

文章编号: 1000-0747(2013)01-0111-06

海流及海床摩擦对油气管道提吊及沉放影响分析

伦冠德^{1,2}, 刘衍聪², 伊鹏², 李成凯², 马晓丽², 曲杨²

(1. 潍坊学院; 2. 中国石油大学(华东)机电工程学院)

基金项目: 国家高科技研究发展规划(863)项目“南海深水油气勘探开发关键技术及装备”(2006AA09A104)

摘要: 基于海洋管道海上提吊、沉放的工程实际, 建立了管道提吊沉放的有限元模型, 以建立的模型为基础确定了管道提吊沉放的方法和步骤, 并对纵向水流、侧向水流及海床摩擦对管道提吊沉放的影响进行了研究。利用有限元分析软件研究了纵向水流、侧向水流及海床摩擦作用下管道提吊及沉放过程中的管道形态及应力分布。研究结果表明: 纵向水流对管道提吊及沉放过程中的空间形态及应力分布几乎没有影响; 侧向水流会使管道在水平面内产生明显变形, 并提高管道的整体应力水平; 海床与管道间的摩擦对管道沉放过程中的侧移有一定的阻碍作用, 海床越粗糙, 管道最终的整体侧移变形越小, 沉放完成后管道达到平衡状态时, 管道与海床之间的摩擦力随摩擦系数增大而增大。图8表3参16

关键词: 有限元模型; 海流; 摩擦系数; 应力; 变形

中图分类号: TE973.92

文献标识码: A

Impacts of ocean current and seabed friction on the picking-up and laying-down processes of oil and gas pipelines

Lun Guande^{1,2}, Liu Yancong², Yi Peng², Li Chengkai², Ma Xiaoli², Qu Yang²

(1. Weifang University, Weifang 261061, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: Based on engineering practice of the picking-up and laying-down processes of offshore pipelines, a finite element model was established. On the basis of the model, methods and steps of the picking-up and laying-down operations were determined, and the impacts of currents and seabed friction on the two operations were studied. The shape and stress distribution of the pipeline under the influences of longitudinal current, lateral current and seabed friction when picked up and laid down were analyzed using finite element analysis software. The results show that the longitudinal current has almost no effect on the pipeline shape and stress distribution in the picking-up and laying-down processes, while the lateral current results in significant deformation of the pipeline in the horizontal plane and raises the overall stress level of the pipeline. The friction between the seabed and the pipeline impedes the lateral displacement of the pipeline when it is laid down. The rougher the seabed, the smaller the overall lateral displacement of the pipeline is. When the pipeline reaches the equilibrium state after it is laid down, the friction between the pipeline and the seabed becomes larger with the increase of the friction coefficient.

Key words: finite element model; ocean current; friction coefficient; stress; deformation

0 引言

浅海水域油气管道的铺设过程为: 在岸上将管道制成长段后, 将管道拖运到铺管海域沉放在海底, 然后由工程船将两条搭接管道提吊起来进行焊接后再沉放到位, 完成管道的水上对接。在管道提吊及沉放的过程中控制管道上的应力分布, 防止管道因局部应力过大而屈曲是管道海上对接设计的重要内容。海洋管道提吊及沉放过程受诸多因素的影响, 其中主要的因素有海洋水流、海床摩擦及提吊沉放方案等。这些因

素影响管道提吊及沉放过程中的管道形态及应力分布, 在一定程度上决定了施工的安全性。研究者对管道铺设过程中的受力状况进行了许多探讨^[1-8], 但未见海流及海床摩擦对管道提吊及沉放影响的研究报道。本文利用有限元分析软件研究海流及海床摩擦作用下管道提吊沉放过程中管道形态及应力分布的变化, 分析纵向水流、侧向水流及海床摩擦对管道提吊及沉放过程的影响, 为海洋管道提吊及沉放的设计和施工提供参考。

1 海洋管道提吊沉放模型建立

海底管道提吊及沉放过程的大变形属于几何非线性范畴，将管道简化为梁，基于非线性梁理论，根据管道微段的平衡条件建立管道变形的基本方程。

1.1 非线性梁模型方程

在悬跨段管道上取一段长度为 ds 的微元体（见图 1）。该段微元体受均布自重 w 的作用，变形后和水平方向的夹角为 θ ，左端 a 处截面受水平力 H 、垂向力 V 、弯矩 M 的作用，右端 b 处截面受到的力和弯矩为 $H+dH$ 、 $V+dV$ 和 $M+dM$ 。

