



纵筋合并连接的装配式钢筋混凝土剪力墙 平面内受力性能

刘立平¹, 余杰¹, 廖东峰², 刘及进³, 邓小华⁴, 李英民¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆长厦安基建筑设计有限公司, 重庆 401324;
3. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013; 4. 重庆市设计院, 重庆 400015)

摘要:钢筋混凝土剪力墙的钢筋数量较多而直径较小, 装配时钢筋的连接工作量大且质量不易保证, 纵筋合并连接是一种可能的解决方案。基于剪力墙截面设计方法分析了纵筋合并连接的可行性; 通过3个剪力墙试件的拟静力试验验证了纵筋合并连接的有效性; 采用有限元模拟方法分析了不同纵筋合并连接的装配式钢筋混凝土剪力墙受力性能。结果表明: 当连接钢筋截面面积(强度)不小于原配筋截面面积(强度)且沿墙长均匀分布时, 纵筋合并连接的装配式钢筋混凝土剪力墙仍表现出较好的抗震性能; 边缘构件纵筋合并连接的剪力墙延性可能降低, 宜慎重采用; 分布钢筋采用合并连接对剪力墙的平面内受力性能影响较小, 是一种较合理的合并连接方式, 但连接钢筋布置位置宜沿墙长均匀分布, 而不应集中于中性轴附近; 未考虑纵筋合并连接对装配式钢筋混凝土剪力墙平面外受力性能、墙体抗裂性能及抗冲击能力等的削弱, 因此, 在应用时要考虑到此局限性。

关键词: 装配式剪力墙; 纵筋合并连接; 拟静力试验; 有限元分析; 受力性能

中图分类号: TU317.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)06-0135-08

In-plane mechanical properties of assembled reinforced concrete shear walls with longitudinal reinforcements combined by connecting rebars

Liu Liping¹, Yu Jie¹, Liao Dongfeng², Liu Jijin³, Deng Xiaohua⁴, Li Yingmin¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Changxia Anji Architectural Design Co., Ltd., Chongqing 401324, P. R. China; 3. CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 400013, P. R. China; 4. Chongqing Architectural Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400015, P. R. China)

Abstract: The number of steel bars in reinforced concrete shear walls is generally large while the diameter is small, making the workload of connections heavy and the quality difficult to guarantee in assembling. In such a case, the longitudinal reinforcement combined connection is a possible solution. Based on the section design method, the feasibility of the longitudinal reinforcement combined connection is analyzed, which is verified through the quasi-static test of three shear wall specimens. The mechanical behavior of assembled reinforced concrete shear walls with different connecting rebars is analysed by finite element simulation

收稿日期: 2019-02-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701506)

作者简介: 刘立平(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震研究, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn.

Received: 2019-02-15

Foundation item: National Key Research and Development Project(No. 2016YFC0701506)

Author brief: Liu Liping (1971-), professor, doctoral supervisor, main research instetest: earthquake resistance of engineering structures, E-mail: liuliping@cqu.edu.cn.

method. The results show that the assembled reinforced concrete shear walls with connecting rebars equalizes to the original reinforcements in terms of area and strength and evenly distributed along the wall length still exhibit good seismic performance. It is indicated that the ductility of shear walls with connecting rebars in edge members may be reduced. Therefore, it is advised to adopt it with caution. It has little effect on the in-plane mechanical properties of shear walls to combine the distributed steel bars by connecting rebars, which is a more reasonable way of combining connections, but the location of the connecting rebars should be evenly distributed along the wall length rather than concentrated near the neutral axis. The out-of-plane mechanical behavior, crack resistance and impact resistance of the assembled reinforced concrete shear wall with longitudinal reinforcements combined by connecting rebars are not considered in this study, which should be taken into account in further application.

