

引用本文:李富民,刘永强,赵 婕,等.海洋环境荷载下半潜式平台上承房屋钢框架结构的动力响应特征[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):22-31.

LI Fu-min, LIU Yong-qiang, ZHAO Jie, et al. Dynamic Response Characteristics of Steel Frame House Structure on Semi-submersible Platform Under Ocean Environmental Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 22-31.

DOI:10.19815/j.jace.2021.05070

海洋环境荷载下半潜式平台上承房屋钢框架结构的动力响应特征

李富民,刘永强,赵 婕,郭 震

(中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾害与结构可靠性重点实验室,江苏 徐州 221008)

摘要:以 1 000 m 深海半潜式平台上承房屋钢框架结构为研究对象,首先采用有限元方法模拟了 3 层、6 层、9 层 3 种高度的上承结构在 100 年一遇极端海洋环境荷载作用下的动力时程响应,获得较适宜的推荐高度;然后对推荐高度结构分别进行陆地地震作用及海洋环境荷载作用下的动力时程响应有限元模拟,并将两种支承条件与作用方式下房屋钢框架结构的动力时程响应结果进行对比。结果表明:海洋环境荷载作用下,3 层和 6 层结构的动力响应水平都相对较小且差距不大,而 9 层结构的动力响应水平因海风及结构倾斜影响过大而比 6 层结构的有显著增大,据此选定 6 层高度作为较适宜的推荐高度;6 层房屋钢框架结构在平台支承 4 个月一遇海况下与在陆地支承 8 度多遇地震下的动力响应水平总体基本相当,但与陆地支承 8 度罕遇地震动力响应水平相比,即使是 100 年一遇的极端海洋环境荷载作用,其动力响应水平总体上也明显小于前者;研究成果可为海洋平台上承结构物的设计提供参考。

关键词:海洋平台;海洋环境荷载;上承结构;钢框架;动力响应

中图分类号:TU391

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0022-10

Dynamic Response Characteristics of Steel Frame House Structure on Semi-submersible Platform Under Ocean Environmental Load

LI Fu-min, LIU Yong-qiang, ZHAO Jie, GUO Zhen

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

Abstract: The steel frame house structure on the semi-submersible platform suitable for 1000 m deep sea was taken as the research object. Firstly, the finite element method was used to simulate the dynamic time-history response of three-story, six-story and nine-story top structures under the ocean environmental load of one-hundred-year return period sea condition, and the suitable recommended height was obtained. Then the dynamic time-history response of the recommended height structure under the actions of both land earthquake and ocean environmental load was simulated by finite element method, and the results of dynamic time-history response under the two supporting conditions and action modes were compared. The results show that, under the

收稿日期:2021-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51878656);江苏省重点研发计划项目(BE2018636)

作者简介:李富民(1972-),男,甘肃静宁人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lfmfm@163.com。

ocean environmental load, the dynamic response levels of the three-story and six-story structures are relatively small and the difference is not big, while the dynamic response level of the nine-story structure is significantly higher than that of the six-story structure due to the large influence of sea breeze and structural slant. Thus the six-story height is selected as the recommended height. The dynamic response levels of the six-story steel frame house structure under the four-month return period ocean environmental load and 8 degrees frequent earthquake are similar, while the dynamic response level of even one-hundred-year return period ocean environmental load is lower than that of 8 degrees rare earthquake. The research findings can provide a reference for the design of the top structures on offshore platform.

Key words: offshore platform; ocean environmental load; top structure; steel frame; dynamic response

0 引言

随着陆地资源逐渐减少,人们将目光投向了更为广阔的海洋空间,各类海洋开发平台正在快速发展。半潜式平台因其水线面小、载重量大的优点成为了目前国内外海洋开发的主流平台,主要应用于深海资源勘探、油气生产加工以及火箭发射等业务^[1]。同时,为了解决人工吹填建岛带来的严重环境破坏问题以及只适宜于近海建造的条件限制问题,采用半潜式平台代替人工吹填建岛模式也将成为未来的发展趋势^[2]。因此,半潜式平台的使用功能将不断增多,从业人员数量也将不断增加,平台上承生产、生活用房的需求必将日益增多,上承房屋结构的海洋环境荷载动力响应分析及设计方法研究工作亟需开展。

既有关于半潜式平台结构的研究工作主要体现在以下两个方面:

(1)关于平台自身整体结构极限强度的研究。冯国庆等^[3-4]采用直接算法对平台结构的总强度进行评估,通过三维水动力理论和设计波法计算了结构在多种工况下的应力响应,对平台结构总强度进行了校核,并给出了半潜式平台的设计建议。白艳彬等^[5]针对平台结构总体强度分析,提出了计算工况选取原则及控制总体强度的关键因素。Jang等^[6]采用有限元方法对半潜式结构的重量优化进行研究,开发了一套内部强度评估系统,根据结构的屈曲强度对半潜式结构进行优化,实现了半潜式结构强度评估过程的全自动化。叶谦等^[7]基于半潜式平台结构整体强度分析方法,采用非线性逐步垮塌分析法建立了不同控制工况下极限承载力模型的功能函数,提出了串联结构体系可靠度计算方法。祁恩荣等^[8]采用解析方法和简化方法对半潜式平台极限

强度进行比较研究,建立了半潜式平台可靠性计算模型。张大勇等^[9]提出了典型半潜式平台在海冰作用下的主要失效模式和评价方法。饶鑫等^[10]通过对平台自身生活区横向、纵向布置的对比分析,得到了生活区参与平台总强度的规律。