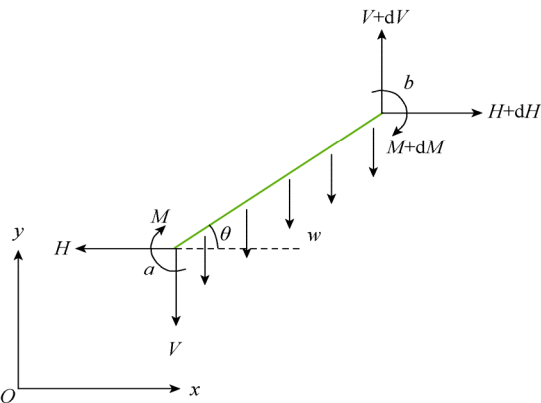


图 1 管道微元段受力情况

在浅水区域铺管，忽略管道的张力，管道的弯曲方程为：

$$EI \frac{y'''}{[1+(y')^2]^{\frac{3}{2}}} = -M \tag{1}$$

对于几何非线性问题的平衡方程式，要用变形后的位置来描述，而管道变形后离地点和管端的位移是未知的，需要求解悬空管段的附加条件。常用的求解方法有：奇异摄动法、打靶迭代法、B 样条曲线拟合法、有限差分法和有限元法。其中有限元法以其较高的准确性和较大的适用范围而得到广泛应用。

1.2 海洋管道提吊沉放有限元模型

以空间大变形梁理论为基础建立海底管道提吊及沉放的有限元模型，模型由海床、管道、吊缆和舷吊 4 部分组成（见图 2）。模型的总体坐标系为右手直角坐标系，原点 O 位于海洋管道平铺于海底时的提吊自由端，管道轴线为 x 轴， z 轴垂直于 x 轴指向海面。模型中主要涉及的几何参数包括：水深 H_0 （6 m）、舷吊与甲板距离 H_s （2 m）、甲板与水面距离 H_w （3 m）、吊点与自由端距离 S_1 （15 m）和 S_2 （45 m）。

管道模型。采用三维线性管单元 PIPE31H 模拟管道，该单元由 2 个节点构成，拥有 12 个自由度，是考虑剪切作用的 Timoshenko 梁单元。同时，PIPE31H

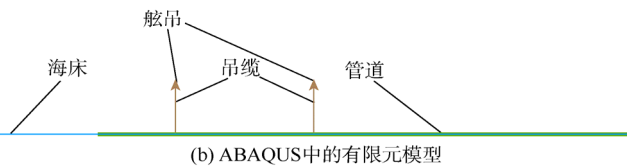
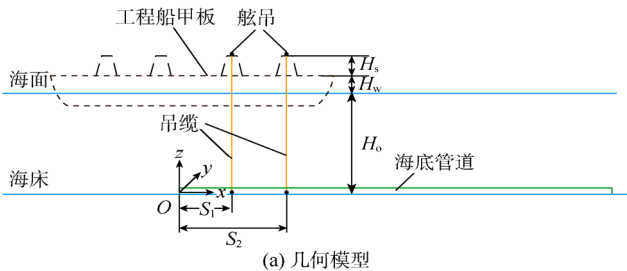


图 2 海底管道提吊及沉放模型

单元还能解决普通梁单元在采用有限位移方法时难以计算轴力和剪切力的问题，通过将轴力和剪切力引入基本方程，该单元的收敛性得到提高。尤其是在细长杆的几何非线性问题中，PIPE31H 单元能够有效解决节点位置的微小改变导致巨大内力的问题，尽管计算量较大，但该单元收敛速度较快，总体效率较高^[9]。

有限元分析存在物理离散误差^[10]，采用较小的单元尺寸有利于得到较精确的分析结果，但同时也会导致计算时间的大幅度增加。为了保证求解的准确性并尽量节省计算时间，结合已发表文献中的研究^[11]，本文采用 1 m 的单元长度对管道模型进行离散。

