

基于流固耦合的重力式复合结构模态分析*

吕小龙^{1,2}, 史宏达^{1,2}, 李彦平^{1,2}

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋工程山东省重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:重力式复合结构作为一种新型码头结构,是重力式结构与桩基结构的结合,具有受力合理、造价较低和施工方便的特点。利用软件 ANSYS-Workbench,以斜桩-重力式复合结构为研究对象,建立三维数值模型,分别模拟此结构在不同水位下的振动特性,探讨流固耦合作用对结构振动特性的影响。结果表明,流固耦合作用会引起结构固有频率减小,这种作用随着淹没深度的增加而增加。

关键词:重力式复合结构;流固耦合;模态分析;固有频率

中图分类号: P75

文献标识码: A

作为国际物流中最主要的运输方式,海洋运输的发展日渐成熟。随着对外贸易的发展,货物量的增加,船舶大型化已经成为发展的必然趋势。一般港口的水深条件已经越来越难以满足大型船舶的需求,因此,建设大型深水开敞式码头势在必行。然而,自然条件良好的天然深水港已经开发殆尽,港口建设逐渐进入风大浪高的海域中,这对传统港口结构的受力特性提出了更高的要求。

我国现有的开敞式码头主要为重力式结构和桩基结构。重力式结构所受波浪力较大,随着水深的增加,造价成非线性增长,不够经济。桩基结构虽然受力合理,但是深水条件下,结构高度大,横向刚度不足^[1]。重力式复合结构是一种新型码头结构,它结合了重力式结构与桩基结构的特点,上部由钢管混凝土桩与混凝土墩台组成,减小了波浪反射,为船舶提供良好的泊稳条件。下部为钢筋混凝土沉箱,利用自重增加结构稳定性。高桩与沉箱固结,根据上部桩柱布置形式的不同可分为直桩复合式结构与斜桩复合式结构,如图1所示^[2-3]。

重力式复合结构作为一种新型结构,在国内的工程中尚未被采用过。主要是由于目前针对此结构缺乏系统的研究,受力特性不够明确,更没有相关规范可依^[4]。在深水条件下,该结构尺寸较高,上部桩基的设置使得结构整体的柔度较大,自振周期较长,结构动力响应以及环境荷载与结构的相互作用问题突出。因此,按照传统的研究方法仅考虑结构在空气中的振动特性是不精确的,应该考虑结构物与流体的耦合作用^[5]。

本文利用大型有限元软件 ANSYS-Workbench,以斜桩-重力式复合结构为研究对象,建立三维数值模型,分别模拟结构在不同水位下的振动特性,探讨流固耦合作用对结构振动特性的影响,为结构的优化设计和故障诊断提供一定参考。

* 收稿日期:2015-01-20

作者简介:吕小龙(1989-),男,硕士研究生,主要从事港口海岸及近海工程方面研究。E-mail:qd651xl@126.com

(陈 靖 编辑)

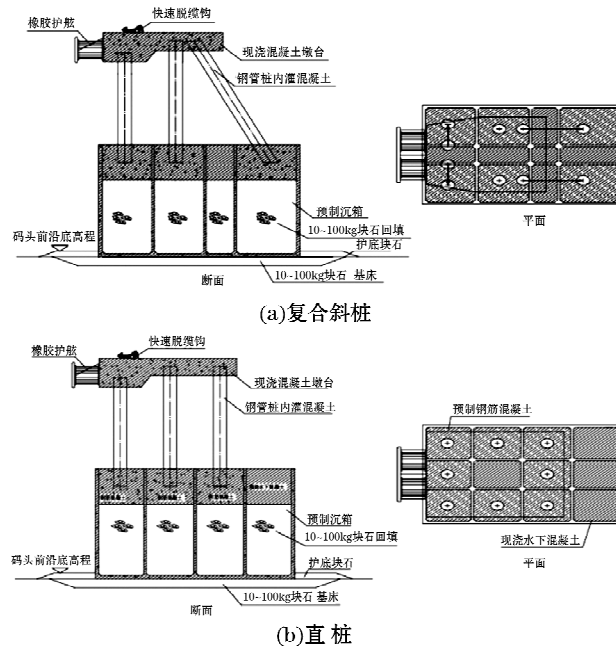


图1 重力式复合结构

Fig. 1 Gravity type complex structure

1 流固耦合数值模型验证

1.1 流固耦合数值模型的建立

本文利用 ANSYS-Workbench 结合参数化语言 APDL 进行二次开发,建立了基于流固耦合的斜桩-重力式复合结构数值分析模型。为验证 APDL 语言修改的正确性,将数模计算结果与解析法的计算结果进行对比分析。该结构由沉箱和桩基结构组成,且分别在平行和垂直码头前沿线方向布置了斜桩,形式复杂,解析法求解较为困难。因此,本验证只提取单根桩基结构作为研究对象,底端固定,顶端自由,设置 FSI 边界模拟水体与桩柱之间的耦合作用。桩直径取 1.6

