

深卧式基础与土 相互作用的有限元分析

邓 冰

(交通部天津水运工程科学研究所)

摘 要: 深卧式基础采油平台采用由沉箱及底梁构成的基础,是渤海的一种新型平台。它同传统的导管架式平台相比,具有工程上、经济上明显的优势。本文对垂直及水平荷载作用下,平台基础与土的相互作用进行了三维非线性有限元分析。计算中运用导出的具有显式刚度矩阵的三维梯形单元进行离散,以节约机时。

计算结果与配合开展的室内实验结果基本吻合。

关键词: 深卧式基础,基础与土相互作用,非线性有限元分析

中国图书分类号: TE951

天津大学和渤海石油设计公司提出了深卧基础式平台方案。其可行性研究成果^[1]已通过部级鉴定。深卧基础式平台在岸上建造、浮运至井位,用吹排泥法下沉。经论证,这种平台具有造价低,海上施工期短,抗冰效果好,可重复使用等优点。而且它将隔水套管同时作为支承桩,可降低工程造价,施工也方便,但对这种由沉箱、底梁构成的组合式基础与土相互作用的力学机制,还缺少理论阐明和实验验证。为此,针对这种基础,又开展了国家自然科学基金重大项目“渤海新型平台基础与土相互作用研究”的工作。本文的研究工作是其中的一个组成部分。以井口保护平台(图1)为研究对象。其基础由钢质圆沉箱和底梁组成,这种基础与土的相互作用问题,相当于码头、建筑工程中常见的桩、承台与土的共同作用问题,其中沉箱相当于桩,底梁相当于承台。

1 理论分析

1.1 三维梯形有限单元

在以往的三维有限元分析中,一般常用八节点或二十节点等参单元,在计算单元刚度矩阵时,均采用高斯积分的方法。以八节点等参元为例,至少要采用 $2 \times 2 \times 2 = 8$

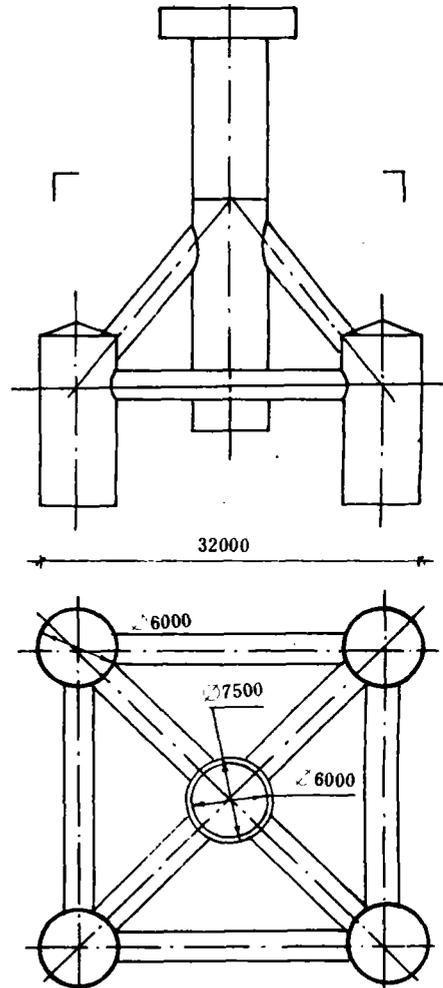


图1 深卧基础式井口平台结构图

个高斯点进行高斯积分，这样就带来了大量的乘法运算增加了机时。尤其在单元较多的情况下，这个问题将更加突出。为了节约机时，又不降低精度，有必要以等参元为基础，推导出单元刚度的显式表达式，这必然使计算机的费用降低，具有经济效益。

梯形单元的形状如图 2(a) 所示，设它有分别平行于 XOY、YOZ 坐标平面的两对平行面，其母单元如图 2(b) 所示。它的位移模式为：

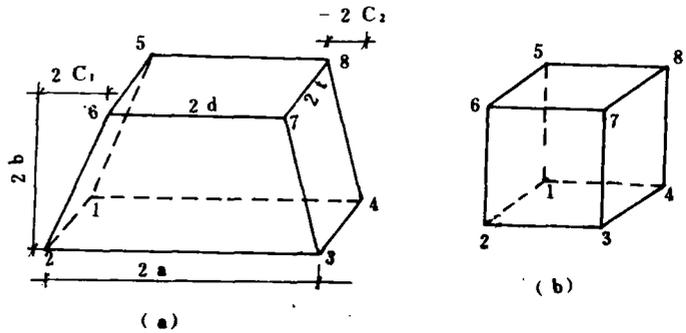


图 2 八节点三维梯形单元(a) 及其母单元(b)

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) u_i \\ v = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) v_i \\ w = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) w_i \end{cases} \quad (1)$$

