

典型通信设备机柜的振动台试验研究^{*}

郝云鹏¹, 冯利飞², 毛晨曦^{1*}

(1. 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;

2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:以振动台试验为手段,研究一种典型通信机柜的抗震性能,同时为后续该机柜的准确数值模拟和地震易损性分析提供基础。考虑机柜参数的随机性和地震动输入的随机性对机柜地震反应的影响,试验中对 3 台同样规格尺寸的机柜和内部设备共输入 9 条地震动;逐渐增大地震动幅值,直至机柜严重破坏,观察机柜和设备在地震作用过程中的破坏模式和特征,记录其地震反应。试验结果表明:各机柜在 PGA 达到 $0.4 \sim 0.5\text{ g}$ 后开始出现损伤,表现为机柜内钢框架的立柱与底部横梁间的焊缝开裂;在 PGA 达到 0.9 g 后,机柜内底部和顶部横梁也开始出现弯曲;试验结束后,机柜完全破坏,不可再使用。最后,建议为提升机柜的抗震性能,应严格控制焊缝质量。

关键词:通信机柜与设备;振动台试验;破坏特征;通信功能

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)03-0485-06

0 引言

近年来,移动通信极大改变了中国人的生活方式:移动支付、网购、外卖、共享单车、直播遍地开花,为中国经济发展带来的直接和间接贡献迅速攀升。如今移动互联网已经渗透到能源、矿业、农业、物流、安保和社会管理等众多行业和领域,并催生了大量新兴业务。移动通信服务业已经在我国国民经济中占有重要地位。

我国是一个多地震国家,地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,面临的地震灾害风险和遭受的损失也随着城市现代化建设的发展与日俱增(陶正如,陶夏新,2004)。地震发生后,通信系统受损将导致灾区与外界通信中断,无法为灾区救灾提供保障,耽误抢险救灾的最佳时机,使民众的生命财产安全受到严重损害(张竞,杜修力,1995)。

在国内外的数次地震中,通信系统都发生了不同程度的破坏和中断。1995 年日本 7.3 级阪神地震后,通信建筑物破坏严重,大部分通信设备遭到破坏,41 万通信线路中断(李腾雁等,1996;杨光,沈繁奎,2005);1999 年土耳其 7.4 级地

震,导致整个灾区的通信几乎中断(张敏政,刘洁平,2000);2010 年海地 7.3 级地震后,通信电缆被破坏,电话线路和部分通信基站铁塔受损,通信几乎全部瘫痪(陈虹,2011);2010 年智利 8.8 级特大地震后,灾区通信一度中断,影响了抢险救灾的进度(Lew *et al.*, 2010; Naeim *et al.*, 2011)。通过对历次地震后通信系统震害的总结可发现,及早发现通信系统中的薄弱环节,提高通信系统抗震性能,做好震后应急储备,至关重要。

通信设备是整个通信系统中最核心的组成部分,任何一种设备的破坏都会影响整个通信系统的正常工作(李桂荣等,2005)。本文以一种在移动通信基站机房中常用的设备机柜为研究对象,在机柜中安装相关设备,模拟设备和机柜的正常运行状态,同时进行振动台试验,研究在地震作用过程中设备的破坏特征,为后续基于试验的数值模拟及通信机柜和设备的地震易损性研究提供基础数据。

1 振动台试验方案

1.1 试验机柜及设备

本次试验选用了一种在移动通信基站中常用

^{*} 收稿日期: 2020-04-07.

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“城市生命线系统地震韧性评价”(2018A02)资助.

通讯作者:毛晨曦(1974-),研究员,硕士生导师.主要从事结构被动耗能减震,震后安全评定、通信系统地震破坏评估等研究. E-mail: maochenxi@iem.ac.cn.