管道模型的相关参数如表 1 所示。

表 1 管道模型相关参数表			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
管道长度	300 m	管材名义最小屈服强度	448 MPa
管道外径	355.6 mm	防腐层厚度	2.8 mm
管道壁厚	14.3 mm	防腐层密度	940 kg/m ³
管道密度	7 850 kg/m ³	配重层厚度	40 mm
管材弹性模量	2.07×10 ¹¹ Pa	配重层密度	295 kg/m ³
管材泊松比	0.3		

吊缆模型。海洋管道提吊沉放过程中，根据实际施工条件在提吊端布置一条或多条吊缆，通过工程船上的舷吊（吊缆的上端）进行作业。由于舷吊固定不动，因此在管道提吊或沉放的过程中吊缆会逐渐倾斜，管道受到的提吊力的大小及方向也会不断改变。为了较真实地模拟吊缆收起与下放的过程，采用 Connector 单元库中的 CONN3D2 单元模拟吊缆^[12]，采

用 Slipping 连接属性模拟吊缆收放过程。

Slipping 是一种较为特殊的组合式连接属性,该属性除了能够模拟连接点之间的平移和旋转关系外还增加了材料流动属性,与两连接点处的第 10 自由度相对应^[13]。该自由度表征材料在连接点处的流入和流出,可以用来模拟安全带、滑轮组及张紧的绳缆的收放行为。采用该属性能够准确计算管道在提吊过程中吊缆张紧状态下的内力。

海床模型。采用刚性解析面 (analytical rigid surface) 模拟海床。相比于离散刚性体,解析刚性面的生成方式简单,且由于单元量减少,计算成本较低。对于地势较平缓的海床,采用刚性解析面进行模拟完全可以满足实际工程分析要求。

除了模拟海床,另一个关键的问题是如何模拟管道同海床的接触。管道和海床之间不仅存在法向相互作用关系,同时由于管道的侧移,海床对管道的摩擦作用十分明显^[14]。本文根据管土作用特点分别采用软接触和弹性滑动模拟管土法向接触和各向异性摩擦。

2 管道提吊及沉放方法

海洋管道提吊分为 8 个阶段,每一阶段仅对一个吊点进行操作,两吊点交替提升,逐步将管道抬离水面,具体步骤如表 2 所示。沉放则分 10 个阶段,同样每一阶段仅对一个吊点进行操作,两吊点交替下放,并在第 1、4、6、8 阶段同时进行工程船的侧移,具体步骤如表 3 所示。

表 2 海底管道提吊步骤

步骤	吊缆 1		吊缆 2	
	吊缆长度/m	收起长度/m	吊缆长度/m	收起长度/m
1	9.0	2.0	11.0	
2	9.0		10.0	1.0
3	7.0	2.0	10.0	
4	7.0		9.0	1.0
5	5.0	2.0	9.0	
6	5.0		7.5	1.5
7	2.5	2.5	7.5	
8	2.5		5.5	2.5

表 3 海底管道沉放步骤

步骤	吊缆 1		吊缆 2		工程船侧移距离/m
	吊缆长度/m	下放长度/m	吊缆长度/m	下放长度/m	
1	2.5		5.5		5.0
2	4.0	1.5	5.5		
3	4.0		7.0	1.5	
4	5.5	1.5	7.0		2.0
5	5.5		8.0	1.0	
6	7.5	2.0	8.0		2.0
7	7.5		10.0	2.0	
8	9.5	2.0	10.0		2.0
9	9.5		11.5	1.5	
10	11.5	2.0	11.5		

3 水流对管道提吊沉放的影响分析

海底管道在提吊及沉放的过程中会受到波浪和洋流等海洋环境载荷的作用。实际施工时,管道提吊沉放及海上对接都选择在天气晴好无风无浪时进行,因此本文仅分析定常水流对管道形态及应力分布的影响。作用在管道表面上的水流力为^[15]:

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} v_w^2 A$$

(2)

管道表面的水流速度为:

$$v_w = v_0 \left(\frac{L}{H_o} \right)^{\frac{1}{7}}$$

(3)

