

文章编号:1005-9865(2019)03-0035-07

基于有限元分析的卷管法管道安装实时研究

李 英,李婧一,刘志龙

(天津大学 建筑工程学院 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘 要:采用卷管法铺设管道时,管道和铺设设备之间的接触作用十分复杂,并且管道在弯曲过程中将会产生塑性变形并可能发生局部屈曲,导致管道失效。基于有限元模型(FEM)实时模拟卷管法安装的整个过程,研究管道与铺设设备之间的接触作用;分析管道对于环境载荷和船体运动的动态响应;获得管道的应力应变值以校核局部屈曲。研究表明,管道弯矩大部分来源于管道与安装设备间的接触作用,而环境载荷及船体运动对管道的弯曲应力影响较小。

关键词:卷管法;管道安装;接触作用;有限元分析;局部屈曲;弯曲应力;海洋油气

中图分类号:P751 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2019.03.004

Real time simulation of subsea pipe installation with reel-lay

LI Ying, LI Jingyi, LIU Zhilong

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: During the pipe installation with reel-lay method, the interaction between the pipe and the reel-lay equipments is complex. It is also known that the pipe undergoes plastic strain during reeling and is subject to local buckling. To address these problems as a case study, the whole procedure of pipe reeling and pipe laying was simulated with finite element model (FEM) in real time paying special attention to the contact interaction between the pipe and the equipments. For the real time simulation, three scenarios were considered to investigate the dynamic response of the pipe to the environmental loads and laying vessel motion during pipe laying. The maximum strain of the pipe was compared with analytical results to check if there was local buckling. The results show that most of the bending moment comes from the contact interaction between the pipe and the equipments, and that the pipe stress isn't so sensitive to the environmental loads.

Keywords: reel-lay; pipe installation; contact interaction; finite element analysis; local buckling; bending stress; offshore oil and gas

海洋油气管道铺设一般有 S-lay, J-lay 和 Reel-lay 三种方法^[1]。由于所有的焊接工作几乎都在岸上完成,卷管法可以实现对直径 20 英寸以下的管道高效安装。但卷管法产生的塑性变形将对管道和环缝焊接疲劳寿命产生影响。因此,有必要对卷管法铺设中管道的材料性能、载荷效应、应变分析、残余椭圆度和局部屈曲等问题进行研究。

Soheil^[2]系统说明了卷管过程和矫直过程中的力学机理。Szczotka^[3]考虑材料的弹塑性特性和铺管船运动,对比了在不同海况下主动卷筒和被动卷筒对管道拉力的影响。Erwan 等^[4]研究了管道的局部屈曲和残余椭圆度,扩展了卷管法的应用。Meissner 等^[5]研究了反复弯曲对管道屈曲性能的影响。

国内学者也针对卷管法管道安装中的一些关键问题进行了研究。曹先凡等^[6]分析管道张力对卷管式铺管的影响。王立权等^[7]研究了管道材料参数和几何参数对校直曲率的影响程度。张九菊等^[8]得到了卷

收稿日期:2018-07-05

基金项目:国家 973 课题资助项目(2014CB046804);天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC21700)

作者简介:李 英(1975-),女,河北保定人,副教授,博士,从事海洋立管设计和水动力研究。E-mail:yingli2011@tju.edu.cn

管铺设中海管的最优弯曲率及海管截面上的残余应力分布规律,并提出了基于弹塑性理论的海管的残余曲率及残余应力的控制建议。廖洪千等^[9]对管道上卷屈曲影响因素进行了研究。

以前研究表明,卷管法将导致管道产生较大变形并可能发生局部屈曲。然而,局部屈曲的分析受限于管道和铺设设备之间复杂的相互作用,针对这个问题,有必要通过实时数值模拟获得管道的应力和应变。通过应用 ABAQUS 建立非线性有限元模型实时研究卷管法的整个过程分析管道的动态响应,并分析管道性能对环境载荷的敏感性,根据实时模拟中获得的管道应力和应变进行局部屈曲校核。

