

张亮泉,刘光涛,毛晨曦. 2022. 网络数据中心典型通信机柜抗震性能拟静力对比试验研究[J]. 地震研究, 45(3): 388-398, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0033.

Zhang L Q, Liu G T, Mao C X. 2022. Pseudo-static experiments of three types of typical IDC communication cabinets[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3): 388-398, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0033.

网络数据中心典型通信机柜抗震性能 拟静力对比试验*

张亮泉¹, 刘光涛¹, 毛晨曦^{2*}

(1. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国地震局工程力学研究所
地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为研究网络数据中心典型通信机柜损伤特征, 获得其力学性能参数, 对3种常用的不同尺寸的6台机柜进行了往复拟静力加载试验, 为准确建立机柜的有限元模型提供数据基础。试验中对每种机柜分别进行了沿宽度和厚度方向的水平往复加载, 逐渐增大机柜顶部位移幅值, 直至机柜严重破坏, 观察其损伤发展过程、特征损伤现象, 记录其承载力-位移滞回曲线。结果表明: 对于此类通信机柜, 底部梁节点焊缝开裂、门板和侧板丧失支撑作用、立柱与机柜底板焊缝开裂是关键损伤机制, 在建立有限元分析模型时应重点考虑。

关键词: 通信机柜; 拟静力试验; 抗震性能; 破坏机制; 力-变形滞回特性

中图分类号: TU352; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)03-0388-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0033

0 引言

互联网数据中心(Internet Data Center, 简称IDC)是通信系统网络中的核心节点, 承担网络互连、流量和资源交换的任务, 是通信系统中最重要的一环(毛晨曦等, 2021)。通信机柜则是数据中心内最重要的设备之一, 内置各种服务器: KVM 切换机、接入/汇聚交换机、路由器、光纤跳线、网络跳线、理线/配线架等, 用来衔接客户与服务器, 其承载空间大, 能够保证设备安全性, 保证上网的安全、访问速度等。地震发生时, 许多建筑物都会发生不同程度的震害损伤甚至倒塌(陈振纳等, 2008), 而通信机柜一旦发生破坏,

将严重影响数据中心功能水平, 使其受损甚至发生瘫痪, 所以通信机柜的抗震能力对数据中心在地震后是否能维持正常的通信服务至关重要。

目前对于网络数据中心通信设备抗震性能的研究主要集中在两个方面: 对通信设备进行震害调查分析和采用抗震试验或有限元分析等方法进行研究。杜鹏(2011)在总结国内外通信设备震损情况和结合不同功能通信设备的地震易损性分析方法的基础上, 给出了室内通信设备在不同等级地震烈度时的破坏状态; 黄维学等(2012)对汶川地震中通信设备震害损失情况进行统计分析, 给出了通信设备震害等级划分标准, 建立了通信设备地震易损性模型和地震灾害损失评估方法; 刘诗语(2014)对广东省惠州市和阳江市通信设

* 收稿日期: 2022-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目“移动通信系统地震韧性评估关键问题研究”(52178513)资助。

第一作者简介: 张亮泉(1974-), 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、通信系统抗震韧性评估、大跨空间结构抗震、结构健康监测. E-mail: zhangliangquan2006@163.com.

✉ **通信作者简介:** 毛晨曦(1974-), 研究员, 博士, 主要从事结构工程抗震和通信系统地震灾害评估等方面的研究.
E-mail: maochenxi@iem.ac.cn.

备进行了全面的震害预测分析；李波等（2020）实地调研统计了四川长宁 6.0 级地震后通信设备的震损情况；毛晨曦和李帆（2021）对云南漾濞 6.4 级地震震区通信系统进行了震害调查，发现大量通信设备出现不同程度的损坏。

除了在震害调查方面的研究，有些学者从试验或有限元分析方面入手进行相关研究。周金荣和黄维学（2003）对通信电源设备的抗震性能试验和抗震检测简况进行了归纳总结；孙国良等（2014）建立了某开关电源设备机柜的模型，并通过 HyperWorks 软件对该模型进行了结构模态分析和谐响应分析；康文利等（2019）基于抗震试验研究了通信机柜斜撑连接方式及摆放位置对抗震性能的影响；韩明超等（2019）提出了通信电源设备抗震性能在线监测存储系统，用以研究通信电源在地震过程中的实时工作状况，进而达到改良设计提高其抗震能力的目的；还有学者进行了蓄电池组（冯利飞，2019）和综合设备机柜（郝云鹏等，2020）的振动台试验，分别总结出 2 种设备出现特征损伤和功能失效时的设备参数，并完成了损伤水平和损伤指标的划分，进而统计出了蓄电池组和设备机柜的地震易损性曲线；尚庆学等（2022）进行了 36 款通信机柜的振动台试验，并基于振动台试验结果建立了机柜的地震易损性模型。

通信机柜的地震易损性是数据中心震后功能评估的基础，而要获得准确可靠的通信机柜地震易损性，需要建立准确的有限元模型，因而通过试验掌握典型通信机柜的力学性能参数及其损伤模式很重要。基于大量实地调研及课题组前期研究，本文选择了数据中心常用的 3 组（共 6 个）标准通信机柜，对其进行拟静力往复加载试验，观察其损伤发展过程，掌握特征损伤模式，获得机柜的侧向变形能力和侧向抗力水平，以及力-变形滞回规则和滞回曲线等，为后续 IDC 通信机柜的准确有限元模拟、地震易损性分析提供数据基础。

1 通信机柜概况

通信机柜作为数据中心使用数量最多的设备，是数据中心的“大脑”，不断地进行数据交换和存储数据的工作，里面放着各种服务器，用来衔接客户与服务器，其承载空间大，能够保证设备安全性，保证上网的安全、访问速度等。机柜主体材料为钢材，表 1 给出了本文试验所选 3 种通信机柜的机械参数，图 1 给出了机柜尺寸及内部承力框架的形式示意。3 种 IDC 通信机柜均设置了内外两套抗侧力和承载框架：外框架梁柱（图 1a）需承担设备重力，同时为机柜提供抵抗侧向力的能力，具有较大截面，梁柱之间多采用型钢焊接而成；内框架梁柱（图 1b）截面较小，主要用于承受放置在隔板上服务器的重力，每个梁柱节点以及每个内外框架的节点连接由 2 根铆钉固定，将重力传递给外框架；服务器隔板（图 1c）与每根内框架柱节点由一根铆钉连接。

