

钢结构全户内半刚性变电站缩尺模型振动台试验

胡宇鹏¹ 吴祖咸¹ 方 瑜¹ 徐晨耘² 罗金辉² 郭小农^{2,*}

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要 为深入研究端板连接半刚性框架的整体抗震性能及变电站设备-结构相互作用, 本文对 1:3 缩尺的钢结构全户内半刚性变电站模型进行了振动台试验, 开展动力响应分析。利用 MTS-STEX Pro 数据采集处理系统及多种传感器, 分别获取了 7 度小震、中震、大震作用下结构的加速度、层间位移角响应及设备的加速度响应。试验结果表明, 主体结构抗震性能良好, 试验过程中未出现塑性变形及明显损伤, 可在该地震设防烈度区域安全使用; 但设备加速度响应较大, 需进一步研究减隔震措施, 以保障电气设备的地震安全。

关键词 端板连接, 振动台试验, 变电站, GIS 电气设备

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0014

Shaking Table Test on Scaled-Down Model of Steel-Framed Fully Indoor Semi-Rigid Substation

HU Yupeng¹ WU Zuxian¹ FANG Yu¹ XU Chenyun² LUO Jinhui² GUO Xiaonong^{2,*}

(1. Zhejiang Huayun Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract To conduct an in-depth investigation into the overall seismic performance of end-plate connected semi-rigid frames and the equipment-structure interaction in substations, this study performs a shaking table test and dynamic response analysis on a 1:3 scaled steel structure model of a fully indoor semi-rigid substation. Employing the MTS-STEX Pro data acquisition and processing system along with various sensors, the acceleration and inter-story drift angle responses of the structure, as well as the acceleration responses of the equipment, are collected under minor, moderate, and major earthquakes corresponding to Seismic Intensity VII. Test results demonstrate that the main structure possesses favorable seismic performance, with no plastic deformation or significant damage observed during the test, thus confirming its safe application in regions with this specified seismic fortification intensity. However, the equipment exhibits relatively large acceleration responses, necessitating further research on seismic isolation and damping measures to ensure the seismic safety of electrical equipment.

Keywords end plate connection, shaking table test, substation, GIS electrical equipment

收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 胡宇鹏, 男, 高级工程师, 主要研究方向为变电站结构设计。E-mail: 523694794@qq.com

* 联系作者: 郭小农, 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金结构和钢结构。E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

0 引言

城市化进程加速与用电需求激增,使变电站的抗震安全成为电力系统稳定运行的关键。变电站作为电力枢纽,其抗震性能直接影响地震时电力生命线能否持续运转,一旦受损则可能引发大面积停电及次生灾害,因此研究其抗震性能意义重大。

半刚性连接在钢结构中可通过节点转动调节梁柱弯矩分布,减少应力集中,优化截面并调整结构周期。但其受力复杂,应用于变电站时因变电站内设备密集导致结构-设备相互作用显著,其地震动力响应规律需深入探究。国内外学者已针对半刚性钢框架的抗震性能开展了大量研究。在静力分析方面,通过节点试验与框架拟静力试验,明确了半刚性连接的弯矩-转角关系模型及框架的屈服机制;在动力性能研究中,数值模拟方法被广泛用于分析半刚性框架在地震作用下的位移响应、内力分布及能量耗散特性。拟动力试验则通过加载装置模拟地震荷载,初步揭示了半刚性框架的动力失效模式^[1-6]。然而,相较于静力与拟动力研究,能够真实反映结构动力特性的振动台试验研究仍较为缺乏,文波、张现宾等分别开展过主-子结构相互作用的振动台试验^[7-11]。

针对全户内钢结构变电站这一特定结构形式,考虑设备质量、刚度对主体结构抗震响应影响的振动台试验更是缺少。为此,本研究对1:3缩尺的全户内半刚性钢结构变电站模型开展振动台试验,考虑结构-设备相互作用,获取地震下结构与设备的响应,旨在为相关抗震性能研究提供基础。

1 试验方案

1.1 模型设计

1.1.1 相似比设计

模型的设计、制作以及地震动激励的选择必须严格遵循相似理论原则,明确模型结构试验过程中各物理量的相似常数,从而推导出反映整个物理过程的相似条件。仅当模型满足上述相似理论的要求时,才能依据相似关系从模型试验结果推算出原型结构的相应地震反应。根据同济大学

土木工程防灾国家重点实验室的试验条件(为4 m×6 m的平台),将长度相似常数设定为1:3。加速度相似常数在模型设计中决定了模型结构能否真实反映原型结构在不同烈度下的真实地震响应。一般情况下,加速度相似常数的控制范围为1~3,本研究的加速度相似比设定为1:2。振动台试验模型与原模型均使用Q355B材料,因此弹性模量相似比为1:1。由这三个数据可计算出其他各参数的相似比取值。模型的相似关系见表1。

