

高层建筑施工剪力墙结构连梁节点受力数值模拟

Numerical Simulation of Shear Wall Structure with Beam Joints in High-rise Building Construction

赵凯选¹, 李慧²

(1. 河南水建集团有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 郑州工商学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为评估高层建筑施工中剪力墙结构连梁节点的受力性能, 提出了一种基于有限元数值模拟的方法。试验结果表明: 该方法能有效模拟连梁节点的实际受力状态, 试件的承载能力与轴压比和暗支撑配筋率正相关, 且随梁端位移增加, 承载力退化系数先升后降, 在配筋率为 1%~2% 时, 试件稳定性表现优异, 具备良好的变形能力和延性。

关键词: 高层建筑施工; 剪力墙结构; 连梁节点; 受力数值模拟; 暗支撑配筋率; 退化系数

中图分类号: TU323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0111-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.021

ZHAO Kaixuan¹, LI Hui²

(1. Henan Water Construction Group Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China;

2. Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To evaluate the stress performance of shear wall structure connecting beam nodes in high-rise building construction, this study proposes a numerical simulation based method. This method connects the shear wall panel to the edge components through fishtail welding technology, sets stiffeners at the center as the origin, and uses double-sided corner welding to fix them. Select a specific connecting beam as the specimen, and use quasi-static loading technology according to JGJ/T 101-2015 standard. Firstly, apply a vertical load of 300 kN, and then apply a horizontal load. Monitor the displacement and stress changes of the rod after being subjected to force using a dial gauge and strain gauge. The experimental results show that this method can effectively simulate the actual stress state of the connecting beam node. The bearing capacity of the specimen is positively correlated with the axial compression ratio and the reinforcement ratio of the hidden support. As the displacement of the beam end increases, the degradation coefficient of the bearing capacity first increases and then decreases. When the reinforcement ratio is 1%-2%, the stability of the specimen is excellent, with good deformation ability and ductility.

Keywords: construction of high-rise buildings; shear wall structure; beam joint; numerical simulation of force; reinforcement ratio of dark support; degradation coefficient

0 引言

剪力墙结构具有较好的抗侧力性能, 其组成结

构主要包括剪力墙板与竖向水平的边缘部件, 其良好的承载力、刚度等优势使其被广泛地应用于高层建筑中。

作者简介: 赵凯选 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 工程现场施工管理、土木水利类技术创新研究等。

通信作者: 李慧 (1982—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 混凝土结构、新型建筑材料、交通工程方面的研究等。

收稿日期: 2023-10-14

建筑结构

在高层建筑施工中,连梁作为连接剪力墙的核心部件,通过精准嵌入并浇筑混凝土,确保了结构的稳固连接^[1-2]。连梁是耗能部件,当地震来袭时,连梁能迅速进入塑性变形状态,有效吸收并减轻地震能量对建筑的冲击^[3-5]。这种性能直接关系着建筑的稳定性,连梁的延性越强,其耗能能力便越出色,从而赋予建筑更高的稳定性。为确保连梁充分发挥耗能作用,连接节点的可靠性至关重要。虽然连梁节点刚度大,能可靠传递剪力,但受力时强度可能退化。因此,对高层建筑施工中剪力墙结构连梁节点的受力分析不可或缺,以便及时发现变形,维护建筑稳定。

杨红等^[6]通过高强螺栓、刚性法兰盘和外加强环板在同一位置实现钢管混凝土柱-柱连接、钢管混凝土柱-钢梁连接,连接节点具有良好的抗震性能;万馨等^[7]采用 ABAQUS 软件建立了钢板混凝土组合剪力墙-钢连梁外肋板节点的三重非线性有限元模型,通过模拟分析不同外肋板高厚比、连接板宽厚比和外包钢板厚度对其抗震性能的影响;王廷彦等^[8]利用 PKPM 软件分析了外填充墙由加气混凝土改为钢筋混凝土或轻骨料混凝土对高层住宅剪力墙结构性能的影响。结果表明,全现浇外墙显著提高刚度、减小侧移,但可能影响振动和扭转;李沙沙等^[9]以 PC 墙板为例,利用 DRUCKER-PRAGER 模型计算土体材料的非线性,分析了拉筋拉力及墙背侧向土压力的分布规律。

