

文章编号: 1001- 4500(2004)01- 0026- 05

# 海底管土相互作用研究概述

任艳荣<sup>1</sup>, 刘玉标<sup>2</sup>, 顾小芸<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:** 在阅读文献的基础上, 对海底管线与海床之间的相互作用进行了系统的阐述。介绍了海底管道稳定性的设计方法、国内外管土相互作用的试验情况和数值计算的进展。指出了管土相互作用要解决的一些问题。

**关键词:** 海底管道; 稳定性; 管土相互作用

**中图分类号:** P75

**文献标识码:** A

## 1 引言

海底管道在海床上的稳定性分析是海底管道设计的重要方面。管道在位稳定性的关键因素主要来源于三个方面: (1) 海底管道所受的水动力; (2) 管道的水下重量、直径和管线的粗糙度; (3) 海床土壤提供给管道的侧向阻力。其中海床土壤给管道的侧向阻力对管道的设计起决定性作用。由此可见, 稳定性设计的目的就是确认管道的水下重量能否满足稳定性原则。如果海底地基土提供的阻力不足以平衡外荷载, 管道将产生较大位移, 即从原位滑出而失去稳定性。为了保持海底管道的在位稳定性, 通常采用加大管子负浮力和设法将管子埋设于海底两大类措施。加大管子负浮力就是加重混凝土加重层, 或者采用压块或机械锚固等措施, 但这将会相应地增加投资。因此研究管土相互作用, 正确评价土体对管道阻力的作用, 对于管道的稳定性、安全性和经济性, 对于完善有关设计规范都有着重要的意义。

## 2 海底管道稳定性设计方法

目前, 在国际上有两个比较通用的海底管道系统规范: 挪威船级社(DNV)发表的《海底管道系统规范》和美国石油学会(API)制定的《近海烃类管线设计、施工、操作和维护推荐实用规程》。

挪威船级社(DNV)根据 PIPESTAB 项目的研究成果在 1988 年颁布了海底管线的稳定性设计规范, 即文献[1]。该规范具有独立的完整性, 它对管道设计、实验、验收和维护都有较详细完整的规定, 实用性较强, 被广泛采用。中国海洋石油总公司也采用该规范作为企业标准(文献[2])。

海底管道在海床上的稳定性分析方法研究可分为 2 个阶段: 第 1 阶段指 1988 年以前, 为静态分析阶段; 第 2 阶段指 1988 年以后, 为动态分析和半动态分析阶段<sup>[3]</sup>。

1) 静态分析 是一种传统的稳定性分析方法。管道受力采用 Morsion<sup>[5]</sup> 方程求解, 并假定管道与海床之间的阻力系数为常数。其公式如下:

$$\frac{(W_s - F_L)\mu}{F_D + F_I} S$$

其中:  $W_s$  为管道的水下重;  $F_L$  为升力;  $F_D$  为阻力;  $F_I$  为惯性力;  $\mu$  为土壤与管道之间的横向摩擦系数;  $S$  为安全系数, 取 1.1。

2) 动态分析 是一种时域解法。该方法主要对以下各项进行模拟: 波谱和与之相应的时间序列、海底流速、管子的结构特性、水动力、土壤阻力和约束条件。在动态分析中, 水动力、管道下沉和土壤阻力是时间的函数。动态分析的基本步骤为: (1) 根据给定的波浪条件模拟出波浪谱; (2) 用波浪谱计算出力谱; (3) 用力谱结

收稿日期: 2003-07-14

作者简介: 任艳荣(1973-), 女, 博士, 讲师, 从事岩土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)。

合土壤类型计算出管道的动力响应。土阻力的计算采用文献[4]提出的管土作用模型。

3) 半动态分析 是一种建立在对动力分析结果归纳的基础上的分析方法。是将动态分析中次要的因素忽略, 采用准静态分析的公式形式。

### 3 管土相互作用的试验研究状况

对管道与基础的稳定性分析, 一般采用经验和理论计算两种方法。经验方法主要是通过模型试验, 理论计算则是采用数值分析的方法, 主要是有限元分析。国外许多规范都规定, 当理论工作还不成熟时, 必须进行模型试验。对于管土相互作用, 至今尚未透彻了解其物理机制, 已有模型只是建立在纯粹经验的基础上, 该方面的进展远不如可靠性较高的水动力计算, 因此模型试验成为必需的手段, 并要用试验结果验证和修改数值计算。

