

文章编号:1001-4500(2006)03-0018-05

# 砂质海底管土相互作用的数值模拟

任艳荣<sup>1</sup>, 刘玉标<sup>2</sup>

(1. 北京建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:**利用有限元计算软件 ABAQUS, 分别采用非线性弹性模型、多孔弹性模型、Ramberg - Osgood 弹塑性模型对管土系统进行有限元计算。构建了有限单元模型, 并对接触面、约束方程进行了说明, 分析了管道的沉降量、侧向阻力系数与管重间的关系, 计算结果与有关的试验结果相吻合, 具有可比性, 表明对管土相互作用进行数值模拟是可行的。并得到了管道侧向失稳的判别准则, 可为今后进一步的试验研究提供参考意见。

**关键词:**有限元模型; ABAQUS; 管土相互作用; 数值模拟

**中图分类号:** P756

**文献标识码:** A

## 1 前言

海底管线的在位稳定性是海底管线设计中的关键问题之一, 管道的稳定性和管道的水下重量、环境载荷和管土相互作用有着重要的关系。为保证管道的稳定, 海底土壤必须提供足够的阻力以平衡波浪荷载, 否则, 管道将产生较大位移而失稳。

20 世纪八十年代以来, 国外的许多科研机构<sup>[1-6]</sup>采用机械式反复加载的方式对裸置管道的管土相互作用进行了深入研究, 主要贡献在于: 波浪和海流引起的环境流体动力载荷导致管道的附加沉降, 在管道产生微量侧向位移的同时管道下方的土体发生侧向隆起, 这些均会使得土体对管道的侧向阻力大于库仑摩擦阻力, 从而使得侧向阻力系数大于库仑摩擦系数, 并提出了管土相互作用模型。在该模型中, 土体对管道的侧向阻力  $F_H$  为库仑摩擦阻力  $F_F$  和被动土压力  $F_R$  的和, 如图 1 所示, 这些结论已经归结到美国天然气协会 (AGA) 和挪威船级社所制订的海底管线的稳定性设计规范中<sup>[7,8]</sup>。

近年来, 顾小芸和高福平等<sup>[9,10]</sup>进行了水动力条件下的管土相互作用试验, 除得到与前人类似的结果外, 并对其物理机制进行了更明确的解释, 还指出波-管-土动力耦合中的管道失稳问题是床面以上的涡流和床面以下渗流共同作用的结果, 即渗透性起着很重要的作用。

上述实验为数值计算提供了检验依据。

数值计算方面的进展大大落后于试验情况, 已有的文献有 Lyons<sup>[11]</sup>进行了裸置管道方面的计算, 他采用非线性弹性模型以及静态的方法。Mei 和 Foda<sup>[12]</sup>的计算为半埋管道的分析。Yongbai<sup>[13]</sup>分析海洋管线的在位稳定性, 但考虑的主要是管线本身的变形行为, 并未考虑管土相互作用。本文用 ABAQUS 软件对管土相互作用进行数值模拟。

在我国南海海域, 石油天然气的开采和勘探在石油天然气产业中占有着较大的比重, 而在该海域, 有广泛分布的砂质海底。由于砂土和粘土的本构关系有很大的不同, 本文选择砂土作为研究对象。

## 2 计算方法和模型

ABAQUS 是面向生产与研究且应用范围广泛的通用有限元计算软件, 其主要优点是具有大型的单元

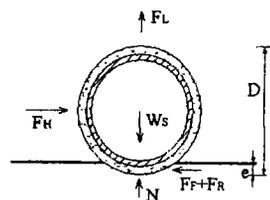


图 1 管土相互作用示意图

收稿日期: 2005-11-30

作者简介: 任艳荣 (1973 ~), 女, 博士, 讲师, 从事固体力学和海洋工程研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19772057)

库和广泛的求解非线性问题的能力。另外, ABAQUS 软件为用户提供接口, 允许用户通过自定义的子程序定制 ABAQUS, 以实现特定的功能。

Lyons<sup>[11]</sup>的计算是在静态分析的基础上进行的, 为与之进行比较, 本文进行了静态计算。但实际上, 管道是设置在海洋环境中, 波浪所引起的载荷为动态载荷, 因此也采用动态的计算方法。

