

文章编号: 1001-4500(2010)03-0017-04

弹塑性海床上的海底管道沉降特性分析

任艳荣¹, 刘玉标²

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

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, 采用有限元软件 ABAQUS 对管土系统进行分析。海床土体采用 Ramberg-Osgood 模型进行模拟, 管土接触面采用“接触对”的算法进行处理, 解决了管道嵌入海床的动边界接触问题。通过改变管道的水下重、环境载荷、管径、屈服应力等参数进行计算。数值计算结果表明这些参数对管道的沉降量都有一定程度的影响。

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

中图分类号: P75 文献标识码: A

The Analysis of Pipes' Penetration Laid on the Elastic-Plastic Seabed

REN Yanrong¹, LIU Yubiao²

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2. DES, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The on-bottom stability of submarine pipeline is one of the key problems in submarine pipeline design, in order to offer the theory ground for the pipe/soil interaction, finite element software ABAQUS has been adopted to analyze the pipe/soil interaction. The seabed soil has been adopted to simulate the soil in the form of dynamic Ramberg-Osgood elastic-plastic model. The contact between pipe and soil is simulated with a 'contact pair', solving the moving boundary contact problem. The computation was executed via changing the parameters of the pipes' subweights, environmental loadings, pipes' diameter, yield stress. Numerical result indicates that these parameters have a certain degree of impact on the pipeline's stability.

Key words: submarine pipelines; stability; Ramberg-Osgood model; penetration

0 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^[1~5]采用机械式反复加载的方法深入研究了裸置管道的管土相互作用, 其研究结果为: 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, 这些均会使土体对管道的侧向阻力大于库仑摩擦阻力, 从而使侧向阻力系数大于库仑摩擦系数。此外, 还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

收稿日期: 2009-10-30

作者简介: 任艳荣(1973-), 女, 博士, 从事岩土力学和海洋工程研究。

F_H 为库仑摩擦阻力 F_F 与被动土压力 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^[6,7]。

近年来,顾小芸等^[8,9]进行了水动力条件下的管土相互试验,除得到与前人类似的研究结果外,还对其物理机制作出了更明确的解释,以及指出波-管-土动力耦合中的管道失稳是床面以上的涡流和床面以下渗流共同作用所致。

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

本文用 ABAQUS^[13]软件对管土系统进行数值模拟,计算结果与国内外有关试验结果进行了对比。由于前人的模型试验多是建立在二维基础上,因此在本文中假定管土系统属于平面应变问题。

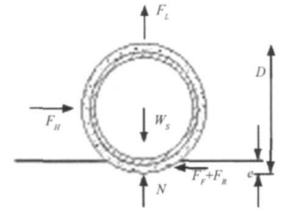


图 1 管土相互作用示意图

1 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。由于管道设置在海洋环境中,波浪载荷是动态的。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

$$E\varepsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^{n-1} \tag{1}$$

式中: E 为弹性模量; ε 为应变; σ 为应力; σ_0 为屈服应力; n 为非线性项的硬化参数; α 为屈服偏移量。

2 有限元模型的建立

2.1 接触面问题

当管土有载荷作用时,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 软件的接触模拟中,采用单纯的主控-从属接触算法。计算时,为获得模拟的最佳结果,须认真选择从属与主控表面,其所遵守的原则是: 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。基于这样的原则,管道下半部作为主接触面,海床的床面上取两个管径的长度为从接触面,从而形成一个接触对。

2.2 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,因此计算时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: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。

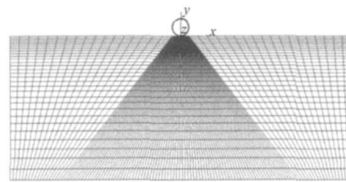


图 2 有限元模型示意图

2.3 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。为与实际情况相吻合,在管道左右两侧施加约束方程,如图 3 所示。

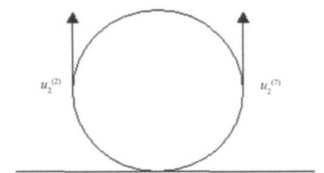


图 3 约束方程示意图

其约束方程形式如下

$$u_2^2 + (-1)u_7^7 = 0 \tag{2}$$

式中 2 与 7 分别是管道两侧的节点号。

3 有限元结果分析

3.1 位移场

当管道外径 $D = 1.0 \text{ m}$ ，管道水下重 $W_s = 11.8 \text{ kN/m}$ 时，通过数值计算，可以绘出管道的水平位移等值线图、垂直位移等值线图，如图 4、图 5 所示。