1 卷管法安装的力学问题

卷管铺设系统通常包括卷筒和安装下放系统,该系统的构成如图 1 所示。其中,安装下放系统由校准器、矫直器和张紧器组成。这些设备的几何特征和位置关系对管道安装时的受力有显著影响。

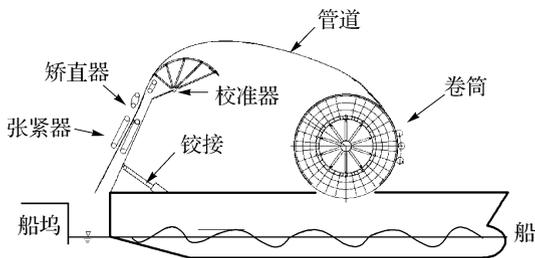


图 1 卷管安装系统

Fig. 1 Reel-lay system

整个安装过程一般分为两个阶段,即上卷阶段和安装阶段。上卷操作在船坞完成,铺管船与船坞的位置关系见图 1。在岸上完成焊接,检验和涂层等工作后,管道将通过张紧器和校准器的牵引力作用缠绕到卷筒上,在此过程中管道将产生塑性变形,图 2 为管道上卷阶段示意图。

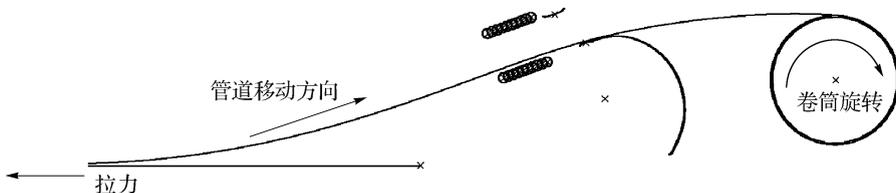


图 2 管道上卷阶段示意

Fig. 2 Reeling up of the pipe

而铺管船就位后,管道随卷筒反转而退卷,通过校准器时再次发生塑性弯曲,而后通过矫直器,矫直器提供反向弯曲应力,以消除其部分塑性弯曲;管道放入水中前,通过张紧器的轨道挤压管道以产生足够的摩擦力来限制管道中的拉力,图 3 为管道安装下放阶段示意图。

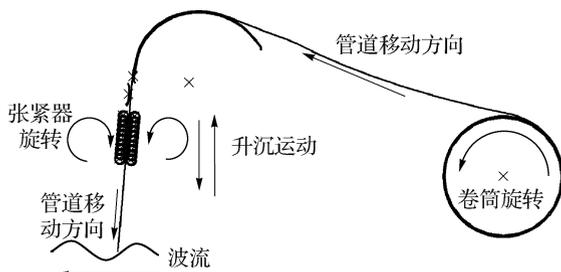


图 3 管道安装下放阶段示意

Fig. 3 Installation process of pipe with reel-lay method

卷管安装过程中涉及许多力学问题,如:研究铺管拉力,因其是卷管法重要的设备参数,且是影响铺管船应用管径范围的因素之一;在上卷阶段,管道承受巨大的弯矩,发生较大的塑性变形,极易造成局部屈曲破坏。首先将对目前工业界常用的方法进行简单介绍。

1.1 安装时管道受力估算

根据 Soheil^[2]提出的方法,在实际工程中,卷管安装上卷阶段管道的卷曲拉力、弯矩以及应变可以根据以下公式进行计算:

$$T_{\text{spooling}} = f_{\text{spooling}} \frac{M_p}{R_{\text{reel}}} \tag{1}$$

$$M_p = \frac{1}{6} \sigma_{y\text{-mean}} [D_{\text{pipe}}^3 - (D_{\text{pipe}} - 2t_{\text{pipe}})^3] \tag{2}$$

$$\varepsilon_{\text{nom}} = \frac{D_{\text{pipe}}}{2R_{\text{reel}} + D_{\text{pipe}} + 2t_{\text{coating}}} \tag{3}$$

式中: ε_{nom} 为管道应变; $D_{\text{pipe}}, t_{\text{pipe}}, t_{\text{coating}}$ 为管道的直径、壁厚和防腐层的厚度; $\sigma_{y\text{-mean}}$ 为平均屈服应力,一般认为 $\sigma_{y\text{-mean}} = SMYS + 50 \text{ MPa}$; f_{spooling} 为拉力系数,最小取为 1.5。

