

机电管线用装配式支吊架抗震性能试验研究

孙彬^{1,2}, 张雪芳^{1,2}, 张晋峰², 王景涛²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建研院检测中心有限公司, 北京 100013)

摘要: 装配式支吊架在工程中已大范围投入使用, 却鲜有关于其抗震性能的研究。为研究装配式支吊架的破坏机理、抗震性能及其影响因素, 开展了两类门型支吊架的低周往复荷载试验, 分析抗震斜撑、抗震连接件以及节点连接形式等对其抗震性能的影响。结果表明: 无斜撑试件易在直角连接件或槽钢底座连接处失效, 带斜撑试件易在管箍连接处失效; 节点依靠咬合作用进行连接的试件抗震性能较差, 采用螺栓对穿连接的试件抗震性能较好; 抗震斜撑能显著提高门型支吊架的抗震性能, 带斜撑试件的弹性刚度、极限承载力、屈服承载力、强度退化系数、刚度退化情况及耗能能力均优于无斜撑试件; 节点连接形式是影响无斜撑试件抗震性能的主要因素, 抗震连接件性能是影响带斜撑试件抗震性能的主要因素。研究成果可为支吊架产品的标准制定、设计施工、质量检验及工程应用提供参考依据。

关键词: 门型支吊架; 抗震斜撑; 节点连接件; 抗震连接件; 抗震性能

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Experimental study on seismic performance of assembly supports and hangers for mechanical and electrical pipelines

SUN Bin^{1,2}, ZHANG Xuefang^{1,2}, ZHANG Jinfeng², WANG Jingtao²

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. CABR Testing Center Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Assembly supports and hangers have been widely used in engineering, but there are few researches on their seismic performance. To investigate the failure mechanism, seismic behavior and influence factors of assembly portal supports and hangers under earthquakes, reverse cyclic loading were subjected to two different typologies of specimens to acquire the influence of seismic bracing and joint connectors on their seismic behavior. The results showed that specimens without seismic bracing were easy to fail at the right-angle or channel base connectors, specimens with seismic bracing were easy to fail at the connection of pipe hoop. The seismic performance of the joints connected by interlocking was poor, while the joints connected by bolt-through was superior. The elastic stiffness, ultimate strength, yield strength, strength and stiffness degradation, and energy dissipation of specimens with seismic bracing were better than those of the specimens without seismic bracing. The main reason affecting the seismic behavior of specimens without seismic bracing was the performance of joint connectors, while the main reason for specimens with seismic bracing was seismic connectors. The research can provide reference for the engineering application, quality inspection and standard formulation of supports and hangers.

Key words: portal support and hanger; seismic bracing; joint connector; seismic connector; seismic performance

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2023-02-02

基金项目: 中国建筑科学研究院有限公司二级单位自筹科研基金项目(20190112470730018); 中国建筑科学研究院有限公司青年科研基金项目(20220112331030032)

作者简介: 孙彬(1978—), 男, 研究员, 博士, 主要从事工程质量检测技术与结构性能评定方法研究。E-mail: sunbinmail@163.com

通讯作者: 张雪芳(1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事非结构构件抗震性能研究。E-mail: 1441358016@qq.com

0 引言

随着建筑主体结构抗震性能的不断提高,地震造成的灾害和损失主要集中于非结构构件,以建筑管道及其支撑体系的破坏最为典型^[1-4]。2006 年夏威夷地震中,医院的喷淋管道系统发生严重损坏,消防用水大面积泄漏,导致 49 名患者撤离到帐篷内居住数周^[5];2008 年汶川地震,部分建筑主体结构并未倒塌,但非结构构件损坏造成了人员伤亡和财产损失^[6];2010 年智利地震,因非结构构件和消防管道损坏导致当地最大的 2 个机场被迫关闭,12 家医院超过 75% 的功能设施瘫痪^[7];2011 年东北太平洋地震,灾害调查结果显示消防系统损失占建筑全部损失的 37%^[8]。

装配式支吊架是确保机电管线与建筑结构可靠连接的重要非结构构件,研究其抗震性能对于预防地震可能引发的次生灾害、保障建筑使用安全以及生命财产安全具有重要意义。TIAN 等^[9]对布置不同支撑形式的 3 个足尺管线系统进行了动态荷载试验,发现布置抗震支撑设施的管线系统性能好于未布置抗震支撑的管线系统,且未布置抗震支撑的管线系统的管线接头、悬吊螺杆等均发生了损坏;LIN 等^[10]对带有支架的水平管道系统进行了振动台试验,结果表明管道连接失效是管道系统的主要破坏原因;HOEHLER 等^[11]对装有支吊架的 7 层足尺剪力墙结构进行了振动台试验,结果表明,随着支吊架位移的增加,管道体系刚度下降,频率逐渐减小;ATTARI 等^[12]对不同截面形式的支吊架进行了振动台试验,发现支吊架连接构件出现滑移时,由于滑移错位后被再次锁定,支撑系统依然能够保持较好的刚度和强度;MALHOTRA 等^[13]确定了支吊架部件在极限荷载下能够承受的循环加载次数,并给出了测试支吊架部件承载力的试验加载制度;罗干等^[14]开展了支吊架连接件的拉伸试验和数值分析,得到了抗震连接构件的极限承载力及破坏形式;尚庆学等^[15]开展了 3 种不同类型单杆抗震支吊架的低周往复荷载试验,通过易损性分析确定了 FM 1950 规定的位移限值下各类抗震支吊架的极限承载力^[16];国内外学者针对管道系统的抗震性能进行了大量的研究,但是关于支吊架试件抗震性能的研究相对较少。