3.1 纵向水流的影响

基于建立的管道提吊沉放有限元模型,采用非线性有限元软件计算管道在静水条件下提吊到最终阶段和对接后工程船侧移 5 m 时的管道形态及应力分布(见图 3)。然后,取海洋表面水流流速为 2 m/s,海底处水流流速为 1 m/s,且海流流速呈线性分布,计算管道在纵向 (x 轴方向) 水流下提吊、沉放的空间形态及应力分布 (见图 4)。

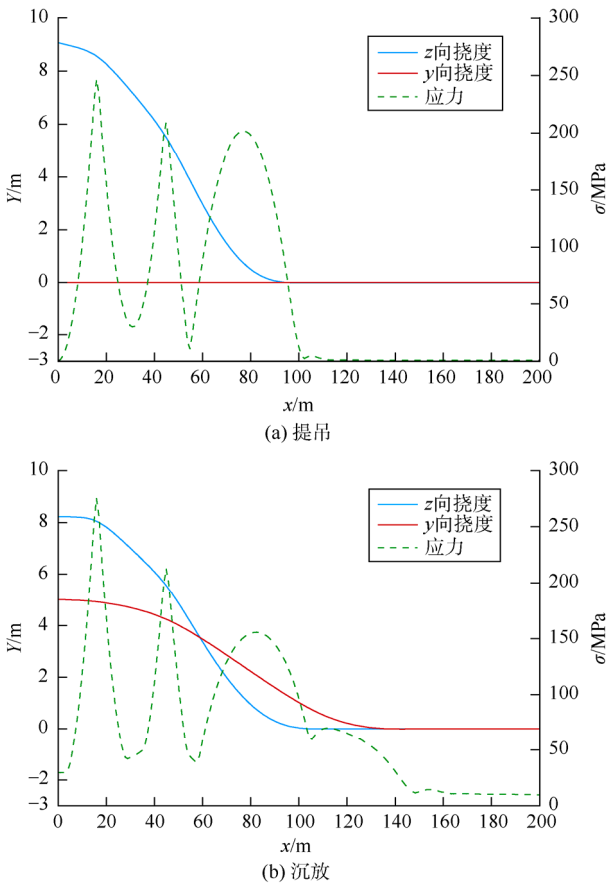


图 3 静水条件下管道提吊及沉放的管道形态及应力分布

对比图 3a 和图 4a 可以发现：静水和纵向水流条件下管道提吊形态及应力分布曲线基本完全一致。对比图 3b 和图 4b 可以发现：静水和纵向水流条件下管

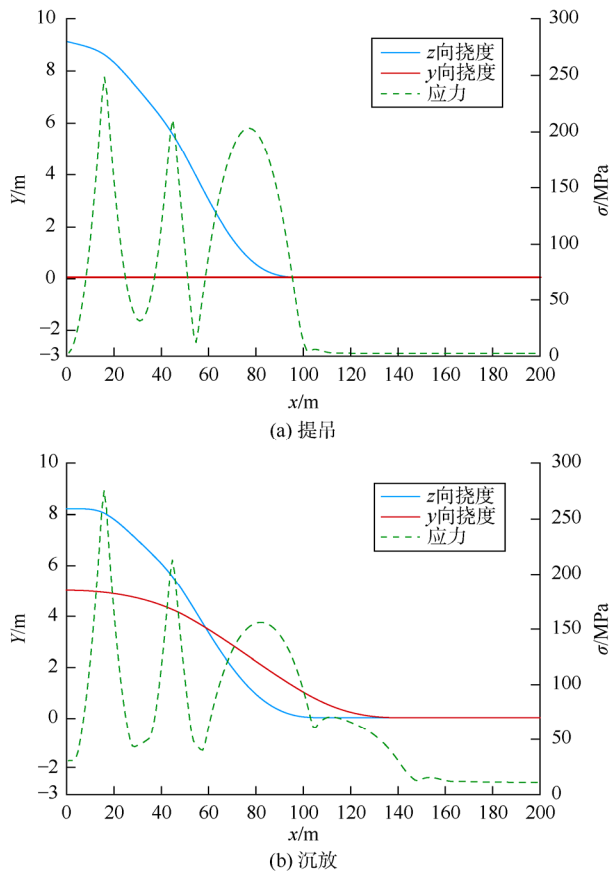


图 4 纵向水流条件下管道提吊及沉放的管道形态及应力分布

道沉放形态及应力分布曲线亦基本完全一致。这说明纵向水流对管道提吊及沉放的管道形态及应力分布影响很小，在对管道进行提吊沉放时，若海流为纵向海流，则可以忽略其对管道的影响。

