

海洋平台动力响应分析研究进展及展望

王琳琳 祁德庆

(同济大学建筑工程系, 上海 20092)

摘 要 对作为海洋工程研究难点的海洋平台的动力响应分析问题的研究现状进行了较全面的综述。首先对平台结构的模型化、桩 - 土相互作用的模型化两个海洋平台动力响应分析中最重要的建模问题进行了讨论, 然后介绍了动力方程中波浪荷载的计算及动水阻尼线性化的方法, 并给出了地震、波浪联合作用下海洋平台动力响应分析的动力方程, 最后对该研究领域中有待深入研究的问题提出了作者的观点。

关键词 海洋平台, 动力分析, 桩 - 土相互作用, Morison 公式, 动水阻尼线性化

Research Advances and Prospect on Dynamic Analysis of Offshore Structures

WANG Linlin QI Deqing

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract This paper presents a research advance of dynamic analysis of offshore structure, which is a complicated research focus of ocean engineering. A review of modeling of platform and modeling of pile-soil dynamic interaction are summarized in this paper. Calculation of wave load and linearization of hydrodynamic damp for dynamic analysis of offshore structure are also discussed. The motion equation of offshore structure under simultaneous loading by wave load and earthquake motion is introduced, and the future development trend of this issue is discussed.

Keywords offshore structure, dynamic analysis, pile-soil dynamic interaction, Morison equation, linearization of hydrodynamic damp

1 引 言

1946 年, 美国在墨西哥湾离岸 8 km, 水深仅有 5.8 m 的地方建造了世界上第一座近海钻井平台。20 世纪 60 年代, 欧洲对北海地区的石油进行了大规模开采, 当地恶劣的环境条件对海洋平台的发展起到了强大的推动作用。随着海洋开发活动向更深的海域发展, 面临的环境条件愈益严酷, 海洋平台的动力效应也愈发显著, 传统的静态分析方法已经不能满足海洋平台的设计制造要求。因此, 对海洋平台的动力响应分析几十年来一直是海洋工程的研究热点。

与陆上建筑物相比, 海洋平台是一个复杂的

结构 - 桩 - 土 - 流耦合体系, 其所处的环境也更加恶劣。因此, 对海洋平台的动力响应分析具有其特殊性和复杂性: 它涉及多个系统 (结构、流体、地基土), 包括多种激励 (波浪、海流、地震、风激), 而且还存在由于系统间的相互耦合 (流体 - 结构的相互作用、桩 - 土的相互作用) 而引起的非线性问题。正是由于非线性和多种环境力共同作用这两个海洋平台动力响应分析的基本特征, 使得这一问题几十年来一直是海洋工程中最为复杂的问题之一。1964 年, 为解决在沼泽地带建设大跨度桥梁的设计问题, Pezzen^[1] 采用集中质量模型模拟桩 - 土动力相互作用的影响, 提出了耦联的非线性分析方法对地震作用下的桩 - 土 - 桥梁结构系统进行了动力分析。虽然, Pezzen 的分

收稿日期: 2008 - 01 - 08

析对象是桥梁,但是他考虑了桩 - 土相互作用、流体 - 结构运动相互耦合的综合性分析方法,正是解决海洋平台动力响应这一综合性问题的基本思路。1972年, Pezlen 和 Kaul^[2]将这一方法应用到导管架海洋平台的地震反应分析上,很好地证明了这一点。有限元方法的成熟和电子计算机速度的提升,对海洋平台的动力响应分析这一复杂问题的解决尤其是其非线性的求解产生了深远的影响。几十年来一直困扰这一课题的很多难题(如非线性的动力分析、空间复杂结构的模型化)都得到了很大程度上的解决。本文拟对海洋平台动力响应分析中建立分析模型及动力方程两个基本过程中所遇到的关键问题加以介绍与讨论。

2 海洋平台动力响应分析模型

2.1 平台结构的模型化

海洋平台是一种巨大的空间框架,往往包括几千个自由度。早期的研究者建模时主要考虑的问题是如何缩减平台庞大的自由度数,以节省计算时间。最早的模型是单质点模型,它忽略了结构几乎所有的细节。文献[3]采用堆聚质量法把每层的质量堆聚到该层的形心位置上,将平台等效为串联多自由度体系。针对堆聚质量法无法考虑平台空间振型的问题,文献[4]采用自由度凝聚法来减少运动方程的个数。

