

DOI:10.11918/202111005

新型装配式剪力墙水平连接装置的力学性能

熊二刚,郭帆,张萌,徐涵,樊禹江

(长安大学 建筑工程学院,西安 710061)

摘 要: 装配式剪力墙结构连接节点/水平接缝的力学性能对装配式结构起着至关重要的作用,为了提高装配式剪力墙结构的抗震性能,本文结合消能减震技术设计研发了一种新型装配式剪力墙水平连接装置。通过该设计,制作了2种不同螺栓数量的水平连接装置,并对其进行了不同正弦加载频率下的动态力学性能试验,探究了不同螺栓预紧力、加载频率及螺栓数量对装置力学性能的影响规律;探究了装置摩擦升温对其力学性能的影响规律。结果表明:该装置在保证结构可靠连接的同时,又能依靠装置的内部摩擦消耗大量地震能量,从而有效减小结构地震响应,保护主体结构。此外,螺栓预紧力与装置的耗能能力和割线刚度基本呈线性关系,但对等效阻尼比影响不大;水平连接装置的力学性能几乎不受加载频率的影响;增加螺栓数量可大幅提高装置耗能能力;螺栓预紧力与加载频率均是装置温度升高的重要影响因素,但装置温度变化对其力学性能影响不大。

关键词: 装配式剪力墙;水平连接装置;摩擦耗能器;螺栓预紧力;加载频率

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)11-0112-10

Mechanical behavior of a new horizontal connection device for fabricated shear wall

XIONG Ergang, GUO Fan, ZHANG Meng, XU Han, FAN Yujiang

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The mechanical properties of the connection joints/horizontal joints of the fabricated shear wall structure play a vital role in the fabricated structure. To improve the seismic performance of the fabricated shear wall structure, we designed and developed a new type of horizontal connection device based on the energy dissipation technology. Through the design, two kinds of horizontal connection devices with different numbers of bolts were prepared. The dynamic mechanical properties of the devices under different sinusoidal loading frequencies were tested, and the influences of bolt preload, loading frequency, and bolt number on the mechanical properties of the device were explored. The influence of temperature rise caused by friction on the mechanical properties of the device was investigated. Results show that the device could ensure the reliable connection of the structure and meanwhile consume much seismic energy due to the internal friction, so as to effectively reduce the seismic response of the structure and protect the main structure. In addition, the bolt preload linearly correlated with the energy dissipation capacity and secant stiffness of the device, but had little effect on the equivalent damping ratio. The mechanical properties of the horizontal connection device were hardly affected by the loading frequency. Increasing the number of bolts could greatly improve the energy consumption capacity of the device. Bolt preload and loading frequency were important factors for the temperature rise in the device, but the temperature change in the device had little effect on its mechanical properties.

Keywords: fabricated shear wall; horizontal connection device; friction damper; bolt preload; loading frequency

装配式剪力墙结构具有节能环保、施工周期短、有利于绿色施工等优点,近年来在许多国家得到推广应用。随着中国建筑工业化的快速发展,装配式剪力墙结构也得到了一定的发展,取得了一定的成就。装配式剪力墙结构的抗震性能主要取决于剪力

墙的水平接缝质量。预制剪力墙之间的连接节点/水平接缝是受力的关键部位,结构设计中对接节点抗震性能具有较高要求,故结合先进的摩擦耗能技术设计一种可用于预制构件节点连接的摩擦耗能装置成为必要。国内外研究学者根据建筑结构的不同连接特点,设计研发了各式各样的摩擦耗能阻尼器^[1]。

加拿大学者 Pall 与 Marsh^[2] 于 1982 年开发设计的一种典型的摩擦耗能器——Pall 摩擦耗能器,

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51808046);

陕西省重点研发计划(2021SF461)

作者简介: 熊二刚(1980—),男,教授,博士生导师

通信作者: 熊二刚, x-e-g@163.com

其已在实际工程中得到应用; Nabid 等^[3-5]将长孔螺栓摩擦阻尼器用于混凝土墙板与梁相连部位构成墙板式摩擦阻尼器; Latour 等^[6-8]对采用喷铝钢板的长孔螺栓摩擦阻尼器进行了往复加载试验研究, 并对带有长孔螺栓摩擦阻尼器的梁柱节点进行了试验研究和有限元分析; Anoushehei 等^[9]试验研究了摩擦阻尼器不同摩擦材料, 在循环荷载作用下的力学性能; Naeem 等^[10]提出一种两侧装有重型扭转弹簧的新型旋转摩擦阻尼器; 隋伟宁等^[11-12]提出了一种新型旋转摩擦阻尼器, 并提出了一种适用于新型旋转摩擦阻尼器设计的计算方法; Golmoghany 等^[13]提出了一种由摩擦阻尼器和垂直剪力板 (HFD-VSP) 组成的新型混合控制系统, 新系统具有两级能量耗散的优势; Lee 等^[14]将转动摩擦阻尼器和长孔屈服阻尼器并联成一种新型复合耗能装置, 与相同屈服强度的传统长孔阻尼器相比, 对于中小地震, 仅激活旋转摩擦阻尼器, 复合阻尼器能在强震作用下同时工作; Mirzabagheri 等^[15]对具有多个单元的旋转摩擦阻尼器的性能进行了试验研究, 并将其试验结果与单个单元阻尼器的结果进行了比较。

尽管国内外的研究学者对剪力墙的水平连接装置、耗能装置进行了一定的研究, 但是其构造复杂、施工复杂、且性能相对单一, 不利于装配式剪力墙结构的推广和应用。为了提高装配式剪力墙结构的抗震性能, 本文结合消能减震技术, 设计了一种新型装配式剪力墙水平连接装置并进行试验研究, 通过试验结果分析螺栓预紧力、加载频率和螺栓数量对装置的耗能能力代表值、割线刚度及等效阻尼比等力学性能的影响规律; 分析研究了螺栓预紧力及加载频率等参数对装置温度变化的影响, 得出装置的温度变化对其力学性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

根据新型装配式剪力墙的力学性能需求, 综合考虑各新型水平连接装置设计方案的工作稳定性、摩擦耗能能力及装置各部件变形等因素, 得出一种具有良好耗能性能、构造简单、摩擦稳定性良好的新型装配式剪力墙水平连接装置。

设计目标及原则为: 1) 设计的连接装置形状应适用于装配式剪力墙的水平接缝且构造简单, 在保证可靠连接的同时方便用于实际结构; 连接装置具有足够的承载力, 有效地传递竖向及水平荷载。2) 通过控制高强螺栓的预紧力, 既能保证结构的可靠连接, 又能依靠连接装置的内部摩擦消耗大量地震能量, 从而达到有效减小结构地震响应, 保护主体