Keywords: assembled shear wall; longitudinal bar combined connection; quasi-static test; finite element analysis; mechanical behavior

装配式钢筋混凝土剪力墙结构是一种比较容易实现工业化的建筑结构体系,主要优点是结构承载力与刚度较好^[1],现场施工效率高,劳动强度低,便于广泛应用。装配式钢筋混凝土剪力墙的上下墙片通过竖向钢筋连接成为整体,按构造形式不同可分为套筒浆锚连接、搭接浆锚连接、现浇段连接、混合连接、螺栓连接5类^[2],而竖向钢筋的连接质量直接决定了装配式钢筋混凝土剪力墙结构的受力和抗震性能。Soudki等^[3-5]进行了钢筋机械连接、焊接连接、螺栓连接、软钢加固、后张无粘结预应力筋等不同连接形式的装配式剪力墙试验,证明了上述连接方式应用于地震区的可行性。钱稼茹等^[6]通过试验发现,竖向钢筋采用套筒浆锚连接的装配式钢筋混凝土剪力墙具有很好的抗震性能,其压弯承载力、刚度和耗能能力与现浇剪力墙相当,其弹塑性变形能力满足现行规范要求。然而钢筋混凝土剪力墙中钢筋数量较多而直径较小,装配时,钢筋连接工作量大,连接质量不易保证。如果将钢筋混凝土剪力墙的纵筋通过连接钢筋进行合并连接,则会减少连接钢筋的数量,增加连接钢筋的直径,有利于提高钢筋的连接质量。张微敬等^[7]通过3个试件的拟静力试验,探讨了预制剪力墙竖向分布钢筋单排连接的可行性,但仅考虑了分布钢筋的单排连接,且未给出连接钢筋的布置建议。刘程炜等^[8]通过研究发现,在低轴压比下,半装配式单排配筋剪力墙具有较好的承载力和耗能能力,但目前还没有装配式剪力墙纵筋合并连接方面的研究成果。本文针对双面配筋的钢筋混凝土剪力墙,采用理论、试验和数值模拟方法,分析纵筋合并连接在装配式钢筋混凝土剪力墙中的适用性,并研究其受力性能,给出较合理的连接钢筋布置方式,为简化装配式剪力墙的钢筋连接提

供参考。

1 纵筋合并连接可行性分析

钢筋混凝土剪力墙设计时,一般仅考虑其承担平面内的弯矩、剪力及竖向力,而忽略其平面外的承载能力。理论上,当钢筋锚固满足要求且其他参数不变时,只要并筋前后的钢筋截面面积相等,则剪力墙所承受的竖向力和水平剪力不变。当剪力墙受弯矩作用或大偏心受力时,以矩形截面为例,中国现行设计规范^[9]忽略了剪力墙离受压区边缘为 $1.5x$ (x 为名义受压区高度)范围内的所有分布纵筋的作用,按式(1)和式(2)计算承载力。因此,当钢筋锚固满足要求且其他参数不变时,若距中性轴相等位置的纵筋截面面积与其连接钢筋截面面积相等,则剪力墙的受弯承载力不变。所以,从受力性能角度,在装配式剪力墙中采用纵筋合并连接具有一定的可行性。但同时要注意到,钢筋混凝土剪力墙设计时除应满足承载力外,还应具有一定的延性和耗能能力,并满足相应的构造要求。

$$N_u = \alpha_1 f_c b_w x - f_{yw} A_{sw} \cdot \frac{h_w 0 - 1.5x}{h_{w0}} \quad (1)$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b_w x \left(h_{w0} - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s (h_{w0} - a_s) - f_{yw} A_{sw} \cdot \frac{(h_{w0} - 1.5x)^2}{2h_{w0}} \quad (2)$$

式中: a_s 为剪力墙受压端部钢筋合力点到受压边缘的距离; b_w 、 h_{w0} 分别为剪力墙截面宽度和有效高度; A_s 和 A_{sw} 分别为剪力墙端部受压钢筋和竖向分布钢筋面积; f_y 和 f_{yw} 分别为剪力墙端部受压钢筋和竖向分布钢筋强度设计值; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; α_1 为受压区混凝土矩形应力图的应力与混凝土轴心抗压强度设计值的比值。

