

文章编号:1005-9865(2001)03-0009-05

箱式超大型浮体结构在规则波中的水弹性响应研究

王志军, 李润培, 舒 志

(上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

摘 要:利用三维线性水弹性理论研究了箱式超大型浮体结构在正弦规则波中的动力响应,用 Bernoulli-Euler 梁解析解计算结构在真空中的动力特性,用弹性体三维势流理论计算结构的水动力系数。浮体结构在单位波幅规则波中的刚体运动幅值与 DNV/WADAM 程序的计算结果进行了比较,并给出了垂向弯曲模态的位移、弯矩随波浪频率的变化规律。由于箱式浮体结构的低阶固有频率很低,相应的弹性振型的响应与刚体运动耦合,结构在波浪中没有发现明显的低阶弹性模态谐振。

关键词:箱式超大型浮体结构;水弹性响应

中图分类号:U661.1;U661.4 **文献标识码:**A

Study on hydroelastic response of box-shaped very large floating structure in regular waves

WANG Zhi-jun, LI Run-pei, SHU Zhi

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Three dimensional linear hydroelasticity theory is applied to investigate the dynamic response of a box-shaped very large floating structure (VLFS) in regular sinusoidal waves in this paper. The analytical method of Bernoulli-Euler beam is used to describe the dynamic characteristics of the structure in vacuum, while the three dimensional potential theory of flexible body is employed to calculate the hydrodynamic coefficients. The amplitudes of rigid body motions in regular waves are compared with that worked out by DNV/WADAM programme. The dynamic displacements and bending moments of the vertical bending mode are presented with respect to wave length. No significant resonance of the low flexible body modes is found due to the coupling of the responses among these modes and the rigid body modes.

Key words: box-shaped VLFS; hydroelastic response

随着地球上人口的急剧膨胀、生态环境的恶化和自然资源的日益枯竭,人类为了自身的生存和发展,不断进行着拓展生存空间和寻求新资源的努力。外层空间探索固然是一种途径,但它毕竟离我们太遥远。占地球总面积 71% 的海洋中蕴藏着丰富的自然资源,因此,国际海洋工程界掀起了应用超大型浮体结构进行海洋空间利用和海洋资源开发的热潮。

超大型浮体结构通常有两种结构型式,箱型 (pontoon type 或 box type 或 mat-like) 和半潜式 (semi-submersible type)。箱型浮体结构由于构造简单,建造成本和维护费用较低,一般可用于靠近海岸的平静水域,日本的浮动机场就是采用这种结构型式。而它在波浪中的运动性能,可以通过在其外围建造防波堤来改善^[1,2]。

箱式超大型浮体结构的长度一般达到数公里,而其型深仅有几米或十几米,因此它是一个十分扁平的海洋结构物,结构的相对刚度大大下降,它在海洋环境中的弹性响应必须考虑。传统方法分析结构在波浪上运

收稿日期:2001-02-20

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50039010)

作者简介:王志军(1966-),男,江苏东台人,讲师,博士研究生,主要从事船舶与海洋工程结构力学研究。

动和受力时,结构的弹性变形与刚体运动位移相比可以忽略不计,因此,结构可以作为刚体来计算。而对于长度达数公里的超大型浮体结构,其弹性变形与刚体位移相当,甚至有可能超过刚体位移,因此基于刚体运动假设的传统水动力理论不再适用于超大型浮体结构,必须应用 70 年代末期发展起来的水弹性理论进行分析。本文应用三维线性水弹性理论分析了箱式超大型浮体结构在单位波幅规则波中的刚体运动和垂向弯曲模态的动力响应。

1 三维水弹性力学基本方程

当作用于结构上的作用力仅为流体压力时,结构在规则波中运动和变形的频域主坐标方程为^[3]:

$$[-\omega^2([a] + [A]) + i\omega([b] + [B]) + ([c] + [C])]\{p\} = \{\Xi\} \quad (1)$$