并且,Soheil 还提出卷管安装下放阶段管道的弯矩计算公式^[2]:

$$M_H = M_p (0.70 + \frac{0.3}{\alpha_h}) \tag{4}$$

其中, M_p 是由式(2)中计算出的卷曲力矩; α_h 是典型应变硬化因子, α_h 取 0.85。

1.2 局部屈曲

采用卷管法铺设管道时,易产生局部屈曲,为避免局部屈曲造成的影响,需要对管道进行校核。DNV 提供了校核局部屈曲的方法^[10]:

$$\varepsilon \leq \frac{1}{\gamma_\varepsilon \cdot \gamma_F \cdot \gamma_C} \cdot \frac{0.78}{\alpha_h^{1.5}} \left(\frac{t}{D} - 0.01 \right) \cdot \alpha_{\text{gw}} \tag{5}$$

式中: ε 为管道应变; γ_ε 为应变系数,对于低安全等级,取 2.0; γ_F 为功能载荷数,取 1.2; γ_C 为条件载荷影响系数,取 0.82; α_h 为应变硬化因子,对于 X65 钢, α_h 取 0.93;当 $D/t \leq 20$ 时,环缝焊缝系数 α_{gw} 取 1.0; t 和 D 分别为管道的壁厚和外径。

2 卷管安装有限元分析

应用 ABAQUS 非线性有限元软件实时模拟卷管安装的整个过程。管道构件尺寸及材料特性等见表 1。

管道材料为 X65 钢,有限元分析中均采用 Ramberg-Osgood 材料模型,其应力—应变的关系为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^\beta \frac{\sigma}{\sigma_y} \tag{6}$$

式中: ε 为应变; σ 为应力; E 为材料弹性模量; σ_y 为材料屈服应力; α 和 β 为材料常数,对于 X65 钢, $\alpha = 1.29, \beta = 25.58$ 。弹塑性材料的应力—应变关系曲线见图 4。

表 1 管道几何参数与材料特性

Tab. 1 Material parameters of the pipe

参 数	取 值
外径 D_o	323.9 mm
壁厚 t_{pipe}	17.5 mm
密度 ρ	7 800 kg/m ³
单位长度质量	132.23 kg/m
杨氏模量 E	207 GPa
泊松比 ν	0.3
屈服强度 σ_y	448 MPa
极限拉伸强度	531 MPa
α	1.29
β	25.58

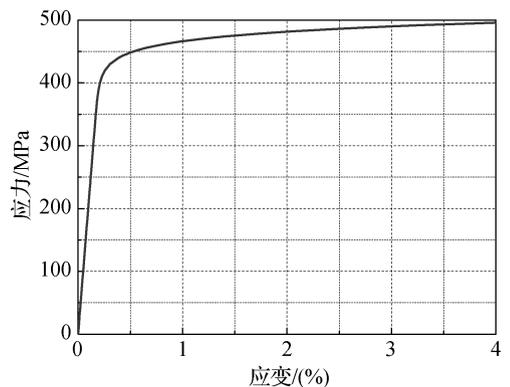


图 4 弹塑性材料应力—应变关系曲线

Fig. 4 Elasto-plastic material characteristic of the pipe

管道所处水深为 1 500 m,波高 H_s 为 1.23 m,波周期 T_p 为 5 s,其余水动力参数见表 2。

采用 Pipe31 单元模拟管道,为使缠绕至卷筒上的管道足够长以避免端部效应,将管道长度取为 250 m,单元长度设置为 0.5 m,共 500 个单元。本文未建立船体模型,仅在上卷阶段使用解析刚体平面模拟船坞,船体运动通过施加在设备上的位移边界条件进行模拟,且未对管道施加任何边界条件,仅对卷筒施加旋转角速度从而带动管道运动。根据设备的几何特征,使用 ABAQUS 中解析刚体单元建立校准器、矫直器、张紧器的有限元模型:使用半径变化的样条曲面建立校准器模型,其下端与轨道由离散刚体平面模拟;使用两端带圆弧倒角的解析刚体圆弧面模拟矫直器,倒角圆弧半径与其链轮半径相同;使用上下各 10 个等距布置的圆鼓模拟张紧器,利用圆鼓的旋转角速度控制管道的下放。

