

装配式剪力墙新型水平连接装置的力学性能数值模拟

付重阳¹, 熊二刚¹, 胡勤斌¹, 张海荣¹, 徐 涵², 樊禹江¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 中冶长天国际工程有限公司 土建设计分院, 湖南 长沙 410200)

摘要: 为了研究装配式剪力墙新型水平连接装置的力学性能, 对两组不同螺栓数量的连接装置试验组进行了动态力学性能试验, 并采用 ABAQUS 有限元软件对其进行相关数值模拟, 进一步分析了较大预紧力对装置力学性能的影响. 试验结果表明: 通过增加螺栓数量和螺栓预紧力, 可有效提升水平连接装置的耗能效果, 但加载频率对其影响较小. 通过分析有限元结果可知: 装置最大水平力, 耗能能力及割线刚度与螺栓预紧力呈近似线性增长趋势, 与试验数据吻合较好; 在较大预紧力情况下, 各力学性能指标保持上升趋势, 但由线性关系逐渐向非线性过渡的范围也随之增大.

关键词: 装配式剪力墙; 水平连接装置; 螺栓预紧力; 滞回曲线; 有限元分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0082-11

Numerical simulation of mechanical properties of new horizontal connection device for prefabricated shear walls

FU Chongyang¹, XIONG Ergang¹, HU Qinbin¹, ZHANG Hairong¹, XU Han², FAN Yujiang¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Civil Engineering Design Branch of MCC Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of a new type of horizontal connection device for prefabricated shear walls, dynamic mechanical properties of two groups of connection devices with different bolt numbers were tested, and the ABAQUS finite element software was used to simulate the dynamic properties of the connection devices. The test results show that the energy dissipation of the horizontal connection device can be effectively improved by increasing the number of bolts and the bolt preload force, but the loading frequency has little influence on it. The results of finite element analysis show that the relationship between the maximum horizontal force, energy dissipation capacity, secant stiffness of the device and the bolt preload is approximately linear, which is in good agreement with the test data. In the case of large preload, the mechanical properties display a rising trend, but the range of transition from linear relationship to nonlinear gradually increases.

Key words: prefabricated shear wall; horizontal connection device; bolt preload; hysteresis curve; finite element analysis

近年来, 装配式结构由于其节能环保, 利于绿色施工, 施工工期短等特点, 在许多国家地区得到了广泛的推广应用^[1]. 干连接是预制装配式结构施工中常见的节点连接方式, 具有工业化程度高、施工速度快等优点, 能更好地发挥预制结构的优势^[2]. 同时, 随着我国对装配式结构形式的不断推广, 使用较为普遍的装配式剪力墙结构也成为主要研究内容之一. 实际震害案例表明, 预制剪力墙构件在地震作用下损伤并不严重, 损伤主要发生在连接节点的后浇混凝土处^[3].

为了尽可能降低地震作用对预制剪力墙的破坏, 国内外专家学者针对预制剪力墙水平接缝的有效连接进行了大量的探索研究. Bora 等^[4]通过长槽孔螺栓的机械连接方法将预制装配式空心墙板与基础连接, 对其进行了动态力学性能试验研究. Lim 等^[5]开发了一种新型预制 T 型混凝土墙板系统, 并对预制 T 型墙进行了基于位移控制的低周往复试验. Jiang 等^[6]研究了一种采用新型钢框和高强螺栓连接预制剪力墙, 并通过试验和数值模拟研究了该形式的力学行为. Zhu 等^[7]提出了

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2023-02-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808046); 陕西省重点研发计划项目(2021SF-461)

第一作者: 付重阳(1999—), 男, 硕士生, 主要从事结构工程抗震性能研究. E-mail: fuchongyang123@163.com

通信作者: 熊二刚(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事新型配式结构设计及抗震性能研究. E-mail: x-e-g@163.com

采用高强螺栓对上部箱形钢和下部槽型钢进行对穿连接,并通过施加不同的螺栓预紧力,控制型钢摩擦面的摩擦力。由于下部槽型钢特殊的螺栓孔构造,工作过程中两型钢之间会发生相对转动,摩擦消耗地震能,达到减小地震对主体结构影响的目的。水平连接装置工作原理如图3所示。

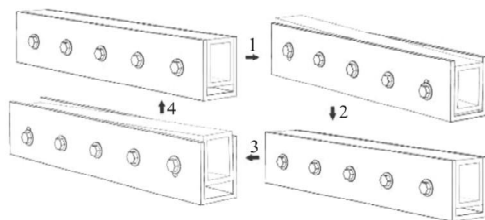


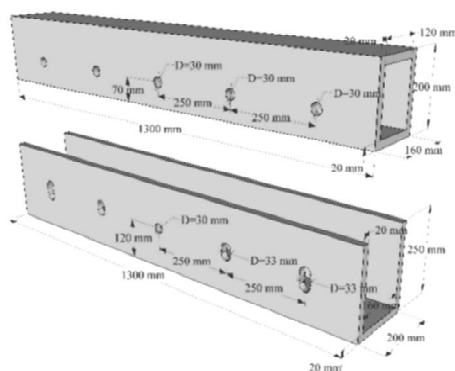
图 3 装置工作原理图

Fig. 3 Working principle of the device

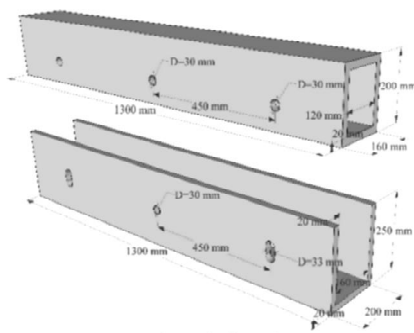
2 试验概况

2.1 试件设计

为探究装配式剪力墙新型水平连接装置的各项力学性能, 制作了两组不同螺栓数量和不同螺栓孔间距的水平连接装置, 分别为设有 5 个螺栓孔的连接装置试验组(装置 A)和设有 3 个螺栓孔的连接装置试验组(装置 B), 试件构造如图 4 和图 5 所示。通过对两组装置进行不同正弦加载频率下的动态力学性能试验, 探究不同螺栓数量、不同螺栓预紧力、不同加载频率对装置力学性能及耗能能力的影响规律。



