

多功能施工平台 在恶劣环境荷载下结构动力响应

许磊磊^{1,2,3}, 杨秀礼^{1,2,3}, 徐杰^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430014;
3. 公路长大桥梁建设国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014)

摘要: 自升式多功能施工平台结构刚度小, 受近海大波浪、长周期涌浪等恶劣荷载影响, 结构动力响应剧烈。结合线性化的莫里森方程和随机波浪理论, 以自升式多功能施工平台为原型, 利用 ANSYS 有限元软件分别对平台模型进行了模态分析和瞬态动力响应分析, 得到了平台结构的频率特性和振动特性, 为平台的安全性和可靠性评估, 以及如何控制平台结构的振动响应提供了理论基础。

关键词: 自升式; 施工平台; 随机波浪; 动力学

中图分类号: U 656.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)08-0012-05

Structure dynamic response of multi-functional construction under unfavorable environment load

XU Lei-lei^{1,2,3}, YANG Xiu-li^{1,2,3}, XU Jie^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Key Lab of Large-Span Bridge Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Wuhan 430014, China;

3. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: The stiffness of jack-up construction platform structure is weak, by offshore large waves and long period of time of swell, the structure produces a violent dynamic response. Based on the linearized equation of Morrison and random wave theory and using ANSYS finite element software, we carry out the modal analysis and transient dynamic response analysis, by which we obtain the frequency characteristics and vibration characteristics. The result provides a theoretical basis for the safety and reliability of evaluation platform, as well as control of the vibration response of the platform structure.

Keywords: jack-up; construction platform; random wave; dynamics

跨海大桥和沿海码头建设面临深水施工的问题, 而解决深水施工的关键就是要修建临时的海上施工平台, 传统的施工平台通常是一次性的临时设施, 人力、物力耗费大, 重复利用率低; 且海上施工平台搭设面临长周期涌浪、大波浪等恶劣条件, 给水上船舶施工造成极大困难, 难以利用打桩船进行桩基施工。而海上自升式多功能施工平台可以利用合适的气象窗口, 通过船舶运输

到作业位置, 快速形成施工平台, 实现全天候海上作业, 有力保障工程施工建设。

该种海上自升式多功能施工平台与传统的施工平台有着较大的区别, 自升式多功能施工平台底部接近铰接, 因此平台结构柔性更大、频率更低、振动幅度更大, 加之近海作业, 面对大波浪、长周期涌浪, 海洋环境恶劣, 故平台结构振动响应更加剧烈, 因此对该施工平台动力振动响应特

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 许磊磊 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程、水工工程及大型装备研发工作。

性的研究显得十分重要。

本文综合考虑海流载荷、波浪载荷、风载等环境载荷, 结合莫里森方程和随机波浪理论, 以自升式多功能施工平台为原型, 利用 ANSYS 有限元软件建立三维有限元模型。在此基础上分别对平台模型进行模态分析和环境载荷作用下的动力响应分析, 得到了平台结构的频率特性和振动特性, 为平台的安全性和可靠性评估, 以及如何控制平台结构的振动响应提供了理论基础。

1 自升式多功能施工平台介绍

自升式多功能施工平台为四桩腿形式, 平台由桩腿、平台框架梁及面板组成, 顶升油缸设置在工作平台的 4 个角点位置, 分别控制 4 根桩腿完成沉桩及拔桩作业。在平台月池内或弦外加装导向模块, 可以打入直桩、斜桩或钻孔等, 另可兼做起重平台。施工平台总体布置见图 1。

