

暖通风管支吊架抗震性能研究

Research on Seismic Performance of HVAC Support Hanger

黄 敏¹, 潘文彬¹, 刘 俊¹, 何 君¹, 杨希彬¹, 解咏平²

(1. 中建科工集团有限公司, 深圳 518052; 2. 天津农学院 水利工程学院, 天津 300392)

摘 要: 为明确暖通风管支吊架关键参数对其抗震性能的影响, 以医疗建筑暖通风管支吊架为研究对象, 设计 15 组不同参数的试件, 通过低周反复荷载下的有限元模拟, 分析其荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、延性及耗能能力等指标。结果表明: 悬吊高度对支吊架影响较小, 建议控制在 900 mm 以下; 丝杠直径超过 12 mm 时, 试件变形能力显著下降, 12 mm 直径丝杠为优选; 无斜撑与单侧斜撑试件的耗能能力明显低于双向斜撑试件, 45°斜撑角度的支吊架力学性能更优。研究结果可为暖通风管支吊架的工程设计及相关标准制定提供参考。

关键词: 支吊架; 滞回曲线; 延性; 抗震性能

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0161-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.028

HUANG Min¹, PAN Wenbin¹, LIU Jun¹, HE Jun¹, YANG Xibin¹, XIE Yongping²

(1. China Construction Science and Industry Co., Ltd., Shenzhen 518052, China;

2. Collage of Water conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: To clarify the influence of key parameters on the seismic performance of HVAC duct support hanger brackets, taking the HVAC support hanger of medical buildings as the research object, 15 groups of specimens with different parameters were designed. Through finite element simulation under low cyclic load, indicators such as load-displacement hysteretic curve, skeleton curve, ductility and energy dissipation capacity were analyzed. The results show that the suspension height has little influence on the support hanger, and it is recommended to control it below 900mm; when the lead screw diameter exceeds 12 mm, the deformation capacity of the specimen decreases significantly, and the 12 mm diameter lead screw is the preferred choice; the energy dissipation capacity of specimens without diagonal brace and with unilateral diagonal brace is significantly lower than that of specimens with bidirectional diagonal brace, and the support hanger with 45° diagonal brace angle has better mechanical properties. The research results can provide reference for the engineering design of HVAC support hangers and the formulation of relevant standards.

Key words: support hanger; hysteretic curve; ductility; seismic performance

基金项目: 国家自然科学基金 (52208193); 天津市自然科学基金项目 (23JCYBJC00510); 中建科工科技研发计划项目 (ZJKG-2023-KT-06)。

作者简介: 黄 敏 (1982—), 男, 本科, 教授级高级工程师。研究方向: 钢结构装配式建筑、绿色建筑。

通信作者: 解咏平 (1979—), 男, 博士, 教授。研究方向: 工程结构与抗震。

收稿日期: 2025-01-03

建筑结构

0 引言

随着建筑结构抗震设计的不断进步, 医疗建筑在地震灾害中所遭受的损失逐渐集中在非结构构件, 尤其是暖通风管及其附属设施等部分。支吊架作为连接机电管线与建筑结构的重要支承设施, 其抗震性能的优劣直接关系到管道系统在地震作用下的安全性。因此, 深入探讨支吊架的抗震性能对于确保建筑的使用安全及保护生命财产安全具有重要的现实意义。

多项研究已针对管道系统的抗震性能进行了试验和分析, 例如, Malhotra 等^[1]结合强震记录建立了支吊架的低周疲劳模型; Soroushian 等^[2]则通过建立消防管道的分析模型, 探讨了地震作用下支吊架的变形行为; Tian 等^[3]的研究则发现, 布置支架的管线系统在地震中损坏较小, 而未布置支架的系统则遭受了较严重的破坏; 另外, Soroushian 等^[4]和 Ryan 等^[5]通过测试五层的钢架管线系统, 了解其破坏形式及抗震性能; Perrone 等^[6]开展了不同类型支吊架的单调加载与低周往复荷载试验, 获取了相应的抗震性能参数; Coodwin 等^[7]的振动台试验表明, 支吊架体系能够有效限制管道的位移; Yue 等^[8]对 20 套支吊架进行了低周往复循环加载试验, 分析了其预加载扭矩、极限承载力等性能指标, 结果显示支吊架在地震中能够有效保护非结构构件; Attari 等^[9]的研究则表明, 当支吊架连接构件发生滑移并被重新锁定时, 支承系统依然能够保持良好的刚度与强度; 郑国术等^[10]以福建沿海地震活动带为背景, 论证了安装支吊架能有效限制建筑机电工程的震害; 朱浩樑等^[11]以实际工程为例, 总结出支吊架具有的抗震作用能够满足 6 至 9 度设防地震烈度要求; 赵金桥等^[12]进行了管线支吊架的抗震性能有限元分析, 得到了不同状态下的模态响应和响应谱云图, 并认为支吊架能显著减小管道在地震作用下的位移; 别亦白等^[13]通过试验发现, 支吊架最易损的部位在与之 C 型钢的连接处; 曾德民等^[14]则从不同方向荷载作用下分析了支吊架的力学性能, 并提出了优化的布置方式; 李旭海等^[15]提出了一种中间采用斜撑的支吊架, 并分析了其抗震性能; 孙彬等^[16]从试验方面分析了抗震斜撑、抗震连接件以及节点连接形式等

