

DOI:10.11918/202104057

基于振动台试验的通信机柜地震易损性分析

尚庆学¹, 韩 镒², 孙国良², 汲书强², 左浩朋¹, 王 涛¹

(1. 中国地震局地震工程与工程振动部门重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080;
2. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘 要: 为考察通信机柜在不同地震强度下的损伤情况,进行了36款通信机柜的振动台试验。根据规范要求采用人工合成地震动作为振动台试验输入。试验结果表明,满足检测标准的机柜有13个,不满足检测标准的有23个,其中有9个机柜在检测中发生倾倒。通信机柜产品质量参差不齐,抗震性能状况堪忧,可能为数据中心的正常运行埋下安全隐患。基于试验测得的加速度时程曲线,对机柜加速度放大效应进行了对比分析,发现不合格机柜的顶部加速度放大效应明显大于合格机柜,中部加速度放大效应基本相当。本文基于36款通信机柜的振动台试验检测结果,建立机柜的地震易损性模型,选取楼面峰值加速度为工程需求参数,以难以修复、丧失使用功能定义通信机柜的损伤状态。结果表明:在楼面峰值加速度达到 $1.118\text{ }1\text{ }g$ 时,通信机柜即有50%的概率丧失使用功能。通过与已有文献中的易损性曲线研究结果对比,发现通信机柜尺寸对其地震易损性的影响较小,但与单向地震激励相比,双向地震输入下机柜更易发生破坏、丧失使用功能。

关键词: 通信机柜; 振动台试验; 地震易损性; 需求谱; 丧失使用功能

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)05-0057-07

Seismic fragility analysis of telecommunication cabinets based on shaking table tests

SHANG Qingxue¹, HAN Di², SUN Guoliang², JI Shuqiang², ZUO Haopeng¹, WANG Tao¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration
(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China;
2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: Shaking table tests on 36 telecommunication cabinets were conducted to investigate the seismic damage of cabinets under different earthquake intensities. Artificial ground motions were adopted as the inputs of the shaking table tests according to the standards. Results show that 13 cabinets met the standards, while other tested cabinets failed to meet the standards, and nine of them overturned during the tests. The quality of the telecommunication cabinets was uneven with poor seismic performance, which may pose a potential safety loophole for the normal operation of internet data centers. The acceleration amplification effects of the cabinets were compared and analyzed based on the recorded acceleration time-history curves during the tests. It was found that the acceleration amplification effect at the top of the unqualified cabinets was significantly larger than that of the qualified cabinets; the acceleration amplification effect at the middle of the cabinets was basically the same. The seismic fragility model of the telecommunication cabinets was developed based on the shaking table test data of 36 cabinets in this study. Peak floor acceleration was selected as the engineering demand parameter and the damage state of the cabinets was defined as hard to recover and loss of functionality. Test results show that when the peak floor acceleration was $1.118\text{ }1\text{ }g$, the exceedance probability corresponding to the damage state of loss of functionality of the telecommunication cabinets was 50%. By comparing the results with the existing fragility curves in the literature, it was found that the dimensions of the telecommunication cabinets had little influence on their seismic fragility. The cabinets were more prone to be damaged and easier to lose functionality under bidirectional seismic excitations than under unidirectional seismic excitations.

Keywords: telecommunication cabinet; shaking table test; seismic fragility; required response spectra; loss of functionality

作为重要生命线系统之一,通信系统在历次大地震中都遭受了严重损伤^[1-5],由此带来的经济损

失、数据中心存储数据丢失以及由于信息通讯延误导致的伤亡人数增加,给国民经济及生活带来巨大灾难。通信系统主要由通信建筑、塔架、通信设备及通信线路组成,文献[5]对2019年四川长宁6.0级地震后通信系统震害展开调查,调查结果表明通信设备是通信系统抗震的薄弱环节,应进一步增强其

收稿日期: 2021-04-14
基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2020EEVL0502)
作者简介: 尚庆学(1993—),男,博士研究生
通信作者: 韩 镒,handi@caict.ac.cn

抗震性能。通信设备主要包括传输设备、交换设备、数据设备、电源系统等,分别固定于通信建筑物内不同楼层。通信设备在地震中破坏形式多样,主要包括柜式设备门脱落、设备挡板脱落、设备甩出、设备

