shear wall (SPSW); prefabricated steel reinforced concrete; flange-bolt connection; finite element analysis; bearing capacity

钢板剪力墙(SPSW)是高效的抗侧向力结构体系,具有较高的刚度、强度和延展性以及耗能

能力,可以有效地限制结构的水平侧移,近年来备受学者的关注,目前已大量应用在高烈度地区

收稿日期: 2023-08-27

作者简介: 王连广(1964—),男,辽宁鞍山人,东北大学教授,博士生导师.

的高层建筑中.国内外学者对型钢或钢管混凝土边框柱钢板剪力墙进行了大量的试验研究,结果表明,剪力墙的边框柱首先出现破坏现象,因此需要采用强度足够高的框架体系作为钢板剪力墙的约束构件,对钢板剪力墙结构体系起到加强作用.

针对不同形式钢板剪力墙结构体系的性能研究,Qiao等^[1]提出了一种新型复合剪力墙结构,并对7榀该新型复合剪力墙结构进行低周往复加载试验,以钢管混凝土(CFST)柱的类型、多层钢板数量以及轴压比为主要参数进行试验研究.Zhang等^[2]采用低周往复荷载试验研究了装配式H型钢框架-波纹钢板剪力墙(HCSW)的滞回性能,分析并讨论了波纹钢板宽厚比、宽高比和轴压比对装配式HCSW性能的影响.Parvizi等^[3]在混凝土边界单元中使用单个嵌入式钢带并通过摩擦式螺栓连接将钢板剪力墙与连接带连接,增强抗震和结构性能,并且不会损坏钢板.综上所述,国内外学者通过试验或数值模拟的方法对各类形式钢板剪力墙组合结构的承载能力、耗能能力及刚度退化速度等性能进行了深入研究.上述研究中不同形式的钢板剪力墙与边缘框架之间大多采用现浇方式进行连接,对于装配式结构中的型钢混凝土边框柱-钢板剪力墙连接节点的受力性能研究较少.

针对钢板剪力墙连接方式的研究,Meng等^[4]研究了钢框架-钢板剪力墙(SF-SPSW)体系的抗力机理,提出了用笛卡尔连接器代替螺栓的方法,该方法可以提高外伸端板连接的SF-SPSW结构抗塌陷性能的分析效率.Gorji等^[5]研究了板框架单元屈服强度、板厚和梁柱连接对SPSW结构受力表现和承载力的影响.采用有限元方法设计分析了板框架单元屈服强度、板厚、梁柱连接简单、刚性不同的SPSW模型.Majlesi等^[6]通过数值模拟的方法评估了半刚性连接对钢框架-钢板剪力墙(SF-SPSW)抗侧向位移能力的影响.王康等^[7]研究了方钢管混凝土框架-冷弯薄壁型钢屈曲约束钢板剪力墙结构的抗震性能及框架与剪力墙的连接相互作用机理.综上所述,国内学者对于装配式钢板剪力墙体系连接节点的研究主要集中在梁墙连接和墙柱连接,对于钢板剪力墙拼接节点研究较少.国外虽然已有针对钢板剪力墙体系模块化拼接性能的研究,但局限于研究连接方式对整体抗震性能的影响,没有全面地、具

体地分析影响节点承载能力及整体承载能力的相关因素.

本文提出采用法兰板-螺栓连接的预制型钢混凝土边框柱钢板剪力墙结构,并选取法兰板-螺栓连接方式,采用ABAQUS有限元软件进行数值模拟计算,建立了预制构件和现浇构件的有限元模型,比较二者受力性能的差异,分析混凝土强度等级、内置钢板厚度、螺栓数量等参数对预制构件承载能力的影响,从而优化连接节点构造设计.

1 法兰板-螺栓连接方式

1) 外法兰板-螺栓连接.型钢混凝土柱内布置箍筋及工字钢,钢筋延伸至构件外部;剪力墙进行预制并内置钢板.型钢混凝土柱及钢板混凝土剪力墙边缘布置预留螺栓孔及钢筋孔的法兰板.构件对齐,将延伸钢筋穿过法兰板预留孔,通过高强螺栓相连,并在预留孔及螺栓处浇筑高强混凝土或高强砂浆,完成外法兰板-螺栓连接构件的安装.为保障耐久性,外法兰板及连接螺栓应选用高强度、耐腐蚀材料,以确保长期稳定性.同时,采取防腐措施,如热喷塑防腐技术或涂覆防锈漆,保护螺栓免受环境腐蚀;定期对法兰板及螺栓进行检查,包括外观、紧固件松动情况,如更换损坏螺栓、重新拧紧松动件,确保连接安全可靠.具体结构见图1.