上述设备均位于安装下放系统上,其角度可通过液压立柱调整。因此,文中将张紧器及其轨道和矫直器与中心点建立铰接关系,以确保其相对位置不变。管道与设备之间的接触关系通过接触力和摩擦力进行模拟,其中接触力采用 ABAQUS 中的 tabular 接触。有限元模型示意如图 5 所示。

表 2 水动力参数

Tab. 2 Hydrodynamic parameters for pipe laying

参 数	取 值
水深/m	1 500
水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 025
流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.15
C_d	1
C_m	2
H_s/m	1.23
T_p/s	5
H_{\max}/m	2.28
T_{\max}/s	5.9

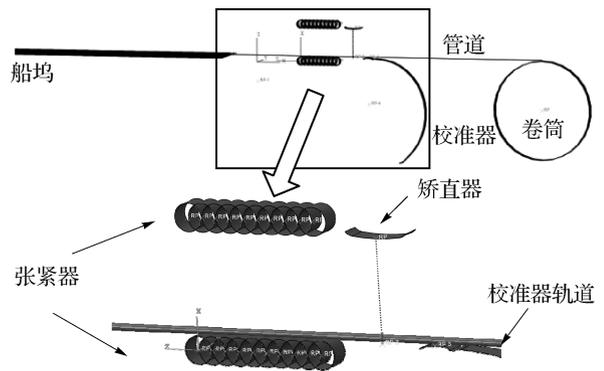


图 5 卷管有限元模型

Fig. 5 FE model of reel-lay

卷管安装的两个阶段均采用隐式动力分析。上卷阶段有限元分析中,将管道一端与卷筒中心点耦合,通过对卷筒施加角速度带动管道上卷。安装下放系统角度设定为 20° ,忽略摩擦系数及船舶运动,摩擦力通过在管道一端施加 1 000 kN 水平方向的拉力进行模拟。上卷阶段动力分析时长为 190 s。

为研究管道对海况条件和船体运动的敏感性,选取三种安装工况下的管道进行安装下放阶段的有限元分析,如表 3 所示。将安装下放系统的角度设定为 85° ,在模型的卷筒和张紧器圆鼓上施加角速度,通过张紧器圆鼓提供的摩擦力带动管道运动。波浪和海流通过 ABAQUS/AQWA 模块施加,安装下放系统的相对运动通过对中心点和张紧器圆鼓施加周期变化的位移来实现。安装下放阶段动力分析时长均为 260 s。

表 3 三种安装工况

Tab. 3 Environmental loads and lay ramp movement during pipe laying

工 况	波 流	船体运动
1	无	无
2	有	无
3	有	有

3 结果分析

3.1 上卷阶段结果分析

通过有限元分析,图 6 给出了上卷过程中管道沿管长方向的轴力,剪力和弯矩的分布图。其中 OA 段是位于船坞上的管道,AB 段为船坞和校准器间的管道,BC 段为校准器上的管道,CD 段为校准器和卷筒间的管道。如图 6 所示,AB 段管道由于重力和校准器轨道的支撑,前半段向下弯曲(最大弯矩 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}$),后半段向上弯曲(最大弯矩 $500 \text{ kN} \cdot \text{m}$),中间存在反弯点。通过校准器后,管道弯矩在重力作用下减小,而在接