柜倾斜、倾覆、设备底部连接部位失效、走线架变形、走线架脱落等(见图 1),其中任何一项破坏均可能导致整个通信基站直接退出服务^[5]。

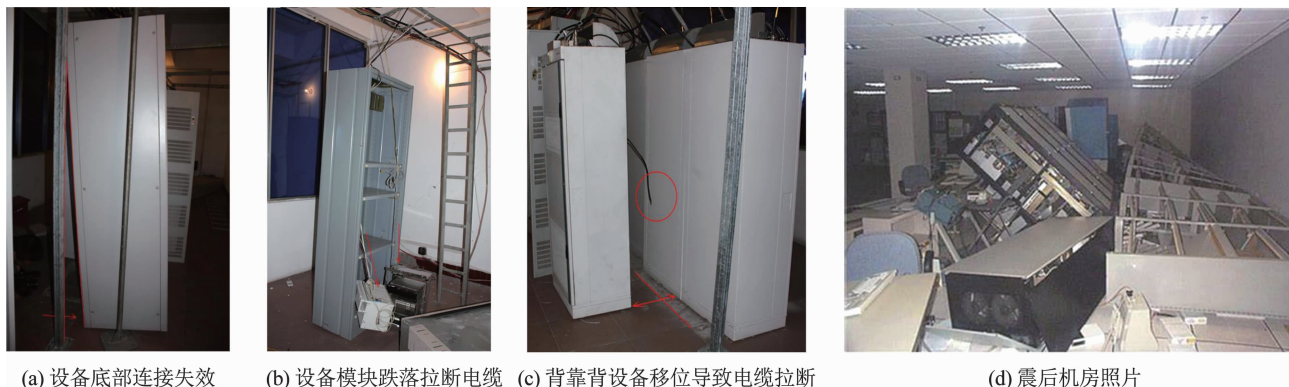


图 1 通信设备震害

Fig. 1 Seismic damage of telecommunication equipment

目前多数通信设备都是以通信机柜的形式存在的,机柜是数据中心机房的重要组成部分。通信机柜通过膨胀螺栓与地面固定连接,通信设备安装、固定于通信机柜中,机柜为设备提供基本的安全保护,抵抗地震作用。文献[6]通过振动台试验考察了蓄电池机柜在不同强度地震作用下的地震响应,结果表明当地震动强度达到 $0.3g$ 时,蓄电池机柜开始出现损伤,背板发生弯曲变形;地震动强度达到 $0.5g$ 时,蓄电池组挡板被蓄电池撞掉,蓄电池移位,蓄电池组丧失使用功能。文献[7]对典型通信系统综合机柜进行双向加载振动台试验研究,对机柜顶部最大位移响应及自振频率变化进行分析,并结合试验损伤现象指出严格控制焊缝质量可以有效提高机柜抗震性能。

文献[8]对中山、东莞部分通信设备进行分析计算,并结合震害经验给出通信设备在不同地震烈度下的破坏状态;文献[9]对落地通信基站机房及内部通信设备地震易损性进行了数值分析研究,并给出了相应的地震易损性参数;文献[6]基于振动台试验结果定义了蓄电池机柜的地震损伤状态,并给出了不同损伤状态的地震易损性参数;文献[10]建立了某开关电源设备机柜的数值分析模型,利用实测数据标定数值模型,并进行机柜的优化设计;文献[11-12]对典型通信铁塔进行了数值模拟及地震易损性分析;文献[13]基于实测数据建立某通信铁塔的数值模型,并进行了抗震性能分析;文献[14]基于汶川地震通信基站震害调查结果,提出了通信基站地震破坏等级划分方法,用于通信基站地震损失快速评估。

现有针对通信机柜的试验研究相对较少,且地

震易损性分析大多基于数值模拟,针对某一特定机柜进行,对通信机柜的地震易损性缺乏系统研究,导致数据中心及通信系统的抗震性能评估及抗震韧性评价缺乏相应的基础数据。本文首先介绍中国电信设备抗震性能检测中人工合成地震动的确定方法,并通过振动台试验对 36 款通信机柜进行了抗震性能检测,基于检测数据定义了通信机柜的地震损伤状态,建立了不同尺寸通信机柜的地震易损性曲线。

1 电信设备抗震性能检测方法

常用的电信设备抗震性能检测方法包括正弦共振拍波测试、人工合成地震动测试和静力拉伸试验^[15-17],文献[15-16]对中、美、日和欧洲通信设备抗震性能检测标准进行了对比分析。鉴于本文的研究重点在于通过振动台试验得到通信机柜的地震易损性,故此处不讨论正弦共振拍波测试和静力拉伸试验检测方法。