随着计算机和有限元方法的发展,平台结构建模技术进入了其崭新的发展阶段,从而出现了许多具有代表意义的平台结构模型,如二维有限元模型^[2]、三维有限元模型^[5]等。平台结构的计算模型越来越精细,研究者也可以在建模中考虑更多的非线性因素,诸如材料的非线性、几何非线性等。目前,对平台结构的建模在理论上已基本不存在障碍,因此对分析模型的选择成为一个重要的问题。鉴于海洋平台动力响应分析本身的复杂性,动力计算将消耗大量的时间,因此在满足分析精度要求的前提下选择适当的计算模型既能减少工作量,又能反映平台真实的动力特性,将是研究者需要认真考虑的。目前,平台结构建模通用的做法是采用梁单元、管单元与平面单元模拟甲板结构,平台上层的建筑物、设备等用质量单元模拟。

2.2 桩 - 土动力相互作用的模型化

当对海洋结构进行地震动力响应分析时,必

须考虑地基土的变形性,即桩 - 土动力相互作用的问题。Pezien 和 Kaul^[2]在最早的论文中就引入了地基阻抗函数考虑了桩 - 土动力相互作用。1980年, Angelides^[6]等人以一系列阻尼器和弹簧来模拟桩 - 土的动力相互作用。目前,应用较多的桩 - 土动力相互作用的模型主要有等效桩和集中参数模型。对于两种模型的比较,文献[7]分别采用等效桩法和集中质量模型对平台结构进行了动力响应分析,结果表明采用集中参数模型的结构动力响应比采用等效桩法的相应要小,两者差异在 30% 以上。

2.2.1 等效桩法

由于其操作的简单性,目前规范中一般都采用等效桩法来考虑桩 - 土动力相互作用。该方法把插在土中的桩用一段下端固定于刚性地基的等效桩来代替,等效桩的长度由模型与实际的桩 - 土耦合体系具有相同的刚度特性来确定。文献[8]通过与实验结果的对比,证明了等效桩法的合理有效性。但是,由于土的非线性,等效桩的刚度特性一般是荷载的函数。因此,等效桩法只能模拟所选定的荷载附近很小范围内的桩 - 土耦合特性。另外等效桩也无法模拟在地震作用下土体所表现出的阻尼特性,包括土体的滞回阻尼和地震波向远场散逸所产生的辐射阻尼。

2.2.2 集中参数模型

集中参数模型的实质是将地基动力刚度(土在相互作用中的动力表现)等效为一质量 - 弹簧 - 阻尼系统。该模型主要包括三个部分:桩、等价土体、自然地基体系。对于桩,可以用离散的质点串或连续梁来模拟;远离结构物的地基称为自然地基,它不受到结构存在的影响,将其简化为半无限刚体。等价土体(参振土体)定义为桩周围与桩具有相同振动的土体,考虑土体的变形性,是桩 - 土动力相互作用分析中重要的一部分。对于等价土体的模拟有很多模型,目前在工程采用的最广泛的是 Winkler 模型(1867)。在该模型中,等价土体由一系列非耦合的弹簧、阻尼器来模拟,弹簧的材料特性可以是线性或非线性的。因此,动力 Winkler 分析模型可以考虑土体的分层和非线性,在海洋平台的动力响应分析中得到了广泛的引用。集中参数模型的示意图见图 1。

集中参数模型最关键的问题在于确定弹簧的刚度系数和阻尼器的阻尼系数。利用实验得到的 $P - y$ 曲线来求弹簧的刚度系数是目前最常用的

方法,或者也可以采用 Gazetas, Dobry 和 Markins 等^[9]给出的经验表达式。

对水平受力桩:

$$K = 1.2 E_s \quad (1)$$

$$C = 6 \cdot 0^{-1/4} \cdot V_s d + 2 \cdot \frac{K}{s} \quad (2)$$

对竖向受力桩:

$$K = 0.6 E_s (1 + 0.5 \sqrt{0}) \quad (3)$$

$$C = 0^{-1/4} \cdot V_s d + 2 \cdot \frac{K}{s} \quad (4)$$

式中, $\omega = d/V_s$ 为无量纲频率; s 为土体密度; γ_s 为土体阻尼系数; V_s 为剪切波速。

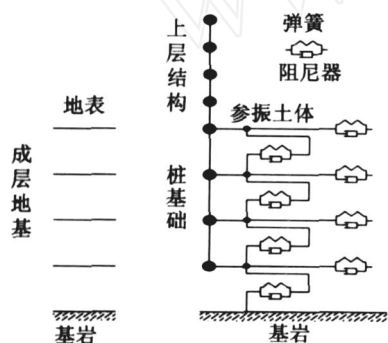


图 1 桩-土动力相互作用的集中参数模型

Fig 1 Lumped parameter model for pile-soil dynamic interaction analysis

3 海洋平台动力响应分析的动力方程

海洋平台在服役期间通常会受到风、波浪、海流、地震等动力作用。对于海洋工程结构来说,风荷载在总荷载之中所占比重一般小于 10%;海流通常被认为不随时间变化 ($\dot{u} = 0$) 但随水深而变化,因此在 Morison 公式中不显含惯性阻力项,处理上也比较简单。对海洋平台动力响应分析考虑最多的是波浪和地震两种荷载。

3.1 波浪力的计算

海洋平台一般是群桩结构,因此主要采用 Morison 公式计算其波浪力。作用于圆柱上的 Morison 公式一般表示为^[10]

$$f = \frac{D^2}{4} C_M \dot{u} + \frac{1}{2} D C_D |u| |u| \quad (5)$$

式中, C_D 为法向拖曳力系数; C_M 为惯性系数; ρ 为流体密度; u 为流体速度。

对于 Morison 公式中流体质点速度和加速度

的确定,可以用波浪谱或者经典的波浪理论来确定结构周围的水动力场。关于各种波浪理论,大体可以分为线性波和非线性波两类。对于给定条件下选用什么样的波浪理论,这是需要考虑的一个重要问题。遗憾的是,评价各种波浪理论的依据很多,现在作为一个共同的基准还没有统一的意见。Dean, Le Mehaute 对这一问题展开了研究,并给出了各种波浪理论的适用范围^[11]。

使用 Morison 公式的另一个重要问题就是两个阻力参数 C_M 和 C_D 的确定。一般认为, C_M 和 C_D 是 R_e , K_e 及柱体表面粗糙度的函数。1981 年, Sarpkaya 和 Isaacson 对这一问题进行了杰出的综述^[12]。文献 [13] 采用了简化的计算公式,仅考虑 R_e 对两个系数的影响。需要注意的是, Morison 公式计算波浪力时, C_D , C_M 与 R_e 有关,而 R_e 中又包含结构的速度项,因此需要采用迭代法来求解动力方程,但这样将非常费时。考虑到两个系数比较集中,一般的处理方式是直接取一个固定值。

海洋平台通常是群桩结构,由于波浪传播过程中的相差,桩群中各个单桩所受的波浪力极值也将出现相差。另外,桩与桩之间形成的实体性及遮帘性对场的影响在 Morison 公式中也未考虑^[14]。因此,在海洋平台动力响应分析中,应该考虑群桩效应。

3.2 考虑波浪、地震联合作用下的平台动力方程

在对海洋平台结构进行动力响应分析时,平台结构本身也是振动的。很多时候研究者都假定平台的振动速度和加速度相对于流体的速度和加速度很小,从而直接采用流体的绝对速度和加速度来计算波浪力^[15]。但是, Penzien, Kaul 的研究表明:对于柔性结构,结构运动速度和加速度的大小可能分别与流体质点的速度与加速度具有相等的量级。因此,在应用 Morison 公式计算波浪力时,必须考虑采用流体质点对于结构的相对速度和加速度。

考虑波浪、地震联合作用下的平台动力方程可以表示为

$$[M + M_a] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -[M + M_a] \{\ddot{x}_g\} + \{f_H\} \quad (6)$$

$$\{f_H\} = C_M [V] \{\dot{u}\} + \frac{1}{2} C_D [A] \cdot$$

$$\{|u - \dot{x} - \dot{x}_g| (u - \dot{x} - \dot{x}_g)\} \quad (7)$$

式中, x , \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为结构节点相对于地面的相对位移、相对速度和相对加速度。

鉴于海洋平台所处环境的特殊性, 动力方程中的质量矩阵除考虑结构本身的质量和附加水质量之外, 还需要考虑海生物附着增加的质量, 一般取 20 ~ 25 kg/m; 另外一个需要考虑的质量因素是附加地基土质量, 附加地基土质量与附加水质量相似, 是由于结构运动而带动周围一部分土体质量随之运动而引起的^[16]。