式中， u_i, v_i, w_i ($i=1, 2, \dots, 8$) 分别是节点 1 到 8 的 X 向、Y 向、Z 向位移。 $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ 是形函数，由下式确定：

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

式中 ξ_i, η_i, ζ_i 为各节点的局部坐标。

根据虚功原理，可知单元刚度矩阵有下列形式：

$$[K] = [B]^T [D] [B] dx dy dz = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,8} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \dots & k_{2,8} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{8,1} & k_{8,2} & \dots & k_{8,8} \end{bmatrix} \quad (2)$$

经推导得每一个子矩阵的显式表达式为：

$$[K_{ij}] = A_j \begin{bmatrix} H_1 + A_2(H_5 + H_9) & A_1 H_2 + A_2 H_4 & A_1 H_3 + A_2 H_7 \\ A_1 H_4 + A_2 H_2 & H_5 + A_2(H_1 + H_9) & A_1 H_6 + A_2 H_8 \\ A_1 H_7 + A_2 H_3 & A_1 H_8 + A_2 H_6 & H_9 + A_2(H_1 + H_5) \end{bmatrix}$$

式中： A_1, A_2, A_3 是与材料性质 E, μ 有关的常量； $H_1, H_2, H_3, \dots, H_9$ 是与单元形状有关的常量，详略。

1.2 计算模型及其求解

本文以邓肯—张模型模拟土的本构关系。它是非线性弹性模型，它与双曲线函数模拟土的应力—应变关系⁸。在深卧式基础与土相互作用有限元分析时，土参数的取值如表1、是通过试验土样的三轴固结不排水剪得到的。

邓肯—张模型参数

(三轴固结不排水剪)

表1

容重 γ kN/m ³	粘聚力 C N/cm ²	内摩擦角 Φ (度)	破坏比 Rf	模量系数 K_2	模量指数 n
18.2	0.1	27.5	0.90	122	0.80

对非线性问题的求解，采用初应力法。通过调整初应力的大小，用线弹性解逼近非线性解。这同本文选用的分块直接三角分解法是相匹配的。在初应力迭代过程中，只需将总刚度矩阵的分解结果回代一次，即可求得本次迭代的解，提高了解题效率。

2 程序设计及检验

根据以上所述的三维梯形有限单元及土体本构关系，用 FORTRAN 语言编制了 DFESS 三维非线性有限元程序，该程序具有数检功能，并能自动生成节点号、节点坐标及单元号。DFESS 采用一维变带宽分块存贮刚度阵，能最有效地利用计算机的内存空间并使几千个自由度的大型有限元分析成为可能。在解方程时，采用克劳特 (croute) 直接三角分解法。

本文用工程中常用的 SAP5 程序的计算结果对比了二十七节点小题目的线弹性的 DFESS 计算结果，二者完全一致。并通过带桩台单桩的算例分析、比较、检验了 DFESS 线性、非线性结果，证明了 DFESS 程序的正确性。

有关程序编制的详细内容可见文献^[10]。

3 理论计算结果分析

3.1 简介

计算时采用前两节所提到的计算模型和程序，运用试验测得的土参数，对试验平台及地基进行了三维非线性有限元分析。分析时，利用对称性，取结构及地基的一半作为计算域。计算域深度约为沉箱高度的3倍，宽度约为平台宽度的3倍。地基的边界条件，除底面固定、地表自由外，其他界面均施加垂直于界面的链杆约束。计算域划分为504个单元，728个节点。垂直及水平荷载分5级加上，垂直各级为1.0kN、2.0kN、4.0kN、3.0kN，水平为0.5kN。计算时间在M—240D机上用8小时左右。

另外，在理论计算的同时，作者还同课题组的其它同志进行了深卧基础式平台基础与土相互作用的室内试验。试验结果同计算结果基本吻合。有关试验的详细情况可见文

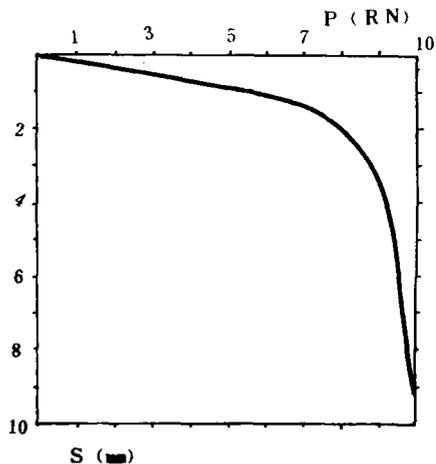


图3 平台的荷载沉降曲线

献^[10]。

3.2 垂直荷载作用下的计算结果分析

3.2.1 平台和土体的位移

按4级加荷的平台荷载与整体沉降的关系，如图3所示。从曲线中可看出，平台的极限荷载约为7.0kN，这同模型试验结果是基本一致的。

当荷载加至10.0kN时，土体的垂直位移场及水平位移场如图4所示。由图中看出，底梁下土体有显著位移。沉箱底部的垂直位移最大，但在沿侧向3倍沉箱宽度以外，沿沉箱底面1倍沉箱高度以下，垂直位移已很小。由于底梁的存在，沉箱之间土体有向外挤出的趋势