结构的目的。

新型装配式剪力墙水平连接装置的构造见图 1。装置的构造呈二维对称, 构造简单, 组成部件主要包括上部箱型钢、下部槽型钢、通长高强螺栓及螺栓垫片等。在上部箱型钢和下部槽型钢上都开有螺栓孔, 其中下部槽型钢中间为圆形螺栓孔, 两侧的螺栓孔为弧形槽孔, 槽型孔长度随中心距增大而增大, 呈“WIFI”形状。主要是为了使上部槽型钢能以中间螺栓为中心相对下部槽型钢转动。5 个螺栓新型水平连接装置命名为装置 A。为了与装置 A 进行对比分析, 同时制作一种 3 个螺栓的装置 B, 装置 B 与 5 个螺栓的装置 A 的主要区别在于螺栓的数量及螺栓孔间距, 装置 B 构造见图 2。

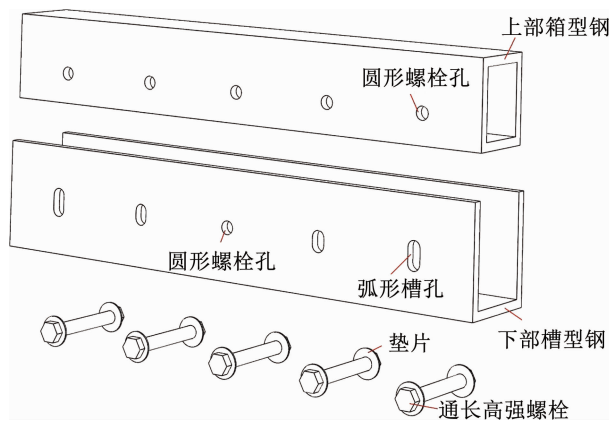


图 1 装置 A 三维构造

Fig. 1 Three-dimensional configuration of device A

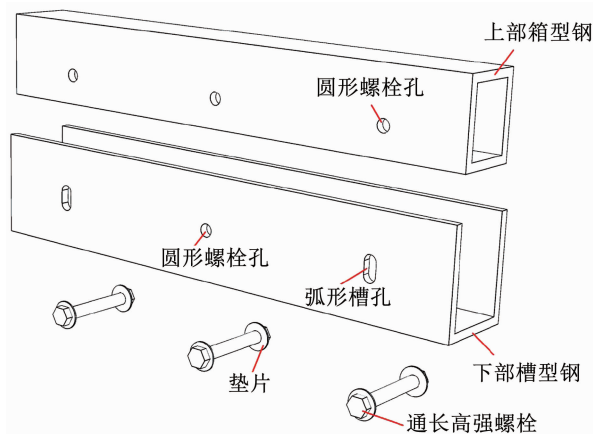
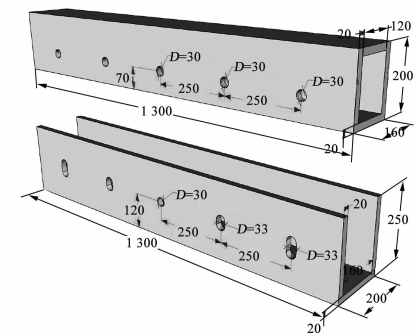


图 2 装置 B 三维构造

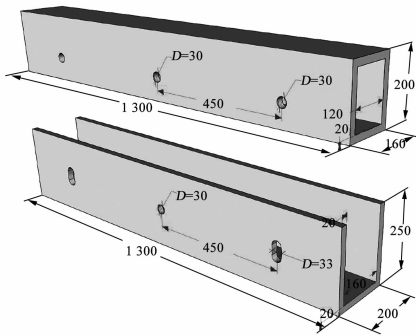
Fig. 2 Three-dimensional configuration of device B

上部箱型钢长 1 300 mm、宽 160 mm、高 200 mm, 钢板厚 20 mm, 装置 A 开有 10 个螺栓孔, 装置 B 开有 6 个螺栓孔。下部槽型钢长 1 300 mm、高 250 mm、宽 200 mm, 钢板厚 20 mm。装置 A 开有 8 个弧形槽孔及 2 个直径为 30 mm 的圆形螺栓孔, 装置 B 开有 4 个弧形槽孔及 2 个直径为 30 mm 的圆形螺栓孔。装置 A 上下两型钢通过 5 个 10.9 级 M30 高强螺栓

连接,装置 B 通过 3 个 12.9 级 M30 高强螺栓连接,试件的几何尺寸见图 3 和图 4。



(a) 装置A部件尺寸



(b) 装置B部件尺寸

图 3 水平连接装置部件尺寸 (mm)

Fig. 3 Dimension of horizontal connection device(mm)

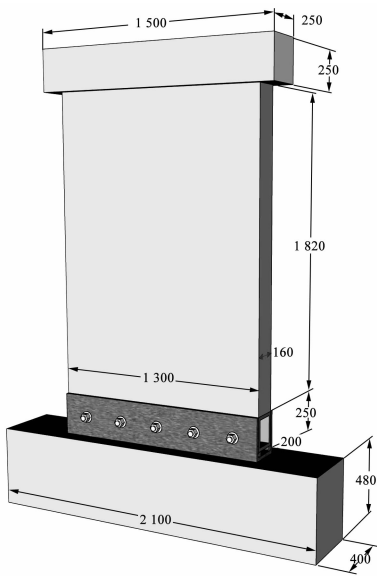
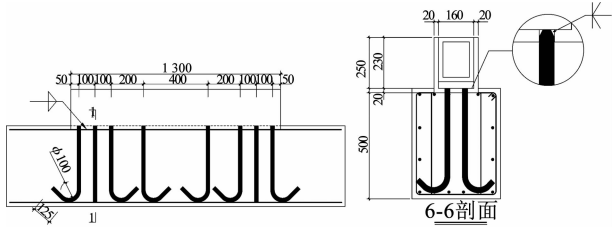


图 4 试件尺寸 (mm)

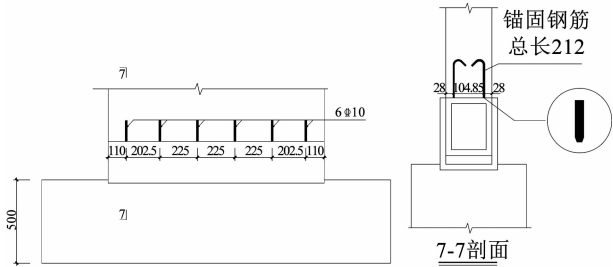
Fig. 4 Dimension of specimen(mm)

装置在上部箱型钢墙体边缘构件纵筋位置处打孔,以便增加钢筋与钢板的焊缝高度,其他钢筋跟水平连接装置采用端焊。在箱型钢上焊接了数根锚固短筋。同时为了实现水平连接装置与地梁的可靠连接,在下部槽钢同样制作数个圆孔,增加钢板与锚固

钢筋的连接可靠性,并将槽型钢与地梁上部纵筋焊接为一个整体,具体位置见图 5。



(a) 装置与地梁的锚固示意



(b) 墙体与装置的锚固示意

图 5 连接装置锚固示意 (mm)

