

加固地基土对导管架海洋平台减振的研究

王 腾[●] 冯秀丽 周长江

(中国海洋大学)

摘 要 本文采用 Winkler 弹性地基梁模型模拟海洋平台桩土间相互作用, 通过组合成层土中桩单元的刚度阵, 推得了海洋平台系统的整体刚度阵及在随机波浪荷载作用下平台甲板处的位移谱响应和时域响应。并通过算例研究和分析了在随机波浪力作用下加固地基土前后地基土参数的变换对平台甲板处位移谱响应及时域响应的影响进行了分析。

主题词 海洋平台 加固地基土 随机波浪荷载

1 前言

波浪荷载作用下, 海洋平台桩基的水平位移响应主要是由泥面下浅部土特性所决定。对于桩土间的相互作用, 国内外许多学者对此做了研究。本文采用 Winkler 弹性地基梁模型模拟桩土间相互作用。由海洋平台的地质勘察报告可知, 该范围内的地基土多处于软塑、流塑状态(见表 1), 对桩的横向约束作用很小。海底探摸报告也表明, 平台周围的海底冲刷相当严重, 冲刷深度在 1.0m~1.9m, 这些因素都将减小地基土对桩的约束作用, 使平台系统的整体刚度降低, 水平位移响应增大。

表 1 土层概况

层号	深度/m	厚度/m	土性描述	状态	标贯击数	层号	深度/m	厚度/m	土性描述	状态	标贯击数
1	3.6	3.6	砂质粉土	可塑		3	7.2	2.1	淤泥质粉质粘土	流塑	10
2	5.1	1.5	粉质粘土	软塑	30	4	10.0	2.8	粉质粘土	可塑	30

为了减小平台水平位移响应幅值, 我们拟采用加固地基的方法对平台进行减振研究。采取深层搅拌法或高压喷射注浆法加固海底下 6D(桩径)内的地基土, 以增强土对桩的约束作用, 增大平台系统的动刚度, 使平台的基频远离波浪频率, 从而减轻平台的水平位移响应。

深层搅拌法加固地基主要利用水泥土具有较高强度、模量和小渗透系数。深层搅拌法形成的水泥土增强体强度比天然土体提高几倍至数十倍, 变形模量也是如此。将水泥土增强体与增强体之间天然土形成复合地基可有效地提高地基承载力和改善地基变形特性。不同水泥掺合比的水泥土的压缩特性如表 2 所示。分析可知, 加固后土体的抗压强度和压缩特性比加固前提高 20 倍。

● 王腾, 副教授, 现在胜利油田博士后工作站进行科研工作, 通讯地址: 山东青岛中国海洋大学工程学院。

表2 水泥土水泥掺合比对压缩特性的影响

水泥掺合比 $a_w/\%$	压缩系数 $a_{1-2}/10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{p(1-2)}/\text{kPa}$	$\frac{E_{p(1-2)} \text{ 水泥土}}{E_{p(1-2)} \text{ 原状土}}$	水泥掺合比 $a_w/\%$	压缩系数 $a_{1-2}/10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{p(1-2)}/\text{kPa}$	$\frac{E_{p(1-2)} \text{ 水泥土}}{E_{p(1-2)} \text{ 原状土}}$
原状土	837	2609		15	40	58807	22.56
10	59	31804	14.60	20	31	73426	28.22

2 地基加固分析计算模型

根据地质勘察报告的土性描述和海洋平台的结构特点(图1),我们将地基土近似分为四层,从上至下每层厚度依次为:7.2m、7.2m、14.4m和30m。每层土的动剪切模量分别为0.5MPa、2.0MPa、5.0MPa和10.0MPa。以土层分界面、海平面和平台顶面将桩分为6段。我们首先从平台的单桩分析入手,求得成层土中单桩动刚度矩阵,进而求得平台系统群桩动刚度矩阵以及位移频响函数。在此基础上,讨论加固区内土剪切模量变化对频响函数、位移谱密度的影响,以此来确定加固减振效果。

假定桩土系统振动为小变形,同一水平层内土为均质土,不同层土其性质可以不同。桩侧土对桩的动力作用简化为线性弹簧 k_{sk} 和线性阻尼器 c_{sk} 以并联的方式耦合。

取第 k 层土中桩的微单元作动力平衡分析,建立桩横向振动微分方程

$$E_p I_p \frac{\partial^4 u_k(z, t)}{\partial z^4} + (k_{sk} + i\omega c_{sk}) u_k(z, t) + m \frac{\partial^2 u_k(z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中 $E_p I_p$ ——桩的弯曲刚度;

