

文章编号 : 1000-4750(2004)02-0084-05

# 弹塑性海床上的管土相互作用分析

任艳荣<sup>1,2</sup>, 刘玉标<sup>1</sup>, 顾小芸<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080; 2. 北京建筑工程学院基础课部, 北京 100044)

**摘 要:** 海底管线的在位稳定性问题是海底管线设计中的关键问题之一, 为对海底管线的设计提供理论依据, 采用大型通用有限元软件 ABAQUS 对管土系统进行分析。土体的本构模型采用动态的 Ramberg-Osgood 弹塑性模型, 通过改变管道的水下重、环境载荷等参数进行计算。计算结果表明, 由于土体侧向隆起而形成的楔形与试验结果相比吻合, 管道的水下重、环境载荷对管道的稳定性都有一定程度的影响, 并得到了管道侧向失稳的判别准则。

**关键词:** 海底管道; 稳定性; Ramberg-Osgood 模型; 沉降量

中图分类号: TV139.2 文献标识码: A

## ANALYSIS OF PIPE/SOIL INTERACTION ON ELASTIC-PLASTIC SEABED

REN Yan-rong<sup>1,2</sup>, LIU Yu-biao<sup>1</sup>, GU Xiao-yun<sup>1</sup>

(1. DES, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Dept.of Basic Sciences, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The on-bottom stability of submarine pipelines is the key problem of submarine pipeline design. In order to offer the theoretical basis for the pipe/soil interaction, the large-scale general finite element program ABAQUS is adopted to analyze the pipe/soil interaction. The dynamic Ramberg-Osgood elastic-plastic model is adopted to simulate the soil. The computation is executed via changing the parameters of the pipe's subweights, environmental loadings and so on. The computational results show that the lateral soil mounding is in accordance with test results. The pipe's subweights and environmental loadings affect the pipeline's stability to a certain degree. A criterion for pipeline's lateral instability is established.

**Key words:** pipe/soil interaction; stability; Ramberg-Osgood model; penetration

### 1 引言

海底管线的在位稳定性问题是海底管线设计中的关键问题之一。为了保证管道的稳定, 海底土

壤必须提供足够的阻力以平衡波浪荷载, 否则, 管道将产生较大的位移而失稳。

20 世纪八十年代以来, 国外许多科研机构<sup>[1-5]</sup>采用机械式反复加载的方式深入研究了裸置管道

收稿日期: 2002-10-24; 修改日期: 2003-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19772057)

作者简介: 任艳荣(1973), 女, 山东人, 讲师, 博士, 从事岩土力学和海洋工程研究(E-mail: wshuhe@sina.com);

刘玉标(1961), 男, 湖南人, 副研究员, 从事海洋工程和振动工程研究;

顾小芸(1936), 女, 上海人, 研究员, 博士生导师, 从事岩土力学和海洋工程研究

的管土相互作用，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。这些结论已归结到“美国天然气协会”和“挪威船级社”所制订的海底管线的稳定性设计规范中<sup>[6,7]</sup>。

近年来，顾小芸等<sup>[8,9]</sup>进行了水动力条件下的管土相互试验，除了得到与前人类似的结果外，并对其物理机制有了更明确的解释，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。

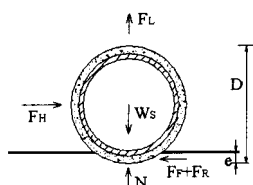


图 1 管土相互作用示意图

Fig.1 Pipe/soil interaction

上述试验为数值计算提供了检验依据。数值计算方面，Lyons<sup>[10]</sup>进行了裸置管道的计算，Mei<sup>[11]</sup>进行了半埋管道的计算，Yongbai<sup>[12]</sup>分析了海洋管线的在位稳定性，但主要考虑了管线本身的变形行为，并未考虑管土相互作用。

本文用 ABAQUS<sup>[13]</sup>软件对管土相互作用进行数值模拟，计算结果与国内外有关试验结果进行对比。由于前人的模型试验多是建立在二维基础上，因此假定管土系统是平面应变问题。

## 2 土体本构模型的选取

土体本构模型的选取是管道与基础之间稳定性分析的关键问题。管道设置在海洋环境中，波浪引起的载荷性质为动态的。因此，采用 Ramberg-Osgood 弹塑性模型作为土体的本构关系。应力—应变关系的骨干曲线为

$$E\mathbf{e} = \mathbf{s} + \mathbf{a} \left( \frac{|\mathbf{s}|}{\mathbf{s}_0} \right)^{n-1} \quad (1)$$

其中  $E$  为弹性模量， $\mathbf{e}$  为应变， $\mathbf{s}$  为应力， $\mathbf{s}_0$  为屈服应力， $n$  为非线性项的硬化参数， $\mathbf{a}$  为屈服偏移量。