以上研究均采用钢管混凝土柱作为剪力墙边缘部件,能够保证剪力墙屈曲后的拉力性能,但其缺乏对连梁与剪力墙结构接触节点的受力研究,因此本文提出高层建筑施工剪力墙结构连梁节点受力数值模拟方法,通过数值模拟呈现连梁节点的受力变化情况,有助于及时发现连梁的破坏情况,提升建筑安全性。

1 剪力墙结构连梁节点受力数值模拟

1.1 试件设计

高层建筑施工中剪力墙结构由钢管混凝土柱、剪力墙板以及钢梁组成。剪力墙板通过鱼尾板焊接与边缘部件相连,以其中心位置为原点竖向双面放置加劲肋,剪力墙板通过双面角焊接同加劲肋相连。剪力墙结构之间只有连梁节点存在差异,其余条件一致。在高层建筑施工剪力墙结构中选取某连梁为

试件,该试件的钢材性能见表 1。

表 1 钢材性能
Table 1 Steel properties

部件类型	板厚 /mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	伸长率 /%
钢板	3	274.7	386.1	201 222	36.9
中梁腹板	5	369.4	498.9	203 222	33.7
连梁腹板	6	348.1	489.2	214 111	37.3
中梁翼缘	7	337.4	478.2	212 111	31.5
钢管	8	394.2	496.4	211 111	32.6
连梁翼缘	9	332.0	484.8	206 777	29.8
顶梁腹板	10	471.5	623.6	214 777	33.7
顶梁翼缘	16	370.2	499.6	203 111	37.0
节点端板	20	285.0	433.2	218 222	40.2

1.2 试验装置与加载制度

试验在实验室内展开,通过拟静力技术加载。量程为 4500 kN 的千斤顶精确部署在门架梁下方,并通过荷载划分梁将荷载均匀传递至所有柱顶。为确保千斤顶能水平活动,在门架梁与千斤顶之间安装了水平活动设施。通过电液伺服加载装置施加水平荷载。在试件的侧方,部署相应数量的作动器,每个作动器的量程均为 1000 kN。这些作动器的两端分别与反力墙和荷载划分梁紧密相连,以确保加载过程的稳定性和准确性。在试件的底部,采用高强度的螺栓将其与地梁紧密连接。同时,为了防止地梁在加载过程中出现滑移,放置压梁对地梁进行牢固的约束。

加载制度基于 JGJ/T101—2015 确定,先对所有柱顶作用 300 kN 的竖向荷载,然后作用水平荷载。主要步骤包括:试件未屈服前,使用作动器以荷载控制的方式逐级加载,每次增加 150 kN,各级循环次数为 1;试件屈服后,改用位移控制的方式进行加载,每次增加荷载是屈服位移的一半,各级循环次数为 3。所有循环先作用推力、后作用拉力,以达到水平荷载峰值的 80%为结束条件。

1.3 测点布置

在试件侧方所有梁的中心位置放置位移计监测地梁滑移状况,在剪力墙板不同位置放置应变花、片,试验时对各位置的应力情况进行监测。

1.4 性能分析

(1) 位移延性位。位移延性是评估结构或构件在地震等外力作用下变形能力的重要指标。采用极限位移与屈服位移的比值来表示位移延性:

$$\mu = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1)$$

式中： Δy 、 Δu 分别为试件的极限、屈服位移。

(2) 承载力退化系数。试件的承载力会在加载过程中跟随循环次数的上升而下降，承载力退化情况通过退化系数 λ_i 表示，则：

$$\lambda_i = \frac{P_{j, i+1}}{P_{j, i}} \quad (2)$$

式中： $P_{j, i}$ 、 $P_{j, i+1}$ 分别为 j 级加载时第 i 、 $i+1$ 循环峰值的荷载。

(3) 耗能能力。采用等效黏滞阻尼系数来表示试件的耗能能力，其公式表示为：

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABD+BCD)}}{S_{(AOF+COE)}} \quad (3)$$