式中: $[a]$ 、 $[b]$ 、 $[c]$ 分别为干结构广义质量、广义阻尼和广义刚度矩阵;

$[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 分别为广义流体附加质量、广义附加阻尼和广义流体恢复力系数矩阵;

$\{\Xi\}$ 为广义波浪激励力列阵;

$\{p\}$ 为广义主坐标列阵。

假定结构周围的流体为均质不可压缩无旋的理想流体,其流场可由速度势表达。采用右手平衡坐标系,假设浮体结构的航速为零,非定常速度势可表示为:

$$\phi(x, y, z) = [\phi_I(x, y, z) + \phi_D(x, y, z) + \sum_{r=1}^m p_r \phi_r(x, y, z)] e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中: ω 为波浪频率; ϕ_I 、 ϕ_D 分别为入射波和反射波速度势; ϕ_r 为第 r 阶单位幅值辐射波速度势, $r = 1, 2, \dots, 6$ 时为刚体运动产生的辐射势, $r = 7, 8, \dots, m$ 时为结构弹性变形产生的辐射势。

ϕ_D 、 ϕ_r 应满足如下边界条件:

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 & \text{流域内} \\ -\omega^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 & \text{自由表面上} \\ \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} & \text{物面上} \\ \frac{\partial \phi_r}{\partial n} = i\omega \vec{u}_r \cdot \vec{n} & \text{物面上} \\ \text{海底边界条件及无穷远辐射条件} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\vec{u}_r = u_r \vec{i} + v_r \vec{j} + w_r \vec{k}$ 为第 r 阶刚体运动或弹性变形模态的位移矢量; $\vec{n}$ 为物面外法线单位向量,入射波为单频规则波。

求解上述运动方程后,结构的动位移和弯矩为:

$$\begin{cases} w(x, t) = \sum_r w_r(x) p_r e^{i\omega t} \\ M(x, t) = \sum_r M_r(x) p_r e^{i\omega t} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $w_r(x)$ 、 $M_r(x)$ 分别为结构的位移振型和弯矩振型。

2 数值计算结果

1999 年 8 月日本在神奈川县横须贺港海面上建成了一个海上浮动机场,该结构的型深仅 3m,吃水为 1m。对这样一个超浅吃水的浮体结构,用三维势流理论计算水动力时,为了保证适当的湿表面面元长宽比,其计算花费是十分巨大的。为此,本文所给算例的箱式浮体结构的吃水加大到 5m,主尺度和剖面特性见表 1。由于将箱式超大型浮体结构简化为一根均匀梁可以较好地描述结构的低阶垂向弯曲模态,因此结构的干固有频率、广义质量可用这种简化方法计算^[3,4]。为了充分反映箱式超大型浮体这种新型结构在波浪中的动力特性,本文从低频到高频共计算了 115 个波浪频率,涵盖了较宽的频率范围(一些特别低频和高频的波浪实际上并不存在),从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 共计算了 7 个浪向。对箱式超大型浮体结构的前三阶弹性振型而言,由于其干结构固有频率很小以及弹性振型和刚体运动的耦合作用(在该区域,波长 λ 与浮体结构长度 L 同量

级),计算给出的湿谐振现象不明显,由谐振峰来确定湿谐振频率就不甚可靠。这种奇特的现象会在相对刚度特别小的结构上出现,结构也未在这些湿谐振频率处发生谐振^[5]。

表1 箱式超大型浮体结构主尺度和剖面参数

Tab.1 The principal dimensions and properties of the box-shaped VLFS

长度 L /m	宽度 B /m	型深 D /m	吃水 d /m	垂向弯曲刚度 $EI_y/(N \cdot m^2)$	水平弯曲刚度 $EI_x/(N \cdot m^2)$	扭转刚度 $GI_t/(N \cdot m^2)$	单位长度质量 $\mu/(kg \cdot m^{-1})$	单位长度转动惯矩 $I_c/(kg \cdot m)$
1 000	60	8	5	$1.507\ 228 \times 10^{13}$	$4.269\ 084 \times 10^{14}$	$1.668\ 054 \times 10^{13}$	$3.075\ 000 \times 10^5$	$1.184\ 903 \times 10^6$

