

· 港 口 ·



离岸深水港轻型码头 在波浪作用下动力响应研究*

张卫平, 孙昭晨, 梁书秀

(大连理工大学港口海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对离岸深水港轻型码头在强浪作用下的动力响应进行研究, 依据JTJ 213—1998《海港水文规范》的环境条件和环境荷载规范, 在考虑桩-土耦合效应下对海洋极端波况下离岸深水港轻型码头结构的动力响应进行了数值模拟; 并对比了不同阻抗处理下桩柱响应与采取基岩面固结简化下的不同。研究表明, 桩土耦合作用对于波浪尤其是不规则波作用下的桩柱响应有很大影响, 考虑耦合作用时结构运动响应为岩面固结简化下的45%~65%, 在不规则波作用下码头结构响应峰值远高于规则波下峰值结果, 尤其不规则波的高频成分更能激发结构物的动力响应。建议在深水轻型码头结构物设计中采取更接近实际的基于两相饱和介质理论的桩基阻抗; 在不规则波作用下尤其当频率较高时, 不规则波中高频成分与轻型码头的固有频率接近易引起较大动力响应, 在工程设计中需引起注意。

关键词: 波浪作用; 不规则波; 桩土相互作用; 轻型码头

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0074-06

Dynamic response research of offshore deepwater light pier under wave action

ZHANG Wei-ping, SUN Zhao-chen, LIANG Shu-xiu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In this article, the dynamic responses of offshore deepwater light pier under extreme waves are investigated. According to the codes of harbor hydrology (JTJ 213—1998), fluid-structure coupling effect is taken into account, comparative analysis is made for the responses with different pile-soil impedances. Results show that pile-soil interaction has great impact on the response of the pier in open sea environment. When take the pile-soil interaction into consideration, the response of the pier is only 45%~65% of that without pile-soil interaction. The dynamic response of the pier is greater under random wave than regular wave, and the response is much bigger especially with high wave frequency. By these conclusions, the impedance under more realistic two phase saturation medium is advised. For that response will be much bigger when wave frequency close to structure natural frequency, it should be pay more attention when the pier subjected to random wave especially with high frequency.

Key words: wave action; random wave; pile-soil interaction; light pier

随着深水岸线资源的逐步减少并伴随着船舶大型化的发展, 码头建设日益向着条件更加恶劣的深水区发展, 离岸深水港轻型结构码头日益成为关注的焦点。离岸深水环境下码头结构在极端海况条件下的受力将更为恶劣, 给码头的建设和安

全使用带来了风险。为配合863课题“离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究”, 本文对新型轻型码头结构在巨浪作用下的动力响应进行数值研究, 为码头结构设计提供必要的设计依据和借鉴, 为建设大型离岸深水码头的安全性提供保障。

收稿日期: 2013-06-14

*基金项目: 国家863项目资助(2007AA11Z130); 国家创新研究群体科学基金(50921001)

作者简介: 张卫平(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事港口和近海工程研究。

在结构物的基础处理上, 土与结构物基础的动力相互作用极大地影响到了结构物的动力响应。尤其在海洋环境条件下, 考虑土-桩-水流体系间的相互作用越来越受到相关研究者的关注^[1-6]。考虑到海洋底部多为饱和和沉积土层, 而在实际考虑桩-土相互作用的研究过程中, 通常将土体简化为单相弹性或者单相黏弹性介质。因此, 在研究桩基-土-波浪体系动力相互作用时, 考虑饱和土-结构的动力相互作用对结构进行动力分析具有重要的理论和实践意义。本文就土-桩-波浪系统下结构反应的动力特性进行研究。

本文对不同桩基础处理下深水轻型结构码头在极端波浪作用下动力响应进行了对比分析, 对其在波浪作用下的受力运动响应规律进行了研究, 为轻型结构码头的工程应用提供相应的参考依据。

1 相关理论

1.1 单桩的波浪力研究

Morison公式的出现为解决作用于小尺度桩柱上波浪力的计算提供了一个简洁实用的方法, 之后该公式在工程上获得广泛应用, 同时为了更有效并在更广的范围内应用Morison公式, 科研工作者也对其进行了大量的研究。尽管已经意识到 Morison公式在理论上不够严格, 在阻力与惯性力都起重要作用的过渡区内往往存在较大误差, 试图以比较严密的理论为基础配合日益有效的计算手段取代它, 但迄今仍旧没有找到更方便有效的方法, 对小尺度孤立桩柱的波浪作用力计算仍沿用此公式, Morison公式将波浪力表示为阻力和惯性力之和, 作用于单位长直圆桩上的正向力 f 为:

$$f = f_i + f_d = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} + C_d \frac{\rho}{2} D u |u| \quad (1)$$