m,高度 18.6 m,流体域平面尺寸为桩径的 10 倍,高度为 15 m。计算时流体参数为:海水密度 $\rho=1\,025\text{ kg/m}^3$,动力黏滞系数 $\mu=1.01\times 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{s}^{-1}$,水中声音传播速度 $s=1\,500\text{ m/s}$ 。桩与水体相互作用的有限元模型如图 2 所示。

1.2 单桩固有频率解析法

单桩的自由振动可以看作是等截面悬臂梁的弯曲振动问题^[5],其自由振动的振幅曲线:

$$Y(x) = C_1 \cosh \lambda x + C_2 \sinh \lambda x + C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x \quad (1)$$

根据悬臂梁固定端与自由端的边界条件,得到单桩无水条件下的固有频率为

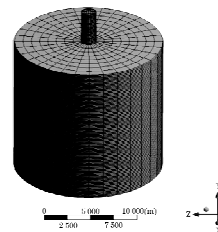


图2 桩基与水体相互作用数值模型

Fig. 2 Numerical model for pile-water interaction

$$\begin{cases} \omega_1 = (1.875)^2 \sqrt{EI/ml^4} \\ \omega_2 = (4.694)^2 \sqrt{EI/ml^4} \\ \omega_n = (i - \pi/2)^2 \sqrt{EI/ml^4} \quad (i = 3, 4, 5, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

式中, E 为杨氏模量 (N/m^2); I 为面积 2 阶距 (m^4); m 为空气中单位长度桩顶的质量 (kg/m); l 为桩柱高度 (m)。

浸没在水中的单桩计算简化图见图 3。图 3 中, m 为空气中单位长度桩柱的质量; m_w 为水中单位长度桩柱的质量; L 为桩柱有效长度; d 为有效水深; L_a 为嵌固深度。

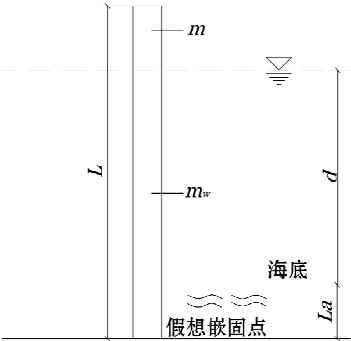


图 3 水中单桩简化图

Fig. 3 A simplified diagram of a single pile in water

等效质量分布 m_a :

$$\begin{cases} m_a = m(1 = \beta\mu) + 4M/L \\ \mu = (m_w - m)/m \end{cases} \quad (3)$$

式中, β 为等效质量因子, 根据深度比和质量比查图确定^[6]。

再用等效质量分布 m_a 替换空气中桩柱质量 m , 即可求得单桩在水中的固有频率。

1.3 计算结果分析

运用解析法和数值模拟的方法计算单桩前 6 阶计算结果如表 1。由表 1 可知, 解析法与数模基频计算结果基本相同, 验证了本文所建立的流固耦合数值模型的正确性。图 4 给出了解析法与数值法的结果对比曲线。可以看出, 解析解与数值解中结构的湿模态固有频率均小于干模态固有频率, 说明水体与结构的耦合作用使结构的固有频率减小。随着模态阶数的增高, 水体对结构固有频率的折减效果更明显。同时, 数值解较解析解偏小, 因此采用数值解法求解结构的固有频率, 结果偏安全。

表 1 解析法与数值法结果对比

Table 1 Comparison of the results between the analytical and the numerical methods

阶数	干模态解析解	干模态数值解	湿模态解析解	湿模态数值解
1	2.816	2.812	2.598	2.564
2	17.648	17.203	16.281	15.589
3	49.419	46.487	45.591	41.944
4	96.186	86.943	88.735	79.317
5	160.078	136.273	147.677	124.880
6	239.126	192.286	220.601	172.470