2) 内法兰板-螺栓连接.构件两端的型钢混凝土柱与钢板剪力墙采用整体预制的形式,型钢混凝土柱内布置纵向钢筋、箍筋及工字钢;剪力墙内置钢板,边缘布置预留螺栓孔的法兰板,并与内置钢板进行焊接.将两侧法兰板对齐,通过高强螺栓将两者连接,连接过后在连接位置处浇筑高强混凝土或高强砂浆并找平,完成内法兰板-螺栓连接构件的安装.具体结构见图1.

2 法兰板-螺栓连接节点受力模拟

2.1 本构模型

有限元模拟中的混凝土采用塑性损伤模型,该模型考虑了在拉伸和压缩过程中由于塑性应变引起的混凝土弹性刚度退化问题^[8],参考《GB50010—2010 混凝土结构设计规范》^[9]和文献^[8]中给出的混凝土单轴应力-应变曲线.

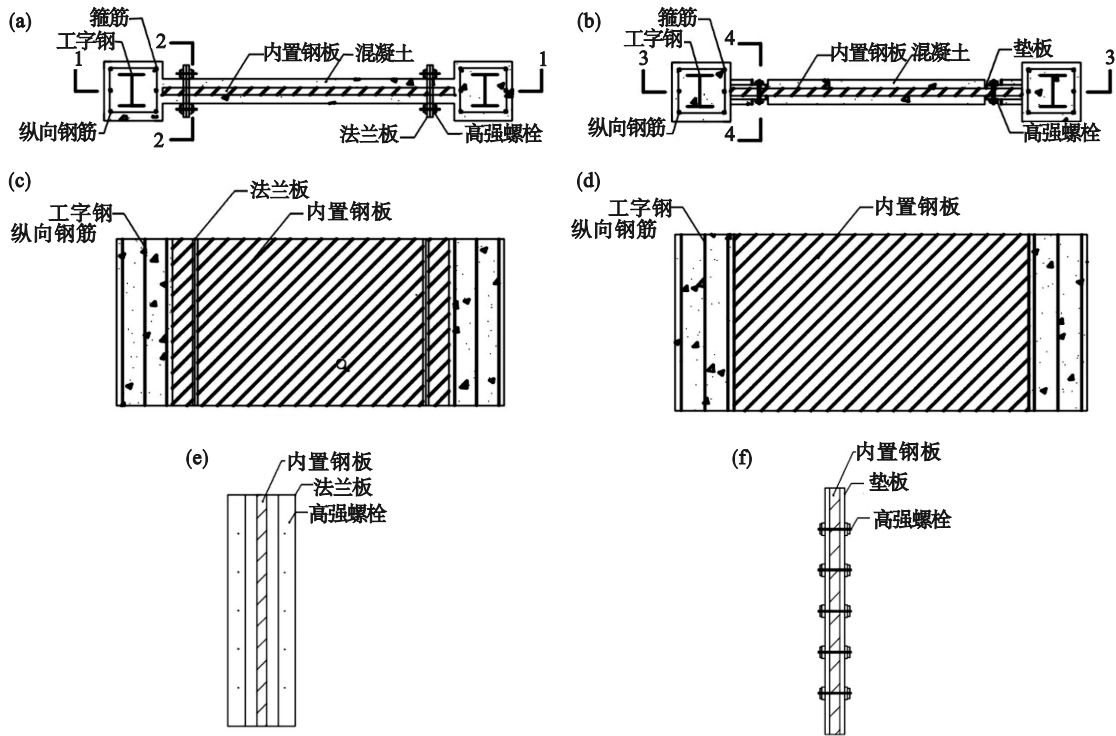


图 1 法兰板-螺栓连接的钢板混凝土剪力墙结构

Fig. 1 Flange plate-bolted steel plate reinforced concrete shear wall structure

(a)—外法兰板-螺栓连接的剪力墙; (b)—内法兰板-螺栓连接的剪力墙; (c)—1-1 剖面图; (d)—3-3 剖面图; (e)—2-2 剖面图; (f)—4-4 剖面图.

