

地震荷载作用下海上电气平台动力模型实验

娄诣科^{1,2}, 李 昕^{1,2}, 王文华^{1,2}, 左晶晶^{1,2}, 钟 耀³

(1. 大连理工大学, 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 大连理工大学, 建设工程学部水利工程学院, 工程抗震研究所, 大连 116024; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

摘 要: 基于水弹性相似律,完成相似比尺为1:30的海上电气平台结构动力实验模型的设计。以实测地震动和人工合成地震动作为激励,开展不同地震波作用下的结构动力模型实验。运用ANSYS建立实验模型的有限元模型,开展地震荷载作用下的结构动力时程响应分析。通过实验数据与有限元结果的分析对比得出,在较小地震荷载作用下,结构反应极值与地震峰值加速度之间表现为线性关系。随着地震峰值加速度的增加,水-结构的非线性效应不断增强,导致结构反应极值呈现出非线性变化趋势。因此在极端地震荷载作用下,水-结构的非线性影响不可忽略。由结构的频域反应可知,结构的频域响应与结构自身的动力特性和激励地震波的频谱特性密切相关。

关键词: 海上电气平台; 地震分析; 动力模型实验; 水弹性相似律; 有限元方法

中图分类号: U674.38

文献标识码: A

0 引 言

海上电气平台作为海上风电场升压站电气设备的承重结构,不仅需确保自身在外部环境荷载作用下的安全,还要保证电气设备的正常运行。目前我国海上风电发展迅速的渤海、东海等海域均处于沿太平洋地震活动带^[1],为保证海上风电场的正常运行有必要开展海上电气平台地震响应研究。

针对海上平台结构抗震设计规范,Bea等^[2]对比验证了基于API规范设计的海上平台结构具有良好的抗震性能。王忠畅^[3]归纳总结了国内外现行的抗震设计规范,对不同等级、地震重现期下的平台结构抗震设计规范进行了分类对比。

有关地震荷载作用下的结构动力反应研究,荣棉水等^[4]研究发现对应不同规范谱结构反应差异较大,建议在海洋平台抗震设计时应根据具体情况选用规范谱。Boote等^[5]考虑不同导管架平台动力特性影响参数,开展导管架平台的地震时程反应分析。Peng等^[6]基于基础-结构非线性模型,进行导管架基础连接处的结构稳定评价。吴俊杰等^[7]针对地震作用下不同服役期的导管架平台的结构反应进

行了对比。

对于地震荷载作用下的海上平台结构振动控制以及抗震优化设计研究,欧进萍等^[8]采用自行设计的主动质量驱动控制系统(AMD)开展了海上平台结构振动台实验,结果表明该系统对结构振动具有良好的控制效果,之后欧进萍等^[9-11]进一步提出粘弹性耗能减振、粘滞耗能减振等多种结构振动控制策略。王兴国等^[12,13]对地震作用下的海上平台结构的响应规律进行研究,建立了海上平台结构优化设计模型。

本文基于水弹性相似律完成海上电气平台整体结构实验模型的设计,开展地震荷载作用下的海上电气平台整体结构动力模型实验和数值仿真分析,系统地研究海上电气平台在地震荷载作用下的结构动力反应。

1 实验设计

1.1 实验模型设计

海上电气平台结构原型材料为钢材,弹性模量为206 GPa,模型材料选用有机玻璃,动弹性模量经材料实验测量为3.850 GPa,弹性模量比尺为

收稿日期: 2016-09-14

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金(51121005)

通信作者: 李 昕(1971—),男,博士、教授,主要从事海上风电、海底管线和海洋工程结构防灾减灾及防护方面的研究。linxin@dlut.edu.cn

53.500;综合考虑实验设备的能力以及相关的水文条件,选定几何比尺为 30;依据水弹性相似律^[14]可得惯性半径比尺为 22.464,由几何比尺和惯性半径比尺可确定模型的基本尺寸。水弹性相似律如