对支吊架抗震性能的影响, 认为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; 宋旭亮等^[17]从试验的角度认为纵向斜撑安装在地震惯性力合力作用点标高位置比较理想。

然而, 尽管已有诸多研究围绕管道体系展开, 针对支吊架抗震性能的系统性研究仍显不足。为此, 以医疗建筑中暖通风管支吊架为例, 对 15 个不同参数的支吊架进行低周反复荷载作用下的有限元模拟, 重点分析抗震悬吊高度、丝杠直径、侧向支撑及斜撑角度等因素对支吊架的荷载-位移曲线、骨架曲线、延性及耗能能力的影响, 期望为支吊架的工程应用及相关标准的制定提供科学依据与参考。

1 试件概况

1.1 支吊架系统组成

以医疗建筑工程为例, 拟采用一种新型的暖通风管用支吊架系统, 结构如图 1 所示。抗震斜撑与竖向丝杠形成三角形结构; 在风管两侧设置限位件, 用外六角螺栓进行固定。系统主要由锚栓、单面槽钢、丝杠、抗震连接座、限位件、螺杆等组成。抗震斜撑通过两端的抗震连接座与结构主体中的锚栓、水平单面槽钢连接, 抗震斜撑和水平单面槽钢为 41 mm × 41 mm × 2 mm 的 C 型槽钢。抗震连接座与抗震斜撑通过铰接的方式连接, 以便选取任意安装角度。

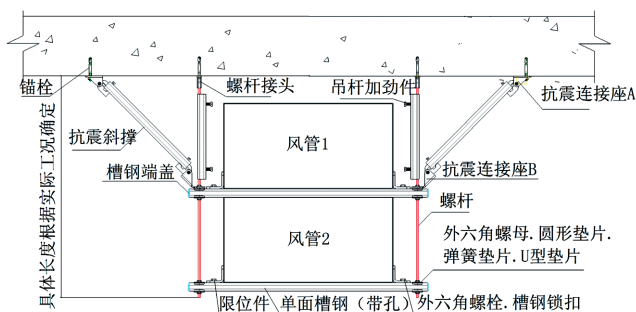


图 1 支吊架示意图

Fig. 1 Support hanger diagram

1.2 试件设计

设计 15 个支吊架试件, 共分四组。第一组以悬吊高度为变量, 编号 S01 ~ S06; 第二组以丝杠直径为变量, 编号 S07 ~ S09; 第三组以侧向支撑形式为

变量, 编号 S10 ~ S11; 第四组以斜撑角度为变量, 编号 S12 ~ S15。试件材料均为 Q235 钢, 单面槽钢为 C 型钢, 具体设计参数见表 1, 其中, 试件高度为上层悬吊高度加下层高度, 下层高度 441 mm 为吊杆尺寸 400 mm 与槽钢尺寸 41 mm 的和。

表 1 试件设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

试件 分组	试件 编号	高度 × 宽度/ mm × mm	丝杠直径 /mm	侧向 支撑	斜撑角度 (水 平夹角) / (°)
第一组	S01	(500 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
	S02	(600 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
	S03	(700 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
	S04	(800 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
	S05	(900 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
	S06	(1000 + 441) × 1 200	12	双侧	45.0
第二组	S07	(700 + 441) × 1 200	10	双侧	45.0
	S08	(700 + 441) × 1 200	14	双侧	45.0
	S09	(700 + 441) × 1 200	16	双侧	45.0
第三组	S10	(700 + 441) × 1 200	12	单侧	45.0
	S11	(700 + 441) × 1 200	12	无	45.0
第四组	S12	(700 + 441) × 1 200	12	双侧	60.0
	S13	(700 + 441) × 1 200	12	双侧	52.5
	S14	(700 + 441) × 1 200	12	双侧	37.5
	S15	(700 + 441) × 1 200	12	双侧	30.0