钢材本构模型采用理想弹塑性模型, 钢筋泊松比取 0.3. 模型中钢板、法兰板、纵筋、箍筋的力学性能指标见表 1.

表 1 钢材力学性能指标
Table 1 Mechanical performance indices of steel

型号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
HPB300	300	420	210 000	0.3
HRB400	400	540	200 000	0.3
Q235	235	440	206 000	0.3
Q355	355	630	206 000	0.3
Q390	390	580	206 000	0.3
Q420	420	680	206 000	0.3

2.2 模型参数

为了对比预制钢板混凝土剪力墙的连接节点与现浇型钢混凝土剪力墙的承载性能, 分析不同参数对预制构件连接节点受力性能的影响, 建立了 1 个现浇构件和 22 个预制构件有限元模型. 模型由剪力墙、法兰板及高强螺栓组成.

剪力墙截面尺寸为 1 800 mm×200 mm, 墙高 1 500 mm, 墙内中间纵筋型号为 4C8, 构件边缘纵筋型号为 8C12, 箍筋型号为 C6@150, 墙内钢筋均采用 HRB400 钢材, 墙内部布置不同厚度钢板.

法兰板尺寸为 1 800 mm×300 mm, 选取

Q355 钢材, 在法兰板周围布置的高强螺栓采用 8.8 级 M16. 模型的基本参数见表 2.

2.3 单元选取和材料属性定义

在现浇和预制三维有限元模型中, 混凝土、内置钢板、工字钢、法兰板、垫板和高强螺栓均采用三维实体单元(C3D8R)进行建模, 钢筋采用三维二节点线性桁架(T3D2)进行建模.

2.4 建立模型和网格划分

为了避免加载过程中端部发生过大塑性变形而引发结果不收敛的情况, 同时方便提取数据, 在剪力墙顶部设置与剪力墙侧面耦合的参考

点,现浇和预制钢板混凝土剪力墙连接节点有限元模型装配图,见图 2 和图 3.

表 2 法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙模型参数
Table 2 Model parameters of flange plate-bolted steel plate reinforced concrete shear wall

剪力墙编号	内置钢板厚度/mm	内置钢板强度等级	混凝土强度等级	螺栓数/个	法兰板厚度/mm	轴压比
SW2-1	5	Q235	C30	34	10	0.2
SW2-2	5	Q235	C40	34	10	0.2
SW2-3	5	Q235	C50	34	10	0.2
SW2-4	5	Q235	C60	34	10	0.2
SW2-5	3	Q235	C30	34	10	0.2
SW2-6	10	Q235	C30	34	10	0.2
SW2-7	15	Q235	C30	34	10	0.2
SW2-8	20	Q235	C30	34	10	0.2
SW2-9	5	Q235	C30	30	10	0.2
SW2-10	5	Q235	C30	26	10	0.2
SW2-11	5	Q235	C30	22	10	0.2
SW2-12	5	Q235	C30	34	10	0.4
SW2-13	5	Q235	C30	34	10	0.6
SW2-14	5	Q235	C30	34	10	0.7
SW2-15	5	Q235	C30	34	10	0.8
SW2-16	5	Q355	C30	34	10	0.2
SW2-17	5	Q390	C30	34	10	0.2
SW2-18	5	Q420	C30	34	10	0.2
SW2-19	5	Q235	C30	34	5	0.2
SW2-20	5	Q235	C30	34	12.5	0.2
SW2-21	5	Q235	C30	34	15	0.2
SW2-22	5	Q235	C30	34	20	0.2
SW2-23	5	Q235	C30	—	—	0.2