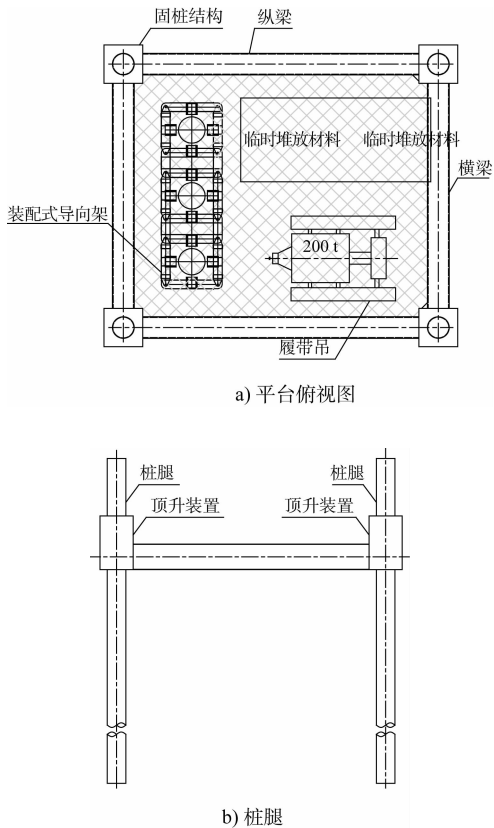


图 1 自升式多功能施工平台布置

2 环境荷载作用的运动方程

在波浪、海流力的作用下平台结构的基本动

力方程可以用如下二阶微分方程表示:

$$\mathbf{M} \times \mathbf{X}'' + \mathbf{C} \times \mathbf{X}' + \mathbf{K} \times \mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别是平台的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{X}'' 、 \mathbf{X}' 、 \mathbf{X} 分别为平台的加速度、速度和位移向量; $\mathbf{F}(t)$ 为施加在平台上的波流载荷向量。

根据平台结构的基本动力方程, 只需要计算出作用在平台上的波流力就可以求出平台的加速度、速度和位移等动力响应。但是实际情况下, 一般的平台结构较为复杂, 难以给出施工平台的质量、阻尼和刚度矩阵, 并且求解该动力方程, 需要求解极其复杂的二阶微分方程。故本文利用通用有限元软件 ANSYS 建立平台有限元模型, 并利用莫里森方程和随机波浪理论计算出随时间变化的波流力, 直接求出平台的动力响应。

3 随机波浪荷载

波浪荷载是一种随机荷载, 为了更准确地描述平台在波浪荷载下的响应, 计算波浪力的时候必须考虑荷载的随机性, 本文通过谱分析法对海浪谱进行描述。随机波浪力可以看做是由很多简谐运动波叠加而成的一个平稳随机过程, 输入到结构系统中, 通过该系统对输入施行某种变化, 得到相应的输出, 变为另一随机函数^[1]。作用在桩腿上的波浪力必须采用线性化的 Morison 方程。

采用斯托克斯五阶波浪理论, 即可确定波浪自由表面方程和响应的流体质点速度和加速度, 且均为关于时间 t 的函数。考虑桩腿直径与波长相比为小尺度结构物, 按结构与流体的相对运动速度表示的 Morison 方程为:

$$\mathbf{F}_H = \int_0^{d+\eta} \left(\frac{1}{2} C_d \rho D |\mathbf{u}| \mathbf{u} + \frac{1}{4} C_m \rho \pi D^2 \mathbf{a} \right) dz \quad (2)$$

根据线性波理论可得随机波面高程与波浪速度时程和波浪加速度时程的关系如下:

$$\begin{cases} u(z, t) = \omega \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \eta(t) \\ a(z, t) = \omega^2 \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \eta(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： u 为波浪速度时程； a 为波浪加速度时程； k 为波数； z 为计算点高度； d 为水深。

根据随机波浪理论，波浪高程可以表达为^[2]：

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (4)$$

式中： M 为参与叠加谐波的个数； k_i 为第 i 个组成波的波数； a_i 为第 i 个组成波的振幅； ω_i 为第 i 个组成波的圆频率； ε_i 为第 i 个组成波在 $(0, 2\pi)$ 范围内的随机初相位。

随机波浪采用波浪谱模拟，波浪谱的选择直接决定了组成谐波的频率和振幅。设模拟波浪的能量绝大部分集中在 (ω_0, ω_n) ，将该频率区间进一步等分为 M 个区间，则可得如下表达式：

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^M \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega_i} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (5)$$