2 建立有限元模型

2.1 支吊架系统模型建立

选择支吊架的斜撑安装方向垂直于管道, 并设定安装间距为 12 m, 管道线密度为 36 kg/m。同时, 在材料特性方面, 除螺栓外, 整个支吊架的钢结构弹性模量 E 设定为 2 060 GPa, 泊松比 μ 为 0.32, 密度 ρ 取为 7.85 kg/m³, 所用钢材为 Q235 型材。为准确模拟材料特性, 采用弹塑性模型, 并以 Von - Mises 屈服准则来界定塑性应变和应力之间的关联。具体而言, 当塑性应变为 0 时, 对应的应力值为 235 MPa; 当塑性应变增长至 0.063, 应力上升至 341.49 MPa; 而当塑性应变进一步达到 0.121 时, 应力则达到 388.6 MPa。

针对螺栓部分, 选用 Q235B 材料, 型号为 M10, 密度为 7.85 kg/m³, 弹性模量 E 设定为 2.5×10^5 MPa, 泊松比 μ 设定为 0.3。同时, 该螺栓的许用抗拉载荷为 4.31 kN, 许用抗剪载荷为 3.24 kN。

为确保数值分析的精确性, 所有结构构件均利用一维线单元进行模拟。网格划分时, 将尺寸统一

设定为 10 mm。在边界条件设定上, 锚栓与主体结构采用固结方式, 水平、垂直方向的位移以及转角均限制为 0。荷载的施加位置选在抗震斜撑与竖向加固吊杆的交汇点, 加载模式采用位移波形加载, 具体依据 FEMA461 位移加载历程进行操作, 最大目标位移设定为 60 mm。支吊架的三维模型如图 2 所示。

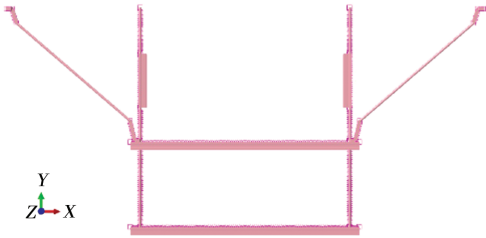


图 2 计算模型
Fig. 2 Calculation model

2.2 加载历程曲线

根据 FEMA 461^[18] 建议的加载程序, 采用变幅位移控制加载方式, 首先对试件进行初步分析, 试件进入峰值荷载后下降至 85% 峰值荷载状态为破坏状态, 其对应的位移记作 Δ_m , 初始加载位移被设定为 $0.048\Delta_m$, 即 0.9 mm, 后续加载位移依据 1.4 的增幅进行, 直至加载至试件破坏或最大位移 50 mm 时停止试验。加载曲线如图 3 所示。

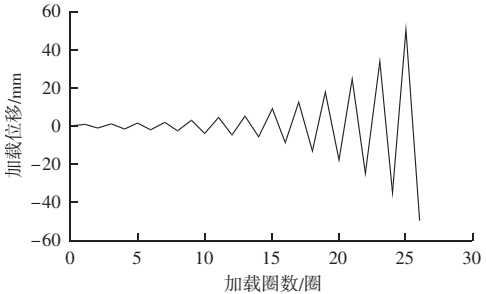


图 3 加载历程
Fig. 3 Loading curve

3 计算结果及分析

3.1 滞回曲线

各试件滞回曲线如图 4 所示, 第一组试件中 S01 ~ S05 在加载阶段呈现出基本一致的行为特点, 其加载曲线在初始阶段表现出明显的线性关系, 表明试件处于弹性阶段, 荷载与位移之间几乎保持线性, 这一阶段卸载时, 试件的残余变形极小, 表明其具备