(a) 装置A部件尺寸图



(b) 裝置B部件尺寸圖

图 4 水平连接装置部件尺寸图

Fig. 4 Dimension of horizontal connection device

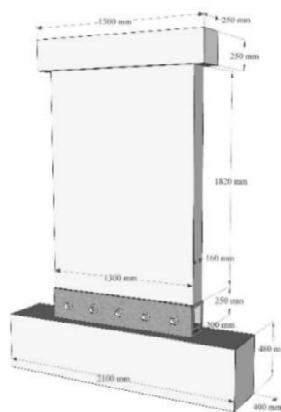


图 5 试件方案图

Fig. 5 Schematic diagram of specimen

两个装置的上下两个型钢均采用 Q345 级碳素钢, 选用 10.9 级和 12.9 级 M30 通长高强螺栓分别作为装置 A 和装置 B 的连接螺栓。墙体材料选用 C30 混凝土和 HRB400 级钢筋, 其中暗柱箍筋使用 HPB300 级钢筋, 剪力墙的配筋详见图 6。

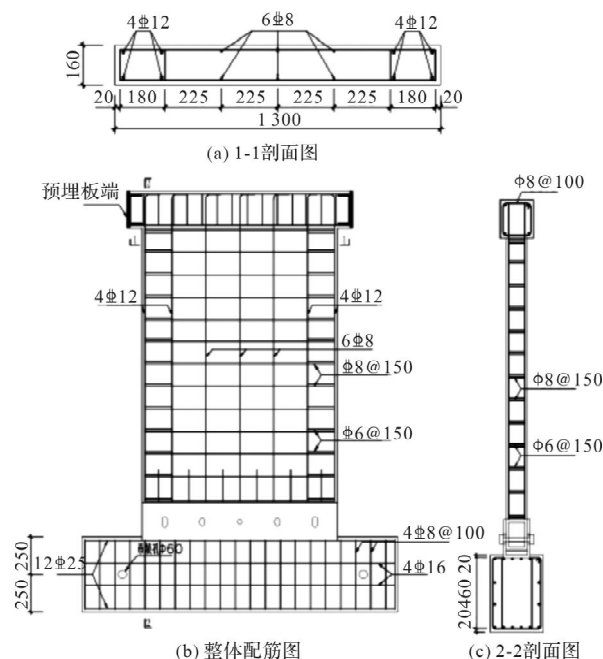


图 6 剪力墙配筋图

Fig. 6 Reinforcement of shear wall

2.2 试验设计

试验使用额定荷载为 500 kN 的 MTS 液压伺服作动器在门式钢架下完成加载, 试件底梁与地槽固定, 顶梁与作动器之间采用四根长螺杆连接传力, 加载装置实物图如图 7 所示。为模拟试件在振动下的运转情况, 采用位移控制加载的拟静力试验, 并根据《建筑消能阻尼器》(JG/T 209—2012)^[22]中对阻尼器力学性能试验方法的有关规定, 结合有限元模拟的计算结果, 确定了此次试验的加载制度, 然后通过设定加载频率与幅值控

制作动器根据正弦曲线进行水平加载. 位移加载曲线图如图 8 所示.

式为弯剪破坏, 破坏出现“X 型”主裂缝以及底部贯通横向裂缝. 试验现象如图 9 与图 10 所示.



图 7 加载装置实物图
Fig. 7 Photo of loading device

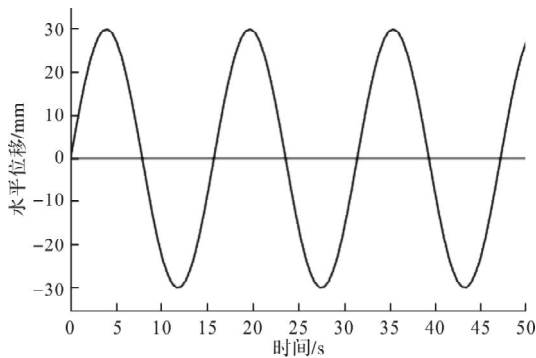


图 8 频率为 0.4 Hz 时位移加载曲线图
Fig. 8 Displacement loading curve at 0.4 Hz

2.3 试验结果与分析

由于钢板之间相互摩擦, 加载过程中伴随明显声响, 且可观察到螺栓垫片与钢板连接的墙角处会有明显的磨损痕迹. 加载结束后, 可观察到螺栓孔与型钢摩擦面会有明显磨损, 剪力墙破坏形



图 9 装置部件磨损情况
Fig. 9 Wear condition of device components



图 10 试件破坏情况
Fig. 10 Failure of specimen

各加载工况下, 新型水平连接装置的单位循环耗能力代表值 E_D 、割线刚度 K 和等效阻尼比 ζ_{eq} 的试验计算结果如表 1 所示.

表 1 各加载工况下装置力学性能参数计算值

Tab. 1 Calculated values of mechanical property parameters of the device under each loading condition

装置编号	加载频率/Hz	预紧力/kN	耗能力代表值/kN · mm	割线刚度/kN · mm ⁻¹	等效阻尼比
装置 A	0.2	45	3 434.381	1.198	0.507
装置 A	0.2	55	4 324.444	1.378	0.493
装置 A	0.2	65	4 931.723	1.532	0.514
装置 A	0.3	45	3 490.753	1.270	0.486
装置 A	0.3	55	4 158.029	1.454	0.506
装置 A	0.3	65	4 889.327	1.657	0.512
装置 A	0.4	45	3 608.878	1.272	0.502
装置 A	0.4	55	4 149.689	1.452	0.505
装置 A	0.4	65	4 940.998	1.628	0.527
装置 B	0.2	45	2 316.010	1.021	0.445
装置 B	0.2	55	2 688.854	1.128	0.432
装置 B	0.2	65	3 107.707	1.207	0.455
装置 B	0.3	45	2 549.098	1.014	0.444
装置 B	0.3	55	2 757.545	1.118	0.436
装置 B	0.3	65	3 055.193	1.155	0.468
装置 B	0.4	45	2 322.052	1.002	0.410
装置 B	0.4	55	2 784.706	1.182	0.417
装置 B	0.4	65	3 354.183	1.338	0.443

对表 1 数据进行分析可知,两试验组的单位循环耗能力与割线刚度均随螺栓预紧力的增加而增加,但等效阻尼比受螺栓预紧力的影响较小.通过滞回曲线可直观地描述装置的工作状态,以加载频率为 0.4 Hz 时的装置 A 为例,绘制不同螺栓预紧力的对比滞回曲线,如图 11 所示.