Fig. 5 Anchoring diagram of connecting device(mm)

装置的工作过程见图 6,装置的上下型钢通过高强螺栓连接,对高强螺栓施加预紧力使上下两型钢接触面产生正应力,下部槽型钢两侧为弧形螺栓孔,中间为圆形螺栓孔,上部箱型钢可以以中间螺栓为中心相对下部槽型钢转动。装置按图中数字顺序循环工作,在转动过程中,钢板之间摩擦消耗大量地震能量,达到消能减震,保护主体结构的目的。

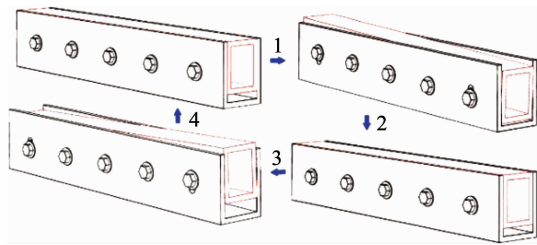


图 6 装置工作原理

Fig. 6 Working principle of device

该水平连接装置的工作原理可以分为 3 个阶段:1)结构在水平荷载作用下,当水平荷载小于预设起滑荷载时,结构不发生转动,受力形式等同于现浇墙体,此时墙体所受的弯矩与剪力均由静摩擦力提供;2)当水平荷载大于预设起滑荷载,水平位移幅值小于限值时,结构发生转动,此时墙体所受的弯矩、剪力基本保持不变,新型装配式剪力墙结构以滑动摩擦的形式耗散地震能量;3)装置转动到最终限值时,此时墙体受力形态等同于现浇墙体,弯矩、剪力主要由装置的限位提供。

两个装置的上下两个型钢均采用 Q345 级碳素钢。装置 A 上下两型钢通过 5 个 10.9 级 M30 通长

高强螺栓连接,装置 B 通过 3 个 12.9 级 M30 通长高强螺栓连接。2 片墙体的混凝土强度均为 C30, 钢筋采用 HRB400 级钢筋,暗柱箍筋为 HPB300 级钢筋。剪力墙的配筋详见图 7。

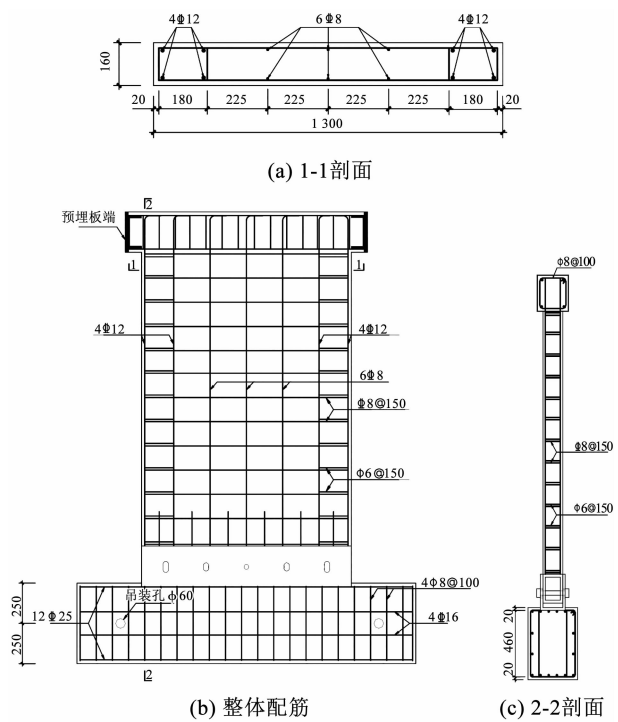


图 7 剪力墙配筋 (mm)

Fig. 7 Reinforcement of shear wall (mm)

1.2 加载装置及加载方案

试验在门式钢架下进行,水平荷载加载设备为额定荷载 500 kN 的 MTS 液压伺服作动器。通过 4 根长螺杆将液压伺服作动器与墙体的顶梁进行连接,并通过液压伺服作动器对剪力墙的顶梁施加水平正弦周期荷载。底梁通过钢压梁与地槽固定连接。加载装置实物见图 8,加载装置示意图见图 9。

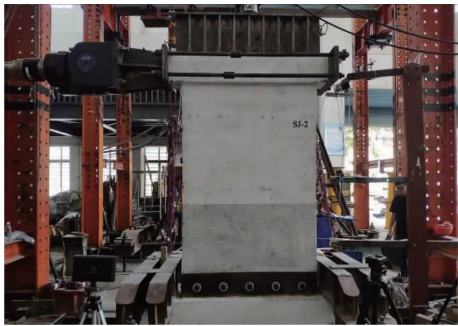


图 8 加载装置实物

Fig. 8 Photo of loading device

本次试验采用位移控制的加载方法,按照正弦曲线进行位移控制加载,通过确定加载频率及幅值控制作动器的实时位移,位移加载曲线见图 10。试验共 18 组加载工况,变化参数为加载频率和每个螺栓的预紧力值。记录试件装置 A 的 9 组加载工况

中装置钢板的初始温度及加载过程中的温度变化,设计加载幅值为 30 mm,各个工况均加载 60 个循环。对于试件装置 B 只需加载 3 个循环,无需监测温度变化,18 组加载工况见表 1。

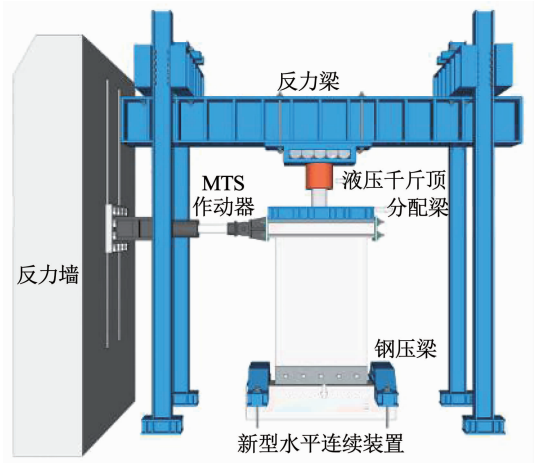


图 9 加载装置示意

Fig. 9 Schematic diagram of loading device

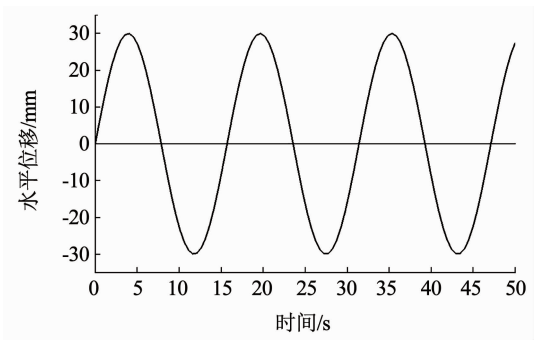


图 10 频率为 0.4 Hz 时位移加载曲线

Fig. 10 Displacement loading curve at 0.4 Hz

表 1 加载工况表

Tab. 1 Loading cases

工况编号	试件编号	频率/Hz	单个螺栓预紧力值/kN
1	装置 A	0.2	45
2	装置 A	0.2	55
3	装置 A	0.2	65
4	装置 A	0.3	45
5	装置 A	0.3	55
6	装置 A	0.3	65
7	装置 A	0.4	45
8	装置 A	0.4	55
9	装置 A	0.4	65
10	装置 B	0.2	45
11	装置 B	0.2	55
12	装置 B	0.2	65
13	装置 B	0.3	45
14	装置 B	0.3	55
15	装置 B	0.3	65
16	装置 B	0.4	45
17	装置 B	0.4	55
18	装置 B	0.4	65