由于波浪作用下海底管道与海床相互作用的复杂性, 国际上许多科研机构、大石油公司和管道工程公司, 都相继投入了大量资金来研究海底管道在海床上的稳定性问题。

#### 3.1 静态试验研究

文献[6]的作者利用机械加载模型试验分别研究了管道与砂土、粉土和粘土之间的相互作用。在试验基础上首次指出, 库仑摩擦理论对砂土质中管道的侧向滑动适用, 而对软粘土的管道侧向位移则不适用。文中指出, 管道与海床之间的相互作用至少与以下参数有关: 1) 管道外表面的粗糙度; 2) 海底介质的土性参数, 包括土体的内摩擦角、粘性、饱和度等; 3) 管道与海床的接触面积; 4) 管道的位移方向。

文献[7]提出, 在自重作用下, 直接安置于海底的管道会在土体中产生自沉陷, 自沉陷的深度跟管重及土体性质有着密切关系, 认为土体(包括砂土和粘土)对管道的侧向阻力系数应是土性、水动力特性和管道参数的函数, 但是没有给出具体的表达式。

#### 3.2 机械式反复加载试验研究

从1983至1987年, SNTF和NHL完成了管线稳定性大型研究课题PIPESTAB Project, 对放置在海床上的试验管道施加往复水平载荷, 用以模拟波浪作用在管道上的拖曳力和惯性力, 同时施加一定比例的、垂直向上的荷载以模拟波浪作用在管道上的升力。在试验结果的基础上, 对于在位状态的管道, 文献[4]等提出: 管道的加载历史将影响其自沉陷, 并且引起在管子前面产生土的堆积, 形成一个楔形土体, 从而导致土阻力的增加, 且这种土侧阻力要比用库仑摩擦理论预测的大得多。管道的运动情况见图1, 其提出的管土相互作用模型见图2, 并建议应该将摩擦力与被动土压力分开来考虑:

$$F_H = F_F + F_R$$

其中,  $F_H$  为总的土体侧向阻力;  $F_F = \mu(W_s - F_L)$  为摩擦力;  $F_R$  为被动土压力。

A GA 研究小组对文献[4]的试验装置稍微进行了改造, 又做了大量的补充试验(即A GA Project)<sup>[8]</sup>。文

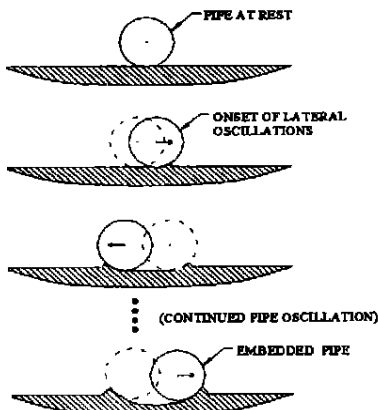


图1 管道的失稳形态

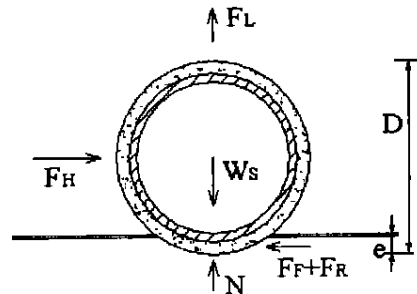


图2 管土相互作用示意图

献[9]以试验为基础,提出了以能量耗散为基础的管土相互作用模型。他们认为在往复荷载的作用下,管道所产生的沉降来自于往复荷载作用于管道上管道振动所产生的能量,建议的模型为:

$$\frac{F_{R, SOC}}{F_{R, ST}} = K_1 \left(\frac{z}{D}\right)^{k_2} + 1$$

其中,  $F_{R, SOC}$  为由于振动所产生的土体侧向阻力;  $F_{R, ST}$  为在静力作用下所产生的阻力;  $K_1$  为与土的密度、管重以及管径相关的经验无量纲数;  $z$  为管道的沉降量;  $D$  为管道外径;  $k_2$  为经验系数。