GB 50981—2014《建筑机电工程抗震设计规范》^[17]是建筑机电抗震的设计依据,规定了抗震支吊架的基本设计要求,并未给出详细设计方法,该标准于 2019 年启动修订并已完成报批;GB/T 37267—2018《建筑抗震支吊架通用技术条件》^[18]规定了抗震支吊架的性能测试方法,该方法源于美国标准 FM 1950,仅适用于单杆防晃支吊架,并不适用于门型支吊架,该标准于 2021 年启动修订;GB/T 38053—2019《装配式支吊架通用技术要求》^[19]是针对支吊架的产品标准,规定了支吊架部件的力学性能,并未给出组件性能的测试方法。

为了研究装配式支吊架的破坏机理、抗震性能及影响因素,针对两类门型支吊架开展了拟静力试验,分析不同类型试件的破坏现象、滞回曲线、骨架曲线及其特征值、刚度和强度退化情况、耗能能力及延性特性等。研究成果可为支吊架产品的标准制定、设计施工、质量检验及工程应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

为考察节点连接形式和抗震连接件类型对支吊架抗震性能的影响,综合考虑工程实际应用情况,设计了 A、B 两类门型支吊架,每类试件考虑带斜撑和不带斜撑 2 种情况,试件参数如表 1 所示。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	有无斜撑	高×宽/mm	槽钢类型	直角连接件设置部位	直角连接件受力方式	底座连接件受力方式	管箍连接件受力方式	抗震连接件类型	抗震斜撑安装角度/(°)	紧固扭矩/(N·m)	试件材料
A1	无	580×400	单拼	横梁上侧	咬合连接	咬合连接	咬合连接	—	—	50	Q235
A2	有	580×400						底座型	45	50	Q235
B1	无	580×400	双拼	横梁上下两侧	咬合连接	对穿连接	咬合连接	—	—	50	Q235
B2	有	580×400						铰链型	45	50	Q235

A 类试件的杆件采用横截面 41 mm×41 mm×2 mm 的单拼 C 型槽钢,槽钢立柱和横梁采用直角连接件相连并依靠槽钢齿牙和旋翼螺母齿槽的咬合作用实现连接。槽钢立柱和建筑主体结构采用底座连接件相连,

立柱与底座连接件的连接依靠槽钢齿牙和旋翼螺母齿槽的咬合作用,斜撑通过底座型抗震连接件与槽钢立柱相连,斜撑与立柱安装角度为 45° ,示意图如图1所示。

B类试件的杆件采用横截面 $21\text{ mm} \times 21\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的双拼C型槽钢,在槽钢横梁上下侧均设置直角连接件,依靠槽钢齿牙和旋翼螺母齿槽的咬合作用实现连接,底座连接件采用螺栓对穿连接,斜撑通过铰链型抗震连接件与槽钢立柱相连。

节点连接形式照片如图2所示,抗震连接件照片如图3所示。

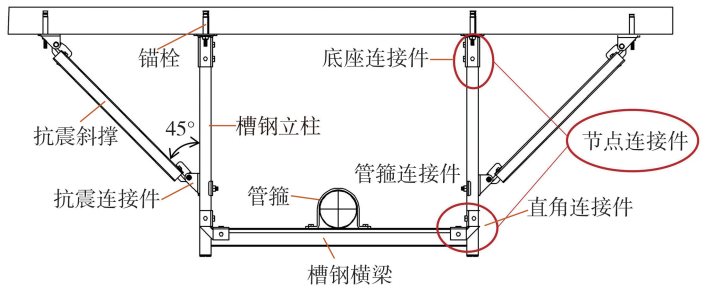


图1 带斜撑门型支吊架示意图

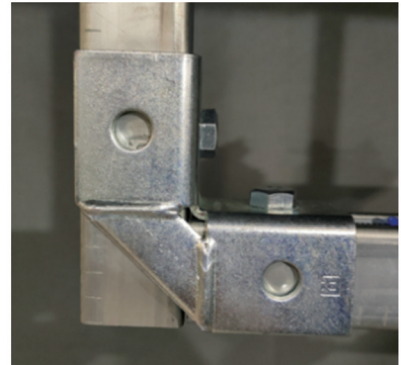
Fig.1 Schematic diagram of supports and hangers with seismic bracing



