

水平荷载作用下群桩 P-Y 曲线特性研究¹

楼志刚 王 梅 (中国科学院力学研究所)

1 概述

海洋结构物常常使用桩基础以抵抗较大的水平荷载和位移。这些水平荷载主要由风暴、冰及波浪作用而产生。在这种水平荷载作用下桩身反应特性非常复杂且是非线性的。目前常用反映非线性桩—土—桩相互作用的 P-Y 曲线来分析水平荷载下单桩的反应特性。但对于需用多根相距较近的桩（群桩桩距通常为 3-5 倍桩径）共同抵抗水平荷载的情况不能将单桩的方法直接应用于群桩计算，而常采用将单桩 P-Y 曲线用折减系数下调成为群桩 P-Y 曲线的方法，因而必须确定 P-Y 曲线的折减系数。

为此，我们进行了一系列水平荷载下群桩模型试验，分别采用不同桩距的布置形式。模型桩为直径(D)3 厘米、长 145 厘米的铝合金圆管，壁厚 1 毫米。试验在砂箱中进行。本文重点分析二根桩群桩的 P-Y 曲线变化特性。

2 群桩模型试验结果

群桩各桩桩头荷载—桩头位移关系、群桩前、后桩弯矩沿深度的分布、群桩典型 P-Y 曲线分别示于图 1 至图 4 中。从其中可以看出桩—土—桩相互作用的特点如下：

1. 相同桩头位移条件下，后桩荷载小于前桩荷载；
2. 相同桩头荷载条件下，前桩最大弯矩值小于后桩；

根据桩身的应力平衡分析可知，以上所述群桩相互作用的现象主要是由于桩间土的抗力减弱所致，且这种减弱的程度随深度增加而变化。通常桩间土的抗力大小用 P-Y 曲线来反映。

3 群桩 P-Y 曲线分析

(1) 群桩 P-Y 曲线关系

图 3、4 所示为双对数坐标表示的典型群桩中前、后桩各深度 P-Y 曲线。从图中可以

¹ 本课题由中国科学院‘八五’重大项目基金资助

看出，P-Y 曲线在双对数坐标中近似呈线性关系，且各深度 P-Y 曲线近似平行。由此可建立 P-Y 曲线关系如下：

$$p = k(x)y^m \quad (1)$$

日本研究者提出砂中单桩 P-Y 曲线可表示为： $p = kxy^{0.5}$ 。图 5 所示为模型试验所得单桩 k 与 x/D 的关系图。从中可得出： $k = 0.765(x/D)$ 。另外从对单桩 P-Y 曲线的分析得到 Y 的指数为 0.48，由此得到单桩 P-Y 曲线的无量纲形式如下：

$$P/P_0 = 0.765(x/D)(y/D)^{0.48} \quad (2)$$

通过对二根桩群桩 P-Y 资料进行分析，得到前桩 k 与 x/D 的关系示于图 6。从中可看出： k 随深度呈线性变化，即 $k = c(x/D)$ 。图 7 所示为 c 与 S/D 关系，从中可得出：

$$C = 0.35(S/D)^{0.68} \quad (3)$$

后桩 k 与 x/D 的关系示于图 8。从图中可以看出： k 与 x/D 在双对数坐标中呈线性关系，即 $k = C(x/D)^n$ 。其中 C 与 n 随桩距的变化关系如图 9 所示。从中可得到 C 、 n 与桩距关系如下：

$$C = 0.05S/D - 0.078 \quad (4)$$

$$n = 2.37 - 0.179S/D \quad (5)$$

前、后桩 y 指数 m 与桩距关系示于图 10。对其进行拟合分析得到如下关系式：

$$\text{前桩: } m = 0.4(S/D)^{0.1} \quad (6)$$

$$\text{后桩: } m = 0.28(S/D)^{0.19} \quad (7)$$

由此得到二根桩群桩前、后桩 P-Y 曲线无量纲表达式如下：

$$\text{前桩: } P/P_0 = 0.35(S/D)^{0.68}(x/D)(y/D)^{0.4(S/D)^{0.1}} \quad (8)$$

$$\text{后桩: } P/P_0 = (0.05S/D - 0.078)^{0.68}(x/D)^{(2.37 - 0.179S/D)}(y/D)^{0.28(S/D)^{0.19}} \quad (9)$$