表2 干结构的固有频率和湿谐振频率

Tab.2 The natural frequency of dry structure and the wet resonant frequency

	一阶垂弯 $r=7$	二阶垂弯 $r=8$	三阶垂弯 $r=10$	四阶垂弯 $r=12$	五阶垂弯 $r=13$	六阶垂弯 $r=16$
干固有频率/($rad \cdot s^{-1}$)	0.156 6	0.431 8	0.846 5	1.399 2	2.090 2	2.919 4
湿谐振频率/($rad \cdot s^{-1}$)	—	—	—	0.844 4	1.073 3	1.427 8

0°浪向升沉运动和90°浪向横摇运动的水弹性程序以及挪威船社 DNV/WADAM 程序的计算结果见图1。由于 DNV/WADAM 程序在水动力计算时也采用三维势流理论,因此,两种程序的计算结果符合得较好。

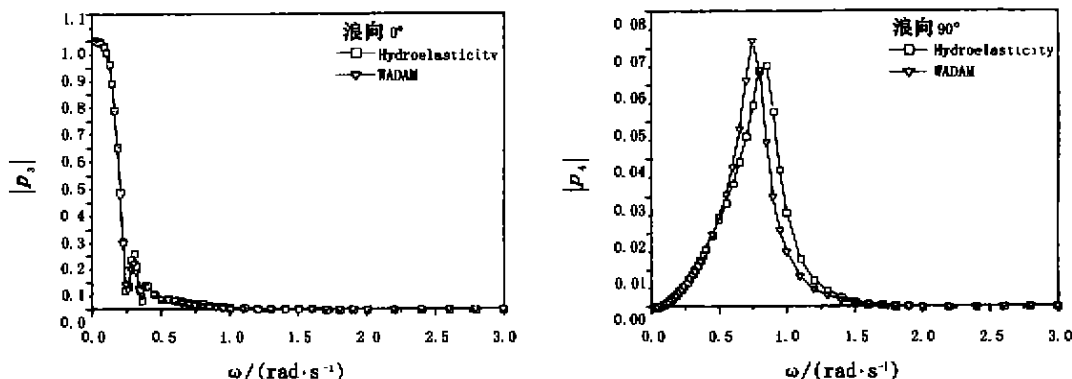


图1 升沉、横摇刚体运动幅值的比较

Fig.1 The comparison of amplitudes of heave and roll motion

垂向弯曲振型广义附加质量矩阵对角元素和0°浪向的广义波浪激励力无因次化曲线见图2(限于篇幅,只给出了前三阶垂向弯曲模态的曲线)。当浮体结构垂向弯曲变形波数约等于浮体结构长度范围内波浪的波数时,波浪激励力出现一个很大的峰值,见表3。对于其它浪向也具有类似规律。

表3 波浪激励力出现峰值时的波浪频率

Tab.3 The wave frequency corresponding to the peak of wave exciting force

	一阶垂弯	二阶垂弯	三阶垂弯	四阶垂弯	五阶垂弯	六阶垂弯
波浪频率/($rad \cdot s^{-1}$)	0.248 27	0.296 74	0.351 10	0.392 55	0.4256 68	0.453 28
L/λ	1.0	1.43	1.88	2.5	2.94	3.33