式(1)所示,基本参数相似关系表 1 所示。
$$\lambda^3 \lambda_r^{-2} = \lambda_E \tag{1}$$
式中, λ ——几何比尺; λ_r ——惯性半径比尺; λ_E ——弹性模量比尺。

表 1 基本参数的相似关系
Table 1 Similarities of basic parameters

参数	长度	面积	体积	密度	质量	速度	加速度	时间	频率	力	力矩	应力
量纲	[L]	[L ²]	[L ³]	[ML ³]	[M]	[LT ⁻¹]	[LT ⁻²]	[T]	[1/T]	[MLT ⁻²]	[ML ² T ⁻²]	[ML ⁻¹ T ⁻²]
相似关系	λ	λ_A	$\lambda \lambda_A$	$\lambda_\rho=1$	$\lambda_\rho \lambda \lambda_A$	$\sqrt{\lambda}$	$\lambda_E=1$	$\sqrt{\lambda}$	$1/\sqrt{\lambda}$	λ^3	λ^4	$\lambda^4 \lambda_\rho \lambda_A^{-1}$

对于原型结构中的桩土相互作用部分,采用等效桩方法进行模拟。依据基频相似,确定等效桩长度为 6 倍桩径。为满足密度比尺为 1,结构采用铅环进行配重;对于电气设备模拟还需要考虑重心位置相似。加工完成后的实验模型如图 1 所示。



图 1 海上电气平台实验模型
Fig. 1 Test model of offshore substation platform

1.2 实验工况及传感器布置

本实验选择白噪声、API RP 2A 标准谱波和 El-Centro 波 3 条地震波作为振动台输入的地震波。输入白噪声用于获得结构的动力特性;根据地勘资料,电气平台所处海域为二类场地,El-Centro 地震波是适用于中硬场地的典型地震波;API(美国石油协会)标准被世界上许多国家认可和采用,因此选择上述 3 种地震波作为实验过程中振动台输入的地震波。结构 Y 方向实验工况如表 2 所示。

注意到实际发生的地震持续时间一般较短,很少超过 30 s,经过时间比尺($\sqrt{\lambda} = \sqrt{30}$)缩放后,输入到振动台的地震波持时已很短。本文首先得到实测地震波的加速度响应谱,然后根据实测波响应

谱合成人工地震波加速度时程。通过控制合成地震波的持时,保证振动台输入地震波有效时长。结构基频对比如表 3 所示。

表 2 Y 方向实验工况
Table 2 Test cases in Y direction

工况编号	水位/m	地震波类型	激励方向	峰值加速度 PGA
AH-WN	0.682	白噪声	水平 X、Y 方向	0.20 g*
AH-A	0.682	API 谱波	水平 Y 方向	0.10 g、0.15 g、0.20 g、0.30 g、0.40 g
AH-E	0.682	El-Centro 波	水平 Y 方向	0.10 g、0.15 g、0.20 g、0.30 g、0.40 g

注:*g——重力加速度,g=9.81 m/s²。

表 3 结构基频对比

Table 3 Comparison of fundamental frequencies

项目	模型实验结果	原型数值结果	相似频率	相对误差/%
f_{xi}/Hz	5.285	0.974	5.335	0.946
f_{yi}/Hz	5.003	0.915	5.012	0.180

实验中用到的传感器主要有应变片和加速度传感器。应变片主要布置在有限元计算结果应力较大杆件处;为研究地震荷载作用下结构的加速度响应规律,沿桩腿高度方向布置加速度传感器。结构桩腿应变片和加速度传感器布置及编号如图 2 所示。

1.3 有限元模型

海上电气平台为多自由度系统,当受到地震荷载作用时,运动控制方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} + \{P_{\text{hydro}}\} \quad (2)$$

式中, $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{\ddot{x}\}$ ——节点相对位移、速度和加速度向量; $[M]$ ——结构质量矩阵; $[C]$ ——结构阻尼矩阵; $[K]$ ——结构刚度矩阵; $\{\ddot{x}_g\}$ ——地面输入加速度向量; $\{P_{\text{hydro}}\}$ ——附加水动力荷载向量。