(2) 群桩 P-Y 折减系数

对群桩计算来说，最简单、方便的方法是引入群桩 P-Y 修正系数对单桩 P-Y 曲线进行折减后再计算以得到群桩计算结果。本次模型试验的主要目的就是要得到有关群桩 P-Y 折减系数的经验计算方法。根据前面对模型试验数据所作的分析，特别是对群桩 P-Y 曲线的分析，得到了群桩 P-Y 折减系数的计算方法。

群桩 P-Y 折减系数 f 的定义如图 11 所示。即相同位移条件下群桩中各桩反力与单桩反力之比，即

$$f = p_s/p_s \quad (10)$$

由群桩 P-Y 曲线分析所得到的单桩、前桩与后桩 P-Y 关系式，将前、后桩 P 值分别与单桩 P 值相比，得到前、后桩 P-Y 折减系数如下：

$$\text{前桩: } f_L = 0.475(S/D)^{0.68}(y/D)^{(0.4(S/D)^{0.1} - 0.48)} \quad (11)$$

$$\text{后桩: } f_b = (0.065S/D - 1.02)(x/D)^{(2.37 - 0.179S/D)}(y/D)^{(0.28(S/D)^{0.19} - 0.48)} \quad (12)$$

按此折减系数进行群桩计算所得计算结果与实测结果示于图 12，二者符合较好。

4 结论

从前面群桩分析可得出以下结论：

1 群桩 P-Y 曲线可表示为 $P/P_0 = C(x/D)^n(y/D)^m$ 的形式。对单桩来说， $C=0.765$ ， $n=1$ ， $m=0.48$ 。对群桩前、后桩则分别有如式（3）—（7）所示关系。

2 群桩前、后桩 P-Y 折减系数可由式（11）—（12）计算。

本次模型试验结果基本反映了群桩相互作用的主要特性。对于二根桩群桩的这种基本排列形式，已得出群桩 P-Y 折减系数的计算方法。如果能得到原位试验结果的验证，则可应用于工程设计中。