当考虑桩柱流固耦合效应时, 计入桩柱自身运动响应, 作用于单位长直圆桩上的正向力 f 可表示为:

$$\begin{aligned} f = f_i + f_d = & \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{du}{dt} - \ddot{x} \right) + \\ & C_d \frac{\rho}{2} D (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} - \\ & C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \ddot{x} + C_d \frac{\rho}{2} D (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| \end{aligned} \quad (2)$$

式中: f_i , f_d 分别为水平惯性力和水平黏性力; u 为桩柱任意高度处波浪水质点的水平速度; x , \dot{x} , \ddot{x} 分别为桩柱任意高度处水平位移、速度以及加速度; D 为桩柱直径; C_d , C_m 分别为速度力系数和惯性力系数, 且 $C_m = 1 + C_m$, C_m 为附连水质量系数。

对于群桩的波浪力, 相对于单桩波浪力的计算, 其主要差别在于: 一是波峰通过各桩的时间不同, 各桩所受的波力峰值之间存在相位差; 二是要考虑邻桩的影响, 当两个或两个以上桩柱组合在一起时, 必须考虑桩与桩之间存在的相互影响, 大多数采用群桩系数予以考虑^[7]。

1.2 桩周土体阻抗

为考虑桩-土间的相互作用, Gazetas等^[8]采用动力Winkler地基梁简化模型, 将土对桩的约束作用简化为沿桩长连续分布且依赖振动频率的线性弹性系数 K 和阻尼 C , 并给出了与频率相关的近似弹簧刚度和阻尼系数表达式。

对水平受力桩

$$K \approx \delta E_s \quad (3)$$

$$C \approx 6a_0^{1/4} \rho_s v_s d + 2\beta_s \frac{K}{\omega} \quad (4)$$

式中: E_s 为土体的弹性模量; 常数 δ 在桩顶自由时取1.2, 桩顶固结时取2.1; 参数 $a_0 = \omega d/v_s$ 为无量纲化的频率参数; v_s 为土层的剪切波速; d 为桩径; ω 为桩基振动频率; ρ_s 为土层的密度; β_s 为土层的黏滞阻尼系数。

Novak等^[9]假定土层为黏弹性介质, 通过理论分析得到了桩基的横向动力阻抗:

$$\begin{aligned} K = & -\pi G a_0^2 \cdot \\ & \frac{4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{b_0^*K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + a_0^*b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: 无量纲频率 α_0 同式(4), $a_0^* = \frac{ia_0}{\sqrt{1+iD_s}}$,

$b_0^* = \frac{ia_0}{\xi\sqrt{1+iD_l}}$; K_0 , K_1 分别为零阶和一阶Bessel

函数; D_s , D_l 则分别为和剪切波及压缩波相关的阻尼系数; ξ 为土层中压缩波和剪切波的波速比。

陆上土层一般假设为单相弹性或黏弹性介质, 而海洋环境下底部为两相饱和介质, 因此考虑饱和土地基与结构的动力耦合作用, 对结构进

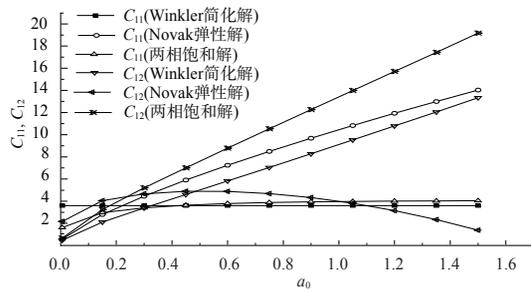
行动力分析具有重要的实践意义。通过求解饱和孔隙介质运动控制方程，将此土层边界代入控制方程，求得土体位移场，详细计算过程可参考文献[10]，求解后沿桩周 $r=r_0$ 积分即可得到桩土间相互作用的合力 q_n ：

$$q_n = \int_0^{2\pi} (-\sigma_r \cos\theta + \tau_r \theta \sin\theta) r_0 d\theta = G(C_{11} + iC_{12})u_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

