

力学

海洋环境下变直径独立桩的有限元分析

唐 娜 俞然刚¹ 邵正飞²

(大庆油田工程有限公司, 大庆 163318; 中国石油大学¹, 东营 257061; 上海同设建筑设计院有限公司², 上海 200092)

摘要 针对变直径独立桩在风、浪、流联合作用下的受力特性进行研究, 以埕岛油田 CB11F 平台处的某一变直径立管桩为例, 应用有限元软件 ANSYS 进行了有限元分析, 分析过程中考虑环境荷载、土壤条件及变直径位置等因素对结构响应的影响, 对光滑渐变的锥形体变径段进行合理地简化, 得到了变径桩在波流作用下的桩顶位移和桩身应力, 并与通长桩的计算结果进行比较, 结果表明, 变径桩的位移和应力减幅都大于 20%, 充分验证了变径措施在降低独立桩位移和减小桩身应力方面的有效性。

关键词 海洋工程 变直径 独桩平台 水平承载力 有限元分析

中图法分类号 O342; **文献标志码** A

在埕岛油田滚动开发的模式下, 采用独立桩结构^[1]型式, 无论在结构型式还是在经济性上都比较适合本海区的特点, 但随着开发水深的增加, 环境荷载逐渐增大, 平台上部结构会产生较大幅度的水平晃动。为了解决平台顶部晃动严重的问题, 海洋开发公司提出了桩身变径的方法。

桩身变径位置一般在海平面以下 1m, 这样可以有效减小波浪、海流和冰荷载的作用面积, 达到降低水平环境荷载的目的。

对桩土模型进行了适当的简化, 应用有限元软件 ANSYS 中 PIPE59 单元的波流荷载自动计算功能^[2]进行独立桩的动力计算, 比较分析变径前后的计算结果, 验证了变径措施的有效性。

1 单桩水平承载力的计算方法

桩的横向承载力主要取决于桩的刚度、强度、入土深度以及土体特性, 打入土体中的桩类似于放在地基上的长梁, 可采用地基反力法计算。取桩的

轴向为 z 轴, 土表面水平方向为 y 轴, 根据梁挠曲变形理论, 可得到水平承载桩的挠曲微分方程:

$$EI \frac{d^4y}{dz^4} + p(y, z) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: y 为 z 深度处的桩身挠度, p(y, z) 为单位桩长上的反力, 表达式如式(2)。

$$p(y, z) = kz^n y^m \text{ 或 } p(y, z) = k(z)y^m \quad (2)$$

式(2)中 k(z) 为地基系数。根据对地基反力 p(y, z) 考虑方法的不同, 桩的横向承载力的计算方法可以分为极限地基反力法、弹性地基反力法和复合地基反力法^[3] (p-y 曲线法) 三种。目前工程上广泛采用的是弹性地基反力法和复合地基反力法 (p-y 曲线法)。前者主要用于受横向荷载时的弹性分析, 后者主要用于弹塑性分析。由于 p-y 曲线法^[4,5] 如实反映了土的非弹性性质及自泥面开始的进行性破坏现象, 因此在海洋平台桩基设计工程中普遍采用。

2 独立桩的有限元建模

2.1 单元的选取

利用有限元软件 ANSYS 建立对应的有限元模型。将桩平台模拟成空间管、梁、板组合结构^[6], 建模过程主要用到的单元为 PIPE59 单元模拟泥面以

2010年6月7日收到, 7月8日修改

第一作者简介: 唐 娜(1983—), 女, 大庆人, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 管道穿越及工业建筑。

上的桩段; PIPE16 单元模拟泥面以下的桩段; COMBIN39 单元模拟土体。

2.1.1 PIPE59 单元

PIPE59 单元是与空间梁单元类似的圆管形单元,可以考虑轴向拉压、扭转、弯曲变形,同时扩充了单元的海洋环境荷载,即浮力、波浪与海流荷载的计算功能。通过输入波流参数表(表 1),可进行海洋环境荷载作用下的结构线性、非线性静力与动力分析。

表 1 波流参数表

1	2	3	4	5
KWAVE	KCRC	DEPTH	DENSW	θ_w
$Z(i)$	$W(i)$	$\theta_d(i)$		
$A(j)$	$\tau(j)$	$\varphi(j)$		

KWAVE 为波浪理论选项,ANSYS 软件中波浪荷载的计算理论有四种,KWAVE = 0 对应微幅波理论; KWAVE = 1 对应 Airy 波理论; KWAVE = 2 对应斯托克斯五阶波理论; KWAVE = 3 对应流函数波浪理论。