参考文献（略）

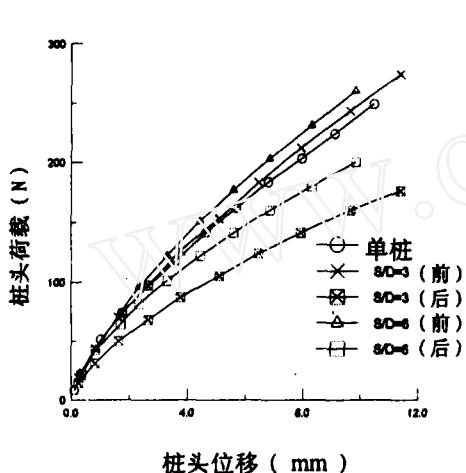


图 1 二根桩群桩中各桩桩头荷载-位移关系

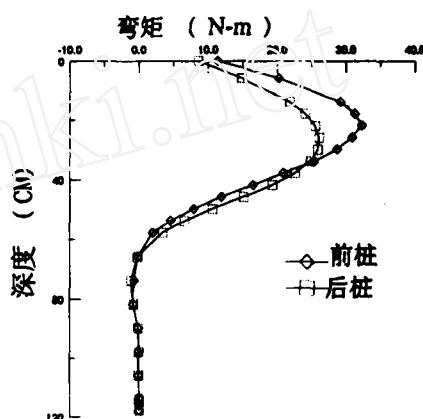


图 2 二根桩群桩中各桩弯矩-深度关系

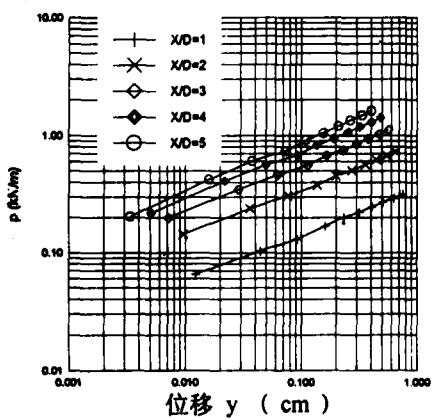


图 3 二根桩群桩(S/D=3)前桩各深度 P-Y 关系

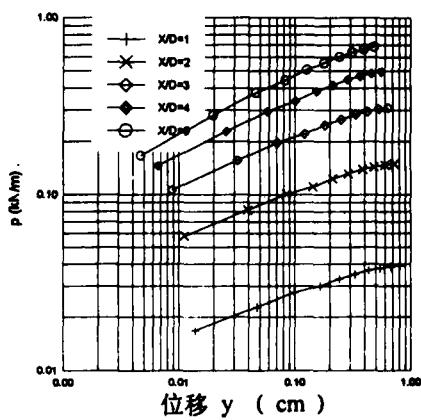


图 4 二根桩群桩(S/D=3)后桩各深度 P-Y 关系

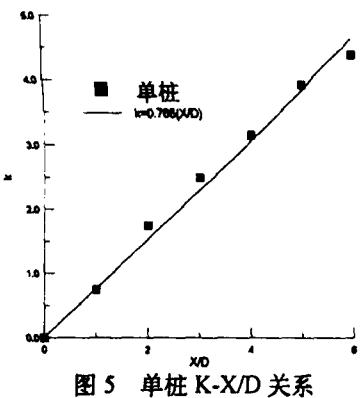


图 5 单桩 K - X/D 关系

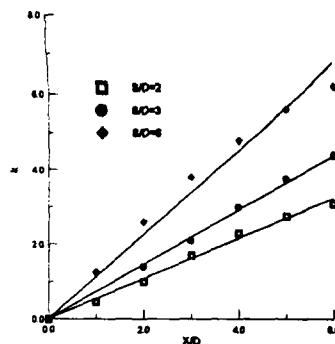


图 6 前桩 K - X/D 关系

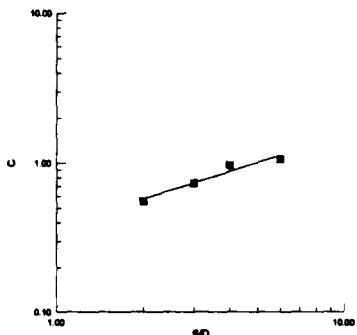


图 7 前桩 C - S/D 关系

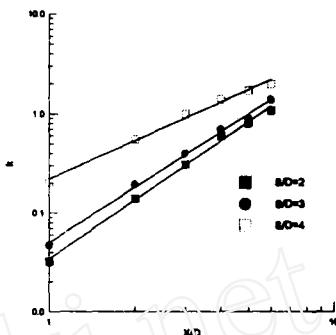


图 8 后桩 K - X/D 关系

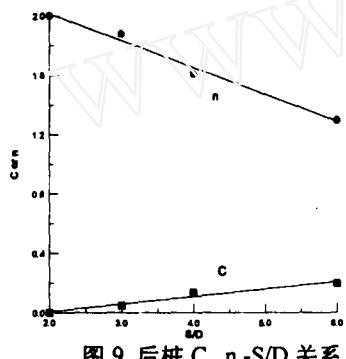


图 9 后桩 C, n - S/D 关系

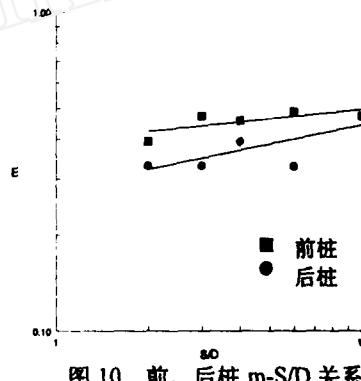


图 10 前、后桩 m - S/D 关系

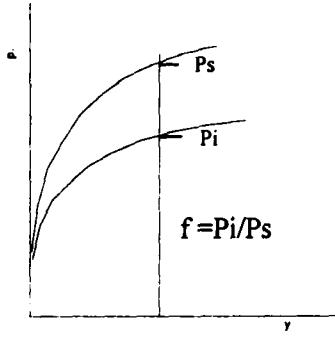


图 11 P - Y 折减系数定义

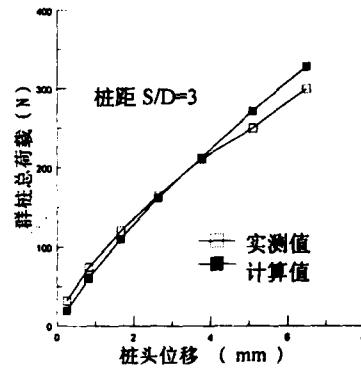


图 12 群桩荷载-桩头位移关系