的综合设备机柜,其尺寸为 600 mm × 800 mm × 2 000 mm。为了尽量模拟机柜的正常运行状态,试验时在机柜中安装了 2 个光纤配线架,2 台交换机,如图 1 所示。每个光纤配线架和 1 台交换机之间通过光纤连接,组成一组设备;两组光纤配线架与交换机之间也用光纤连接,实现了两组设备间的互通。试验中选择了 3 台同样规格尺寸的机柜和内部设备,这是因为在振动台试验中对同一台机柜不能施加过多的地震动,以免机柜产生严重的累积损伤而影响试验结果的可靠性。为充分考虑地震动的随机性对机柜抗震性能的影响,试验

中对每台机柜施加 3 条地震动,3 台机柜共施加 9 条地震动,3 台机柜和其内部设备虽然型号完全相同,但有可能由于加工过程的不确定性导致其抗震性能存在一定的差异,选择多台设备进行试验也可以适当考虑设备材料参数的随机性对试验结果的影响。

试验中每台机柜均通过底部螺栓与底板固定连接,底板与振动台也通过螺栓固定连接。试验过程中保持设备的供电。通过交换机上的 2 个指示灯,可以分别观察到设备是否维持通电状态,以及光纤是否保持连接。

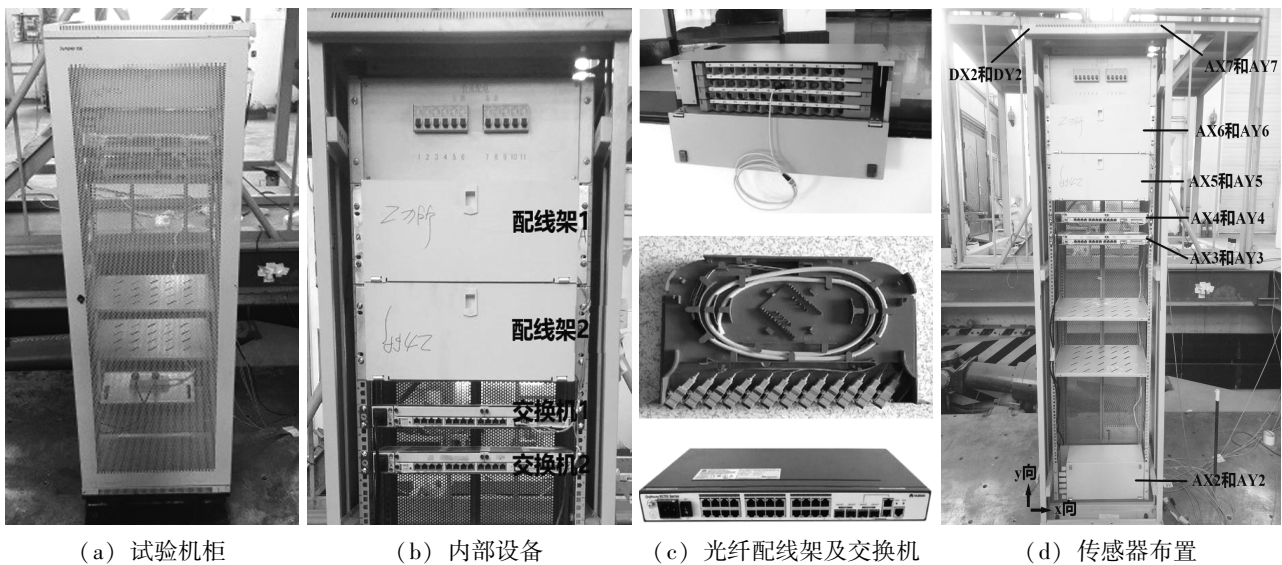


图 1 试验机柜、配置及传感器布置

Fig. 1 The test cabinet and its configuration, and arrangement of the sensors

1.2 测试传感器的布置

试验前,在柜顶的 2 个水平方向 (x 向和 y 向) 各布置 1 个位移传感器 (编号为 DX2 和 DY2);在机柜的顶部,以及每台设备的安装高度处沿 2 个水平方向各布置 1 个加速度传感器 (编号分别为 AX2 ~ AX7 和 AY2 ~ AY7),目的是监测机柜和设备在地震引起的惯性力作用下产生的位移和加速度反应。在台面的 x 向和 y 向分别布置 1 个加速度传感器 (编号为 AX1 和 AY1) 和 1 个位移传感器 (编号为 DX1 和 DY1),以监测振动台台面在 2 个水平方向的位移和加速度。试验中传感器布置如图 1d 所示。