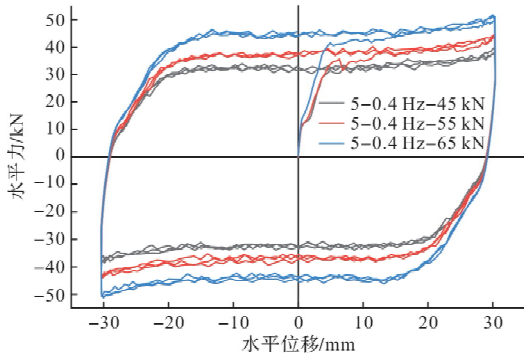


图 11 频率 0.4 Hz 下不同预紧力对装置 A 滞回性能的影响

Fig. 11 Influence of different preloads on hysteretic performance of device a at frequency of 0.4 Hz

同时分析数据可知,在仅改变加载频率时,两试验组各项数据均没有明显变化,说明不同加载频率对水平连接装置性能影响较小.以螺栓预紧力为 65 kN 时的装置 A 为例,绘制不同加载频率的对比滞回曲线,如图 12 所示.

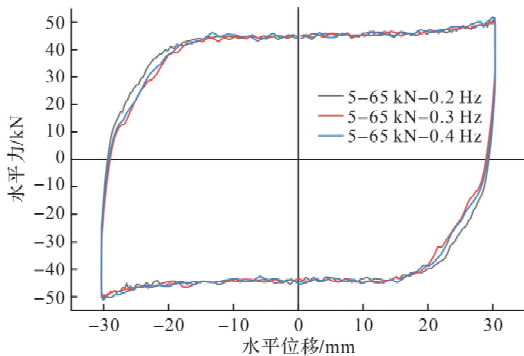


图 12 预紧力 65 kN 下不同频率对装置 A 滞回性能的影响

Fig. 12 Influence of different frequencies on hysteretic performance of device a under preload of 65 kN

在相同加载工况下,比较装置 A 与装置 B,发现装置 A 的各项性能参数均明显高于装置 B,耗能能力高出约 50%,割线刚度与等效阻尼比均高出 20%以上,说明在加载频率及螺栓预紧力保持不变的情况下,设有 5 个螺栓孔的连接装置 A 的滞回耗能性能明显优于 3 个螺栓孔的连接装置 B. 以加载频率为 0.4 Hz,螺栓预紧力为 65 kN 时为例,绘制不同螺栓数量的对比滞回曲线,如图 13 示.

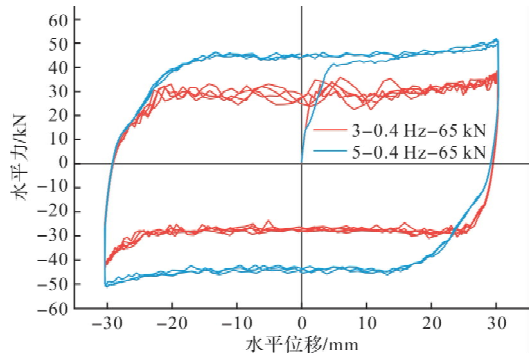


图 13 频率 0.4 Hz 预紧力 65 kN 下不同螺栓数量对装置滞回性能的影响

Fig. 13 Influence of different bolt quantity on hysteretic performance of device under 0.4 Hz frequency and 65 kN preload

3 有限元模拟

3.1 模型建立

通过有限元软件 ABAQUS,按照试件设计尺寸建立装置 A 与装置 B 的有限元模型,以装置 A 为例,装配完成的有限元模型如图 14 所示.

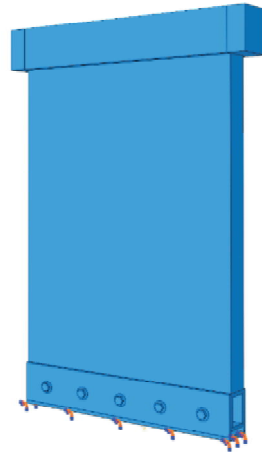


图 14 有限元模型装配图

Fig. 14 Assembly drawing of finite element model

对于试件所采用的混凝土材料,各项参数均为试验实测值,具体参数见表 2,本构关系参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录 C^[23].模型所用钢材具体参数见表 3,钢筋及钢板的材料属性采用理想的弹—塑性本构模型.高强螺栓采用双折线本构模型.

表 2 混凝土材料参数

Tab. 2 Parameters of concrete material

参数	强度等级	$f_{c,r}/\text{MPa}$	$f_{t,r}/\text{MPa}$	$\epsilon_{c,r}$	$\epsilon_{t,r}$	弹性模量/MPa
数值	C30	30.4	2.317	1.255E-3	1.02E-4	29 518

表 3 钢材材料参数

Tab. 3 Parameters of steel materials

材料型号	直径/ mm	f_y / MPa	f_u / MPa	弹性 模量/MPa	泊松比
HPB300	6	298	412	210 000	0.3
HRB400	8	406	556	200 000	0.3
HRB400	12	410	581	20 0000	0.3
Q345	-	345	530	206 000	0.3
10.9 级	30	940	1 040	209 000	0.31
12.9 级	30	1 100	1 220	209 000	0.31

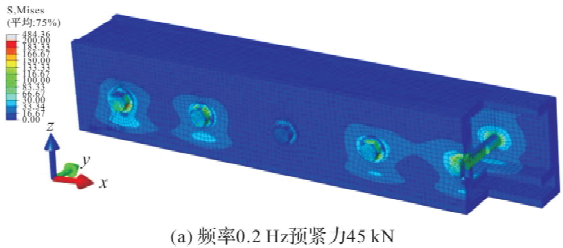
在上部箱型钢与下部槽型钢之间、螺栓孔与螺杆之间、垫片与钢板之间和垫片与螺母之间创建面与面接触对, 将接触属性中法向行为设置为“硬接触”, 水平行为设置为“罚”函数, 摩擦系数取 0.2。上部箱型钢上表面和墙体下表面之间的接触行为设置为绑定(Tie)。创建两个参考点, 分别与上部箱型钢和下部槽型钢作耦合, 在这两个参考点之间创建线条特征, 为线条指派“铰(HINGE)”连接属性。在下部槽型钢底面添加固定约束边界条件。对于螺栓预紧力, 通过载荷中的螺栓荷载进行预紧力施加。在顶梁端面通过施加一个正弦周期位移约束, 来实现在不同加载频率下的正弦位移加载。