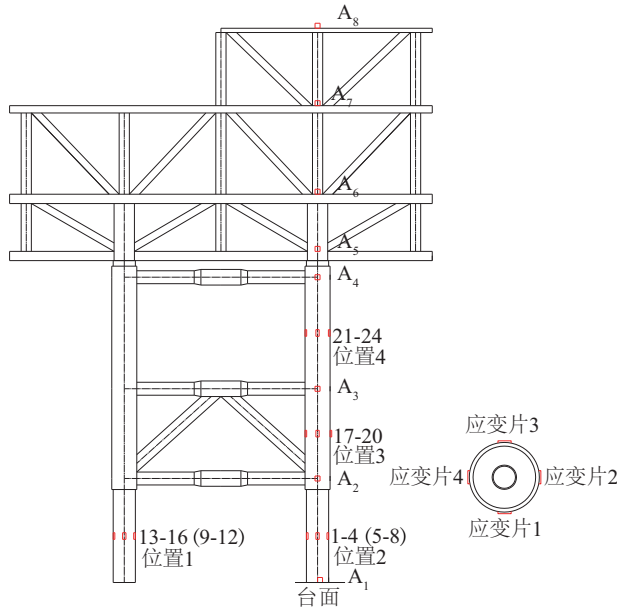


图2 Y方向加速度传感器布置图

Fig. 2 Layout of accelerometers in Y direction

实验过程中不考虑风、浪、流的影响。根据莫里斯方程,水动力荷载可写成如式(3)所示的形式,包括附加质量力和拖曳力2部分。

$$\{P_{\text{hydro}}\} = -\rho C_a A \{\ddot{x}_a\} - 1/2 \rho C_D D |\{\dot{x}_a\}| \{\dot{x}_a\} \quad (3)$$

式中, ρ ——水密度; A ——截面面积; C_a ——附加质量系数; C_D ——拖曳力系数; D ——直径; $\{\dot{x}_a\}$ 、 $\{\ddot{x}_a\}$ ——绝对速度和加速度向量,其中 $\{\dot{x}_a\} = \{\dot{x}\} + \{\dot{x}_g\}$ 。

将水动力荷载表达式代入式(1),进一步整理可得整体结构运动方程,如式(4)所示。

$$([M] + [M_a])\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -([M] + [M_a])\{\ddot{x}_g\} + \{F_D\} \quad (4)$$

式中, M_a ——附加质量矩阵, $M_a = -\rho C_a A$; $\{F_D\}$ ——拖曳力向量,表达式如式(5)所示,由式(5)可看出,水-结构之间存在明显的非线性作用。

$$\{F_D\} = -1/2 \rho C_D D |\dot{x} + \dot{x}_g| \{\dot{x} + \dot{x}_g\} \quad (5)$$

采用 ANSYS 建立海上电气平台实验模型的有

限元模型,如图3所示。该有限元模型采用管单元 Pipe59 模拟平台基础结构水下部分,采用管单元 Pipe16 模拟平台基础结构水上部分以及上部平台的竖直撑和斜撑。上部平台的主梁和次梁用梁单元 Beam188 模拟;平台甲板采用壳单元 Shell63 模拟,铅块配重采用质量单元 Mass21 模拟。实验模型整体坐标系如图4所示,坐标系原点位于结构底部中心,沿结构高度方向为 Z 轴正方向。