表 2 和图 5 给出了水体对桩柱固有频率的折减情况。由结果可知,2 种解法的频率折减效果相近。解析法公式中,水体对结构振动的影响是以附加质量的形式体现的,折减率取决于附加质量与结构本身质量的比值,折减率不随阶数的改变而改变。由于误差的原因数值解法中的折减率大于解析法结果,但结果差异不大。

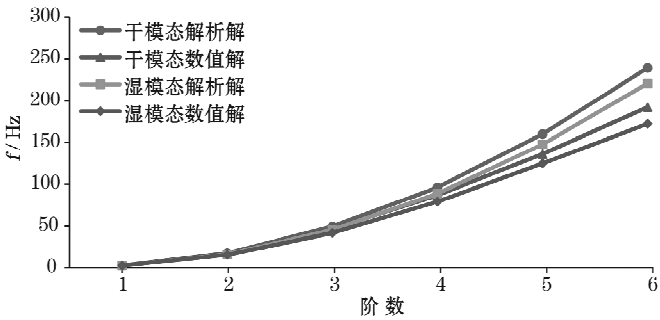


图 4 解析法与数值法结果对比曲线

Fig. 4 Comparison of the results between the analytical and the numerical methods

表 2 固有频率的折减率(%)
Table 2 The reduction rate of natural frequency(%)

方 法	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
解析法	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74
数值法	8.82	9.38	9.77	8.77	8.36	10.31

表 3 数值解与解析解结果偏差(%)
Table 3 Deviations of the analytical and the numerical solutions(%)

方 法	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
解析法	0.14	2.52	5.93	9.61	14.87	19.59
数值法	1.31	4.25	8.00	10.61	15.44	21.82

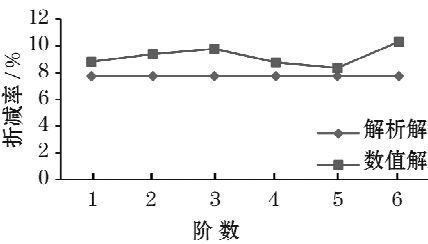


图 5 折减率对比曲线

Fig. 5 Contrast coves of reduction rate

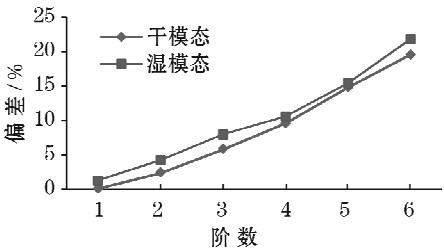


图 6 偏差对比曲线

Fig. 6 Contrast curves of deviation

表 3 与图 6 给出了数值解与解析解的偏差值。随着模态阶数的增高,解析解与数值解结果偏差增大。由于数值解法本身存在计算误差,高阶振动形式复杂使得误差放大。结构低阶模态的振动周期长,模态刚度较小,在同样量级的激励作用下,低阶模态更容易激发,在模态组合中提供较大的贡献。因此,工程上通常关注结构的低阶模态,在评价结构的动力特性时更有实际意义。

综合上述验证,本研究的流固耦合数值模型建立方法是可行的。

2 斜桩-重力式复合结构模态分析

2.1 空间实体模型的建立

本研究选取某工程斜桩重力式复合结构作为研究对象,结构高程 9.0 m,钢筋混凝土沉箱尺寸为 23.5 m×16.7 m×19 m,沉箱底高程-27.0 m,顶高程-8.0 m;结构前侧及后侧各布置两根斜桩,倾斜方向分别平行和垂直于码头面方向,中部为两根直桩。钢管混凝土桩直径 1.6 m,壁厚 30 mm。利用 ANSYS-SolidWorks 建立的实体模型如图 7 所示。

通过 ANSYS-SolidWorks 接口导入模型后,设置相应的分析类型和条件可直接进行计算,相比于在 ANSYS 中建模,通过接口导入的方式更加方便。

2.2 结构模态分析

为了更好地观察水体对复合结构固有频率的影响,本文将进行斜桩-重力式复合结构在不同水位下的模态分析,得出结构的固有频率和振型。

2.2.1 复合结构干模态分析

通过 ANSYS 计算此结构在空气中的前 10 阶模固有频率见表 4。由表 4 可知,结构固有频率随阶数的增大而增大,并分布在 2 个区间内。结构前 3 阶频率较低,分布在 3.49~5.35 Hz,各阶频率相近,说明结构刚度分布均匀。结构 4~10 阶固有频率较前 3 阶有明显增大,分布在 17.88~21.87 Hz。