3.2 有限元分析结果对比

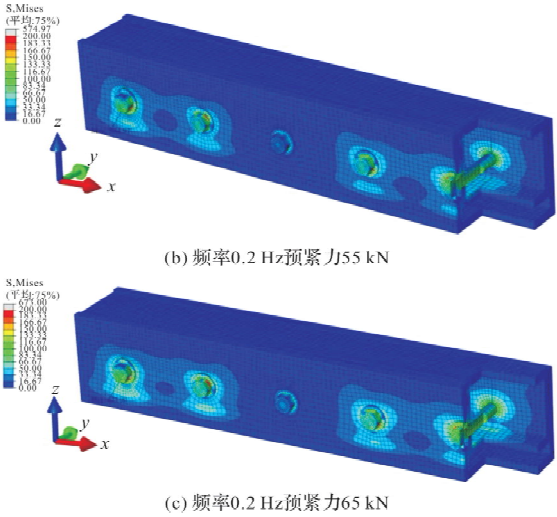
3.2.1 应力对比

由已有试验可知, 水平连接装置的力学性能对不同加载频率的反应较小, 故只对频率为 0.2 Hz 加载工况进行分析, 分析两种装置的有限元模型所得 Mises 应力云图如图 15 和图 16 所示。

由图可知, 装置模型应力主要分布在钢板摩擦接触区域, 应力区域以螺栓为中心向外扩散; 6 个装置模型中装置 A 预紧力为 65 kN 的有限元模型 Mises 应力最大, 达到 673 MPa, 应力最大值主要集中在螺母边缘。由于最大应力仍然远低于材料屈服强度设计值, 可知模型仍处于弹性阶段, 这与试验现象中试件无明显塑性变形相对应。将有限元应力云图与试验现象进行对比, 可知有限元模型中的应力分布形式与试验相吻合。



(a) 频率0.2 Hz预紧力45 kN

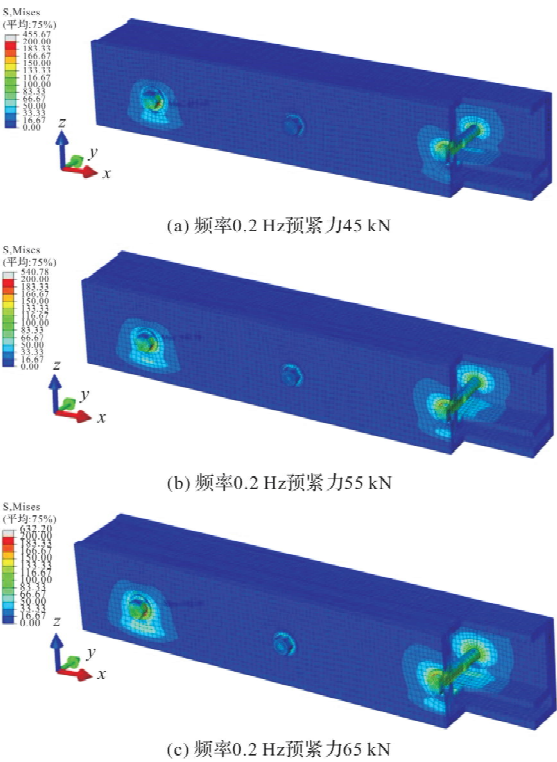


(b) 频率0.2 Hz预紧力55 kN

(c) 频率0.2 Hz预紧力65 kN

图 15 装置 A 有限元模型应力云图

Fig. 15 Stress nephogram of finite element model of device A



(a) 频率0.2 Hz预紧力45 kN

(b) 频率0.2 Hz预紧力55 kN

(c) 频率0.2 Hz预紧力65 kN

图 16 装置 B 有限元模型应力云图

Fig. 16 Stress nephogram of finite element model of device B

3.2.2 滞回曲线对比

表 4 为模拟结果与试验结果的数据对比。根据已有试验数据绘出试验滞回曲线, 将其与有限元模型滞回曲线进行对比分析, 绘出滞回曲线对比图, 如图 17 和图 18 所示。由对比分析可知: 有限元模型得出的滞回曲线饱满, 与试验结果吻合, 能较好地反应水平连接装置的滞回性能。试验得到的滞回曲线在达到最大位移前会出现曲线上扬的现象, 经过仔细分析可知, 墙体设计厚度与上部箱型钢设计宽度相同, 但是, 由于木模板误差