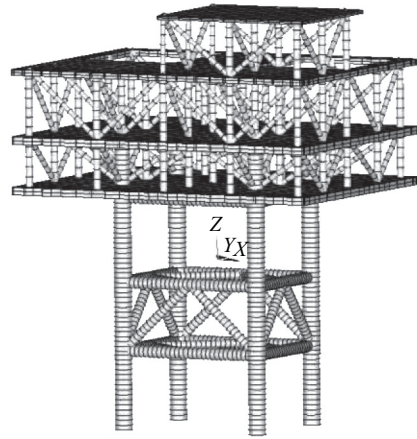


图3 海上电气平台实验模型的有限元模型

Fig. 3 FE model of offshore substation platform

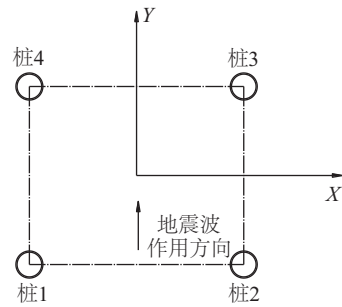


图4 实验模型整体坐标系

Fig. 4 Global coordinate system of model

2 水弹性相似律验证

由原型模态分析可得,原型整体结构前2阶特征频率分别为0.974、0.915 Hz。由动力特性测试可知,整体模型前2阶特征频率分别为5.285、5.003 Hz。将原型数值频率通过频率相似比尺转化为模型的相似频率,与模型实验频率进行对比,可得整体结构前2阶特征频率的相对误差分别为0.946%和0.180%。

基于动力特性实验数据,可得实验模型的简易

振型,如图 5 所示。通过对比结果可知,基于数值和实验得到的结构振型基本一致。

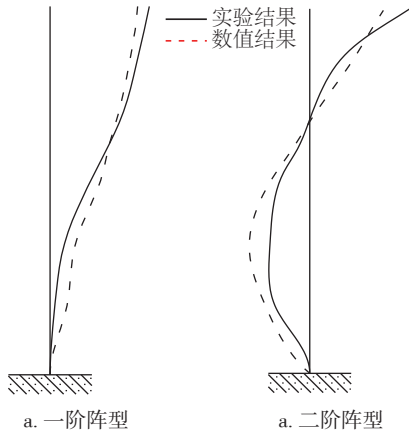


图 5 X 方向简支振型对比

Fig. 5 Comparison of mode shapes in X direction

由上述对比可得,实验和有限元结果基本一致。由此可验证相似关系和实验模型设计是合理的,模型中引入的假设和简化并未影响海上电气平台的整体结构动力特性。

3 地震实验结果分析

3.1 加速度及应变时程响应分析

对应 Y 实验方向 AH-A0.2 和 AH-E0.2 实验工况,平台顶部传感器 A8 加速度响应实验结果和数值计算结果时程对比如图 6 所示,位置 3 处应变响应时程对比如图 7 所示。由图 6 和图 7 可看出,加速度和应变时程响应的实验和有限元结果基本一致。API 谱波和 El Centro 波作用下加速度和应变时程反应的统计值对比如表 4 所示。由表 4 可知,不同实验工况下实验与有限元结果的统计值基本相同。

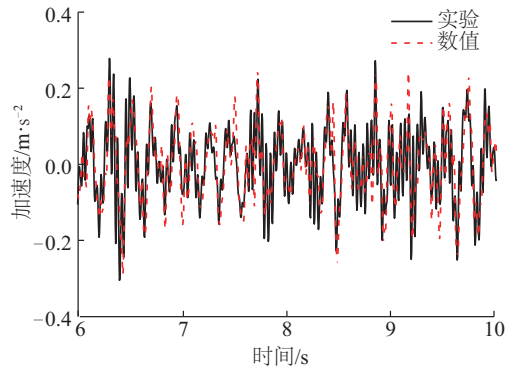
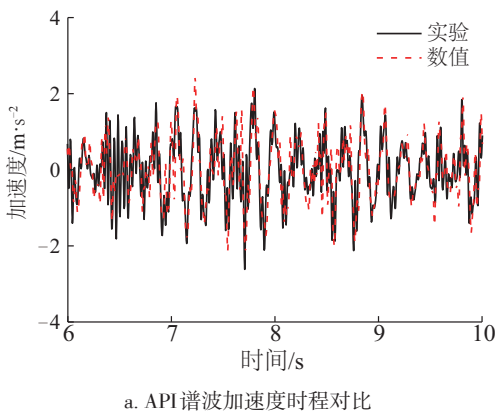