式中： $S_{(ABD+BCD)}$ 、 $S_{(AOF+COE)}$ 分别为循环加载中试件的滞回耗能、总应变能。

(4) 刚度。刚度是评估结构或构件抵抗变形能力的重要指标。采用梁端弯矩与转角之比来表示试件的刚度，设加载位置的压力是 P ，试件的刚度表示为：

$$K_s = \frac{M_p}{\theta_p} \quad (4)$$

式中： M_p 为梁端的弯矩； θ_p 表示转角。

1.5 建立有限元模型

通过 HyperMesh 清理高层建筑施工剪力墙结构，Autochearup 过滤干扰，网格自动划分，高层建筑施工剪力墙结构为四面体网格^[10-12]，如图 1 所示。

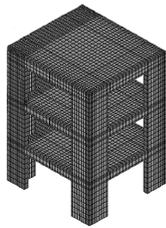


图 1 高层建筑施工剪力墙结构划分模型
Fig. 1 Structure division model of shear wall in high-rise building construction

1.6 应用有限元法的连梁节点受力数值模拟

应用有限元法求解动力方程，划分求解域为固定数量且不重叠的单元^[13-14]，在各单元内设定适宜节点为函数插值，其等同于连梁节点单位所受力。

通过 ANSYS 数值模拟连梁节点受力情况，某时刻连梁节点的空间坐标可表示为 $x_i (i = 1, 2, 3)$ ，

则其动量方程式为：

$$\sigma_{ij, j} + \rho f_i = \rho \dot{x}_i \quad (5)$$

式中： $\sigma_{ij, j}$ 为应力， $j = 1, 2$ ； f_i 为单位质量体积力； \dot{x}_i 为加速度。

质量守恒方程式为：

$$\rho V = \rho_0 \quad (6)$$

式中： V 为现时构形体积； ρ 、 ρ_0 分别为现时质量密度及其初始情况。

能量方程式为：

$$E = VS_{ij}\varepsilon_{ij} - (p + q) V \quad (7)$$

式中： q 为黏性阻力； ε_{ij} 为应变率张量； ε_{ij} 为偏应力； P 为压力。

利用有限元离散化动量方程满足微分方程内积，变换输出的虚功率方程为节点位移方程^[15-16]，获取某时刻连梁节点的受力变化。

2 试验分析

以高层建筑施工剪力墙结构连梁试件为研究对象，其数值模拟情况见图 2，在单向竖直加载情况下的应力图变化状况如图 3 所示。

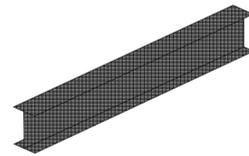


图 2 连梁数值模拟
Fig. 2 Numerical simulation of coupling beam

由图 3 可知，在试件一端位移为 Δu 的情况下，其端部嵌入腹板上下位置的应力大，中间部分的应力小；在试件一端位移为 $1.5\Delta u$ 的情况下，其端部嵌入位置的横截面应力都近似屈服应力值；且随荷载的不断增大，应力由试件嵌入端随梁跨大程度扩散至两侧，试件嵌入位置与其周围应力高于屈服强度；在试件一端位移为 Δ_{max} 的情况下，嵌入剪力墙的试件受混凝土约束应力较小，试件一端部分腹板应力接近屈服应力，嵌入位置与其周围达到屈服应变，试件节点破坏。