提出如图 1 所示的纵筋合并连接构造方式以及钢筋混凝土剪力墙纵筋合并连接的基本要求:1)连接钢筋的截面面积(强度)应不小于原纵筋截面面积(强度);2)距中性轴相等位置,合并后的纵筋截面面积不宜小于原纵筋截面面积;3)不宜全部纵筋均采用合并连接,需有部分纵筋对接直接传力;4)连接钢筋能够有效传力且满足锚固要求。

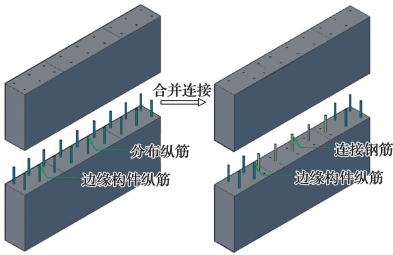


图 1 连接构造示意图

Fig. 1 Connection details sketch

2 试验研究

为了考察纵筋合并连接在装配式钢筋混凝土剪力墙中的适用性,设计了 3 个钢筋混凝土剪力墙试件^[10-11],分别是 1 个现浇钢筋混凝土剪力墙试件(编号为 XJQ)、1 个套筒-搭接连接装配式混凝土剪力墙试件(编号为 DTQ)和 1 个部分纵筋合并连接混凝土剪力墙试件(编号为 DPQ)。3 个试件均由加载梁、基础梁及剪力墙墙体 3 部分组成,其设计参数见表 1,试件尺寸及配筋如图 2 所示。混凝土设计强度等级为 C30,其实测标准试块强度平均值 XJQ 为 35.2 MPa,DTQ 为 38.7 MPa,DPQ 为 29.1 MPa;钢筋采用 HRB400,其实测力学性能如表 2 所示。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

| 试件 | 连接方式 | 试验轴压比 | 纵筋合并连接 |
|-----|---------|-------|--------|
| XJQ | 现浇构件 | 0.11 | 否 |
| DTQ | 套筒-搭接连接 | 0.11 | 否 |
| DPQ | 套筒-搭接连接 | 0.11 | 部分 |

表 2 钢材的力学性能

Table 2 Material properties of steel

| 试件编号 | 钢材直径/mm | f_y /MPa | f_u /MPa | E_s /GPa | $\epsilon_y/10^{-6}$ |
|------|---------|------------|------------|------------|----------------------|
| XJQ | 14 | 475.0 | 1001.7 | 184.0 | 2 584.3 |
| DTQ | 8 | 531.7 | 623.3 | 232.0 | 2 293.7 |
| DPQ | 14 | 467.0 | 615.3 | 196.8 | 2 376.7 |
| | 8 | 460.6 | 614.8 | 199.0 | 2 357.7 |