图 6 加速度反应时程对比

Fig. 6 Comparison of acceleration response

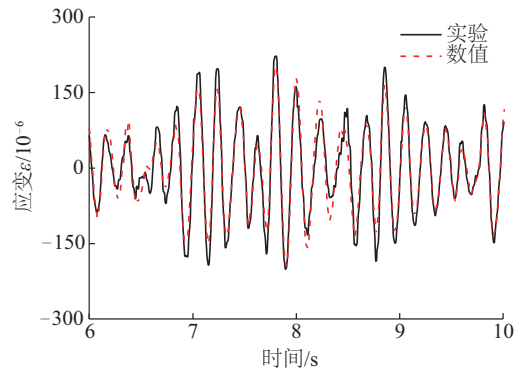


图 7 应变反应时程对比

Fig. 7 Comparison of strain response

3.2 加速度频域响应分析

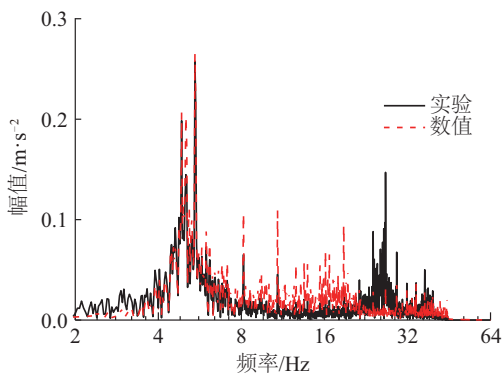
对于实验条件下,API 谱波与 El Centro 波输入时结构加速度频域响应对比如图 8 所示。从图 8 可看出:API 谱波输入时,结构加速度频域响应在整体结构 2 阶频率附近出现 2 个峰值,峰值对应频率分别为 4.856 和 5.428 Hz;El Centro 波作用时,结构加

速度频域响应在整体结构 2 阶频率位置为单峰,对 应峰值频率为 4.464 Hz。

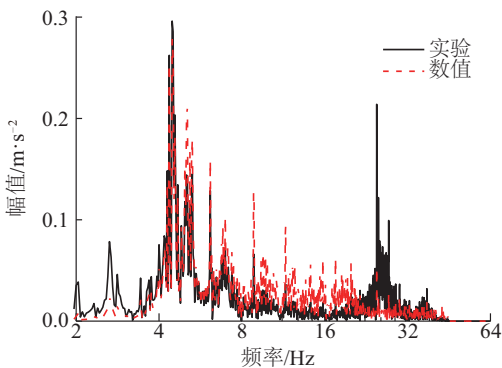
表4 API谱波、El Centro波加速度和应变统计值对比

Table 4 Statistics of acceleration and strain under API and El Centro seismic excitations

项目	API谱波						El Centro波					
	加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$			应变 $\varepsilon/10^{-6}$			加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$			应变 $\varepsilon/10^{-6}$		
	最大值	最小值	标准差	最大值	最小值	标准差	最大值	最小值	标准差	最大值	最小值	标准差
实验结果	2.94	-2.65	0.60	222.37	-200.70	64.38	2.75	-3.04	0.73	248.61	-257.87	81.75
数值结果	2.35	-2.55	0.63	221.15	-218.22	61.16	2.45	-2.84	0.73	243.82	-268.98	83.02
相对误差/%	20.00	3.70	4.69	0.55	8.73	5.00	10.71	6.45	0.65	1.93	4.31	1.55