试验所用位移传感器为拉线位移计,量程为 ± 400 mm,精度为 ± 1 mm;加速度传感器量程为 ± 10 g,精度为 1%;各传感器试验前均经过标定。

1.3 地震动输入的选取

为确保所选择到的地震动记录对试验设备是较为不利地震动激励,振动台试验中地震动激励的选择采用了 FEMA P695 建议的方法 (Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 2009),其相关选波原则如下:① $M_s \geq 6.5$ 地震,以排除不太可能对结构造成严重损坏的地震;②地震波 $PGA \geq 0.2$ g,以选择对结构地震作用明显的地震动记录;③同一个地震记录所选波不超过 2 条,从而消除地震动选取结果对地震事件的依赖性;④所选地震动通过调幅使其平均反应谱在 $0.2T_1 \sim 1.5T_1$ (T_1 为试验机柜的一阶自振周期),与规范设计谱相差不超过 10%。

在选取地震动之前,首先对机柜进行白噪声扫频,并依据机柜在白噪声激励下的反应识别得到机

柜的自振频率。图 2 为 3 台机柜自振频率的识别结果，并综合自振频率确定了地震动记录选择的频率范围，即 $0.2 T_1 \sim 1.5 T_1$ 。为了较好地考虑地震动随机性造成的机柜反应的差异，对每台机柜施加 3 条不同的地震动激励，试验中共输入了 9 条地震动记录（表 1）。所有地震动记录均选自美国太平洋地震工程研究中心强震数据库 PEER。

1.4 振动台试验加载工况

在振动台试验过程中，为实现双向加载，将表 1 所列每次地震的 2 个水平方向的记录作为一组地震动，分别施加在机柜的 x 和 y 方向。将每组地震记录里 PGA 较大方向的记录称为“主激励”，与之垂直的水平方向的记录称为“从激励”。试验过程中首先将主激励和从激励分别沿机柜的 x 和 y 方向施加，并保持主激励和从激励的 PGA 比值为 $1:0.85$ ；随后将 2 个方向的地震动激励对调，即主激励和从激励再分别沿机柜的 y 和 x 方向施加，并维持主激励和从激励间 PGA 比值不变。按照表 1

中列出的地震动记录的顺序对每台机柜逐一施加地震动，并逐渐将主激励的 PGA 从 $0.1 g$ 逐渐增大至 $1.2 g$ ，每次增幅 $0.1 g$ 。在每个幅值的 3 条地震动全部施加完毕后，对试验机柜进行一次白噪声扫频，以观察机柜自振频率的变化。

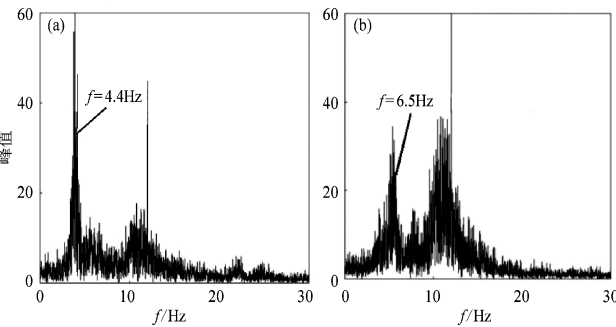


图 2 机柜 x 向 (a)， y 向 (b) 自振频率的识别结果

Fig. 2 Identified fundamental frequency of one test cabinet in the x (a) and y (b) directions

表 1 振动台试验输入的地震动记录

Tab. 1 The earthquake records that was adopted in the shaking table tests

地震动记录名称	试验编号	机柜	年份	地点	台站名称	震级	震中距/km
KOCAELI_GYN000	KO	机柜 1	1999	Turkey	Goynu	7.51	31.74
CALDIRAN_153041	CA		1976	Caldiran	Maku	7.21	50.82
DARFIELD_SBRC31E	DA		2010	Darfield	SBRC	7.0	24.34
KOCAELI_MCD000	KM	机柜 2	1999	Turkey	Mecidiyekoy	7.51	53.43
HECTOR_FVR090	HE		1999	Hector	Fun Valley	7.13	54.68
LANDERS_FFP210	LA		1992	Landers	Forest	7.28	45.34
LANDERS_H05000	LH	机柜 3	1992	LANDER	Hemet Fire	7.28	68.66
AQABA_EIL-EW	AQ		1995	Aqaba	Eilat	7.2	44.1
DARFIELD_OXZE	DO		2010	Darfield	MAYC	7.0	30.63