岩土工程计算中, 土的本构模型的选取是非常重要的。本文采用三种本构模型进行计算, 以了解不同模型的影响。第一个为 Duncan - Chang 非线性弹性模型, 比较简单, 在工程中应用广泛。文献[9]的试验表明, 渗透性在管土相互作用中起着重要的作用, 因此第二个模型为多孔弹性模型。但由于实际土体受力后既包括弹性变形, 又包括塑性变形, 加之所受载荷性质是动态的, 所以第三个为 Ramberg - Osgood 弹塑性模型。三种模型所需参数如表 1, 2, 3 所示, 管道参数如表 4 所示。

表 1 非线性弹性模型所需参数

粘聚力 <i>C</i> (kPa)	内摩擦角 (°)	饱和密度 <i>sat</i> (kg/m <sup>3</sup> )	破坏比 <i>R<sub>f</sub></i>	试验常数 <i>K</i>	试验常数 <i>n</i>	试验常数 <i>G</i>	试验常数 <i>F</i>	试验常数 <i>D</i>
0.0	40	2.0 × 10 <sup>3</sup>	0.85	410	0.60	0.34	0.09	420

表 2 多孔弹性模型所需参数

土的孔隙率 <i>n</i>	泊松比 <i>μ</i>	剪切模量 <i>G</i> (N/m <sup>2</sup> )	渗透系数 (m/sec)	土颗粒体积模量 (N/m <sup>2</sup> )	土骨架的体积模量 (N/m <sup>2</sup> )
0.4	0.4	5 × 10 <sup>6</sup>	10 <sup>-4</sup> (细砂)	40 × 10 <sup>9</sup>	100 × 10 <sup>6</sup>

表 3 Ramberg - Osgood 模型所需参数

弹性模量 (N/m <sup>2</sup> )	泊松比 <i>μ</i>	硬化参数 <i>n</i>	剪切应力 <i>y</i> (Pa)	屈服偏移量
5 × 10 <sup>5</sup>	0.35	5	3 × 10 <sup>4</sup>	1

表 4 管道参数

弹性模量 (N/m <sup>2</sup> )	泊松比 <i>μ</i>
210 × 10 <sup>9</sup>	0.3

### 3 有限元模型的建立

#### 3.1 接触面

当管土相互作用中有载荷作用时, 管道与土体交界面上可能产生剪切滑移, 因此有必要设置接触面。在 ABAQUS 的接触模拟中, 采用单纯的主控 - 从属接触算法。计算时, 为获得模拟的最好结果, 必须认真选择从属与主控表面, 遵守的原则是: (1) 从属表面应是网格划分得更精细的表面; (2) 若网格密度相近似, 从属表面应由更为柔软的材料组成。因此管道下半部作为主接触面, 海床的床面上取 2 个管径的长度为从接触面, 形成一个接触对。

#### 3.2 有限元模型

由于海床地基土体是一个半无限空间体, 计算时只能截取一定的范围。按照下述原则确定有限元计算模型的范围: 海床水平方向为管径的 20 倍, 垂直方向为管径的 10 倍。在分析中, 管道采用八节点等参单元, 海床土体采用四节点等参单元, 如图 2 所示。模型的边界条件为: 在远离管道的边界 (即在海床的左右两侧、底部边界) 上作为固定边界, 海床的上边界作为自由边界。

#### 3.3 约束条件

由于实际管道受到立管和压块等约束, 不可能发生滚动。而在数值模拟中, 所建立的有限元模型有可能在海床上发生滚动。为对实际情况进行模拟, 在管道左右两侧施加约束方程, 如图 3 所示。其约束方程为:

$$u_2^{(2)} + (-1)u_2^{(7)} = 0$$

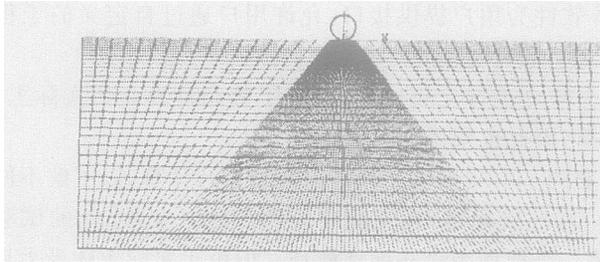


图2 有限元模型示意图

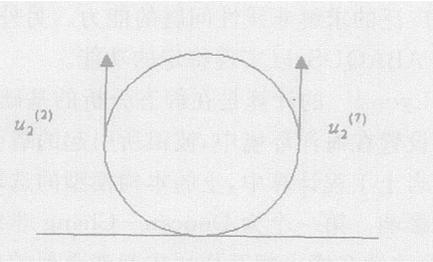


图3 约束方程示意图

上式中,(2)与(7)分别是管道两侧的节点号。

### 4 有限元结果分析

#### 4.1 静态计算结果

Lyons 进行静态计算时得到砂土的阻力系数为 0.7。本文进行静态计算时,所用模型为非线性弹性模型,也得到侧向阻力系数为 0.7,这是由于静态计算中假定环境载荷的方向和大小都与时间无关。

#### 4.2 动态计算结果

海洋环境载荷为动态载荷,管土相互作用试验也是在动载下进行的。下面是动态的计算结果。

##### (1) 管道的沉降量

保持环境载荷不变,改变管道的水下重,可以得到沉降量与管重间的关系,发现管道的沉降随管重的增加而增加,如图 4、5 所示。

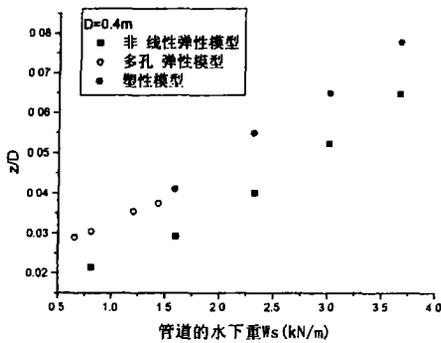


图4 管重与沉降量的关系

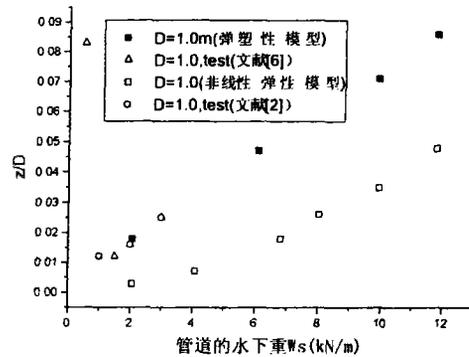


图5 沉降量与试验的比较图

由图 4 可知,当管道直径  $D = 0.4\text{m}$  时,多孔弹性和弹塑性两种模型的计算情况一致,非线性弹性模型偏小,但无试验数据。

由图 5 可知,  $D = 1.0\text{m}$  时,弹塑性模型计算结果与试验一致,非线性弹性模型的计算结果偏小。表明在沉降量方面,多孔弹性模型和弹塑性模型的计算结果和试验情况相符,但非线性弹性认为土体是弹性的,其计算结果偏小。

##### (2) 土体侧向隆起现象

D. W. Allen<sup>[4]</sup>对管道的运动情况进行了详细描述,发现管道侧向位移的同时,管道下方的土体发生侧向隆起,如图 6 所示。本文的计算也得到类似现象,如图 7 所示。而不同模型隆起的程度不同,非线性弹性模型的模形与管径的比值为 0.064,多孔弹性模型的比值为 0.0575,弹塑性模型的比值为 0.075。从而说明计算所得到现象与试验现象具有可比性。

##### (3) 侧向阻力系数

D. A. Wanger et al<sup>[2]</sup>分别进行了单调加载和微幅振动加载试验,微幅振动加载试验的侧向阻力系数为 0.888,比库仑摩擦系数 0.7 大得多,这是由于土体侧向隆起的存在,导致侧向阻力大于库仑摩擦阻力。本文计算结果如下:非线性弹性模型侧向阻力系数平均值为 0.78;弹塑性模型的侧向阻力系数值为 0.897,也比