式中： $\Delta\omega$ 为频率步； ω 为各频率区间均值； $S(\omega)$ 为波浪功率谱； ω_i 为第 i 个组成波的代表频率。

基于上述分析过程，在给定功率谱的条件下，可得随机波面高程变化时程。

4 算例

4.1 波浪力计算

以正在研发的、为南美地区某工程服务的自升式多功能施工平台为对象，研究其在恶劣风浪条件下的动力响应。平台参数为：平台总质量1486 t，工作水深20 m，桩腿直径1.6 m。风浪参数为：有义波高3 m，周期10 s。

根据平台及波浪参数，曳力系数 C_d 取1.2；惯性力系数 C_m 取2.0^[3]；不考虑群桩效应。本文的海浪谱采用规范谱进行分析。

$$S(\omega) = \frac{0.74}{\omega^5} \exp\left(-\frac{2.45}{\omega^2 H_{1/3}}\right) \quad (6)$$

根据平台参数和风浪参数，可得波浪谱（图2），作用在单个桩腿上的随机波浪力的时域仿真结果见图3。

4.2 施工平台有限元模型

采用通用大型有限元软件建立平台有限元模型。由于本文主要研究平台在恶劣环境荷载条件

下的振动特性，而不关注局部受力，因此采用beam188单元建立平台框架结构，平台上吊车、临时堆放材料等采用mass21单元模拟（图4）。

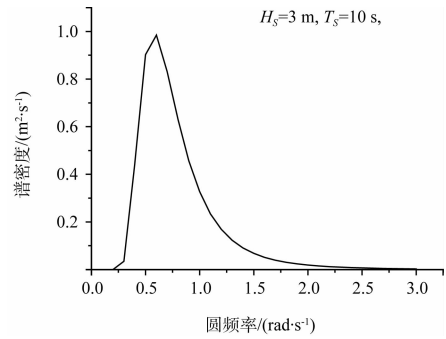


图2 波浪谱

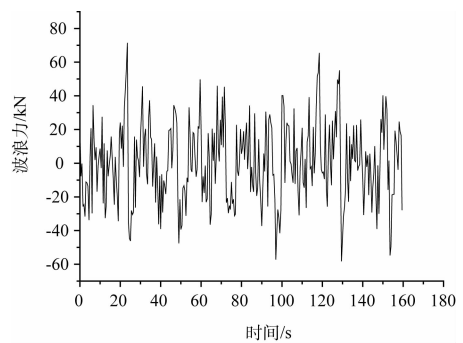
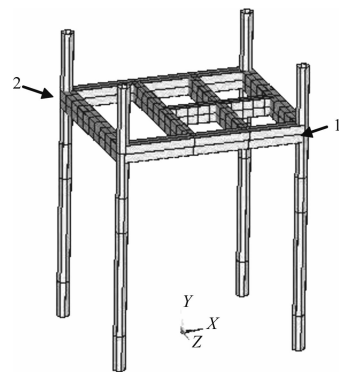
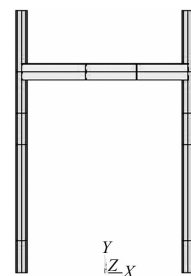