$u_k(z, t)$ ——桩身质点位移。

结合桩单元两端力与位移的边界条件,得到该桩单元的动刚度矩阵

$$k_{sk} = \begin{bmatrix} \frac{F_6}{h_k^3} & \frac{F_4}{h_k^2} & \frac{F_5}{h_k^3} & -\frac{F_3}{h_k^2} \\ \frac{F_4}{h_k^2} & \frac{F_2}{h_k} & \frac{F_3}{h_k^2} & \frac{F_1}{h_k} \\ \frac{F_5}{h_k^3} & \frac{F_3}{h_k^2} & \frac{F_6}{h_k^3} & -\frac{F_4}{h_k^2} \\ -\frac{F_3}{h_k^2} & \frac{F_1}{h_k} & -\frac{F_4}{h_k^2} & \frac{F_2}{h_k} \end{bmatrix}$$

对于水中的桩单元,采用 Morison 方程并线性化其阻力项得动力方程

$$E_p I_p \frac{\partial^4 u_k(z, t)}{\partial z^4} + (m + \phi_m) \frac{\partial^2 u_k(z, t)}{\partial t^2} = \phi_m \ddot{u}_w + \phi_d \dot{u}_{mw} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \dot{u}_w = f(z, t) \quad (3)$$

式中 \dot{u}_w , \ddot{u}_w 和 \dot{u}_{mw} 表示垂直于桩轴水流的速度、加速度及速度的均方根并假定其为一常

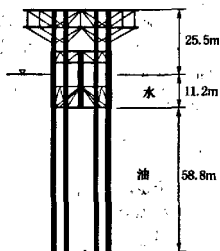


图1 海洋平台立面结构

数。 C_d 、 C_m 为附加质量系数和水流阻力系数， ρ 为水体密度， $\phi_m = \frac{C_m \rho \pi D^2}{4}$ ， $\phi_d = \frac{C_d \rho D}{2}$ ， D 为桩体直径。偏于保守地把波浪力集中在海平面处，即方程(3)右端作用力作为外力加在海面处，采用与土中桩单元相同的方法可求得水中桩单元的动刚度矩阵 $[k_{wk}(4 \times 4)]$ 。同理可求得其桩单元的动刚度矩阵 $[k_{ak}(4 \times 4)]$ 。

组合各段桩单元的动刚度矩阵，得到单桩的动刚度矩阵 K_{dk} 。因平台桩间距大于6倍的桩径，所以忽略桩与桩之间的动力相互作用，得群桩动刚度矩阵为 $K_d = 4K_{dk}$ 。由平台与群桩桩顶处的力与边界条件可求得平台系统整体动刚度矩阵 K 。对动刚度矩阵 K 求逆，得到系统的频域响应矩阵 $H(i\omega)$ 。

在平台振动响应分析过程中，我们主要关心的是位于15.5m处平台在海面波浪力作用下的动力响应。这使平台系统成为单输入单输出系统，从系统的频响矩阵中提取在0点输入、15.5m输出的频响传递函数 $H_L(i\omega)$ ，我们便可求得任意波浪力作用下平台位移响应的标准差为：

$$\sigma_x = \sqrt{\int_0^{\infty} S_x(i\omega) d\omega} \quad (4)$$

式中 $S_x(i\omega) = |T_{sx}|^2 S_f(i\omega)$ ， $S_x(i\omega)$ 为甲板位移谱密度； $S_f(i\omega)$ 为随机波浪荷载谱密度； $|T_{sx}|$ 为传递函数。

通过卷积定理，可以得到随机荷载作用下平台甲板处的时域响应为：

$$S(t) = h(t) \times f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(i\omega) \times H_L(i\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5)$$

式中 $h(t)$ 为频率响应函数 $H_L(i\omega)$ 的傅立叶逆变换， $F(i\omega)$ 为波浪荷载 $f(t)$ 的傅立叶变换。

3 计算结果分析

该平台所处的海浪可由单侧 JONSWAP 谱 $Shh(f)$ 来描述，其有效波高 $H_s = 2.5m$ ，峰能量周期 $T = 4.5s$ ，水深 $d = 11.2m$ ，见图2。

图3和图4反映了土层加固前后频率响应曲线和位移谱密度曲线。由图3可见，加固地基后，平台系统的基频增大，响应的峰值降低；从位移谱曲线亦可见加固后平台位移谱响应峰值降低。图5反映了不同加固效果其位移均方根的变化曲线。由图5可见，随着加固土体剪切模量的增大，其振动幅度逐渐减小。当加固土体剪切模量为10.0MPa时(原土剪切模量为0.5MPa)，其减幅效果可达73.5%。这说明了，采用深层搅拌法来加固有效深度内土层的