2 振动台试验结果

2.1 自振频率变化

表 2 给出了试验过程中 3 台机柜在每一次地震激励后自振频率的变化。由表 2 可以发现，3 台型号材质相同的机柜在试验前的自振频率相差不大，但在不同的地震动作用后，机柜自振频率的变化并不相同，这体现了机柜在不同的地震动作用后损伤发展历程的差异。总体上看，试验机柜沿 x 和 y 向的自振频率在 PGA 达到 $0.5 g$ 后开始降低，至 $0.8 g$ 后进一步衰减，说明机柜在 PGA 达到 $0.5 g$ 后损伤开始明显且逐渐加重。虽

然试验机柜 y 向的刚度强于 x 向，但在地震作用下， y 向的自振频率降低幅度也很大，说明机柜沿 y 向的损伤也很严重。

2.2 位移反应

图 3 为在各次地震动作用下 3 台机柜柜顶的峰值位移。从图中可以看出，总体而言，3 台机柜在 x 向的位移反应大于 y 。机柜 1 沿 x 向在 $PGA \leq 0.6 g$ 几乎处于弹性状态，沿 y 向在 $PGA > 0.6 g$ 出现较为明显的非线性趋势。随着 PGA 进一步增大，机柜 1 沿 x 向和 y 向开始产生塑性变形。机柜 2 沿 x 向在 $PGA \leq 0.4 g$ 时保持接近于弹性的变形状态，沿 y 向在 $PGA \leq 0.6 g$ 时保持近似弹性的变形状态。机柜 3 沿 x 向在 $PGA \leq 0.5 g$ 时保持接近于弹性的

表 2 试验机柜自振频率变化
Tab. 2 Variation of the fundamental frequency
of the tested cabinets 单位: Hz

PGA/g	机柜 1		机柜 2		机柜 3	
	x 向	y 向	x 向	y 向	x 向	y 向
0.3	4.2	7.5	4.4	6.1	3.9	6.0
0.4	4.3	7.3	3.8	6.2	3.9	5.8
0.5	4.2	7.0	3.6	5.4	3.7	5.9
0.6	4.2	6.4	2.5	4.9	2.7	5.6
0.7	4.1	6.3	2.5	4.8	2.5	5.6
0.8	2.5	5.1	2.3	3.8	2.3	4.8
0.9	2.3	4.9	2.0	3.8	2.2	4.6
1.0	2.2	4.8	2.1	3.9	2.0	4.4
1.1	未加载	未加载	未加载	未加载	1.7	3.8
1.2	2.0	3.8	未加载	未加载	未加载	未加载

变形状态,沿 y 向在 $PGA \leq 0.6\text{ g}$ 时保持近似弹性的变形状态。不同机柜在同一个方向上的峰值位移反应也有很大的差异。在 x 向,机柜 2 和机柜 3 的柜顶峰值位移比机柜 1 大得多,而在 y 向,机柜 1 和机柜 3 峰值位移反应大致相当,机柜 2 的峰值位移反应最大,这也体现了地震动的随机性造成的机柜峰值位移反应的差异。

3 试验现象及结果分析

通信机柜是依靠其内部沿 x 方向布置的 2 个钢框架来抵抗侧向力的(如图 1d 所示)。这 2 个钢框架均是由 2 根立柱和柜顶、柜底的横梁焊接而成。在机柜内部沿 y 方向,则在机柜的底部、1/2 高度处、顶部有横梁连接 2 个 x 方向的钢框架,这样就形成了整个机柜沿 2 个水平方向的抗侧力体系。