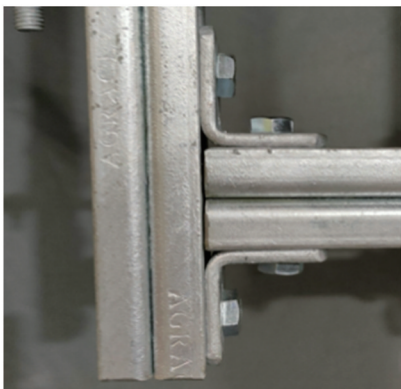
(a) 槽钢齿牙



(b) 旋翼螺母齿槽



(c) A类直角连接



(d) B类直角连接



(e) A类底座连接



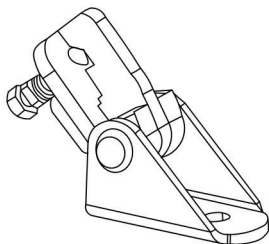
(f) B类底座连接

图2 节点连接形式

Fig.2 Joint connection



(a) 底座型抗震连接件



(b) 铰链型抗震连接件

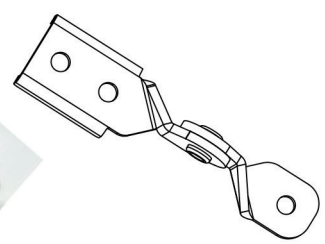


图3 抗震连接件

Fig.3 Seismic connectors

1.2 加载方案

本次试验仅考虑水平地震作用对管道的影响。为避免多套支吊架加载时由于安装误差导致的试验结果不准确问题,研发了一套加载装置,可针对单套支吊架进行加载,加载示意图如图 4 所示,带斜撑试件测试安装照片如图 5 所示。

根据 FEMA 461^[20] 建议的加载程序,采用变幅位移控制加载,加载频率为 0.05 Hz。首先确定初始加载位移 Δ_0 , 后续加载位移 Δ_i 按 $1.4\Delta_{i-1}$ 进行增幅,每级位移循环 2 次,直至试件破坏或荷载下降至 0.85 倍的峰值荷载时停止加载,加载曲线示意图如图 6 所示。

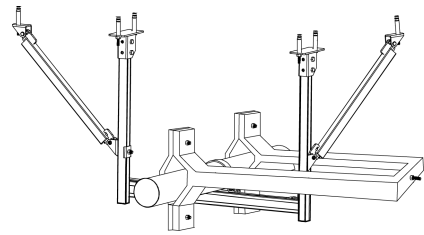


图 4 试件加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading

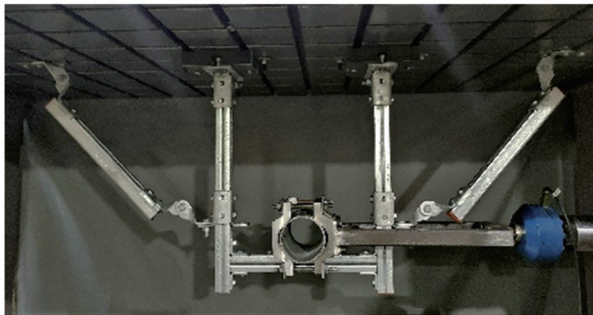


图 5 试件测试安装照片

Fig. 5 Installation photo of specimens

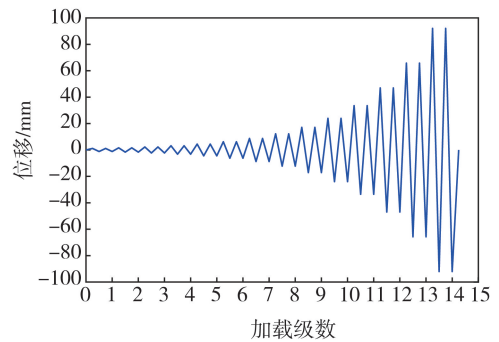


图 6 加载曲线示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading curves

1.3 加载装置稳定性测试

为考察试验装置加载的稳定性,试验开始之前分别对 3 套同规格型号的门型支吊架进行低周往复循环加载,得到试件的滞回曲线,如图 7 所示。由图可知,3 套支吊架的滞回曲线基本重合,极限承载力最大差值不超过 4.4%,屈服承载力最大差值不超过 6.8%,验证了采用该试验加载装置对单套支吊架加载是可行的,试验结果离散型较小,具备良好的稳定性。

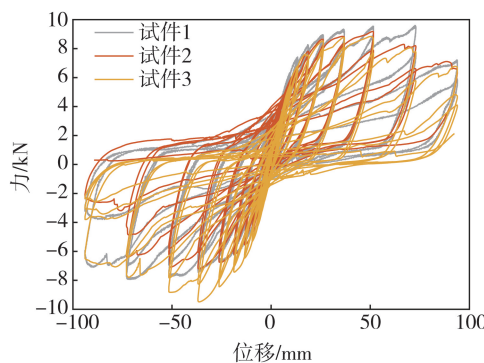


图 7 稳定性测试试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of specimens for stability tests