KCRC 为波流相互作用选项; DEPTH 为水深; DENSW 为海水密度; θ_{wu} 为波浪入射方向; $Z(i)$ 为从海底到水面不同海流流速所在 Z 坐标值; $W(i)$ 、 $\theta_d(i)$ 分别为各对应高度的海流的流速和流向; $A(j)$ 、 $\tau(j)$ 、 $\varphi(j)$ 分别为波浪的波高、波峰相位角和波浪周期(图 1)。

3.1.2 COMBIN39 单元

COMBIN39 是一种具有非线性广义力—变形能力的轴向弹簧单元,结合根据 $p-y$ 曲线理论计算出来的泥面下某一深度力-变形关系对应的值,就可以模拟海底各层土壤对桩的横向承载作用。

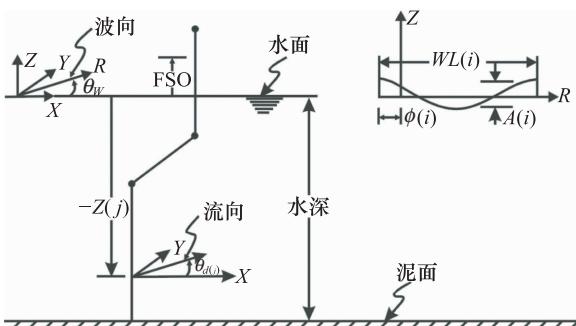


图 1 波流作用方向

2.2 变径位置的简化处理

工程中的变径位置为光滑渐变的锥形体,几何形状见图 2,但由于 PIPE59 单元不具备变径功能,故在有限元模拟中要采用简化处理,采用从上至下沿深度方向分段逐级加大的等直径单元(见图 3)。

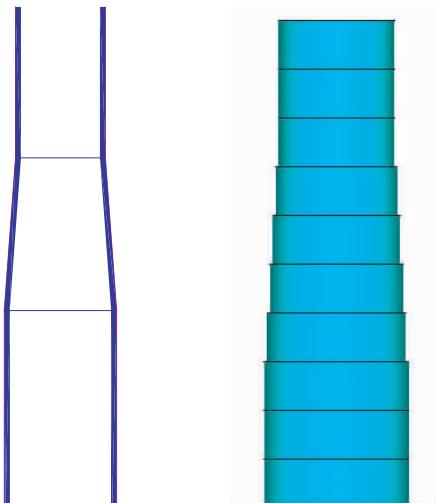


图 2 几何模型

图 3 有限元模型

2.3 波浪理论的选择

常用的波浪理论有微幅波、二次斯托克斯波、五次斯托克斯波三种。这些波浪理论都是通过某些假设与简化得到的。由于不同的假设与简化,理论计算结果有别,也各有适用范围。现采用竺艳蓉提出的适用范围标准^[7],线性波、斯托克斯五阶波、椭圆余弦波理论的适用范围为:

$$\begin{aligned} T \sqrt{g/d} < 6.0, H/d \leq 0.2 &; \text{采用线性波理论;} \\ T \sqrt{g/d} \leq 10.0 & \text{采用斯托克斯五阶波理论}^{[8]}; \\ T \sqrt{g/d} \geq 10.0 & \text{采用椭圆余弦波理论。} \end{aligned}$$

式中 T 为波浪周期; d 为水深; H 为波高; L 为波长; g 为重力加速度。

根据上面的判断准则,现采用斯托克斯五阶波理论进行分析,在 ANSYS 中的实现即为设计定波浪理论选项 KWAVE = 2。

3 计算实例

根据以上计算理论,以埕岛油田 CB11F 平台的

某变直径立管桩为例进行波流荷载作用下的受力分析。

3.1 结构型式

该立管桩采用 $\Phi 1\ 200 \sim \Phi 1\ 500$ 的开口变壁厚变径钢管桩, 壁厚为 26 mm、30 mm、34 mm, 材质为 D32, 桩顶标高 5.0 m, 上设 6 m \times 5 m 桩顶平台一个, 入泥深度为 25 m。

3.2 环境条件

3.2.1 海域条件

(1) 正常波浪条件: 平均水深 12.0 m, 潮位 1.48 m, 波高 4.75 m。周期 8.6 s, 表层流速 0.96 m/s, 底层流速 0.71 m/s, 风速 28.0 m/s。

(2) 极端波浪条件: 平均水深 12.0 m, 潮位 3.08 m, 波高 6.45 m。周期 8.6 s, 表层流速 1.46 m/s, 底层流速 0.94 m/s, 风速 30.5 m/s。