平台在水中振动所受到的阻尼力主要有结构阻尼、土壤阻尼、辐射阻尼、粘性动水阻尼四种形式。其中, 后两种阻尼又统称为动水阻尼。对动水阻尼的处理是一个很复杂的问题, 很多学者对此进行了专门研究。文献 [17] 指出动水阻尼对波浪响应的影响较为显著, 而对不太强烈的地震响应则影响甚微, 可以不予考虑。也有些研究者考虑海洋平台构件的直径较小, 从而忽略辐射阻尼, 仅考虑拖曳阻力项^[16]。日本的 Yamada 等人分析指出在地震和波浪同时作用下的动力响应由于动水阻尼的影响有时会比地震单独作用时的反应要小^[18]。

3.3 动水阻尼的线性化

由 3.2 节得到的动力方程不难看出, 由于拖曳力是速度的平方项以及需要考虑波浪与结构运动的相互耦合, 将会使动力微分方程成为非线性的。然而, 动力分析方法中的振型叠加法和谱分析方法都是基于叠加原理进行求解的, 在理论上只适用于线性系统。对于这一问题, Borgman 进行了开创式的研究, 给出了一个线性化的 Morison 公式^[19]。随后, 一大批学者对这一问题进行了广泛的研究, 提出了很多线性化的方法。Deleuil 等对海洋平台进行动力响应分析中应用二阶谱分析方法来近似考虑波浪力中的非线性拖曳力^[20]。目前, 对于波浪力中的拖曳阻力项, 一般采用两种方法将其线性化。

第一种方法为等效阻力法, 该方法直接对二次的拖曳阻力项线性化:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} C_D A |u - \dot{x} - \dot{x}_g| (u - \dot{x} - \dot{x}_g) \\ &= \frac{1}{2} A C_{Df} (u - \dot{x} - \dot{x}_g) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, f 为阻力线性化因子, 按照曲线拟合的最小二乘原理求得。

第二种方法是先将拖曳力中的速度平方项展开:

$$\begin{aligned} & |u - \dot{x} - \dot{x}_g| (u - \dot{x} - \dot{x}_g) \\ &= |u - \dot{x}_g| (u - \dot{x}_g) - 2 |u - \dot{x}_g| \dot{x} + |\dot{x}| \dot{x} \quad (9) \end{aligned}$$

假设结构振动的速度远小于流体质点相对于地面的速度, 即 $|u - \dot{x}_g| \gg |\dot{x}|$, 从而忽略结构振动速度的平方项 ($|\dot{x}| \dot{x} = 0$), 得到:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} C_D A |u - \dot{x} - \dot{x}_g| (u - \dot{x} - \dot{x}_g) \\ &= \frac{1}{2} A C_D |u - \dot{x}_g| (u - \dot{x}_g) - C_D A |u - \dot{x}_g| \dot{x} \end{aligned} \quad (10)$$

由前面对流体 - 结构的相互作用一节的讨论可以看出, 实际的结构运动速度和加速度的大小可能分别与流体质点的速度与加速度具有相等的量级, 因此第二种方法的假设并不正确, 绝大部分对动水阻尼的线性化均采用第一种方法。文献 [21] 指出线性化的 Morison 公式计算结果比原始的 Morison 公式的要小, 值得我们注意。

4 展 望

对海洋平台的动力分析, 是一个综合性问题, 它涉及到结构动力学、流体力学、土动力学、波浪理论等诸多学科, 因此它的发展离不开其中每个子问题在各自领域的发展。由于有限元方法和计算机的发展, 对海洋平台动力响应分析的研究几十年来取得了很大的进展, 但在很多方面仍需要展开进一步的研究, 包括:

- (1) 如何有效地确定集中参数模型中弹簧和阻尼器参数的具体数值以及等价土体的适当体积和质量;
- (2) 对多种环境力联合作用下或极端条件下的动力响应分析研究;
- (3) 涡激振动引起的海洋平台的疲劳问题;
- (4) 考虑波流的相互作用对动力响应分析结构的影响。

参考文献

- [1] Peizien J. Seismic analysis of bridges on long piles [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1964, 90 (EMS): 223-254.
- [2] Penzien J, Kaul M K. Response of offshore towers to strong motion earthquakes [J]. Earthquake