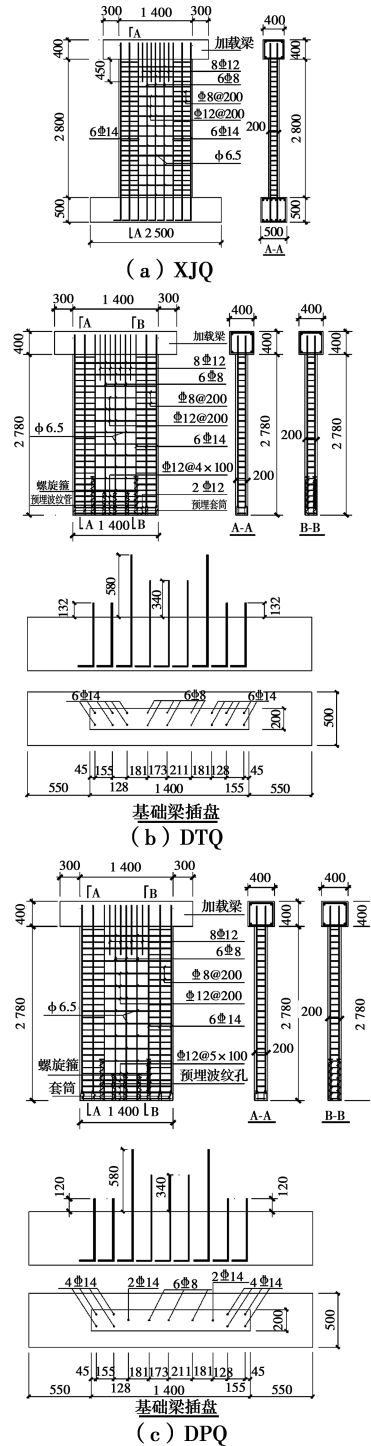


图 2 试件尺寸及配筋详图

Fig. 2 Dimension and reinforcement details of specimens

对上述 3 个试件进行拟静力试验。试件开裂前,采用水平力控制并以预估开裂荷载的 50%为初始荷载分级加载,每级水平力以 10 kN 为级差往复一次;试件开裂后,采用水平位移控制加载,每级位移循环两次,直至试件承载力降低到峰值荷载的 85%以下,或试件无法稳定地承受反复荷载时,停止加载。试件的破坏如图 3 所示,3 个试件均发生弯

曲破坏,其中,试件 XJQ 与试件 DTQ 均表现为边缘构件纵筋屈服、墙角混凝土压溃,而试件 DPQ 表现为边缘构件纵筋屈服后套筒连接失效、墙角混凝土压溃。3 个试件的破坏特征相似,表明并筋连接并未改变剪力墙的破坏模式。

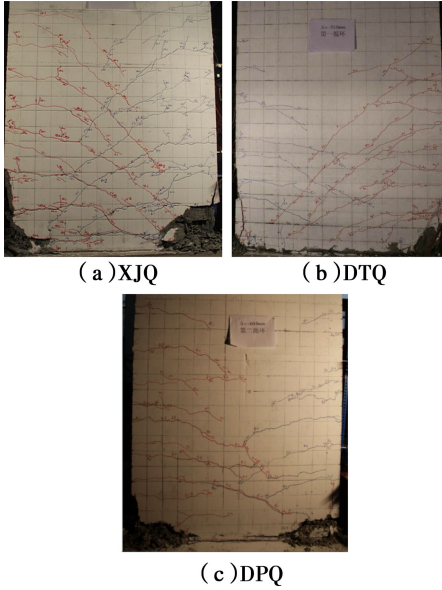


图 3 试件破坏图

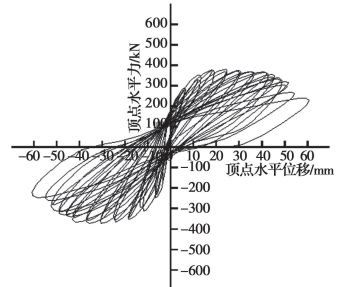
Fig. 3 Failure diagram of specimens

试件顶点水平力-位移滞回曲线如图 4((a)~(c))所示,XJQ 和 DTQ 滞回曲线均较饱满,而 DPQ 由于后期套筒连接失效,滞回曲线捏拢较严重。由于各试件的材料参数存在差异,为便于比较,对各试件骨架曲线按其承载力峰值进行“归一化”处理,3 个试件处理后的骨架曲线对比如图 4(d)所示,其骨架曲线特征点如表 3 所示。由此可知,在试件屈服前,3 个试件的力与位移间斜率基本相同,即其刚度相当,说明 3 个试件的前期性能相当;在试件屈服后、达到极限承载力之前,DTQ 和 DPQ 试件的刚度基本相同,说明 2 个装配式试件的承载力相当;XJQ 和 DTQ 试件的延性系数分别为 6.61 和 7.30,相差不大,但 DPQ 的延性系数为 4.87,远小于另两个试件,说明对部分纵筋采用合并连接会降低试件的延性。