3.2.2 土壤条件

海域的土壤资料见表 2。

表 2 土壤资料表

土层名称	层厚 /m	有效容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗剪强度 /kPa	内摩擦角 /°
粉土	2.6	9.7	/	27
淤泥质土	4.4	7.9	9.7	/
粉质粘土	3.9	8.4	12.8	/
粉土	4.1	10.6	/	23.4
粉质粘土	4.3	9.8	21.1	/
粉土	5.7	10.2	/	27.1
粉砂	16.1	10.0	/	30

3.2.3 工况及荷载组合

根据平台作业方式和荷载组合原则, 主要考虑两种典型工况组合形式:

(1) 正常作业工况: 在设计水位下, 考虑结构自重、活荷载、风荷载、波流荷载和浮力, 荷载作用方向为水平 X 轴方向。

(2) 极端波浪工况: 在校核水位下, 考虑结构自重、风荷载、波流荷载和浮力, 荷载作用方向为水平 X 轴方向。

3.3 静力分析

结构静力分析的目的是通过各工况下的结构

分析, 求得结构的桩顶位移和构件的最大内力, 结果见表 3。

表 3 静力计算结果

桩型	正常作业工况		极端波浪工况	
	位移/cm	应力/MPa	位移/cm	应力/MPa
通长桩	4.47	22.79	11.83	47.11
变径桩	3.46	17.47	8.57	35.55
减幅	22.6%	23.3%	27.6%	24.5%

3.4 模态分析

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值方程:

$$[K]\{\varphi_i\} = \omega_i^2[M]\{\varphi_i\}.$$

式中 $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\varphi_i\}$ 为第 i 阶模态的振型向量(特征向量); ω_i 为第 i 阶模态的固有频率(ω_i^2 是特征值); $[M]$ 为质量矩阵。

选用 ANSYS 程序中的 Block Lanczos 法对独立桩模型进行模态分析, 提取结构各阶振型的自振频率, 计算固有频率。图 4 即为结构前三阶振型图。

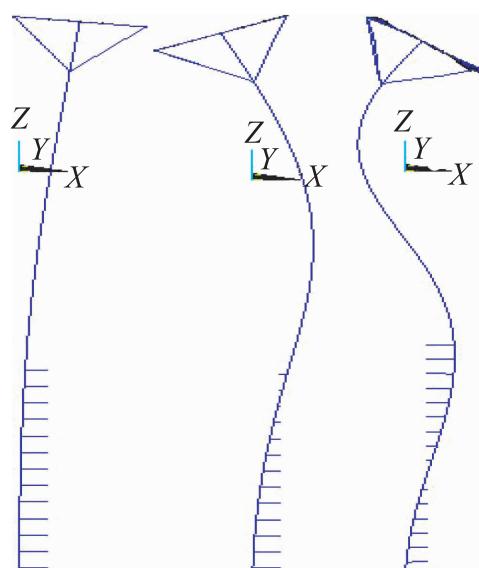


图 4 第 1~3 阶振型图

其中, 第一阶为横向振动, 第二阶为纵向振动, 第三阶为扭转方向振动。前三阶振型的固有频率分别为 1.313 3、7.388 7 和 17.748, 计算可得第一阶频率对应的自振周期为 0.7 s, 而波浪周期为 8.6 s, 可见独桩平台的结构自振频率很好地避开了波浪的固

有频率,避免了共振现象的发生。

3.5 动力分析

利用 ANSYS 进行波浪工况作用下独立桩的瞬态动力求解后,由时间历程后处理器 POST26 可以得到结构出现最大位移值时节点的水平位移随时间变化的曲线。图 7 为极端波浪工况下,桩顶水平位移在 0~50 s 内的时间历程动力响应曲线。

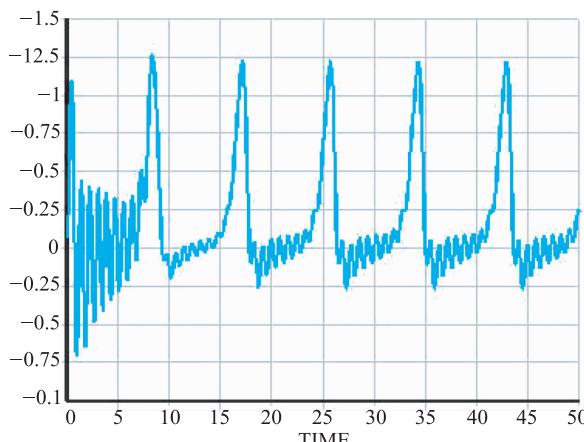


图 5 极端波浪工况下桩顶位移的时程曲线

由图 7 得到,独立桩的最大位移出现在 8.3 s,通过 ANSYS 普通后处理功能可以得到这一时间点的位移、应力的最大值。通长桩和变径桩的计算结果比较见表 4:

表 4 两种桩型的计算结果比较

桩型	桩顶位移/cm			最大应力/MPa		
	静力 计算	动力 计算	放大 系数	静力 计算	动力 计算	放大 系数
通长桩	11.83	17.57	1.49	47.11	63.17	1.34
变径桩	8.57	12.59	1.47	35.55	47.89	1.35
减幅	27.6%	28.3%	/	24.5%	24.2%	/

4 结论

1) 在对独立桩进行有限元分析的过程中,采用 $p-y$ 曲线法考虑土体的非线性,将桩身受到的土反力作用简化为一系列等效集中的非线性弹簧,用 COMBIN39 单元模拟,真实地反映了桩—土间的相互作用,为独立桩的理论计算提供了新的思路。

2) 比较动力和静力分析的结果,可以得出,极端波浪工况下,独立桩的动力响应现象比较显著,位移和应力的放大系数都超过了 1.3,因此,对独立桩进行结构计算时必须考虑动力响应的影响。

3) 极端波浪工况下,无论是静力计算还是动力计算,与通长桩相比,变径桩的位移和应力减幅都大于 20%,充分验证了变径措施在降低独立桩晃动和减小桩身应力方面的有效性。

参 考 文 献

- 王世敬,徐常胜. 胜利浅海单井采油平台的发展过程及浅海采油平台的发展趋势. 中国海洋平台, 2003,18(6): 18—21
- 李茜,杨树耕. 采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析. 中国海洋平台, 2003,18(4): 41—46
- 横山幸满,著,唐业清、吴庆荪,译. 桩结构物的计算方法和计算实例. 北京:中国铁道出版社,1984:14—136
- API PR 2A. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform, American Petroleum Institute, 1991
- 中国船级社. 海上固定平台入级与建造规范. 北京:人民交通出版社,1992
- 张建勇. 浅海独桩平台有限元分析及合理结构型式研究. 天津:天津大学,2005
- 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学. 天津:天津大学出版社,1991: 61—62
- Skjelbreia L, Hendrickson J A. Fifth order gravity wave theory. Proceedings, Seventh Conference of Coastal Engineering, 1961, 1: 184—196

(下转第 6256 页)

THz Frequency Division Multiplexer Based on Two-dimensional Photonic Crystal

ZHANG Hui, CHANG Sheng-jiang¹

(College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, P. R. China;
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, P. R. China)

[Abstract] A THz frequency division multiplexer based on two-dimensional photonic crystal defects is designed and analyzed. The device consists of two waveguides formed by line defects in photonic crystal as up and load waveguides and two air point defects separated by a silica rod as frequency selectors whose selected frequency can be tuned by the radius of the air defects and the silica rod between them. The results simulated by plane wave expansion method and finite difference time domain method indicate that the frequency division multiplexer has two narrow band peaks at 0.927 THz and 1.184 THz.

[Key words] THz frequency division multiplexer photonic crystal finite difference time domain method

(上接第 6247 页)

Finite Element Analysis on an Independent Variable Diameter Pile under the Marine Environment

TANG Na, YU Ran-gang¹, SHAO Zheng-fei²

(Daqing Oilfield Engineering Co., LTD, Daqing 163318, P. R. China; Chinese Petroleum University¹, Dongying 257061, P. R. China;
Shanghai Tongshe Architectural Design Institute Co., LTD², Shanghai 200092 P. R. China)

[Abstract] Research on the mechanical properties of variable diameter independent pile under the combined action of wind, wave and flow is carried out. Take a variable diameter independent pile in CB11F platform of Cheng-dao oilfield for example, simulative analysis is performed using the finite element software ANSYS, considering the influence for some factors to structure response, that is environmental load, soil conditions and variable diameter position. The variable diameter part of the smooth gradient cone is simplified reasonably, getting the top of the displacement and the whole body stress of variable diameter pile under wave and flow actions, comparing with the result of non-variable diameter pile. The results show that the displacement and stress of variable diameter pile decrease more than 20%, the measure adopted in this paper about decreasing the displacement of independent pile and the stress of whole body is validated.

[Key words] ocean engineering variable diameter single pile platform horizontal bearing capacity
finite element analysis