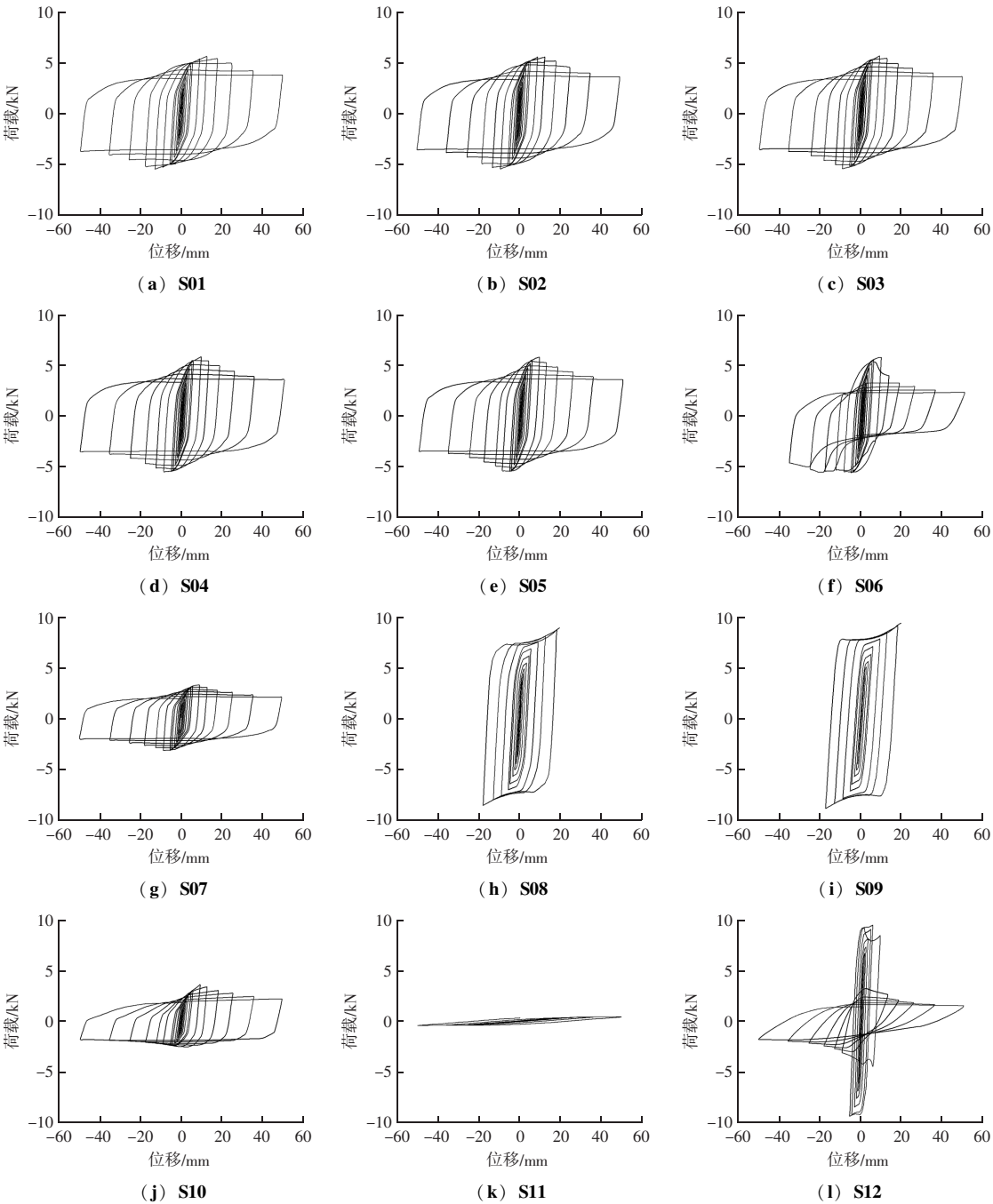
建筑结构

较好的恢复性能。然而，随着位移的持续增加，滞回环的形状趋向饱满，表明材料内部的塑性变形不断累积。在加载的后期，试件的塑性变形持续发展，残余变形随之增加。当试件的承载力达到峰值荷载后，表现出明显的下降趋势，尤其是 S06 试件，其峰值荷载后强度快速退化。

第二组试件（S07~S09）中，S08 和 S09 的表现

明显不同于 S07，尽管 S07 的滞回曲线与 S01~S05 相似，但其峰值荷载相对较低；而 S08 与 S09 在达到峰值荷载后，迅速发生破坏，残余变形较小，这主要是由于抗震连接座 B 的失效导致试件承载能力的急剧丧失。