表1 结构模型动力相似关系

Table 1 Structural model dynamic similarity relationship

物理性能	物理参数	关系表达式	相似常数	备注
几何性能	长度	S_l	1/3	控制尺寸1/3
	线位移	S_l	1/3	
	角位移	$S_\beta = S_\sigma / S_E$	1	
材料性能	弹性模量	S_E	1	控制材料
	应力	S_σ	1	
	应变	$S_\epsilon = S_\sigma / S_E$	1	
	质量密度	$S_\rho = S_E / (S_a \cdot S_l)$	3/2	
荷载性能	质量	$S_m = S_\sigma \cdot S_l^2 / S_a$	1/18	
	集中力	$S_F = S_E \cdot S_l^2$	1/9	
	线荷载	$S_p = S_E \cdot S_l$	1/3	
	面荷载	$S_q = S_E$	1	
动力性能	力矩	$S_M = S_E \cdot S_l^3$	1/27	
	阻尼	$S_c = S_E \cdot S_l^{1.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$\sqrt{6}/18$	
	周期	$S_T = S_l^{0.5} \cdot S_a^{-0.5}$	$\sqrt{6}/6$	
	频率	$S_f = S_l^{-0.5} \cdot S_a^{0.5}$	$\sqrt{6}$	
	速度	$S_v = S_l^{0.5} \cdot S_a^{0.5}$	$\sqrt{6}/3$	
	加速度	S_a	2.00	控制试验

1.1.2 模型尺寸

本模型为实际变电站结构中选取的3跨子结构,并进行1:3比例缩尺,按7度设防地震设计。主体为两层单跨四榀框架结构,长、宽、高分别为6 m、3.5 m、4.5 m,其中一层高1.67 m,2层高2.83 m。梁柱截面均为热轧H型钢,截面尺寸见表2,其中主梁-柱、边次梁-柱的连接形式采用端板连接。

楼板采用50 mm厚C30混凝土预制楼板。模型与底座采用焊接+柱脚加劲耳板的固定连接,底座与振动台台面预留孔洞使用大尺寸螺栓连

表 2 模型截面尺寸

Table 2 Model cross-sectional dimensions

截面	材料	名称
H 型钢柱	Q355B	H200×200×6×10
主梁/边次梁	Q355B	H280×100×5×10
次梁	Q355B	H165×60×5×5

接。框架整体现场图片如图 1 所示,梁平面布置如图 2 所示。

1.1.3 节点设计

梁-柱半刚性连接采用不加耳板的外伸式端板连接,主梁-柱、边次梁-柱连接的端板厚度均为 10 mm,采用 10.9 级 M12 高强螺栓紧固,排列形式为四排两列。其中边次梁的端板与柱弱轴腹板盖



图 1 框架整体图

Fig.1 Overall view of the framework

板相连,柱的腹板盖板内部设置十字加劲肋以保证节点的强度。连接示意图如图 3 所示,节点详图如图 4 所示,现场连接图如图 5 所示。

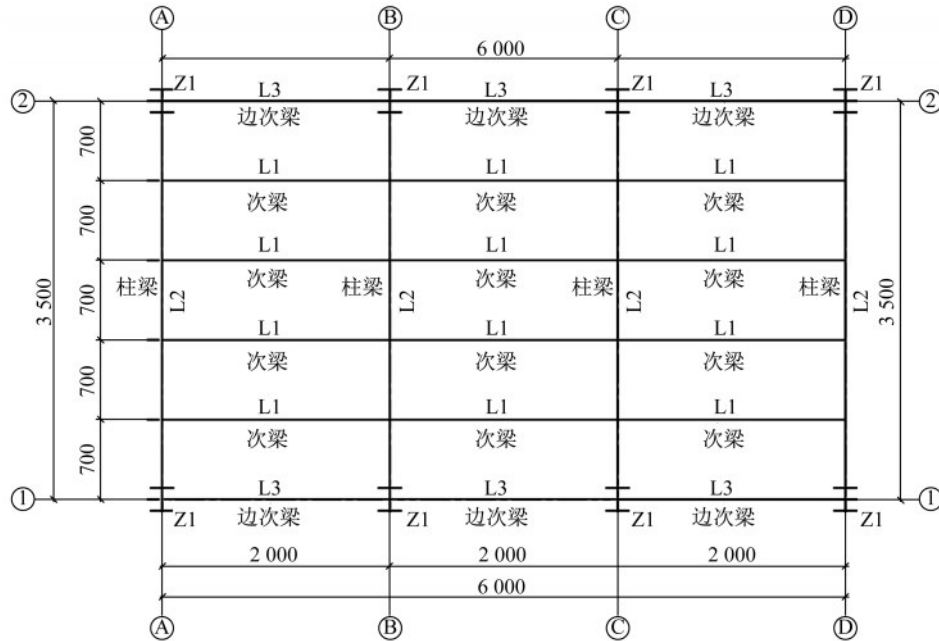


图 2 钢梁平面布置图(单位:mm)

Fig.2 Layout of steel beams (Unit:mm)