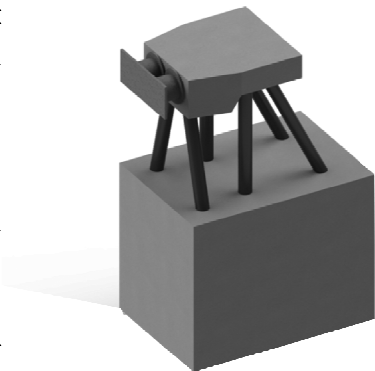


图 7 重力式复合结构效果图
Fig. 7 An effect chart of the gravity type complex structure

表 4 结构在空气中前 10 阶固有频率(Hz)

Table 4 The first ten order natural frequency(Hz) of the structure in the air

阶 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频 率	3.496 4	4.267 0	5.347 4	17.882 0	18.672 0	19.689 0	19.996 0	20.168 0	21.450 0	21.872 0

2.2.2 复合结构湿模态分析

结构在水中模态分析的求解使用上文验证时的建模方法如图 8 所示。

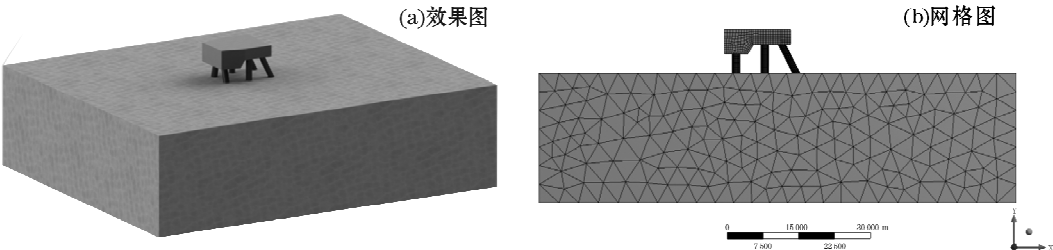


图 8 考虑流固耦合的复合结构数值模型(水深 27 m)
Fig. 8 Numerical model of complex structure (water depth: 27 m), in which the fluid-solid coupling is considered

通过 Unsymmetry 法提取结构在不同水位下的前 10 阶模态,结构的固有频率如表 5 所示。由表 5 可知,考虑流固耦合作用时,淹没深度的增加会进一步减小结构的固有频率。水深 19 m 时,水位到达沉箱顶面。与无水时的相比,虽然水深增加 19 m,但是固有频率变化并不明显。当水位到达桩基部分时,随着淹没深度的增加,水体对结构固有频率的影响更加明显。说明水体对桩基部分的振动影响更大,而桩基部分作为整个结构中的柔性部分,在结构受力时容易发生失稳和破坏,水体对其振动特性的影响是重点研究的内容。

表 5 结构在不同水位下前 10 阶固有频率(Hz)

Table 5 The first ten order natural frequency(Hz) of the structure at different water levels

水深/m	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
0	3.496 4	4.267 0	5.347 4	17.882 0	18.672 0	19.689 0	19.996 0	20.168 0	21.450 0	21.872 0
19	3.496 3	4.267 0	5.346 9	17.022 0	17.777 0	19.620 0	19.690 0	19.760 0	19.899 0	20.658 0
21	3.496 1	4.266 6	5.346 8	16.571 0	17.704 0	17.853 0	18.904 0	19.581 0	19.848 0	19.985 0
23	3.495 6	4.265 7	5.345 5	16.210 0	16.322 0	17.371 0	17.907 0	18.894 0	19.477 0	19.691 0
25	3.493 5	4.262 0	5.340 9	15.041 0	15.797 0	16.376 0	17.577 0	18.080 0	18.869 0	19.206 0
27	3.487 5	4.252 1	5.329 1	13.952 0	15.307 0	15.429 0	17.099 0	17.541 0	17.959 0	18.346 0
29	3.475 6	4.233 7	5.308 4	13.010 0	14.610 0	14.783 0	16.580 0	17.179 0	17.273 0	17.628 0
31	3.460 0	4.211 6	5.285 0	12.206 0	13.920 0	14.284 0	16.302 0	16.896 0	17.022 0	17.038 0

为了更好地表示淹没深度与固有频率折减效果的关系,设水深比为桩淹没深度与桩垂直高度之比,取 0,1/6,1/3,1/2,2/3,5/6,1,图 9 给出了水体对结构基频的折减率与相对水深的关系。由图 9 可知,考虑流固耦合作用时,折减率随相对水深的增加而增加。当淹没深度较小时,随水深的增加,曲线变化平缓,折减率变化较小。当水深比大于 1/3 时,水体对结构固有频率的影响幅度增大,则曲线斜率随之明显增大。