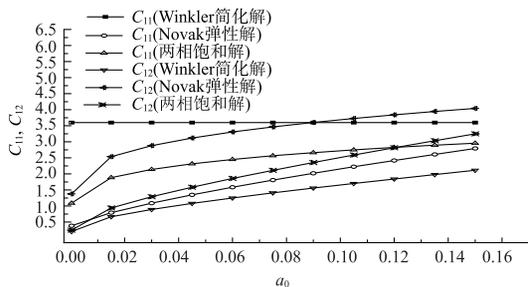
式中： C_{11} 为水平刚度系数； C_{12} 为水平阻尼系数。

1.3 水平动力阻抗参数研究

对于给定的地基条件，阻抗因子为桩柱振动频率的函数，为方便比较，取归一化的频率 $\alpha_0 = \omega d/v_s$ 参数，对简化桩基阻抗、单相弹性地基阻抗以及两相饱和地基阻抗进行了对比。从图1中阻抗实部与虚部对比可以看出，随着振动频率的增加，阻抗因子实部在Winkler简化模型计算下为常数，与频率无关，在弹性地基以及饱和地基中在低频范围内随频率增大而上升，而在高频区域弹性地基下的阻抗因子实部变化趋势逐渐变小，对于饱和地基存在一临界频率，超过临界频率后，阻抗因子实部 C_{11} 呈下降趋势。相应的对于阻抗因子的虚部 C_{12} 均随着频率的增大而明显增加，且趋势相同，其中在饱和地基条件中取到最大值。



a) 桩基阻抗对比



b) 实际波浪频率范围内阻抗

图1 不同地基下桩基阻抗对比

由于在实际海洋波浪环境荷载下，波浪频率相对较小，为更好地比较在海洋波浪环境条件下

的不同地基阻抗，选取 $\alpha_0 < 0.1$ ，可以看出在此频率范围内，简化解阻抗因子实部最大，而阻抗因子虚部则在Novak简化模型下取最大值。

1.4 波浪作用下考虑桩土相互作用桩柱运动方程

在土-桩柱-水流环境下，桩柱受到波浪环境荷载，在考虑到桩周土体阻抗下的运动方程可表示为：

$$M \times \ddot{x} + C \times \dot{x} + K \times x = -C' \times \dot{x} - K' \times x + f \quad (7)$$

式中： M 、 C 、 K 分别为桩柱的质量、阻尼和刚度矩阵； C' 和 K' 为桩周土体对桩柱的阻抗； x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为桩柱各结点相对于桩柱底部的位移、速度和加速度向量； f 为考虑流固耦合效应下桩柱受到的流体作用力。本文通过在有限元ADINA81程序中加入桩基阻抗模块以及海洋波浪荷载模块，对考虑桩基-土-波浪体系间的动力相互作用进行数值模拟。

2 数值分析及算例

2.1 计算模型

计算模型依据863课题“离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究”成果——四桩钢管轻型结构码头结构形式，对轻型码头结构在强浪海况下的动力响应进行研究。

离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头的计算模型见图2。相应计算参数为：桩柱弹性模量210 GPa，土体剪切模量 $C_s=21$ MPa，土体密度 $\rho_s=2.1$ t/m³，流体密度 $\rho_f=1.0$ t/m³，桩柱材料密度 $\rho_p=7.8$ t/m³，地基孔隙率 $n=0.3$ ，动力渗透系数 1.0×10^{-5} ，地基泊松比 $\nu=0.25$ ，主桩截面外径 $R_1=1.4$ m，截面壁厚 $t_1=32$ mm，斜撑截面外径 $R_2=0.75$ m，截面壁厚 $t_2=20$ mm。

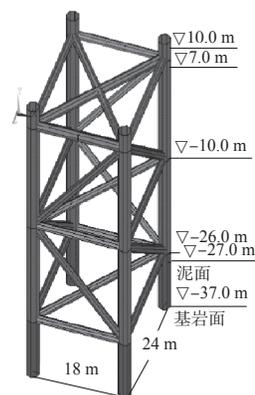


图2 离岸深水码头计算模型

2.2 规则波作用下桩柱动力响应

由于离岸深水港离岸线较远且海洋环境条件更加恶劣, 本文在模拟其动力响应时, 规则波计算波高取11 m, 波浪周期在8~16 s范围内每隔2 s间距取5种周期工况进行模拟。图3为周期10 s下桩顶的位移响应, 为方便稳态响应下的位移对比, 图中选取了100~150 s时间段。并在表1和图4中对所有工况下响应的峰值进行了对比。