第三组试件（S10~S11）中，S10 的承载能力较低，且其正负向力学性能不对称，负向承载力趋近



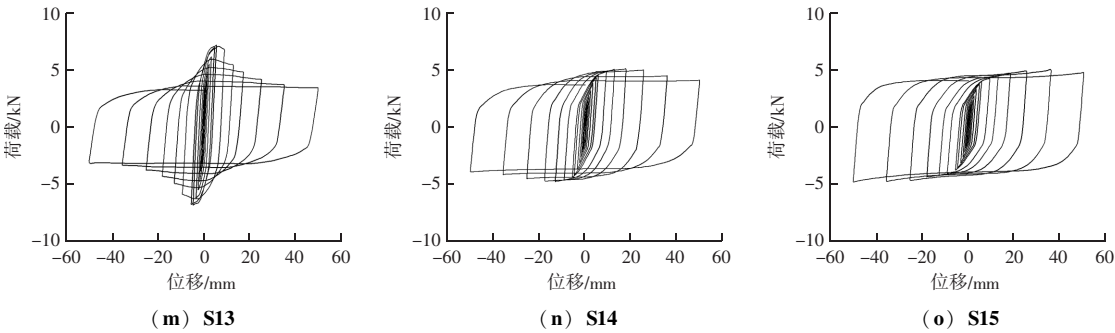


图 4 滞回曲线
Fig. 4 Hysteresis curve

于一条水平线，显现出其承载能力的不足；而 S11 试件由于缺少斜撑，其荷载位移曲线表现为近似直线且滞回环面积几乎接近 0，表明无斜撑的支吊架缺乏抗震能力。

第四组试件（S12~S15）中，S12 的峰值荷载之后强度急剧退化，导致试件完全丧失承载能力；S13 的滞回曲线与 S01~S05 相似，但其强度退化速度明显快于前者；S14 在试验中表现出较大的残余变形；而 S15 试件的承载力随着位移的增加逐渐增强，然而未出现明显的强度退化现象，但峰值荷载较低。

3.2 骨架曲线

将滞回曲线的峰值荷载点相连得到骨架曲线如图 5 所示，为便于对比分析，将试件 S03 作为对比试件分别绘制在第二组、第三组和第四组的骨架曲线中。

第一组试件正负向承载能力和变形性能基本相同，除 S06 试件外，其余试件均具有较好的承载能力及变形性能，强度退化均匀且平缓。

第二组和第三组试件中，S08 和 S09 试件的变形能力较差，但承载力明显高于 S03 试件，S07 试件承载力明显低于 S03 试件，而 S10 试件承载力比 S03 试件低得更多，S11 试件几乎没有承载能力。

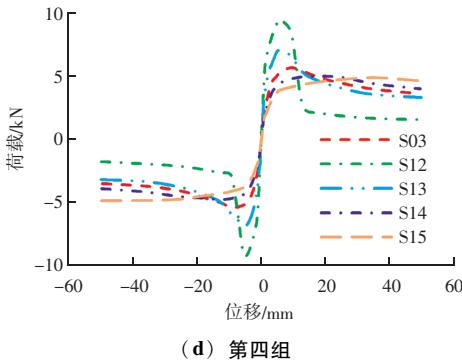
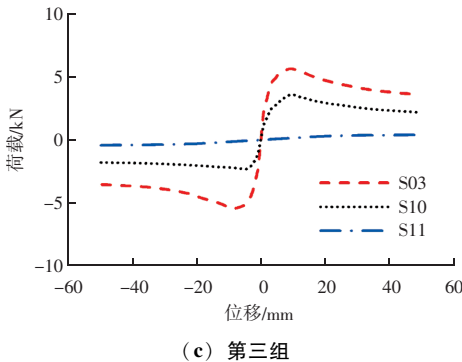
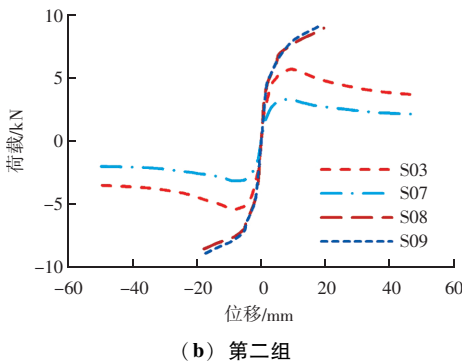
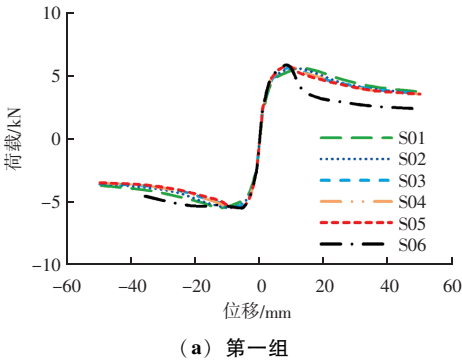