目前 YD 5083—2005《电信设备抗地震性能检测规范》^[17]规定,抗震设防烈度 7 度及以上地区公用电信网上使用的交换、传输、移动基站、通信电源等主要电信设备应进行抗震性能检测。被检测设备底部应与振动台台面直接连接,当条件不具备(如设备安装螺栓孔位与台面孔位不一致)时,可通过增设连接件的方式与台面连接,但连接件应有足够刚度且不影响待检测设备的动力特性。

检测试验推荐使用单向激励进行,也可使用多向激励,当采用人工合成地震动作为检测输入时,首先需要确定加速度需求反应谱,需求反应谱的加速度谱值(阻尼比为 3%)按照输入楼面峰值加速度(A_{PF})与设备动力放大系数谱(β 谱)的乘积确定,再

根据需求反应谱生成相应的人工合成地震动,且人工合成地震动的持续时间不少于 30 s,强震部分持续时间不少于 20 s。动力放大系数谱的谱形见图 2,其中关键点的频率与动力放大系数值的对应关系见表 1,需要指出的是表 1 所定义的各频率点之间的动力放大系数在对数坐标系下为线性分布(见图 2)。

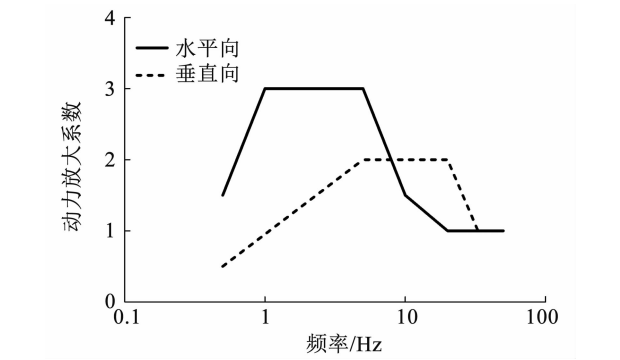


图 2 动力放大系数谱

Fig.2 Spectrum of dynamic amplification factors

输入楼面峰值加速度按式(1)确定,其中 k_1 为设备重要度系数, k_2 为楼面加速度放大系数,不同类型电信设备的 k_1 、 k_2 取值按表 2 确定;当确定了待检测设备在通信建筑中的安装楼层时,也可按照式(2)确定 k_2 取值;式(2)中 h 为设备所在位置距地面高度, H 为结构总高度, A_{PG} 为地面峰值加速度,根据抗震等级确定;水平地面峰值加速度取值见表 3,垂直地面峰值加速度取值为对应水平地面峰值加速度取值的 1/2;表 3 同时给出了不同抗震等级下通信机柜检测标准,若不满足相应的判定标准,则认为检测不合格,规范^[17]规定检测不合格机柜不得使用,故本文将检测不合格机柜判定为检测后丧失使用功能。以通信电源设备为例,其在不同抗震等级下的水平向需求反应谱见图 3。

$$A_{PF} = k_1 \cdot k_2 \cdot A_{PG} \tag{1}$$

$$k_2 = \begin{cases} 1.0 + 2 \cdot \frac{h}{H}, & \text{地上楼层} \\ 1.0, & \text{一楼及地下楼层} \end{cases} \tag{2}$$

表 1 规范^[17]中定义的动力放大系数

Tab.1 Dynamic amplification factors defined in the standards^[17]

固有频率/Hz	水平向	垂直向
0.5	1.5	0.5
1.0	3.0	
5.0	3.0	2.0
10.0	1.5	
20.0	1.0	2.0
33.0		1.0
50.0	1.0	1.0

表 2 关键参数取值

Tab.2 Values of critical parameters

设备种类	设备重要度系数 k_1	楼面加速度放大系数 k_2
电源设备	1.2	3
交换设备	1.1	2
传输设备	1.1	2
基站设备	1.1	3

表 3 不同等级下抗震判定标准

Tab.3 Determination requirements for different aseismic grades

抗震设防烈度	A_{PG} 取值/ g	判定标准
7 度	0.10	柜体结构不得有变形和破坏
8 度	0.20	应保证柜体结构完整性,主体结构允许出现轻微变形,连接部分允许出现轻微损伤,但任何焊接部分不得发生破坏
9 度	0.40	机柜主体结构允许出现部分变形和破坏,但机柜不得倾倒