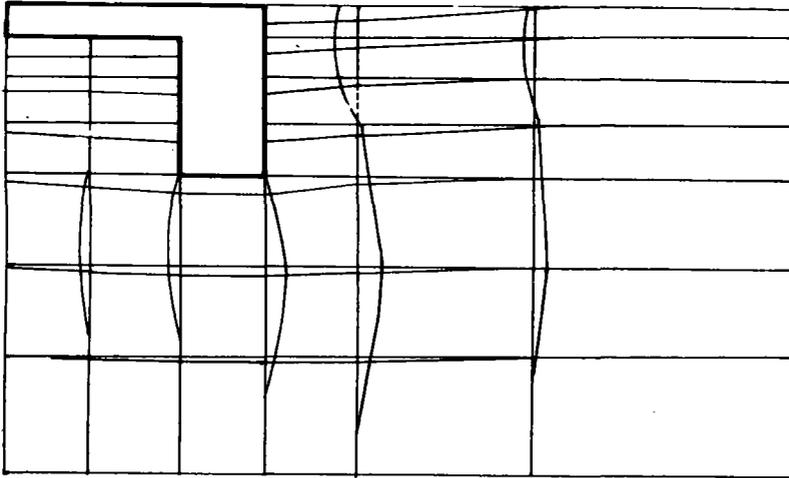


图4 土体的垂直位移场及水平位移场

3.2.2 平台基础各部分受力特点

在各级垂直荷载作用下，沉箱底部反力、侧壁摩阻力及底梁反力分布，如图5所示。沉箱下端外侧摩阻力小于内侧，反映出底梁存在对箱侧摩阻力的增减调节作用。

理论计算求得的沉箱底部反力、侧面摩阻力及底梁反力在垂直荷载中所分担的份额，可见表2。

由表2可看出，在加荷初期，沉箱底部反力和底梁反力份额随荷载增大而增加，侧壁摩阻力份额则减小。这一趋势同试验是吻合的。底梁分担外荷载的比例同试验非常接近，最后一级荷载时，侧摩阻力的回升，可能是地基达到极限承载力后，平台产生较大沉降而引

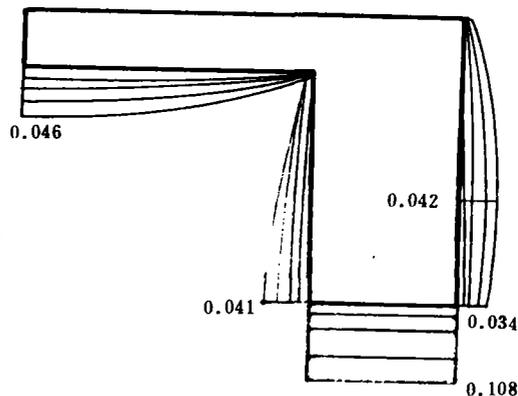


图5 沉箱底部反力、侧面摩阻力及底梁阻力分布(MPa)

起的。

分担外荷份额随荷变化

表 2

份额 反力	荷载		1.00	3.00	7.00	10.00
	%	kN				
底梁反力			34.0	34.8	33.1	30.9
箱底反力			39.5	41.7	50.8	46.0
箱侧阻力			26.5	23.5	16.1	23.1

3.2.3 土体中垂直应力分布及塑性开展情况

土体中的垂直应力中沉箱底面以下及沉箱外侧的衰减都很快。其影响域约在箱底下一倍沉箱埋深及箱外侧一倍沉箱直径的范围内。

土体的塑性区在加第三级垂直荷载时（总荷重为 7.0kN）在沉箱外侧的土体中出现。至第四级垂直荷载时，扩展到沉箱外侧两倍沉箱直径的范围。但沉箱底部没有出现土体的塑性区，可能是由于土体三向受压的缘故。