图 5 骨架曲线
Fig. 5 Envelope curve

第四组试件中，S12 和 S13 试件承载力较高，但峰值荷载后，试件仍有残余变形；S14 和 S15 试件承载力明显低于 S03 试件，但有较好的塑性变形。

建筑结构

由骨架曲线可知, 可将屈服点、峰值点和破坏点作为骨架曲线的特征点, 各试件骨架曲线特征值见表 2。

S01 ~ S06 试件屈服荷载和峰值荷载近似相同, 但屈服位移、峰值位移和极限位移随悬吊高度的增加而降低, S06 极限位移较低。

相较于 S03 试件, S08 试件的屈服承载力提升幅度达 53.8%, 极限承载力提升幅度为 57.5%。而 S09 试件对比 S03 试件, 屈服承载力提高了 56.9%, 极限承载力提高了 61.5%。另外, S08 和 S09 试件峰值点即为破坏点, 表明丝杠直径虽然能提高试件承载力, 但降低了变形性能, 试件突然破坏。S07 试件的屈服承载力和极限承载力较 S03 试件分别降低了

42.0% 和 41.7%, 表明较小的丝杠直径会降低试件的承载性能。而 S10 试件的屈服承载力和极限承载力较 S03 试件分别降低了 47.9% 和 46.8%, 表明单侧斜撑和无斜撑试件承载能力较差。

与 S03 试件相比, S12 试件在屈服承载力方面实现了 62.9% 的增长, 极限承载力提升了 67.2%。S13 试件相较于 S03 试件, 屈服承载力提高了 22.4%, 极限承载力提高了 25.1%。值得注意的是, S14 和 S15 试件的承载力显著低于 S03 试件。这一系列数据清晰地显示出, 抗震斜撑的角度对于支吊架的性能有着较为显著的影响。尤其值得一提的是, 在各种角度中, 45° 角度的模型展现出相对更优的力学性能。

表 2 试件的特征点
Table 2 Key point of specimens

试件编号	加载方向	屈服荷载及位移		峰值荷载及位移		破坏荷载及位移		延性系数
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
S01	正向	4.78	5.06	5.615	12.63	4.767	24.92	5.04
	负向	4.77	4.66	5.516	12.86	4.689	24.10	
S02	正向	4.71	4.17	5.57	9.13	4.73	22.31	5.46
	负向	4.71	3.83	5.48	9.06	4.66	21.34	
S03	正向	4.80	4.21	5.65	9.13	4.80	19.25	4.82
	负向	4.72	3.63	5.46	9.06	4.61	18.54	
S04	正向	4.91	4.19	5.80	9.21	4.93	18.05	4.84
	负向	4.70	3.29	5.46	9.18	4.64	18.19	
S05	正向	4.90	4.00	5.77	9.15	4.90	16.36	4.64
	负向	4.68	3.19	5.41	9.10	4.60	16.98	
S06	正向	4.91	3.90	5.74	9.28	4.88	11.09	3.06
	负向	4.73	3.21	5.51	5.53	4.68	10.65	
S07	正向	2.81	3.78	3.29	9.01	2.80	16.90	4.79
	负向	2.71	3.31	3.19	8.88	2.71	17.05	
S08	正向	7.36	8.26	8.91	19.51	—	—	2.49
	负向	7.28	6.72	8.59	17.85	—	—	
S09	正向	7.39	7.98	9.00	17.60	—	—	2.32
	负向	7.55	7.05	8.94	17.33	—	—	
S10	正向	2.98	5.52	3.58	9.18	3.03	17.94	3.41
	负向	1.98	2.77	2.33	4.73	1.98	10.36	
S11	正向	0.28	22.16	0.37	49.71	—	—	2.18
	负向	0.30	23.42	0.39	49.82	—	—	
S12	正向	7.76	2.88	9.36	5.63	7.96	9.58	2.98
	负向	7.75	2.48	9.22	4.51	7.84	6.38	
S13	正向	5.82	3.09	7.01	5.54	6.01	11.01	3.53
	负向	5.83	2.76	6.89	4.67	5.86	9.63	
S14	正向	4.33	5.29	4.95	17.69	4.21	40.44	8.37
	负向	4.17	4.51	4.83	12.93	4.11	41.61	
S15	正向	4.07	8.74	4.85	35.64	—	—	3.96
	负向	4.15	9.21	4.88	35.53	—	—	