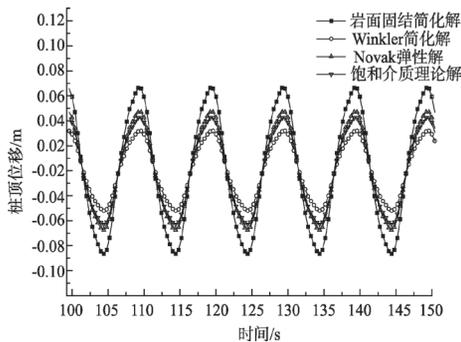


图3 规则波下不同地基桩顶横向位移时程曲线

表1 规则波作用下桩柱顶点位移响应最大值

周期/s	位移响应最大值/m			
	基岩面处 固结	Winkler 简化解	Novak 弹性解	两相饱和 地基
8	0.066	0.032	0.047	0.042
10	0.067	0.032	0.047	0.043
12	0.065	0.030	0.046	0.043
14	0.065	0.029	0.046	0.042
16	0.065	0.029	0.046	0.042

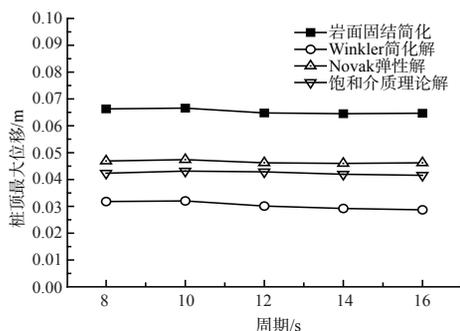


图4 规则波作用下不同地基处理下横向最大位移比较

从规则波作用下桩柱运动响应对比可以看出, 码头运动响应幅值随波浪周期变化很小, 而不同基础处理方式对运动响应的影响较大, 考虑桩土耦合效应时运动响应为不计桩土间相互作用

的45%~65%。且不同地基处理方式结构物位移响应差别达50%左右。在Winkler简化解下结构响应偏小, Novak弹性解偏大, 饱和解居中, 此结论与阻抗对比研究结果吻合。

2.3 不规则波作用下桩柱运动响应

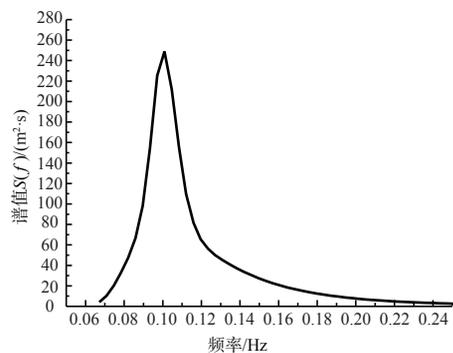
实际海洋工程中结构物遭受的海况绝大多数都是不规则波, 为更加真实地模拟出海洋波浪环境, 本文针对桩柱在不规则波下的受力响应进行了研究, 不规则波谱型采用目前通用的JONSWAP谱模拟。

不规则波的数值模拟采用 $H_{1\%}$ 波高作为计算波高, 波周期取平均周期 \bar{T} 。按照《港口工程技术规范》, 将给定波浪的波高、周期换算成有效波高 $H_{1/3}$ 和谱峰周期 T_p 进行波浪的模拟, 其中 $T_p=1.15\bar{T}$ 。不规则波的频谱采用合田改进的JONSWAP谱, 具体参数可参考文献^[11]。

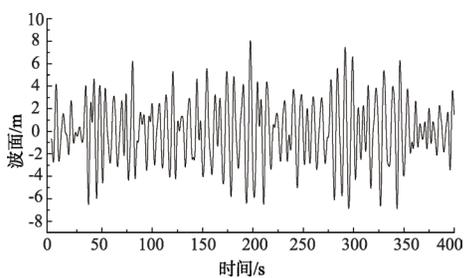
$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \cdot \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (8)$$