a. API谱波加速度频域响应对比

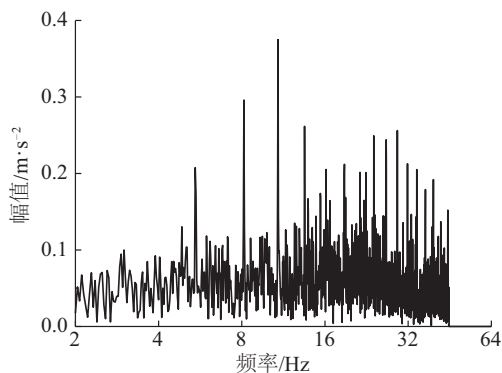


b. El Centro波加速度频域响应对比

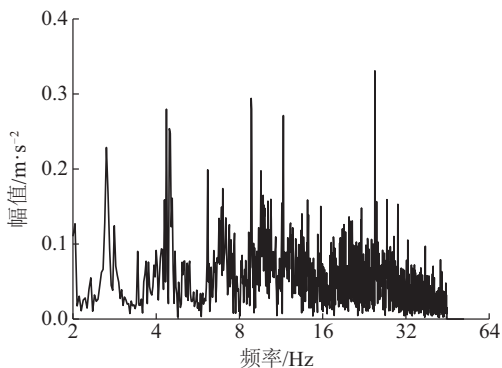
图8 加速度频域响应对比

Fig. 8 Comparison of acceleration responses in frequency domain

由动力特性实验结果可知,整体结构 2 阶频率为 5.003 Hz。这表明,在 API 谱波和 El Centro 波作用时:加速度频域响应在整体结构 2 阶频率附近出现峰值;不同类型地震波峰值位置也不同。由此说明,结构地震响应不仅与自身动力特性有关,并且与激励地震波的频谱特性密切相关。不同地震波包含的控制频率不同,这将会导致结构反应的差异。将输入地震波加速度峰值进行归一化处理,然后进行频谱分析,结果如图 9 所示。



a. API谱波频域结果



b. El-Centro波频域结果

图9 振动台输入地震波频域结果

Fig. 9 Spectral analysis of seismic waves

由图 9 可知:API 谱波在 0~8 Hz 的低频段幅内值较小,但是高频段幅值较大且较均匀,在 5.406 Hz 处出现峰值,这主要与 API 谱波输入时加速度频域响应的 1 个峰值频率 5.428 Hz 相对应;El Centro 波则是在高频段幅值分布较为均匀,但在低频段峰值较为集中,低频段峰值对应 4.535 Hz,这就是 El Centro 波作用时加速度频域响峰值频率为 4.464 Hz 的原因。

此外,从图 8 也可得出,对于平台顶部加速度频域响应,在低频段实验和有限元结果基本一致。

实验模型设计时引入的假设和简化以及加工误差,对于高阶模态可能会引起比较大的误差,高频分量在有限元结果中不明显。

3.3 加速度及应变变化曲线

以 API 谱波输入时的实验工况为例,结构加速度响应峰值随基础输入加速度变化曲线如图 10 所示。结构位置 2 处应变峰值随基础输入加速度变化曲线如图 11 所示。从图 10 和图 11 可看出:在输入地震波加速度 $0.3g$ 范围内,模型结构加速度和应变响应峰值与基础输入地震波加速度峰值之间近似为线性关系。但随着基础输入地震波峰值加速度的增加,水与结构物之间的非线性相互作用对于结构反应的影响不断增强,结构反应极值呈现出非线性变化趋势。