图3 随机波浪力



a) 施工平台



b) 桩腿

图4 有限元模型

4.3 结构模态分析

利用上述模型, 对平台进行模态分析, 提取前 10 阶模态, 结果见表 1。平台结构前 3 阶振型见图 5。

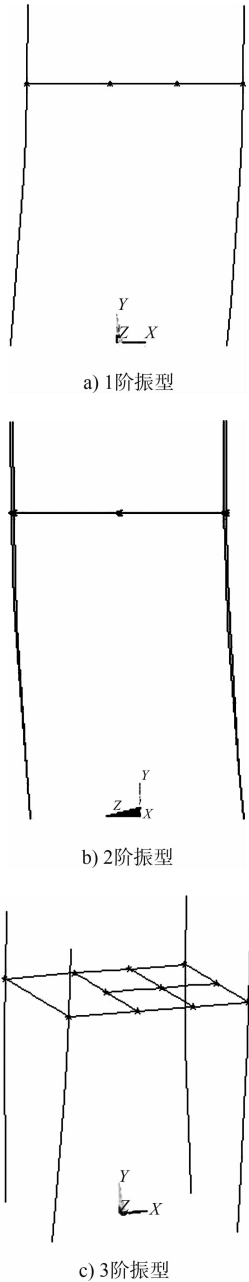


图 5 平台结构前 3 阶振型

表 1 平台结构模态分析结果

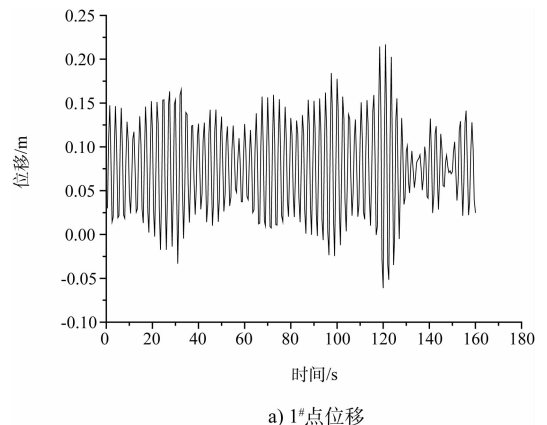
阶次	频率 f/Hz	阶次	频率 f/Hz
1	0.457	6	5.399
2	0.460	7	6.232
3	0.578	8	6.848
4	3.798	9	7.942
5	5.267	10	7.958

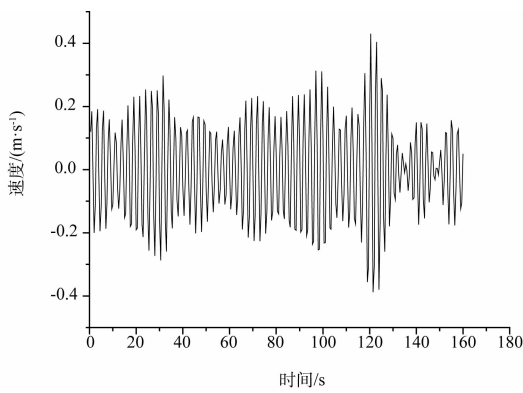
模态分析反映了结构自身的固有特性, 是进行结构动力分析的基础。根据结构模态计算得到结构自振频率可知: 1) 施工平台前 3 阶振动频率与高阶振动频率相比较低, 且与传统平台的低阶频率相比也大幅降低, 说明结构具有较大的柔性; 2) 平台 1 阶振型主要沿纵向方向, 2 阶振型沿平台横向, 3 阶振型沿平台平面扭转, 说明由于桩腿原因, 平台整体刚度较弱; 4 阶以后的高阶频率突增, 且变形主要是框架梁横向与竖向变形, 说明平台在框架梁平面内的刚度较强; 3) 平台设计时应充分考虑平台自振特性及刚度分布, 优化结构设计。

4.4 瞬态动力学分析

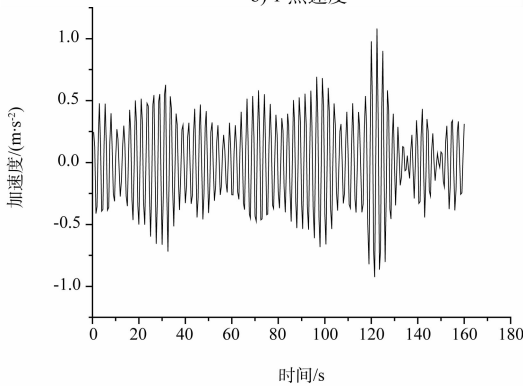
根据模拟出的随机波浪力, 利用 ANSYS 进行数值仿真瞬态分析, 得到多功能施工平台在随机波浪荷载作用下的振动响应。仅给出浪向沿 x (纵向) 方向时, 对平台结构的影响。选取施工平台对角 (1[#]、2[#]) 为监测点, 结构响应见图 6 (风荷载、流荷载沿 x 方向)。