1.3 量测内容及测点布置

试验的量测内容包括通过 MTS 作动器内置传感器测量加载点的水平力及水平位移值,用量程为 300 mm 的高精度激光位移计记录顶梁另一端中点处的水平位移值,通过在剪力墙单侧墙体的 1/4、1/2、距顶梁下侧 50 mm 处和底梁一端中点处架设 4 个 LVDT 位移计测量墙体水平侧移。在装置一侧的中间孔及两个槽型孔下面各布置一个应变花,用于测量钢板的应变值,温度传感器、应变花及位移计布置见图 11。在下部槽型钢的内侧紧邻螺栓孔上侧开细槽,埋设 3 个热电偶温度传感器,用于测量摩擦接触面在装置正常工作时的温度变化,热电偶温度传感器实物布置见图 12。

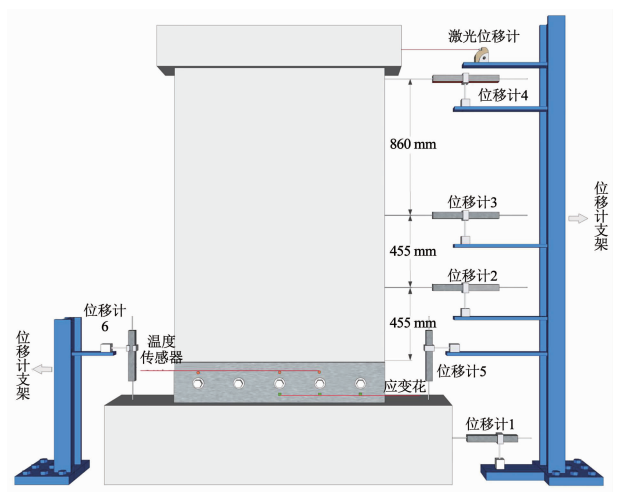


图 11 温度传感器、应变花及位移计布置

Fig. 11 Layout of temperature sensor, strain gauge, and displacement gauge

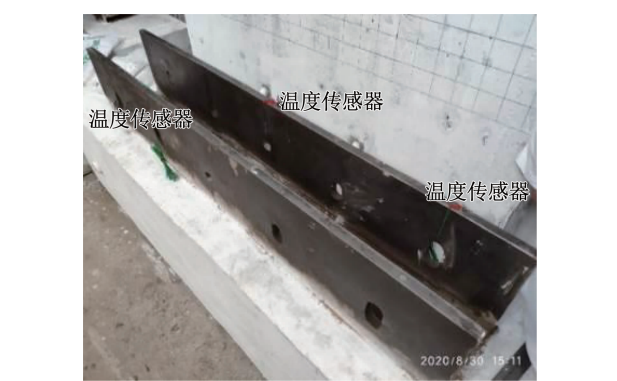


图 12 热电偶温度传感器实物布置

Fig. 12 Layout of thermocouple temperature sensor

2 试验现象

根据试验加载方案对 2 个试件装置 A 及装置 B 进行正弦曲线位移加载。试验准备阶段,架设激光位移计和 LVDT 位移计,将数据采集线与数据采集箱连接,并检查其是否正常工作。使用激光水平仪将试件对中,特别调整使螺栓位于孔位中间。试验

加载阶段,无需施加竖向荷载,利用 MTS 作动器进行正弦曲线位移控制的水平加载,加载过程中钢板摩擦会发出明显的“咔咔”声,而且“咔咔”声随预紧力的增大逐渐增大,随加载频率的增大声音更加连续。随着上部墙体的摆动,进入钢板的墙角墙体会被磨出明显痕迹,垫片周围会有明显铁屑掉落。加载结束后,将装置拆解会发现螺栓孔周围及两个型钢的摩擦面会有明显磨损的痕迹。实际试验现象见图 13。试件破坏时墙角处混凝土破碎严重,边缘纵筋暴露并明显观测到弯曲严重,破坏后整体裂缝分布情况见图 14。

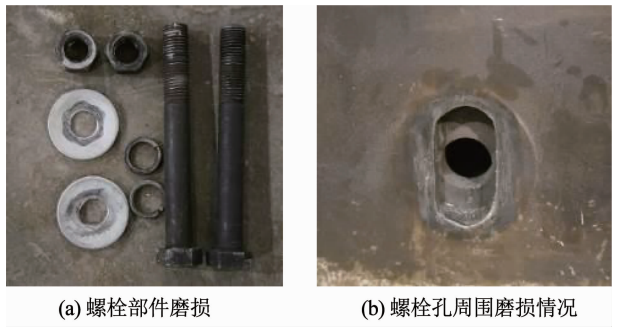


图 13 装置部件磨损情况

Fig. 13 Wear conditions of device components



图 14 试件破坏情况

Fig. 14 Failure of specimen

3 试验结果与分析

3.1 耗能性能分析

3.1.1 预紧力对装置性能的影响

本节研究螺栓预紧力对新型水平连接装置的单位循环耗能能力代表值 E_D 、割线刚度 K 和等效阻尼比 ζ_{eq} 等力学性能的影响。对于两个新型水平连接装置,均取滞回曲线的第二圈数据进行装置的力学性能分析。试验所得荷载-位移曲线见图 15。