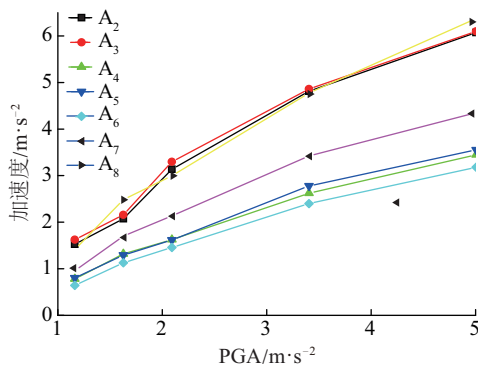


图 10 加速度响应峰值变化曲线

Fig. 10 Variation of peak values of acceleration responses

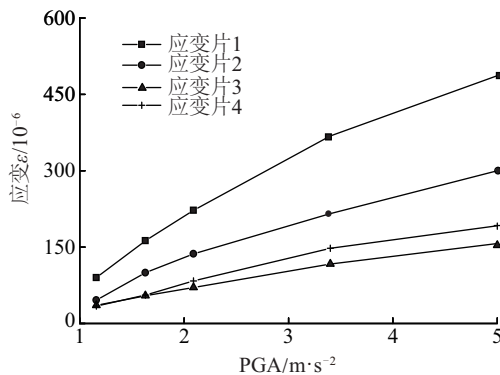


图 11 结构应变变化曲线

Fig. 11 Variation of peak values of strain responses

由图 2b 可知,应变片 1、3 对称布置,应变片 2、4 对称布置。但从图 11 可看出,各应变片反应并不对称,位置 3 处各应变相对于最大应变比值如图 12 所示,4 个应变片应变峰值比值的平均值为

$1:0.560:0.298:0.258$,说明桩腿截面变形主要受到截面弯矩的影响。

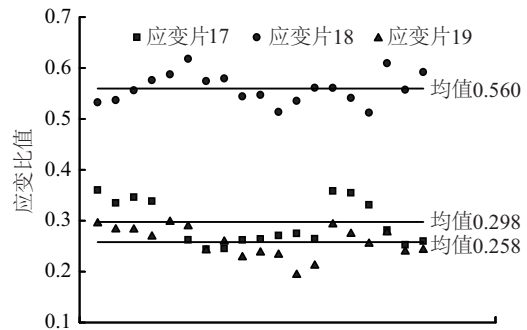


图 12 应变片 17-20 应变反应最大值对比

Fig. 12 Ratios of maximum values of strain gauges 17-20

4 结 论

本文以实际地震记录和人工合成地震动作为激励,开展不同地震波作用下的动力模型实验,系统地研究地震荷载作用下海上电气平台结构的动力反应,得出以下结论:

1) 结构各位置处加速度和应变响应最大值随底板输入地震波加速度峰值的增大而增大。在较小地震荷载作用时,结构响应近似为线性。但随着地震峰值加速度的增加,水-结构物之间的非线性作用对于结构反应的影响不断增强。

2) 对于固定式海上电气平台,为了能准确得到极端地震荷载作用下的结构反应,需考虑水-结构的非线性效应。

3) 地震波作用时,结构频域响应峰值出现在基频附近,不同类型地震波峰值位置不同。由此说明,结构地震响应不仅与自身动力特性有关,并与激励地震波的频谱特性密切相关。

4) 基于实验数据和有限元结果,验证有限元模型和相似关系的合理性及实验结果的准确性。

[参考文献]

- [1] Zheng X Y, Li H, Rong W, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study [J]. Marine Structures, 2015, 44: 125—141.
- [2] Bea R G, Akky M R, Audibert J M E. Earthquake Response of Offshore Platforms [J]. Journal of the Structural Division, 2014, 105(2): 377—400.