如图 2a 所示，试验选用的 3 种 IDC 通信机柜具有相同的宽度和高度，但厚度不同，在数据中心中用来放置不同的通信设备。机柜尺寸分别为 600 mm × 600/800/1 000 mm × 2 000 mm（以下用 600、800、1 000 代替 3 种尺寸机柜，用 X、Y 区分加载方向），且 3 种机柜的梁、柱截面完全相同，柜内共有 3 层隔板，每层隔板间距为 500 mm，每一层隔板处加入 100 kg 配重（图 2b），柜体和配重的总质量为 87.5 kg/95 kg/122 kg + 3 × 100 kg = 387.5 kg/395 kg/422 kg，为机柜正常使用状态的承载重量。试验中每台机柜均通过底部螺栓与底座固定连接，底座则与反力架连接，如图 2c 所示。每种机柜选择了 2 台同样规格尺寸的机柜，沿机柜的 X 方向和 Y 方向（两个水平方向）进行拟静力试验，以获得不同尺寸机柜在两个水平方向的特征损伤模式、变形能力、恢复力模型等。

表 1 试验中通信机柜主要机械参数

Tab. 1 Main mechanical parameters of the cabinets in the experiment

设备名称	数量	规格尺寸/mm ³	机柜钢材型号	机柜重量/kg	配重块重量及数量	机柜总重/kg
通信机柜 G36642	2	600 × 600 × 2 000	Q235	87.5	100 kg × 3	387.5
通信机柜 G36842	2	600 × 800 × 2 000	Q235	95	100 kg × 3	395
通信机柜 G36042	2	600 × 1000 × 2 000	Q235	122	100 kg × 3	422

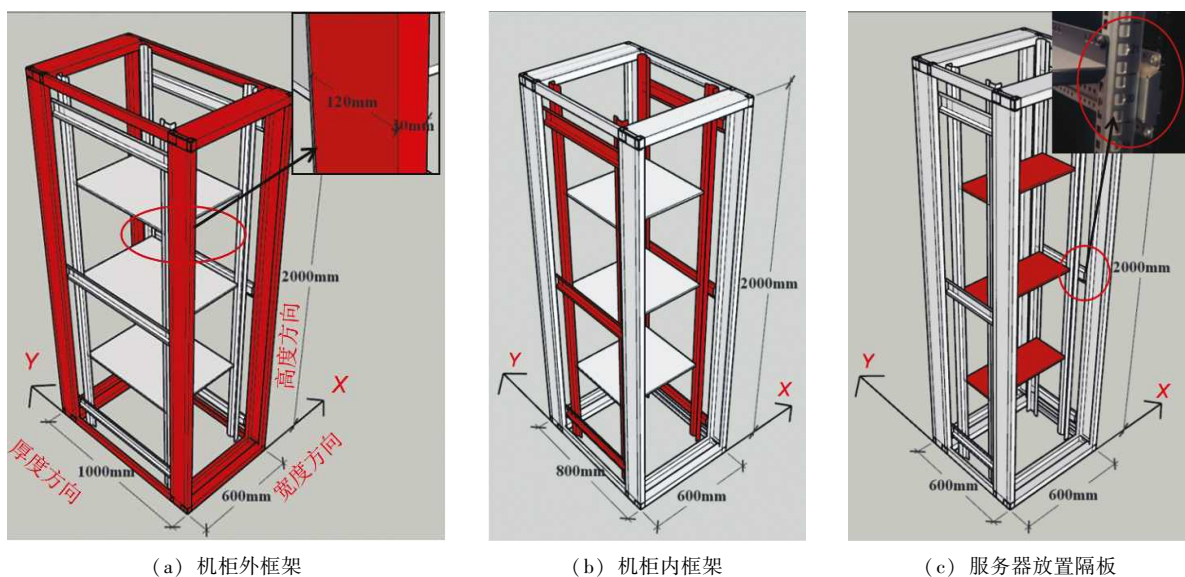


图 1 通信机柜主体结构示意图

Fig. 1 The main structure of the cabinet



图 2 试验机柜 (a)、配重 (b) 及传感器布置 (c)

Fig. 2 The test cabinet (a), weight stack (b) and sensor arrangement (c)

2 通信机柜主体钢材拉伸试验及主要物理指标

为了获得 3 种机柜柜体所用钢材实际力学性能参数, 为数值建模提供材料本构关系, 依据《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010) 的规定, 拟静力试验结束后在机柜侧板未损伤的部位取样, 裁剪为标准钢材拉伸性能测试件, 进行钢材拉伸性

能试验。从每 1 个机柜未损坏侧板各裁取 3 个试件, 则 6 个机柜共 18 个标准拉伸试件进行拉伸试验 (图 3)。机柜的柜门、侧板、梁柱型钢厚度均为 2 mm, 制作成拉伸试件厚 2 mm、拉伸段宽 10 mm、长 60 mm, 如图 3d 所示。试验加载装置为 SHT4106 微机控制电液伺服万能试验机 (图 4d), 加载速率为 4 mm/min。图 4a ~ c 为 3 组试件试验后的破坏照片, 图 5 给出了试件的应力 - 应变曲线, 表 2 给出了试件钢材的主要力学性能指标平均值。