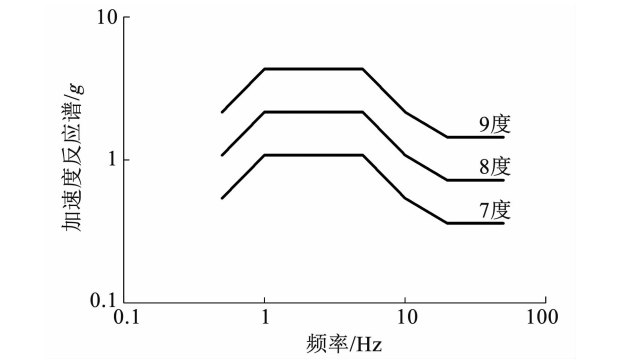


图 3 通信电源设备需求反应谱

Fig.3 Required response spectra of telecommunication power equipment

2 通信机柜抗震性能检测试验

2.1 通信机柜示例

2018 ~ 2019 年间,项目组对 36 款通信机柜进行了抗震性能检测,所检测机柜基本材料均为冷轧钢板,且机柜结构形式统一,均由框架、前后门板、左右侧板、顶板、底板、隔板、立柱等组成,主体框架均采用焊接形式,试验依据规范^[17]进行。以图 4(a)所示的待检测通信机柜为例,机柜通过螺栓与槽钢连接件紧固,槽钢连接件与振动台台面通过螺栓连接,在机柜底部、中部、顶部及台面分别安装加速度传感器见图 4(b),用于台面输入加速度及机柜响应加速度的测量。该机柜宽、深、高(即图 4(a)中的 y 、 x 、 z 方向)分别为 600 mm、1 200 mm、2 000 mm,对机柜进行正弦扫频,获得 x 、 y 向的固有自振频率(f)分别为 12.891 Hz、7.422 Hz, x 、 y 向的阻尼比(ξ)分别为 9.55%、4.75%。根据文献[9]的研究结果,通信机柜通常在水平的 y 方向(即沿机柜的短边方向)发生破坏,因而本文仅考虑 y 方向的检测结果。本文检测的通信机柜 y 方向自振频率基本介于 2.0 ~ 8.0 Hz 之间。

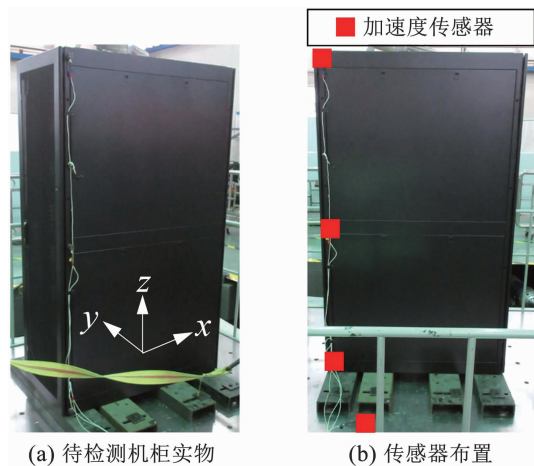


图4 待检测通信机柜

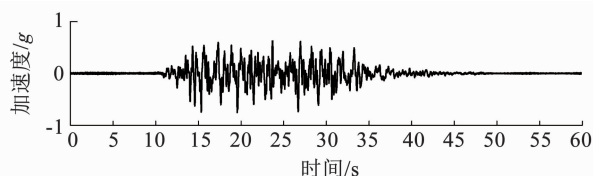
Fig. 4 Telecommunication cabinet for tests

检测试验输入采用根据规范^[17]生成的人工合成地震动,对于图4的通信机柜,8度检测使用的台面输入见图5(a),人工合成地震动加速度反应谱与需求谱对比见图5(b),满足规范^[17]要求。机柜底部加速度响应与台面输入加速度基本吻合,见图5(c),说明检测试验所采用的螺栓连接对机柜性能无影响,满足检测要求。试验结束后,被检测机柜前后门打开,主框架四角撕裂,机柜整体接近倾倒(见图5(d)),震后丧失使用功能,不满足表3的检测标准。