- [3] 王忠畅. 固定式平台抗震分析若干问题探讨[J]. 中国海上油气, 2005, 17(6): 421—423.
- [3] Wand Zhongchang. The discussion on some problems in anti-seismic analysis for fixed platform [J]. China Offshore Platform, 2005, 17(6): 421—423.
- [4] 荣棉水, 彭艳菊, 吕悦军. 导管架式海洋平台的地震动时程分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(1): 25—30.
- [4] Rong Mianshui, Pen Yanju, Lyu Yuejun. Seismic time-history analysis of a jacket offshore platform [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 25—30.
- [5] Boote D, Mascia D, Caffarena R. Seismic behaviour of fixed offshore platforms[A]. Archivio istituzionale della ricerca[C], Università di Genova, 1998.
- [6] Peng B, Chang B, Llorente C. Nonlinear dynamic soil-pile-structure interaction analysis of a deepwater platform for ductility level earthquakes[A]. Offshore Technology Conference[C], Houston, Texas, USA, 2005.
- [7] 吴俊杰, 陈国明, 陈团海. 带储罐老龄导管架平台地震响应分析[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(6): 29—33.
- [7] Wu Junjie, Chen Guoming, Chen Tuanhai. Seismic response analysis of aged jacket platform with storage tank [J]. Oil Field Equipment, 2009, 38(6): 29—33.
- [8] 欧进萍, 王刚, 田石柱. 海洋平台结构振动的AMD主动控制实验研究[J]. 高技术通讯, 2002, (10): 85—90.
- [8] Ou Jinping, Wang Gang, Tian Shizhu. Experimental research on AMD control of structural vibration of offshore platform[J]. Chinese High Technology Letters, 2002, (10): 85—90.
- [9] 欧进萍, 肖仪清, 段忠东, 等. 设置粘弹性耗能器的JZ20-2MUQ平台结构冰振控制[J]. 海洋工程, 2000, 18(3): 9—14.
- [9] Ou Jinping, Xiao Yiqing, Duan Zhongdong, et al. Ice-induced vibration control of JZ20-2MUQ platform structure with viscoelastic energy dissipators [J]. Ocean Engineering, 2000, 18(3): 9—14.
- [10] 欧进萍, 龙旭, 李QS, 等. 振动控制 of 钢套架式 offshore 平台结构 with 阻尼隔离系统 [J]. Engineering Structures, 2007, 29(7): 1525—1538.
- [11] 欧进萍, 龙旭, 肖仪清, 等. 导管架式海洋平台结构阻尼隔振体系及其减振效果分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 115—122.
- [11] Ou Jinping, Long Xu, Xiao Yiqing, et al. Damping isolation system and its vibration-suppressed effectiveness analysis for offshore platform jacket structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 22(3): 115—122.
- [12] 王兴国, 周晶, 翟刚军, 等. 导管架海洋平台结构的抗震模糊优化设计[J]. 船舶力学, 2003, 7(4): 65—72.
- [12] Wang Xingguo, Zhou Jing, Zhai Gangjun, et al. Structure fuzzy optimum design of earthquake-resistant for offshore jacket platform [J]. Journal of Ship Mechanics, 2003, 7(4): 65—72.
- [13] 王兴国, 周晶, 康海贵, 等. 基于稳定的导管架海洋平台的多目标优化设计[J]. 中国海洋平台, 2001, 16: 7—11.
- [13] Wang Xingguo, Zhou Jing, Kang Haigui, et al. Multi-objective optimization design for jacket platform based on stability [J]. China Offshore Platform, 2001, 16: 7—11.
- [14] 王文华, 李昕, 王滨, 等. 海上风机整体结构动力模型实验设计[J]. 水力发电, 2014, 40(5): 77—80.
- [14] Wang Wenhua, Li Xin, Wang Bin, et al. Design of dynamic model test of Offshore wind turbine [J]. Water Power, 2014, 40(5): 77—80.

DYNAMIC MODEL TEST OF OFFSHORE SUBSTATION PLATFORM UNDER EARTHEQUAKES

Lou Yike^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Wang Wenhua^{1,2}, Zuo Jingjing^{1,2}, Zhong Yao³

(1. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: Dynamic model of offshore substation platform is designed based on the hydro-elastic similarity, and the similarity scale of the model is 1:30. Series of test cases are performed under the synthesized ground motion and the measured seismic excitations. A finite element model of the test model is established using ANSYS, and then the time history seismic analysis is performed. Based on the comparison of the experimental and numerical results, a linear relationship between the maximum structural response and the peak ground accelerations (PGAs) is found. It also should be noted that the nonlinearities of the fluid-structure interaction will influence the structural response at a higher seismic intensity. Therefore, in order to obtain a reasonable structural response, the fluid-structure interaction should be taken into account under extreme seismic loading. According to the structural response, the frequency domain response is closely related to the dynamic characteristics of the structure and the spectrum characteristics of the excitation seismic waves.

Keywords: offshore substation platform; seismic analysis; dynamic model test; hydro-elastic similarity; finite element method