(2)关于平台自身关键节点极限强度的研究。半潜式平台主体与浮体一般由加劲板结构组成,加劲板在焊接过程中会产生初始变形和残余应力,在结构承受荷载时造成不利影响。Paik等^[11-13]通过试验和非线性有限元方法研究了考虑结构裂纹影响的板在轴向压缩或拉伸下的极限强度。Estefen等^[14]研究了半潜式平台一个柱段中的加劲板在屈曲荷载及后屈曲条件下的状态,以及不同板缺陷情况对屈曲扩展的影响。Cheon等^[15]对半潜式平台甲板底部加筋板在考虑流固耦合作用下的砰击压力进行研究。Huo等^[16]提出了一种基于数值模型重建和外推的支撑结构强度分析方法,通过模型试验与数值模拟对考虑波浪冲击荷载的支撑强度进行研究。张健等^[17]对深海半潜式平台典型构件和节点在腐蚀损伤下的极限强度进行研究,总结出腐蚀损伤对平台极限承载力的影响及随时间的演变规律。嵇春艳等^[18-19]基于逐步破坏分析法和有限元计算方法,提出了一种考虑材料腐蚀、疲劳裂纹等结构损伤的半潜式海洋平台关键结构全寿期极限强度计算方法。

综上,既有半潜式平台结构的研究工作主要着眼于平台整体、关键节点的极限强度方面,而对于平台上承结构的有关问题研究较少^[20]。本文基于深海半潜式平台上承房屋结构设计建造需求,选取较为适宜的钢框架结构为对象,对不同高度的钢框架结构进行极端海洋环境荷载作用下的动力时程分析,据此确定适宜的结构高度,然后对适宜结构高度

进一步进行陆地 8 度设防地震和海洋 3 个等级环境荷载作用下的动力时程响应分析,通过对比得到海洋环境荷载作用下平台上承钢框架结构的动力响应特征,为海洋平台上承结构物的设计建造提供参考。由于海洋平台结构尺度非常大,真正有效的试验研究难度也就非常大,当前几乎所有此类研究都还只能采用数值模拟方法进行,因此,本文也将采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 与水动力分析软件 AQWA 进行分析研究。

1 海洋环境荷载下不同高度上承结构的动力响应模拟分析

在海洋环境荷载中,风荷载占有一定的比例,海面以上结构物高度对该比例的影响较大^[21-22];另一方面,海洋平台的竖向稳固性相对较差,海洋环境荷载作用容易引起上下摇动,因而上承结构对自身的重心高度较为敏感。因此,研究海洋环境荷载作用下上承结构高度对其动力响应特征的影响,继而找出较为合适的高度作为推荐高度对于海洋平台上承结构设计非常必要。为此,本文建立 3 层、6 层和 9 层(分别高 9、18、27 m)3 个平台上承钢框架结构模型进行动力响应有限元模拟研究,结构整体布置如图 1 所示。

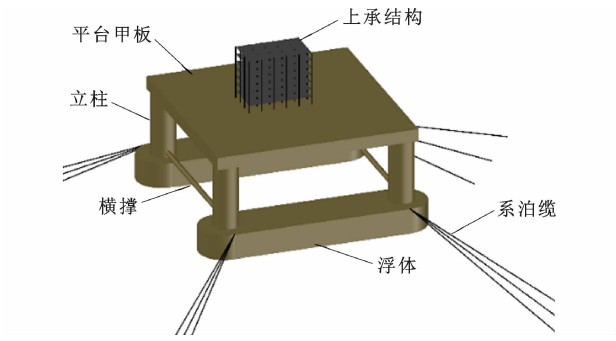


图 1 结构整体布置
Fig. 1 Overall Layout of Structure

1.1 结构参数

1.1.1 平台主体

半潜式平台主体采用常规四立柱双浮体形式。平台上部采用箱式甲板结构,水下采用双浮体结构,甲板与浮体之间采用四立柱进行连接,立柱相互之间通过横撑进行支撑^[23]。各部分材料均采用 Q345 钢;平台主体自重 25 000 t,主要几何参数如表 1 所示。

1.1.2 系泊系统

海洋平台工作的设计水深为 1 000 m,采用张

表 1 平台主体几何参数	
Table 1 Geometric Parameters of Platform Body	
参数	取值
甲板轮廓尺寸	80 m×80 m×5 m
浮体轮廓尺寸	90 m×20 m×10 m
立柱外径/m	10
立柱高度/m	30
横撑外径/m	2
平台吃水深度/m	25

紧式系泊系统设计方案,如图 2 所示。系泊系统共采用 4 组系泊缆沿浮体四角对称布置,每组系泊缆由 3 根等长的缆绳组成,每根缆绳与其水平投影的夹角均为 40°,中间缆绳的水平投影与 X(或 Y)轴的夹角为 45°,相邻两根缆绳之间的空间夹角为 5°;每根缆绳的长度为 1 490 m,预张力为 1 000 kN,系泊缆材料组成及其性能参数如表 2 所示。

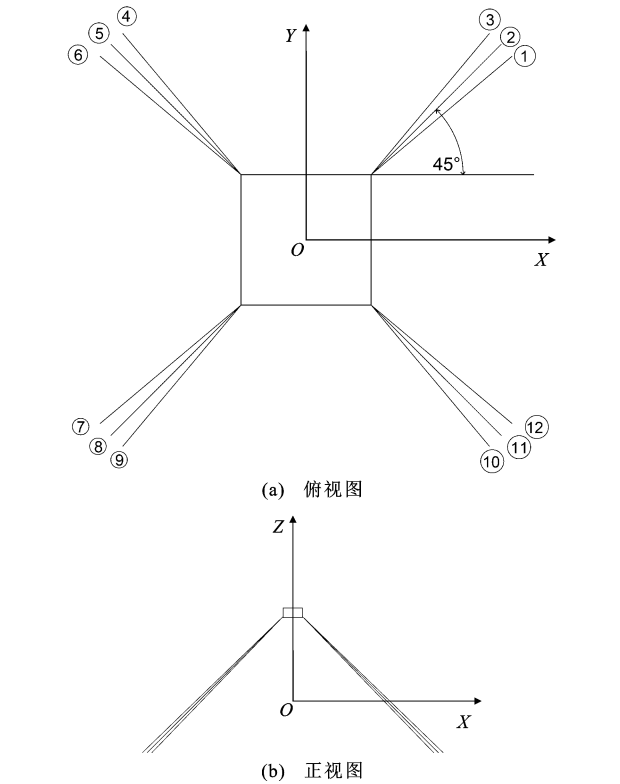


图 2 系泊系统布置
Fig. 2 Mooring System Layout

1.1.3 上承结构

上承结构以住宅建筑为依据,按照陆地《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[24]《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[25]和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[26]设计,截面参数如表 3 所示。本结构设定抗震类别为丙类,设防烈度为 8 度,场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第一组。