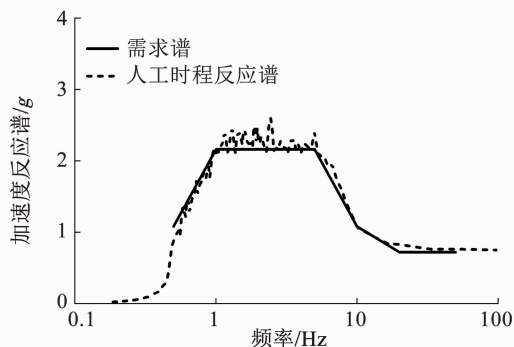
2.2 通信机柜检测结果

所检测的36款通信机柜分为4种:深1 000 mm高2 000 mm、深1 000 mm高2 200 mm、深1 200 mm高2 000 mm、深1 200 mm高2 200 mm,宽均为600 mm。检测结果表明,满足标准要求的有13个,不满足表3检测标准的有23个,其具体尺寸、机柜质量及配重见表4,不合格率为64%;具体而言,7度不合格1个,8度不合格8个,9度不合格14个,其中有9个机柜发生倾倒现象,其余不合格机柜破坏现象主要体现在机柜前后门打开或与机柜框架分离、支撑侧板掉落、外框架顶部及底部焊接处开裂。通信机柜产品质量参差不齐,抗震性能状况堪忧,遭遇地震时易发生破坏,可能为数据中心的震后正常运行埋下安全隐患,影响震后应急通信功能的行使。结合试验中观察到的破坏现象,在机柜设计中应针对顶部及底部焊缝、前后门及支撑侧板的连接进行重点考察和设计,以保障震后机柜的正常使用。

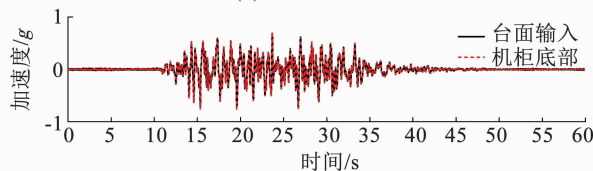
本文将机柜加速度放大系数定义为机柜中部和顶部峰值加速度响应与台面输入峰值加速度响应的比值,加速度放大系数对比见图6;从统计意义上来看,不合格机柜的顶部加速度放大效应明显大于合格机柜,中部加速度放大效应基本相当。



(a) 台面输入加速度



(b) 加速度反应谱



(c) 机柜底部与台面输入加速度对比



(d) 机柜破坏照片

图5 检测试验输入及机柜响应

Fig. 5 Input for tests and response of cabinet

2.3 通信机柜地震易损性

通信机柜的地震损伤与所在楼层的楼面加速度响应相关,本文以楼面峰值加速度为工程需求参数(E_{dp}),将通信机柜损伤状态定义为丧失使用功能(不满足表3列出的通信机柜检测标准)、难以修复(机柜焊缝开裂、倾倒等损伤),则通信机柜的易损性函数 $F_{dm}(e_{dp})$ 定义为通信机柜在给定楼面峰值加速度下,丧失使用功能的概率,并假定 $F_{dm}(e_{dp})$ 符合式(3)给出的对数正态分布^[18-19]:

$$F_{dm}(e_{dp}) = \Phi\left(\frac{\ln(e_{dp}/A_{PF-m})}{\beta}\right) \quad (3)$$

$$A_{PF-m} = \exp\left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln r_i\right) \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\ln(r_i/A_{PF-m}))^2 + \beta_u^2} \quad (5)$$

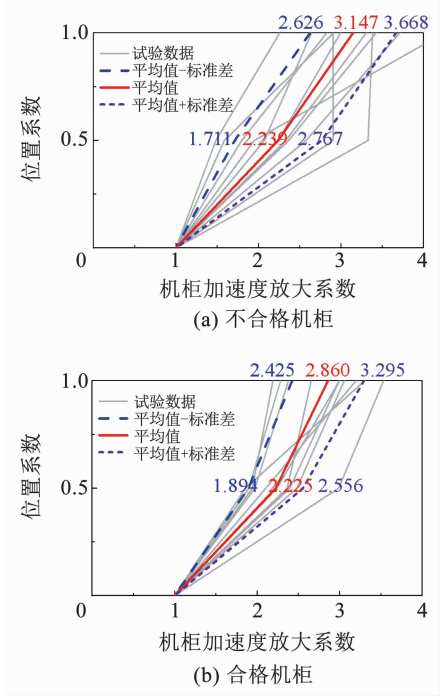
表 4 不合格机柜尺寸及质量分布
Tab.4 Dimensions and mass distributions of unqualified cabinets

宽/mm	深/mm	高/mm	机柜质量/kg	配重/kg
600	1 000	2 000	184	150
			170	300
			162	200
			160	500
600	1 000	2 200	168	300
			194	200
			168	200
600	1 200	2 000	233	500
			216	300
			162	500
			206	260
			144	200
			214	800
600	1 200	2 200	218	150
			237	300
			302	600
			210	500
			294	200
			248	500
			162	550
			324	700
			168	200
			220	300

式中: Φ 为标准正态分布累积分布函数, A_{PF-m} 、 β 分别是楼面峰值加速度中位值和对数标准差, M 为所考虑的试件数目, i 为试件编号, r_i 为试件 i 破坏时对应的楼面峰值加速度的具体取值^[18-19], β_u 是对 β 的修正参数, 参考文献[20], 建议取 $\beta_u=0.25$ 。