由试验数据绘出的滞回曲线可直观地反映水平连接装置的实际工作状态。由图 15 可知,滞回曲线均呈矩形形状且规则饱满,表明装置具有良好的摩

擦耗能能力;相同加载频率作用下新型水平连接装置的耗能性能都随螺栓预紧力的增加而逐渐增大。

分析计算各加载频率作用下,不同螺栓预紧力对两个水平连接装置的力学性能参数,计算结果见

表 2。其中,加载频率为 0.4 Hz 时,不同螺栓预紧力对两个水平连接装置的各性能参数的影响见图 16 和图 17。

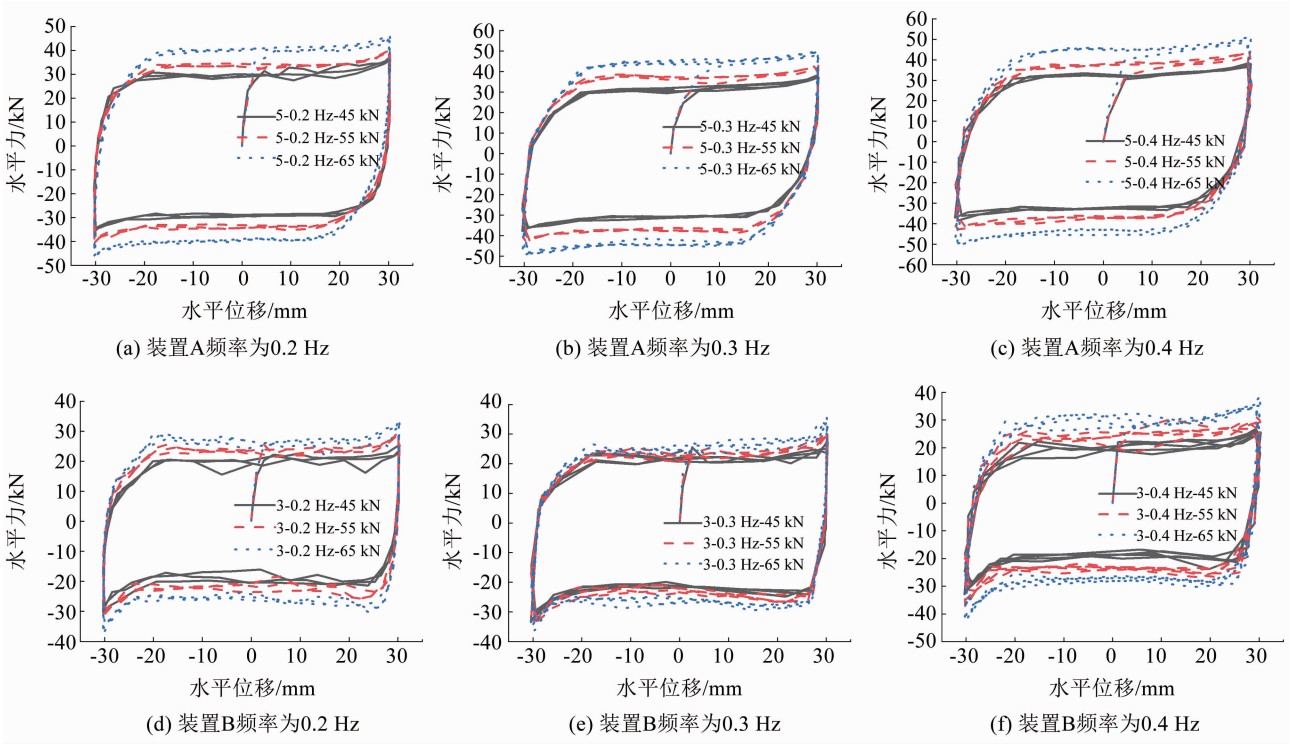


图 15 不同螺栓预紧力对水平连接装置滞回性能的影响

Fig. 15 Effect of bolt preload on hysteretic performance of horizontal connection device

表 2 各个加载工况作用下预紧力对装置参数影响					
Tab. 2 Influence of preload on device parameters under different loading cases					
装置编号	加载频率/Hz	预紧力/kN	耗能能力代表值/(kN·mm)	割线刚度/(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比 ζ_{eq}
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

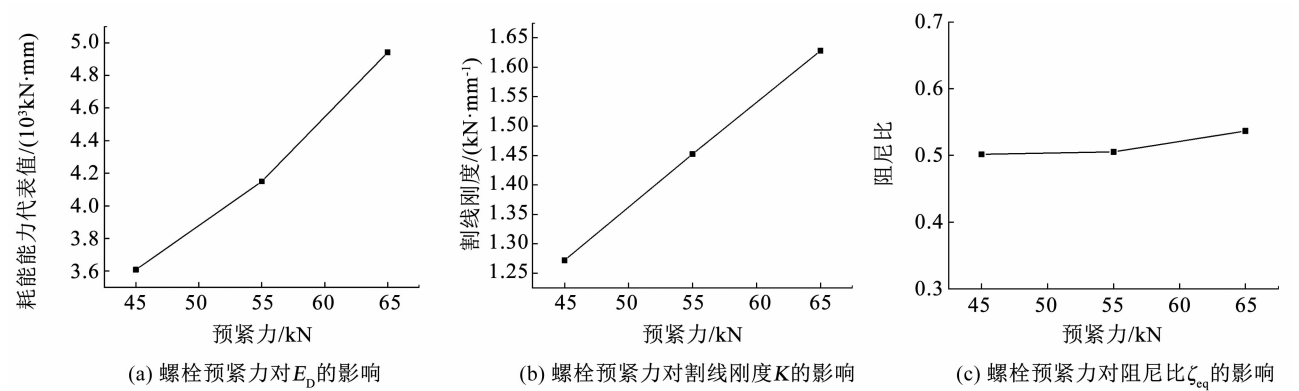


图 16 不同预紧力对装置 A 力学性能参数的影响

Fig. 16 Effect of preload on mechanical property parameters of device A

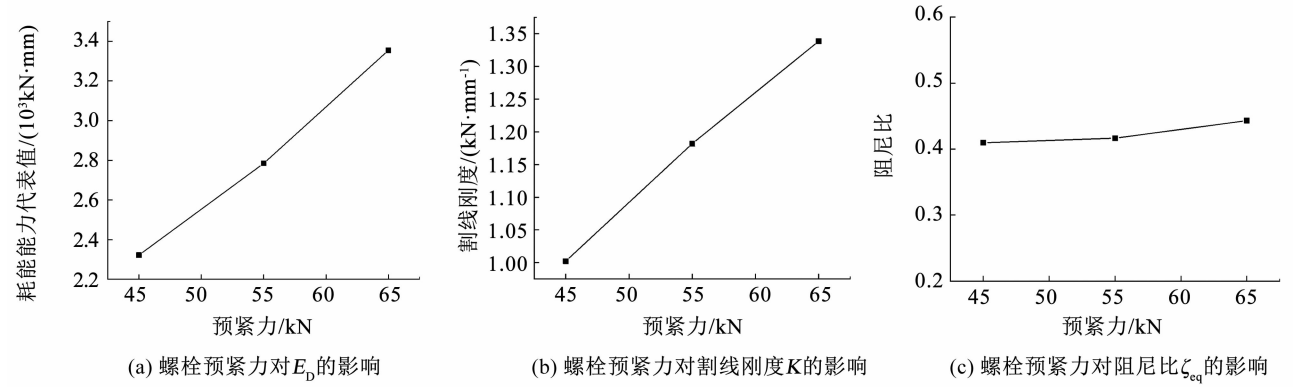


图 17 不同预紧力对装置 B 力学性能参数的影响

Fig. 17 Effect of preload on mechanical property parameters of device B

从表 2、图 16 和图 17 可以看出,随着螺栓预紧力的增加,两种新型水平连接装置的单位循环耗能能力代表值 E_D 和割线刚度 K 也随之增加,而且呈近似线性关系。其中对于单位循环耗能能力代表值 E_D ,后一级荷载比前一级增加约 11% ~ 20%。对于割线刚度 K ,后一级荷载比前一级增加约 10% ~ 19%。等效阻尼比 ζ_{eq} 与耗能能力代表值 E_D 和割线刚度 K 两者的比值呈线性关系,等效阻尼比 ζ_{eq} 随螺栓预紧力增加保持相对稳定。装置 A 的等效阻尼比约保持在 0.5,装置 B 的等效阻尼比约保持在 0.42,装置 A 的阻尼耗能能力要明显略大于装置 B。