表 2 系泊缆材料组成及其性能参数

Table 2 Material Composition and Performance Parameters of Mooring Lines

材料组成	船链 R4S	GAMA98 纤维缆	底链 R4S
长度/m	210	1 070	210
直径/mm	162	290	162
干重/(kg·m ⁻¹)	423.4	41.7	423.4
湿重/(kg·m ⁻¹)	386.9	12.0	386.9
刚度/(MN·m ⁻¹)	1 735	445	1 735
破断力/kN	24 760	24 500	24 760

表 3 上承结构构件截面参数

Table 3 Section Parameters of Top Structure Members

构件	框架梁	框架柱
3 层	HN346×174×6×9	HW350×350×12×19
6 层	HN346×174×6×9	HW492×465×25×20
9 层	HN346×174×6×9	□550×550×20

3 层、6 层和 9 层钢框架(分别记为 S3、S6 和 S9)的结构平面布置相同,如图 3 所示,每层的层高均为 3 m。采用 PKPM 进行结构设计,3 个结构所有框架梁的截面均取为相同,而框架柱的截面则按照 3 个结构各对应楼层层间位移角相近的原则确定;框架柱与框架梁的材料均采用 Q345 钢。所有楼板均采用 100 mm 厚压型钢板-混凝土组合板,其中压型钢板采用 Q345 的 YX75-200-600 开口型压型钢板,钢板厚度为 0.75 mm;混凝土采用强度等级为 C30 的商品混凝土。所有墙体均采用尺寸为 600 mm×200 mm×200 mm 的蒸压加气混凝土砌块,并沿每层框架纵、横双向向框架梁方向布置。3 个结构的自重分别为 620、1 278、2 007 t。

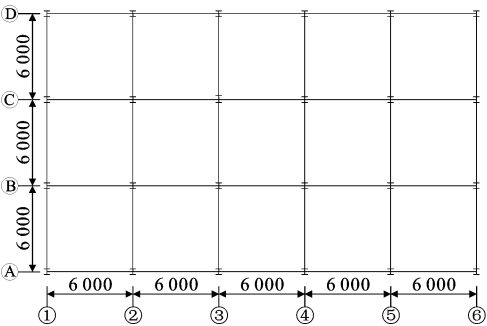


图 3 上承钢框架结构平面布置(单位:mm)
Fig. 3 Plan Layout of Steel Frame Top Structure (Unit:mm)

1.2 有限元模型

在 ANSYS 中建立结构有限元分析模型。平台主体由甲板、立柱与浮体组成,平台浮体、甲板与立柱均采用 Shell181 单元,横撑采用 Pipe59 单元。平台水动力计算模型如图 4 所示。

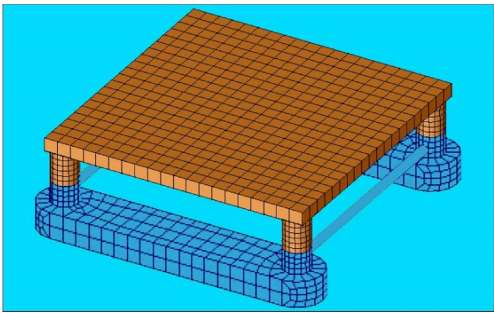


图 4 平台水动力计算有限元模型
Fig. 4 Finite Element Model for Hydrodynamic Calculation of Platform

平台上承结构的框架柱与框架梁选用 Beam188 单元,板采用 Shell181 单元。框架梁与框架柱、楼板与框架梁之间均采用刚接形式连接。上承结构有限元分析模型如图 5 所示(以 6 层框架为例)。

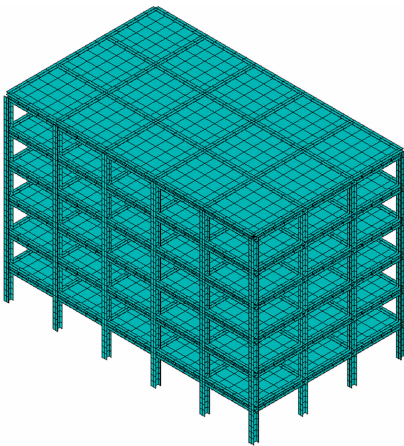


图 5 上承结构动力响应分析有限元模型
Fig. 5 Finite Element Model for Dynamic Response Analysis of Top Structure

1.3 荷载选取

平台设计工作水深为 1 000 m,海水密度为 1 025 kg·m⁻³,空气密度为 1.29 kg·m⁻³,重力加速度为 9.81 m·s⁻²。波浪谱采用 JONSWAP 谱,风谱采用 NPD 谱,流荷载采用流速的方式进行施加。根据南海波浪分布图选取 100 年一遇的极端海况提取海洋环境荷载,具体环境荷载参数见表 4。根据此荷载,采用波浪、风、流同向的最不利组合工况,在 AQWA 中对平台进行水动力计算,获取每个立柱与海平面交界线的 2 个外侧顶点(4 根柱共 8 个点)的位移时程曲线,进一步在 ANSYS 中将上述 8 条位移时程曲线作为荷载施加到 4 个立柱的 8 个点上,对平台进行瞬态动力学分析。