近卷筒时迅速增大(最大弯矩约 750 kN·m)。结果表明,管道最大拉力出现于校准器和卷筒间的管段(CD 段),但是小于该船的许用拉力 200 kN。

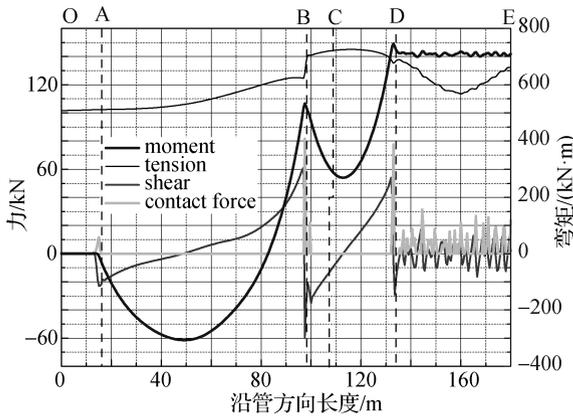


图 6 沿管长方向的轴力、剪力和弯矩分布图
Fig. 6 Distribution of tension, shear and bending moment along the pipe

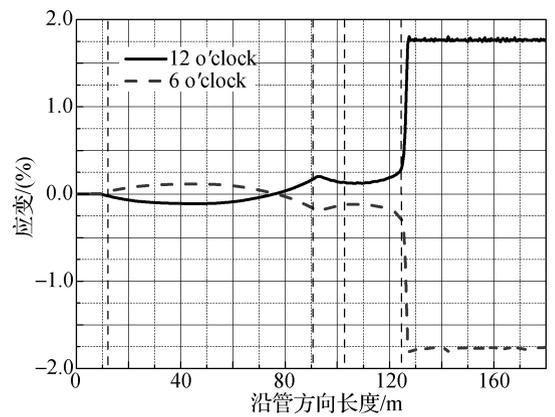


图 7 12 点方向和 6 点方向沿管道的应变分布
Fig. 7 Distribution of the strain along the pipe at 12 o'clock and 6 o'clock during pipe reeling

上卷过程中,管道缠绕至卷筒上形成绕环,规定绕环顶部方向为 12 点方向,底部方向为 6 点方向。图 7 给出了 12 点方向和 6 点方向沿管道的应变分布。如图 7 所示,管道接近卷筒时,由于塑性区域急剧扩展,管道应变急剧增大,且此时管道尚未与卷筒密合,缺乏有效的支撑和接触,极易发生局部弯曲。图 8 为沿管长方向的应力分布图。如图 8,管道靠近卷筒时弯矩达到最大值。因此,关键管段是管道与卷筒靠近但尚未密合的部分。

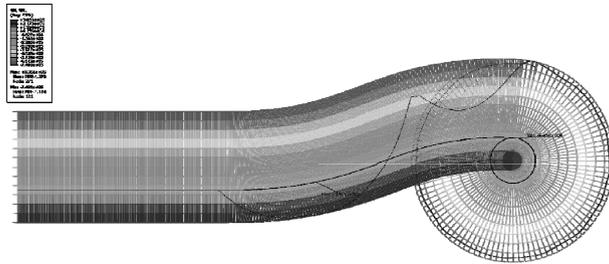


图 8 沿管长方向的应变图
Fig. 8 Distribution of bending moment during pipe reeling

根据 1.1 节公式计算管道的拉力与弯矩,将其结果与有限元分析所得结果进行对比,如表 4 所示。结果表明应变有限元分析结果小于理论值,这是因为按照公式计算时,假定管道全截面进入塑性,而实际中管道截面仅部分进入塑性,即理论值较有限元分析值相对保守。

表 4 拉力与弯矩

Tab. 4 Tension and bending moment of pipe during reeling

方法	$T_{spooling}/\text{kN}$	$M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\varepsilon_{nom}/(\%)$
公式计算	163.8	819.1	2.11
有限元分析	146.3	749.5	1.81

3.2 安装阶段结果分析

图 9 给出了三种工况下一个船舶运动周期($T=5.9\text{ s}$)内的轴力图。如图 9 所示,船舶运动对管道拉力有显著影响。若不考虑船舶运动,回拉力约为 150 kN;反之,则回拉力明显增大,并在 $t=T/2$ 时达到最大值 175 kN。在 $t=T/4$ 时,管道最大拉力,约为 430 kN,出现于矫直器和张紧器之间的管段。

