

采油平台与土共同作用的动态有限元分析*

张崇文 张社荣 秦子健 徐继祖
(天津大学, 300072)

1. 前言

目前在渤海油气田的开发和生产中, 所采用的采油平台一般是具有桩基础的导管架式的固定平台。

实践表明, 桩基式的海上采油平台抗冰荷载能力不强, 而且工程投资大、不能搬迁和重复使用, 这后两种原因, 特别不适用于早期生产和边际油田。为此, 近年来, 渤海工程设计公司及有关单位协作研究了一种新型采油平台。此种平台具有造价低、抗冰能力好和能重复使用等特点。经对此种结构的初步分析研究, 认为是可行的^[1]。对此种结构的深入研究, 尤其是结构与土的相互作用问题的研究引起了国内不少学者的兴趣, 开展了多项研究。

众所周知, 海洋采油平台在设计中特别关注的是波浪、水流、海冰和地震所产生的瞬态和周期性的动力载荷的作用。目前, 对这类载荷的动力作用的研究一般采用动力有限元法, 本文拟在前人研究的基础上, 采用作者所推导的三维等参动态有限元对此种结构与土的相互作用的动力问题进行尝试性的研究, 得到了一些有参考价值的结论。

2. 平台形式及现场地质条件

2.1 主体结构和基本尺度

本文是以辽东湾JZ-202油田的采油平台为研究对象。其主体结构形式见图1。

此平台基础结构是由四个沉箱和二根斜底梁与四根水平底梁构成的。沉箱呈正方形布置由四根水平底梁和二根斜底梁连接。沉箱直径为6.0m, 斜底梁与水平底梁直径为2.5m。在二根斜底梁的交叉点上有一根立柱与上部结构联接。这根中央立柱的直径在高程-2.5m处为6.0m, 由此向下直径逐渐加大, 至高程-20.5m处为7.0m。上部结构的重量和沉箱中压载(有效净重为21304kN)作为集中质量, 施加于平台的有关部位。

2.2 现场地质条件

根据文献[1]所提供的井位的工程地质资料情况, 海底地层大致分为三层, 从海底泥面

*国家自然科学基金资助项目。
到稿日期: 1992-08-20.

高程-18.5m起沿深度方向的情况是:

- (1)第Ⅰ层土: 土层深度为0.0~5.5m(或8.5m)。这层土是由淤泥、淤泥质粘土和粉质粘土所组成, 土质较软或非常软。
- (2)第Ⅱ层土: 土层深度为8.5m(或10.0m)~21.0m(或23.0m)。土质褐灰色粉砂和粉质土互层。同时含有较多的砂透镜体, 结构松散。