表 4 100 年一遇极端海况参数

Table 4 Extreme Sea State Parameters with 100 Year

Return Period

环境荷载	参数	取值
波浪	谱峰升高因子	1.499 7
	谱峰周期/s	18
	有义波高/m	15
风	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	56
流	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.57

1.4 动力时程分析

由于平台甲板的整体刚度很大,对上承结构的动力响应影响仅限于与钢柱连接处的局部变形,因而对计算结果影响非常小,尤其对结构的整体响应特征几乎没有影响;另一方面,因平台主体过于巨大,如均采用弹塑性模型进行分析,计算量过大,很难完成有效分析,因而目前常见的水动力分析软件在计算过程中均须把平台主体视作刚体进行分析。因此,本文在计算过程中亦将平台主体假定为刚体,将荷载施加点的位移时程施加到平台模型上,在 ANSYS 中进行动力时程分析。

1.4.1 加速度响应

3 个不同高度的结构各楼层质点加速度峰值如图 6 所示。由图 6 可知:结构加速度峰值随高度的增加近似呈线性增长;S3 各楼层的加速度峰值略小于 S6 和 S9 各楼层,而 S6 各楼层的加速度峰值则与 S9 各楼层基本相当。

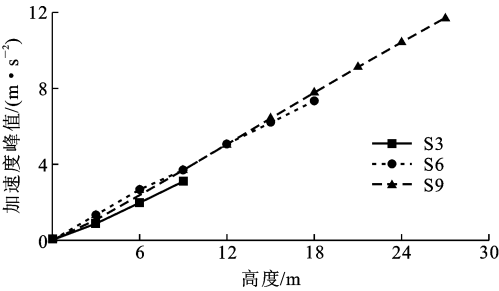


图 6 极端海况上承结构加速度峰值

Fig. 6 Peak Acceleration of Top Structure Under Extreme Sea State Condition

1.4.2 位移响应

极端海况下,上承结构各楼层的最大层间位移角以及各楼盖的最大相对侧移如图 7 所示。其中楼盖的最大相对侧移是指,以迎浪方向一个角柱的柱底作为参考点,该角柱与每层梁板的交点作为考察点,考察点与参考点在横向的最大相对位移。显然,考虑到极端海况下平台会产生大幅度的摇动,这里定义的层间位移角和相对侧移不仅包含了变形引起

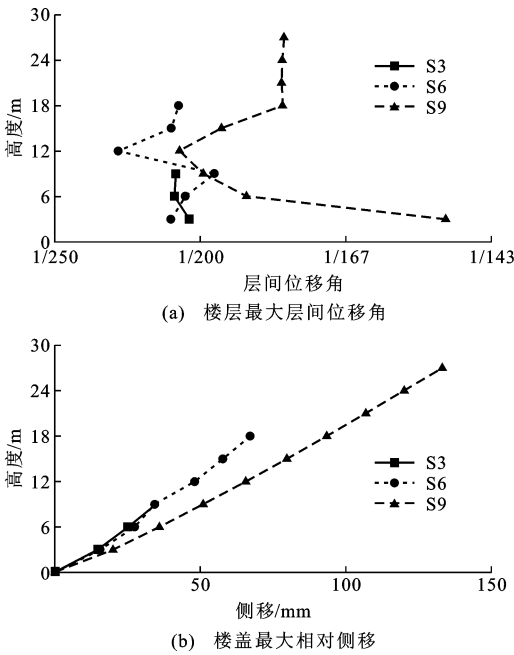


图 7 极端海况上承结构最大位移响应

Fig. 7 Maximum Displacement Response of Top Structure Under Extreme Sea State Condition

的位移,也包含了刚体转动引起的位移。另外,这里定义的层间位移角和相对侧移都是作用时段的最大值,并不具有时间对应性,因而相对侧移与层间位移角之间并无直接关联。由图 7 可知:

(1)上承结构各楼层的最大层间位移角分布较为复杂。S3 的最大层间位移角在第 1 层最大,第 2 层和第 3 层基本相当;S6 的最大层间位移角从第 1 层至第 3 层逐渐增加,在第 4 层突然减小至最小值,然后再增加至与第 1、2 层大致相当的水平,总体曲线接近于 S 形;S9 的最大层间位移角在第 1 层最大,然后逐渐减小,至第 4 层时达到最小值,之后从第 4 层到第 6 层又不断增加,最后从第 6 层到第 9 层又基本保持不变,总体曲线接近于 C 形。上述最大层间位移角的复杂分布主要是由于海浪、海流、海风共同组合而成的海洋环境作用比较复杂、组合的随机性较大等因素造成的。相比而言,S3 与 S6 最大层间位移角的水平总体相差不大,而 S9 的最大层间位移角则明显大于 S3 与 S6 的。

(2)上承结构各层楼盖最大相对侧移分布相对简单,3 个结构都随高度的增加而近似呈线性增大。相比而言,S3 与 S6 前三层的楼盖最大相对侧移较为接近,而 S9 的楼盖最大相对侧移则明显大于 S3 和 S6 对应楼盖处的。

1.5 适合高度建议

由第 1.4 节结构动力响应分析结果可知,在相

同极端海况作用下,尽管不同高度结构对应楼层质点的最大加速度总体相差不大,但楼层最大层间位移角及楼盖最大相对侧移却存在明显差别,这种差别主要体现在 9 层结构与 6 层及 3 层结构上,即 6 层和 3 层结构的楼层最大层间位移角及楼盖最大相对侧移总体较为接近,但却均明显小于 9 层结构的。这表明,当结构高度大于 6 层时,就有可能带来结构动力响应的加速增大,因此,本文建议平台上承结构高度不宜超过 6 层,且以 6 层为相对适宜高度。

2 海洋环境荷载与地震作用下上承结构动力响应特征对比分析

根据第 1.5 节的建议,现选取第 1.1 节所设定的 6 层钢框架结构作为基本结构模型,然后分别将其置于两种工况下进行动力响应分析,一种工况是将其固定于半潜式海洋平台上经受海洋环境荷载作用,另一种是将其固定在陆地地面上经受地震作用。钢框架及海洋平台的有限元模型仍与第 1.2 节的相同。