已知轴压比能够显著影响试件的抗震性能，对比分析轴压比分别为 0、0.4、0.8 时试件的骨架曲线，如图 4 所示。

建筑结构

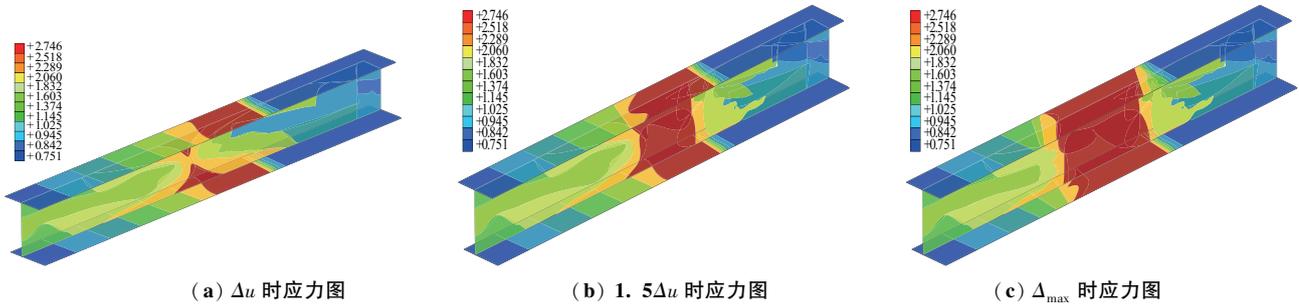


图 3 试件应力云图

Fig. 3 Stress cloud diagram of specimen

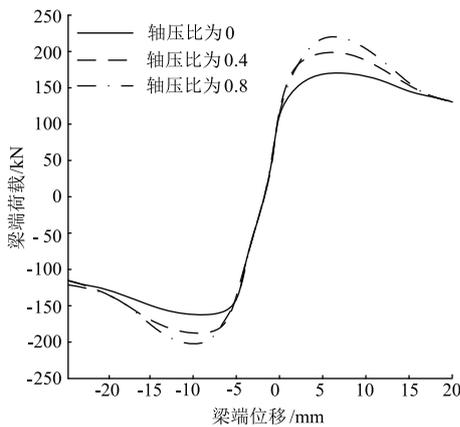


图 4 不同轴压比下的骨架曲线

Fig. 4 Skeleton curves under different axial compression ratios

通过图 4 可知，试件承载力与轴压比呈正相关关系，即随着轴压比的提升，试件的承载力也相应提升。然而，随着轴压比的进一步增大，试件承载力的提升速度逐渐下降。

研究配筋率对高层建筑施工剪力墙结构连梁节点受力情况的影响。设钢筋直径为 4、6 和 8 mm，得到配筋率分别为 0.1、0.2 和 0.4，得到试件的 3 个推覆曲线，如图 5 所示。在配筋率分别为 0.1、0.2 和 0.4 的情况下，其对应连梁较无钢筋连梁的承载力分别有不同程度的提高，试件承载力跟随暗支撑配筋率的提高而提高，在配筋率 0.2 时试件的承载力提高情况最佳，若配筋率大于 0.2 且继续上升，则试件的承载力提升效果显著下降，造成钢筋浪费。

研究不同连接模式对试件的受力影响，A 为隔板贯通焊接，B 为穿芯螺栓连接，C 为悬臂段-端板连接。对比分析不同连接模式的试件结构，其滞回曲线如图 6 所示。隔板贯通焊接与穿芯螺栓连接的试件滞回曲线较之悬臂段-端板连接的试件捏拢情况更加严重，存在明显的剪切滑移情况，虽然承载力较大，

