

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0836-03

水平荷载下套管桩基的非线性响应分析

王 腾¹, 李大勇², 张玉哲¹

(1. 中国石油大学 华东石油工程学院, 东营 257061; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 青岛 266510)

摘 要: 提出了用新型套管桩基来提高海洋平台桩基水平承载力和减小平台响应幅值。采用 p - y 曲线法来模拟桩土间的相互作用, 对套管桩基进行非线性响应分析, 研究了套管的埋深和宽度对桩身变形和土抗力的影响, 并与普通桩基进行了对比分析。研究表明, 套管桩基能充分发挥桩土间的相互作用, 提高桩基的水平承载力, 减小桩基的水平响应。

关 键 词: 套管桩; 桩土相互作用; p - y 曲线; 非线性; 海洋桩基

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study on nonlinear response of casing pipe pile to lateral loads

WANG Teng¹, LI Da-yong², ZHANG Yu-zhe¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, East China, Dongying 257061, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: A new type of casing pipe pile foundation is presented to increase the offshore pile foundation lateral capacity or decrease the lateral displacement. The nonlinear response of the casing pile under lateral load is studied by means of p - y curves. The influence to the pile response of the depth below the seafloor and the width of the casing pipe is investigated and compared with the common pile. The results show that the casing pipe can excite the pile-soil interaction effectively and increase the pile foundation capacity and decrease its response to lateral loads.

Key words: casing pipe; pile - soil interaction; p - y curves; nonlinear; offshore pile foundations

1 前 言

导管架海洋平台在大的风、浪、流和冰荷载作用下, 往往产生较大的水平位移。如果其桩基刚度较低, 平台顶部就有可能产生大的水平位移而使其上面依托的输油管线的立管、注水管线和电缆线造成损坏, 甚至渗漏油, 造成海洋环境的污染, 给油田经济造成严重的损失。水平荷载及弯矩作用下桩基的响应计算, 必须指定桩土间相互作用的非线性应力-变形特性。已经建立了很多模型来求解桩土系统的响应, 其中非线性 Winkler 基础梁模型(BNWF)用非线性桩土弹簧 p - y 曲线的简化方法可考虑桩土间的非线性相互作用, 并在工程实践中得到广泛的应用。Trochanis^[1]等研究表明, 用 BNWF 方程来计算水平承载桩的响应与静载试验结果及非线性 3D 有限元分析结果符合得很好。通过对水平荷载作用下桩基受力响应分析可知^[2~6], 桩基承受的最大弯矩和剪力发生于浅层土中, 浅层土和桩间的相互作用

决定了桩基水平承载力和水平挠度响应。要提高海洋平台桩基的水平承载力, 减小其幅值响应, 就应想办法提高浅层土中桩土间的相互作用力。一种方法是提高土体的强度, 如采用地基处理的方法; 第二种方法是加强桩基, 如钢管内注混凝土或增大桩径。本文研究的套管桩基是在原桩基外局部套上大桩径的套管, 如图 1 所示。套管桩处的惯性矩由三部分组成: (1) 普通桩部分; (2) 连接钢板 (如图中 1~4 所示); (3) 套管部分。这种套管桩扩大了浅层土中桩身的侧面积, 提高了桩土间的相互作用力, 提高了桩基的水平承载力。本文对套管桩基进行非线性响应分析, 研究其在提高桩基承载力和减少桩基响应方面的有效性, 并与普通桩基进行比较分析, 以验证其有效性。

2 套管桩基的计算模型

本文研究的平台桩基外径 $D = 1\ 780\ \text{mm}$, 壁厚 $w = 40\ \text{mm}$, 长为 $54\ \text{m}$, 入土为 $40\ \text{m}$, 水深为 $14\ \text{m}$ 。

收稿日期: 2006-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 50409007)

作者简介: 王腾, 男, 1973 年生, 教授, 博士, 主要从事海洋岩土工程方面的研究。E-mail: ldy@sdust.edu.cn

假定波浪荷载施加在水面处，采用美国 API^[7]建议的水下软黏土的 p - y 曲线（如图 2 所示）来模拟桩土间的相互作用，分段研究套管加强桩基的非线性响应，得到的微分方程为

$$EI_m \frac{d^4 y}{dx^4} - p = 0 \quad (1)$$

式中 EI_m 为套管桩的弯曲刚度； y 为桩身质点位移； N 为轴向力； p 为土抗力， m 为不同桩身截面数。套管桩处的惯性矩由三部分组成：（1）普通桩部分；（2）连接钢板；（3）套管部分。