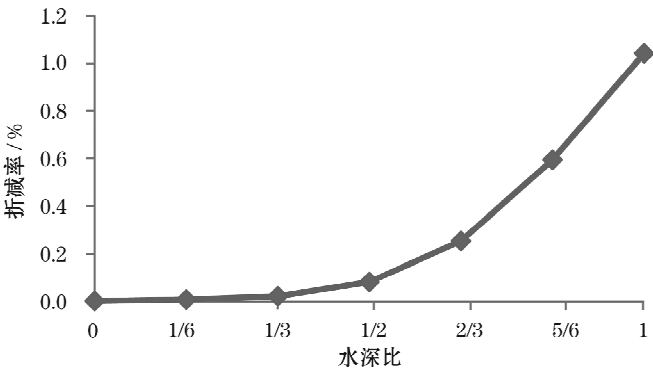


图 9 折减率与相对水深的关系

Fig. 9 Relationship between the reduction rate and the relative water depth

表 6 给出了水体完全淹没前部桩柱,即水深比为 1 时水体对各阶固有频率的影响情况。可见,水体对结构前 3 阶固有频率的影响明显小于高阶,考虑是由于高阶模态振型复

杂且振动频率远高于前 3 阶模态,高频振动使水体与结构间的相互作用更强,折减率明显增加。而且,各阶模态的变形趋势不同使流固耦合的频率折减效果不同,水体对结构 4 阶固有频率的影响最大。

表 6 水深比为 1 时的固有频率折减率(%)

Table 6 The reduction rate of the natural frequency(%) when water depth ratio is 1

阶 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频 率	1.04	1.30	1.17	31.74	25.45	27.45	18.47	16.22	20.64	22.10

2.3 结构振型分析

由湿模态与干模态的计算结果对比,发现水体对结构振型的影响较小,在不同水位下的结构振动形态基本一致。选取水深为 29 m 时的结构前 3 阶振型进行分析,为观察方便,结构振幅放大 2 000 倍,阴影部分为结构原有位置如图 10 所示。

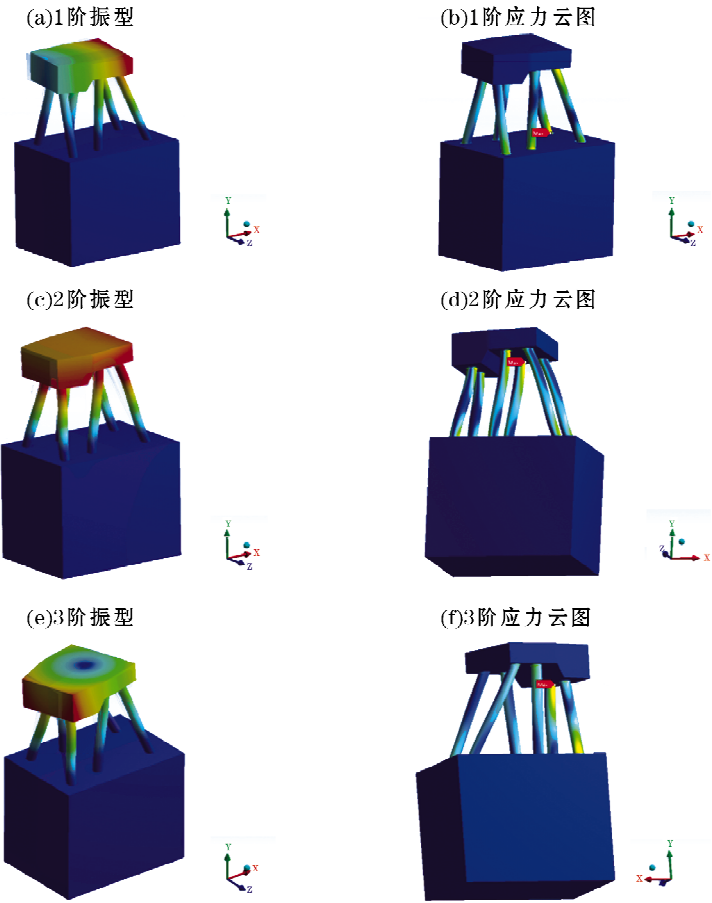


图 10 结构前 3 阶振型与应力云图

Fig. 10 Mode of vibration (left) and stress cloud (right) in the first three orders