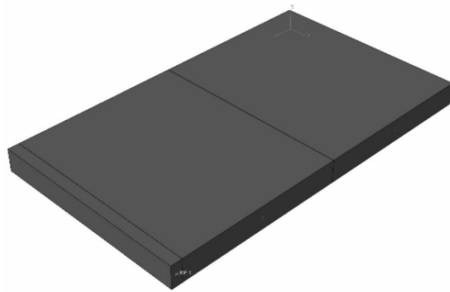


图 2 现浇钢板混凝土剪力墙模型

Fig. 2 Model of cast-in-place steel plate concrete shear wall

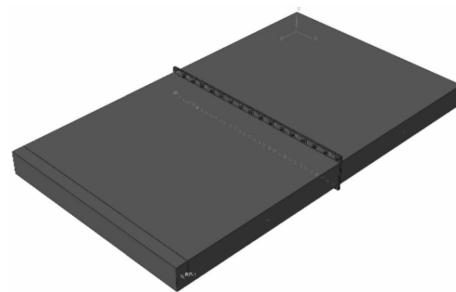


图 3 预制法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙模型

Fig. 3 Model of precast flange plate-bolted steel plate concrete shear wall

模型中的混凝土、垫板、钢筋、工字钢、钢板等规则部件采用结构网格划分;法兰板与螺栓采用扫掠网格划分.完成网格划分后的现浇及预制钢板混凝土剪力墙连接节点的网格划分,见图 4.

2.5 约束边界条件及加载方式

剪力墙边界条件为顶端自由、底端固结,法兰板与剪力墙采用绑定约束连接;钢筋及钢板被混凝土包裹在内,采用内置约束;法兰板与法兰板、螺栓杆与螺栓孔、螺母与法兰板需考虑构

件之间接触面的摩擦作用,故采用面-面接触连接,摩擦系数取 0.3.

根据模型的加载情况定义分析步,对于现浇模型设置 2 个分析步,第 1 步在剪力墙顶部按轴压比设计值施加均布荷载;第 2 步在剪力墙顶端侧向施加水平位移,采用一次性经历加载方式.

对于预制模型,考虑对高强螺栓施加预紧力,为保证计算收敛,设置 5 个分析步:①逐个对螺栓施加全部预紧力的 20%;②对螺栓施加全部

预紧力;③将螺栓预紧力更改为固定当前螺栓长度;④在剪力墙顶部耦合的参考点分别根据轴压比设计值在预制型钢混凝土边框柱钢板剪力墙

顶部施加相应的均布荷载;⑤在剪力墙顶部采用一次性静力位移加载方式施加侧向水平位移荷载。

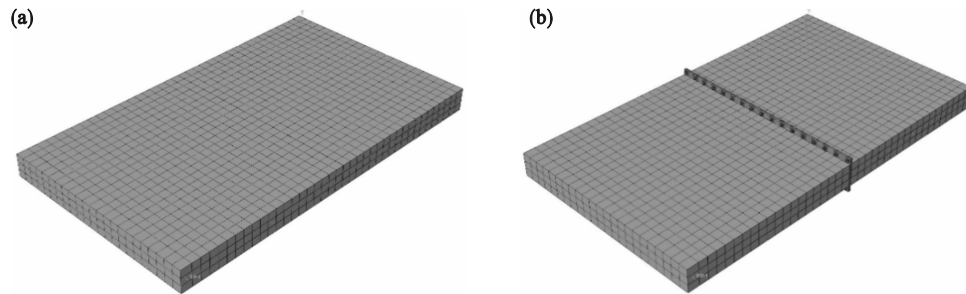


图4 钢板混凝土剪力墙连接节点网格划分

Fig. 4 Grid division of steel plate reinforced concrete shear wall joints
(a)—现浇钢板混凝土; (b)—预制钢板混凝土。

3 数值模拟结果分析

3.1 现浇和预制构件受力对比

预制法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙各部件应力分布见图5。从应力云图中可以看出预

制剪力墙构件中的混凝土和钢板单元的破坏过程与形式相近,应力主要集中在剪力墙法兰板与混凝土交界面受压端。当构件达到峰值荷载时,混凝土及钢板受拉区尚未达到屈服状态,高强螺栓杆及法兰板螺栓交界面已达到屈服状态。模型SW2-1与SW2-23剪力墙荷载-位移曲线对比见图6。