2.1 荷载选取

2.1.1 海洋环境荷载

仍然采用第 1.3 节中的海洋基本参数设置,在此基础上,考虑海洋环境荷载水平常以有义波高来反映,这里选取有义波高差值在 6 m 左右的三级海洋环境荷载进行分析,这三级荷载所对应的重现期分别为 1 d、4 个月和 100 年,荷载具体参数见表 5。

2.1.2 地震波的选取

基于《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),

表 5 海洋环境荷载参数				
Table 5 Ocean Environmental Load Parameters				
环境荷载	参数	1 d 重现期	4 个月重现期	100 年重现期
波浪	波浪谱	JONSWAP	JONSWAP	JONSWAP
	谱峰升高因子	1.000 0	3.298 0	1.499 7
	谱峰周期/s	9.7	15.7	18.0
	有义波高/m	3.66	9.88	15.00
风	风谱	NPD	NPD	NPD
	风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	14.5	24.9	56.0
流	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.50	0.80	1.57

根据工程场地类别为 II 类、设计地震分组为第一组、抗震设防烈度为 8 度($0.2g$, g 为重力加速度)确定地震规范设计谱,进而根据规范设计谱各设计一条 8 度多遇及 8 度罕遇人工波,如图 8(a)、(d)所示;同时,根据频谱特性、有效峰值和持续时间等参数相近的原则,在太平洋地震研究中心强震记录数据库中各选择两条与 8 度多遇及 8 度罕遇人工波相近的实际记录地震波(天然波),其中 Friuli_Italy 波和 Mammoth Lakes 波是与 8 度多遇人工波相近的天然波,Imperial Valley 波和 San Fernando 波是与 8 度罕遇人工波相近的天然波,如图 8(b)、(c)、(e)、(f)所示。荷载施加方向与海洋环境荷载方向相同。

2.2 动力时程分析

2.2.1 水平加速度响应

上承结构在 3 个级别的海洋环境荷载、3 个 8 度多遇地震以及 3 个 8 度罕遇地震作用下,每个楼层质点的水平加速度峰值如图 9 所示。

由图 9 可知:

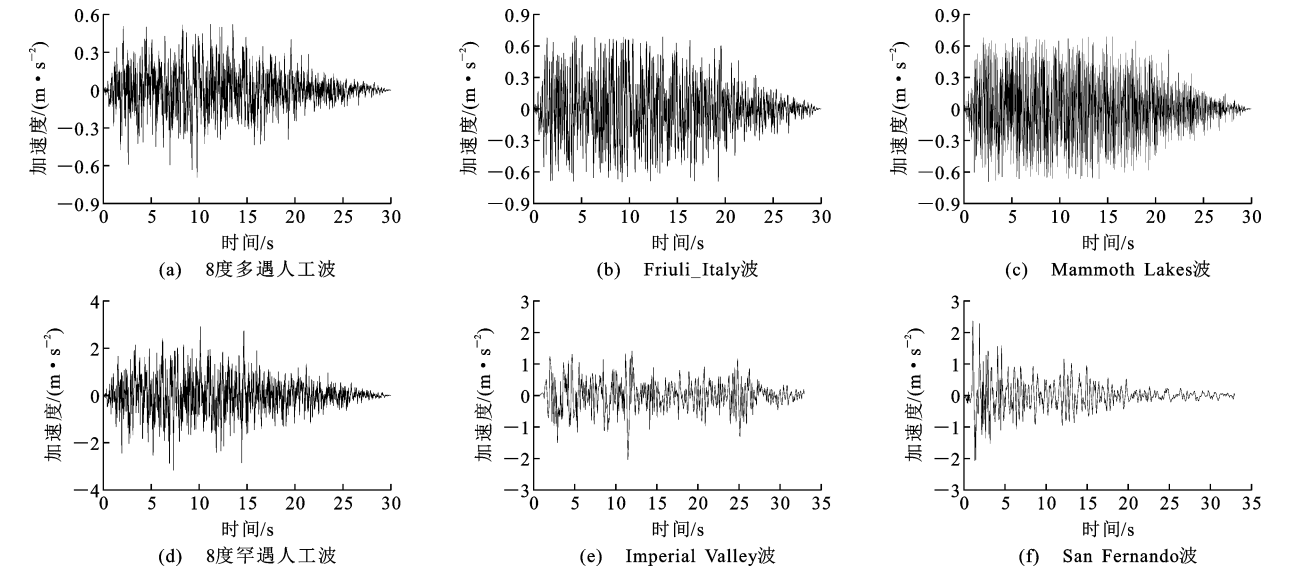


图 8 地震波加速度时程曲线

Fig. 8 Time-history Curves of Seismic Acceleration

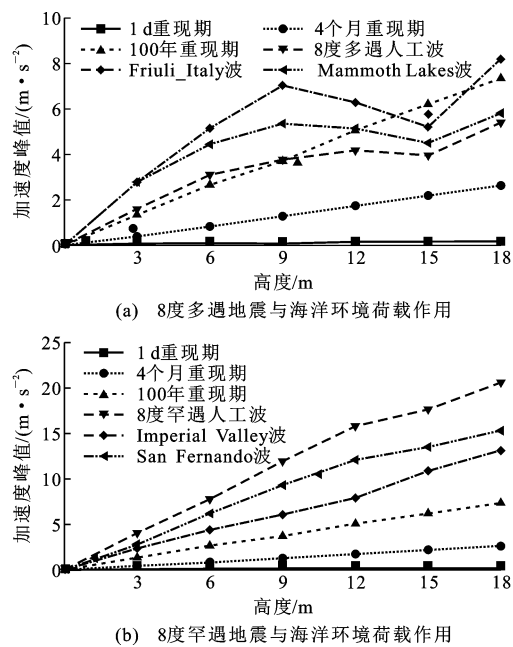


图9 结构水平加速度峰值

Fig. 9 Horizontal Peak Acceleration of Structure

(1) 3个级别海洋环境荷载作用下上承结构的加速度峰值随高度的增加近似呈线性增长,且随荷载级别的增加,结构加速度峰值也在增大;3个8度罕遇地震作用下上承结构的加速度峰值随高度的增加总体上也接近线性增长,只是第5、6两层稍有偏离;3个8度多遇地震作用下上承结构的加速度峰值随高度的增加呈非线性变化趋势,尤其在第4、5层还出现了下降,到第6层又增长。