由图 10 可知,结构 1 阶振型为结构上部沿平行于码头面方向作平动,振幅由上向下依次减小。结构前桩的纵向倾斜布置使结构前部纵向刚度较大,振幅较小。而结构后部的纵向刚度较前部小,产生了较大振动振幅,使得结构上部产生转动。此时,后桩与沉箱

和墩台连接处的应力较大。

结构2阶振型为结构上部沿垂直于码头面方向作平动,振幅由上向下依次减小。结构后桩的横向倾斜布置使结构横向刚度较大,振动幅值较小。此时前桩与中部桩与墩台连接处的应力较大。根据1,2阶振型的振动幅值对比可知,结构的纵向刚度稍好于结构的横向刚度,有利于结构抵抗船舶撞击力、波浪力等纵向荷载。

结构3阶振型为水平面内的扭转振动,扭转角度由上往下依次减小,转动中心位于结构中后部偏后的位置,说明结构后部抵抗扭转的能力较强。应力最大值出现在前桩与墩台连接处,且大于前2阶振动时应力最大值,可增加前桩的桩径。

从结构前3阶振型看,结构各阶振型均匀,振幅较小,结构整体性良好。前桩与后桩的倾斜布置使得结构整体刚度较大,有利于抵抗动力荷载。

3 结 论

重力式复合结构作为一种新型码头结构,缺乏相关的基础性研究。本文区别于以往在空气中分析结构振动特性的研究方法,建立了水-结构耦合振动的三维有限元模型,分析了结构振动特性以及水体结构振动的影响,得到了以下结论:

1)结构固有频率呈分段集中分布,固有频率随模态阶数增加而增加。结构前3阶自振频率相近,3阶到4阶频率有明显的跃升,4~10阶为同一振动频率区间。各分段区内自振频率趋稳,结构刚度分布均匀,有利于结构动力承载性能。

2)结构前3阶自振频率较低,容易诱发共振,在使用过程中应避免出现与前3阶频率相近的激励源。结构产生纵向位移和水平扭转时,前斜桩应力较大,可适当增加其桩径。

3)水体使结构固有频率减小,主要体现在对桩基部分的影响。随着淹没深度的增加,水体对结构固有频率的影响逐渐增大。结构在工作时的淹没深度一般较大,水深比高于2/3。此时水体对固有频率的影响较为明显。

4)复合结构上部为桩基结构,柔度较大,自振周期长。考虑流固耦合作用时,结构自振频率减小,周期增大,更接近海洋环境荷载的周期,易发生共振。因此对重力式复合结构进行动力分析时,应考虑流固耦合作用。

参考文献:

- [1] 郭传胜,张宁川,黄玉新,等. 潜式沉箱-群桩-平台型复合结构的水动力特性[J]. 中国海洋平台, 2011,26(2):32-36.
- [2] 吴澎,曹凤帅. 我国深水港口建设技术进展[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(1). 北京:海洋出版社,2013:12-18.
- [3] 交通部第三航务工程勘察设计院. 码头新型结构[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [4] 刘春阳. 桩基-重力式复合结构码头的优势及存在问题[J]. 水利科技与经济,2013,19(1):50-52.
- [5] 王元战,王朝阳. 考虑流固耦合影响的水中桩基结构振动特性分析[J]. 水道港口,2013,34(1):73-79.
- [6] M. G. 哈勒姆, N. J. 黑弗, L. R. 伍顿. 海洋建筑物动力学[M]. 北京:海洋出版社,1981.

Vibration Analysis of Gravity Type Complex Structure Based on Fluid-Solid Coupling

LÜ Xiao-long^{1,2}, SHI Hong-da^{1,2}, LI Yan-ping^{1,2}

(1. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *The Key Laboratory of Ocean Engineering of Shandong Province, Qindao 266100, China*)

Abstract: As a new type of wharf structure, the gravity type complex structure is the combination of gravity structure and piling structure and has characteristics of rational load-carrying capability, lower cost and convenient construction. However, the influence of water on port structures was not considered in the previous researches. This paper takes the declining pile-gravity type complex structure as the research object and establishes a 3D finite element mode by using ANSYS-Workbench software, so that the vibration characters under the conditions of different water levels are simulated respectively and the effects of fluid-solid coupling on the vibration character of structure are discussed. The results show that the fluid-solid coupling can lead to the decrease of the natural frequency of structure, and such effect can increase with the submerging depth of the structure.

Key words: gravity type complex structure; fluid-solid coupling; modal analysis; natural frequency