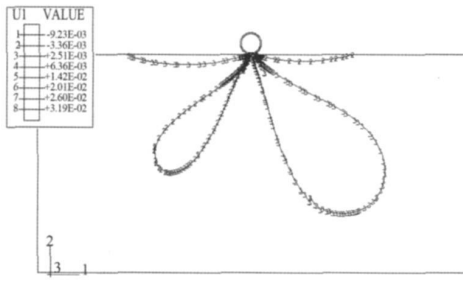


图 4 管土系统水平位移等值线图

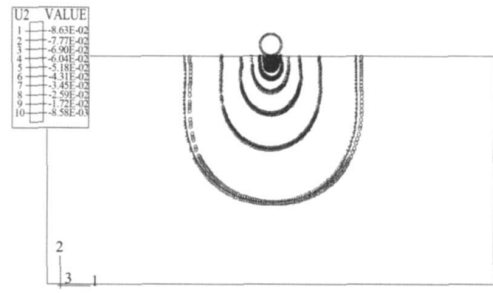


图 5 管土系统垂直位移等值线图

从图 4 和图 5 中可以发现，靠近管道处，土体的垂直位移较大，可随着海床深度和宽度的增加，垂直位移逐渐减小，最后变为零。水平位移等值线图的位移等值线并不都是集中靠近在管道处，其中一部分等值线已经扩展到了海床的边缘附近。由此可知远离管道的土体，受外载荷的影响较小。

3.2 管重的影响

保持环境参数不变，当管径为 0.4 m 、 1.0 m 时，可以得到管道的沉降量与管道水下重间的关系如图 6、图 7 所示。

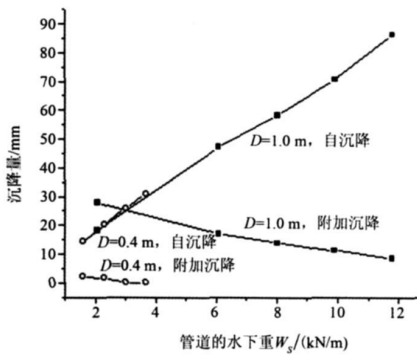


图 6 管道水下重对沉降量的影响

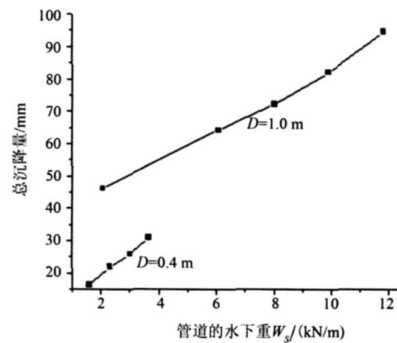


图 7 总沉降量与管道水下重间的关系

由图 6 可知，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 7），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，土体中附加应力减小，管土系统趋于稳定状态，附加沉降因而不会增加。由图 8 可知，管道沉降量的计算结果与试验结果^[6]吻合。

3.3 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，所得结果如图 9 所示。

由图 9 可知，随着作用在管道上的环境载荷的增大，土体中的附加应力增大，因此管道的最终沉降量在增大。

3.4 管径的影响

保持管道的水下重量不变，即 $W_s = 3 \text{ kN}$ ，环境条件也不变，改变管径进行计算，所得结果如图 10 所示。从图 10 可以发现，随着管径的增加，管道的沉降量也在增加。