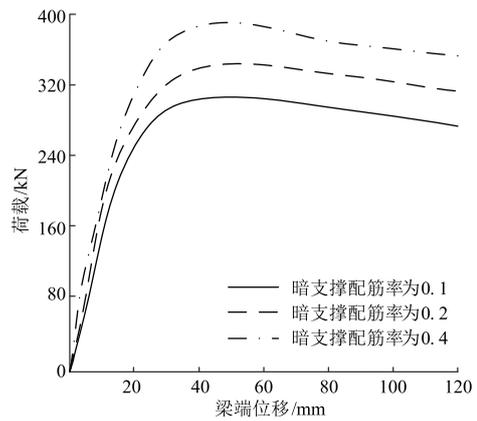


图 5 暗支撑配筋率的影响

Fig. 5 Effect of reinforcement ratio of dark support

但二者的刚度退化速度较快，具有脆性破坏，整体的延性与耗能性能较差；悬臂段-端板连接的试件极限承载力较隔板贯通焊接与穿芯螺栓连接的试件有所下降，但其刚度退化的速度较慢，具有较为规整的滞回环，破坏类型为延性破坏。综上，悬臂段-端板连接的试件延性与耗能性能较优，抗震性能较好。

对比不同连接模式试件的承载力退化系数，结果如图 7 所示。

三种连接模式的试件承载力退化曲线均存在小幅度抖动，当加载至极限时其承载力退化系数均高于 0.95。承载力退化系数随着梁端位移的逐渐提升呈先上升后下降态势。在梁端位移为 70 mm 的情况下，穿芯螺栓连接的试件嵌入剪力墙位置出现断裂情况，连梁的耦联性能降低，而隔板贯通焊接、悬臂段-端板连接的试件均为延性破坏，较之二者，穿芯螺栓连接的试件承载力退化明显。