式中: γ 为谱峰升高因子, 取 $\gamma=3.3$, 即平均的JONSWAP谱。

图5即为JONSWAP谱及其生成的时域随机波面($H_{1\%}=11$ m, $\bar{T}=10$ s)。



a) JONSWAP谱

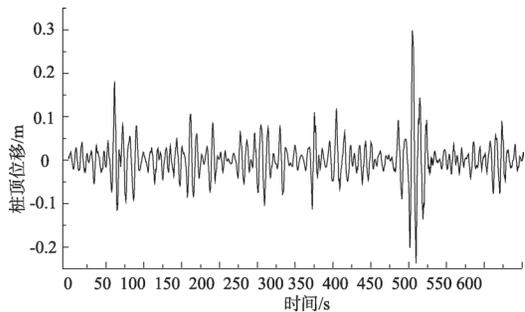


b) 由JONSWAP谱合成的随机波面

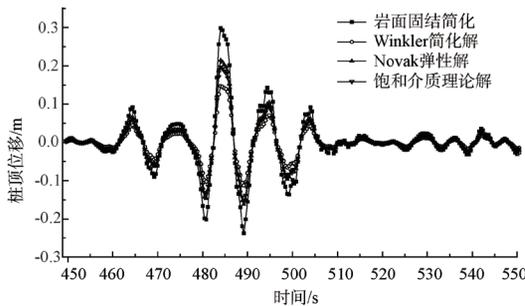
图5 随机波谱及其生成的时域波面

对于不规则波作用, 本文取11 m ($H_{1\%}$) 作为计算波高, 波浪周期的选取与规则波相同, 在8~16 s 区间内每隔2 s时间步长取5种周期工况。为使不同周期条件下模拟结果具有可比性, 对不同周期工况下的计算时长都取100个平均周期时间长度进行模拟。

以 $H_{1\%}=11$ m, $\bar{T}=10$ s随机波为例, 给出了不规则波作用下桩顶的位移响应, 并在响应峰值区内对不同基础处理条件下的响应结果进行了对比(图6), 从桩柱的位移响应可以看出, 不规则波作用下的响应峰值在不考虑桩土相互作用时达到0.33 m, 远高于规则波下的响应峰值, 达到同等工况条件下规则波响应峰值的5倍左右。通过图6b) 不同桩土作用模型对比可以看出, 不同地基处理方式下码头的响应相位基本保持一致, 在Winkler简化模型下其响应峰值仅为不考虑桩土间耦合作用时的50%左右, Novak弹性解以及两相饱和和介质理论模型则介于两者之间且两相饱和和介质理论模型下略偏小。



a) 不计桩土间作用桩柱顶点位移响应



b) 桩柱顶点位移响应对比

图6 随机波作用下桩柱顶点位移响应

为比较不同基础处理对轻型码头结构响应的影 响, 对不同地基工况在不同周期下桩柱的位移响应极值进行了对比(表2, 图7)。可看出, 与

图6响应曲线对比一致, Winkler简化处理下桩柱的响应最小, 其响应极值相比两相饱和基础处理小20%~35%, 采取两相饱和和介质理论假设下的桩柱位移响应位于Winkler简化解与Novak解之间。相比较规则波, 不规则波的周期因素对码头动力响应的影 响显著且在高频下结构物的响应要显著高于低频下的结果。

表2 不规则波作用下桩柱顶点位移响应最大值

周期/s	位移响应最大值/m			
	基岩面处固结	Winkler简化解	Novak弹性解	两相饱和地基
8	0.425	0.201	0.281	0.256
10	0.330	0.157	0.236	0.213
12	0.316	0.153	0.229	0.215
14	0.328	0.155	0.237	0.223
16	0.280	0.127	0.200	0.188

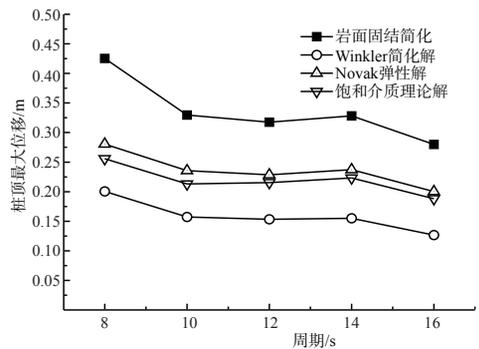
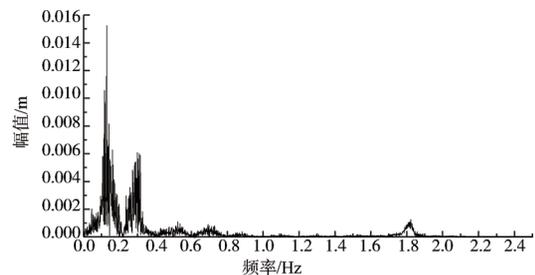