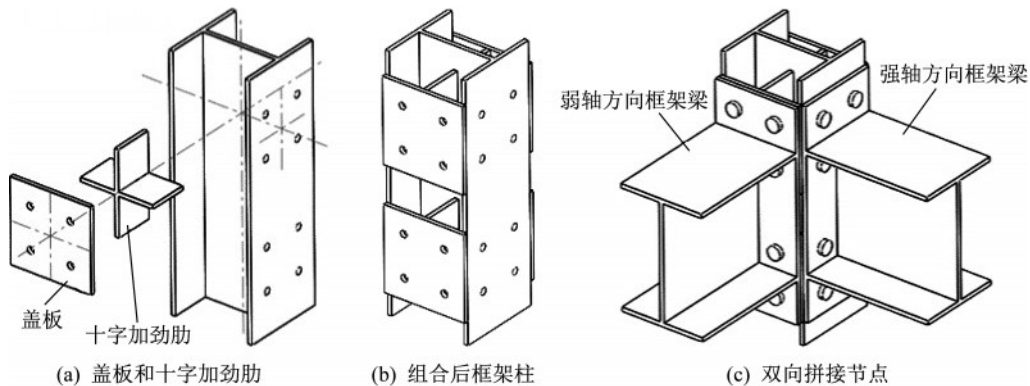


图 3 改进端板节点构造示意图

Fig.3 Schematic diagram of the improved end-plate joint

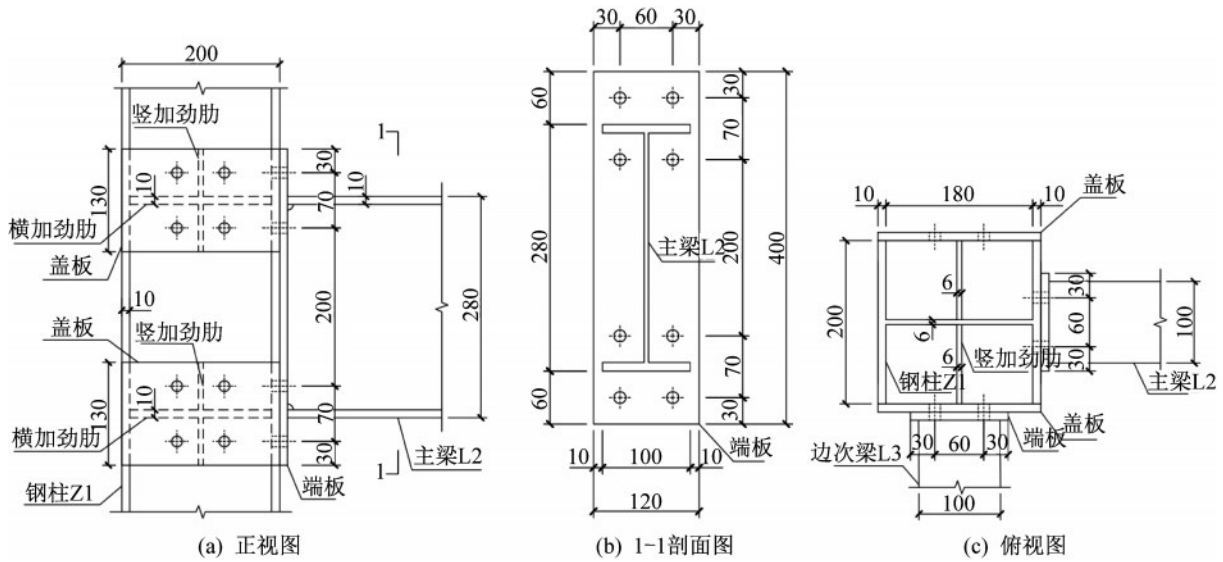


图4 节点详图(单位:mm)

Fig.4 Node detail drawing (Unit:mm)



图5 端板连接现场图

Fig.5 End plate connection site photo



图6 电气设备图片

Fig.6 Picture of electrical equipment

1.1.4 电气设备

电气设备采用缩尺的220 kV GIS设备(图6),全部使用Q355B钢材制作。电气设备各单元焊接为一个整体,再与共用底板焊接固定,共用底板下部设置横梁和纵梁以控制底板变形量。共用底板放置于四个设备支座上方,分别采用4个M14高强螺栓连接,支座再与主体结构楼面板预埋钢板相焊接,以此实现电气设备与主体结构的固定。连接部位详图如图7所示,现场连接图如图8所示。

1.1.5 模型质量

由于模型采用缩尺模型,实际重量与荷载比例有所变化,因此需要附加质量块。人工质量块单块重7.5 kg,楼面共布置质量块343块,电气设备共布置质量块123块,屋面共布置质量块

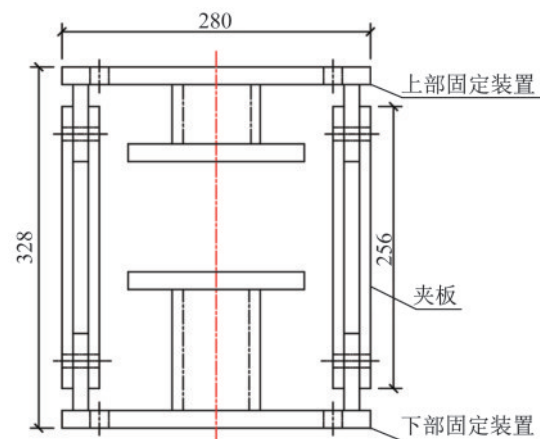


图7 设备连接详图(单位:mm)

Fig.7 Equipment connection detail diagram (Unit:mm)

405块。最终楼板重5.35 t、框架重4.0 t、设备重1.85 t、人工配重7.35 t、刚性基础重4.0 t,总重(含底座)22.55 t。附加质量布置如图9所示。

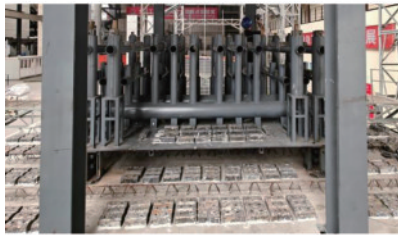


图8 设备连接现场图

Fig.8 Equipment connection site photo



(a) 屋面附加质量



(b) 楼面及设备附加质量

图9 附加质量现场布置图

Fig.9 Additional quality site layout

1.2 材料特性试验

对次梁、主梁/边次梁、柱翼缘分别取样进行屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和弹性模量的测量。板状拉伸试件样胚根据《钢及钢产品 力学性能试验 取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[12]标准执行制备。检测标准为《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[13]。M12螺栓使用《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.1—2010)^[14]进行拉伸试验。钢材的材性试验结果见表3。