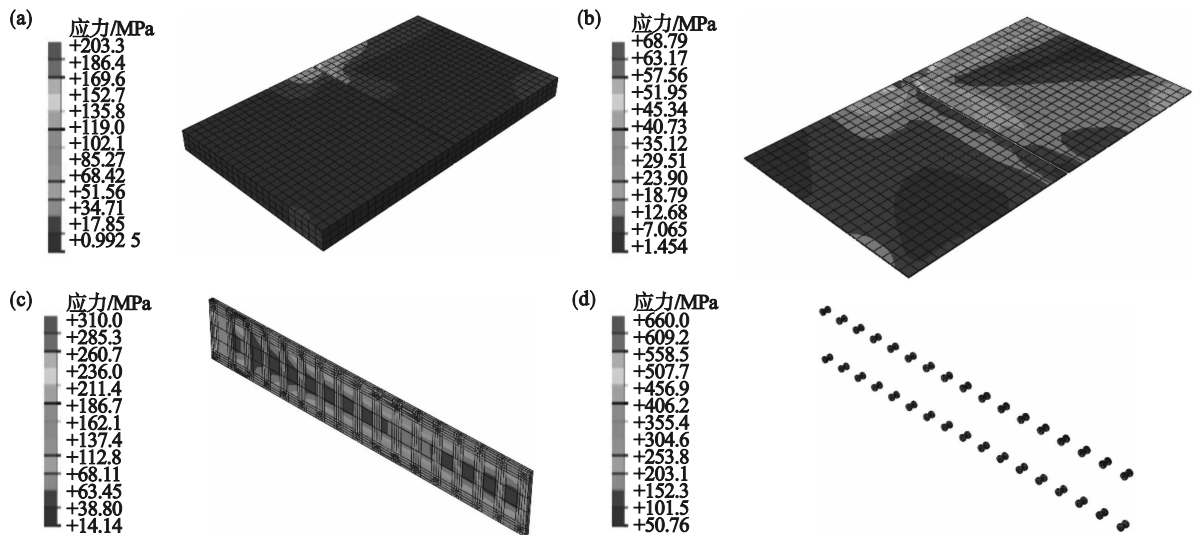


图5 预制法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙各部件应力分布

Fig. 5 Stress distribution of various components of prefabricated flange plate-bolted steel plate reinforced concrete shear wall

(a)—混凝土单元; (b)—钢板单元; (c)—法兰板单元; (d)—螺栓单元。

SW2-1 预制模型与SW2-23 现浇模型的荷载-位移曲线形状无明显差异。在结构受力的弹性阶段,现浇及预制模型的荷载-位移曲线基本重合,且初始刚度值大致相同。在结构受力的强化阶段,现浇及预制模型的荷载-位移曲线也基本重合。随着侧向位移的不断增大,SW2-1 预制模型相较于SW2-23 现浇模型,屈服荷载提高了0.59%,极限荷载提高了0.44%,说明钢板和预埋

螺栓对于提高节点承载力有一定的促进作用。

3.2 设计参数分析

为了进一步探究预制法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙节点性能,建立不同参数的有限元模型,分析混凝土强度等级、内置钢板厚度、螺栓数量、等相关参数对结构受力性能的影响,从而对剪力墙连接节点的构造进行优化。

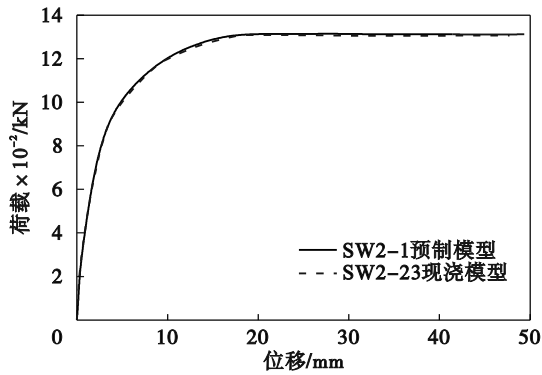


图6 SW2-1和SW2-23荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of SW2-1 and SW2-23

3.2.1 螺栓数量的影响

建立SW2-1, SW2-9, SW2-10和SW2-11模型, 螺栓数量分别为34, 30, 26和22个, 分析螺栓数量对剪力墙的影响, 计算得到螺栓数量对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响, 见图7.