3.1.2 加载频率对装置性能的影响

为了研究不同加载频率对新型水平连接装置力学性能的影响规律,在螺栓预紧力不变的情况下,对比分析装置的滞回耗能性能、割线刚度 K 及等效阻尼比 ζ_{eq} 等力学性能的变化情况。试验滞回曲线对比分析见图 18。对于两个新型装配式剪力墙水平连接装置,均取滞回曲线的第二圈数据进行研究分析。各力学性能参数计算结果见表 2。

由图 18 可知,对于两种水平连接装置,当螺栓预紧力保持不变时,改变正弦加载频率,水平力几乎保持恒定值,3 条滞回曲线几乎重合,说明水平连接装置的力学性能几乎不受加载频率的影响。由表 2

可知,在螺栓预紧力保持不变的情况下,装置的循环耗能能力代表值 E_D 、割线刚度 K 及等效阻尼比 ζ_{eq} 力学性能参数也均浮动不大,进一步说明了不同加载频率并不影响水平连接装置耗能性能。

3.1.3 螺栓数量对装置性能的影响

装置 A 与装置 B 分别通过 5 个通长螺栓与 3 个通长螺栓连接。对于本文所研究的新型水平连接装置,螺栓的数量直接决定着单个螺栓预紧力相同情况下钢板所承受的正应力的 大小,也就决定着钢板之间摩擦力的大小,决定着装置的总体耗能能力。通过上文分析比较,得知不同加载频率未对水平连接装置耗能性能产生影响,故本节只需探究加载频率为 0.4 Hz 时,螺栓数量对水平连接装置耗能性能的影响。

如图 19 所示,在加载频率及螺栓预紧力保持不变的情况下,5 个螺栓连接装置 A 的滞回耗能性能明显优于 3 个螺栓连接装置 B。如表 2 所示,对于单位循环耗能能力代表值 E_D ,装置 A 比装置 B 增加了约 50%。装置 A 的割线刚度 K 比装置 B 增加了约 22%。对于等效阻尼比 ζ_{eq} ,装置 A 比装置 B 增加了约 21%,进一步说明 5 个螺栓连接装置 A 的滞回耗能性能明显优于 3 个螺栓连接装置 B。

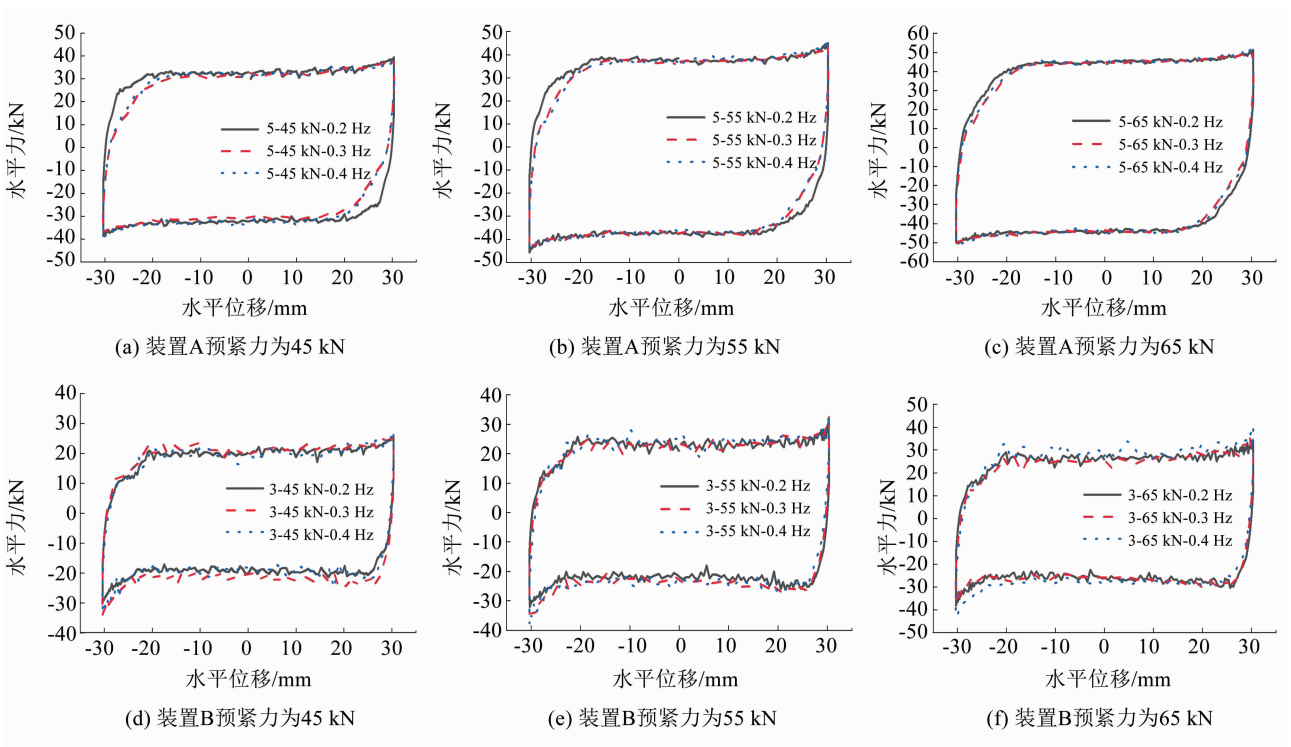


图 18 不同加载频率对水平连接装置滞回性能的影响

Fig. 18 Effect of loading frequency on hysteretic performance of horizontal connection device