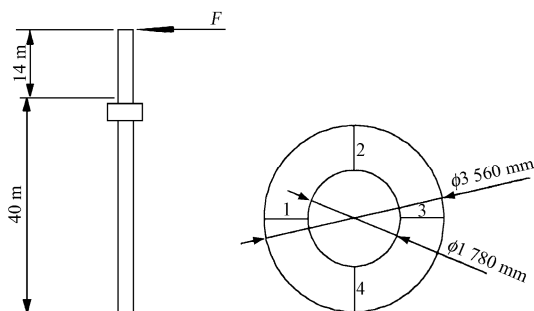


图 1 套管桩示意图

Fig.1 Schematic of casing pipe configuration

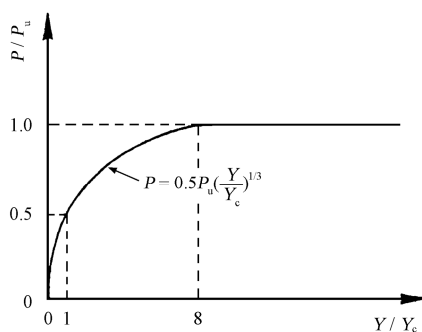


图 2 典型的软黏土 p - y 曲线

Fig. 2 Characteristic shape of p - y curve in soft clay

桩在水平荷载作用下产生挠度变形 y ，促使桩周土产生相应的变形，并产生抗力 p ，阻止桩变形的进一步发展，这一个非线性迭代求解的过程，方程（1）可用有限差分法求解，式（1）在 m 点处的差分表达式为

$$y_{m-2}EI_{m-1} + y_{m-1}(-2EI_{m-2}EI_{m-1}) + y_m(4EI_m + EI_{m-1} + EI_{m+1} - 2Nh^2 + E_{sp}h^4) + y_{m+1}(-2EI_m - 2EI_{m+1}) + y_{m+2}EI_{m+1} = 0 \quad (2)$$

结合初始条件和边界条件，通过迭代求解可得到桩身任一点的响应 y ，进而可求得桩身的土抗力 p 。下面通过算例分析套管对桩基响应的影响。

3 算例分析

3.1 套管埋深对桩基响应的影响

为了确定桩基套管的埋深，需要分析单位长度（ $1D$ ， D 为普通桩基外径）套管在不同深度处对桩基响应的影响。套管直径： $D_t/D=2$ （ D_t 为套管桩外径）。均质软黏土的不排水剪切强度 $c=20$ kPa，半主应变 $\varepsilon=0.04$ 。考虑到海洋桩基的冲刷淘深的影响，套管埋深应大于 $1D$ ，水平荷载 $F=400$ kN。计算数据见表 1、图 3 和图 4。

表 1 套管埋深对桩基变形、土抗力的影响
Table 1 The influence of embedded depth on pile displacement and soil resistance

参 数	埋深		
	$1D$	$3D$	$5D$
泥面处位移/mm	54(64)	58.5(64)	61.1(64)
泥面处减幅/%	15.6	8.6	4.5
普通桩土抗力/ $kN \cdot m^{-1}$	61.5	76.5	68.65
套管桩土抗力/ $kN \cdot m^{-1}$	86.25	104.5	106.5
土抗力增幅/%	40.2	36.8	54.5

注：（）内数字为普通桩基位移响应。

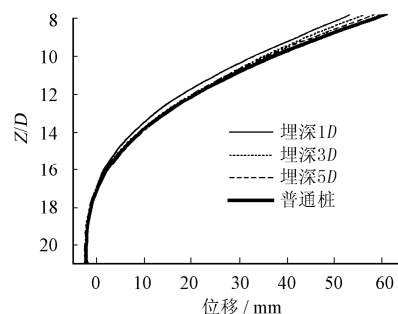


图 3 套管埋深对桩身变形的影响

Fig.3 Influence of casing pipe embedded depth on pile displacement

由图 3 可见，与普通桩基相比，设置套管后桩身挠度变形减小。随着套管埋深增大，泥面处（ $Z/D=8$ ）桩身挠度变形逐渐增大，套管对减小变形的作用逐渐减弱，其减幅效果由埋深 $1D$ 下的 15.6 % 降低到 $5D$ 埋深下的 4.5 %。在本文研究的土力参数条件下，当埋深超过 $5D$ 时，套管对桩身变形的影响已经很小。分析其原因是桩基的响应主要是由浅部的桩土相互作用决定。随着埋深增大，桩身变形相对较小，套管的作用不能充分发挥。所以套管位置的应设置在 $5D$ 以上，但同时受土参数与荷载作用水平的影响。

图 4 表示套管埋深对土抗力的影响。由图可见，与普通桩基相比，设置套管后地基土对桩的抗力在

套管加强处有显著的提高。同时由表 1 可见,埋深 $1D$ 处的土抗力增幅为 40.2 %;埋深 $5D$ 处的土抗力增幅为 54.5 %,这充分说明套管的设置能充分发挥桩土相互作用,提高桩基水平承载力。