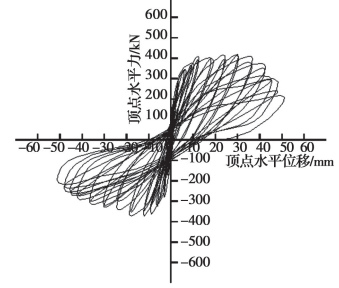
表 3 各试件骨架曲线特征点

Table 3 Characteristic points of skeleton curves of specimens

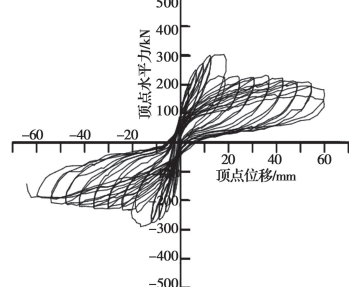
| 试件编号 | P_y /kN | P_{max} /kN | Δ_y /mm | Δ_u /mm | 延性系数 | 极限位移角 |
|------|-----------|---------------|----------------|----------------|------|-------|
| XJQ | 287.0 | 378.6 | 7.65 | 50.57 | 6.61 | 1/59 |
| DTQ | 324.0 | 395.5 | 5.30 | 38.70 | 7.30 | 1/70 |
| DPQ | 220.0 | 300.3 | 4.52 | 22.03 | 4.87 | 1/135 |



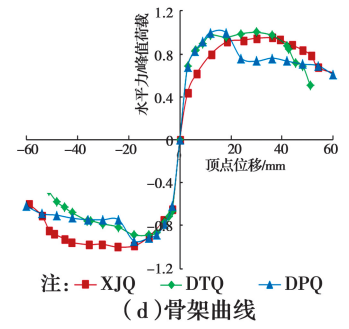
(a) XJQ



(b) DTQ



(c) XJQ



(d) 骨架曲线

注: ■ XJQ ▲ DTQ ▲ DPQ

图 4 各试件滞回曲线与骨架曲线
Fig. 4 Hysteresis and skeleton curves of specimens

3 数值模拟分析

3.1 有限元模型及验证

采用有限元数值模拟方法,进一步分析纵筋合并连接的装配式剪力墙平面内受力性能。分析模型采用 ABAQUS 建模,并与 DTQ 试件的试验结果进行对比,以验证模型的有效性。分析模型的混凝土和钢筋采用分离式建模,混凝土材料采用三维实体八节点线性减缩积分单元(C3D8R)和适用于低围压

下反复加载的塑性损伤模型^[12]。采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[9]中建议的混凝土单轴受拉和单轴受压应力-应变关系,流动法则中混凝土的膨胀角对混凝土受力表现的影响较为明显,其值一般取 $15^\circ \sim 45^\circ$,本文取 30° ,粘滞系数对结构的刚度影响较大,本文取 0.0005 ^[13]。钢筋和套筒连接段均采用三维二节点线性桁架单元(T3D2)和拉压等强的随动硬化弹塑性模型。模型中采用“接触”来考虑墙身与地梁之间接触面的相互作用,法线方向的接触采用硬接触,切线方向采用如图 5 中虚线所示的库伦摩擦模型,其中,摩擦系数 μ 参考美国混凝土规范(ACI)^[14],取为 0.6。

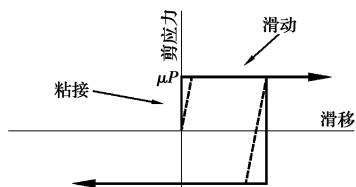


图 5 摩擦特性

Fig. 5 Frictional properties

试件 DTQ 试验骨架曲线与有限元模型骨架曲线对比如图 6 所示。可以发现,在构件顶点水平位移幅值达到 10 mm 前,两者拟合得非常好;在构件顶点水平位移幅值达到 10 mm 后,正向骨架曲线拟合较好,而试验反向骨架曲线刚度退化快于数值模拟。这主要是由于试验时试件因存在拉压变形不完全一致所导致的试验正、反向骨架不对称所致。因此,可以认为分析模型能较好地模拟试件的骨架曲线。