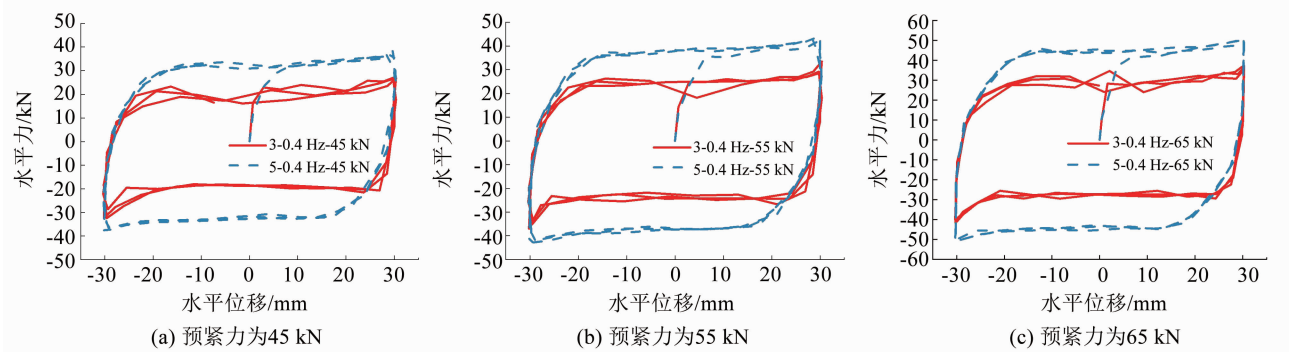


图 19 不同螺栓数量对水平连接装置滞回性能的影响

Fig. 19 Effect of bolt number on hysteresis performance of horizontal connection device

3.2 温度对连接装置力学性能的影响

前人对阻尼器的研究主要是通过摩擦阻尼器的荷载-位移曲线来研究阻尼器的耗能能力,而并未考虑温度对摩擦阻尼器力学性能的影响。在工作过程中,摩擦阻尼器会由于摩擦生热导致其内部温度升高,从而影响摩擦阻尼器的力学性能参数。摩擦阻尼器的温度变化主要影响摩擦面的摩擦系数等力学性能参数,从而影响摩擦阻尼器的耗能性能。因此,本文对新型水平连接装置温度特性的研究具有重要意义。

对于装置 A 布置 3 个测温点,见图 12。通过 3 个测温点的温度测量数据分析可知,温度升高幅度随测温点距中间螺栓的距离增大而增大。以加载频率 0.3 Hz,预紧力 45 kN 工况为例,靠近中心测温点的温度几乎没有变化,离中心距离最远测点的温度升高 2.6 ℃,介于两者中间的测点温度升高 1 ℃。

故在下文分析过程中,只对温度变化明显的最外侧测点进行分析研究。

3.2.1 预紧力对装置温度的影响

对于装置 A 的 9 种加载工况,分析不同螺栓预紧力大小对新型水平连接装置温度变化的影响规律。在正常工作过程中,水平连接装置将部分摩擦机械能转化成热能,使装置的温度在往复循环中不断升高。试验过程中每个工况加载 60 圈,记录不同加载频率(0.2 Hz~0.4 Hz)和不同螺栓预紧力(45 kN~65 kN)对装置温度变化情况。

图 20(a)~(c)分别表示在 0.2 Hz~0.4 Hz 加载频率下,螺栓预紧力对新型水平连接装置温度变化的影响。从图中可以明显看出,随着螺栓预紧力增加,装置的升温速率加快。如图 21 所示,试验的初始温度约为 24 ℃,试样温度随加载循环次数的增加而升高。通过对比第一个循环与最后一个循环的

温差,可以看出螺栓预紧力越大,温差越大。在相同的加载频率情况下,螺栓预紧力越大,加载循环次数与温度曲线的斜率越大。在 0.4 Hz 频率下,当螺栓预紧力为 65 kN 时,加载完成 60 圈后温度上升了 3.4 ℃;当螺栓预紧力为 55 kN 时,加载完成 60 圈后温度上升了 2.9 ℃;当螺栓预紧力为 45 kN 时,加载完成 60 圈后温度上升了 2.6 ℃。因此,螺栓预紧力是装置温度升高的重要参数。

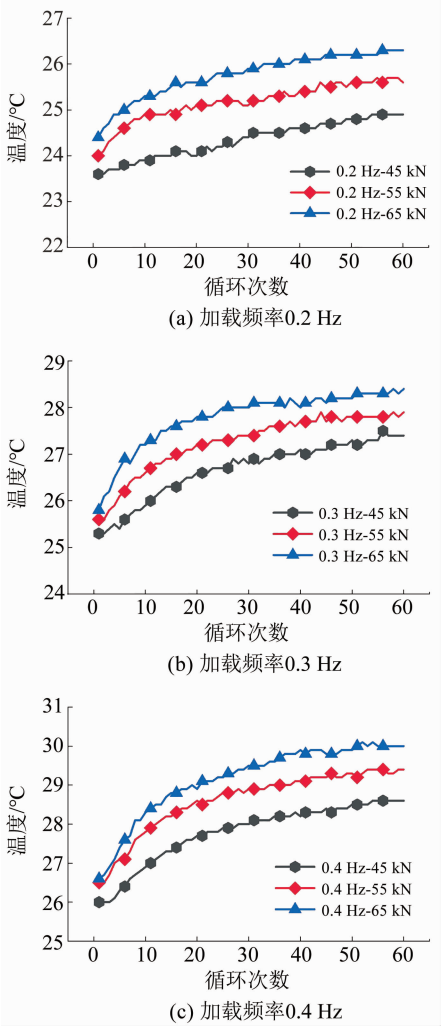


图 20 螺栓预紧力对装置温度变化的影响

Fig. 20 Effect of bolt preload on temperature change in device

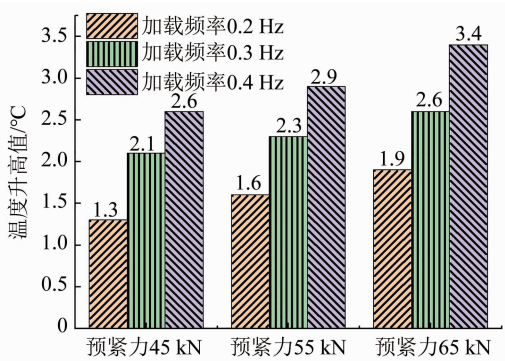


图 21 60 圈后装置的温度变化情况

Fig. 21 Temperature change in device after 60 turns

3.2.2 加载频率对装置温度的影响

如果加载速率不引起摩擦面性质变化,加载速率就不会引起摩擦系数的变化。但一般状况下,加载速率会引起摩擦面层的磨损、发热和变形,从而对摩擦系数产生一定的影响。加载速率对摩擦力大小的影响主要取决于温度变化。加载速率引起的温度变化改变了摩擦面层的性质和摩擦面层的相互作用,从而使摩擦系数发生相应的变化。随着正弦加载频率的增加,位移加载速率增大,加载周期缩短。在保持螺栓预紧力不变的情况下,研究加载频率对装置温度变化的影响。

图 22(a) ~ (c) 为螺栓预紧力分别为 45 kN ~ 65 kN 时,不同加载频率对水平连接装置温度变化的影响规律曲线。由图 22 可知,升温曲线斜率的不断增大,说明装置的升温速率随着加载频率的增加不断加快。由图 21 可知,随着加载频率增加,温度升高幅度增加。