通过平台角点动力响应可以看出: 1) 在随机波浪力、水流力、风荷载作用下, 平台 x 向最大位移达到 251 mm; 采用传统静力计算平台最大 x 向位移为 93 mm。动力计算值约为静力计算值的 2.7 倍, 说明结构与随机波浪力在一定程度上发生了共振, 后续结构设计应采取措施, 改变平台刚度。2) 平台最大速度响应和最大加速度响应分别为 0.43、1.1 m/s^2 (约 0.1g), 在这种条件下, 会明显感到平台晃动, 引起不适, 且有可能对作业设备的安全施工带来不利影响。

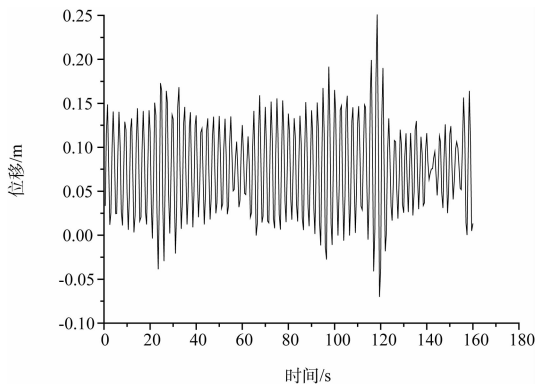




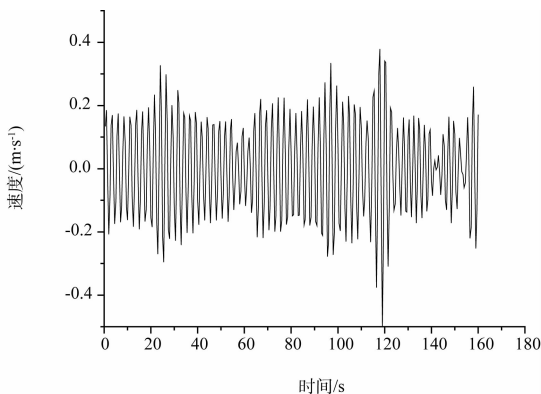
b) 1#点速度



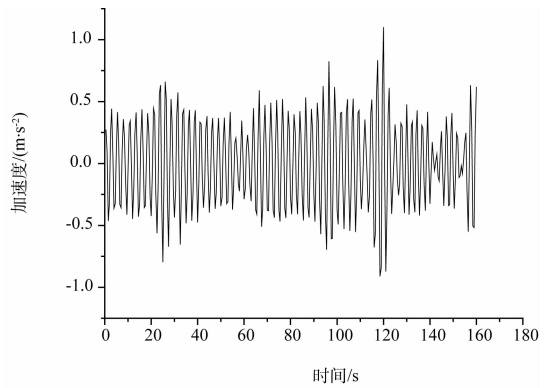
c) 1#点加速度



d) 2#点位移



e) 2#点速度



f) 2#点加速度

图6 结构响应

5 结语

1) 该种新型平台与传统施工平台相比, 柔性更大、频率更低; 特别是前3阶振型频率在0.4~0.6, 结构刚度较弱。

2) 平台位移响应大, 峰值达到251 mm, 平台最大速度响应和最大加速度响应分别为0.43 m/s、1.1 m/s², 与环境荷载存在共振, 需要采取措施加强结构刚度。

3) 对于在海洋恶劣环境条件下工作的施工平台, 必须进行动力学分析, 在设计过程中应充分考虑平台刚度。

参考文献:

[1] 周丹, 肖盛燮, 杜逢彬. 波浪荷载作用下施工平台随机动力响应分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008(3): 370-373.

[2] 陈小波. 随机风浪荷载作用下近海风机塔架动力响应分析[J]. 人民长江, 2013(9): 75-78.

[3] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册(中)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

[4] 嵇春艳, 刘聪. 随机波浪荷载作用下深水自升式海洋平台动力响应分析[J]. 造船技术, 2012(5): 27-31.

(本文编辑 武亚庆)