3.2 侧向水流的影响

改变水流方向，使其沿 y 轴方向流动。由于管道提吊过程存在关于 x 轴方向的对称性，仅对沿 y 轴正向水流作用下管道提吊的空间形态及应力分布进行计算分析。

对比图 3a 和图 5 可以发现：侧向水流作用下管道提吊时的空间变形不再是位于提吊面内的平面曲线，管道在 y 轴方向上出现了较大的挠度，最大挠度为 2 m，发生在 80 m 附近的悬垂段管道；管道 z 轴方向挠度变化很小；管道最大应力由 230 MPa 增加至 270 MPa，整体应力水平有所上升，管道的应力区延伸至 180 m。

图 6 为侧向水流作用下管道沉放的空间形态和应

力分布情况，图 6a 的水流方向为 y 轴正向（和工程船侧移方向相同），图 6b 的水流方向为 y 轴负向（和工程船侧移方向相反）。

从图 6a 中可以看出： y 轴正向水流作用下管道沉

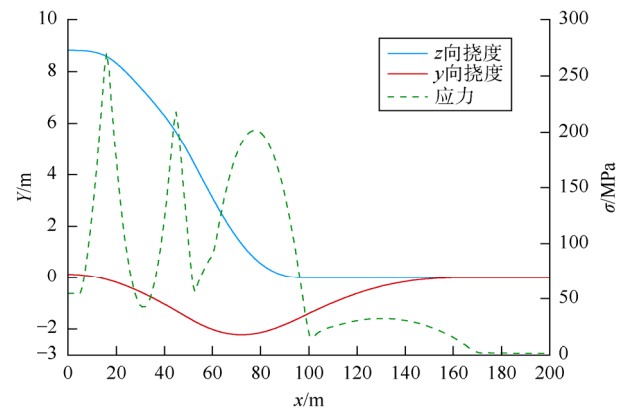


图 5 侧向水流条件下管道提吊的空间形态及应力分布

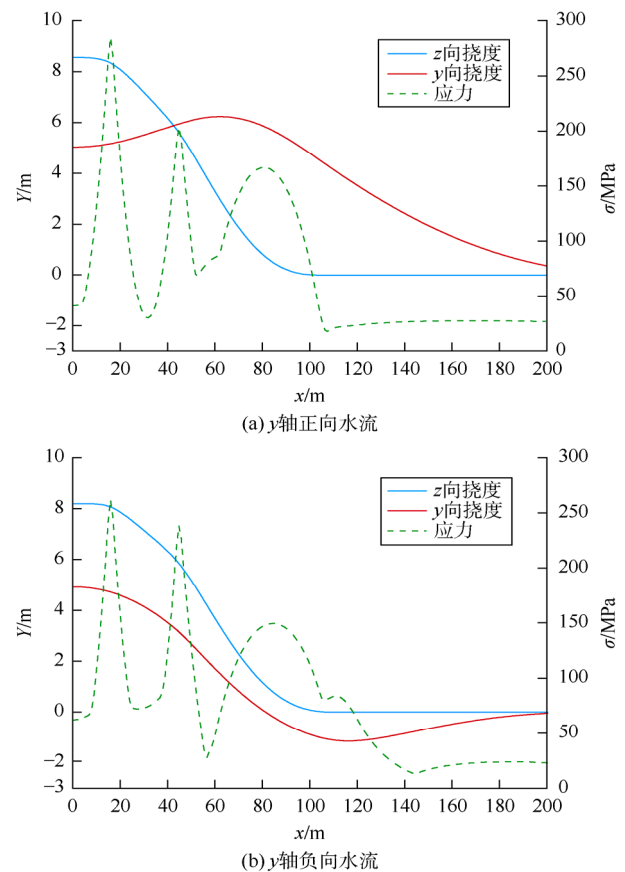


图 6 侧向水流条件下管道沉放的空间形态及应力分布

放时，管道在 y 轴方向的挠度变形呈外凸状，发生挠度变形的管道长度超过 200 m；最大挠度为 6.5 m，发生在 70 m 附近的悬跨段管道，超出了工程船的侧移距离。对比图 3b 和图 6a 可以发现： y 轴正向水流作用下