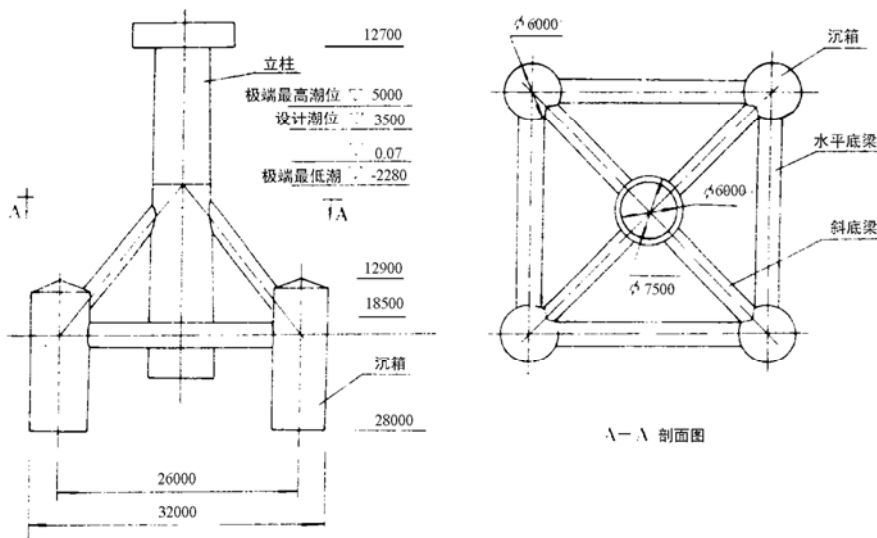


图1 平台结构图

- (3)第Ⅲ层土: 土层深度为21.0m(或23.0m)~50.0m。土质为褐灰色的粉细砂, 结构密实, 强度较高。
- 以上三层土的物理力学指标见表1。

表1		土层物理力学指标					
层 次		土名	土层深度 (m)	含水量 (%)	容重 (kN/m³)	不排水剪强度 S _n (kPa)	内摩擦角 φ (°)
Ⅰ	1	淤泥	0.0~0.5	60	16.2	20~50	—
	2	淤泥质粘土	0.5~1.5	40~45	17.0~18.0	50~150	—
	3	粉质粘土	1.5~5.5(8.5)	30	18.5~19.5	400~750	—
Ⅱ		粉砂与粉质土互层	8.5(10.0)~21.0(23.0)	25~30	16.8~20.1	750~1000	25~35
Ⅲ		粉细砂	21.0(23.0)~50.0	22~25	19.5~20.3	3500~4000	—

3. 三维动态等参单元理论推导简介

自从J.S.Przemieniecki提出动态有限单元法(finite dynamic element method)的概念以来^[2], 国内外学者相继也发表了一些论文^[3-5], 笔者在前人研究的基础上作了一些研究^[6-9]。

本文在研究中引用了文献[9]的理论推导和计算公式, 在此作一简要介绍。

3.1 动态有限单元法的基本思路

动态有限单元在分析结构振动问题时, 所采用的位移模式为

$$\{u(t)\} = [N(x, y, z, \omega)]U(t) \quad (1)$$

式中 $\{u(t)\}$ 为单元内任意一点位移矢量; $U(t)$ 为单元结点的位移矢量; $[N(x, y, z, \omega)]$ 为动态有限单元的形函数(简称动态形函数); x, y, z 为所采用的坐标系下的坐标; ω 为结构的圆频率; t 为时间。

式(1)中动态形函数与动力有限单元法的形函数不同之处, 在于动态形函数不仅与单元形状和所选取的坐标有关, 而且也与结构的圆频率 ω 有关。但动力有限单元法的形函数是一种静态形函数, 它仅仅与单元形状和所取的坐标有关。

实际上, 当结构振动时, 其振动位移场可由结构的各阶主振动线性叠加得出, 应是整个时间历程的函数。根据目前见到的文献资料和笔者所进行的工作表明, 采用动态有限单元法来分析结构的动力问题会得到更为精确的结果, 尤其在求解结构反应问题时, 效果更佳。

3.2 三维等参数动态有限单元法理论公式简介

为了解决新型海上采油平台与土动力相互作用问题, 现将文献[9]中的理论公式简介如下:

(1) 动态位移形函数

三维六面体八结点单元的计算模式见图2。

无阻尼自由振动微分方程为

$$\nabla^2 u_i + \alpha_2(u_{j,j})_{,i} = \beta \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

式中 ∇ 为拉氏算子; $u_i (i = x, y, z)$ 为单元内任意

一点的位移; $\alpha_2 = \frac{1}{1-2\mu}$; $\beta = 2(1+\mu)\frac{\rho}{E}$; ρ, E, μ 分

别为单元材料的质量密度、弹性模量和泊松比。

单元内任意一点的位移采用的形式为

$$u_j = \sum_{r=0}^{\infty} \omega^r [\bar{N}_{r,j}] |q| e^{i\omega t}, \quad (j = x, y, z) \quad (3)$$

式中 $[\bar{N}_r]$ 为各阶动态形函数; $|q|$ 为单元结点位移 U 的振幅列阵。

三维六面体八结点动态单元的前三阶位移形函数为:

a) 零阶动态形函数。其形函数 $[\bar{N}_{0x}]$ 、 $[\bar{N}_{0y}]$ 和 $[\bar{N}_{0z}]$ 的形式与静态位移形函数相同。在各结点上可写成

$$\left. \begin{aligned} [\bar{N}_{0x}]^{1,5} &= [\bar{N}_{0y}]^{1,5} = [\bar{N}_{0z}]^{1,5} = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1\mp\zeta) \\ [\bar{N}_{0x}]^{2,6} &= [\bar{N}_{0y}]^{2,6} = [\bar{N}_{0z}]^{2,6} = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1\mp\zeta) \\ [\bar{N}_{0x}]^{3,7} &= [\bar{N}_{0y}]^{3,7} = [\bar{N}_{0z}]^{3,7} = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1\mp\zeta) \\ [\bar{N}_{0x}]^{4,8} &= [\bar{N}_{0y}]^{4,8} = [\bar{N}_{0z}]^{4,8} = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1\mp\zeta) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