不同类型通信机柜易损性参数见表 5, 相应的易损性曲线见图 7(a)~(d), 除深 1 200 mm 高 2 000 mm 的机柜外, 其他机柜均能通过具有 5% 显著性水平的拟合优度检验^[21]。易损性分析结果表明: 深 1 200 mm 高 2 000 mm 的机柜最容易丧失使用功能, 深 1 000 mm 高 2 000 mm 的机柜次之, 深 1 000 mm 高 2 200 mm 的机柜与深 1 200 mm 高 2 200 mm 的机柜抗震性能接近, 且深 1 200 mm 高 2 200 mm 的机柜抗震性能最好。若不考虑深 1 200 mm 高 2 000 mm 的机柜, 其他 3 组机柜的楼面峰值加速度中位值分别为

1.061 9 g、1.202 9 g、1.253 2 g, 总体而言较为接近, 机柜尺寸对其地震易损性的影响较小。



注: 图中数据来源于台面实际得到的峰值加速度介于 1.5 g~1.8 g 之间的机柜测试结果。

图 6 机柜加速度放大系数

若对通信机柜尺寸不加区分, 将所有通信机柜损伤破坏数据进行拟合, 得到通信机柜的地震易损性曲线见图 7(e), 在楼面峰值加速度达到 1.118 1 g 时, 通信机柜丧失使用功能的超越概率为 50%。

表 5 列出了文献[6, 9]给出的通信机柜易损性参数, 由此得到的通信机柜地震易损性曲线与本文检测结果的对比如图 7(f)。文献[6]所研究的机柜(蓄电池机柜)宽、深、高分别为 560 mm、800 mm、2 260 mm, 选取 6 组实际地震记录, 进行双向加载, 基于 2 个机柜在逐级增大加载过程中的加速度响应及破坏现象, 将机柜丧失使用功能定义为蓄电池机柜最上层蓄电池撞坏挡板、电池甩出, 并通过对逐级加载的数据拟合得到在不同地震动强度下机柜失效的概率及相应的易损性参数。从图 7(f)可以看出, 文献[6]得到的易损性曲线离散性较大, 主要是由于双向耦合激励下柜顶峰值加速度与台面输入峰值加速度拟合的数据离散性较大造成的; 与本文表 5 的结果对比发现, 同等强度的地震激励下, 与单向地震激励相比, 双向地震激励下机柜更易发生破坏。文献[9]所研究的机柜宽、深、高分别为 500 mm、650 mm、1 880 mm, 采用 ABAQUS 有限元软件建立机柜的弹塑性分析模型, 基于增量动力分析确定机柜的地震易损性, 尽管其尺寸与本文检测试验考察的机柜尺寸有一定差距, 但其地震易损性相差不大。