管道沉放时 z 轴方向挠度变化很小；最大应力大幅度增加至近 300 MPa。

对比图 3b 和图 6b 可以发现： y 轴负向水流作用下管道沉放时，管道在 y 轴方向的挠度变形仍然近似 S 形，但整体变形量有所减小，且离地点附近的管道发生了较为明显的负向挠度，最大挠度为 5 m，发生在管道自由端（0 m 处）；管道 z 轴方向挠度变化很小； y 轴方向发生挠曲变形的管道长度增加，管道最大应力略微上升。

通过以上对比分析可以发现：侧向水流对管道 y 轴方向挠曲变形影响较大。水流与工程船侧移方向一致会使悬跨段管道的 y 轴方向挠度较大，最大挠度发生位置超过了工程船侧移距离，管道最大应力明显增加。水流与工程船侧移方向相反时，水流对管道 y 轴方向变形有阻碍作用，并且在离地点附近出现较为明显的 y 轴负向挠度，而应力水平略有增加。

综上所述，侧向水流会提高管道在提吊及沉放过程中的应力水平，同时造成管道 y 轴方向挠度的明显变化，增加了管道的控制难度。因此，应尽量避免在侧向水流条件下进行管道的提吊和沉放作业。

4 海床与管道摩擦影响分析

由于工程船的侧移作用，海底管道沉放过程中管道同海床之间存在明显的摩擦。海床与管道之间相互作用的轴向、横向摩擦力采用库仑摩擦力计算公式^[16]，即：

$$F = \mu W \quad (4)$$

为了对比不同摩擦系数对管道沉放的影响，根据海床与管道间的摩擦特性，分别取摩擦系数为 0.2、0.3 和 0.4，计算管道沉放完成后的形态和弯矩分布（见图 7）。

从图 7a 可以看出：海床摩擦对管道沉放的最终形态有一定的影响，海床越粗糙，管道的整体侧移越小，但这种影响程度较小。

从图 7b 可以看出：海床摩擦对管道最终弯矩分布影响较大。在水平坐标（ x ）70 ~ 120 m 范围内的管道，海床摩擦系数越大，弯矩越大；在水平坐标 120 ~ 180 m 范围内的管道，情况相反，管道弯矩随着海床摩擦系数的增大而减小。

图 8 为管道沉放完成后与海床之间摩擦力的分布情况。从图 8 中可以看出：管道所受摩擦力的分布情况比较复杂，波动很大且没有明显的规律。不同摩擦

系数下管道与海床间摩擦力分布情况相似，最大摩擦力都发生在 70 m 附近，但海床摩擦系数较大时管道同海床之间的整体摩擦力水平较高。

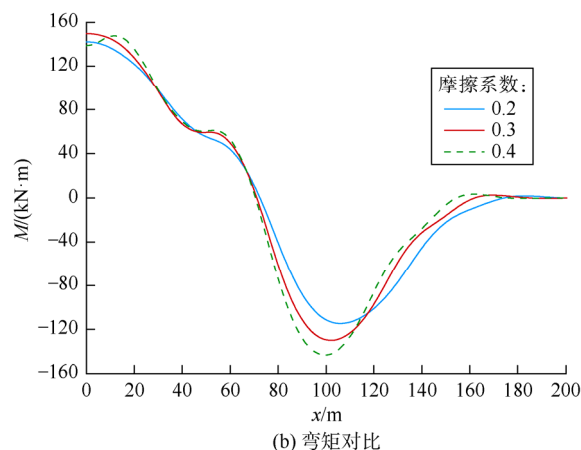
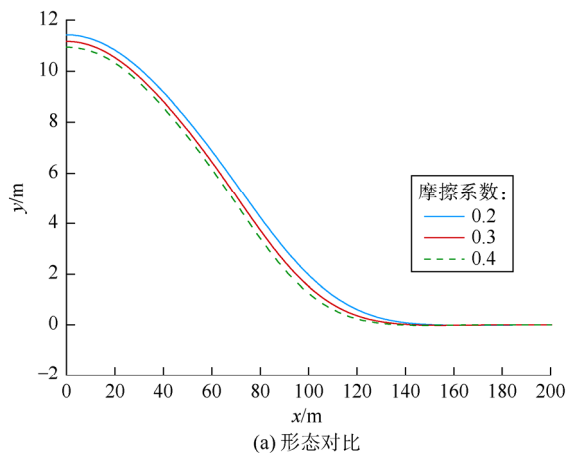