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏形式

各试件的典型破坏照片如图 8 所示,各试件的受力性能及破坏情况如下:

1) 试件 A1: 初始加载时,试件变形主要集中在管箍处;随着位移增加,槽钢底座连接件处旋翼螺母出现滑移,并将槽钢凹形槽口向外挤压出鼓包,直角连接件处的旋翼螺母也出现滑移;当加载位移达到 60~90 mm 时,试件整体侧向变形显著,滑移增多,承载力不再上升;当加载位移为 92.07 mm 时,与直角连接件相连的槽钢齿牙被磨平,旋翼螺母和槽钢齿牙的咬合连接失效(图 8(a)),同时槽钢底座连接件处旋翼螺母将

槽钢凹形槽口撕裂发生拔出破坏(图8(b)、(c)),但槽钢立柱并未弯曲。试验停止时,试件直角连接件和槽钢底座连接件处的连接失效。

2) 试件 A2: 初始加载时, 由于两侧抗震斜撑的支撑作用, 主体杆件变形相对较小, 管箍变形较大; 随着位移继续增加, 管箍连接处旋翼螺母出现滑移, 最终发生滑脱破坏(图8(d)), 直角连接件处旋翼螺母出现滑移但并未失效, 底座连接件、抗震斜撑和抗震连接件全程未见明显塑性变形。试验停止时, 试件管箍与槽钢横梁的连接失效。

3) 试件 B1: 初始加载时, 变形主要集中在管箍处; 加载过程中, 由于缺少两侧抗震斜撑的约束作用, 试件侧向变形逐渐增加; 当加载位移达到 60~90 mm 时, 与底座连接件接触位置的槽钢变形较大(图8(e)), 槽钢横梁上侧直角连接件出现滑移; 当加载位移大于 90 mm 时, 横梁上侧直角连接件发生滑脱破坏, 底座连接件未见明显塑性变形, 仅在横梁上侧的直角连接件处发生破坏(图8(f)), 槽钢立柱发生明显侧向弯曲(图8(g)), 主体杆件性能得到充分发挥, 故试件 B1 的承载力大于试件 A1。

4) 试件 B2: 初始加载时, 主体杆件变形相对较小, 管箍变形较大(图8(h)); 随着位移继续增加, 管箍连接处旋翼螺母出现滑移直至破坏, 抗震斜撑和抗震连接件全程未见明显塑性变形。试件 B2 破坏特征与试件 A2 相似, 均是管箍连接处旋翼螺母发生滑脱破坏, 但试件 B2 极限承载力小于试件 A2。