3.3 延性性能

试件的延性性能通过表2中提供的数据进行了详细的分析,其中屈服位移、破坏位移或峰值位移均为正负向取平均值。这一数据表明,试件 S08、S09、S11 及 S12 的延性系数均低于3,而其余试件的延性系数则普遍高于3,这一现象充分表明了大多数试件在变形能力上具备相当优异的性能,能够在面临外部荷载时有效地进行形变而不发生脆性破坏。尤其值得注意的是,试件 S14 的延性系数达到了8.37 这一相对较高的数值,主要归因于其在加载初期表现出的较大刚度以及较小的屈服位移。随着荷载及变形程度的增加,S14 试件的强度退化过程相对缓慢,显示出其在极限状态下仍然维持较大的变形能力,从而确保其在极端工况下的稳定性和结构安全性。

3.4 耗能能力

构件的耗能能力大都用等效黏滞阻尼系数来表示。通过对等效黏滞阻尼系数的分析,可以有效评估不同试件的耗能能力,尤其是试件 S03 在多组试验中的表现为对比分析提供了重要基础。

四组的等效黏滞阻尼系数如图6所示,大多数试件的等效粘滞阻尼系数随位移的增加而逐渐上升,表明这些试件具有较为优越的耗能能力,当位移超过20 mm 时,等效粘滞阻尼系数趋于平稳,显示出其在大幅位移下的稳定性。悬吊高度对试件的耗能能力的影响相对较小,但明显的趋势是在悬吊高度超过900 mm 后,诸如试件 S06 在1 000 mm 悬吊高度下显现出峰值荷载后耗能能力的急剧降低,因此,结合滞回曲线及延性等参数影响,建议将支吊架的悬吊高度控制在900 mm 以下。丝杠的直径也对试件的耗能能力产生影响,当丝杠直径超过12 mm 时,试件的变形能力显著下降,因此推荐使用直径为12 mm 的丝杠,以优化性能。斜撑的存在与否直接影响试件的抗震性能,无斜撑状态下(S11),试件表现为弹性状态且完全没有耗能能力,而单侧斜撑(S10)的耗能能力显然低于双向斜撑,基于该观察结果,建议在设计中采用双向斜撑以增强结构的稳定性。斜撑角度的优化对支吊架的性能亦有重要意义,角度越大,耗能能力趋于减弱,尤其是保持在45°的斜撑角度,试件耗能能力相对较强,因此,设计时应优先考虑这一角度的应用。