图 7 不同海床摩擦系数下管道沉放完成后的形态和弯矩分布

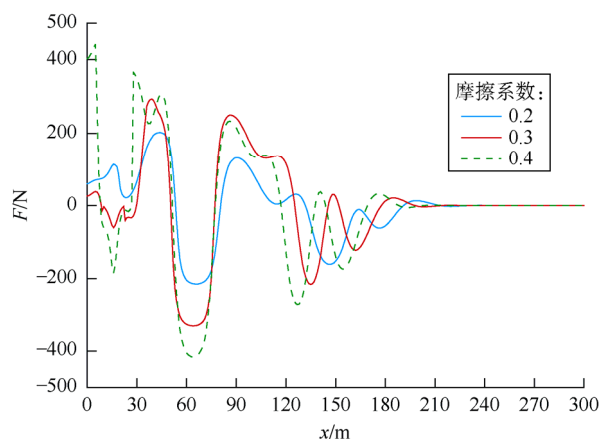


图 8 不同海床摩擦系数下管道沉放完成后摩擦力沿管道长度的分布

5 结论

基于海洋管道海上提吊、沉放的工程实际，建立了管道提吊沉放的有限元模型。模型由海床、管道、

吊缆和舷吊 4 部分组成。采用 PIPE31H 单元模拟管道,有效解决了节点位置的微小改变导致巨大内力的问题;采用 CONN3D2 单元模拟吊缆,并创新性地采用 Slipring 连接属性模拟吊缆收放过程,该属性能够准确计算管道在提吊过程中吊缆张紧状态下的内力;采用刚性解析面模拟海床,既满足工程分析要求又有效降低了计算成本,此外分别采用软接触和弹性滑动来模拟管土法向接触和各向异性摩擦。

以建立的模型为基础,确定了管道提吊沉放的方法和步骤,并采用非线性有限元软件计算了纵向水流、侧向水流及海床摩擦作用下管道提吊沉放的管道形态和应力分布。纵向水流对管道提吊沉放的管道形态与应力分布影响很小,可以忽略;侧向水流会明显影响管道在水平面内的变形,提高管道的整体应力水平,应尽量避免在侧向海流条件下对管道实施提吊及沉放作业;海床与管道间的摩擦对管道沉放的最终形态及弯矩分布有一定的影响,粗糙的海床对管道沉放过程中的侧移有一定的阻碍作用,且沉放完成后管道达到平衡状态时弯曲管段弯矩较大。

符号注释:

ds ——管道微元段长度, m ; w ——管道微元段均布自重, N/m ; θ ——管道微元段变形后与水平方向的夹角, $(^\circ)$; H ——管道微元段 a 端所受水平力, N ; V ——管道微元段 a 端所受垂向力, N ; M ——管道微元段 a 端所受弯矩, $N \cdot m$; $H+dH$ ——管道微元段 b 端所受水平力, N ; $V+dV$ ——管道微元段 b 端所受垂向力, N ; $M+dM$ ——管道微元段 b 端所受弯矩, $N \cdot m$; E ——管材弹性模量, Pa ; I ——管材截面惯性矩, m^4 ; H_0 ——水深, m ; H_s ——舷吊与甲板距离, m ; H_w ——甲板与水面距离, m ; S_1, S_2 ——吊点与自由端距离, m ; F_w ——水流力, N ; C_w ——水流阻力系数; ρ ——海水密度, kg/m^3 ; v_w ——管道表面的水流速度, m/s ; A ——管道在与流向垂直面上的投影面积, m^2 ; v_0 ——海面的水流速度, m/s ; σ ——管道承受应力, MPa ; L ——管道到海底的距离, m ; Y ——管道挠度, m ; F ——管道与海床间的摩擦力, N ; μ ——管道与海床间的摩擦系数; W ——管道的有效重力, N 。