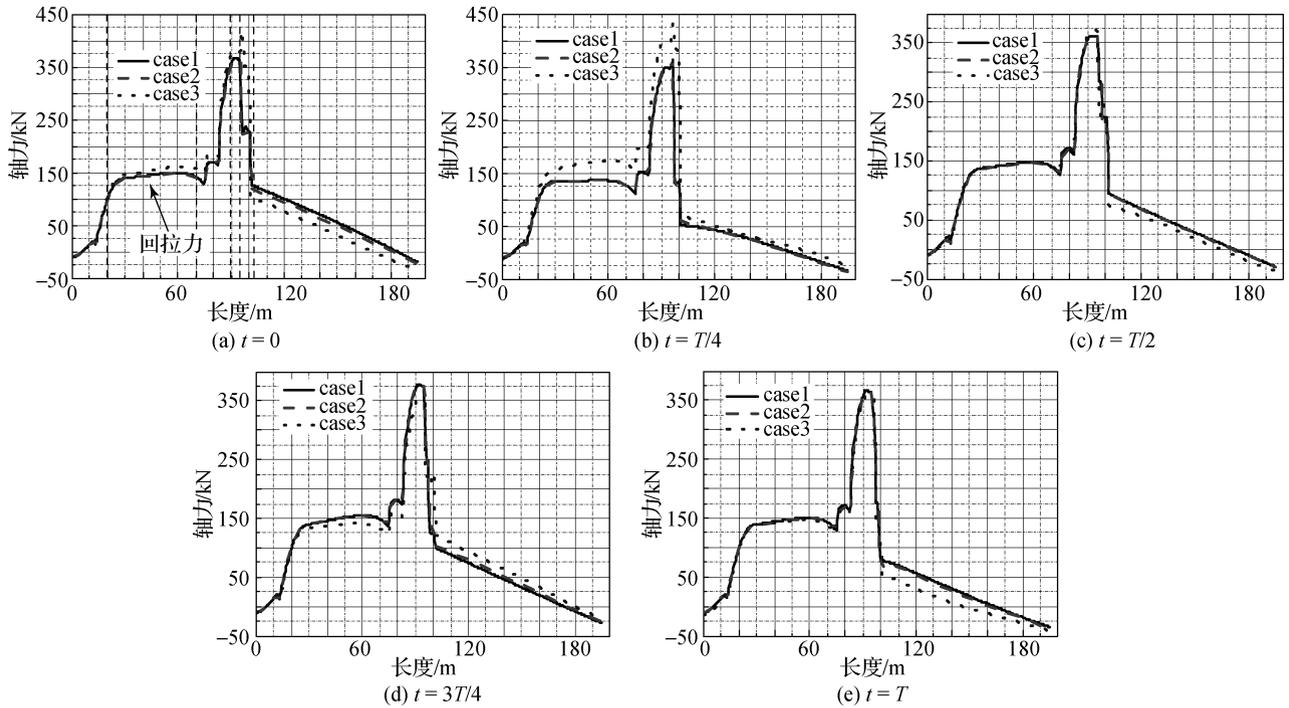


图 9 三种工况下的管道轴力图

Fig. 9 Axial force distribution along the pipe during installation in three scenarios

图 10 为三种工况下的弯矩—曲率曲线。如图 10 所示,海况与船舶运动对弯矩影响不大,表明弯矩大部分来源于管道与安装设备之间的接触作用。

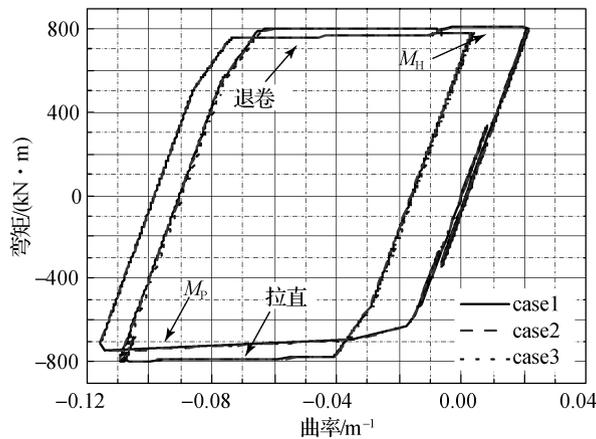


图 10 三种工况下的弯矩—曲率曲线

Fig. 10 Moment vs. curvature in three scenarios

根据规范公式计算安装下放阶段管道的弯矩与卷曲力矩,并与有限元分析结果进行比较,如表 5,弯矩高于卷曲力矩 6%左右。同时,有限元分析结果均小于理论值。

表 5 管道的卷曲力矩与弯曲力矩

Tab. 5 Reeling moment and straightening moment of the pipe

计算方法	$M_p / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_H / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$\Delta / (\%)$
公式计算	819.1	862.5	5.3
有限元分析	749.5	800.0	6.7