较大,墙体实际制作尺寸略大于设计宽度,这就导致过盈现象,随墙体进入下部槽型钢越来越深,水平推力会有一定程度增加。由于有限元建模精

度较高,不会出现上述过盈现象,故有限元模型计算得到的滞回曲线在此方面优于试验值。

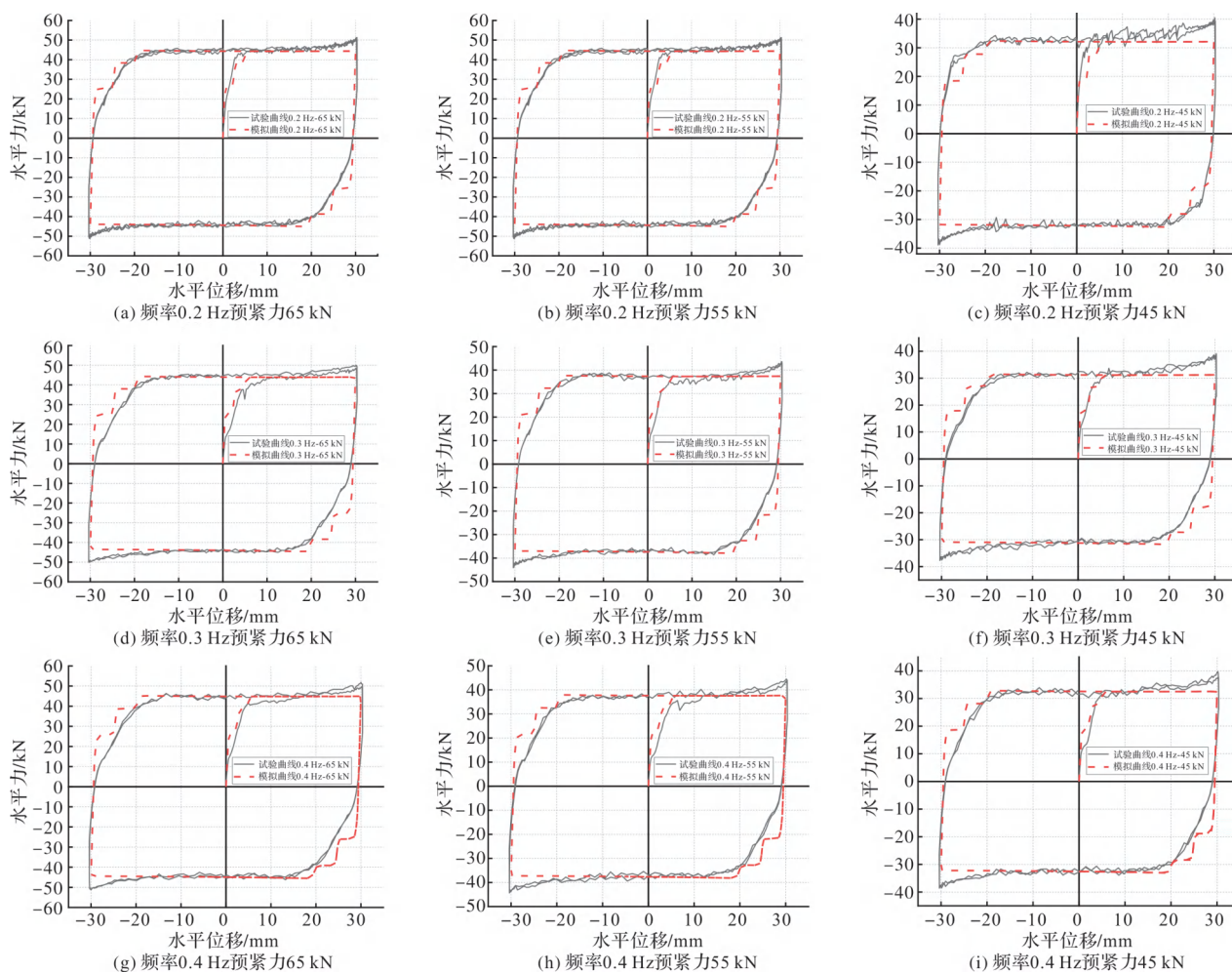
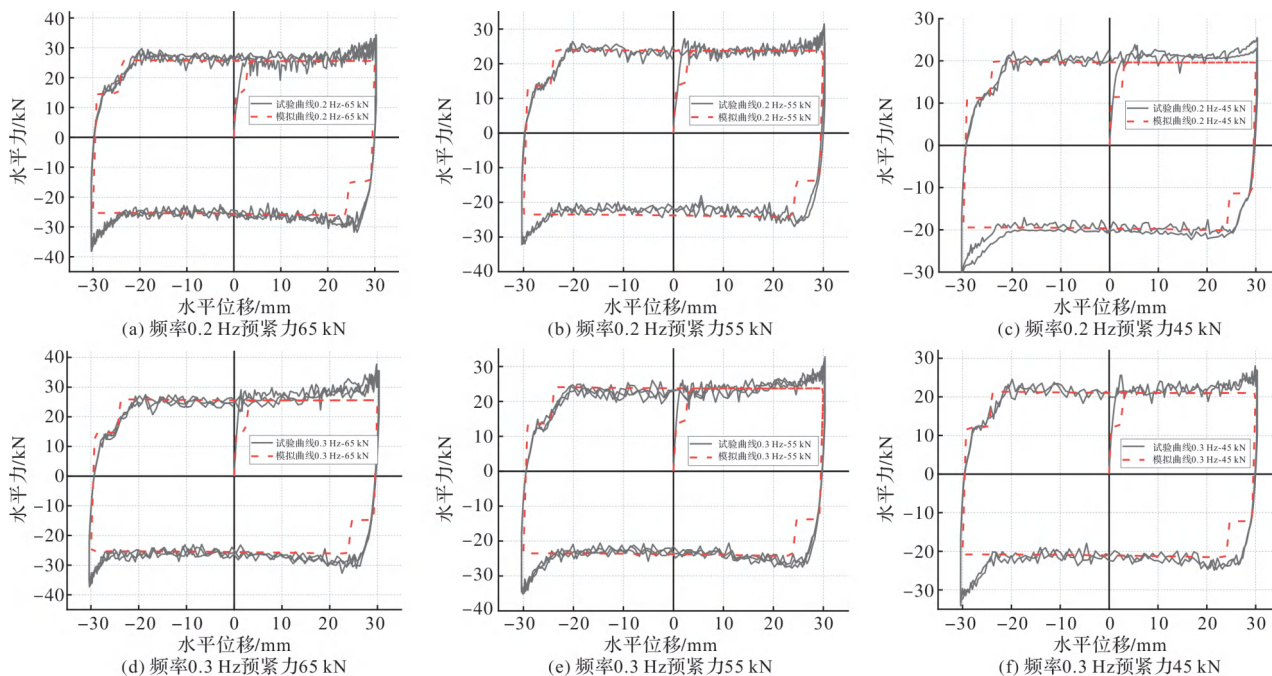


图 17 装置 A 模拟结果与试验结果对比

Fig. 17 Comparison between simulation results and test results of device A



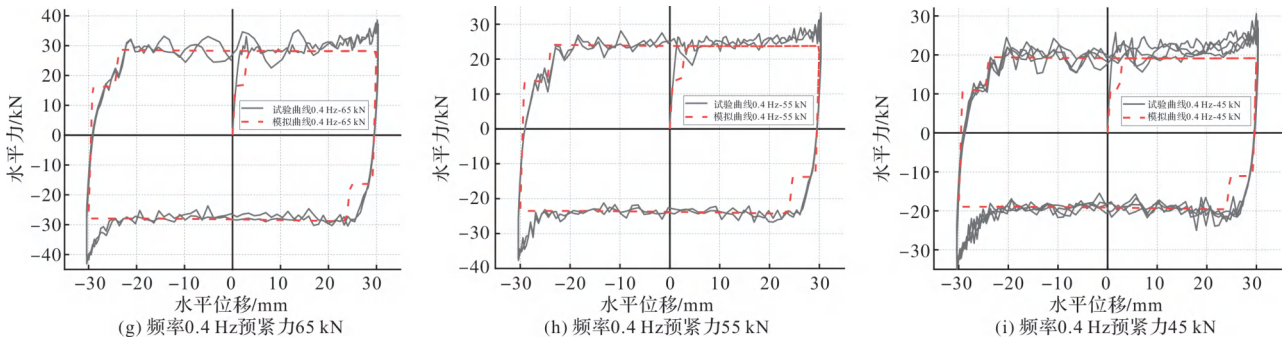


图 18 装置 B 模拟结果与试验结果对比

Fig. 18 Comparison between simulation results and test results of device B

通过对表 4 数据分析可知, 试验单位循环耗能能力代表值与有限元计算值相差较小, 对于两种装置的每个工况试件试验结果与有限元分析误差均低于 6.6%, 误差最小值低至 0.8%, 故有限元计算结果可较好反映新型水平连接装置的耗能性能。