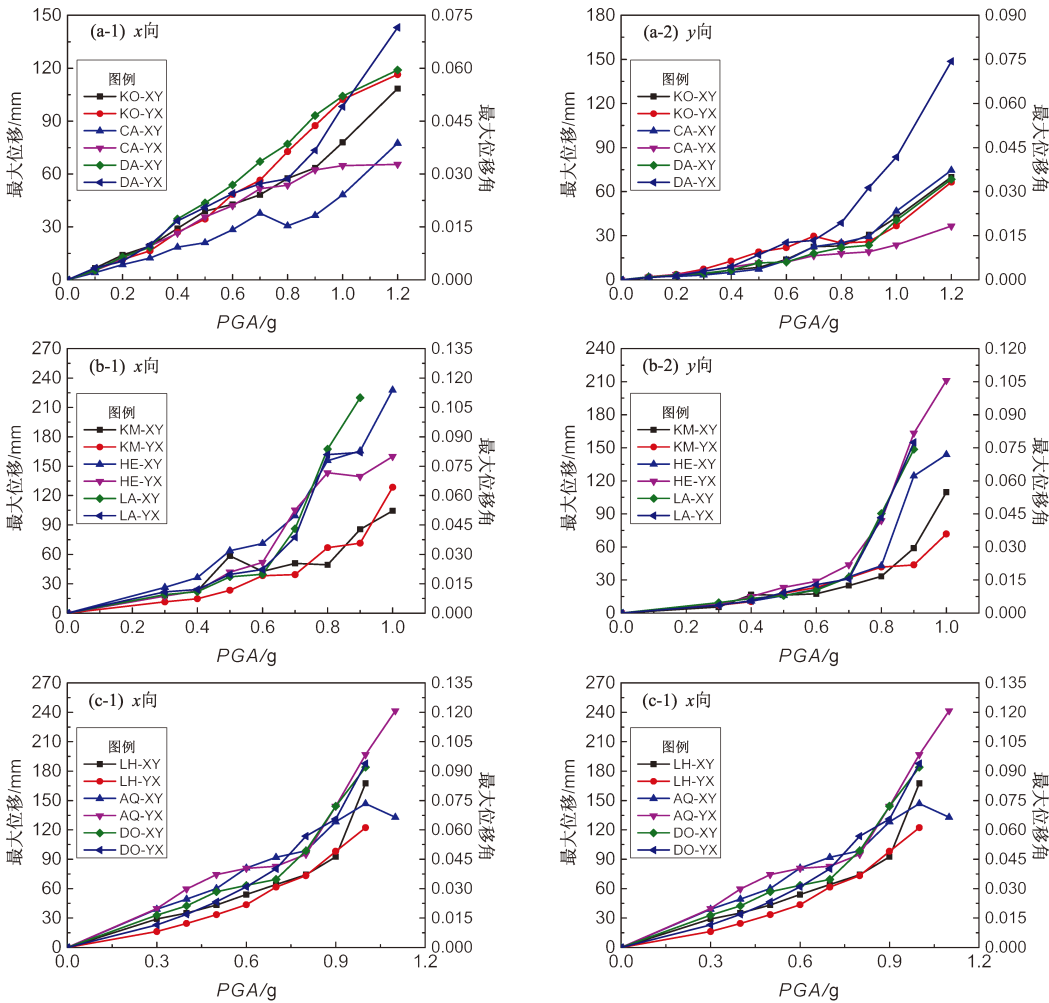


图 3 不同地震动作用下机柜 1 (a), 2 (b) 和 3 (c) 顶部峰值位移随 PGA 的变化
Fig. 3 Peak displacements at the top of the cabinet 1 (a), 2 (b) and 3 (c)
under various ground motions with changes of PGA

各试验机柜主体在地震作用下的典型损伤现象参见表 3，损伤现象照片如图 4 所示。从表 3 和图 4 可以看出，机柜内的钢框架是其重要的抗侧力承

载体，钢框立柱与顶梁、底梁的焊缝质量对机柜的抗震能力有很大影响。因此，严格控制焊缝质量可以有效提高机柜的抗震能力。

表 3 试验机柜在各地震动作用下的典型损伤现象

Tab. 3 Typical damage phenomenon of the tested cabinets under various ground motions