不同连接模式的试件弹性、弹塑性极限层间位移角见表 2。其中，隔板贯通焊接与穿芯螺栓连接的试件屈服位移为连梁屈服位置的柱顶位移，悬臂段-

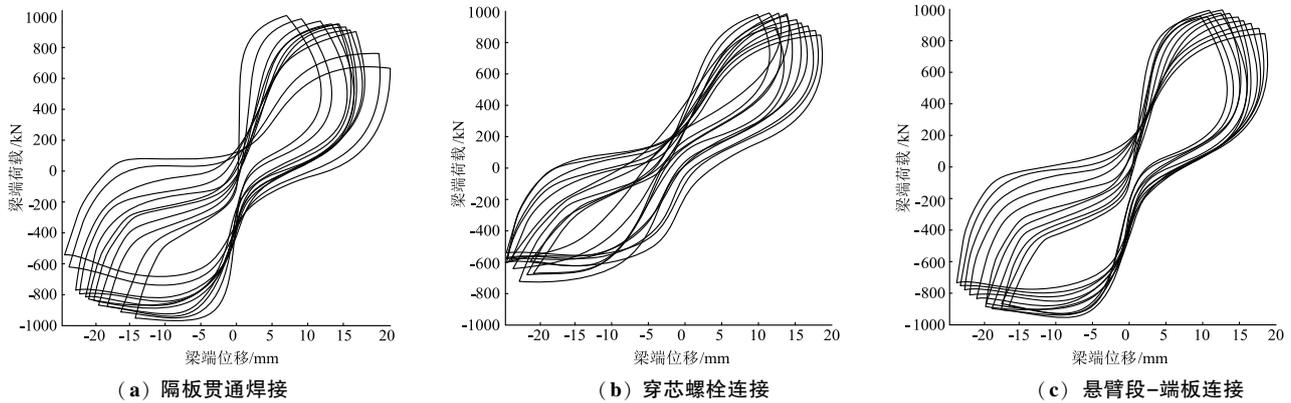


图 6 不同连接模式的滞回曲线
Fig. 6 Hysteresis curves of different connection modes

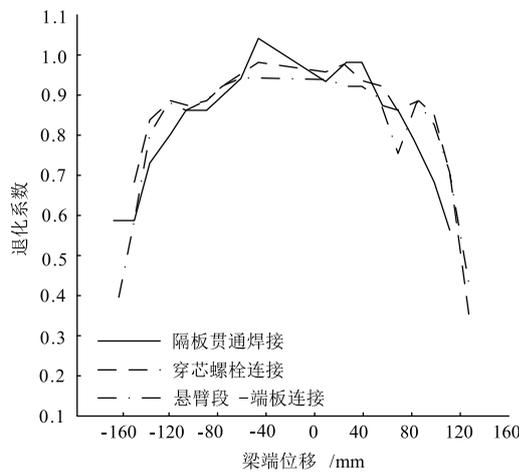


图 7 承载力退化曲线
Fig. 7 Bearing capacity degradation curve

表 2 试件屈服、极限层间位移角
Table 2 Specimen yield and limit interlayer displacement angle

连接模式	加载方向	屈服状态		极限状态	
		极限位移/mm	弹性层间位移角	屈服位移/mm	弹塑性极限层间位移角
隔板贯通焊接	正	77.41	1/50.4	202.82	1/21.6
	负	59.05	1/65.8	202.62	1/21.6
穿芯螺栓连接	正	84.55	1/46.3	186.03	1/23.1
	负	49.50	1/78.8	185.39	1/23.2
悬臂段-端板连接	正	43.95	1/89.3	235.59	1/19.2
	负	77.07	1/50.6	233.69	1/19.4

端板连接试件的屈服位移通过上柱端屈服形态判断；极限位移均采用 85% 峰值水平力进行确定。

通过表 2 可知，不同连接模式试件的弹性、弹塑性极限层间位移角分别为 1/89.3~1/46.3、1/23.2~1/19.2，设定震动情况下的层间位移角限值为 1/300

与 1/50，不同连接模式的试件层间位移角均大于该设定，说明试件具有较好的变形能力。

研究震动作用下不同连接模式的试件在差异轴压比、高宽比和配筋率影响下的最大层间位移角，结果见表 3。当高宽比和配筋率固定时，隔板贯通焊接的试件最大层间位移角随着轴压比的增大而不断增加，穿芯螺栓、悬臂段-端板连接的试件最大层间位移角无显著变化。当配筋率和轴压比固定时，试件的最大层间位移角与高宽比呈正相关关系，跟随高宽比的增大而增加。在高宽比为 1 时，试件之间的最大层间位移角差异较小，在高宽比为 2 时，穿芯螺栓、悬臂段-端板连接的试件最大层间位移角均呈下降趋势。当轴压比和高宽比固定时，穿芯螺栓、悬臂段-端板连接的试件最大层间位移角随着配筋率的提高无显著变化。表明试件在配筋率为 1%~2% 时具有较好的稳定性，稳定性随着配筋率的提升呈现

表 3 震动作用下试件最大层间位移角
Table 3 Maximum interstory displacement angle of the specimen under vibration

轴压比	连接模式	高宽比 1.0		高宽比 2	
		1	2	1	2
0.2	隔板贯通焊接	1.40	1.41	2.80	3.02
	穿芯螺栓连接	1.43	1.40	2.47	2.10
	悬臂段-端板连接	1.42	1.41	2.91	2.31
0.4	隔板贯通焊接	1.55	1.48	2.96	3.23
	穿芯螺栓连接	1.43	1.35	2.33	1.90
	悬臂段-端板连接	1.51	1.41	3.07	2.15
0.6	隔板贯通焊接	1.77	1.62	3.06	3.20
	穿芯螺栓连接	1.44	1.32	3.19	1.50
	悬臂段-端板连接	1.70	1.38	3.14	2.08

建筑结构

小幅度的上升。

以延性为指标衡量高层建筑施工剪力墙结构连梁节点抗震性能,结果见表4。

表4 试件在各阶段的荷载、位移

Table 4 Loads and displacements of the specimens at each stage

指标	隔板贯通焊接	穿芯螺栓连接	悬臂段-端板连接
屈服荷载/kN	103.5	112.8	93.9
屈服位移/mm	18.1	18.7	16.5
峰值荷载/kN	161.8	170.3	157.7
峰值位移/mm	71.2	84.3	64.3
破坏荷载/kN	138.3	145.5	134.8
极限位移/mm	121.1	132.4	111.1
延性系数	9.36	9.87	9.64