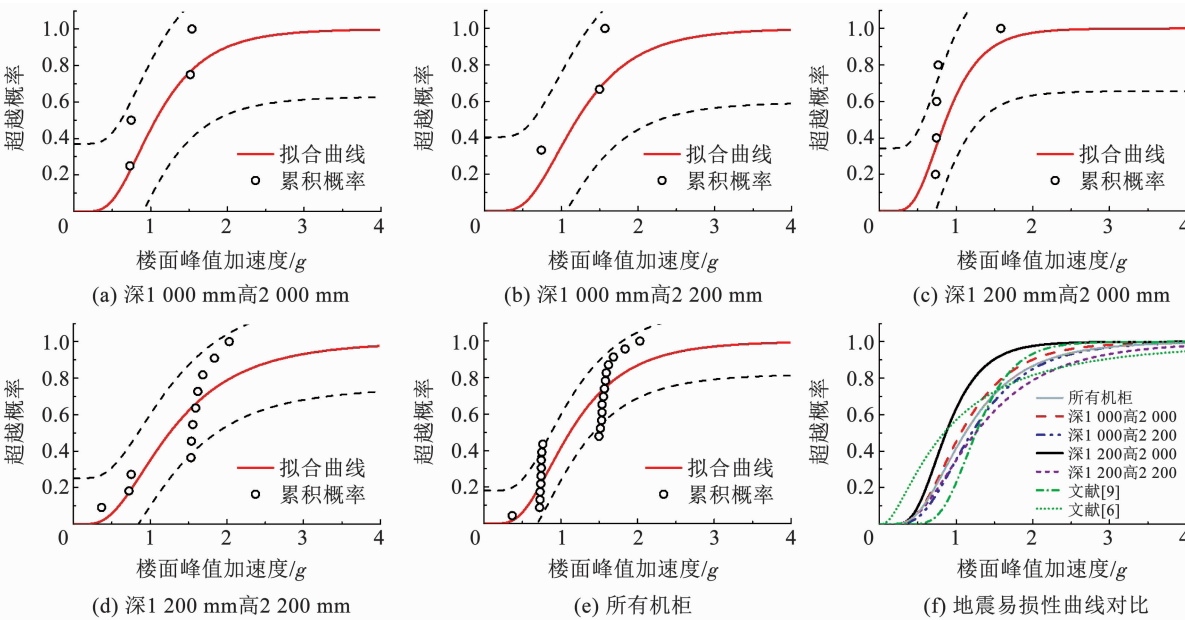


图 7 机柜地震易损性曲线

Fig. 7 Seismic fragility curves of cabinets

表 5 易损性参数
Tab.5 Fragility parameters

机柜类型	A_{PF-m}/g	β
深 1 000 mm 高 2 000 mm	1.061 9	0.488 4
深 1 000 mm 高 2 200 mm	1.202 9	0.490 0
深 1 200 mm 高 2 000 mm	0.867 8	0.419 4
深 1 200 mm 高 2 200 mm	1.253 2	0.584 2
所有机柜	1.118 1	0.521 8
文献[9]	1.258 3	0.307 2
文献[6]	0.843 0	0.959 0

3 结 论

通信设备是通信系统保全其通讯功能不可或缺的部分,而国内对通信设备抗震性能的研究还相对较少。本文通过振动台试验对 36 款通信机柜进行了抗震性能检测,发现通信机柜薄弱方向(y 向)自振频率基本介于 2.0 ~8.0 Hz 之间,不合格率 64%;通信机柜产品质量参差不齐,抗震性能状况堪忧,可能为数据中心的正常运行埋下安全隐患。

不合格机柜的顶部加速度放大效应明显大于合格机柜,中部加速度放大效应基本相当。基于检测结果建立了不同尺寸通信机柜的地震易损性曲线,发现在楼面峰值加速度达到 1.118 1 g 时,通信机柜即有 50% 的概率丧失使用功能。通过与现有研究结果进行对比,通信机柜尺寸对其地震易损性的影响较小,但与单向地震激励相比,同等强度的地震激励下,双向地震激励下机柜更易发生破坏、丧失使用功能。

本文建立的通信机柜地震易损性模型可为数据中心抗震性能评估及抗震韧性评价提供基础数据。但现有结果也表明单向地震输入与双向地震输入下通信机柜的地震易损性有一定差距,且本文由于检测试验的特殊性,并未进行地震动强度从小到大的逐级加载,很难得到机柜逐步损伤破坏过程中的现象,用于定义通信机柜的损伤状态,基于不同损伤状态定义的通信机柜地震易损性模型仍有待进一步研究;另一方面,易损性曲线拟合结果易受样本容量的影响,后续将考虑进一步增加样本容量,同时考虑不同配重对通信机柜抗震性能的影响,以建立更加完善的通信机柜地震易损性曲线。

参考文献

[1]郭恩栋,余世舟,李正光,等. 云南大姚 6.1 级地震中的生命线工程——震害及功能状态评述[J]. 自然灾害学报, 2004, 13 (1): 112
GUO Endong, YU Shizhou, LI Zhengguang, et al. Lifeline engineering in M_s 6.1 Dayao, Yunnan, earthquake: Seismic damage and service state[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13 (1): 112. DOI:10.13577/j.jnd.2004.0118

[2]刘爱文,厦珊,吕红山,等. 汶川地震极重灾区通信基站典型震害及原因分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2012, 25(12): 82
LIU Aiwēn, XIA Shan, Lǚ Hongshan, et al. Typical damage analysis for mobile communication base stations in the extremely damage area of Wenchuan earthquake [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2012, 25(12): 82. DOI:10.13992/j.cnki.tetas.2012.12.017

[3]刘金龙,林均岐,刘如山,等. 芦山 7.0 级地震通讯系统震害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 91
LIU Jinlong, LIN Junqi, LIU Rushan, et al. Seismic damage investigation and analysis of the communication system in Lushan M_s

7.0 earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 91. DOI:10.13577/j.jnd.2013.0513

[4] 刘金龙, 黄勇, 喻绍宁. 尼泊尔8.1级地震通讯系统震害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 146

LIU Jinlong, HUANG Yong, YU Shaoning. Investigation and analysis of seismic damage to communication system in Nepal M_s 8.1 earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 146. DOI:10.13577/j.jnd.2016.0217