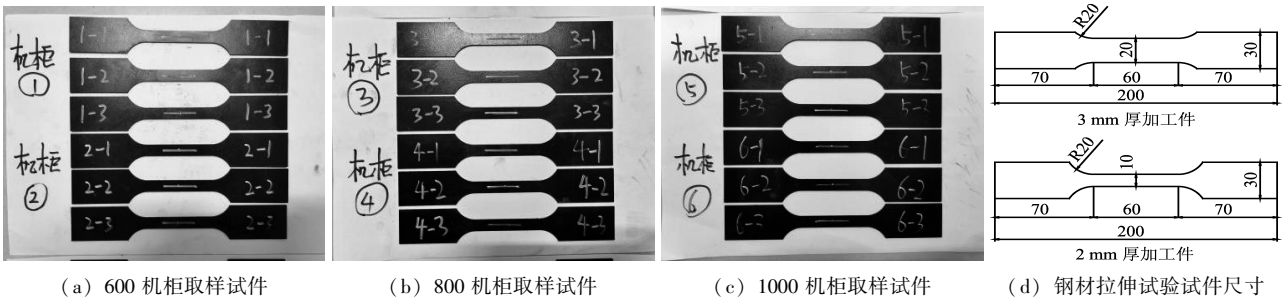


图3 标准拉伸试件（取自机柜主体）
Fig. 3 The standard tensile specimens (taken from the cabinet body)

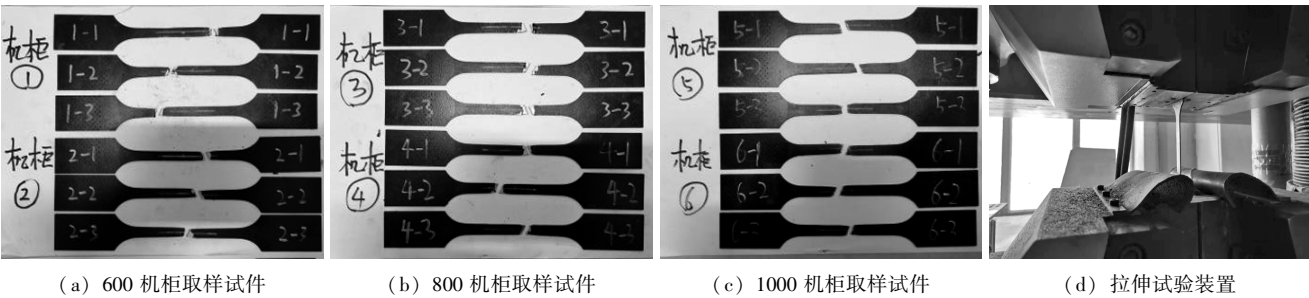


图4 试验后破坏试件及加载装置
Fig. 4 The destroyed specimens and the loading device

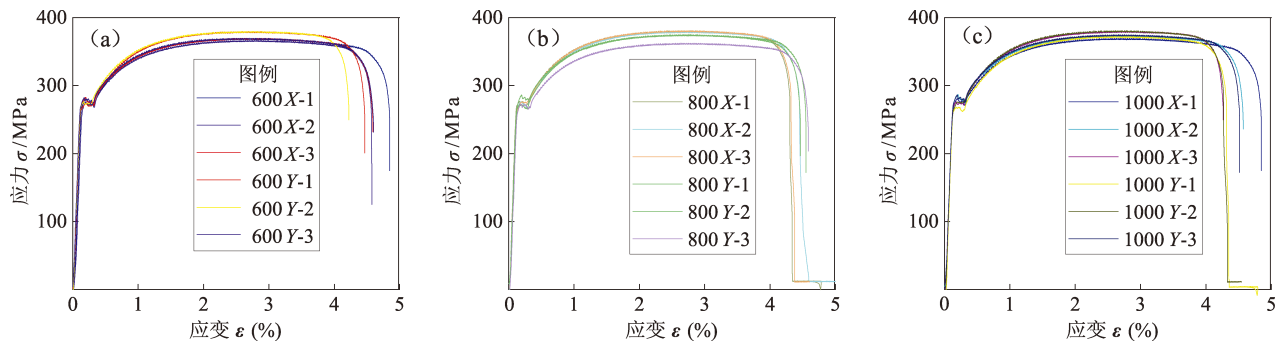


图5 600 (a)、800 (b)、1000 (c) 3组试件应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of specimens with length of 600 mm(a), 800 mm(b), and 1 000 mm(c) in tensile test

表2 机柜主体钢材主要力学参数
Tab. 2 The main mechanical parameters of cabinets

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服应变 (%)	极限应变 (%)	厚度/mm
7 850	2.08×10^5	278	373	0.14	2.82	2

3 拟静力加载试验

试验中对3种尺寸机柜分别进行往复拟静力加载,每种尺寸机柜一台沿X方向(宽度方向)加载、另一台沿Y方向(厚度方向)加载。加载装置采用了MTS电液伺服程控结构试验机,最大出力为600 kN、最大加载速度为10 mm/s。

3.1 试验中传感器应用及布置情况

为获得试验加载过程中机柜的变形情况,在每个机柜的柜顶、1/2柜高、柜底3个高度处均布置了位移计;为监测加载过程中机柜转动情况,在柜顶和1/2柜高处均布置了2个拉线位移计,柜底位置布置1个顶杆位移计,如图6所示。机柜在水平方向的抗力则是通过串联在作动器端头处的力传感器测出,串联的力传感器最大量程为100 kN。