1.3 测点布置方案

楼层位移、楼层加速度以及设备加速度是重

表3 钢材的材性试验结果

Table 3 Test results for steel properties

试件部位	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	弹性模量
次梁	442 MPa	533 MPa	28.5%	217 GPa
主梁/边次梁	398 MPa	500 MPa	33.0%	208 GPa
柱翼缘	402 MPa	503 MPa	33.0%	215 GPa
M12 高强螺栓		934 MPa		

要的地震响应参数。为获得完备的加速度以及位移数据,试验采用的测试设备和仪器有 MTS-STEX Pro 数据采集处理系统、CA-YD 压电式加速度传感器以及 ASM 拉线式位移传感器。具体布置方案如下:

(1) 加速度传感器 33 个,分别在刚性底座、楼面板、屋面板、设备顶部及设备底部,以获取主体结构各层楼面的加速度响应,以及电气设备关键位置处的加速度响应规律。每个位置均布置两个加速度传感器以保证数据的安全冗余。其中设备顶部加速度关键测点布置示意图如图 10 所示,位于设备各轴末梢端点,此处易产生最大的地震加速度响应。楼面加速度计布置于楼板中心,楼面加速度计现场布置图如图 11 所示。

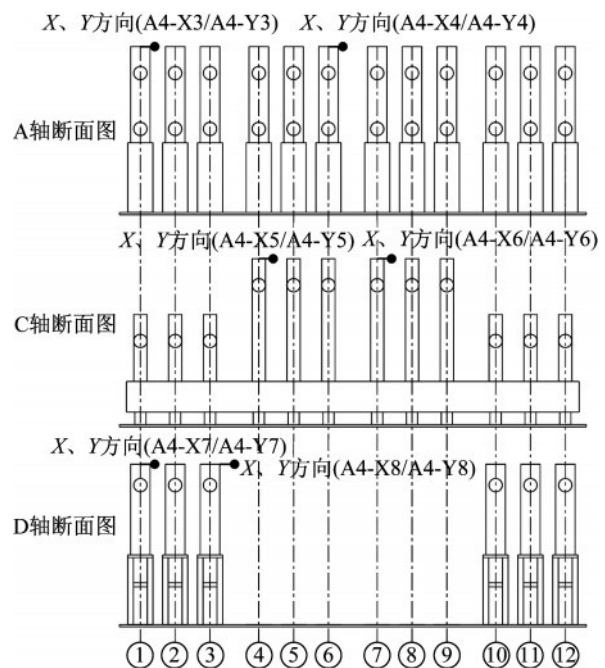


图10 设备顶部加速度传感器布置示意图

Fig.10 Schematic diagram of the acceleration sensor arrangement on the top of the equipment

(2) 位移传感器 22 个,集中在设备顶部重要位置以及楼面屋面板高度处,以进一步计算出结



图11 楼面加速度计现场布置图

Fig.11 Floor acceleration meter on-site layout

构的层间位移。楼面位移计现场布置图如图12所示。设备顶部位移传感器布置如图13所示。



图12 楼面位移计现场布置图

Fig.12 Floor displacement gauge layout

楼面加速度及位移计布置与编号如图14所示。

1.4 加载制度

本项目位于抗震设防烈度为7度的区域,设计基本加速度设定为 $0.10g$,根据《建筑抗震设计

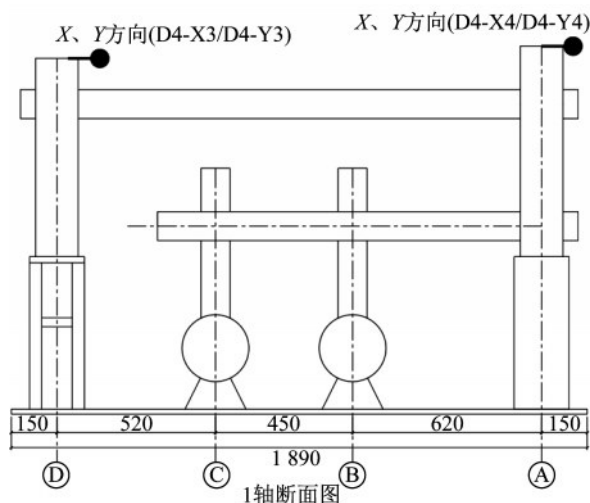


图13 设备顶部位移计传感器布置示意图

Fig.13 Schematic diagram of the displacement meter sensor arrangement on the top of the equipment

标准》(GB/T 50011—2010)^[15],该项目被归类于第I组地震分组,其场地条件属于III类。为了确保试验的完备性,本试验选取了四条不同类型的水平地震动记录用于振动台动力试验:其中包括三条天然地震波——Darfield波、Christchurch波以及Imperial Valley波;另外还加入了一条人工合成AGM波作为补充。这四种波形的选择旨在覆盖从近场到远场不同特性的地震影响,具体为一条无脉冲特征的近场地震波、一条带有明显脉冲效应的近场地震波及一条远场地震波。所有选定的输入信号均遵循现行国家标准技术指标。