综上所述, 经过对新型水平连接装置的数值仿真结果与试验结果的比较研究表明: 有限元模拟与试验的滞回曲线比较一致, 单周期循环耗能能力误差较小, 有限元模型可以与试验结果较好地吻合, 同时也证实了新型水平连接装置有限元数值分析模型的正确性。

表 4 模拟结果与试验结果对比

Tab. 4 Comparison between simulation and experiment

装置 编号	加载 频率/Hz	螺栓预 紧力/kN	$E_{D,TEST} /$ kN · m	$E_{D,FEM} /$ kN · m	$\delta / \%$
装置 A	0.2	45	3 434.381	3 629.06	5.4
装置 A	0.2	55	4 324.444	4 253.74	-1.7
装置 A	0.2	65	4 931.723	4 994.94	1.3
装置 A	0.3	45	3 490.753	3 528.54	1.1
装置 A	0.3	55	4 158.029	4 214.02	1.3
装置 A	0.3	65	4 889.327	4 952.14	1.3
装置 A	0.4	45	3 608.878	3 676.47	1.8
装置 A	0.4	55	4 149.689	4 243.14	2.2
装置 A	0.4	65	4 940.998	5 053.23	2.2
装置 B	0.2	45	2 316.010	2 243.26	-3.2
装置 B	0.2	55	2 688.854	2 709.21	0.8
装置 B	0.2	65	3 107.707	2 915.30	-6.6
装置 B	0.3	45	2 549.098	2 402.72	-6.1
装置 B	0.3	55	2 757.545	2 709.21	-1.8
装置 B	0.3	65	3 055.193	2 915.77	-4.8
装置 B	0.4	45	2 322.052	2 186.67	-6.2
装置 B	0.4	55	2 784.706	2 709.27	-2.8
装置 B	0.4	65	3 354.183	3 214.37	-4.3

注: $E_{D,TEST}$ 为试验所得单位循环耗能能力代表值, $E_{D,FEM}$ 为有限元所得单位循环耗能能力代表值, 误差 $\delta = (E_{D,FEM} - E_{D,TEST}) / E_{D,TEST}$

3.3 较大预紧力对装置性能的影响

本节利用此有限元模型对较大预紧力下各个装置的力学性能进行模拟。预紧力值的变化范围为 65~250 kN, 此范围能更加合理地体现装置正常工作状态下的力学性能。通过有限元模拟得到装置 A 的较大预紧力滞回曲线如图 19 所示, 表 5 给出了计算得到的较大预紧力下装置的力学性能参数。

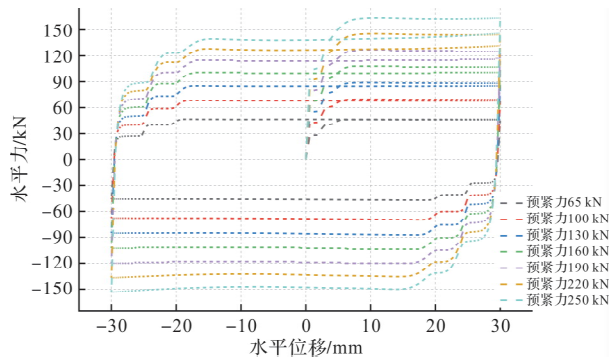


图 19 装置 A 较大预紧力下的模拟结果

Fig. 19 Simulation results of device A under large preloa

图 20 给出了装置螺栓预紧力与装置各个力学性能参数的关系。由图表可知, 最大水平力, 耗能能力及割线刚度与预紧力呈近似线性增长趋势。利用 Origin 软件对三组数据进行一元线性回归拟合, 可以通过螺栓预紧力值预测三个参数的值。得到螺栓预紧力与三个参数的一元线性方程为

螺栓预紧力与耗能能力代表值

$$E_p = 60.88P + 1\,607.45 \quad (1)$$

螺栓预紧力与割线刚度

$$K = 0.018\,6P + 0.387\,6 \quad (2)$$

螺栓预紧力与最大水平力

$$F_{\max} = 0.537P + 13.771 \quad (3)$$

随着预紧力的逐渐增大, 有限元模型的滞回曲线也变得更加饱满, 装置也表现出更出色的耗

能力. 通过图 20(c)可以看出, 等效阻尼比随预紧力值增大基本保持不变. 随着预紧力值增加, 曲线由线性向非线性过渡的范围也随之增大, 说明随着预紧力值增大, 钢板开始有一定变形, 但未发现屈服失稳现象.