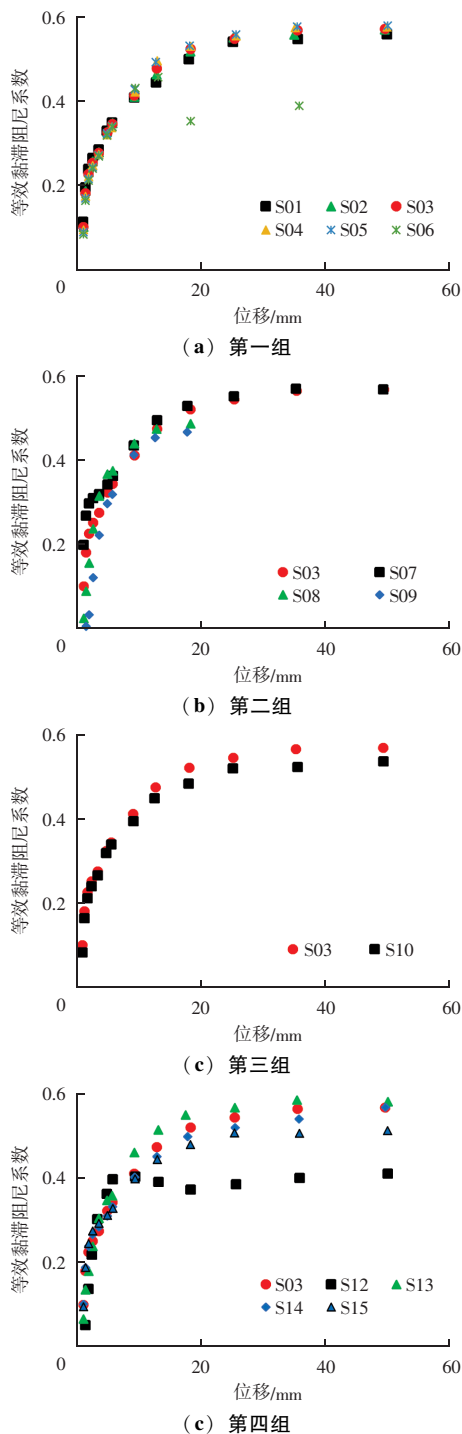


图6 等效粘滑阻尼系数

Fig. 6 Equivalent viscous damping coefficient

4 结论

由悬吊高度、丝杠直径、侧向支撑以及斜撑角度几方面,对支吊架抗震性能进行有限元分析,得出如下结论:

建筑结构

(1) 悬吊高度对试件的耗能能力的影响相对较小, 但试件 S06 在 1 000 mm 悬吊高度下显现出峰值荷载后耗能能力的急剧降低, 建议将支吊架的悬吊高度控制在 900 mm 以下。

(2) 丝杠直径对支吊架抗震性能有显著的影响, 直径小于等于 12 mm 时, 试件具有较好的抗震性能及变形能力, 大于 12 mm 时, 峰值荷载显著提高, 但达到峰值荷载后试件随即发生破坏, 变形能力较差。

(3) 无斜撑状态下试件 (S11), 表现为弹性状态且完全没有耗能能力, 而单侧斜撑 (S10) 的耗能能力显然低于双向斜撑, 试件设计时建议采用双向斜撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SOROUSHAN S, ZAGHI A E, MARAGAKIS E M, et al. Seismic fragility study of fire sprinkler piping systems with grooved fit joints [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141 (6): 04014157.
- [3] 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.
- [4] SOROUSHAN S, MARAGAKIS E, RYAN, et al. Seismic simulation of an integrated ceiling - partition wall - piping system at e - defense. II: evaluation of nonstructural damage and fragilities [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142 (2): 4 - 15.
- [5] RYAN, KERI L, MARAGAKIS E, et al. Seismic Simulation of an integrated ceiling - partition wall - piping system at e - defense. I: three - dimensional structural response and base isolation [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142 (2): 1 - 15.
- [6] PERRONE D, FILIATRAULT A, PELOSO S, et al. Experimental seismic response evaluation of suspended piping restraint installations [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18 (4): 1499 - 1524.
- [7] GOODWIN E, MARAGAKIS E, ITANI A. Seismic evaluation of hospital piping systems [C] //Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: WCEE, 2004.
- [8] YUE F, JAISEE S, ZHU B, et al. Experimental study on friction seismic sway bracings for seismic protection of building nonstructural components [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 26 (14): 7297 - 7318.
- [9] 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.
- [10] 郑国术, 卢达洲. 建筑抗震支吊架的施工技术与应用 [J]. 福建建材, 2016 (12): 50 - 51, 114.
- [11] 朱浩樑, 梁启惠, 丁幼亮. 建筑抗震支吊架的地震模拟试验研究 [J]. 建筑设计管理, 2018, 35 (1): 72 - 74.
- [12] 赵金桥, 刘胜, 马龙. 基于 ANSYS 的管线抗震支架抗震特性研究 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (2): 80 - 86.
- [13] 别亦白, 刘文白, 谢文远. 建筑抗震支吊架斜撑连接构件的拉伸破坏试验研究 [J]. 港工技术, 2018, 55 (5): 49 - 53.
- [14] 曾德民, 张晨, 杜志超, 等. 不同方向荷载作用下侧纵向抗震支吊架力学性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (3): 64 - 70.
- [15] 李旭海, 张俊苹, 钟杰. 新型风管抗震支吊架力学性能研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (3): 74 - 82.
- [16] 孙彬, 张雪芳, 张晋峰, 等. 机电管线用装配式支吊架抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44 (1): 38 - 47.
- [17] 宋旭亮, 杨澄宇, 蔡雪松, 等. 纵向抗震支吊架拟静力试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊1): 853 - 857.
- [18] FEMA 461 Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2007.