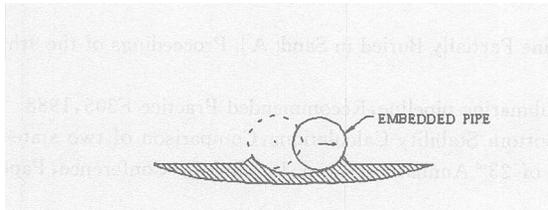


图 6 机械式反复加载试验中的管道失稳形态<sup>[4]</sup>

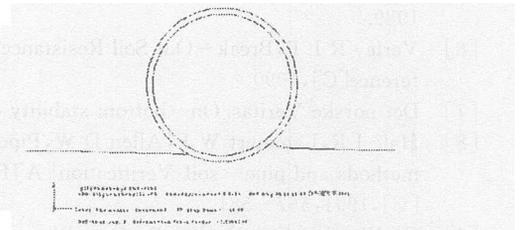


图 7 计算得到的侧向隆起

0.7 要大,且后者与上述试验值更接近。水动力载荷试验<sup>[14]</sup>得到的三实验值为 0.83,而计算时采用多孔弹性模型的平均值为 0.802,两者基本上接近,从而说明本文计算和试验较吻合,见图 8,同时由图可以知道,有以下几个因素影响管道与土体的侧向阻力系数:管道的水下重,管径,管道所处的环境条件以及土性等。

### 4.3 管道的侧向失稳准则

$$Fr = \frac{2 A_0}{T \sqrt{GD}}$$

其中,  $A_0$  为水质点运动幅值;  $T$  为波浪周期;  $D$  为管径;  $G = \frac{W_s}{r D^2}$ , 无量纲管重,  $W_s$  为管道水下重,  $r$  为砂的浮容重。

通过拟合无量纲管重与管道失稳时的临界  $Fr$  数的关系,可以得到管道侧向失稳的准则:

$$Fr = 0.068 + 0.070 G \quad (0.4 \leq G \leq 1.0)$$

当环境载荷相应的  $Fr$  数高于临界  $Fr$  时,管道将发生侧向失稳。

## 5 结论

通过 ABAQUS 软件对管土相互作用进行数值模拟,可以得到以下结论:

- 1) 三种模型所计算出的结果(沉降量,侧向隆起,阻力系数)虽有差异,但相对接近,且落在试验结果范围内,表明所进行的管土相互作用有限元计算是可行的。
- 2) 静态计算是将环境流体荷载模拟为单向的、大小不变的简单静力荷载,实际上环境载荷的大小和方向是随时间而变化的,因此对于管土相互作用,动态计算更符合实际。
- 3) 在这三种模型中,只有多孔弹性模型能计算孔隙水压力,可以反映孔隙水压力对管土相互作用的影响,其它两种模型则不能。要考虑海床土体塑性的影响,则采用弹塑性模型。至于选择哪种模型进行计算,需要根据海床土体的性质进行判断。
- 4) 得到了管道侧向失稳的判别准则,其临界值与无量纲管重有关。
- 5) 通过管土相互作用有限元分析,可为今后进一步的试验研究提供参考依据。

### 参考文献

[1] Brennodden H, Sveggen O, Wagner DA, Murff JD. Full - scale pipe - soil interaction tests[A]. OTC Paper 5338[C], 1986.

[2] Wanger D A, Murff J D, Brennodden et al. Pipe - Soil Interaction Mode[A]. Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 5504[C], 1987:181 - 190.

[3] Palmer A C, Andrew Palmer et al. Lateral Resistance of Marine Pipelines on Sand[A]. Proceedings of 20th Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 5853[C], 1988:399 - 408.

[4] Allen D W, Lammert W F et al. Submarine Pipeline On - Bottom Stability:Recent A GA Research[A]. Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC6055[C], 1989:121 - 132.