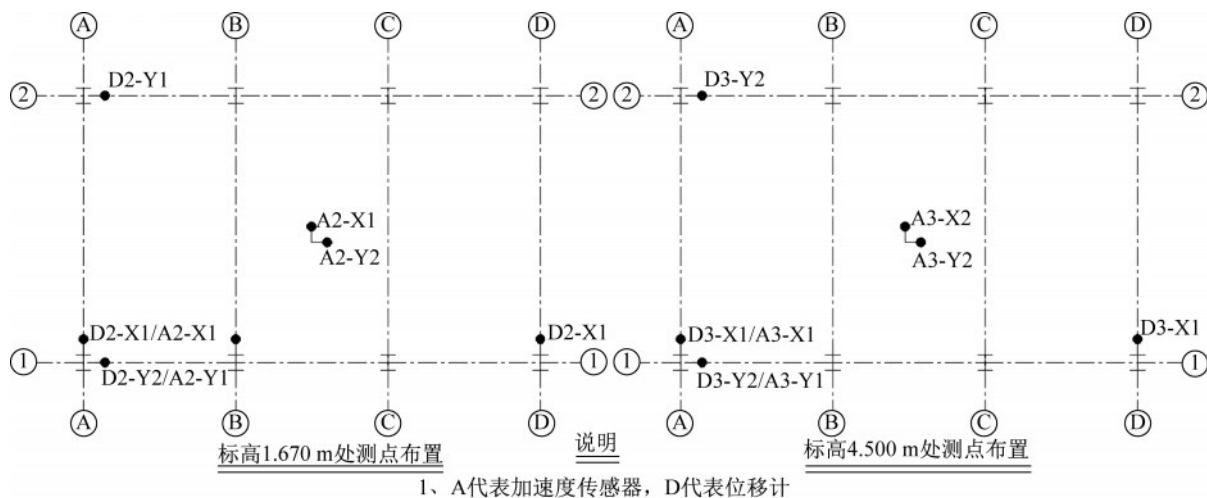


图14 楼面加速度传感器、位移计布置图

Fig.14 Floor acceleration sensor and displacement meter layout diagram

试验根据峰值地面加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 分为三个阶段, 即小震 (70 cm/s^2)、中震 (200 cm/s^2) 和大震 (440 cm/s^2), 各阶段开始前均使用白噪声进行扫频处理, 以此来评估整个系统在经历不同程度的地震作用后可能出现的整体损伤程度变化情况。通过这种方式可以更加全面准确地掌握建筑物对不同强度级别自然灾害响应能力的信息。具体的加载方案详见表 4。

表 4
Table 4 试验工况表
Test conditions table

工况编号	地震激励	长轴方向地震动峰值/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)
1	白噪声	50
2	Darfield	70
3	Christchurch	70
4	Imperial Valley	70
5	AGM	70
6	白噪声	50
7	Darfield	200
8	Christchurch	200
9	Imperial Valley	200
10	AGM	200
11	白噪声	50
12	Darfield	440
13	Christchurch	440
14	Imperial Valley	440
15	AGM	440
16	白噪声	50

2 试验结果分析

2.1 试验现象

在 7 度小震、7 度中震加载过程中, 结构的响应均不明显, 肉眼观察到的结构位移有限。7 度大震工况下能够观察到模型有较为明显的晃动, 预制混凝土板与主体框架使用灌浆料连接处出现落灰。试验完成后主体结构以及电气设备各处均未出现塑性变形。结构及设备保持完好, 无明显损伤。

2.2 结构自振频率

白噪声扫描是一种有效的结构自振频率识别方法, 本试验通过读取白噪声扫描工况下屋面加

速度值并进行傅里叶变换得到结构自振频率, 如图 15 所示。

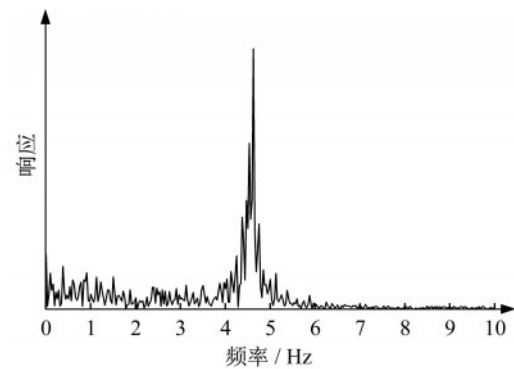


图 15 结构自振频率白噪声扫描结果

Fig.15 Structural self-oscillation frequency white noise scan results

各次扫描后自振频率见表 5。由表可见 7 度大震试验后结构自振频率没有发生明显变化, 结合现场主体结构也没有出现明显损伤, 说明半刚性钢框架在此设防区域的抗震性能良好, 结构在 7 度大震下仍然处于弹性工作范围内。

表 5 白噪声扫频结果

Table 5 White noise sweep frequency results

工况编号	1	6	11	16
频率/Hz	4.6	4.6	4.6	4.6

2.3 加速度响应

加速度响应是框架结构地震响应的重要参数之一, 对全户内变电站而言, 楼面电气设备的加速度响应更是研究重点。为了精确量化地震作用下半刚性框架各层楼面及设备加速度的放大效应, 本研究引入峰值加速度放大系数的概念, 记为 k 。