图 11 为三种工况下的应力—应变曲线。如图所示,环境载荷对应力—应变曲线几乎没有影响。图 12 为管道应力的时程变化曲线,管道于 $t=422.5$ s 时刻下放至水中,船舶运动对管道应力产生影响,但由于管道依然处于弹性阶段所以曲线亦几乎无变化。且由于 Bauschinger 效应,第二周期的应力应变迟滞曲线明显高于第一周期,卷管安装期间管道的累积应变约为 5.6%。

整个安装过程中的最大变形出现在上卷阶段。根据规范公式校核局部屈曲,局部屈曲临界值为 1.95%,而管道最大应变为 1.81%。结果表明,管道最大应变值低于临界值,故管道并未发生局部屈曲。

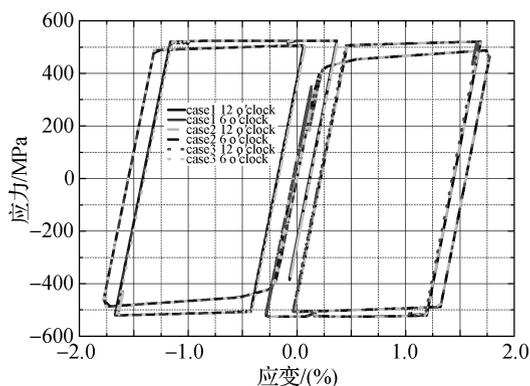


图 11 应力—应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve in three scenarios at 12 o'clock and at 6 o'clock

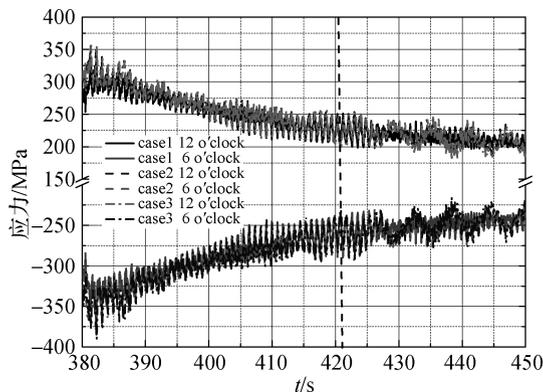


图 12 应力时程曲线

Fig. 12 Time history of stress in the pipe in three scenarios at 12 o'clock and at 6 o'clock

4 结 语

通过建立 ABAQUS 有限元模型,对卷管安装过程中的管道进行实时研究,分析了管道与设备之间的接触作用与环境载荷和船体运动对管道性能的影响,并对比了有限元分析所得结果与理论值。通过研究得到以下结论:

1) 卷管法中,上卷过程管道的最大拉力出现于校准器与卷筒之间的管段,最大弯矩出现于与卷筒接近密合的管段;安装下放过程管道的最大拉力出现于矫直器与张紧器之间的管段。

2) 环境载荷与船体运动对管道拉力影响显著,但对管道塑性变形和弯矩没有明显影响,表明大部分管道弯矩源自管道与安装设备之间的接触及摩擦。

3) 通过有限元分析获得的拉力、弯矩、应变等结果均小于根据规范公式计算所得结果,表明与有限元分析结果相比,理论值更为保守。

参考文献:

- [1] API-5L, Specification for line pipes[S]. American Petroleum Institute, 2004.
- [2] SOHEIL M. A discussion of practical aspects of reeled pipe[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Ocean. 2012; OMAE-83649.
- [3] SZCZOTKA M. Pipe laying simulation with an active reel drive[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(7): 539-548.
- [4] ERWAN K, HENK S, HELEN B. Extend reel-ability of HMC new aegir reeling vessel based on reliability based assessment and bending tests program[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Ocean. 2012; OMAE-83061.
- [5] MEISSNER A, ERDELEN P M, SCHMIDT T. Impact of reel-laying on mechanical pipe properties investigated by full and small-scale reeling simulations[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2012, 22(4): 282-289.
- [6] 曹凡, 秦延龙, 刘振纹, 等. 基于 Abaqus 的卷管式铺管的卷管过程仿真[C]//达索系统 2013 SIMULIA 中国区用户大会. 2013. (CAO X F, QIN Y L, LIU Z W, et al. Simulation on reel process of Reel-Lay pipeline based on Abaqus[C]//Dassault Systems 2013 SIMULIA User Conference in China. 2013. (in Chinese))

- bifurcated estuary[C]//Proceedings of the 18th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium (Part II). Beijing: Ocean Press, 2017:1157-1163. (in Chinese))
- [9] 吴明珠, 潘昀. 整治工程对概化分汊河口分流和分沙影响分析[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(1):166-171. (WU Mingzhu, PAN Yun. Analysis of the effects of remediation projects on the generalization of the split estuary and the separation of sand[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43(1):166-171. (in Chinese))
- [10] JIAO Z X, DOU X P, ZHENG J H, et al. Influence of spur dike on hydrodynamic exchange between channel and shoal of generalization estuary in physical model test[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(5): 624-630.
- [11] VAN D W M. Modeling morphodynamic evolution in alluvial estuaries[M]. CRCpress/balkema, 2010.
- [12] DAM G, WEGEN M V D, LABEUR R J, et al. Modeling centuries of estuarine morphodynamics in the Western Scheldt estuary [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(8): 10.1002/2015GL066725.
- [13] GUO L, WEGEN M V D, ROELVINK D, et al. Long-term, process-based morphodynamic modeling of a fluvio-deltaic system, part I: The role of river discharge[J]. Continental Shelf Research, 2015, 109: 95-111.
- [14] LU S, TONG C, LEE D, et al. Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, 120(9): 6445-6473.
- [15] RIJN L C V, NIEUWJAAR M W C, KAAJ T V D, et al. Transport of fine sands by currents and waves [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1993, 119(2): 123-133.
- [16] PARTHENIADES E A. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1965, 91(1): 105-139.
- [17] WINTERWERP J C. On the sedimentation rate of cohesive sediment [J]. Proceedings in Marine Science, 2007, 8: 209-226.
- [18] 缴健, 高祥宇, 丁磊, 等. 整治工程影响下分汊河口水动力变化研究 [J]. 海洋工程, 2019, 37(2): 76-83. (JIAO Jian, GAO Xiangyu, DING Lei, et al. Numerical modeling study of the hydrodynamical impact of the river regulation project in a bifurcated estuary [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(2):76-83. (in Chinese))

(上接第 41 页)

- [7] 王立权, 廖洪千, 李怀亮, 等. 深海卷管铺设中的管道安全性分析 [J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 80-86. (WANG L Q, LIAO H Q, LI H L, et al. Analysis on pipe safety during reel lay in deep sea [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 80-86. (in Chinese))
- [8] 张九菊, 段梦兰, 胡显伟. 卷管铺设的海管曲率模型及残余应力计算 [J]. 海洋工程, 2015, 33(3): 19-28. (ZHANG J J, DUAN M L, HU X W. Bending curvature model and calculation of residual stress of submarine pipe during reel-lay [J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(3): 19-28. (in Chinese))
- [9] 廖洪千, 王立权, 李怀亮, 等. 基于非线性环理论的管道上卷弯曲屈曲分析 [J]. 中国海上油气, 2016, 28(1): 126-132. (LIAO H Q, WANG L Q, LI H L, et al. Analysis on buckling performance of pipe in reeling based on nonlinear ring theory [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(1): 126-132. (in Chinese))
- [10] DNV-OS-F101, Dynamic risers[S]. Det Norske Veritas, 2012.