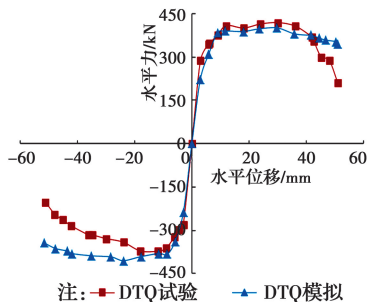


图 6 DTQ 试验与模拟骨架曲线

Fig. 6 Contrast of skeleton curves between simulation and test results

图 7 是有限元分析模型所模拟出的试件 DTQ 在破坏时的受拉塑性损伤结果,单元颜色越深(红

色)的部位表示混凝土的损伤越严重。与图 3(b)对比可以发现,DTQ 模拟的受拉塑性损伤结果与其在试验中的裂缝开展情况大致相符,特别是墙身下部,裂缝密集,受拉损伤严重。因此,有限元分析模型能较准确地模拟装配式剪力墙的受力性能。

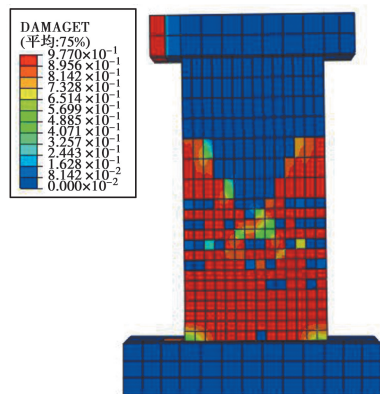


图 7 DTQ 混凝土损伤

Fig. 7 Concrete damage of DTQ

3.2 算例及分析

影响剪力墙受力性能的因素包括:墙体厚度、高度、宽度;边缘构件的宽度、配筋率;分布钢筋配筋率、轴压比等,但本文研究的目的是分析墙体纵筋合并连接(包括边缘构件纵筋和分布纵筋)方式对剪力墙受力性能的影响,因此,设计算例时重点关注的是纵筋的合并方式,其他因素均参照试验试件取值。以 DTQ 试件为参照,根据第 1 节所提出的钢筋混凝土剪力墙纵筋合并连接的基本要求,构建了如表 4 所示的 4 种纵筋合并连接方式。按第 3.1 节的有限元分析建模方法建立相应的分析模型,分析各算例的平面内受力性能,分析算例均采用 0.11 的试验轴压比。算例 BJQ1 对边缘构件部分纵筋和分布纵筋采用合并连接;算例 BJQ2 和 BJQ3 仅对分布纵筋采用合并连接,分别为单排合并连接和双排合并连接;算例 BJQ4 仅对边缘构件纵筋采用合并连接。有限元分析时采取与试验相同的位移加载模式,即在剪力墙顶部施加竖向力以实现给定的轴压比,在剪力墙顶部沿墙平面内施加拉压力以实现低周反复荷载。

图 8 是包括 DTQ 的各算例有限元分析的骨架曲线。由图 8 可见,4 个算例的骨架曲线均高于 DTQ 的骨架曲线。其中,BJQ2、BJQ3 的骨架曲线略高于 DTQ 的骨架曲线,原因是连接钢筋截面面积

略大于原配筋截面面积。而 BJQ1、BJQ4 的骨架曲线明显高于 DTQ 的骨架曲线,这是因为边缘构件连接钢筋截面面积大于原配筋截面面积,而边缘构件的钢筋对承载力贡献远大于分布钢筋的贡献。从