(2) 海洋环境荷载作用下上承结构的加速度峰值全面小于8度罕遇地震作用下上承结构的加速度峰值,其中最大的100年一遇海洋环境荷载引起的加速度峰值不及最大的8度罕遇人工地震波引起的加速度峰值的一半;另一方面,海洋环境荷载引起的加速度峰值总体上也小于8度多遇地震引起的加速度峰值,但其中最大的100年一遇海洋环境荷载引起的加速度峰值在第4、5、6三层部分超过8度多遇地震引起的加速度峰值。

2.2.2 角加速度响应

与地震作用相比,海洋环境荷载作用下结构呈更为显著的六自由度运动,且平面外的运动对结构的影响较大,故这里对结构平面外运动进行探究,提取上承结构绕图3所示A轴转动的角加速度,如图10所示。

由图10可知:随荷载级别的增加,角加速度的峰值也在增大,但从1d到4个月重现期的增大非常显著,而从4个月到100年重现期的增大则相对

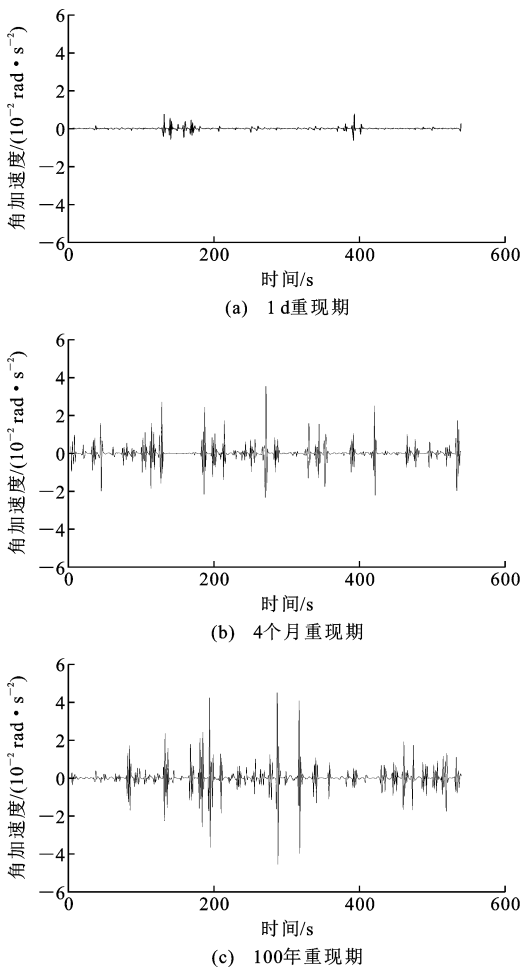


图10 海洋环境荷载下平台上承结构角加速度时程曲线

Fig. 10 Time-history Curves of Angular Acceleration of Top Structure Under Ocean Environmental Load

较小。原因在于:当海洋环境荷载较小时,结构摇动平衡主要依赖结构-水系统自身的回复力,此时荷载的增加会引起摇动响应的显著增大;然而,当海洋环境荷载较大以后,结构摇动平衡转为主要依赖系泊系统提供的回复力,鉴于系泊系统可提供较大刚度的约束,此时荷载的增加就不再会引起摇动响应的显著增大。

2.2.3 位移响应

图11、12分别为3个级别海洋环境荷载与3个8度多遇地震、3个8度罕遇地震作用下,每个楼层的最大层间位移角及每层楼盖的最大相对侧移。由图11、12可知:

(1) 关于上承结构各楼层最大层间位移角的分布,在海洋环境荷载作用下,除了100年一遇极端海况下呈较复杂的S形之外,1d和4个月一遇海况下均呈近似的铅垂直线形分布;在8度多遇地震作用下,最大层间位移角的最小值均出现在第1层,最大

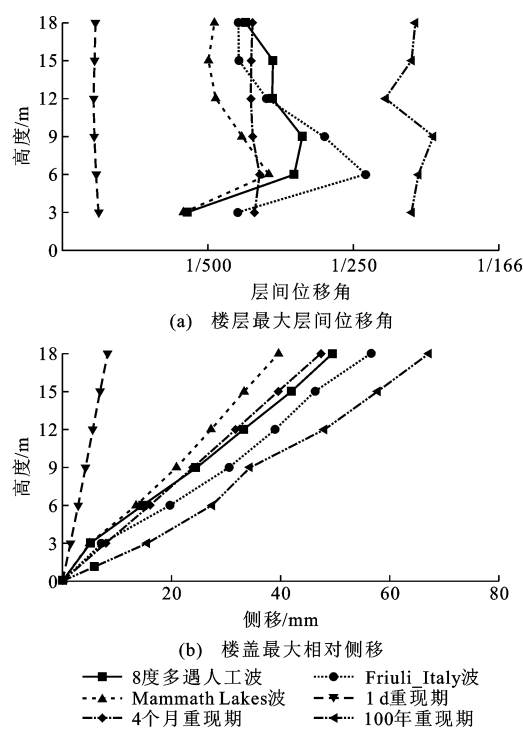


图 11 8 度多遇地震及海洋环境荷载下结构位移响应
Fig. 11 Displacement Response of Structure Under 8 Degree Frequent Earthquake and Ocean Environmental Load