0°浪向各阶垂向弯曲模态主坐标幅值随波浪频率的变化曲线见图3。从图中可见,对一阶垂向弯曲振型($r=7$)、二阶垂向弯曲振型($r=8$)和三阶垂向弯曲振型($r=10$)而言,由于结构的弯曲刚度很小,其弹性变形垂向位移完全是由波浪激励力引起的,结构在波浪中并未发生谐振。对四阶垂向弯曲振型($r=12$)、五阶垂向弯曲振型($r=13$)和六阶垂向弯曲振型($r=16$)而言,随着结构相对弯曲刚度的增加,结构在波浪频率0.90rad/s、1.15rad/s和1.5rad/s时发生了谐振,但谐振的幅值并不大。第一阶垂向弯曲模态的位移幅值为1.38m,第六阶垂向弯曲模态的位移幅值为0.086m,后者仅为前者的6.2%。

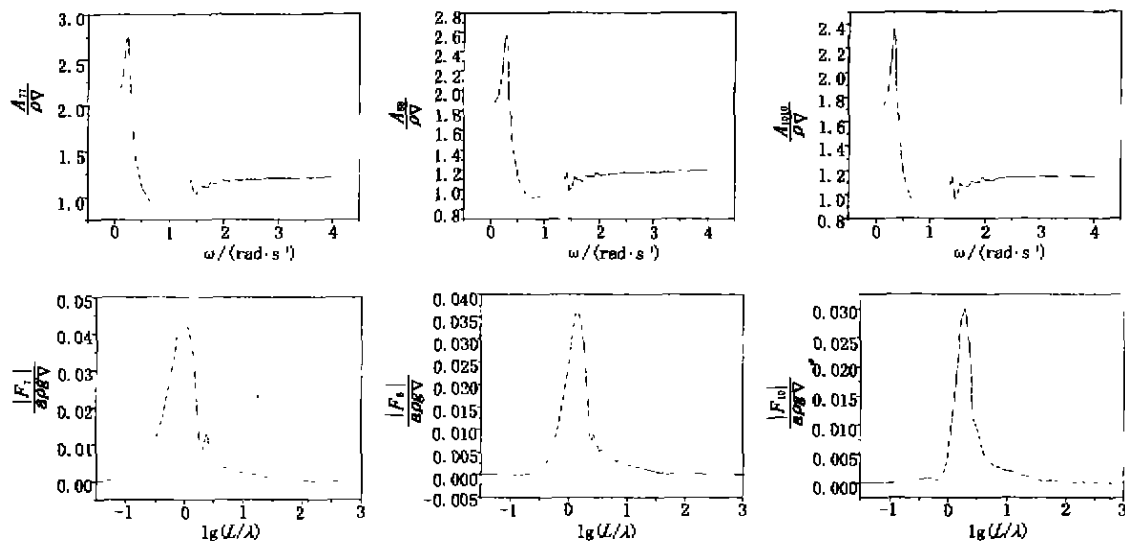


图 2 垂向弯曲振型广义附加质量和广义波浪激励力曲线

Fig.2 The generalized mass and wave exciting force of the vertical bending modes

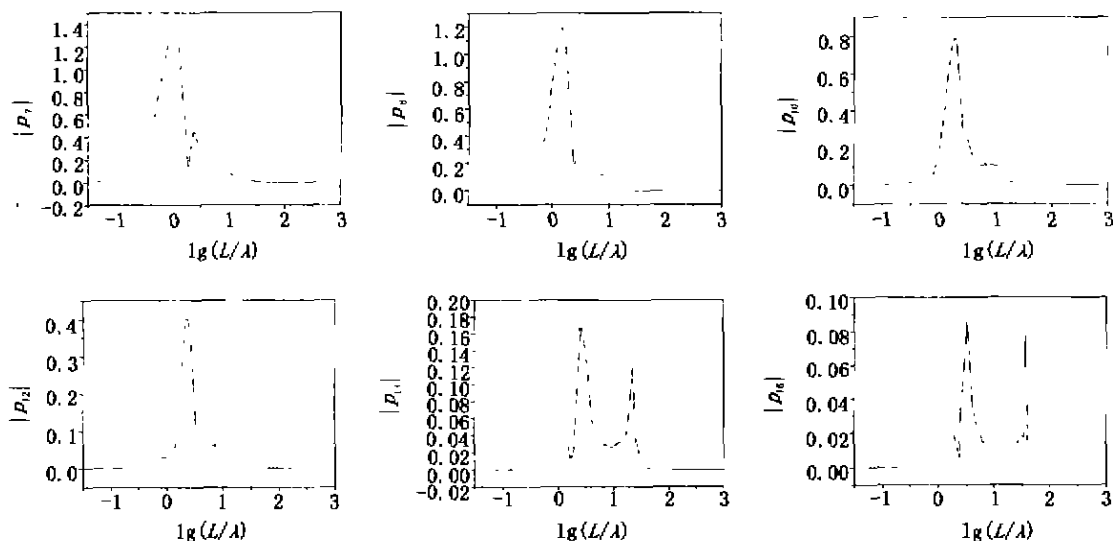


图 3 垂向弯曲模式主坐标幅值