骨架曲线来看,只要连接钢筋截面面积不小于原配筋截面面积,采用纵筋合并连接不会降低剪力墙的承载力。

表 4 并筋连接剪力墙的分析算例

Table 4 Analysis examples of shear walls with tendon connection

| 算例编号 | 边缘构件连接钢筋 | 分布纵筋连接钢筋 | 墙身钢筋示意图 | 连接钢筋示意图 |
|------|------------------------------|-------------|---------|---------|
| DTQ | 12 Φ 14 | 6 Φ 8 | | |
| BJQ1 | 8 Φ 14 + 2 Φ 20 | 3 Φ 12 | | |
| BJQ2 | 12 Φ 14 | 3 Φ 12 | | |
| BJQ3 | 12 Φ 14 | 2 Φ 14 | | |
| BJQ4 | 4 Φ 18 | 6 Φ 8 | | |

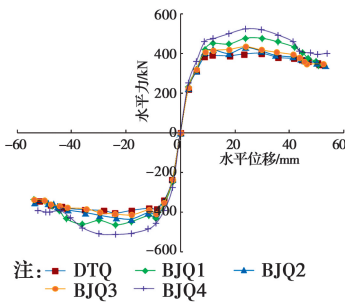


图 8 平面内骨架曲线对比

Fig. 8 Contrast of skeleton curves in plane

将图 8 中各骨架曲线的特征点列于表 5,表中 P_y 和 P_{max} 分别为剪力墙屈服荷载、峰值荷载, Δ_y 和 Δ_u 分别为剪力墙屈服位移、极限位移。由表 5 可见,算例 BJQ2、BJQ3 的延性系数和极限位移角略小于算例 DTQ 的相应值,而算例 BJQ1、BJQ4 的延性系数和极限位移角明显小于算例 DTQ 的相应值。说明采用纵筋合并连接后剪力墙的延性变差,其中,仅分布钢筋采用合并连接时,延性略有降低;而边缘构件纵筋采用合并连接时,延性明显降低。因此,分

布钢筋采用合并连接方式具有一定的适用性,而边缘构件纵筋采用合并连接方式宜慎用。

表 5 平面内骨架曲线特征点

Table 5 Characteristic points of skeleton curves in plane

| 模型编号 | P_y /kN | P_{max} /kN | Δ_y /mm | Δ_u /mm | 延性系数 | 极限位移角 |
|------|-----------|---------------|----------------|----------------|------|-------|
| DTQ | 363.0 | 403.0 | 7.77 | 51.29 | 6.60 | 1/58 |
| BJQ1 | 431.0 | 471.0 | 9.34 | 44.43 | 4.76 | 1/68 |
| BJQ2 | 394.5 | 432.5 | 8.31 | 45.25 | 5.45 | 1/66 |
| BJQ3 | 382.5 | 424.0 | 7.77 | 46.59 | 6.00 | 1/62 |
| BJQ4 | 453.5 | 518.5 | 9.19 | 40.94 | 4.45 | 1/75 |

为了进一步考察分布钢筋采用不同连接布置方式对剪力墙受力性能的影响,将算例 BJQ2 和 BJQ3 在破坏状态时的竖向钢筋应力云图示于图 9。由图 9 可知,算例 BJQ2 边缘构件内的纵筋竖向屈服范围略小于算例 BJQ3 纵筋竖向屈服范围,说明剪力墙的分布钢筋采用合并连接后,远离中性轴有利于降低边缘构件中纵筋承担的荷载。因