总体来看, 无斜撑试件易在直角连接件或槽钢底座连接处失效, 带斜撑试件易在管箍连接处失效, 故无斜撑试件应加强节点连接件的设计, 带斜撑试件应加强管箍处连接。

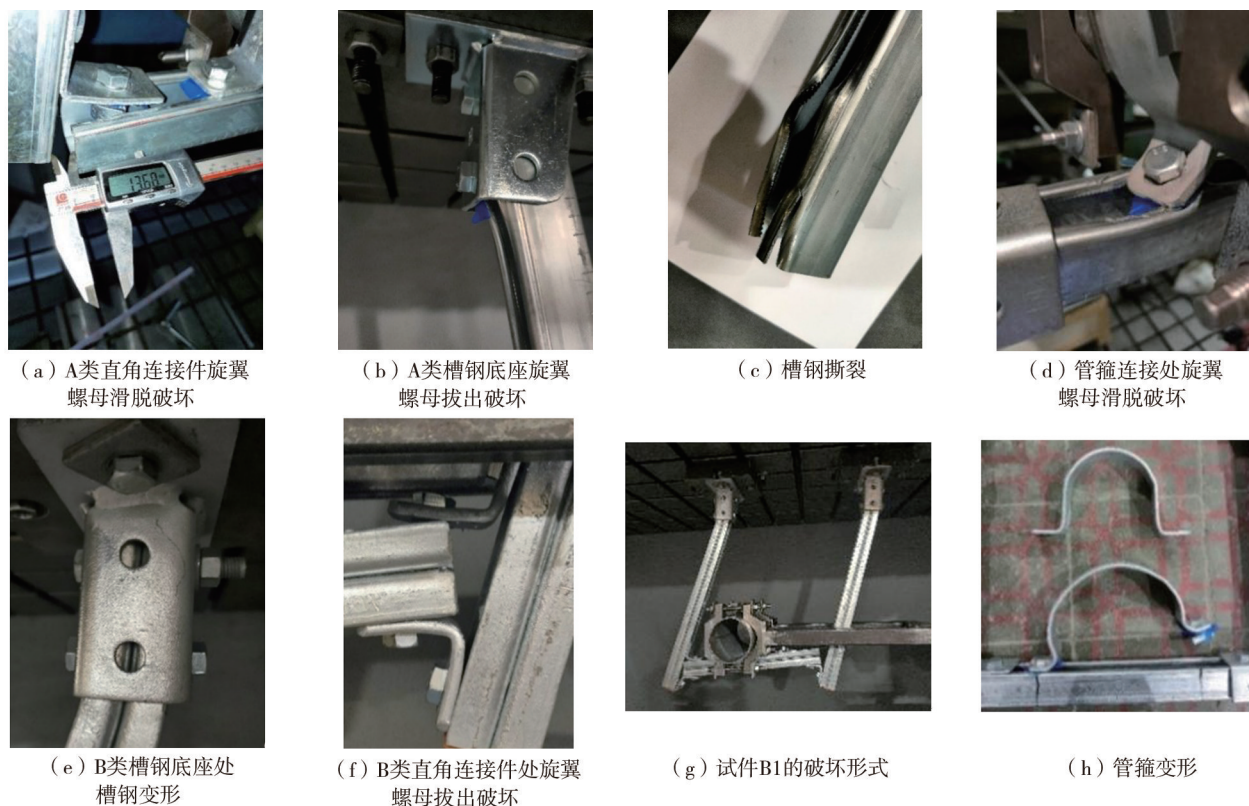


图8 试件破坏形态

Fig. 8 Failure phenomenon of specimens

2.2 滞回曲线

各试件的滞回曲线如图9所示。由图可知, 加载初期, 试件均处于弹性阶段, 荷载和位移基本呈线性关系, 卸载时残余变形很小, 滞回环呈细长梭形; 随着位移增加, 试件由弹性阶段进入弹塑性阶段, 连接节点处先后出现滑移, 滞回曲线斜率发生变化, 并逐渐向位移轴方向倾斜, 残余变形增加, 滞回环趋于饱满; 加载后期, 节点连接处滑移增多, 试件塑性变形不断发展, 曲线斜率随着荷载往复加载的次数减小, 残余变形持续增加, 试件承载力到达峰值荷载后开始下降, 刚度退化明显, 同一加载等级对应的2次循环的滞回曲线重合度降低, 第二次循环加载的峰值荷载和曲线斜率明显低于第一次循环。

初始加载时试件 A2、试件 B1 和试件 B2 的滞回环呈梭形,表明其具备较好的抗震性能;随着加载位移增加,试件连接节点出现滑移,滞回环由梭形逐渐过渡为弓形;加载后期,试件塑性变形不断发展,滞回环由弓形最终变为耗能能力较差的倒 S 形。试件 A1 的滞回曲线前期变化与其他试件相似,但试件破坏时,试件 A1 的滞回环由弓形变成了耗能能力最差的 Z 形。