[5] Brennodden H, Lieng J T, Sotberg T, verley RLP. An energy-based pipe-soil interaction model[A]. OTC paper 6057[C],

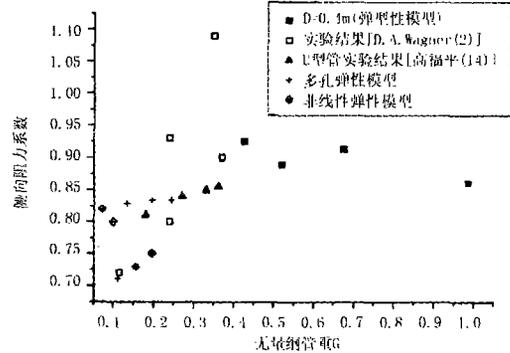


图 8 阻力系数与试验结果的比较图

- 1989.
- [6] Verley R L P, Break - Out Soil Resistance for a Pipeline Partially Buried in Sand[A]. Proceedings of the 9th OMAE Conference[C], 1990
- [7] Det norske Veritas. On - bottom stability design of submarine pipeline, Recommended Practice E305, 1988
- [8] Hale J R, Lammert W F, Allen D W, Pipeline On - bottom Stability Calculations: Comparison of two state - of - the art methods and pipe - soil Verification[A]. Proceedings of 23<sup>rd</sup> Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC 6761 [C], 1991:567 - 581.
- [9] Gu Xiaoyun, Gao Fuping, Pu Qun. Wave-soil-pipe coupling effect upon submarine pipeline on - bottom stability[J]. Acta Mechanica Sinica (English Series) 2001, 17(1):86 - 96.
- [10] 高福平, 顾小芸, 浦群. 海底管道失稳过程的模型试验研究[J], 岩土工程学报, 2000, 22(3):304 - 308.
- [11] C. G. Lyons. Soil Resistance to Lateral Sliding of Marine Pipelines[A]. Proceedings of Fifth Annual Offshore Technology Conference, Paper OTC1876[C], 1973:479 - 484
- [12] Mei CC., Foda M F. Wave - induced Stresses around a Pipe laid on a Poroelastic Seabed[J]. Geotechnique, 1981b, 31:509 - 517.
- [13] Yong Bai et al. A finite - Element Model for In - Situ Behavior Offshore Pipelines On Uneven Seabed and Its Application to On - Bottom Stability[J]. Proc. 9th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 1999, 11:132 - 140.
- [14] 高福平, 波浪作用下海底管道稳定性的实验研究[D]. 中国科学院力学研究所博士论文, 2001.

## NUMERICAL SIMULATION OF PIPE/ SOIL INTERACTION LAID ON THE SANDY SEABED

REN Yanrong<sup>1</sup>, LIU Yubiao<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044,  
2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** Using finite element software ABAQUS program, the pipe/ soil interaction is analyzed by non-linear elastic porous elastic and Ramberg - Osgood models. The finite element model is established. The interface and the constraint equation are explained. The relationship between the pipe's penetration, lateral resistance coefficient and the pipe's subweight is analyzed. computation results show that the computation is in accordance with some test results and the computation of the pipe/ soil interaction is feasible. The rule of distinguishing pipeline's lateral instability is obtained. It can provide the referenced ideas for the further test study.

**Key words:** finite element model, ABAQUS software, pipe/ soil interaction, numerical simulation

[上接第 44 页]

- [21] 李桂青, 李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [22] 岳前进, 等. 平台冰激振动及疲劳分析研究[R]. 大连理工大学与中海石油研究中心合作科研报告, 2004.

## DYNAMIC RELIABILITY ANALYSIS OF HUMAN EXPOSURE TO ICE - INDUCED VIBRATION ON OFFSHORE PLATFORMS

LI Gang, ZHANG Dayong, YUE Qianjin

(Dalian University of Technology, Dalian, 116023)

**Abstract:** This paper analyses dynamic Time - dependent reliability of human feeling (comfort, depress work efficiency, health) due to ice - induced vibration based on first passage breakage mechanism. The original multi - degree - of - freedom platform is evaluated using an equivalent single - degree - of - freedom system obtained through a static pushover analysis. Then we establish a dynamic Time - dependent reliability model of single freedom nonlinear system. Lastly, using Poisson and Markov process methods, evaluate dynamic Time - dependent reliability of human feeling induced by the dynamic ice load of MSW platforms of Jz20 - 2 in the Bohai bay.

**Key words:** offshore platform, ice - induced vibration, human feeling, dynamic reliability.