PGA/g	机柜 1	机柜 2	机柜 3
0.1 ~ 0.4	弹性阶段，无损伤	弹性阶段，无损伤	弹性阶段，无损伤
0.5	机柜框架立柱底端与底板横梁的交接处焊缝轻微开裂（图 4a）	机柜框架立柱底端与底板横梁的交接处焊缝轻微开裂	弹性阶段，无损伤
0.6	焊缝开裂进一步发展（图 4b）	焊缝开裂进一步发展	机柜框架立柱底端与底板横梁的交接处焊缝轻微开裂
0.7 ~ 0.8	机柜框架的 4 根立柱与底板横梁的焊缝全部开裂，柜身在地震动作用下出现抬升	机柜框架的 4 根立柱与底板横梁的焊缝全部开裂，柜身在地震动作用下出现抬升	机柜框架底部横梁开始出现弯曲变形；4 根立柱与底板横梁的焊缝全部开裂，柜身在地震动作用下出现抬升
0.9 ~ 1.2	机柜框架底部横梁开始出现弯曲变形（图 4c）	机柜框架底部横梁开始出现弯曲变形	机柜框架顶部横梁开始出现弯曲变形（图 4d）

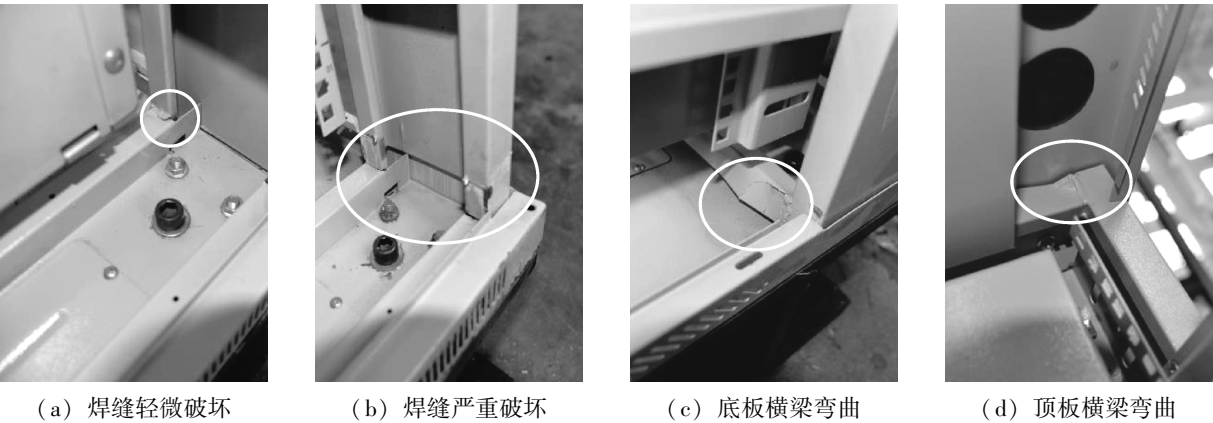


图 4 机柜破坏现象

Fig. 4 Damage phenomenon of the cabinets

除了机柜的主体框架发生破坏以外，机柜上的“非结构构件”也发生了相应的破坏，具体包括机柜前后门的脱落，侧向板的脱落等。虽然这些“非结构构件”的破坏不会影响整个机柜的正常工作，但是它们的缺失会使得机柜整体上的抗侧刚度受到影响，从而导致在地震作用下机柜的地震反应尤其是位移反应更加剧烈，加速了机柜的破坏。

需要指出的是，直到试验全部结束，3 个机柜内交换机上的电源指示灯和光纤连通指示灯均未熄灭，表明在试验结束后，即使机柜已经破坏得非常严重，但机柜内的 2 个交换机一直在维持相互连接状态。据此推定机柜内的交换机在这样的地震动强度下仍可正常工作还需谨慎。本文的试验

中，每个工况仅针对一台机柜和其内部的设备进行地震激励，设备是在机柜内互相连接的。在实际的通信机房内，是通过光纤将不同机柜内的设备相互连接（光纤通过机柜顶部或底部的走线架进入机柜），在地震作用过程中是否会因为不同机柜间地震反应的差异而拉断光纤还需要进一步的研究。在后续的通信设备抗震性能研究中，还应考虑在地震作用后对通信设备进行更为详细的电参数检测。