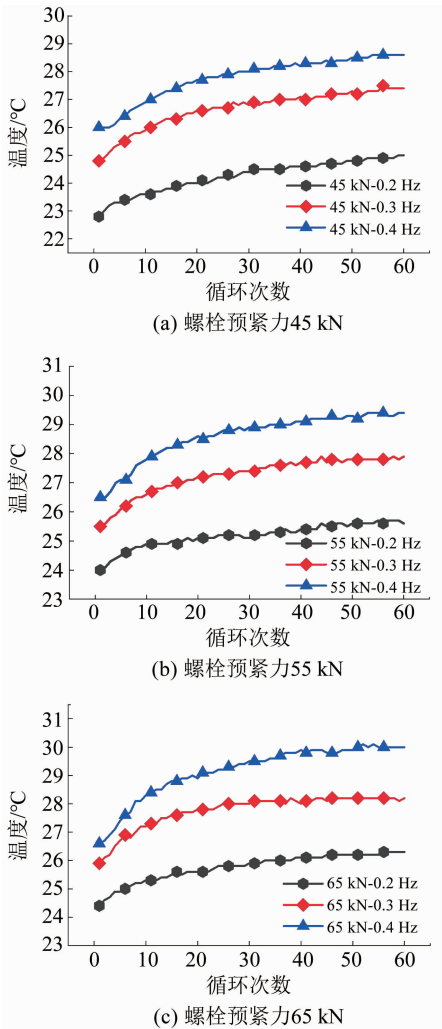


图 22 加载频率对装置温度变化的影响

Fig. 22 Effect of loading frequency on temperature change in device

当螺栓预紧力为 65 kN 时,在 0.2 Hz 频率下加载完成 60 圈后温度上升了 1.9 ℃;在 0.3 Hz 频率下加载完成 60 圈后温度上升了 2.6 ℃;在 0.4 Hz 频率下加载完成 60 圈后温度上升了 3.4 ℃。综上所述,加载频率对于试件升温速度的影响与螺栓预紧力一样显著。

3.2.3 温度对装置恢复力的影响

经过循环往复正弦加载,新型水平连接装置的温度因摩擦生热不断升高。对于装置 A,利用热电偶温度传感器实时采集钢板摩擦面的温度变化,同时记录每个加载循环结束时的装置的恢复力值及相应时间的温度值,得到水平连接装置的恢复力随其温度升高的变化规律。

装置在往复加载 60 圈后保持了良好的滞回耗能特性。以加载频率 0.3 Hz,预紧力 45 kN 工况为例,见图 23,水平连接装置的滞回曲线呈规则矩形形状。装置起滑后,其刚度基本可以忽略,起滑位移大约 3 mm 左右,其初始刚度比较大。从最大负位移到最大正位移过程中,水平连接装置恢复力基本保持恒定值,这表明加载速率对水平连接装置的恢复力影响不大。其他加载工况的滞回曲线形状与图 23 相似,此处不再赘述。

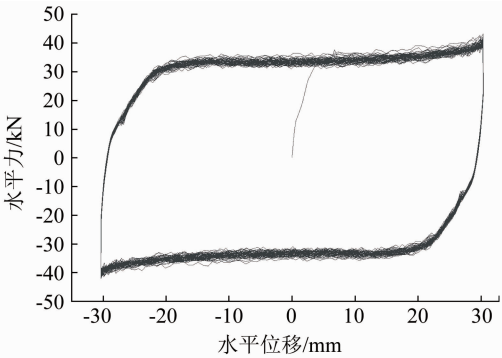


图 23 力与位移滞回曲线

Fig. 23 Hysteretic curve of force and displacement

在加载过程中,同时记录每个加载循环结束时的装置的恢复力值及相应时间的温度值,得到了装置的恢复力随各加载循环温度变化而变化规律。在加载频率为 0.3 Hz,预紧力为 45 kN 工况下,水平连接装置温度 - 恢复力关系曲线,见图 24。由图可知,经 60 次循环加载后,试件的温度从 25.3 ℃ 上升到 27.4 ℃,恢复力在 32 kN ~ 34 kN 之间无规律浮动,考虑到加载过程中恢复力也会有一定程度波动,故可认为恢复力基本保持相对稳定。故正常工作情况下,装置的温度变化对装置的力学性能影响不大。

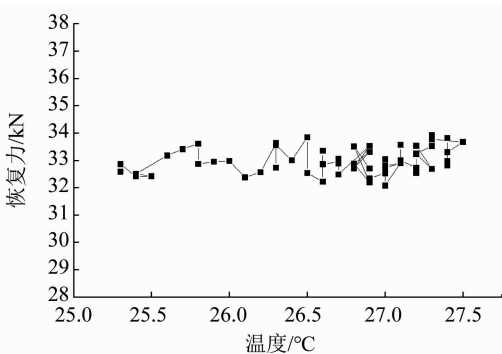


图 24 温度 - 恢复力相关性曲线

Fig. 24 Temperature - resilience correlation curve

4 结 论

本文主要对新型水平连接装置的力学性能进行了试验研究,得出以下结论:

- 1) 各工况滞回曲线均呈矩形形状,且规则饱满,说明该装置具有很好的摩擦耗能能力。
- 2) 新型水平连接装置的耗能性能随螺栓预紧力的增加而逐渐增大,螺栓预紧力与装置的耗能能力代表值和割线刚度线性相关;增加螺栓数量可大幅提高装置耗能性能,装置 A 的耗能能力代表值比装置 B 高约 50%。装置 A 的割线刚度比装置 B 高约 22%。
- 3) 螺栓预紧力与加载频率均是装置温度升高的重要因素,装置的升温速率和升温幅度随加载频率与螺栓预紧力的增加而不断增大。

参考文献

[1] 文龙. 建筑结构耗能减震技术及阻尼器研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(4): 423
WEN Long. Research progress in energy dissipation technology and damper for building structure [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2020, 46(4): 423. DOI: 10.11920/xnmzdk.2020.04.013

[2] PALL A S, MARSH C. Response of friction damped braced frames [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(6): 1313. DOI: 10.1109/ICTTA.2008.4530175

[3] NABID N, HAJIRASOULIHA I, PETKOVSKI M. Seismic investigation of multi-storey RC frames retrofitted using a friction panel with different slip load distributions[C]//Proceedings of the Annual Postgraduate Research Student Conference. Sheffield; [s. n.], 2015

[4] NABID N, HAJIRASOULIHA I, PETKOVSKI M. A practical method for optimum seismic design of friction wall dampers [J]. Earthquake Spectra, 2017, 33(3): 1033. DOI: 10.1193/110316EQS190M

[5] NABID N, HAJIRASOULIHA I, PETKOVSKI M. Performance-based optimisation of RC frames with friction wall dampers using a low-cost optimisation method [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(10): 5017. DOI: 10.1007/s10518-018-0380-2

(下转第 150 页)