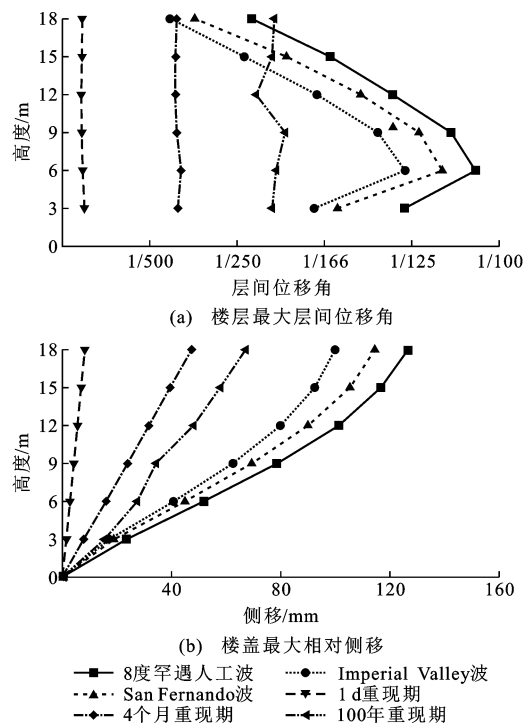


图 12 8 度罕遇地震及海洋环境荷载下结构位移响应
Fig. 12 Displacement Response of Structure Under 8 Degree Rare Earthquake and Marine Environmental Load

值出现在第 2 层(Friuli_Italy 波和 Mammoth Lakes 波)或第 3 层(人工波),第 2 层(或第 3 层)往上逐渐小幅减小;在 8 度罕遇地震作用下,最大值均出现在

第 2 层,第 2 层往上逐渐以较大幅度减小。

(2)关于上承结构各楼层最大层间位移角的大小关系,4 个月一遇海况下与 8 度多遇地震下各楼层的最大层间位移角大小总体基本相当,而 1 d 和 100 年一遇海况下各楼层的最大层间位移角总体上分别小于和大于 8 度多遇地震下各楼层的最大层间位移角;另一方面,3 种海况下各楼层的最大层间位移角总体上明显小于 8 度罕遇地震下各楼层的最大层间位移角,只有 100 年一遇海况下第 6 层的最大层间位移角全面大于 3 个 8 度罕遇地震下第 6 层的最大层间位移角。

(3)关于上承结构各层楼盖最大相对侧移的分布,3 种海况下及 8 度多遇地震下都随高度的增加近似呈线性增大,而 8 度罕遇地震下则呈非线性增大,即从第 1 层到第 2 层增大较快,从第 2 层往上增大越来越慢。

(4)关于上承结构各层楼盖最大相对侧移的大小关系,4 个月一遇海况下与 8 度多遇地震下各层楼盖最大相对侧移大小总体基本相当,1 d 一遇海况下各层楼盖最大相对侧移全面显著小于 8 度多遇地震下各层楼盖最大相对侧移,100 年一遇海况下各层楼盖最大相对侧移全面略大于 8 度多遇地震下各层楼盖最大相对侧移;另一方面,3 种海况下各层楼盖最大相对侧移总体上明显小于 8 度罕遇地震下各层楼盖最大相对侧移。

3 结 语

(1)在 100 年一遇海洋环境荷载作用下,6 层(高 18 m)与 6 层以下高度的上承结构各层的动力响应水平都相对较小且相互之间的差距也不大;高于 6 层以后,结构的动力响应水平因海风及结构倾斜影响过大而比 6 层结构的有显著增大。因此,海洋平台上承房屋钢框架结构的高度不宜超过 6 层(高 18 m)。

(2)6 层房屋钢框架结构的最大层间位移角当在陆地上经受 8 度抗震设防烈度多遇与罕遇地震作用时,自下而上呈先增加后减小的发展趋势,最大值基本都出现在第 2 层;当在平台上经受 1 d、4 个月和 100 年一遇海洋环境荷载作用时,自下而上总体上基本相等,近似呈铅垂直线形分布,只是 100 年一遇作用时略有偏离,接近较弱的 S 形。

(3)6 层房屋钢框架结构的最大相对侧移当在平台上经受 1 d、4 个月和 100 年一遇海洋环境荷载作用时以及在陆地上经受 8 度抗震设防烈度多遇地

震作用时,都随高度的增加近似呈线性增大,但在陆地上经受 8 度抗震设防烈度罕遇地震作用时,则随高度的增加而呈非线性增大,即从第 1 层到第 2 层增大较快,从第 2 层往上增大越来越慢。

(4)平台支承海洋环境作用与陆地支承地震作用两种条件下 6 层房屋钢框架结构的动力响应在 4 个月一遇海况下与 8 度多遇地震下的响应水平总体基本相当,而 1 d、4 个月及 100 年一遇海况下的响应水平总体上明显小于 8 度罕遇地震下的响应水平。

(5)由于海洋平台结构尺度非常大,真正有效的试验验证很难实现,因此,本文只做了数值模拟研究,其结果仅具参考价值。

参考文献:

References:

- [1] 张晓诚,霍宏博,李金蔓,等. 停产海洋平台再利用[J]. 中国海洋平台,2021,36(3):67-71.
ZHANG Xiao-cheng, HUO Hong-bo, LI Jin-man, et al. Reuse of Suspended Offshore Platform [J]. China Offshore Platform, 2021, 36(3): 67-71.
- [2] 丁 军,程小明,田 超,等. 近岛礁浅水环境下浮式平台系泊系统设计研究[J]. 船舶力学,2015,19(7):782-790.
DING Jun, CHENG Xiao-ming, TIAN Chao, et al. Investigations on Mooring System Design for a Floating Platform in Shallow Water Near Islands and Reefs [J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(7): 782-790.
- [3] 冯国庆,任慧龙,李 辉,等. 基于直接计算的半潜式平台结构总强度评估[J]. 哈尔滨工程大学学报,2009,30(3):255-261.
FENG Guo-qing, REN Hui-long, LI Hui, et al. Overall Strength Assessment of Semi-submersible Platform Structures Based on Direct Calculation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(3): 255-261.
- [4] 冯国庆,任慧龙,陈北燕,等. 半潜式平台结构屈曲强度评估[J]. 船舶工程,2010,32(2):67-72.
FENG Guo-qing, REN Hui-long, CHEN Bei-yan, et al. Buckling Strength Assessment of Semi-submersible Platform Structures [J]. Ship Engineering, 2010, 32(2): 67-72.
- [5] 白艳彬,刘 俊,薛鸿祥,等. 深水半潜式钻井平台总体强度分析[J]. 中国海洋平台,2010,25(2):22-27.
BAI Yan-bin, LIU Jun, XUE Hong-xiang, et al. Global Strength Analysis of a Deepwater Semi-submersible Platform [J]. China Offshore Platform, 2010, 25(2): 22-27.
- [6] JANG B S, KIM J D, PARK T Y, et al. FEA Based Optimization of Semi-submersible Floater Considering Buckling and Yield Strength [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11(1): 82-96.
- [7] 叶 谦,何 勇,金伟良. 半潜式平台结构整体可靠性分析方法[J]. 海洋工程,2011,29(3):31-36.
YE Qian, HE Yong, JIN Wei-liang. System Reliability Analysis of Semisubmersible Platform [J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 31-36.
- [8] 祁恩荣,庞建华,吴东伟. 半潜式平台极限强度可靠性研究[J]. 船舶力学,2011,15(4):371-376.
QI En-rong, PANG Jian-hua, WU Dong-wei. Ultimate Strength Reliability for Semi-submersible Platforms [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(4): 371-376.
- [9] 张大勇,于东玮,王国军,等. 半潜式海洋平台抗冰性能分析[J]. 船舶力学,2020,24(2):208-220.
ZHANG Da-yong, YU Dong-wei, WANG Guo-jun, et al. Ice-resistant Performance Analysis of Semi-submersible Offshore Platforms [J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(2): 208-220.
- [10] 饶 鑫,周 佳,薛鸿祥,等. 深水半潜式平台大型生活区结构强度[J]. 船舶工程,2019,41(6):119-124.
RAO Xin, ZHOU Jia, XUE Hong-xiang, et al. Structural Strength of Large Living Quarters for Deepwater Semi-submersible Platform [J]. Ship Engineering, 2019, 41(6): 119-124.
- [11] PAIK J K. Residual Ultimate Strength of Steel Plates with Longitudinal Cracks Under Axial Compression-experiments [J]. Ocean Engineering, 2008, 35 (17/18): 1775-1783.
- [12] PAIK J K. Residual Ultimate Strength of Steel Plates with Longitudinal Cracks Under Axial Compression-nonlinear Finite Element Method Investigations [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(3/4): 266-276.
- [13] JEOM K P, JUNG M S. Effects of Welding Residual Stresses on High Tensile Steel Plate Ultimate Strength: Nonlinear Finite Element Method Investigations [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2012, 134(2): 21401.
- [14] ESTEFEN T P, ESTEFEN S F. Buckling Propagation Failure in Semi-submersible Platform Columns [J]. Marine Structures, 2012, 28(1): 2-24.
- [15] CHEON J S, JANG B S, YIM K H, et al. A Study on Slamming Pressure on a Flat Stiffened Plate Considering Fluid-structure Interaction [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(2): 309-324.

- [16] HUO F L, YAO Z, ZHANG J, et al. Strength Analysis on Brace Structure for Semi-submersible in Consideration of Wave Slamming[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(5): 536-545.
- [17] 张健, 沈中祥, 王自力, 等. 腐蚀损伤对深海半潜式平台结构极限强度的影响研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(11): 1283-1290.
- ZHANG Jian, SHEN Zhong-xiang, WANG Zi-li, et al. Influence Research of Ultimate Strength to Deepwater Semi-submersible Platforms Structure Under Corrosion Damage[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(11): 1283-1290.
- [18] 嵇春艳, 张赞, 元志明. 半潜式平台全寿命期极限强度随机预报方法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 8-12.
- JI Chun-yan, ZHANG Yun, YUAN Zhi-ming. Stochastic Prediction Method of Ultimate Strength of Semi-submersible Platforms in Total Life Cycle[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(1): 8-12.
- [19] 嵇春艳, 于雯, 黄山, 等. 半潜式平台关键结构全寿命期极限强度预报方法研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(5): 566-573.
- JI Chun-yan, YU Wen, HUANG Shan, et al. A Prediction Method of the Ultimate Strength of Key Components of Semi-submersible Platforms in Total Life Cycle[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(5): 566-573.
- [20] 张彤彤, 陶沙, 吴健. 海洋平台上层建筑振动传递仿真及试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 198-202, 263.
- ZHANG Tong-tong, TAO Sha, WU Jian. Simulation and Experimental Research of Vibration Transmission of Offshore Platform Superstructures[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 198-202, 263.
- [21] 章鹏, 曹金凤. 强台风作用下在役导管架海洋平台安全性评价[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(12): 60-64.
- ZHANG Peng, CAO Jin-feng. Safety Evaluation of Jacket Offshore Platform in Service Under Strong Typhoon[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(12): 60-64.
- [22] 刘红兵, 陈国明, 吕涛, 等. 大型海洋石油平台风振响应[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 647-655.
- LIU Hong-bing, CHEN Guo-ming, LYU Tao, et al. Wind-induced Response of Large Offshore Oil Platform[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 647-655.
- [23] 谢伟. 海洋平台的尺寸控制分析[J]. 电焊机, 2018, 48(11): 71-77.
- XIE Wei. Analysis of Size Control of Offshore Platform[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 71-77.
- [24] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [25] 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.
- [26] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.