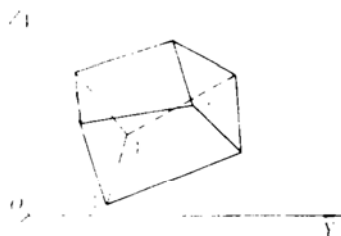


图2 六面体八结点单元

式(4)中的上标为结点号。例如 $[\bar{N}_{\alpha\alpha}]^{1,5}$ 分别表示第1结点和第5结点的表达式。

b) 一阶动态形函数

$$[\bar{N}_{1x}] = [\bar{N}_{1y}] = [\bar{N}_{1z}] = 0 \quad (5)$$

c) 二阶动态形函数。由于 $[\bar{N}_{2i}]$ ($i = x, y, z$) 各表达式较长, 在此, 只写出其中一个, 例如:

$$\begin{aligned} [\bar{N}_{2x}]^1 = \frac{1}{144} \rho \left[\frac{1}{\alpha_1} (3 - \xi - 3\eta - 3\zeta + \xi\eta + 3\eta\xi - \zeta\xi - \xi\eta\zeta - 3\xi^2 + \xi^3 \right. \\ + 3\xi^2\eta + 3\xi^2\zeta - \xi^3\eta - 3\xi^2\eta\zeta - \xi^3\zeta + \xi^3\eta\zeta) + (6 - 6\xi - 4\eta - 4\zeta + 4\xi\eta + 2\eta\zeta + 4\zeta\xi \\ - 2\xi\eta\zeta - 3\eta^2 - 3\zeta^2 + 3\xi\eta^2 + 3\xi\zeta^2 + \eta^3 + 3\eta\zeta^2 + 3\eta^2\zeta + \zeta^3 - \xi\eta^3 - 3\xi\eta\zeta^2 \\ \left. - \eta^3\zeta - \eta\zeta^3 - 3\xi\eta^2\zeta - \xi\zeta^3 + \xi\eta^3\zeta + \xi\eta\zeta^3) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

(2) 单元的坐标形函数

$$[N_i] = \frac{1}{8} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 + \zeta_i \zeta), \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (7)$$

由于本文所用的位移形函数和坐标形函数不同, 故本文运用局部坐标所建立的单元可称之为等参形式动态有限单元。

(3) 动态单元刚度矩阵和质量矩阵

根据动态有限单元的基本概念, 动态位移形函数可以写成

$$[\bar{N}_i] = [\bar{N}_{0i}] + \omega^2 [\bar{N}_{2i}], \quad (i = x, y, z) \quad (8)$$

动态单元刚度矩阵可写成

$$[K]^e = [K_0]^e + \omega^4 [K_4]^e$$

式中 $[K_0]^e$ 与一般有限单元法相同, 即

$$[K_0]^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_0]^T [D] [B_0] |J| d\xi d\eta d\zeta,$$

$$[K_4]^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_2]^T [D] [B_2] |J| d\xi d\eta d\zeta;$$

$[B]$ 为应变转换矩阵; $[D]$ 为弹性矩阵; $|J|$ 为雅可比矩阵行列式。

动态单元质量矩阵可以写成

$$[m]^e = [m_0]^e + \omega^2 [m_2]^e \quad (9)$$

$$\text{式中 } [m_0]^e = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [\bar{N}_0]^T [\bar{N}_0] |J| d\xi d\eta d\zeta;$$

$$[m_2]^e = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 ([\bar{N}_0]^T [\bar{N}_2] + [\bar{N}_2]^T [\bar{N}_0]) |J| d\xi d\eta d\zeta.$$

4. 计算模型和基本假设

4.1 计算模型

对于图1的工程结构情况进行结构与土相互作用研究, 在采用笔者所推导出的理论时, 工程结构的离散状况见图3。

4.2 基本假设

在图3中, 采油平台(包括沉箱及底梁)按等频原则划分成一般有限单元法的三维梁单元。

由于水平底梁之上有水体(水体深度以设计潮高为准)。在分析计算中考虑为动水压力, 作为附加质量施加于采油平台结构上, 即

$$[M_{总}] = [M_{结}] + [M_{动水}] \quad (10)$$

式中 $[M_{结}]$ 为采油平台结构物的质量矩阵; $[M_{动水}]$ 为动水压力转化的质量矩阵。

在实际情况下, 水平底梁上有7m~8m的淤泥层, 分析考虑为二种情况:

(1) 方案 I —— 淤泥作为重粘度液体

笔者分析认为此层淤泥具有一定的流动性(在振动情况下)。因此, 在运动时可能产生两个方面的作用力, 即惯性力和阻尼力。

惯性力按动水压力的处理方法作为附加质量施加于采油平台结构物上, 即

$$[M_{总}] = [M_{结}] + [M_{动水}] + [M_{淤}] \quad (11)$$

式中 $[M_{淤}]$ 为淤泥形成的惯性力转化的质量矩阵。

阻尼力在分析中用一个阻尼系数 $[C_{淤}]$ 来计算其作用。在整体分析中其总的阻尼矩阵可以写成

$$[C_{总}] = [C_{结}] + [C_{淤}] \quad (12)$$

式中 $[C_{淤}]$ 为淤泥的阻尼作用而形成的阻尼矩阵; $[C_{结}]$ 为结构物的阻尼矩阵。

(2) 方案 II —— 淤泥作为土体的一部分

在分析中, 与下层土体一起划分成三维单元。

分析土体范围的选取, 根据一般情况, 土体整个宽度为井口平台底部宽度的三倍, 土体的整体高度为井口平台沉箱高度的三倍。

地基边界条件在分析中, 由于考虑冰载荷的水平方向动力作用, 土体两侧边界在水平方向上约束; 在土体的底部边界为全约束。

众所周知, 结构与土的相互作用问题十分复杂, 土存在非线性问题; 土体边界存在反射、吸收等问题; 土体与结构物的接触问题等等都是值得探讨的问题。作者在此为了首先运用动态有限单元法对此类问题进行尝试性的研究, 故限定为线弹性范围内进行, 从而了解该类结构与土相互作用的机理。通过分析研究, 得出了一些有益的结果。

5. 计算结果分析

采油平台在冰载荷作用下的动力反应, 本文采用了威尔逊法进行的历程分析。采油平台上作用的冰载荷最大值为5377.5kN; 最小值为1792.6kN。冰载荷函数呈锯齿状分布, 作用周期为1.776s。见图4。

自振特性分析则采用了斯特姆序列与迭代法联合求解。

整个分析计算按照笔者所推导的理论公式而编制的计算机程序DFEC进行的。计算结果分析如下:

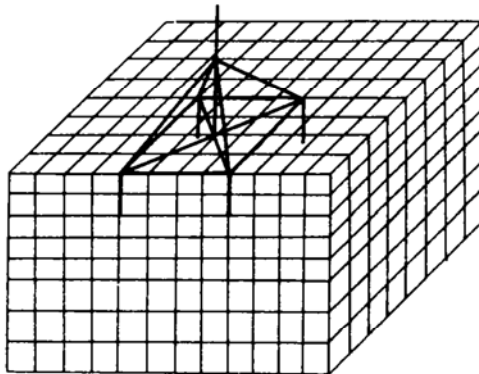


图3 结构离散示意图

5.1 自振周期

两种计算方案所得到的自振周期列于表2之中。

表2 二种计算方案的前六阶自振周期(s)

方案	振动阶数(N)					
	1	2	3	4	5	6
I	2.758	1.296	1.274	0.875	0.580	0.438
II	2.763	0.996	0.531	0.473	0.383	0.376

5.2 底梁的反力分布

图5表示两种计算方案底梁在冰载作用下，在时刻 $t=1.6s$ 时最大反力分布情况。

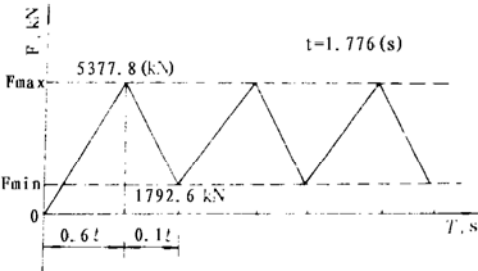


图4 冰载荷函数分布图

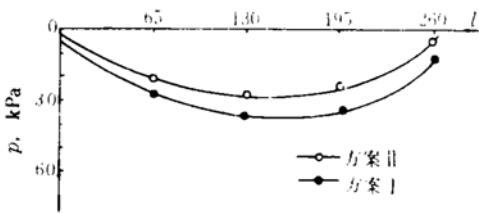


图5 底梁反力分布图($t=1.6s$)

5.3 沉箱两侧土体抗力分布

本文取一个沉箱箱腿情况进行分析，其抗力分布见图6。

5.4 前沉箱水平反应位移曲线

这里所言的前沉箱是指在冰载荷作用方向上不直接承受载荷的沉箱。其水平反应位移分布见图7。

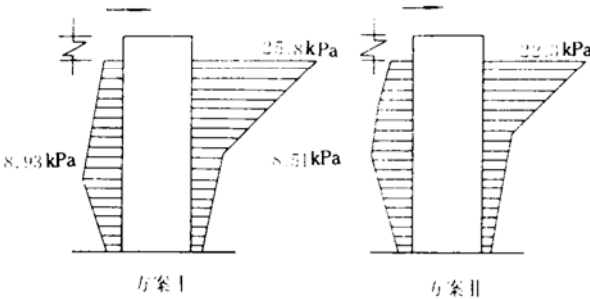


图6 沉箱两侧土体抗力分布($t=1.6s$)