Fig.3 The amplitudes of principal coordinate of the vertical bending modes

为了得到箱式超大型浮体结构在不规则波中谱分析的各物理量的传递函数,本文给出了垂向位移、剖面弯矩等随波长变化的规律。将升沉、纵摇和各阶垂向弯曲振型的垂向位移进行叠加,当波长 λ 等于浮体结构长度 L (0°浪向)时,不同模态进行叠加的结构垂向位移沿浮体长度方向的分布曲线见图 4(a)(叠加的模态分别为升沉+纵摇+一阶垂向弯曲;升沉+纵摇+一、二阶垂向弯曲;升沉+纵摇+一、二、三、四阶垂向弯曲和升沉+纵摇+一、二、三、四、五、六阶垂向弯曲)。从图 4(a)可见,六个模态叠加的垂向位移值和八个模态叠加的垂向位移值几乎重合,因此,计算更高阶的垂向弯曲振型对浮体结构的水弹性响应没有太大意义; $\lambda = L$ 时,不同浪向单位波幅规则波中的结构垂向位移沿长度方向的分布曲线见图 4(b),不同波长 0°浪向的垂向位移沿长度方向的分布曲线见图 4(c)。从图 4(c)可见,浮体结构长度约等于波长时的位移值远远大于波长与结构长度相比很小时的位移值;不同浪向结构剖面弯矩随波浪频率变化的曲线见图 4(d)。