此,分布钢筋采用合并连接的布置位置宜在远离中性轴处。

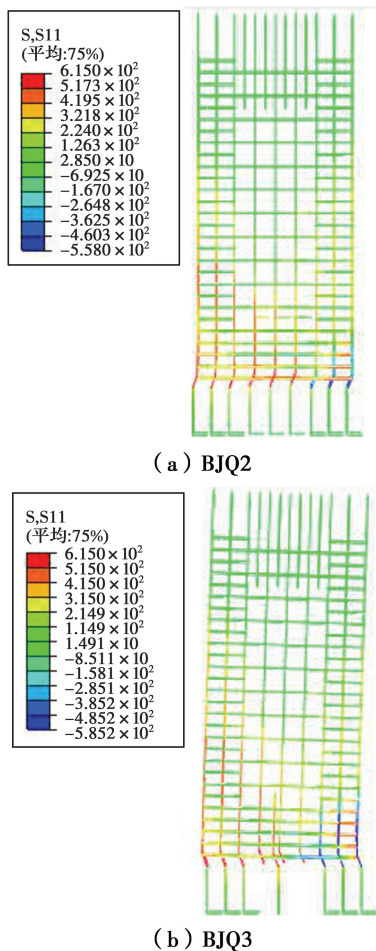


图9 竖向钢筋应力云图

Fig. 9 Stress diagram of vertical steel bar

4 结论

1)当连接钢筋截面面积(强度)不小于原配筋截面面积(强度),且连接钢筋沿墙长均匀分布时,纵筋合并连接的装配式剪力墙表现出较好的抗震性能,其平面内的压弯承载力、刚度与现浇剪力墙的性能相当,弹塑性变形能力能够满足现行规范要求。

2)剪力墙边缘构件内纵向钢筋采用合并连接时,装配式钢筋混凝土剪力墙的延性会有所降低。因此,对剪力墙边缘构件内纵向钢筋应慎用合并连接。

3)剪力墙分布纵筋采用等截面面积合并连接时,装配式钢筋混凝土剪力墙的平面内受力性能无显著变化,但连接钢筋布置位置应沿墙长均匀分布而不应集中于中性轴附近。

4)仅分析了纵筋合并连接的钢筋混凝土剪力墙平面内的受力性能,未考虑纵筋合并连接对其平面外受力性能、墙体抗裂性能及抗冲击能力等的削弱,因此,在应用时要考虑到此局限性。

参考文献:

- [1] BACHMANN H, STEINLE A. Precast concrete structures [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2011.
- [2] 安贺舜,周德源. 预制装配式剪力墙钢筋连接方法研究进展[J]. 结构工程师, 2018, 34(6): 158-167.
AN H S, ZHOU D Y. Research progress of the connection of reinforced bar of prefabricated shear wall structure [J]. Structural Engineers, 2018, 34(6): 158-167. (in Chinese)
- [3] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal, 1995, 40(4): 78-96.
- [4] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, DAIKIW R W. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 2: prestressed connections [J]. PCI Journal, 1995, 40(5): 82-96.
- [5] SOUDKI K A, WEST J S, RIZKALLA S H, et al. Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading [J]. PCI Journal, 1996, 41(3): 64-80.
- [6] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 1-6.
QIAN J R, PENG Y Y, ZHANG J M, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements spliced by grout sleeves [J]. Building Structure, 2011, 41(2): 1-6. (in Chinese)
- [7] 张微敬,钱稼茹,陈康,等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 12-16.
ZHANG W J, QIAN J R, CHEN K, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical distributed reinforcements spliced by a single row connecting rebars [J]. Building Structure, 2011, 41(2): 12-16. (in Chinese)
- [8] 刘程炜,曹万林,董宏英,等. 低轴压比半装配式单排配筋再生混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结

- 构学报, 2017, 38(6): 23-33.
- LIU C W, CAO W L, DONG H Y, et al. Experimental study on seismic performance of semi-assembled recycled concrete shear wall with single row of steel bars under low axial compression ratio [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 23-33. (in Chinese)
- [9] 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.
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 刘及进. 不同竖向钢筋连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LIU J J. Experimental study on seismic behavior of precast reinforced concrete shear wall with different vertical steel connection [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [11] 廖东峰. 竖向钢筋不同连接方式的装配式钢筋混凝土剪力墙抗震性能[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
LIAO D F. Seismic behavior of fabricated concrete shear wall with different vertical steel bar connection modes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [12] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-82.
NIE J G, WANG Y H. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-82. (in Chinese)
- [13] 张雅融. 翼缘板切割型 RCS 组合节点的破坏模式和承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
ZHANG Y R. Research on shear bearing capacity and failure modes of composite RCS joints with tapered-flange-type details [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] Building code requirements for reinforced concrete: ACI 318-14 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.

(编辑 王秀玲)