## 3 有限元模型的建立

### 3.1 接触面问题

在管土相互作用问题中，当有载荷作用时，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。在计算时，为获得模拟的最好结果，须认真选择从属与主控表面，所遵守的原则是：从属表面应是网格划分得更精细的表面；若网格密度相近似，从属表面应由更为柔软的材料组成。基于这样的原则，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 有限元模型和边界条件

由于海床地基土体是一半无限空间体，在计算中只能截取一定的范围，水平方向为管径的 20 倍，垂直方向为管径的 10 倍。在计算中，管道用八节点单元，海床用四节点单元。边界条件为：在远离管道的边界上，海床的左右两侧、底部为固定边界，而海床的上边界为自由边界。有限元模型见图 2。

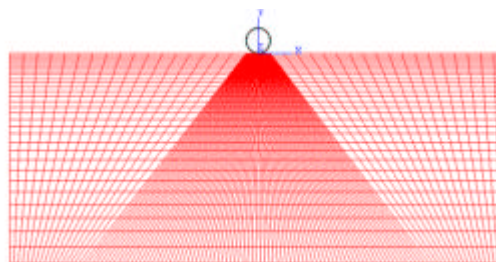


图 2 有限元模型示意图

Fig.2 Finite element model

### 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。而数值模拟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，因此在管道左右两侧施加约束方程。如图 3 所示。

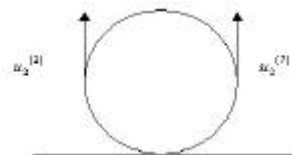


图 3 约束方程示意图

Fig.3 Constraint equation

其约束方程形式如下：

$$u_2^2 + (-1)u_2^7 = 0 \quad (2)$$

其中，2 与 7 分别是管道两侧的节点号。

### 4 有限元结果分析

#### 4.1 管重的影响

保持环境参数不变,管径为0.4及1.0的管道的沉降量与管道水下重间的关系如下图所示:

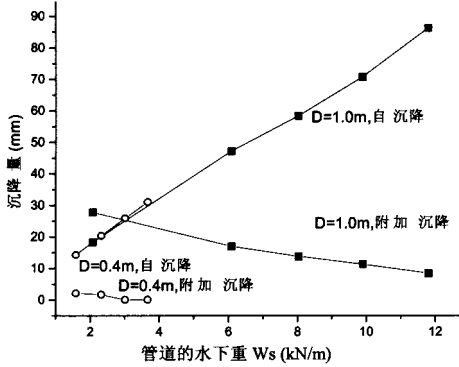


图4 管道水下重对沉降量的影响

Fig.4 The effect of pipe's subweight on penetration

由图4知,管道自沉降随管重的增加而增加,而附加沉降随管重的增加而减小,但总的沉降量随管重的增加而增加,见图5。原因是随管道水下重的增加,自沉降增加,导致作用在管道上的环境载荷减小,土体中附加应力很小,管土系统趋于稳定状态,则附加沉降不会增加。由图6知,管道沉降量的计算结果与试验结果相比吻合。

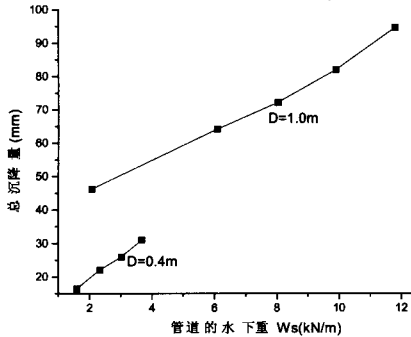


图5 总沉降量与管道水下重间的关系

Fig.5 The relationship between the total penetration and

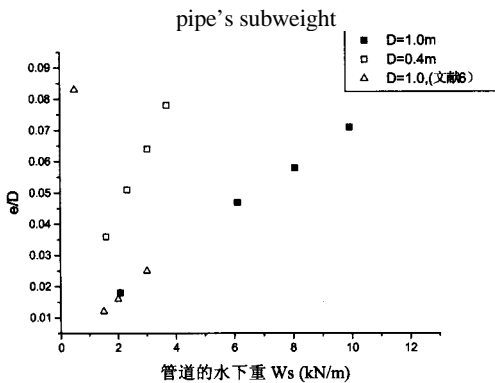


图6 管道的沉降量与试验的比较

Fig.6 The comparison of pipe's penetration and test results

#### 4.2 环境载荷的影响

保持管道水下重不变,改变环境参数进行计算,所得结果如下图:

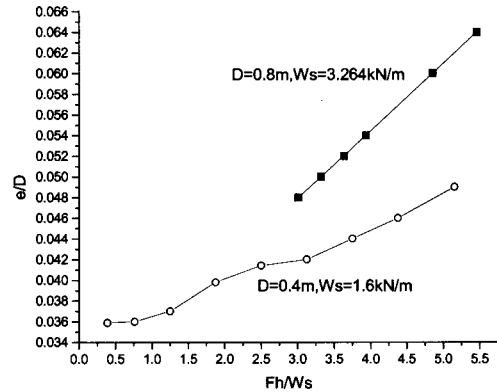


图7 沉降量与环境载荷的关系

Fig.7 The relationship between the penetration and environmental load

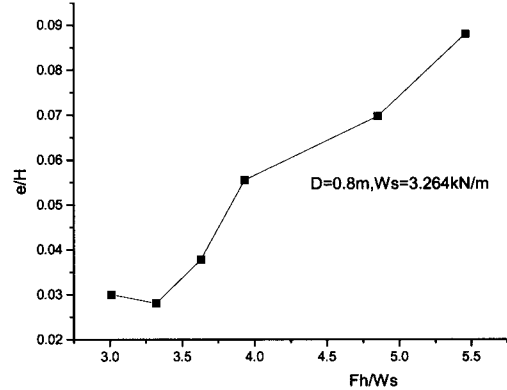


图8 水平位移与环境载荷的关系

Fig.8 The relationship between horizontal displacement and environmental load

由图7和图8知,随作用在管道上的环境载荷的增大,土体中的附加应力增大,从而管道的最终沉降量在增大,水平位移也在增大。

#### 4.3 管道的运动状态与试验比较

D.W.Allen<sup>[4]</sup>详细描述了管道的运动情况,管道侧向位移的同时,管道下方的土体发生侧向隆起,如图9。本文也得到类似现象,如图10。这说明计算结果与试验现象相比具有可比性。



图9 机械加载试验中的管道失稳形态

Fig.9 The movement of pipe in the test

#### 4.4 侧向阻力和阻力系数

由图11可知有以下几个因素影响管道的侧向阻力:管道水下重,管径,管道所处的环境条件以及管道的沉降量等。由图12知,本文计算的侧向阻

力系数的平均值为 0.897，略大于机械式反复加载试验的阻力系数的平均值 0.888,也大于高福平<sup>[14]</sup>水动力载荷试验的阻力系数的平均值 0.83。

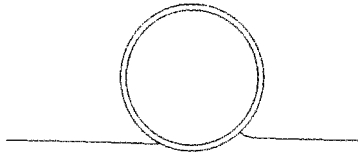


图 10 计算的管道的运动状态

Fig.10 The movement of pipe in the computation

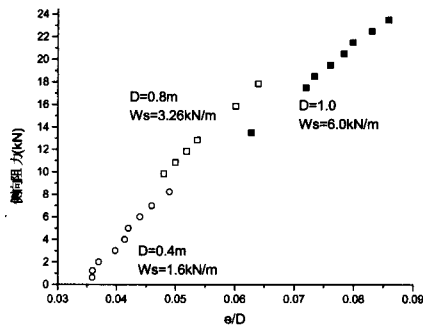


图 11 侧向阻力

Fig.11 Lateral resistance

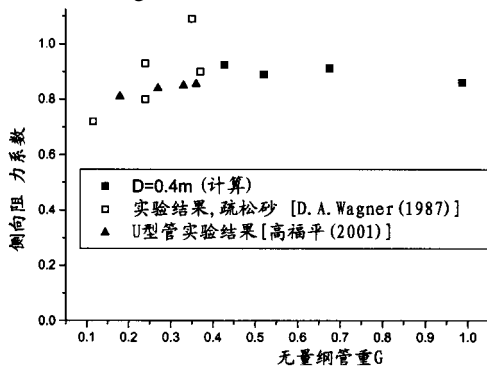


图 12 阻力系数与实验的比较

Fig.12 The comparison of resistance coefficient and test results

#### 4.5 管道的侧向失稳准则

拟合结果，得到管道失稳的准则：

$$F_r = 0.068 + 0.070G \quad (\leq 0.4G \leq 1.0) \quad (3)$$

$F_r = \frac{2\pi A_0}{T\sqrt{gD}}$ ，为佛罗雷得数，其中， $A_0$ —水质点运动幅值， $T$ —波浪周期， $D$ —管径， $G = \frac{W_s}{r'D^2}$ ，无量纲管重， $W_s$ —管道水下重， $r'$ —砂的浮容重。

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

## 5 结论

(1) 由于实际土体是一种弹塑性材料，受力后既有弹性变形，又有塑性变形；加之所受的载荷为动态的，因此采用 Ramberg-Osgood 弹塑性模型作为土体的本构关系进行计算。

(2) 管道水下重和环境载荷对管道的稳定性均有影响。

(3) 影响土体侧向阻力的因素：管道水下重、管径、管道所处的环境条件和管道的沉降量等。

(4) 计算发现管道两侧的土体侧向隆起，与试验结果相比具有可比性。

(参考文献转 83 页)