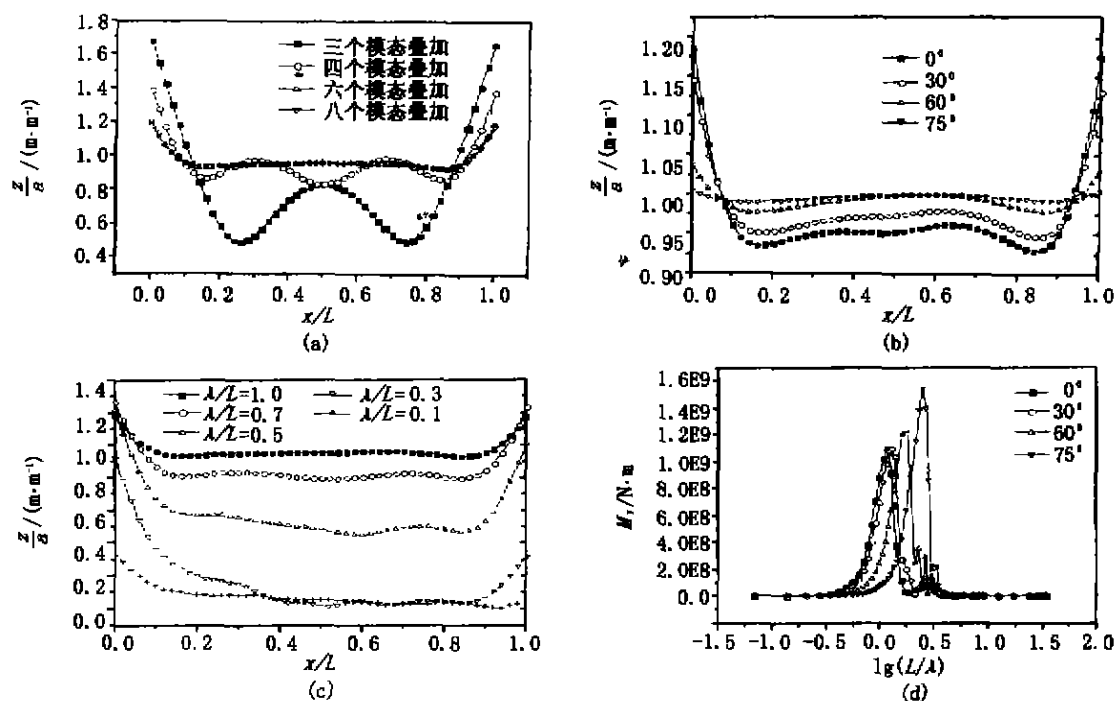


图4 位移、弯矩随波浪频率和浪向的变化曲线

Fig.4 The curves of dynamic displacement and bending moment varying with wave frequency and wave direction

3 结 语

本文利用三维线性水弹性理论研究了箱式超大型浮体结构在正弦规则波中的动力响应,得出:

- 1) 本文算例的箱式超大型浮体结构的第六阶垂向弯曲振型的位移幅值仅为第一阶垂向弯曲位移幅值的6.2%,因此在浮体结构动力响应计算时,垂向弯曲振型取到六阶就足够了,图4(a)也验证了这一结论;
- 2) 由于箱式超大型浮体结构的相对刚度十分低以及弹性振型和刚体运动的耦合作用,对前几阶弹性模态而言,其谐振频率的估算会存在一定的问题,结构在波浪中也未发生明显的谐振;
- 3) 浮体结构长度约等于波长时的结构垂向位移值远远大于波长浮体结构长度比很小时的值,考虑到箱式超大型浮体结构外围可能设置了防波堤以及在波浪能量集中的范围内不可能出现波长约等于浮体结构长度的波浪,所以结构的实际垂向位移值可能更小,这有待于在不规则波中用谱分析的方法作进一步的阐述和论证;
- 4) 由于箱式超大型浮体结构的长度一般以公里计,而波浪在整个结构长度范围内传播会耗散一定的能量,因此,结构迎浪面的位移值要大于背浪面的位移值。从图4(c)可以看出,随着 λ/L 的减小,这种现象更加明显。

致谢:中国船舶科学研究中心吴有生院士提供了三维线性频域水弹性计算程序并给予作者许多帮助,在此谨表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Yytaka Ohkawa. Concept and outline of Mega-float[A]. Proceedings of the Second International Workshop on Very Large Floating Structures[C]. 1996, 45-52.
- [2] Yoshida Koichiro. Developments and research on VLFS in Japan[A]. VLFS'96[C]. 1996, 5-11.
- [3] Wu Yousheng. Hydroelasticity of floating bodies[D]. PH.D Thesis, Brunel University, UK, 1984
- [4] 王志军,舒志,李润培.三维水弹性力学中的结构广义质量计算[J].船舶工程,2001,(2):
- [5] Price W G, Inzunza M Salas, Temarel P. The hydroelastic behavior of barge type structure in waves[A]. VLFS'96[C]. 1996, 173-182.
- [6] 王志军,舒志,李润培,等.超大型海洋浮式结构物概念设计的关键技术问题[J].海洋工程,2001,19(1):1-6.
- [7] 崔维成,吴有生,李润培.超大型海洋浮式结构物开发过程中需要解决的关键技术问题[J].海洋工程,2000,18(3):1-8.