图7 不规则波作用下不同地基下横向最大位移比较

为进一步研究波浪频率对轻型码头结构动力响应的影 响, 以桩端基岩面固结为例, 对周期 \bar{T} 为8 s和16 s下的位移响应进行快速傅里叶变换(FFT)(图8)。从图8中频域内结果的对比可明显看出, 轻型码头结构在高频波的作用下, 由于其频率接近码头结构的固有频率, 使得结构物固有振型受到激发, 产生更大的动力响应。



a) $\bar{T}=8$ s

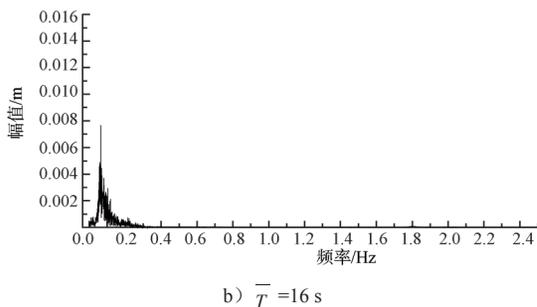


图8 桩柱顶点位移频域响应

3 结论

1) 在规则波作用下, 波浪周期对轻型码头结构响应的影响较小。当考虑桩土间的相互作用时, 其动力响应为桩端固结简化的45%~65%。对于不同的桩-土相互作用模型, 在Winkler简化解下结构响应最小, Novak弹性解偏大, 饱和解居中。建议在离岸深水轻型码头的设计中采取更接近实际的两相饱和介质模型考虑桩-土间的相互作用。

2) 在不规则波的作用下, 轻型码头结构的响应峰值远高于规则波, 码头结构的响应极值达到相同工况规则波作用下的5倍左右。不同地基处理方式对桩柱响应的影响与不规则波相似, 相比较于规则波, 周期因素对不规则波下码头动力响应影响明显, 尤其高频波频率能接近码头结构固有频率, 能大大激发码头结构的动力响应, 因此在考虑不规则波作用时码头结构更需要考虑到结构的动力响应特性。

参考文献:

- [1] 孙树民. 考虑流体-桩-土相互作用的独桩平台波浪响应的TMD控制研究[J]. 中国造船, 2002, 43(1): 52-57.
- [2] 马红艳, 刘书田, 顾元宪. 随机波浪作用下海洋平台响应分析与结构优化设计[J]. 工程力学, 1995, 22(1): 129-134.
- [3] 吴锋. 港口工程水平受荷桩m值的确定[J]. 水运工程, 2010(1): 32-34.
- [4] 张卫平, 孙昭晨. 波浪作用下考虑桩土相互作用的桩柱响应[J]. 水运工程, 2012(3): 57-61.
- [5] 何晓宇, 李宏男. 波浪与地震对小尺度桩柱的共同作用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5): 41-48.
- [6] Novak M H. Mitwally random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1990, 112(1): 35-41.
- [7] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [8] George Gazetas, Ricardo Dobry. Horizontal response of piles in layered soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(1): 20-40.
- [9] Novak M, Aboul-ella F. Dynamic stiffness and damping of piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974(11): 574-598.
- [10] 尚守平, 余俊, 王海东, 等. 饱和土中桩水平振动分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1696-1702.
- [11] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

( 上接第67页 )

- [5] Hayashi T. Hydraulic research on closed pile breakwater[C]// Proc 10th Coastal Engineering Conference, 1966: 873-884.
- [6] Van weele B J, Herbich J B. Wave reflection and transmission for piles arrays[C]//Proc 13th Coastal Engineering Conference:ASCE, 1972:1935-1953.
- [7] Shankar N J, Khader M H. Performance characteristics of closely spaced pile breakwaters[C]//Proc 15th Australia Coastal Engineering Conference, 1981: 25-27.
- [8] Truitt C L, Herbich J B. Transmission of random waves through pile breakwater[C]//Proc 20th International Coastal Engineering Conference: ASCE, 1987: 2303-2313.
- [9] 邱大洪, 王学庚. 深水薄板式防波堤的理论分析[J]. 水运工程, 1986(4): 8-12.
- [10] 严以新, 郑金海, 曾小川. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998, 16(1): 67-74.
- [11] 麻志雄. 透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 南京水科院, 2002(2): 1-6.

( 本文编辑 郭雪珍 )