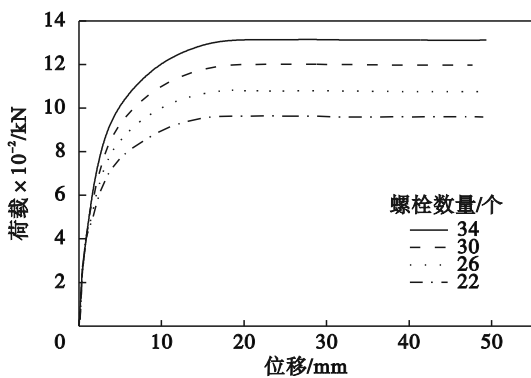


图7 螺栓数量对荷载-位移曲线的影响

Fig. 7 Effect of bolt number on load-displacement curves

在加载初期, 构件处于弹性阶段的曲线基本呈线性增长, 进入弹塑性阶段后曲线呈非线性增长, 进入强化阶段后曲线趋于平缓. 弹性阶段, 不同螺栓数量的预制构件荷载-位移曲线基本一致, 说明螺栓数量对于构件刚度几乎没有影响. 曲线开始进入弯曲阶段时, 可以看到随着螺栓数量的增大, 构件刚度退化的速度逐渐减弱, 说明螺栓数量的增加会延缓刚度退化. 当螺栓数量从22提高到26, 30和34个时, 构件的极限荷载提高了12.25%, 24.48和36.36%, 构件的极限位移无明显变化.

综上所述, 当螺栓数量为34个时对应的节点承载力最好, 且满足规范最小螺距要求, 因此本文建议采用配置34个螺栓的预制法兰板螺栓连接钢板混凝土剪力墙.

3.2.2 混凝土强度等级的影响

建立SW2-1, SW2-2, SW2-3和SW2-4模型, 其混凝土强度等级分别为C30, C40, C50和C60. 分析混凝土强度等级对剪力墙的影响, 计算得到混凝土强度等级对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响, 见图8.

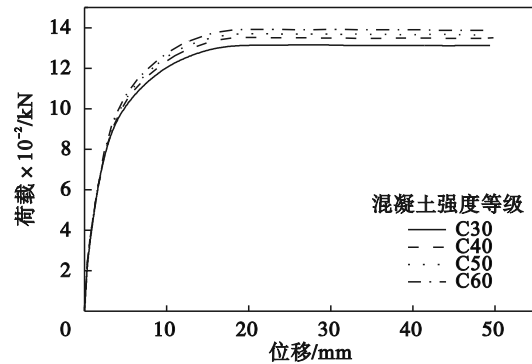


图8 混凝土强度等级对荷载-位移曲线的影响

Fig. 8 Effect of concrete strength grade on load-displacement curves

在结构受力的弹性阶段, 不同混凝土强度等级的预制剪力墙在弹性阶段的刚度差异不大. 通过延性系数的计算发现, 混凝土强度等级对构件的延性没有明显影响. 极限荷载和屈服荷载都随着混凝土强度等级的增加而增加. 当混凝土强度等级由C30提高到C40, C50和C60时, 屈服荷载分别提高了2.25%, 3.75%和7.75%, 极限荷载分别提高了3.04%, 4.50%和6.35%. 在进行设计时可以通过提高混凝土强度等级的方式提高构件的节点承载力.

3.2.3 轴压比的影响

建立SW2-1, SW2-12, SW2-13, SW2-14和SW2-15模型, 轴压比分别为0.2, 0.4, 0.6, 0.7和0.8. 分析轴压比对剪力墙的影响, 计算得到轴压比对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响, 见图9.

可以看出, 在结构受力的弹性阶段, 各预制剪力墙刚度无明显区别. 在结构受力的弹塑性阶段, 各预制剪力墙的屈服荷载及极限荷载随着设计轴压比的增大而增大, 提高轴压比对于提高预制构件的水平极限承载力有效果. 当构件轴压比从0.2提高到0.4, 0.6, 0.7和0.8时, 预制剪力墙构件屈服荷载分别提高了4.48%, 8.39%, 14.63%和15.92%; 极限荷载分别提高了6.00%, 13.27%, 18.92%和19.99%. 随着构件轴压比的增大, 构件延性不断增大. 当构件轴压比超过0.7时, 预制剪

力墙极限荷载及屈服荷载的增加速度逐渐放缓,差别不明显.故本文选用的轴压比建议控制在0.7左右.