- Engineering and Structural Dynamics, 1972, 1: 55-68
- [3] 俞载道, 陈路, 傅公康. 固定式海洋平台的抗震分析 [J]. 同济大学学报, 1984, 4: 1-7.
- [4] 周昌年, 孙复中, 金国斐. 海洋结构地震响应及参数的影响 [J]. 海洋工程, 1985, 3(4): 13-24.
- [5] Pengzien J, Tseng W. Three dimensional dynamics analysis of fixed offshore platforms[M] // Zien Kiewicz O C Numerical Methods in Offshore Engineering New York: John Wiley and Sons Ltd, 1978
- [6] Angelides D C, Connor J J. Response of fixed offshore structures in random sea[J]. EESD, 1980, 8: 503-526
- [7] 金伟良, 郑忠双, 李海波. 地震荷载作用下海洋平台结构物动力可靠度分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2002, 36(3): 233-238
- [8] 蔡之端. 桩基海洋平台的动力特性分析与实验研究 [R]. 国家地震局工程力学研究所研究报告.
- [9] 肖晓春, 林皋, 迟世春. 桩 - 土 - 结构动力相互作用的分析模型与方法 [J]. 世界地震工程, 2002, 18(4): 123-130.
- [10] Morison J R, O'Brien M P, Schaff S A. The force exerted by surface waves on piles [J]. Institute of Mining Engineering, 1950, 189: 149-154.
- [11] 邱大洪. 波浪理论及其工程应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [12] Sarpkaya T, Isaacson M. Mechanics of wave forces on offshore structures [M]. Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [13] 曲乃泗. 水中空间结构对随机地震的反应 [J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(1): 61-72
- [14] 李玉成. 波浪对海上建筑物的作用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [15] 何晓宇, 李宏男. 地震与波浪联合作用下海洋平台动力特性分析 [J]. 海洋工程, 2007, 25(3): 18-25.
- [16] 魏巍. 导管架式海洋平台地震破坏状态分析研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [17] 罗传信, 刘春山, 唐红英. 动水阻尼对桩基平台动力响应的影响问题 [J]. 海洋学报, 1989, 11(6): 794-800.
- [18] Yamada Y, Imura H. Seismic response of offshore structures in random seas [J]. EESD, 1989, 18: 965-981.
- [19] Borgman L E. Spectral analysis of ocean wave forces on piling [J]. Proc ASCE, 1967, 93 (ww2): 129-156
- [20] Deleuil G E, Deserts L D. A new method for frequency domain analysis of offshore structures: Comparison with time domain analysis [C]. 18th Annual Offshore Technology Conference, 1986
- [21] 宋金宝, 徐德伦, 孙孚. 计算孤立小桩柱上随机波浪力的一个线性化的 Morison 公式 [J]. 海洋学报, 1997, 19(3): 133-141.

(上接第 120 页)

(1) 与轻型钢架平改坡工程平均 6 个星期的施工周期相比, 木结构“平改坡”工程的时间一般仅为 10 d 左右, 可缩短周期 2/3, 大大节省时间成本。

(2) 木结构“平改坡”工程可避免施工工序繁多, 机械、人工和管理费用较大的问题。

(3) 木结构的节能性能不仅能为住户创造舒适的居住环境, 而且有利于降低能耗成本, 从长远利益考虑可以降低成本。

但是, 木桁架结构体系这种高次超静定的结构使得结构分析非常复杂, 所以许多情况下, 设计上往往采用经过长期工程实践证明的可靠构造做法。因而, 对于目前仍处于应用推广阶段的改进后的轻型木结构“平改坡”工程而言, 仍需要大量的研究分析及实际工程经验积累, 以发现问题并进一步优化结构形式, 使其成为成本低且结构合理的“平改坡”选择方案, 以达到经济安全的双重目的。

同时, 相信随着轻型木结构建筑在我国的推广应用及我国森林资源可持续发展政策的实施, 轻型木结构结构用材的价格将逐渐降低, 造价将不再成为制约其发展应用的因素, 轻型木结构将在“平改坡”工程中显现出更大的优势。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB 50005—2003 木结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [5] 中国建筑标准设计研究院. 03J203 平屋面改坡屋面建筑构造 [S], 2004.