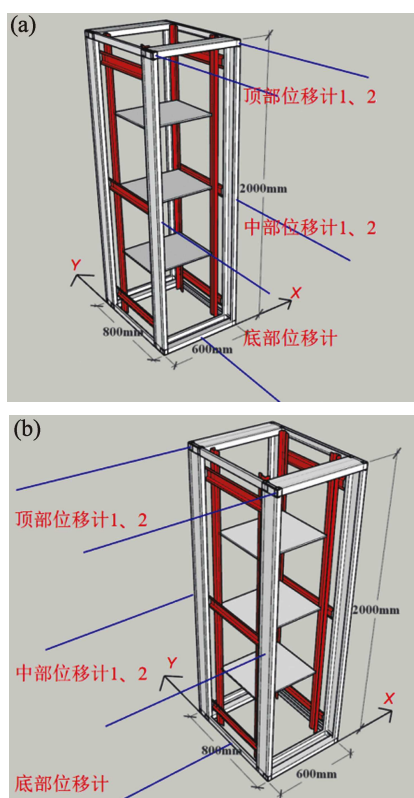


图6 X方向(a)和Y方向(b)位移计布置图

Fig. 6 The displacement sensor layout in

X (a) and Y (b) direction

3.2 拟静力试验加载工况

在每台机柜开始进行拟静力加载之前, 对其施加冲击激励并测量柜顶的加速度, 以识别

机柜在完好状态下的自振频率。拟静力试验采用位移控制方式(建筑抗震试验规程, JGJ/T101—2015), 在每台机柜的柜顶施加控制位移。与以往的拟静力往复加载试验不同, 本试验在加载历程的设计上力求考虑到机柜在未来地震动作用下将遭受的各种情况, 以观察机柜的力-变形滞回规则。在随机地震动作用下, 机柜可能会遭受加载、卸载不完全的情况, 因而设计了如下的两周期加载机制(图7a): ①位移角(柜顶位移除以机柜高度)小于3%时, 每个加卸载循环均采用完全加卸载历程, 每个位移幅值重复两次; ②位移角大于3%后, 每个位移幅值重复3次: 第一次为目标幅值(Δ)的完全加卸载; 第二次加载 $3/4\Delta$ 后卸载; 第三次则加载到 Δ , 卸载至 $1/4\Delta$, 反向再加载至 $3/4\Delta$, 然后卸载, 采用三周期加载方式(图7b)。图7c给出了上述两阶段加载历程的示意图。对柜顶施加三角波位移历程, 逐级增大位移幅值, 每一级加载的位移幅值分别为 ± 6 、 ± 12 、 ± 18 、 ± 24 、 ± 30 、 ± 36 、 ± 42 、 ± 48 、 ± 54 、 ± 60 、 ± 70 、 ± 80 、 ± 90 、 ± 100 , 加载速度为 1 mm/s 。在施加往复荷载的过程中, 观察机柜的损伤发展状况, 当机柜出现严重破坏或其承载力下降为峰值的85%时, 停止试验。试验结束后再次对破坏的机柜施加冲击激励, 测量损伤后机柜的自振频率。

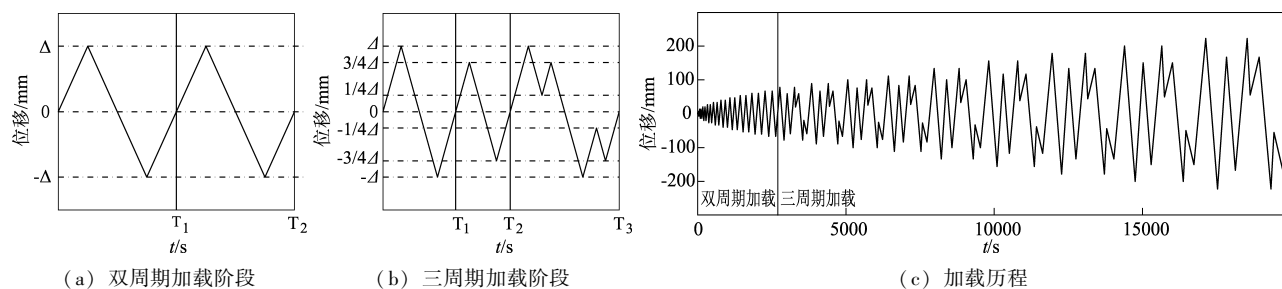


图7 拟静力试验加载位移历程

Fig. 7 The displacement history of pseudo-static loading experiments

4 试验结果

4.1 机柜损伤发展及特征现象

试验过程中观察3组IDC通信机柜的损伤随“柜顶相对柜底位移角”(以下简称为“柜顶位移角”)的变化, 柜顶位移角定义为柜顶位移与柜底

位移差的绝对值与柜体高度的比值。以800机柜为例, 在其沿X方向往复加载试验中, 观察到的机柜损伤发展过程及每个阶段的特征损伤现象如下:

(1) 当顶部位移不大于18 mm(柜顶位移角为0.9%)时, 机柜基本完好。

(2) 当柜顶位移超过18 mm(柜顶位移角为0.9%)时, 柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝,

并随加载幅值增大不断扩大。

(3) 当顶部位移达到 36 mm (柜顶位移角为 1.8%) 时, 柜门门轴从底座拔出, 柜门下部脱离柜体, 随着位移幅值增大, 机柜承载力逐渐下降。

(4) 当顶部位移达到 90 mm (柜顶位移角为 4.5%) 时, 一侧柜门从门框脱出, 与柜体分离。

(5) 当顶部位移达到 100 mm (柜顶位移角为 5.0%) 后, 机柜柜门全部脱出门框, 承载力显著下降, 柜底横、纵梁节点处裂缝贯通, 机柜完全破坏。

表 3 详细展示了 800 mm 机柜沿 X 方向加载时各阶段的特征损伤现象。600 和 1000 机柜沿 X 方向往复加载试验中观察到的机柜损伤发展过程及每个阶段的特征损伤现象与 800 机柜基本相同, 具体损伤发展过程见表 4。

表 3 沿 X 方向加载时厚度 800 mm 机柜的损伤发展过程

Tab. 3 Damage process of 800 mm long cabinets when being loaded in X direction



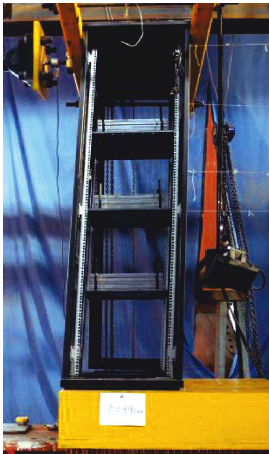





损伤阶段编号	$X-1$	$X-2$	$X-3$	$X-4$
位移/位移角	18 mm/(0.9%)	36 mm/(1.8%)	90 mm/(4.5%)	100 mm (5.0%)
机柜整体变形				
				
损伤部位细节				
损伤现象	柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝	柜门门轴从底座拔出, 柜门下部脱离柜体	一侧柜门从门框脱出, 与柜体分离	柜底横、纵梁节点处裂缝贯通

表 4 沿 X 方向加载时 3 种机柜的损伤发展过程

Tab. 4 Damage preocess of three types of cabinets when being loaded in X direction.