该系数定义为钢框架结构中特定位置 (如楼面或设备) 的最大加速度与输入地震波的 PGA 之间的比值。在小震、中震以及大震工况下分别输入四条前文选取的地震波 (共 12 种工况), 得到 12 组结果, 展示在图 16 中。

分析表明, 在遭遇地震荷载时, 第二层楼面上的设备以及屋顶处的加速度放大现象尤为显著。具体而言, 在模拟 7 度大震的情况下, 屋顶部位的峰值加速度放大系数达到了 2.8, 而位于二层的设备则表现出更加剧烈的响应, 其峰值加速度放大系数高达 7.9。表 6 体现了不同地震波对 k 值的影

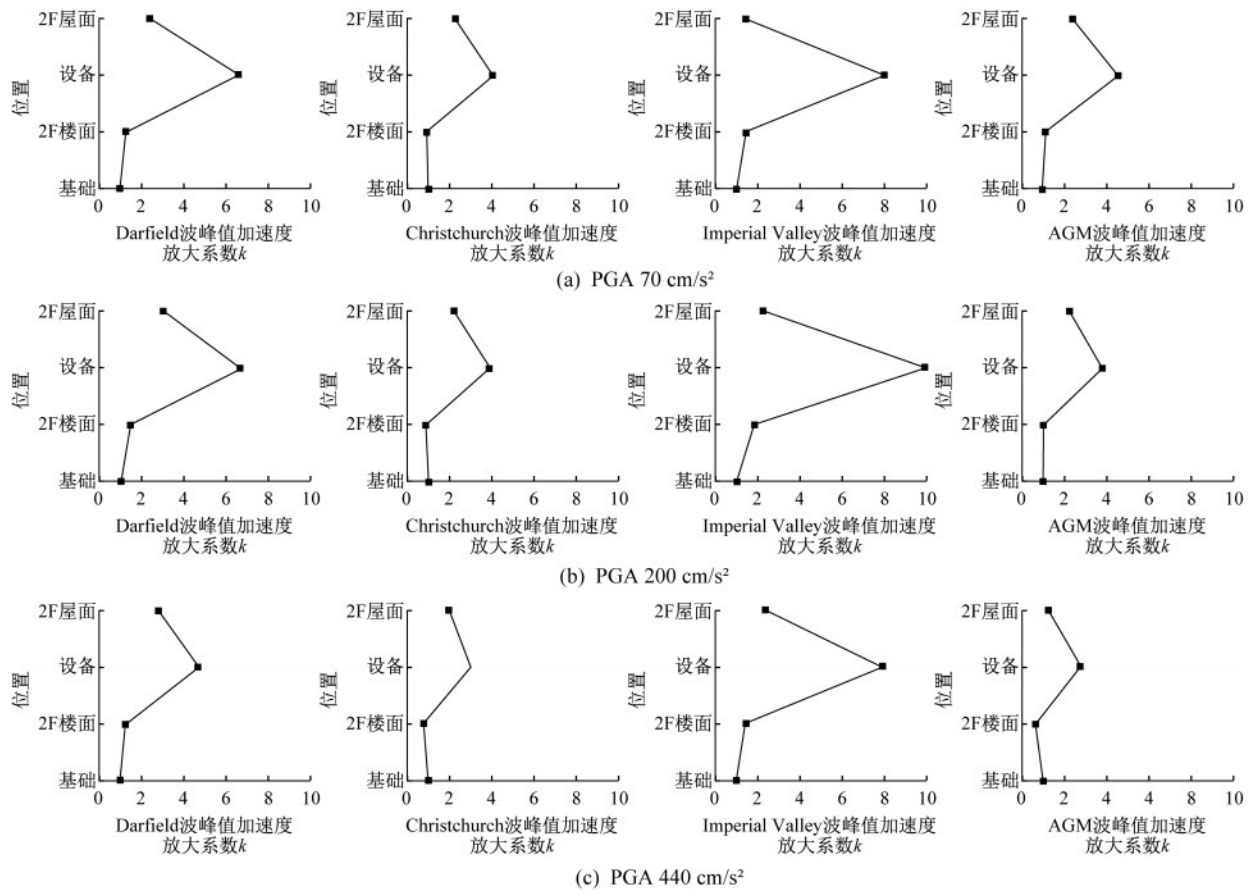


图 16 各层峰值加速度放大系数

Fig.16 Peak acceleration amplification factor for each story

响。在 12 种工况下,楼面、设备和屋面的加速度放大系数 k 分布趋势几乎相同,结构和设备对无脉冲的近场地震动 Christchurch 波的响应总体来说最小,电气设备的放大系数 k 均为 4.0 左右。而对于有脉冲的近场地震波 Imperial Valley 来说,其设备的加速度响应极大,均在 8.0 以上,其中 7 度中震 Imperial Valley 波工况放大系数高达 9.93。这说明此结构和设备对于近场地震波的脉冲现象感知明显,地震的脉冲对电气设备加速度响应影响较大。

2.4 位移响应

除了关注加速度之外,层间位移角也是评价

主体结构受损程度的重要参数之一。根据《建筑结构抗震规范》中“大震不倒”设计目标,需要控制结构层间位移角以保证结构不会倒塌。李国强等^[16]建议半刚性连接组合梁框架在多遇地震下的允许层间位移角为 1/200。