3.3 水平荷载下箱侧土反力分布

前后沉箱在侧面的横向土抗力分布如图 6 所示。

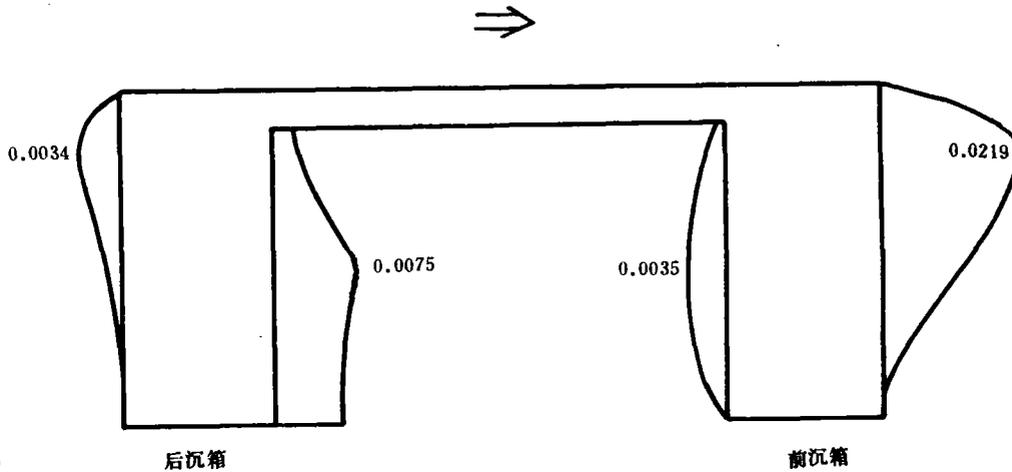


图 6 沉箱两侧的横向土抗力 (MPa)

由图 6 看出，前沉箱分担的水平荷载比后沉箱大，这与试验结果是一致的。

4 结论

总结本文的理论分析及模型试验，可得到以下几点主要结论

4.1 深卧基础式平台采用的组合式基础、其沉箱、底梁与土共同构成相互作用体系，不能忽略任一部分的作用。这种平台在工程上、经济上具有明显的优点。

4.2 沉箱在基础中的使用是显著的，在平台的工作条件下，沉箱可分担垂直荷载的 70% 左右，其中箱底反力约分担 50%，箱侧壁摩阻力约分担 20%。另外，沉箱还承担着水平荷载的大部。

4.3 底梁在基础中起着重要作用,它一般可分担垂直荷载的30%左右,而且它可以改善基础的荷载沉降特性,提高其安全度,并具有对沉箱侧壁摩擦阻力的增减调节作用。

4.4 本文提供的计算基础与土相互作用的三维有限元分析方法和计算程序,其模型选用合理,运算功能和效率较好,计算结果较合理,可应用于土与基础相互作用的研究。

最后感谢天津大学的徐继祖、张崇文、陈环教授及课题组其他同志对本文的指导及协作。

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. 1983
- [2] Hooper, J.A.(et.al). bservations on the behaviour of a pile-raft foundation on London clay. Proc. of Institute of Civil Engineers 55, Dec. pp855-877. 1973
- [3] 黄委会山东省河务局情报站. 黄河洛口桩基试验报告. 1985
- [4] Patra, J. Naborczyk, J. Bearing capacity of pile with the spot footing. proc. of ninth ICSMFE, vol.1, pp683-686. 1977
- [5] Poulos, H.G. Devis, E.H. The settlement behavior of single axially loaded incompressible pile and piles. Geotechnique, vol.18, pp351-371. 1978
- [6] Hooper, J.A. Ovc, A.(et, al). Field instrumentation for long term measurement of pile load and raft contact pressure. Civil Engineering and public works Review, May. 1973
- [7] Ottviani, M. Three dimation finite element analysis of vertically loaded pile groups. Geotechnique, vol.25, No.2, pp159-174. 1975
- [8] Duncan, J.M.and chang, C.Y. Nonlinear Analysis of stress and strain in soil. J.soil Mech. and Found. Div. ASCE, vol.96, No. SM5, pp1629-1653. 1970
- [9] Desai, C.S. 3-D. Material and Geometrical Nonlinear Analysis of Piles. Proc. 2nd Int. Conf. on Num. Mech. in Offshore Piling. 1982
- [10] 邓冰. 深卧基础式采油平台基础与土相互作用的三维有限元分析及模型试验研究. 天津大学硕士论文. 1990

Three Dimentional Finite Element Analysis of The Interaction Between Deeply-Embedded Foundation and Soil

Deng Bing

(Tianjin Institute of Water Transport Engineering)

Abstract: Deeply-embedded platform which consists of separated caissons and connected bottom-beams between them, has its engineering and economical advantages. However the interaction mechanism of this new type of foundation with soil is still in research. In this thesis the deeply-embedded foundation and the soil are analysis by a self-made nonlinear finite element programme—DFESS. Indoor model test is carried out for verification of results of analysis. The results of calculation and those of model test are principally inagreement. They both show the features and interaction principle of the deeply-embedded foundation with soil. This would be beneficial to the further development and design of the new platform.

keywords: deeply-embedded foundation, soil-foundation interaction, nonlinear finite element analysis.