## 5 结论

(1) 本文通过 11 根钢 - 混凝土连续组合梁试验研究, 得到了连续组合梁的滑移和挠度分布规律。

(2) 利用叠加原理提出了考虑钢 - 混凝土连续组合梁界面滑移与挠度耦合效应的连续组合梁滑移与挠度计算方法计算结果与实测结果吻合较好。

(3) 随连续组合梁连接刚度的降低, 连续组合梁界面滑移逐渐增大。当剪力连接度达到完全剪力连接后, 增大剪力连接度对挠度影响很小。当连接程度在 0.60~1 之间变化时, 跨中挠度增量在 5% 左右。

### 参考文献:

- [1] Eurocode4 Design of Composite steel and concrete Structures [S]. European Committee for standardization, 1994.
- [2] 聂建国, 王洪全. 钢 - 混凝土组合梁纵向抗剪的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 18(2): 40-46.  
Nie Jianguo, Wang Hongquan. Experimental study on longitudinal splitting strength of composite steel-concrete Beams [J]. Journal of Building Structures, 1998, 18(2): 40-46. (in Chinese)
- [3] 聂建国, 沈聚敏. 滑移效应对钢 - 混凝土组合梁抗弯刚度的影响及其计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(1):

42-45.

Nie Jianguo, Shen Jumin. Slip effect on strength of composite steel-concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(1): 42-45.

- [4] R P Johnson. Composite structure of steel and structure, Vol. 1[M]. Blackwell Scientific Publications, 1994.
- [5] 李佳. 钢 - 混凝土组合梁界面滑移研究[D]. 中南大学, 2001.  
Li Jia. The study on longitudinal slitting of composite beams of steel and concrete [D]. Central South University, 2001. (in Chinese)
- [6] 高向东. 钢 - 混凝土连续组合梁塑性铰特性及内力重分布研究[D]. 哈尔滨建筑工程学院, 1988.  
Gao Xiangdong. The study on plastic hinge and inter-force redistribution of continuous composite beams of steel and concrete [D]. Harbin Architectural Engineering College, 1988. (in Chinese)
- [7] 聂建国, 沈聚敏, 余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 11-17.  
Nie Jianguo, Shen Jumin, Yu Zhiwu. A reduced rigidity method for calculating deformation of composite steel-concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 11-17.

(上接 87 页)

### 参考文献:

- [1] H Brennodden, O Sveggen. Full-scale pipe/soil interaction tests[A]. Proceedings, Eighteenth Annual Offshore Technology Conference[C], OTC Paper 5338, 1986. 433-440.
- [2] D A Wanger, J D Murff, H Brennodden. Pipe-soil interaction model[A]. Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference[C], Paper OTC 5504, 1987. 181-190.
- [3] A C Palmer. Lateral resistance of marine pipelines on sand[A]. Proceedings of 20th Annual Offshore Technology Conference[C], Paper OTC 5853, 1988. 399-408.
- [4] D W Allen, W F Lammert, et al. Submarine Pipeline On-Bottom Stability:Recent AGA Research[A]. Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference[C], Paper OTC 6055, 1989. 121-132.
- [5] H Brennodden, J T Lieng, T Sotberg, R L P Verley. An energy-based pipe/soil interaction model[A]. Proceedings of 21st Annual Offshore Technology Conference[C], OTC Paper 6057, 1989. 147-158.
- [6] Det norske Veritas. On-bottom stability design of submarine pipeline[M]. Recommended Practice 305, 1988.
- [7] J R Hale, W F Lammert, et al. Pipeline on-bottom stability calculations:comparison of two state-of-the art methods and pipe-soil verification[A]. Proceedings of 23rd Annual Offshore Technology Conference[C], 1991, Paper OTC 6761: 567-581.
- [8] 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.
- [9] 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.  
Gao Fuping, Gu Xiaoyun, Pu Qun. Experimental research on the instability process of submarine pipelines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 304-308. (in Chinese)
- [10] C G Lyons. Soil resistance to lateral sliding of marine pipelines[J]. Proceedings of Fifth Annual Offshore Technology Conference, 1973, Paper OTC 1876:479-484.
- [11] Mei C C, Foda M F. Wave-induced Stresses around a Pipe laid on a Poroelastic Seabed. Geotechnique[J]. 1981b,31:09-517.
- [12] 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,IIPP: 132-140.
- [13] HKS. Inc. ABAQUS/Standard User's Manual [M]. Version 5.8, HKS. INC. USA, 1998.
- [14] 高福平. 波浪作用下海底管道稳定性的实验研究[D]. 北京: 中科院, 2001.  
Gao Fuping. Experimental study on submarine pipeline stability under wave loading[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Doctoral Dissertation, 2001.