各工况下各层最大层间位移角见表 7。在所有工况中测得的结构最大层间位移角均未超过 1/200,其中 7 度大震下的 Darfield 波工况层间位移角最大,为 1/232。在 7 度小震和 7 度中震工况下,AGM 人工波的最大层间位移角是 3 条天然波的 2~3 倍,但在 7 度大震工况下,AGM 人工波层间位移角数值与 3 条天然波接近。

表 6 不同地震波对 k 值的影响

Table 6 The effect of different seismic waves on the k value

地震波类型	典型案例	设备峰值加速度放大系数(k)特征
无脉冲近场波	Christchurch 波	k 值普遍较小(电气设备 $k \approx 4.0$),加速度响应平缓
有脉冲近场波	Imperial Valley 波	k 值显著更大(电气设备 $k > 8.0$),7 度中震时 k 达 9.93

表 7 层间位移角
Table 7 Inter story displacement angles

地震类型	地震波	一层层间位移角	二层层间位移角
多遇地震	Darfield	1/2 256	1/1 741
	Christchurch	1/2 056	1/1 509
	Imperial Valley	1/2 472	1/1 724
	AGM	1/1 214	1/647
设防地震	Darfield	1/1 008	1/589
	Christchurch	1/802	1/526
	Imperial Valley	1/931	1/636
	AGM	1/453	1/285
罕遇地震	Darfield	1/382	1/232
	Christchurch	1/382	1/273
	Imperial Valley	1/438	1/274
	AGM	1/370	1/253

图 17 为 7 度大震下各工况最大层间位移角分布图。从楼层分布趋势可以看出,二层的层间位移角均比一层的层间位移角更大,说明二层是结构的薄弱层。屋面也是惯性力直接作用的楼层,故层间位移角更大。

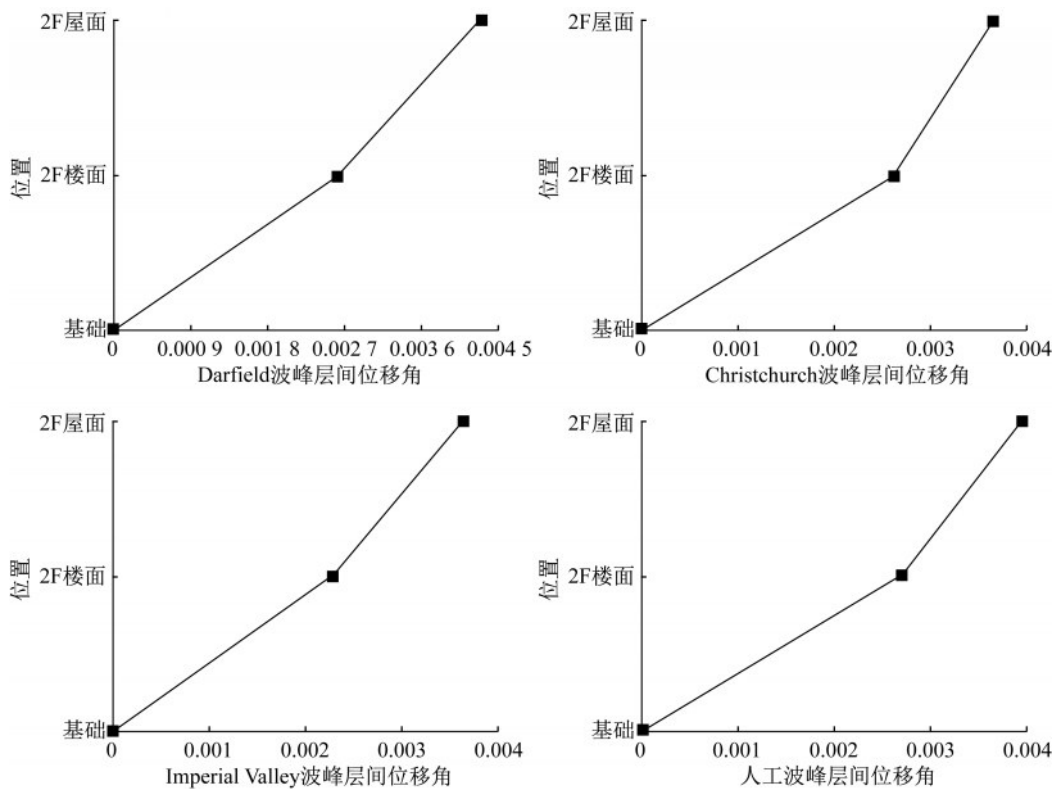


图 17 最大层间位移角 (PGA 440 cm/s²)

Fig.17 Max value of interstory displacement angles (PGA 440 cm/s²)

2.5 楼面设备的加速度放大系数

为探寻电气设备峰值加速度与楼面峰值加速度的关系,定义 k_{eq} ,其大小为电气设备峰值加速度与楼面峰值加速度的比值。

不同输入地震波下 k_{eq} 的值见表 8。

表 8 不同地震波下 k_{eq} 数值
Table 8 k_{eq} values under different seismic waves

PGA/(cm·s ⁻²)	地震波	k_{eq}
70	Darfield	5.21
	Christchurch	4.57
	Imperial Valley	5.50
	AGM	4.09
200	Darfield	4.62
	Christchurch	4.35
	Imperial Valley	5.45
	AGM	3.89
440	Darfield	3.72
	Christchurch	3.83
	Imperial Valley	5.59
	AGM	4.58