通过表4可以看出,不同连接模式的试件均具有较好的延性,延性系数在[9.36, 9.87]区间内,均大于5,符合抗震需要。隔板贯通焊接的试件和穿芯螺栓的试件、隔板贯通焊接的试件和悬臂段-端板连接的试件之间的延性系数均有所增加,此时表示外肋板高厚比有所下降,但变化幅度较小,说明高层建筑施工剪力墙结构连梁节点延性受外肋板高厚比的影响较小,抗震性能较好。

3 结论

研究高层建筑施工剪力墙结构连梁节点受力数值模拟方法,通过选取试件并基于JGJ/T101-2015加载制度采用拟静力技术加载,通过百分表、应变仪测定杆件受压后的位移、应力变化。试验结果说明该方法具有较好数值模拟效果,可有效呈现出高层建筑施工剪力墙结构连梁节点的实际受力变化情况;在配筋率0.2时连梁的承载力提升情况最佳;具有较为规整的滞回环,破坏类型为延性破坏。承载力退化系数均高于0.95且跟随梁端位移的逐渐提升呈先上升后下降态势,在配筋率为1%~2%时均具有较好的稳定性,延性较好。

参 考 文 献

[1] 陈颖,刘涛,孙健.高层钢筋混凝土核心筒的抗震性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2023,45(1):71-82.
[2] 陈大川,郭虹位.高层建筑施工剪力墙免支撑置换受力分

析[J].工业建筑,2020,50(9):68-74.
[3] 程蓓,高旭杰,杨参天.螺栓钢板加固连梁延性对钢筋混凝土剪力墙结构受力性能的影响[J].工程抗震与加固改造,2019,41(1):112-117.
[4] 李明,谢可可,吴潜,等.工字钢连接剪力墙和连梁的受力性能研究[J].四川建筑科学研究,2021,47(6):22-29.
[5] 王能,许海涛,徐征宇,等.核电工程双钢板混凝土结构L形转角墙节点研究[J].建筑结构学报,2019,40(增刊1):91-98.
[6] 杨红,余依瑾,康乐,等.法兰连接钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点受力性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(2):157-172.
[7] 万馨,相景森,白尧尧,等.外肋板式钢板混凝土组合剪力墙与钢梁节点的受力性能数值模拟[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1468-1476.
[8] 王廷彦,高宇甲,霍继炜,等.外填充墙对高层住宅剪力墙结构受力性能影响分析[J].建筑结构,2021,51(10):60-64.
[9] 李沙沙,蒋玉飞,康英.装配式建筑构件连接结构受力特性数值模拟[J].计算机仿真,2021,38(1):198-202.
[10] 钱稼茹,崔瑶,张薇,等.装配式空心板剪力墙结构叠合连梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):51-60.
[11] 种迅,张蓝方,万金亮,等.两层带开洞预制剪力墙抗震性能试验研究与数值模拟分析[J].工程力学,2019,36(5):176-183.
[12] 马尤苏夫,杨焯,张淑云,等.不同连梁节点构造的联肢钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(10):45-56.
[13] 张鹏,彭铭旭,朱鹏举,等.超高层建筑钢板剪力墙钢筋节点深化设计与施工[J].建筑技术,2021,52(12):1437-1439.
[14] 王列德,马斌勇,陈青佳.高层剪力墙结构中不同连梁模拟单元对比分析[J].建筑结构,2021,51(增刊1):380-383.
[15] 李霆,张慎,徐子豪,等.带分段式连梁的钢筋混凝土联肢剪力墙拟静力试验及数值模拟[J].土木工程学报,2020,53(4):38-49.
[16] 贺景然,陈建兵,任晓丹,等.基于不同损伤本构模型的钢筋混凝土剪力墙结构数值模拟[J].建筑结构学报,2021,42(6):139-149.