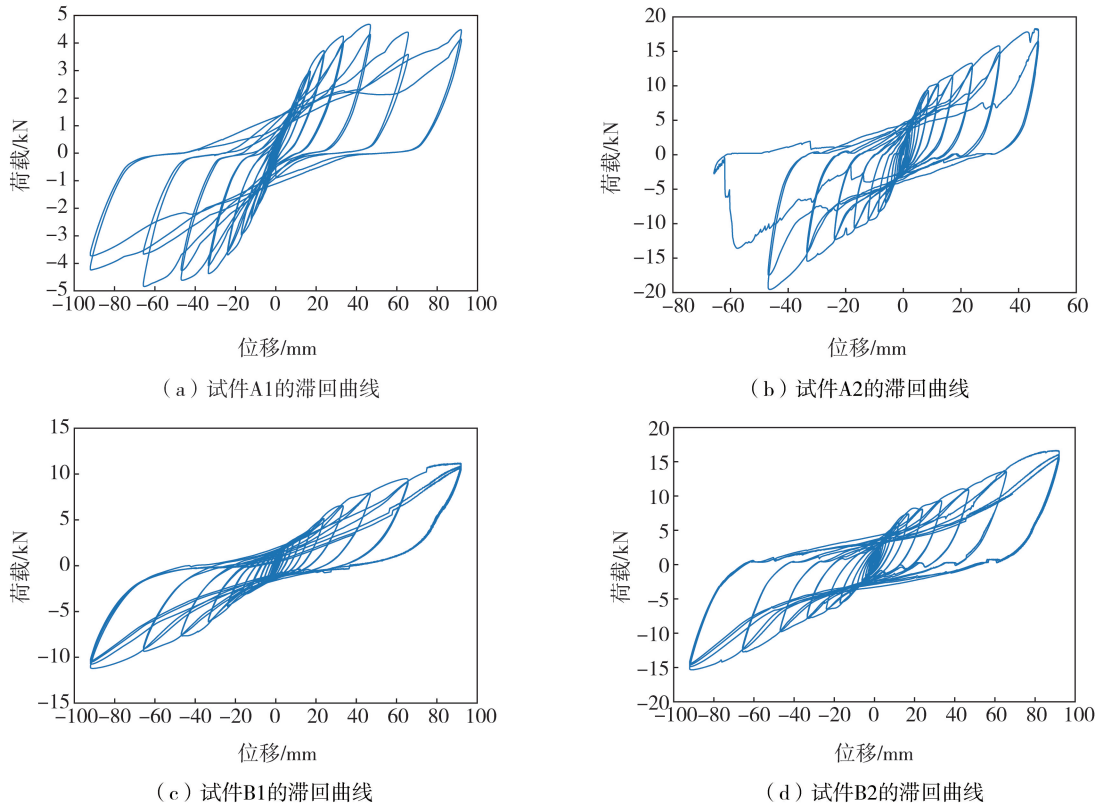


图 9 滞回曲线

Fig.9 Hysteretic curves

2.3 骨架曲线

将滞回曲线同向各次加载的荷载极值点相连得到骨架曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知:①试件 A2 的承载力和弹性刚度远大于试件 A1,试件 B2 的承载力和弹性刚度大于试件 B1,表明抗震斜撑能显著提高门型支吊架的抗震性能;②试件 B1 的承载力和弹性刚度大于试件 A1,试件 B1 仅在直角连接件处发生滑脱破坏,而试件 A1 在直角连接件及槽钢底座连接处均出现滑脱,说明螺栓对穿连接的性能优于齿牙咬合连接;③试件 B1 性能优于试件 A1,但试件 A2 的承载力和弹性刚度却远大于试件 B2,说明抗震连接件是带斜撑试件抗震性能的主要影响因素,且底座型抗震连接件具备较好的抗震性能。

2.4 骨架曲线的特征点

将骨架曲线最高点对应的荷载和位移定义为极限荷载和极限位移;破坏荷载取 0.85 倍的极限荷载,相应的位移为破坏位移,屈服荷载和位移采用通用屈服弯矩法确定。

各试件的骨架曲线特征值如表 2 所示,由表可知:①试件 A2 的正向(负向)极限承载力和屈服承载力分别较试件 A1 提高了 290.2%(308.4%)和 242.5%(246.9%),试件 B2 的正向(负向)极限承载力和屈服承载力分别较试件 B1 提高了 47.0%(35.3%)和 37.4%(16.7%);②试件 B1 的正向(负向)极限承载力和屈服承载力分别较试件 A1 提高了 141.9%(137.7%)和 93.4%(100.0%);③试件 A2 的正向(负向)极限承载力和屈服承载力分别较试件 B2 提高了 9.7%(27.0%)和 28.8%(48.7%)。

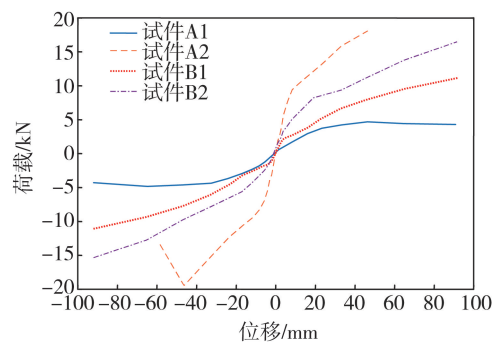


图 10 骨架曲线

Fig.10 Envelope curves

同,带斜撑试件优于无斜撑试件,依靠螺栓对穿连接的试件优于依靠咬合作用进行连接的试件,采用底座型抗震连接件的试件优于采用铰链型抗震连接件的试件。

2.7 能量耗散

采用等效黏滞阻尼系数 ξ_e 和能量耗散系数 E 评估试件的耗能能力,以图 13 为例, ξ_e 的表达式为

$$\xi_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} = \frac{E}{2\pi} \quad (3)$$

试件滞回环面积反映其在低周往复荷载作用下的总耗能,各试件在加载位移 Δ/Δ_y 为 1、8、12、14 的滞回环如图 14 所示。由图可知,在同一加载等级下,滞回环面积从大到小依次为试件 A2、试件 B2、试件 B1、试件 A1。各个试件在初始状态和破坏状态的耗能指标如表 3 所示。由表可知,带斜撑试件的总耗能、等效黏滞阻尼系数和能量耗散系数基本大于无斜撑试件。