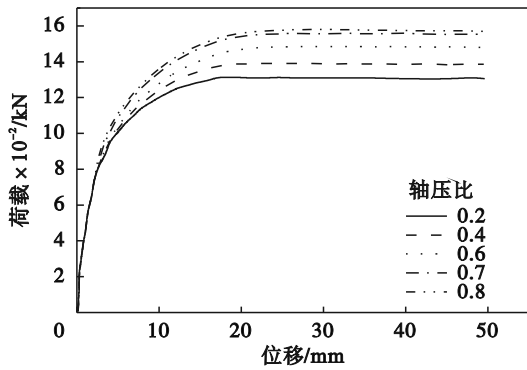


图9 轴压比对荷载-位移曲线的影响
Fig. 9 Effect of axial compression ratio on load-displacement curves

3.2.4 内置钢板厚度的影响

建立 SW2-1, SW2-5, SW2-6, SW2-7 和 SW2-8 模型,钢板厚度分别为 5, 3, 10, 15 和 20 mm,分析内置钢板厚度对剪力墙的影响,计算得到内置钢板厚度对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响,见图10.

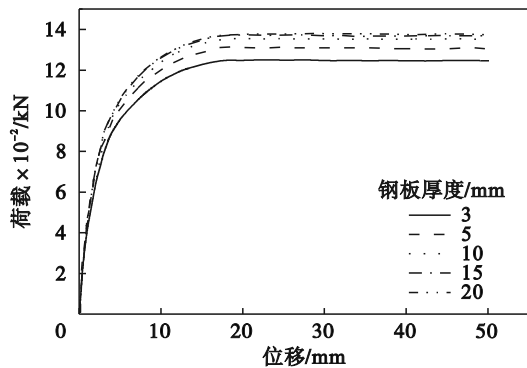


图10 内置钢板厚度对荷载-位移曲线的影响
Fig. 10 Effect of thickness of internal steel plate on load-displacement curves

可以看出,当钢板厚度由3 mm增加到5 mm时,节点的屈服荷载提高了5.74%,极限荷载提高了5.31%;当内置钢板厚度由5 mm增加到10 mm时,节点的屈服荷载提高了4.00%,极限荷载提高了3.11%;当内置钢板厚度由10 mm增加到15 mm时,节点的屈服荷载提高了2.65%,极限荷载提高了1.26%;当内置钢板厚度由15 mm增加到20 mm时,节点的屈服荷载降低了1.17%,极限荷载提高了0.46%.随着内置钢板厚度的增加,水平屈服荷载和极限荷载涨幅较小,构件延性变化不大,考虑造价成本等因素,设计时建议将内置

钢板厚度控制在20 mm以内.

3.2.5 内置钢板强度等级的影响

建立 SW2-1, SW2-16, SW2-17 和 SW2-18 模型,内置钢板强度等级分别为 Q235, Q355, Q390 和 Q420.分析内置钢板强度等级对剪力墙的影响,计算得到内置钢板强度等级对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响,见图11.

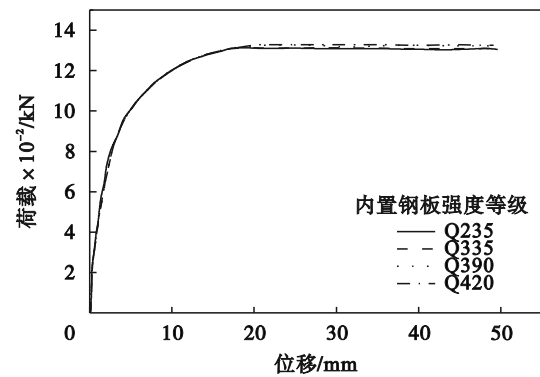


图11 内置钢板强度等级对荷载-位移曲线的影响
Fig. 11 Effect of strength grade of built-in steel plate on load-displacement curves

随着内置钢板强度的增加,钢板的屈服荷载和极限荷载有增大的趋势,但是涨幅不大,同时对于延性没有明显影响.当钢板从Q235提升到Q420时,构件屈服荷载和极限荷载分别提高了2.68%和1.10%,通过增加钢板强度等级来提高构件承载力的效率相对较低.

3.2.6 法兰板厚度的影响

建立 SW2-1, SW2-19, SW2-20, SW2-21 和 SW2-22 模型,法兰板厚度分别为 10, 5, 12.5, 15 和 20 mm.分析法兰板厚度对剪力墙的影响,计算得到法兰板厚度对各剪力墙模型的荷载-位移曲线的影响,见图12.