参考文献:

- [1] 詹侃, 陆仁华. 海底管道在铺设过程中的二维静态分析[J]. 海洋工程, 1991, 9(4): 15-20.
Zhan Kan, Lu Renhua. Two-dimensional static analysis in the process of laying submarine pipelines[J]. Ocean Engineering, 1991, 9(4): 15-20.
- [2] 黄玉盈, 朱达善. 海洋管线铺设时的静力分析[J]. 海洋工程, 1986, 4(1): 32-45.
Huang Yuying, Zhu Dashan. Static analysis of laying marine pipeline[J]. Ocean Engineering, 1986, 4(1): 32-45.
- [3] 张浦阳, 于晓洋, 丁红岩. 海上自升式钻井平台插桩阶段桩靴承载力计算[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 613-619.
Zhang Puyang, Yu Xiaoyang, Ding Hongyan. Spudcan bearing capacity calculation of the offshore jack-up drilling platform during the preloading process[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 613-619.
- [4] 戴英杰, 宋甲宗. 悬跨段海洋管道非线性自由振动分析[J]. 大连理工大学学报, 1995, 39(6): 756-760.
Dai Yingjie, Song Jiazong. Analysis on nonlinear free vibration of free spanning marine pipelines[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1995, 39(6): 756-760.
- [5] 白宁, 赵冬岩. 海底管道 S 型铺设的计算机辅助设计[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 620-627.
Bai Ning, Zhao Dongyan. Computer aided design for offshore pipe S-laying[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 620-627.
- [6] 戴英杰, 宋甲宗. 海底管道收弃管作业分析[J]. 海洋工程, 2000, 18(3): 75-78.
Dai Yingjie, Song Jiazong. A study on abandonment and recovery operation of submarine pipelines[J]. Ocean Engineering, 2000, 18(3): 75-78.
- [7] 鞠少栋, 畅元江, 陈国明, 等. 深水钻井隔水管连接作业窗口分析[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 105-110.
Ju Shaodong, Chang Yuanjiang, Chen Guoming, et al. Envelopes for connected operation of the deepwater drilling riser[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 105-110.
- [8] 邢静忠. 海底管道离地点的接触条件探讨[J]. 力学与实践, 2005, 27(5): 57-60.
Xing Jingzhong. An investigation on contact condition at separation point of submarine pipeline[J]. Mechanics and Engineering, 2005, 27(5): 57-60.
- [9] Plunkett R. Static bending stress in catenaries and drill strings[J]. Journal of Engineering for Industry, 1967, 20(3): 267-275.
- [10] Brewer W J, Dixon D A. Influence of lay barge motion on a deep water pipeline lay under tension[R]. OTC 1072, 1969.
- [11] Pedersen P T. Equilibrium of offshore cables and pipelines during laying[J]. International Shipbuilding Progress, 1975, 22: 399-408.
- [12] Gardner T N, Kotch M A. Dynamic analysis of risers and caissons by the element method[R]. OTC 2651, 1976.
- [13] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Zhuang Zhuo. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [14] Konuk I. Application of an adaptive numerical technique to 3-D pipeline problems with strong nonlinearities[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1982, 104: 58-62.
- [15] 陈铁云. 海洋工程结构力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991.
Chen Tiejun. Marine engineering structural mechanics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1991.
- [16] Christensen L. Displacement control in lateral buckling of "short" pipelines [R]. Seoul, Korea: The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005: 84-92.

第一作者简介: 伦冠德 (1969-), 男, 山东潍坊人, 硕士, 潍坊学院副教授, 现为中国石油大学 (华东) 机电工程学院博士研究生, 主要从事海底管道对接技术的研究工作。地址: 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号, 中国石油大学 (华东) 机电工程学院, 邮政编码: 266580。E-mail: guandelun@126.com

收稿日期: 2012-06-14 修回日期: 2012-11-23

(编辑 胡苇玮 绘图 刘方方)