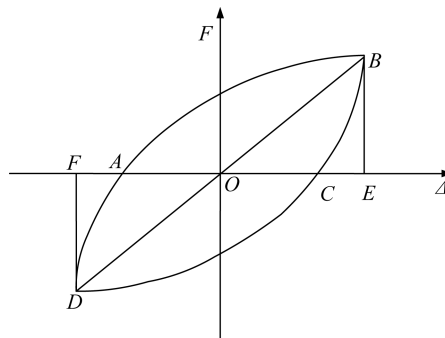


图 13 滞回环示意图

Fig. 13 Schematic diagram of hysteretic loop

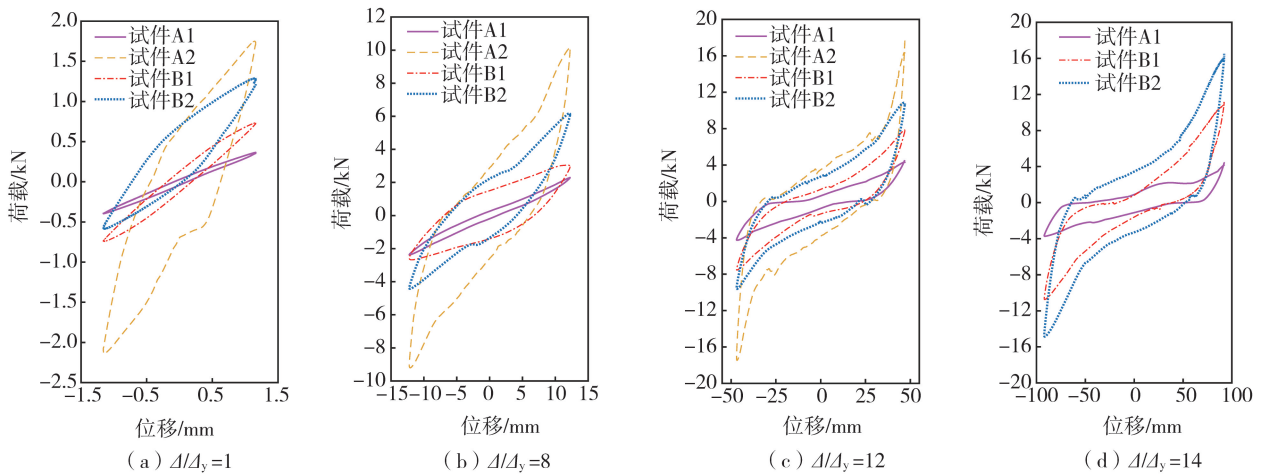


图 14 不同试件滞回环随加载位移的变化情况

Fig. 14 Change of hysteretic loop with loading displacement of different specimens

表 3 试件耗能参数

Table 3 Energy dissipation parameters of specimens

试件编号	状态	Δ/Δ_y	总耗能/(kN · mm)	等效黏滞系数 ξ_e	能量耗散系数 E
A1	初始状态	1	121	0.043	0.267
	破坏状态	14	387 450	0.154	0.965
A2	初始状态	1	2 660	0.188	1.179
	破坏状态	12	692 452	0.125	0.782
B1	初始状态	1	439	0.082	0.513
	破坏状态	14	720 147	0.112	0.703
B2	初始状态	1	1 134	0.164	1.029
	破坏状态	14	1 349 711	0.147	0.922

试件各级循环荷载下的等效黏滞阻尼系数 ξ 。如图 15 所示,由图可知:①加载初期,各个试件的等效黏滞阻尼系数从大到小依次为试件 A2、试件 B2、试件 B1、试件 A1,与试件承载力、弹性刚度、强度和刚度退化等规律相同;②随着加载位移的增加,试件 A2、试件 B1、试件 B2 的等效黏滞阻尼系数呈现出先增加后减少的趋势,而试件 A1 的等效黏滞阻尼系数随位移增长而增加。主要原因是试件 A1 的抗震性能较差,承载力较低,加载后期试件 A2、试件 B1、试件 B2 的承载力随位移增长稳步上升,而试件 A1 的承载力几乎不再增长,但其滞回环面积持续增加,导致试件 A1 的等效黏滞系数持续增长。

2.8 延性系数

延性系数能够反映试件从屈服到承载力没有显著降低期间抵抗塑性变形的能力。结构构件中通常采用延性系数评估试件的变形能力,延性系数定义为破坏位移与屈服位移的比值。

各试件的延性系数如表 4 所示。由表可知,延性系数从大到小依次为试件 A1、试件 B2、试件 B1、试件 A2。综合弹性刚度、极限承载力、强度退化系数、环线刚度和等效黏滞阻尼系数以及能量耗散系数等抗震性能试验结果,带斜撑试件抗震性能优于无斜撑试件,各试件抗震性能指标降序排布依次为试件 A2、试件 B2、试件 B1、试件 A1。支吊架的延性系数与其他抗震性能指标相悖,主要是支吊架试件连接节点众多,试件位移包含了一部分连接滑移,依靠齿牙咬合作用进行连接的节点越多,变形位移中包含的滑移成分越多,计算得到的延性系数就越不精确,因此,延性系数可否用于不同节点连接形式支吊架变形能力的评估还需进一步研究。

3 结论

通过对装配式支吊架的抗震性能试验研究和分析,得到如下结论:

- 1) 无斜撑试件易在直角连接件或槽钢底座连接处失效,带斜撑试件易在管箍连接处失效,故无斜撑试件应加强节点连接件的设计,带斜撑试件应加强管箍处连接。
- 2) 节点依靠槽钢齿牙和旋翼螺母齿槽的咬合作用进行连接的试件抗震性能较差,依靠螺栓对穿连接的试件抗震性能较好,工程中支吊架产品关键节点处的连接宜选用螺栓对穿连接。
- 3) 抗震斜撑能显著提高门型支吊架的抗震性能,带斜撑试件的极限承载力、屈服承载力、强度和刚度退化情况、耗能能力均优于无斜撑试件。
- 4) 节点连接形式是无斜撑试件抗震性能的主要影响因素,抗震连接件性能是带斜撑试件抗震性能的主要影响因素,底座型抗震连接件具备较好的工作性能,工程应用中无斜撑试件应重视节点连接形式的合理选取,带斜撑试件尽可能选用底座型抗震连接件。
- 5) 无斜撑门型支吊架具备抗震能力,实际工程中若考虑无斜撑门型支吊架的抗震性能,将其与带斜撑支吊架进行统筹设计,能够更科学地实现建筑机电的安全性和经济性。

参考文献:

- [1] MIRANDA E, MOSQUEDA G, RETAMALES R, et al. Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): 453-471.
- [2] PERRONE D, FILIATRAULT A, PELOSO S, et al. Experimental seismic response evaluation of suspended piping restraint installations [J].