4 结论

本文针对一种通信基站常用的通信设备机柜，

进行了地震模拟振动台试验。试验中对 3 台同样规格尺寸的机柜和内部设备共输入 9 条地震动,以考虑机柜参数和地震动输入的随机性对机柜地震反应的影响。通过逐渐增大地震动幅值,直至机柜严重破坏,观察机柜和设备在地震作用过程中的破坏模式和特征,记录机柜和设备的地震反应。主要得到以下结论:

(1) 无论从试验现象,还是从机柜的位移反应,均可以看出本文所研究的这种通信机柜在 PGA 达到 $0.4 \sim 0.5 \text{ g}$ 后开始出现损伤,具体的损伤特征表现为机柜内钢框架的立柱与底端横梁间的焊缝开裂。随着 PGA 的增加,这些焊缝进一步开裂,导致机柜的钢框架在地震动作用下出现抬升;在 PGA 达到 0.9 g 后,机柜内底部和顶部横梁也开始出现弯曲;试验结束后,机柜完全破坏,不可再使用。

(2) 针对本文所研究的这种典型通信机柜,机柜内的钢框架是其重要的抗侧力承载体,钢框立柱与顶梁、底梁的焊缝质量对机柜的抗震能力有很大影响。因此,严格控制焊缝质量可以有效提高机柜的抗震能力。

参考文献:

- 陈虹. 2011. 海地震害及其经验教训[J]. 国际地震动态, (9): 36-41.
- 李桂荣, 王国荣, 郭恩栋. 2005. 通信系统抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 21(3): 94-96.
- 李腾雁, 马宁, 严斌. 1996. 日本阪神大地震概要[J]. 工程抗震, (1).
- 陶正如, 陶夏新. 2004. 基于地震动参数的建筑物震害预测[J]. 地震工程与工程振动, 24(2): 88-94.
- 杨光, 沈繁鑫. 2005. 日本阪神地震灾害的一些调查统计数据[J]. 华南地震, (1): 83-86.
- 张竞, 杜修力. 1995. 珠江三角洲通信系统震害预测[J]. 华南地震, 15(3): 47-51.
- 张敏政, 刘洁平. 2000. 土耳其伊兹米特地震(1999, $M7.4$)的强地震动[J]. 世界地震工程, (2): 1-7.
- Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency. 2009. Quantification of building seismic performance factors [R]. Report No. FEMA P69, America: FEMA.
- Lew M, Naeim F, Carpenter L D, et al. 2010. The significance of the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 19(8): 826-837.
- Naeim F, Lew M, Carpenter L D, et al. 2011. Performance of tall buildings in Santiago, Chile during the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 20(1): 1-16.

Study on Shaking Table Tests of a Typical Telecommunication Cabinet

HAO Yunpeng¹, FENG Lifei², MAO Chenxi¹

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

(2. Dalian University of Technology Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract

A commonly used telecommunication cabinet in base transceiver stations was investigated in this study through shaking table tests. The tests results can be used to calibrate numerical model of the cabinets in following works. Shaking table tests for three cabinets (with telecommunication equipment in it) with the same specification were carried out. To consider the influence of randomness of earthquakes on seismic responses of the cabinets, three various earthquake records were input for each cabinet. The intensity of the earthquakes was increased until the cabinets were completely damaged. The damage mode and characteristics of the cabinets during the tests were observed and the seismic responses of the cabinets were recorded. The test results indicated that the cabinets begin to damage when the PGA of an earthquake reached $0.4 \sim 0.5 \text{ g}$. Weld between columns and beams of the steel frame in the cabinet began to crack at this moment. When the PGA of an earthquake reached 0.9 g , the beams at the bottom and top plates began to buckle. After the tests, the cabinets were totally damaged and could not be used. Through the tests, the seismic damage characteristics of this typical communication cabinet were known, and suggestions for improving the seismic performance of the cabinet were put forward.

Keywords: telecommunication cabinet and equipment; shaking table test; damage characteristics; communication function