损伤阶段编号	位移/位移角			平均位移/位移角	损伤现象
	600 机柜	800 机柜	1000 机柜		
$X-1$	18 mm/(0.9%)	18 mm/(0.9%)	18 mm/(0.9%)	18 mm/(0.9%)	柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝
$X-2$	42 mm/(2.1%)	36 mm/(1.8%)	42 mm/(2.1%)	40 mm/(2.0%)	柜门门轴从底座拔出, 柜门下部脱离柜体
$X-3$	90 mm/(4.5%)	90 mm/(4.5%)	80 mm/(4.0%)	86.7 mm/(4.3%)	一侧柜门从门框脱出, 与柜体分离
$X-4$	100 mm/(5.0%)	100 mm/(5.0%)	90 mm/(4.5%)	96.7 mm/(4.8%)	柜底横、纵梁节点处裂缝贯通

对 800 机柜沿 Y 方向往复加载试验中, 观察到的机柜损伤发展过程及每个阶段的特征损伤现象如下:

- (1) 当顶部位移不大于 24 mm (柜顶位移角为 1.2%) 时, 机柜基本完好。
- (2) 当柜顶位移超过 24 mm (柜顶位移角为 1.2%) 时, 柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝, 并随加载幅值增大不断扩大。
- (3) 当顶部位移达到 36 mm (柜顶位移角为 1.8%) 时, 柜门侧板从底座拔出, 侧板下部脱离柜体, 机柜承载力略有下降。
- (4) 当顶部位移达到 80 mm (柜顶位移角为

4.0%) 时, 一侧侧板从柜体脱出, 机柜承载力显著下降。

(5) 当顶部位移达到 120 mm (柜顶位移角为 6.0%) 时, 外框架柱与机柜底板间焊缝开裂。

(6) 当顶部位移达到 180 mm (柜顶位移角为 9.0%) 后, 机柜侧板全部脱出门框, 柜底横、纵梁节点处裂缝贯通, 机柜完全破坏。

表 5 给出了 800 机柜沿 Y 方向加载时各阶段的特征损伤现象。600 和 1000 机柜沿 Y 方向往复加载试验中观察到的机柜损伤发展过程及每个阶段的特征损伤现象与 800 机柜基本相同, 具体损伤发展过程见表 6。

表 5 沿 Y 方向加载时厚度 800mm 机柜的损伤发展过程

Tab. 5 Damage process of the 800 mm long cabinet when being loaded in Y direction.





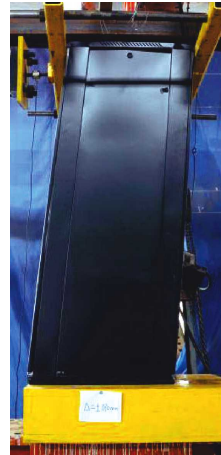





损伤阶段编号	$Y-1$	$Y-2$	$Y-3$	$Y-4$	$Y-5$
位移/位移角	24 mm/(1.2%)	36 mm/(1.8%)	80 mm/(4.0%)	120 mm/(6.0%)	180 mm/(9.0%)
机柜整体变形					
损伤部位细节					
损伤现象	柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝	侧板从底座拔出, 侧板下部脱离柜体	一侧侧板从柜体脱出	外框架柱与机柜底板间焊缝开裂	柜底横、纵梁节点处裂缝贯通

表 6 沿 Y 方向加载时 3 种机柜的损伤发展过程

Tab. 6 Damage process of three types of cabinets when being loaded in X direction

损伤阶段编号	位移/位移角			平均位移/位移角	损伤现象
	600 机柜	800 机柜	1000 机柜		
Y-1	18 mm/(0.9%)	24 mm/(1.2%)	24 mm/(1.2%)	22 mm/(1.1%)	柜底横、纵梁节点处开始出现裂缝
Y-2	60 mm/(3.0%)	36 mm/(1.8%)	42 mm/(2.1%)	46 mm/(2.3%)	侧板从底座拔出, 侧板下部脱离柜体
Y-3	70 mm/(3.5%)	80 mm/(4.0%)	60 mm/(3.0%)	70 mm/(3.5%)	一侧侧板从柜体脱出
Y-4	120 mm/(6.0%)	120 mm/(6.0%)	120 mm/(6.0%)	120 mm/(6.0%)	外框架柱与机柜底板间焊缝开裂
Y-5	180 mm/(9.0%)	180 mm/(9.0%)	180 mm/(9.0%)	180 mm/(9.0%)	柜底横、纵梁节点处裂缝贯通

4.2 基于试验数据进行机柜破坏机理分析

图 8 给出了 3 种不同尺寸机柜沿 X、Y 方向加载后的力 - 位移滞回曲线, 为便于分析宏观损伤对机柜承载能力的影响, 图中标出了与表 4、6 对应的损伤阶段编号。

结合图 8a-1、b-1、c-1 中的力 - 位移滞回曲线和表 3 的特征损伤现象可知: 在加载的初始阶段, 机柜的 X 方向侧向抗力主要来源于机柜的承力框架和前后门板, 此时门板起到了类似斜撑的作用; 由于机柜的立柱与底板、横梁与纵梁的连接节点为焊接, 且节点的承载力弱于立柱, 阶段损伤达到 X-1 时, 发生了横梁与纵梁焊缝开裂, 但此时机柜的刚度无明显变化, 承载力随机柜顶部位移增大仍在线性增加; 当达到损伤阶段 X-2 后,