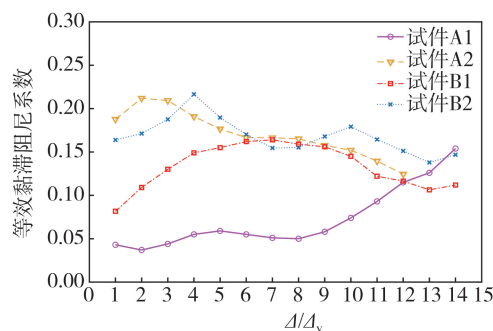


图 15 等效黏滞阻尼系数

Fig. 15 Equivalent viscous damping coefficient

表 4 试件延性系数

试件编号	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ
A1(+)	25.59	92.07	3.60
A1(-)	24.73	92.07	3.72
A2(+)	22.15	46.27	2.09
A2(-)	24.73	58.27	2.36
B1(+)	38.92	92.07	2.37
B1(-)	42.37	92.07	2.17
B2(+)	37.50	92.07	2.46
B2(-)	38.76	92.07	2.38

- Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18 (4):1499-1524.
- [3] DAVIES R D. Seismic evaluation, parameterization, and effect of light-frame steel studded gypsum partition walls [D]. New York: State University of New York, 2010.
- [4] 王亚勇. 概论汶川地震后我国建筑抗震设计标准的修订[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 1-12.
WANG Yayong. An overview of recent revision of seismic design codes after the 5 · 12 Wenchuan Earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 1-12. (in Chinese)
- [5] CHOCK G. Preliminary observations on the Hawaii earthquakes of October 15, 2006 [R]. Hawaii: EERI Special Earthquake Report, 2006.
- [6] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9 (in Chinese)
- [7] MIRANDA E, MOSQUEDA G, RETAMALES R, et al. Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): 453-471.
- [8] MIZUTANI K, KIM H, KIKUCHIHARA M, et al. The damage of the building equipment under the 2011 Tohoku pacific earthquake[C] //9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, CUEE. Tokyo, Japan: Tokyo Institute of Technology, 2012.
- [9] TIAN Y, FILIATRAULT A, MOSQUEDA G. Seismic response of pressurized fire sprinkler piping systems I: Experimental study[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(4): 649-673.
- [10] LIN Z Y, LIN F R, CHAI J F, et al. Experimental studies of a typical sprinkler piping system in hospitals[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2016, 49(1): 1-12.
- [11] HOEHLER M S, PANAGIOTOU M, RESTREPO J I, et al. Performance of suspended pipes and their anchorages during shake table testing of a seven-story building[J]. Earthquake Spectra, 2009, 25(1): 71-91.
- [12] ATTARI N K A, WAEZI Z, JAHROMI K K, et al. Experimental investigation of the seismic performance of trapeze supports of the suspended ducts and pipes[J]. Structures, 2022, 38: 704-718.
- [13] MALHOTRA P K, SENSENY P E, BRAGA A C, et al. Testing sprinkler-pipe seismic-brace components[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(1): 87-109.
- [14] 罗干, 丁幼亮, 朱浩樑. 抗震支吊架抗震连接构件的破坏试验与数值分析研究[J]. 工程建设与设计, 2020(3): 40-44.
LUO Gan, DING Youliang, ZHU Haoliang. Tensile test and numerical analysis of structure connecting component of anti-seismic hangers[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(3): 40-44. (in Chinese)
- [15] 尚庆学, 李泽, 刘瑞康, 等. 管线系统抗震支架力学试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 120-125, 133.
SHANG Qingxue, LI Ze, LIU Ruikang, et al. Experimental study on properties of aseismic braces used in pipe line systems[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 120-125, 133. (in Chinese)
- [16] FM 1950 Approval standard for seismic sway braces for automatic sprinkler systems[S]. Massachusetts: FM Global Research, 2010.
- [17] GB 50981—2014 建筑机电工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
GB 50981—2014 Code for seismic design of mechanical and electrical equipment[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [18] GB/T 37267—2018 建筑抗震支吊架通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
GB/T 37267—2018 General specification of seismic bracing for building[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [19] GB/T 38053—2019 装配式支吊架通用技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
GB/T 38053—2019 General technical specifications of prefabricated supports and hangers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [20] FEMA 461 Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components [S]. California: Federal Emergency Management Agency, 2007.