[5] 李波, 郭恩栋, 毛晨曦. 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, 2020, 36(2): 172

LI Bo, GUO Endong, MAO Chenxi. Seismic damage survey and analysis of communication system in Changning M_s 6.0 Earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 172

[6] 毛晨曦, 冯利飞. 基于振动台试验的移动通信节点机房蓄电池组地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(3): 10

MAO Chenxi, FENG Lifei. Seismic fragility analysis of storage batteries in mobile communication node room based on shaking table test[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 10

[7] 郝云鹏, 冯利飞, 毛晨曦. 典型通信设备机柜的振动台试验研究[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 485

HAO Yunpeng, FENG Lifei, MAO Chenxi. Study on shaking table tests of a typical telecommunication cabinet [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 485

[8] 杜鹏. 室内通信设备地震易损性分析[J]. 华南地震, 2011, 31(1): 98

DU Peng. Seismic vulnerability estimation analysis of interior communication apparatus[J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(1): 98. DOI:10.13512/j.hndz.2011.01.013

[9] 毛晨曦, 李诗尧, 张亮泉. 落地通信基站机房地震易损性及震后功能失效概率评估[J]. 世界地震工程, 2018, 34(2): 55

MAO Chenxi, LI Shiyao, ZHANG Liangquan. Seismic fragility and functional failure probability assessment of machine room of typical base transceiver stations that located on the ground [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(2): 55

[10] 孙国良, 汲书强, 李晓亮. 开关电源设备的抗地震性能分析[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(2): 66

SUN Guoliang, JI Shuqiang, LI Xiaoliang. Anti-seismic performance analysis on switching power supply [J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(2): 66. DOI:10.13340/j.cae.2014.02.013

[11] 李波, 毛晨曦, 郭恩栋. 基于性能的移动通信铁塔地震易损性分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 21

LI Bo, MAO Chenxi, GUO Endong. Seismic fragility analysis of mobile communication towers based on structural performance[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(3): 21. DOI:10.13577/j.jnd.2018.0303

[12] 毛晨曦, 李诗尧, 张亮泉. 典型通信铁塔抗震性能及地震易损性[J]. 世界地震工程, 2018, 34(1): 63

MAO Chenxi, LI Shiyao, ZHANG Liangquan. Seismic capacity and vulnerability of typical communication towers [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(1): 63

[13] 张朋波, 高永强, 杜文嫚, 等. 基于实测模型的通信铁塔抗震性能仿真分析[J]. 计算机辅助工程, 2016, 25(4): 62

ZHANG Pengbo, GAO Yongqiang, DU Wenman, et al. Anti-seismic performance simulation analysis on communication tower based on measured model[J]. Computer Aided Engineering, 2016, 25(4): 62. DOI:10.13340/j.cae.2016.04.012

[14] 臧战胜, 黄维学, 孙国良. 通信基站地震破坏等级划分探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊1): 1025

ZANG Zhansheng, HUANG Weixue, SUN Guoliang. Study on communication base station seismic damage grades[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 1025. DOI:10.13197/j.eeev.2014.S0.1025.zangzs.161

[15] 祝捷, 蒯锐. 通信设备抗震性能测试探讨[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2013, 13(1): 54

ZHU Jie, KUAI Rui. Seismic test of telecommunications equipment [J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2013, 13(1): 54

[16] 李晓亮. 中、美、日和欧洲通信设备抗震检测规范分析研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(3): 153

LI Xiaoliang. Comparative study on standards of seismic test for telecommunications equipment among China, America, Japan and Europe[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(3): 153

[17] 电信设备抗地震性能检测规范: YD 5083—2005[S]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006

Specification for seismic test of telecommunications equipment: YD 5083—2005 [S]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006

[18] PORTER K, KENNEDY R, BACHMAN R. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering [J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(2): 471. DOI:10.1193/1.2720892

[19] 尚庆学, 王涛. 隔震建筑柔性连接管线的抗震性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 50

SHANG Qingxue, WANG Tao. Experimental study on seismic performance of flexible pipelines used in base isolated buildings [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 50. DOI:10.1377/j.jnd.2018.0107

[20] PORTER K, KENNEDY R, BACHMAN R. Developing fragility functions for building components for ATC-58[R]. Redwood City: Applied Technology Council, 2006

[21] LILLIEFORS H W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown [J]. Journal of the American Statistical Association, 1967, 62(318): 399. DOI: 10.1080/01621459.1967.10482916

(编辑 苗秀芝)