随着柜门门轴从柜体拔出, 柜门与柜体部分脱离, 斜撑作用下降, 承载力出现大幅下降 (约降低 60%), 再加载的刚度也明显降低 (降低约 80%); 此后, 随位移幅值增大, 柜门先后从柜体脱落, 机柜损伤集中在了立柱 - 横梁的节点位置, 焊缝开裂逐步扩展, 直至最终贯通, 在力 - 位移滞回曲线上表现为刚度和承载力的逐步降低。

为了进一步清晰地观察到不完全加卸载情况下机柜沿 X 方向荷载 - 位移曲线的滞回规则, 图 9a 以 800 机柜为例给出了位移达到 X-3 水平时三周加卸载的滞回曲线, 分别用 T_1 、 T_2 、 T_3 表示。从图中可以看出, 在卸载未达到零点即反向再加载的情况下 (T_{3-2} 曲线), 反向再加载刚度与卸载刚度几乎相同, 因而周期 T_{3-2} 曲线包围的

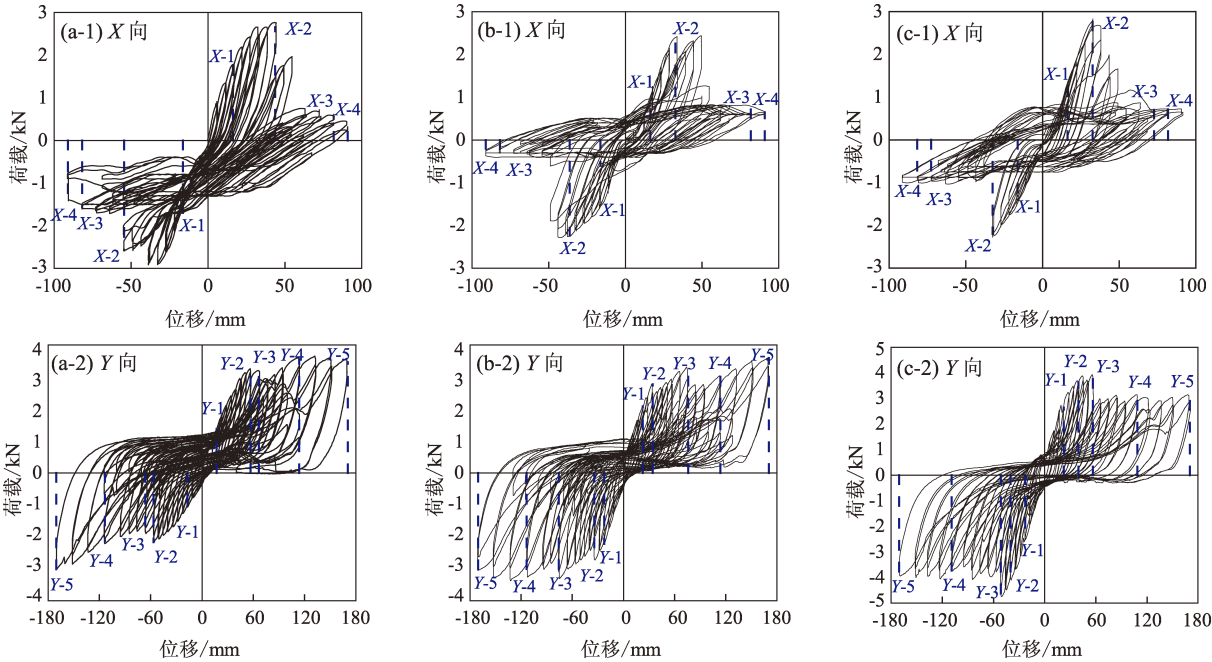


图 8 600 (a)、800 (b)、1000 (c) 机柜沿 X、Y 方向力 - 位移滞回曲线

Fig. 8 The force - displacement curves of cabinets with lenth of 600 mm (a), 800 mm (b), 1 000 mm (c) in X and Y direction respectively

面积非常小,几乎可以忽略。

Y 方向的损伤发展与 X 方向不同。从图8a-2、b-2、c-2的力-位移滞回曲线和表5内特征损伤现象可以看出:在 Y 方向加载的初始阶段,与 X 方向类似,机柜的侧板起到了斜撑的作用,与 Y 方向的承力框架共同工作;在达到损伤阶段 $Y-1$ 时发生了横梁与纵梁焊缝开裂,但机柜刚度无明显变化,承载力随机柜顶部位移增大也继续线性增加;达到损伤阶段 $Y-2$ 之后,侧板部分脱出柜体,承载力略有下降(下降约10%),损伤发展表现出了与 X 方向的不同;在达到损伤阶段 $Y-3$ 之后,一侧侧板脱出柜体,机柜的侧向承载力下降了约20%;随后侧向力主要由 Y 向框架承担, Y 向承力框架的底部横梁与纵梁的节点焊缝开裂逐步扩展直至贯通。与 X 方向不同的是, Y 方向在侧板脱落后,框架仍能够承担大部分承载力,并且在 $Y-4$ 损伤阶段后出现了立柱与底板焊缝开裂的现象。同时也应注意到,厚度600 mm和800 mm的机柜在沿 Y 方向加载过程中峰值承载力出现在侧板脱落之后,而厚度1 000 mm机柜峰值承载力出现在侧板脱落前,这说明随着机柜宽度增加,侧板尺寸对机柜 Y 方向承载力有一定影响。

图9b给出了800机柜沿 Y 方向加载时,位移达到 $Y-4$ 水平三周加卸载滞回曲线。从图中可以看出,当卸载未达到零点即反向再加载的情况下(T_{3-2} 曲线),反向再加载刚度略高于卸载刚度,周期 T_{3-2} 曲线有一定的包围面积和耗能能力。