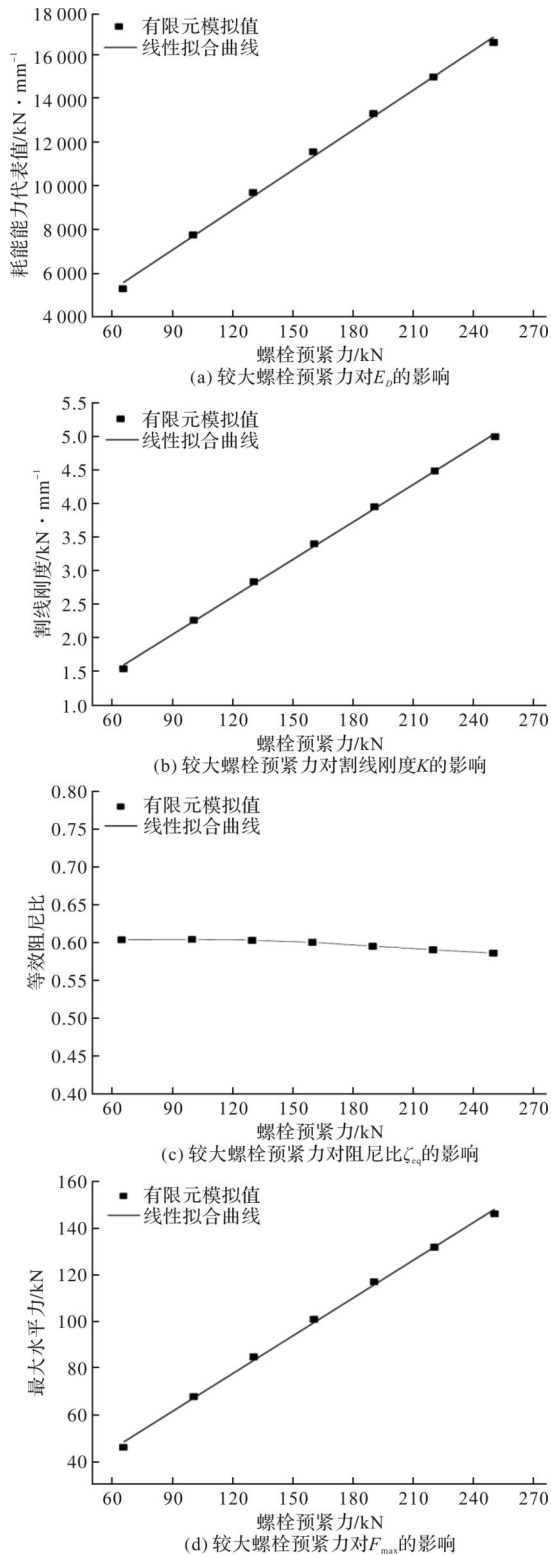


图 20 较大预紧力对装置 A 力学参数的影响

Fig. 20 Influence of larger preload on mechanical properties of device A

表 5 较大预紧力下装置的力学性能参数

Tab. 5 Mechanical performance parameters of the device under large preload

装置 编号	螺栓 预紧力/kN	$E_{D,FEM} /$ $kN \cdot mm$	割线 刚度	等效 阻尼比	F_{max} / kN
装置 A	65	5 271.76	1.54	0.60	46.3
装置 A	100	7 744.22	2.26	0.61	68.0
装置 A	130	9 687.14	2.84	0.60	85.0
装置 A	160	11 561.17	3.40	0.60	101.0
装置 A	190	13 312.63	3.95	0.60	117.0
装置 A	220	14 985.81	4.48	0.59	131.8
装置 A	250	16 569.87	4.99	0.59	146.0
装置 B	65	3 083.57	0.91	0.60	27.3
装置 B	100	4 535.72	1.33	0.60	40.1
装置 B	130	5 715.19	1.68	0.60	50.6
装置 B	160	6 821.71	2.01	0.60	60.3
装置 B	190	7 813.12	2.33	0.59	69.6
装置 B	220	8 720.91	2.64	0.59	78.0
装置 B	250	9 672.38	2.94	0.58	86.3

通过有限元模拟得到装置 B 的较大预紧力滞回曲线如图 21 所示. 图 22 给出了装置螺栓预紧力与装置各个力学性能参数的关系. 对比可知较大预紧力对装置 B 的影响与装置 A 相似. 同样利用 Origin 软件对三组数据进行一元线性回归拟合, 得到螺栓预紧力与三个参数的一元线性方程为

螺栓预紧力与耗能能力代表值

$$E_P = 35.40P + 984.26 \quad (4)$$

螺栓预紧力与割线刚度

$$K = 0.011P + 0.232 \quad (5)$$

螺栓预紧力与最大水平力

$$F_{max} = 0.318P + 8.2 \quad (6)$$

综上所述, 两种新型水平连接装置在较大预紧力工况下有良好的力学性能, 滞回曲线饱满, 有较强的耗能能力, 且耗能能力随预紧力增大而增大.

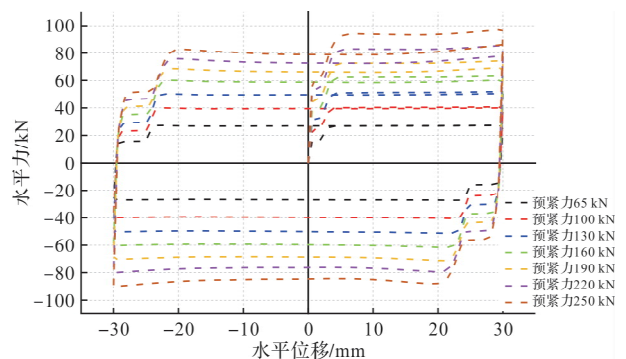


图 21 装置 B 较大预紧力下的模拟结果

Fig. 21 Simulation results of device B under large preload

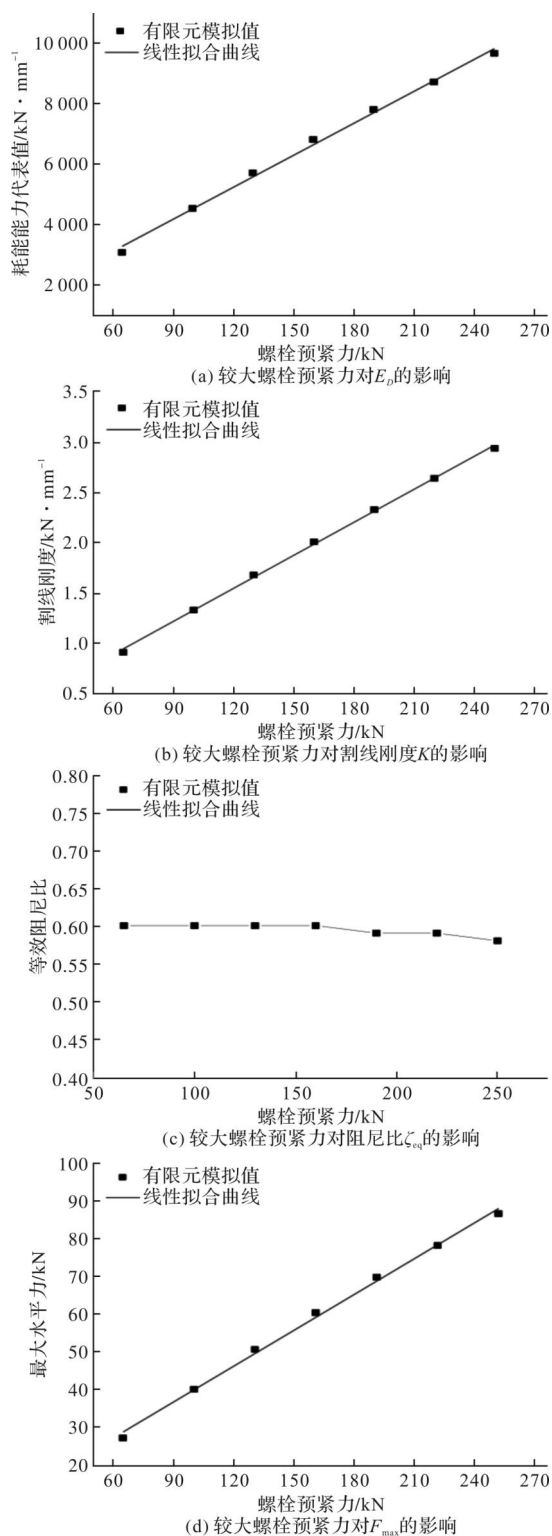


图 22 较大预紧力对装置 B 力学参数的影响

Fig. 22 Influence of larger preload on mechanical properties of device B

4 结论

为探究新型水平连接装置的相关力学性能,设计并制作了两组试件,进行了正弦曲线位移加载试验;通过 ABAQUS 软件,对水平连接装置进行数值模拟,主要结论如下:

(1) 增加螺栓预紧力和螺栓数量可有效增加水平连接装置的耗能能力,但加载频率对装置几乎没有影响.有限元模型的应力云图和滞回曲线与试验结果表现一致,说明 ABAQUS 有限元模拟结果可较好反映新型水平连接装置的耗能性能;

(2) 通过有限元分析对较大预紧力情况进行研究,发现随着预紧力值的增加,最大水平力值、耗能能力代表值及割线刚度也随之增大,且曲线由线性关系逐渐向非线性过渡的范围也随之增大,表明随着预紧力值增大,钢板开始有一定变形,但未发现屈服失稳现象.

参考文献 References

- [1] 汪梦甫, 杨惠迪. 预制混凝土剪力墙结构体系的研究现状与改进策略[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(1): 1-9.
WANG Mengfu, YANG Huidi. Research advance and improvement strategy of precast concrete shear wall structure system[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(1): 1-9.
- [2] 阿热帕提·艾斯凯尔, 陈国新. 预制装配式混凝土结构节点连接方式研究综述[J]. 结构工程师, 2020, 36(5): 224-233.
AISIKAIER A, CHEN Guoxin. Summary of investigation on joint form of precast concrete structure joints[J]. Structural Engineers, 2020, 36(5): 224-233.
- [3] 吴刚, 冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 1-16.
WU Gang, FENG Decheng. Research progress on basic performance of prefabricated concrete frame joints[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 1-16.
- [4] BORA C, OLIVA M G, NAKAKI S D, et al. Development of a precast concrete shear-wall system requiring special code acceptance[J]. PCI Journal, 2007, 52(1): 122-135.
- [5] LIM W Y, KANG T H K, HONG S G. Cyclic lateral testing of precast concrete T-walls in fast low-rise construction[J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(1): 179-189.
- [6] JIANG S F, LIAN S H, ZHAO J, et al. Influence of a new form of bolted connection on the mechanical behaviors of a PC shear wall[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1381.
- [7] ZHU L M, KONG L M, ZHANG C W. Numerical study on hysteretic behaviour of horizontal-connection and energy-dissipation structures developed for prefabricated shear walls[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1240.

- [8] SEMELAWYM E, DAMATTY A E, SOLIMAN A M. Novel anchor-jointed precast shear wall: testing and validation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2015, 168(4): 263-274.
- [9] SEMELAWYM E, DAMATTY A E, SOLIMAN A M. Finite-element analysis of anchor-jointed precast structural wall system[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2017, 170(8): 543-554.
- [10] SUN J, QIU H X, JIANG H B. Experimental study and associated mechanism analysis of horizontal bolted connections involved in a precast concrete shear wall system[J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(1): 282-295.
- [11] CHONG X, XIE L L, YE X G, et al. Experimental study on the seismic performance of superimposed RC shear walls with enhanced horizontal joints[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019, 23(1): 1-17.
- [12] SUN C F, LIANG S T, ZHU X J, et al. Experimental study and numerical simulation of precast shear wall with rabbet-unbonded horizontal connection[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020, 14(1): 1-16.
- [13] 王洪欣, 唐智荣, 王宁. 装配式型钢混凝土剪力墙抗震性能有限元研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(S2): 515-521
WANG Hongxin, TANG Zhirong, WANG Ning. Finite element study on seismic behavior of prefabricated steel reinforced concrete shear walls [J]. *Building Structure*, 2019, 49(S2): 515-521.
- [14] 王威, 熊峰, 徐锦祥, 等. 预制装配式混凝土墙板螺栓连接抗剪性能试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(S2): 86-92.
WANG Wei, XIONG Feng, XU Jinxiang, et al. Experimental study on shear resistance of bolted connections of prefabricated concrete wallboards [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2016, 48(S2): 86-92.
- [15] 鲍磊, 赵宏康, 方有珍, 等. 装配式剪力墙水平接缝钢板高强螺栓连接的抗震性能研究[J]. *江苏建筑*, 2020(6): 33-37.
BAO Lei, ZHAO Hongkang, FANG Youzhen, et al. Study on seismic performance of steel plate high-strength bolt connection with horizontal joint of prefabricated shear wall [J]. *Jiangsu Construction*, 2020(6): 33-37.
- [16] 李万润, 向荣江, 杜永峰. 一种新型螺栓连接预制剪力墙抗震性能分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 78-86.
LI Wanrun, XIANG Rongjiang, DU Yongfeng. Seismic performance analysis of a new bolt connected precast shear wall[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 78-86.
- [17] 汤统壁, 周云, 杨波. 摩擦耗能器的类型与性能及其在实际工程中的应用[J]. *世界地震工程*, 2008, 24(1): 47-55.
TANG Tongbi, ZHOU Yun, YANG Bo. Types and performance of friction dampers and their engineering applications [J]. *World Earthquake Engineering*, 2008, 24(1): 47-55.
- [18] PALL A S, MARSH C. Response of friction damped braced frames[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1982, 108(9): 1313-1323.
- [19] LI Z, HE M, DONG H, et al. Friction performance assessment of non-asbestos organic (NAO) composite-to-steel interface and polytetrafluoroethylene (PTFE) composite-to-steel interface: Experimental evaluation and application in seismic resistant structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 272-283.
- [20] SAMANI H R, MIRTAHERI M, ZANDI A P. Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 112: 354-362.
- [21] 王宇亮, 崔洪军, 张玉敏, 等. 滑动长孔螺栓摩擦阻尼器力学性能试验研究[J]. *震灾防御技术*, 2020, 15(1): 11-20.
WANG Yuliang, CUI Hongjun, ZHANG Yumin, et al. Experimental research on mechanical property of friction damper with sliding long-hole bolt[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2020, 15(1): 11-20.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑消能阻尼器: JG/T 209—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Dampers for vibration energy dissipation of buildings: JG/T 209—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [23] 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, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

(编辑 郑晓龙 沈 波)