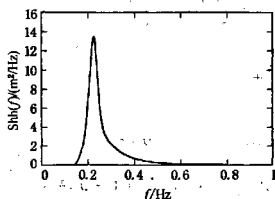


图2 JONSWAP谱

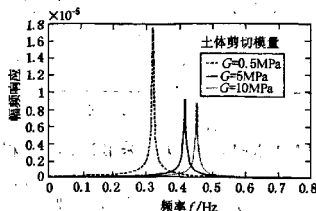


图3 不同加固效果平台的幅频响应曲线

方法来达到减振的目的是有效的。

图 6~图 8 是加固前后平台的波浪力时程曲线和位移响应时程曲线。由图中曲线比较可见,加固后位移响应显著减小,其最大值由加固前的 40mm 降低为加固后的 16mm,其减幅程度达到 60%。说明了用加固地基土方法来减小生活平台振动的效果是显著的。

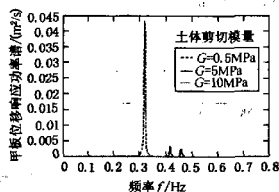


图 4 不同加固效果平台的位移功率谱曲线

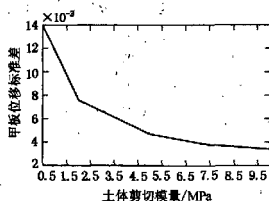


图 5 不同加固效果位移标准差的变化曲线

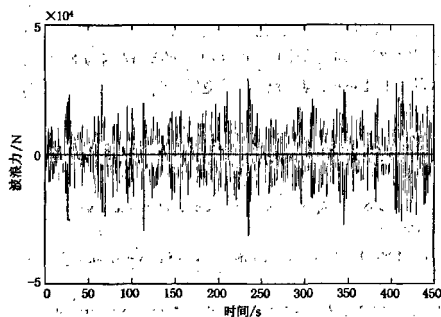


图 6 波浪力时程曲线

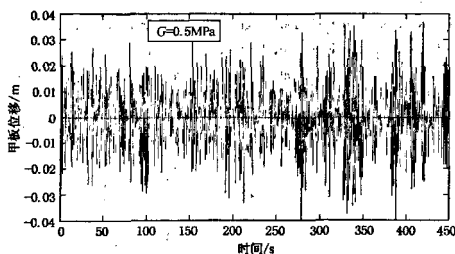


图 7 加固前平台位移时程响应曲线

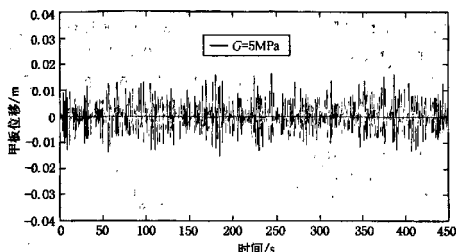


图 8 加固后平台位移时程响应曲线

4 结论

在随机波浪荷载作用下,随着加固土体剪切模量的增大,平台甲板处的位移响应的标准差逐渐减小,当加固土体剪切模量为 10.0MPa 时(原土剪切模量为 0.5MPa),其减幅效果可达 73.5%。由时域响应曲线可知,加固后平台甲板的时程响应显著减小,其最大值由加固前的 40mm 降低为加固后的 16mm,其减幅程度达到 60%。说明了用加固地基土方法来减小生活平台振动的效果是显著的。

参 考 文 献

- 1 Dobry, R. and Gazetas, G (1988). Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups. *Geotechnique*, 38, (4): 557~574
- 2 Gazetas, G & Dobry, R. (1984a). Horizontal response of piles in layered soils. *J. Geotech. Engrg Am. Soc. Civ. Engrs* 110: 20~40
- 3 Makris, N. and Gazetas, G (1993). Displacement phase differences in a harmonically oscillating pile. *Geotechnique* 43, (1): 135~150
- 4 Novak, M. and Aboul-Ella, F (1978). Impedance functions piles in layered media *J Geotechnical Engrg ASCE*, 104, (6): 643~661
- 5 Prakash, S. and Puri, VK (1992). Analysis and design of piles for marine environment. *Proc 2st International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, 1, 339~361
- 6 Gazetas, G & Dobry, R. (1984b). Single radiation damping model for piles and footings. *J. Engrg Mech, Am. Soc. Civ. Engrs* 110, (6): 937~956
- 7 Chakrabarti, SK (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structure*, Springer - Verlag Berlin, Heidelberg