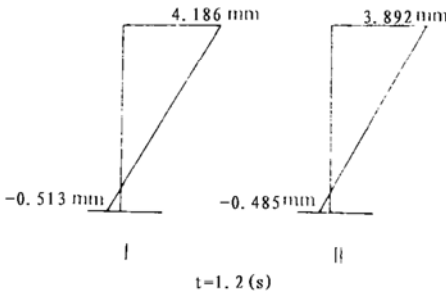


图7 前沉箱水平反应位移分布曲线($t=1.2s$)

5.5 沉箱底部水平面上土体各点水平反应位移分布

图8表示了沉箱底部水平面上土体各点水平反应位移分布情况。

综合上述各项结果情况，可以看出：

- (1)第一自振周期两种方案相差不大。但从2到6阶自振周期有明显的缩短情况。原因在于方案II淤泥作为土体的一部分，从而增大了水平底梁和斜底梁的支撑能力。
- (2)在1.6s时刻底梁反力出现最大值。并偏于底梁中点的一侧，此现象是符合规律的。从

结果看出, 方案Ⅰ是把淤泥作重粘度液体看, 故其底梁反力增大是合理的。

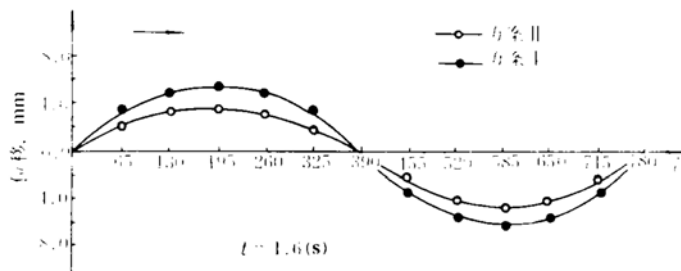


图8 沉箱底部水平面上土体各点水平反应位移分布 ($t=1.6s$)

(3)沉箱两侧土体抗力和前沉箱水平反应位移, 两方案相差不大。但由于方案Ⅰ考虑淤泥作为重粘度液体施加的作用, 故上述的抗力和反应位移均大于方案Ⅱ。

(4)沉箱底部水平面上土体各点水平反应位移在井口中心两侧呈反对称分布 ($t=1.6s$)。由此可以说明平台是处于正常的运动之中。两种方案的水平反应位移均不太大, 可以说采油平台在冰载荷作用下处于较稳定的工作状态。

6. 结 语

(1)动态有限单元法用于结构与土的相互作用研究是可行的。经分析说明笔者所推导的三维等参动态单元的理论公式是正确的, 可以应用的。

(2)对海洋采油平台基础结构与土的相互作用的研究所提出的两种方案是一种尝试性分析。关于方案Ⅰ是属于长周期作用的动载荷, 仍需深入研究。

参 考 文 献

1. 天津大学海洋与船舶工程系. 辽东湾深卧基础式平台可行性研究报告. 1988.
2. 普齐米尼斯基J S. 结构分析理论. 王德荣译. 北京: 国防工业出版社, 1975.
3. Gupta K K. On a finite dynamic element method for free vibration analysis of structures. Comput Meth Appl Mech Eng, 1976(9): 105~120.
4. 陈显钧, 赵令诚. 弯曲板固有振动分析的动态有限元素法. 振动与冲击, 1982(2).
5. 张汝清等. 计算结构动力学. 重庆大学出版社, 1987.
6. 张崇文, 桂国庆. 三维动态八结点有限单元的建立及理论推导. 振动工程学报, 1991, 4(3): 60~65.
7. Chongwen Zhang, Guoqing Gui. A new formulation of the finite dynamic element for free vibration analysis of two-dimesional structures, J. of Tianjin University, 1992(2): 38~48.
8. 张崇文, 陈荣. 二维等参形式动态有限单元的建立与理论推导. 振动工程学报, 1992, 5(4): 343~354.
9. 张崇文, 徐继祖, 秦子健. 三维等参形式动态有限单元的理论推导. 天津大学学报, 1992(4): 64~70.