文献[10]也利用机械加载方式研究管土相互作用(DH I Research Program), 提出管土相互作用的经验关系:

$$\left(\frac{S}{r}\right)_{0.5} = 0.6 + 0.2r + 2z_0/D$$

式中  $s = \frac{S_r}{\gamma D^2}$ ,  $r = \frac{R_r}{\gamma D^2}$ ,  $S_r$  为管道所受的水平土阻力,  $R_r$  为管道与土之间的垂向接触力;  $\left(\frac{S}{r}\right)_{0.5}$  为管道位移为  $0.5D$  时的  $\frac{S}{r}$  值;  $z_0$  为管道的初始沉降量。

文献[11]对管土相互作用问题进行了量纲分析。并参考AGA、PIESTAB 和DH I的试验结果提出了描述管道侧向失稳的力-位移模型。文献[12]用细砂和原型管道进行了模型试验。对半埋入土中的管道,进行了管道侧向阻力试验以及用往复荷载来模拟水动力载荷作用下管道的侧向阻力及沉降量。在该试验中给出了土体侧向阻力的表达式。文献[13]、[14]进行了海底部分埋设管道在波流作用下水动力效应的试验研究,但只是研究了水动力系数对环境载荷的影响。文献[15]以离心机试验为基础,进行了裸置管道的模型试验,提出土体侧向阻力的表达式:

$$\frac{F_H}{\gamma z^2} = \frac{m \mu (1 + \eta)^2}{(1 + m)^2} \left[ \frac{K_{vp}}{\gamma z} \right]$$

其中:  $m$ ,  $\eta$  为由试验得出的系数。

以上试验均是利用机械式反复加载模拟波浪荷载,所提出的模型都不能直接体现波浪的水动力效应。

### 3.3 波-管-土动力耦合试验

文献[16]采用水动力加载方法研究海底管道的在位稳定性,采用U型振荡流水槽产生的振荡流来模拟水动力,试验反映了波浪、管道、海床之间的耦合效应。试验发现,海底管道的侧向失稳一般经历四个阶段:完全稳定、砂床冲蚀、管道轻微位移和管道失稳,并发现加载历史、土性参数和管道初始沉降量均对管道稳定性产生影响。在试验基础上,初步建立了管道稳定性“波-管-土”相互作用的经验关系。文献[17]指出:在相同环境载荷作用下,孔隙水在细砂中的水头损失要比在中砂中大得多,管道正下方的局部土颗粒容易产生松动,则铺设在细砂上的管道就更容易发生沉降,这对提高管道侧向稳定性有利。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。

以上这些均是国内外的试验结果,但随着有限元方法的不断完善,计算机技术的迅速发展,数值计算也逐渐受到重视,并成为研究管土相互作用的另一种重要手段。

## 4 管土相互作用数值计算

文献[6]在进行试验分析的同时,也采用了有限单元模型研究了软粘土海底对管道侧向滑动的计算,将管土系统问题描述为平面应变问题,土体的应力应变关系是非线性的,采用增量-迭代法来求解非线性问题。通过计算,可得到外荷载与管道侧向位移的关系,应用管道侧向位移来作为计算的控制因素,从而判断管土系统的稳定性。在研究中,将环境流体荷载模拟为单向、大小不变的静力荷载,并采用力偶以防止管道可能发生的滚动。

文献[18]运用边界层理论研究了管道、波浪、土体之间的相互作用问题,本构模型为多孔弹性模型,但重点考虑管道下方海床中的应力分布问题。文献[19]采用有限单元法对裸置于海床上的管线下土体的响应问题进行了研究,土体的本构为多孔弹性模型,并且土的渗透系数以及剪切模量是与深度相关的函数。在计

算中,没有考虑管线与海床之间接触问题的影响,对管道的运动情况没有进行讨论。

文献[20]认为:管道在自重和静水压力作用下会产生静沉降,当管道垂直方向上的外荷载和土体的局部极限承载力相等时,静沉降终止。然后在环境流体动力荷载的作用下产生附加沉降。应用总应力分析方法和有限元法对管土系统进行准静态计算,土体本构模型为邓肯-张模型。其结论是,随着管道沉降量的增加,作用在管道上的侧向阻力将增大,侧向阻力的增大主要来自于土体的被动土压力的水平分量。但是他的计算依旧是静态载荷作用下的计算,也没有考虑管道与土体之间接触面的影响。