7度中震 Imperial Valley 波工况电气设备加速度和楼面加速度时程曲线如图 18 所示。通过对比电气设备与楼面加速度时程曲线,可以进一步观察到,相对于整个建筑层面而言,电气设备对于地震动更为敏感,其加速度增长幅度更大。值得注意的是,观察试验过程录像与设备出现峰值加速度处的加速度计位置发现,在各地震波下电气设备最大加速度出现位置均位于图 10 中 C 轴断面图与 1 轴相交处,具体表现为电气设备顶端的局部震颤。

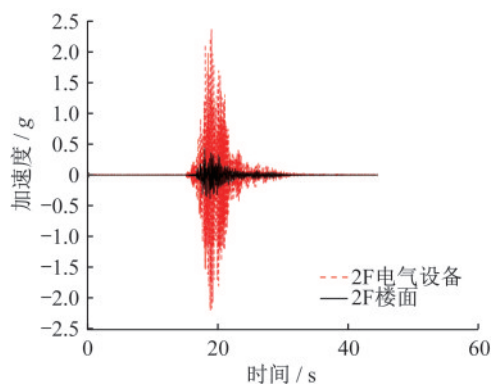


图 18 Imperial Valley 波设备-楼面加速度时程曲线
(PGA 200 cm/s²)

Fig.18 Imperial Valley wave equipment-floor acceleration time-history curves (PGA 200 cm/s²)

3 结 论

本研究通过振动台试验研究了钢结构全户内半刚性变电站在地震作用下的抗震性能,得到以下结论:

(1) 在 7 度设防烈度下,结构的屋面和设备层的峰值加速度放大系数较高,显示出结构在地震作用下的动力响应特性。特别是电气设备,其加速度响应最大可达到楼面加速度的 5.6 倍,地面输入地震波的 9.93 倍,在实际地震中可能面临破坏风险。

(2) 结构的峰值层间位移角均小于建议值 1/200,且试验中未观察到明显的结构破坏,白噪声扫频测试也显示梁柱构件损伤程度较低。该半刚接变电站主体结构展现出良好的抗震性能。

参 考 文 献

[1] 韩冬,胡长皎,王新武.半刚性连接空间钢框架的拟

动力试验分析[J].世界地震工程,2014,30(2):24-28.

HAN Dong, HU Changjiao, WANG Xinwu. Research on seismic performance of plane steel frame with semi-rigid connection [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 24-28. (in Chinese)

[2] 李浩.半刚性钢框架的抗震性能研究[D].西安:西安理工大学,2018.

LI Hao. Seismic performance analysis of steel frame with semi-rigid connections [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. (in Chinese)

[3] 周兴卫.梁柱半刚性连接钢框架结构的抗震性能分析[D].长沙:中南大学,2013.

ZHOU Xingwei. The seismic behavior analysis of steel frame structures with semi-rigid connections of the beam-to-column [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

[4] 胡长皎.半刚性连接平面钢框架抗震性能研究[D].洛阳:河南科技大学,2016.

HU Changjiao. Research on seismic performance of planar steel frame with semi-rigid connection [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[5] SPRINGFIELD J. Semi-rigid connections structural steel framing: A practising engineer's view [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1987, 8: 1-13.

[6] 叶康,李国强,张彬.钢框架半刚性连接研究综述[J].结构工程师,2005(4):68-71,76.

YE Kang, LI Guoqiang, ZHANG Bin. Summarizing in research for semi-rigid connections for steel frame structures [J]. Structural Engineers, 2005 (4) : 68-71, 76. (in Chinese)

[7] 文波,张路,牛获涛,等.考虑主子结构动力相互作用的变电站抗震性能分析[J].振动与冲击,2019,38(16):166-173.

WEN Bo, ZHANG Lu, NIU Ditao, et al. Seismic behavior of substation considering dynamic interaction on the main structure [J]. Vibration and Shock, 2019, 38(16) : 166-173. (in Chinese)

[8] 张现宾.结构—设备耦合体系地震响应振动台试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2014.

ZHANG Xianbin. The shaking table test of the structure-equipment coupled system for the earthquake response [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)

[9] 张肖峰,袁灼光,黎玉婷,等.全户内变电站楼面电

- 气设备抗震设计[J]. 工程建设与设计, 2022(20): 27-29.
- ZHANG Xiaofeng, YUAN Zhuoguang, LI Yuting, et al. Seismic design of floor electrical equipment of whole indoor substation [J]. Engineering Construction and Design, 2022(20): 27-29. (in Chinese)
- [10] PANTOLI E, CHEN M C, WANG X, et al. Full-scale structural and nonstructural building system performance during earthquakes: Part II-NCS damage states[J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 771-794.
- [11] 滕睿, 徐国贤, 张锡朋, 等. 非结构构件振动台试验楼面响应谱再现技术研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(S1): 115-121.
- TENG Rui, XU Guoxian, ZHANG Xipeng, et al. Studies of the floor response spectra reappearance technology of nonstructural component shaking table testing [J]. Structural Engineers, 2018, 34(S1): 115-121. (in Chinese)
- [12] 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [13] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [14] 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱: GB/T 3098.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Mechanical properties of fasteners-Bolts, screws and studs: GB/T 3098.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [15] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 李国强, 胡大柱, 孙飞飞. 半刚性连接组合梁框架足尺模型模拟地震振动台试验[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 39-47.
- LI Guoqiang, HU Dazhu, SUN Feifei. Shaking table test on a composite-beam frame with semi-rigid connections [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 39-47. (in Chinese)