从上述分析可以看出,在机柜的 X 和 Y 方向,底部横纵梁节点与立柱-底板节点焊缝持续开裂、

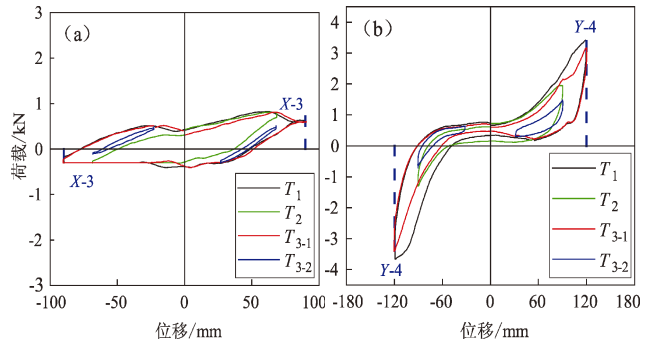


图9 800 机柜沿 X 向 $X-3$ 阶段(a) Y 方向 $Y-4$ 阶段(b)力-位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curves of cabinets with length of 800 mm in the loading phase $X-3$ in X direction (a) and $Y-4$ in Y direction (b)

门板和侧板的支撑作用丧失是这种通信机柜的关键损伤机制,应作为此类通信机柜力学性能数值模拟的关键考虑因素。此外,机柜在不完全加卸载情况下荷载-位移曲线所表现出来的滞回规则也是数值建模时需要重点关注的。

图10对机柜在 X 和 Y 方向的力-变形滞回曲线进行了比较,可以看出机柜沿 Y 方向的抗力和变形能力均大于其在 X 方向的相应性能,这主要是因为机柜的4根立柱在 Y 方向的宽度(120 mm,图1)大于其在 X 方向的宽度(30 mm),因此对于这类IDC机柜而言, X 方向(即宽度方向)为柜体水平承载的弱方向。在后续对此类IDC机柜进行抗震能力分析和地震易损性分析时,可以考虑仅对 X 方向进行分析,所得的分析结果也是偏于安全的。

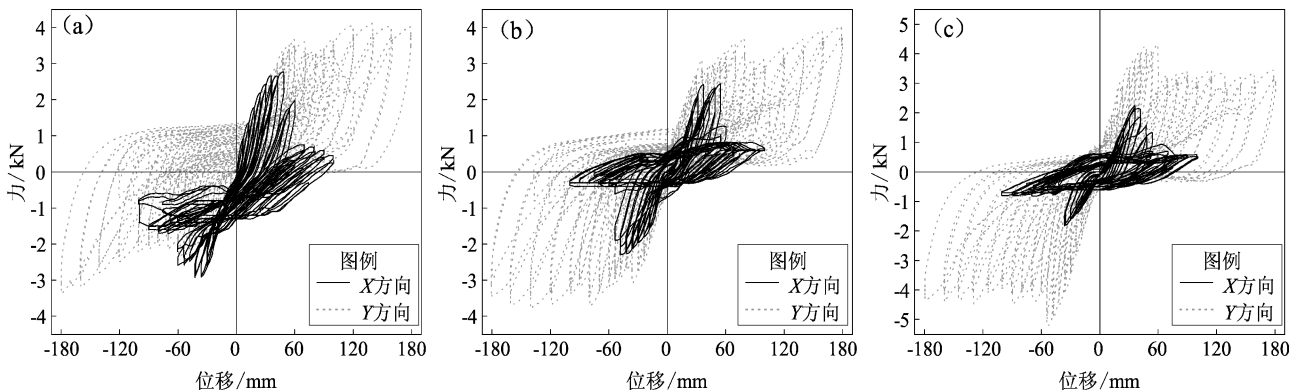


图10 600 (a)、800 (b)、1000 (c) 机柜在 X 方向和 Y 方向力-位移滞回性能的比较

Fig. 10 Comparison of the force-displacement behavior of cabinets with length of 600 mm (a), 800 mm (b), and 1000 mm (c) in X direction and Y direction respectively

4.3 试验前后的机柜一阶频率变化

如前所述，在拟静力试验前后，采用锤击法分别对3种机柜抗侧力框架施加激励，通过FBA-12型力平衡加速度计和MTS系统电子控制台采集柜顶加速度反应时程，再由快速傅立叶变换(FFT)将所采集的时域数据转化为频域，进而得到6台机柜损伤前后的一阶固有频率(表7)，图11给出了6台IDC机柜在试验前后的频率。从图中可以看出，各机柜在X方向频率均在9.4 Hz左右、Y方向频率均在14.0 Hz左右，实验结束后无论是沿X方向还是Y方向，6个机柜一阶频率均显著降低，这是由柜体各部位发生不同程度损伤、

破坏，其刚度大幅下降，结构抵抗外力的能力基本丧失所致。

表7 6台机柜损伤前后频率

Tab.7 Frequencies before and after the six cabinets being damaged

机柜编号-测量方向	试验前频率/	试验后频率/	频率下降比例 (%)
	Hz	Hz	
600-X	9.3	4.2	54.80
600-Y	13.6	6.1	55.10
800-X	8	3.9	51.30
800-Y	15.1	5.9	60.90
1000-X	9.5	4	57.90
1000-Y	14.9	6.4	57.00