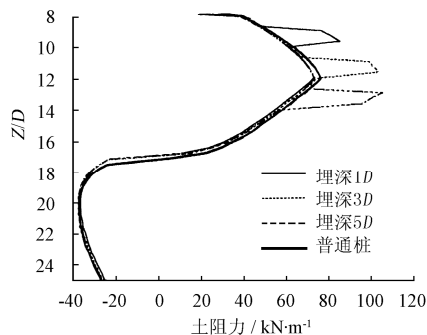


图 4 套管埋深对桩身土抗力的影响

Fig.4 Influence of casing pipe embedded depth on soil resistance

3.2 套管宽度对桩基响应的影响

套管宽度不同,桩基激发的土抗力不同。这里分析单位长度套管的宽度对桩基响应的影响,套管埋深为泥面下 $1D$ 。计算数据见表 2 及图 5 和图 6,现分析套管宽度对桩基变形和土抗力的影响。

由图 5 可见,随着套管宽度的增大,套管桩基桩身的挠度变形相应减小,土抗力则有显著增大。与普通桩基相比,随着套管宽度的增大,套管的减

表 2 套管宽度对桩基变形、土抗力的影响

Table 2 Influence of pipe diameter to pile displacement to pile displacement and soil resistance

参数	挠度变形		
	$D_t=1.0D$	$D_t=1.5D$	$D_t=2.0D$
泥面处响应/mm	64	59.8	54
变形减幅/%	—	6.5	15.6
土抗力/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	61.5	75	86.2
土抗力增幅/%	—	30	40.2

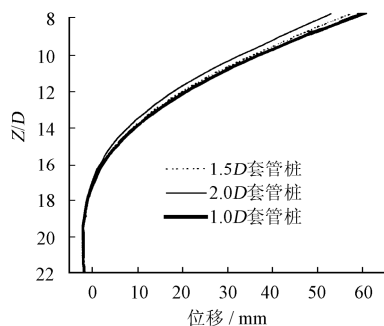


图 5 套管宽度对桩基变形的影响

Fig.5 Influence of casing pipe diameter on pile displacement

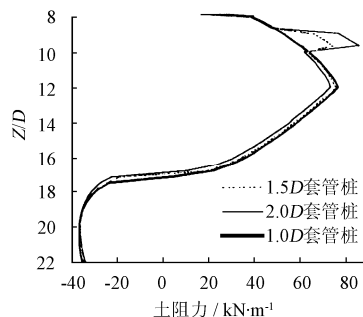


图 6 套管宽度对桩基土抗力的影响

Fig.6 Influence of casing pipe diameter to soil resistance

幅作用显著提高。当套管宽度为 $1.5D$ 时,其泥面处位移减幅程度为 6.5 %,当套管宽度为 $2D$ 时,其减幅程度为 15.6 %,见表 2。图 6 表明,普通桩基设置套管后,地基土对桩的抗力有显著地提高。当套管宽度变为 $2D$ 时,该处的土抗力由 61.5 kN/m 提高到 86.2 kN/m ,增幅为 40.2 %。这也充分说明了套管的设置对降低平台响应幅值方面的有效性。

4 结 论

(1) 浅部套管的设置增大了桩土间相互作用力,从而提高了桩基的水平承载力,减小了桩基变形。

(2) 随着套管埋深的增大,套管在提高承载力或减小响应方面的作用逐渐减弱。

(3) 随着套管宽度的增大,套管激发的桩土作用力增大,桩基承载力提高,变形相应减小。

(4) 套管桩的提出为海洋桩基平台提供了新的结构形式。

参 考 文 献

- [1] Trochanis A M, Bielak J, Christiano P. Simplified model for analysis of one or two piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1991, 117(3): 448—466.
- [2] Brown D A, Morrison C, Reese L C. Lateral load behavior of pile group in sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(11): 1 261—1 276.
- [3] Crouse C B, Kramer S L, Mitchell R, et al. Dynamic tests of pipe pile in saturated peat[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1993, 119(10): 1 551—1 566.
- [4] Ochoa M, O'Neill M. Lateral pile interaction factors in submerged sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(3): 359—378.
- [5] Dunnavant T W, O'Neill M W. Experimental p - y model for submerged, stiff clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1989, 115(1): 95—114.
- [6] Randolph. Response of flexible piles to lateral loading[J]. *Geotechnique*, 1981, 31(2): 247—259.
- [7] American Petroleum Institute, API RP 2A-WSD, 20th, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms[S]. 1993.