3.5 屈服应力的影响

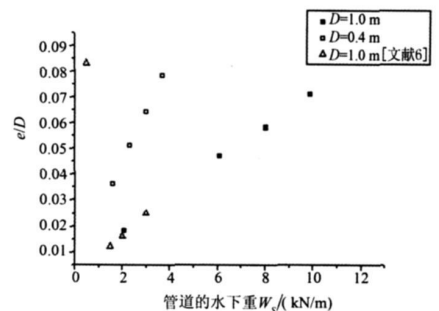


图 8 管道的沉降量与试验的比较

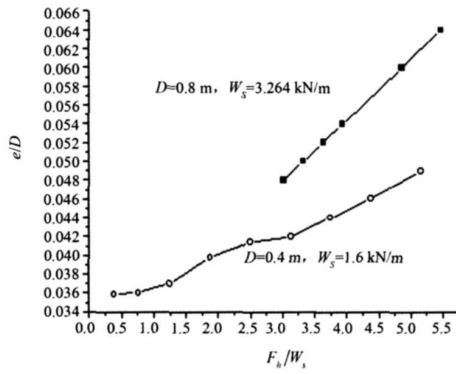


图 9 沉降量与环境载荷的关系

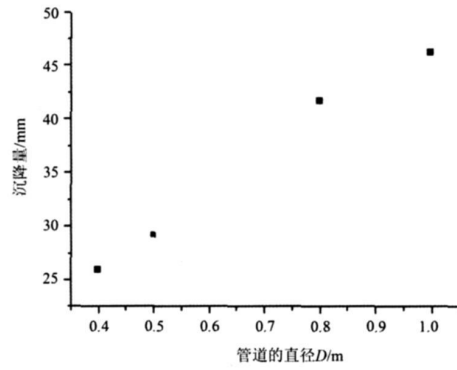


图 10 沉降量与管径的关系

对于塑性模型, 只要土体单元的应力超过了屈服应力, 则土体就会进入屈服状态, 从而引起破坏。因此计算时, 研究了屈服应力对管道的沉降量的影响, 所得结果如图 11 所示。由图 11 可知, 随着屈服应力的减小, 管道的沉降量在增大。这是由于屈服应力越小, 土体中某些单元的应力就会越容易达到屈服点, 从而导致土体的某个部分发生破坏, 造成管道的沉降量增大。

4 结论

(1) 由于实际海床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; 加之所受的外载荷是动态的, 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) 数值计算结果表明用 ABAQUS 软件进行管道沉降量的计算是可行的, 同时也表明管道水下重、环境载荷、管径、屈服应力对管道的沉降量均有一定的影响。

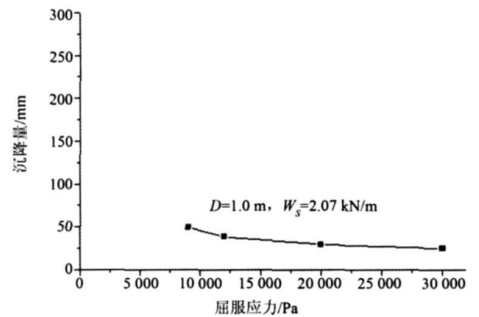


图 11 沉降量与屈服应力的关系

参考文献

- [1] Brennodden H, Sveggren O, et al. Full Scale Pipe Soil Interaction Tests[C]. OTC, 1986.
- [2] Wagner D A, Murff J D, Brennodden H. Pipe Soil Interaction Model[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 115(2): 205-220.
- [3] Palmer A C, Steinfelt J S, Steensen Bach J O, et al. Lateral Resistance of Marine Pipelines on Sand[C]. Offshore Technology Conference, 1988.
- [4] Allen D W, Lammert W F, et al. Submarine Pipeline On Bottom Stability: Recent AGA Research[C]. Offshore Technology Conference, 1989.
- [5] Brennodden H, Lieng J T, Sotberg T, et al. An Energy Based Pipe/ Soil Interaction Model[C]. OTC, 1989.
- [6] Detn Veritas. On bottom stability design of submarine pipeline [S]. 1988.
- [7] Hale J R, Lammert W F, et al. Pipeline On Bottom Stability Calculations: Comparison of Two State of the Art Methods and Pipe Soil Model Verification[C]. Offshore Technology Conference, 1991.
- [8] Gu X Y, Gao F, Pu Q. Wave Soil Pipe Coupling Effect upon Submarine Pipeline on Bottom Stability[J]. Acta Mechanica Sinica, 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.
- [10] Lyons C G. Soil Resistance to Lateral Sliding of Marine Pipelines[C]. Offshore Technology Conference, 1973.
- [11] Mei C C, Foda M F. Wave induced stresses around a pipe laid on a porous elastic seabed[J]. Geotechnique, 1981b, 31: 509-517.
- [12] Yong B, et al. A finite Element Model for In Situ Behavior Offshore Pipelines On Uneven Seabed and Its Application to On Bottom Stability[C]. Ninth(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999.
- [13] Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS/Standard User's Manual[M]. Vol. I & II (ver. 5.4), 1994.