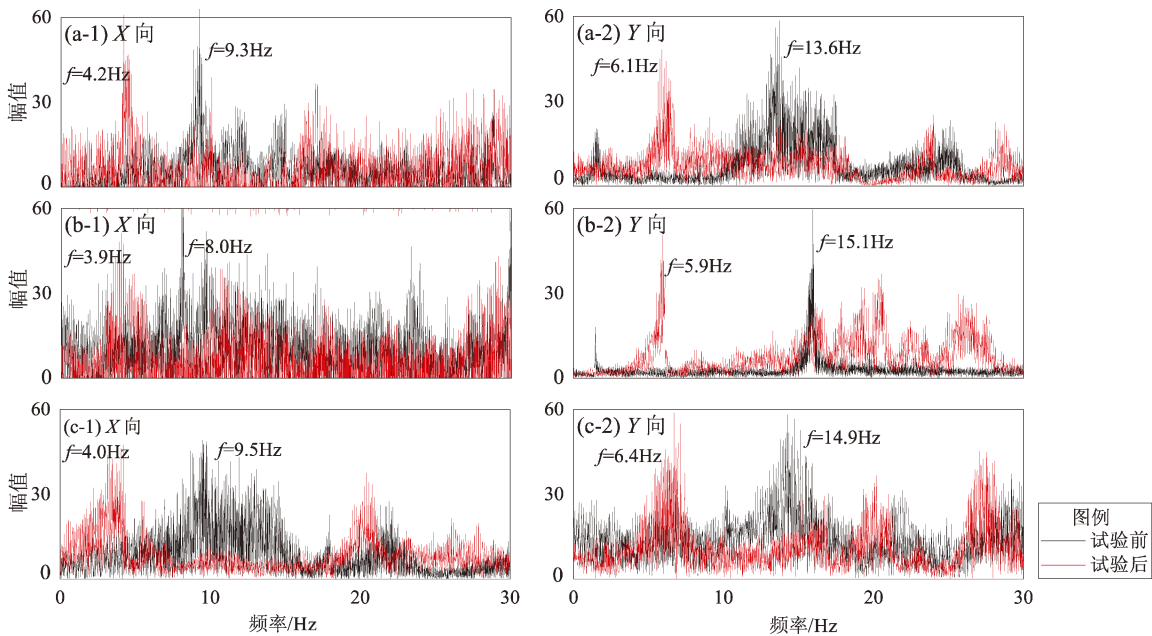


图11 600 (a)、800 (b)、1000 (c) 机柜试验前后频率

Fig. 11 Frequencies of cabinets with length of 600 mm (a), 800 mm (b), and 1000 mm (c) before and after the experiment

5 结论

本文针对互联网数据中心(IDC)中常用的3种不同尺寸的机柜，进行了沿机柜两个水平方向的往复加载拟静力试验，研究其在两个水平方向上的力学性能和力学参数。每组试验针对两台质量、结构、规格、尺寸都相同的机柜进行，通过逐渐增大机柜顶部位移，直至机柜严重破坏，观察机柜在加载过程中的破坏模式和破坏特征，记录机柜承载能力的变化。通过

试验得到的主要结论为：

(1) 在X方向(即宽度方向)水平往复荷载作用下，3种机柜的损伤发展过程基本相同：底部横、纵梁焊缝开裂→门轴拔出，门板部分脱离柜体→柜门逐渐脱落，与柜体分离→损伤集中在节点，焊缝持续开裂直至贯通。

(2) 在Y方向(即厚度方向)水平往复荷载作用下，3种机柜的损伤发展过程基本相同：底部横、纵梁焊缝开裂→侧板逐渐脱落，与柜体分离→立柱与底板焊缝开裂→损伤集中在节点，焊缝持续开裂直至贯通。

(3) 随机柜 Y 方向尺寸逐渐增大, $Y-3$ 损伤阶段(侧板脱落)前承载力逐渐增大,侧板尺寸对 Y 方向承载力有一定影响。

(4) 对于此类通信机柜,无论在宽度方向还是在厚度方向,横纵梁节点、立柱与底板焊缝持续开裂,门板和侧板的支撑作用丧失都是关键的损伤机制,当采用数值模拟手段建立机柜力学分析模型时都应作为关键模拟因素。

参考文献:

- 陈振纳,周威,阎玉敏. 2008. 钢-混凝土组合结构抗震性能研究综述[J]. 森林工程, (1): 45-47.
- 杜鹏. 2011. 室内通信设备地震易损性分析[J]. 华南地震, 31(1): 98-103.
- 冯利飞. 2019. 基于振动台试验的关键通信设备地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 韩明超,李皓琰,韩月鹏,等. 2019. 通信电源设备抗地震性能监测系统的设计[J]. 电信技术, (11): 68-71.
- 郝云鹏,冯利飞,毛晨曦. 2020. 典型通信设备机柜的振动台试验研究[J]. 地震研究, 43(3): 485-490.

- 黄维学,臧战胜,汲书强,等. 2012. 通信设备地震灾害损失快速评估研究[J]. 电信工程技术与标准化, 25(12): 73-77.
- 康文利,孙国良,李倩,等. 2019. 基于 Hyperworks 的斜撑对机柜抗震性能影响的研究[J]. 现代制造工程, (1): 144-150.
- 李波,郭恩栋,毛晨曦. 2020. 四川长宁县 6.0 级地震通信系统结构震害调查与分析[J]. 世界地震工程, 36(2): 172-179.
- 刘诗语. 2014. 通信设备及塔架地震破坏易损性分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 毛晨曦,李帆. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震通信系统震害调查与分析[J]. 地震研究, 44(3): 461-471.
- 毛晨曦,刘光涛,张亮泉. 2021. 典型 IDC 通信机柜抗震性能拟静力试验研究[J]. 地震研究, 44(4): 700-709.
- 尚庆学,韩镭,孙国良,等. 2022. 基于振动台试验的通信机柜地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 54(5): 57-63.
- 孙国良,汲书强,李晓亮. 2014. 开关电源设备的抗地震性能分析[J]. 计算机辅助工程, 23(2): 66-84.
- 周金荣,黄维学. 2003. 通信电源设备抗震性能实验与检测[J]. 电信工程技术与标准化, (6): 54-55.
- GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S].
- JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].

Pseudo-static Experiments of Three Types of Typical IDC Communication Cabinets

ZHANG Liangquan¹, LIU Guangtao¹, MAO Chenxi²

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

In order to investigate the damage characteristics of the commonly used communication cabinets in the internet data center (IDC), obtain parameters of mechanical property, and accumulate basic data for establishing accurate finite element models of six cabinets with various sizes, pseudo-static experiments were carried out on them. During the tests, each cabinet was loaded in X direction and in Y direction respectively. The displacement on the top of each cabinet gradually increased until the cabinet was seriously damaged. The damage process and some special types of damage were observed, and the hysteretic curves of bearing capacity-displacement were got. The test results show that for such communication cabinets, the cracking of bottom beam joints, the loss of door and side panels make up the key damage mechanism, which should be taken into consideration when establishing the finite element model.

Keywords: IDC cabinet; pseudo-static test; aseismic capacity; damage mechanism; force-deformation hysteretic curves