文献[21]分析了海洋管线的在位稳定性。管线的加载历史由一个或几个连续的加载条件组成,例如:管线的铺设、管线运行时的行为、动态波浪和海流的联合荷载。管道采用三维弹塑性梁单元来模拟,材料模型是 Ramberg-Osgood 模型,海床土体的模型没有进行说明。该研究中主要考虑管线的变形行为。

## 5 结语

综上所述,管道稳定性问题分为:1)管道的受力计算;2)在给定力作用下,管道与海床之间的相互作用问题。对于管道的稳定性而言,管土相互作用模型是一个关键问题。对于管道自重所引起的静沉降,可以按照土体的局部极限承载理论来确定。但是对于管道的附加沉降,目前还没有统一的标准。因此关于管土相互作用,还有许多需要研究内容,如:土体本构模型的正确选取,土体与管道之间接触面影响的问题,土体在载荷作用下的应力发展,孔隙水压力对管道稳定性的影响,以及土体进入塑性状态时的破坏分析等。因此,应该采用有限单元法研究波-管-土的动力耦合效应,为管道稳定性设计提供理论依据。

## 参考文献

- [1] DnV RPE305, On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines[S], 1988
- [2] 中国海洋石油总公司企业标准 Q/HS701693-海底管道稳定性设计[S], 中国海洋石油总公司, 1993
- [3] 赵冬岩 海底管道稳定性分析综述[J], 中国海上油气(工程)1998, 10(5): 1-3
- [4] Wanger D A, Murrif J D, Brennodden et al Pipe-Soil Interaction Model[A]. Proceedings of Nineteenth Annual Offshore Technology Conference[C], 1987, OTC 5504: 187-190
- [5] 孙意卿 海洋工程环境条件及其荷载[M], 上海交通大学出版社, 1989
- [6] Lyons C G. Soil Resistance to Lateral Sliding of Marine Pipelines[A]. Proceedings of Fifth Annual Offshore Technology Conference[C], 1973, OTC1876: 479-484
- [7] Karel Karal Lateral Stability of Submarine Pipelines[A]. Proceedings of 9<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference[C], 1977, OTC2967: 71-75
- [8] Allen D W, Lammert W F et al Submarine Pipeline On-Bottom Stability: Recent A GA Research[A]. Proceedings of 21<sup>st</sup> Annual Offshore Technology Conference[C], 1989, OTC6055: 121-132
- [9] Brennodden H, Lieng J T, Sotberg T. et al An Energy-Based Pipe-Soil Interaction Model[A]. Proceedings of 21<sup>st</sup> Annual Offshore Technology Conference[C], 1989, OTC6507: 147-158
- [10] Palmer A C, Andrew Palmer et al Lateral Resistance of Marine Pipelines on Sand[A]. Proceedings of 20<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference[C], 1988, OTC5853: 399-408
- [11] Verley R L P, Torbjørn Sotberg, A Soil Resistance Model for Pipeline Placed on Sandy Soils[J]. OMAE, Volume V-4, Pipeline Technology, 1992: 123-131
- [12] 闫澍旺 砂土对管道约束力的模型实验研究[J]. 海洋工程, 1996, 14(1): 62-72
- [13] 马良, 张日向 海底部分埋设管道在波流作用下水动力效应的实验研究[J]. 中国海上油气(工程), 1998, 10(4): 33-37
- [14] 张日向, 马良 海底沟槽内管道在波流作用下水动力效应的实验研究[J]. 中国海上油气(工程)2000, 12(4): 22-27
- [15] Zhang J, Stewart D P. et al An Elasto-Plastic Model for Pipe-Soil Interaction of Unburied Pipelines[A], Proc 9<sup>th</sup> Int Offshore and Polar Engineering Conference[C], 1999, 2: 185-192
- [16] 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
- [17] Gu Xiaoyun, Gao Fuping, Pu Qun Wave-soil-pipe Coupling Effect on Submarine Pipeline On-bottom Stability[J], Acta Mechanica Sinica (English Series), 2001, 17(1): 86-96