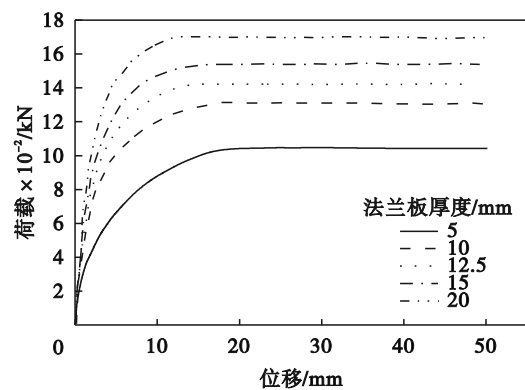


图12 法兰板厚度对荷载-位移曲线的影响
Fig. 12 Effect of thickness of flange on load-displacement curves

在结构受力的弹性阶段,不同厚度法兰板钢板剪力墙刚度存在明显差异,刚度随着法兰板厚度的增加而增加.在结构受力的弹塑性阶段,各预制剪力墙的屈服荷载及极限荷载随着法兰板厚度的增大而增大.当法兰板厚度从 5 mm 提高到 20 mm 时,预制剪力墙的屈服荷载分别提高了 66.10%, 69.62% 和 12.14%; 极限荷载分别提高了 25.49%, 17.40% 和 10.28%. 随着法兰板厚度的增加,构件的延性稍有降低.在进行设计时可以通过增加法兰板厚度的方式提高构件的节点承载力.

4 结 论

1) 设计了法兰板-螺栓连接预制型钢混凝土柱-钢板混凝土剪力墙连接节点.通过对比分析可知,通过法兰板-螺栓连接的预制构件的受力性能与现浇构件相当.

2) 预制法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙各部件应力发展与现浇节点应力发展相似.预制剪力墙构件中的混凝土和钢板单元的破坏过程与形式相近,应力主要集中在剪力墙法兰板与混凝土交界面受压端.当构件达到峰值荷载时,混凝土及钢板受拉区尚未达到屈服状态,高强螺栓杆及法兰板-螺栓交界面已达到屈服状态.

3) 对于法兰板-螺栓连接钢板混凝土剪力墙的连接节点,增加混凝土强度等级、螺栓数量和法兰板厚度均能够提高节点的承载能力.对于改变内置钢板强度等级及内置钢板厚度,水平屈服荷载和极限荷载涨幅较小,构件延性变化不大,考虑造价成本等因素,设计时建议将内置钢板厚度控制在 20 mm 以内,轴压比控制在 0.7 左右.

参考文献:

- [1] Qiao Q Y, Cao W L, Li X Y, et al. Seismic behavior of shear walls with boundary CFST columns and embedded multiple steel plates: experimental investigation [J]. *Engineering Structures*, 2018, 160: 243-256.
- [2] Zhang X Y, Chen Y, Qiao H Y, et al. Investigation on hysteretic performance of assembled H-shaped steel frame-corrugated steel plate shear wall with different corrugated orientation and wavelength [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77: 107473.
- [3] Parvizi M, Fathi M, Zamani S S M, et al. Experimental and numerical study of concrete frames with steel plate shear walls [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 196: 107404.
- [4] Meng B, Hao J P, Zhong W H. Numerical study on the anti-progressive collapse performance of steel frame-steel plate shear wall structures [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102049.
- [5] Gorji A M, Gholhaki M, Ali K M, et al. Study of effects of beam-column connection and column rigidity on the performance of SPSW system [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101821.
- [6] Majlesi A, Asadi-Ghoozhdhi H, Bamshad O, et al. On the seismic evaluation of steel frames laterally braced with perforated steel plate shear walls considering semi-rigid connections [J]. *Buildings*, 2022, 12(9): 1427.
- [7] 王康, 陈庆, 王宇航, 等. 方钢管混凝土框架-两边连接屈曲约束钢板剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(sup2): 391-399.
(Wang Kang, Chen Qing, Wang Yu-hang, et al. Experimental study on buckling-restrained steel plate shear walls connected to beams only with concrete-filled square steel tubular frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(sup2): 391-399.)
- [8] Richard L J Y, Yan J B, Huang Z Y. Steel-concrete-steel sandwich composite structures-recent innovations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 130: 202-221.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)