- [18] Mei CC, Foda MA. Wave-induced responses in a fluid-filled Poro-elastic solid with a free surfaced boundary layer theory (J). Geophys J Royal Aust Soc, 1981, 66: 597-631.
- [19] Jeng D S, Cheng L. Wave-induced seabed response around a pipe laid on a poro-elastic seabed [A]. 17<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]: 98-0594
- [20] 吴鑫 砂质海底管土相互作用有限元分析 [D]. 中国科学院力学研究所硕士论文, 1999.
- [21] Yong Bai et al A finite-Element Model for In-Situ Behavior Offshore Pipelines On Uneven Seabed and Its Application to On-Bottom Stability [A], Proc 9<sup>th</sup> Int Offshore and Polar Engineering Conference [C], 1999, 2: 132-140

## The Summarization of Research on Interaction of Submarine Pipeline and seabed

REN Yanrong<sup>1</sup>, LU Yubiao<sup>2</sup>, GU Xiaoyun<sup>2</sup>  
(Beijing Institute of Civil Engineering)

**Abstract:** The pipe/soil interaction on the seabed is expatiated systemically. The design methods of submarine pipeline stability are introduced; The development of the experiment and numerical computation of the pipe/soil interaction and introduced; The problems needed to be resolved of pipe/soil interaction are pointed out

**Key words:** submarine pipeline, stability, pipe/soil interaction

## 2007 年世界阀门市场将超过 440 亿美元

据 M C Ivaine 公司最近出版的《世界市场报告》预测, 2003 年世界工业阀门市场为 380 亿美元, 到 2007 年将超过 440 亿美元。在阀门的各种类型中, 自动调节控制阀所占比例最大, 将占市场总份额的 20% 以上, 球阀也将占到几乎同样的市场份额, 其它阀门所占市场份额的排名依次是: 闸阀和截止阀、蝶阀、工业塞阀, 其它各种阀门被分为第六类, 2007 年市场销售量将达到 76 亿美元。

此外, 还按国家和阀门种类对工业市场的份额进行了划分并汇总出世界市场份额。油气工业现在是且将来也会继续是最大的买主, 其次是炼油厂、电力和化工业。城市污水处理厂排第五位, 其后是纸浆和造纸业、和城市供水。2007 年其它几个行业各自将采购价值 10 亿美元的阀门。它们是食品业、钢铁业以及制药业。剩下的一些行业有: 金属、采矿和半导体业。

电力工业一直是最不稳定的市场之一。2000~ 2001 年应用于联合循环燃气轮机发电厂的阀门订单骤增, 而 2002 年订购量却又急剧下降。不过, 燃煤发电的使用使订购量又发生了反弹。同样的发电量, 燃煤发电厂的阀门用量是燃气发电厂的三倍。所以长期的阀门市场潜力更大。

中国将是阀门需求量增长最快的国家, 到 2007 年将在世界排名第四。美国仍会排名第一, 紧随其后的是日本和德国。英国居第五位, 下面依次排名为: 法国、韩国、意大利、中国台湾和加拿大。

世界上有 5 万多家阀门制造商。报告专门提到的有近一千家。大公司并未控制全球市场。前 5 家公司是: Tyco、Flow serve、Emerson、Dressor 和 Kitz, 他们仅占市场份额的 12%, 后面五家公司是: ABB、SPX、Circor、Mitsubishi 和 KSB, 合占市场份额的 4%。排名 11~ 15 的五家公司占市场份额的 3%。因此, 前 15 家公司总共只控制 19% 的市场份额。

在数千种应用中, 阀门的大小、材料、功能方面都有很大的差异。因此, 有些阀门制造商专门为食品、制药业生产阀门。另有些制造商专门制造发电业使用的高温高压阀门。许多公司只生产一种阀门, 甚至更专业到只生产一种阀门的一个部件。由于市场需求的多样性, 这种专门化生产将很有可能继续下去, 且将会有更多的公司参与分享这块市场。

[姜淑兰 摘译自《THE FLOW CONTROL INDUSTRY INSIDER》JULY 2003]