Numerical Simulation Analysis of Allowable Bending Moment of Offshore Pipeline

De Li, Guangsheng Yang, Mingtao Li, Zhongshan Wang, Chengbin Wang

China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei Email: lide@cppmde.com

Received: Jul. 15th, 2020; accepted: Aug. 13th, 2020; published: Sep. 15th, 2020

Abstract

As per standard "DNVGL-ST-F101 submarine pipeline systems", it can be presumed that when the concrete weight coating strain reaches (-) 0.2%, the concrete crushing occurs. This paper establishes the 3D model of offshore pipeline with concrete weight coating and based on the above-mentioned assumption builds the boundary condition. Numerical Simulation Analysis was carried out for the determination of the allowable bending moments of pipe joints with three different concrete thicknesses by using software ANSYS. The analysis results have some guidance for the offshore pipeline laying construction.

Keywords

Concrete Weight Coating, Offshore Pipeline, Allowable Bending Moments

海底管道许用弯矩数值模拟分析

李 德,杨光升,李明涛,王中山,王成斌

中国石油管道局工程有限公司国际事业部,河北 廊坊 Email:lide@cppmde.com

收稿日期: 2020年7月15日; 录用日期: 2020年8月13日; 发布日期: 2020年9月15日

摘要

根据标准 "DNVGL-ST-F101海底管道系统",可以假定当混凝土配重层应变达到(-) 0.2%时,混凝土发生破碎。本文建立了含混凝土配重层的海底管道三维模型并基于以上假设建立了边界条件,利用ANSYS 软件对三种不同混凝土壁厚管道的许用弯矩进行了数值模拟分析。分析结果对于指导海底管道铺设施工具有指导作用。

关键词

混凝土配重,海底管道,许用弯矩

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

海底管道(以下简称"海管")混凝土配重层为海管提供负浮力,防止海管在海底失稳,同时对海管起 起机械保护作用。海管铺设施工过程中受海管弯曲变形影响,混凝土配重层容易出现环向裂纹,主要表 现为垂直于管轴方向局部出现不同深度和宽度的裂纹,严重时裂纹延伸至整圈管壁,造成混凝土配重从 钢管上脱落,导致配重失效,并可能导致海管底拖施工时防腐层刮擦海底而受损,对海管铺设质量及后 期运行带来不利影响[1][2]。

本文以国外某在建海管项目为例,该项目技术文件要求对海管进行整管全尺寸轴向弯曲试验,以确 定混凝土配重层不发生断裂破坏的许用弯矩。项目所在国没有厂家能提供大管径(42")、高壁厚的混凝土 覆壁管进行弯曲试验,需在全球范围寻找合适资源进行此试验,考虑到高昂的费用和周期,参考 DNV 标 准规范要求,利用有限元软件 ANSYS 进行数值模拟仿真,计算该许用弯矩,并获得业主批准,节约了 时间和成本。

2. 海管物理模型

2.1. 海管接头

海管直径 42",单根长约 12 m,混凝土配重层分三种不同厚度规格,分别为 70 mm、80 mm、110 mm。 海管接头剖面示意图如下图 1 所示。



Figure 1. Offshore pipeline joint cross-section 图 1. 海管接头剖面图

2.2. 材料参数

海管钢管、3PPL防腐层、混凝土配重的材料参数分别如表 1、表 2、表 3 所示。

Table	1. Steel pi	pe parameter
表1.	钢管参数[3] [4] [5]

参数	单位	设计值	备注
材料		碳钢	
等级		DNVGL SAWL 450	
长度	m	12.2 ± 0.2	取 12.2 m
公称外径	mm	1066.8	D/t = 20.9
公称壁厚	mm	26.8	D/t = 39.8
杨氏模量	GPa	207	
泊松比		0.3	
屈服强度	Мра	450	总应变的 0.5%
强度极限	Мра	535	假定为总应变的 20%

Table 2. 3PPL Anti-corrosion coating 表 2. 3PPL 防腐层参数[6] [7]

参数	单位	设计值	备注
材料		3 LPP	
厚度	mm	5~8	取 5 mm
缩颈长度	mm	225	
杨氏模量	MPa		假设为 1.3 Gpa
泊松比			假设为 0.4
屈服强度	Mpa	≥20	取 20 Mpa

混凝土配重层参数[8] [9]			
参数	τ	单位	设计值	备注
材料	ŀ		混凝土	
厚度	Ę	mm	70/80/100	
缩颈长度		mm	375	
杨氏模量		GPa		取 33.274 Gpa
泊松比				取 0.2
台口坦中	单轴	Мра	≥ 40	取 55 Mpa
机压蚀度	双轴	Мра		取 1.1
单轴抗拉强度		Мра		取 0.1
粘接强度		Мра	≥0.5	取 0.5 Mpa
许用应变		%	-0.2	

依据标准 DNVGL-RP-F105, 混凝土杨氏模量与抗压强度成以下关系:

$$E_{co} = 10 (\sigma_{co} / MPa)^{0.33} GPa$$
 [10]

其中: E_{co} 为混凝土杨氏模量; σ_{co} 为混凝土压缩强度。

经计算, 混凝土配重层杨氏模量为 33.274 Gpa。

3. 海管许用弯矩理论计算

参考标准 DNVGL-ST-F101,在不考虑其他因素的前提下,第一次发生混凝土压裂时的平均过弯应变 取决于管道刚度、混凝土配重层的强度和厚度、轴向力和防腐层抗剪强度。在不考虑其他因素的前提下, 可假设混凝土破裂发生在混凝土中间层的应变(在混凝土中间层受压处)达到-0.2%时。根据线弹性理论, 海管许用弯矩可由以下公式(1)计算:

$$M = \frac{EI_{STEEL} + EI_{ACC} + EI_{CWC}}{D/2 + t_{ACC} + t_{CWC}/2} \varepsilon_{CWC}$$
(1)

其中: M 为海管许用弯矩; EI_{STEEL} 为钢的刚度值; EI_{ACC} 为防腐层的刚度值; EI_{CWC} 为混凝土配重层的刚 度值; D 为钢管弯矩; t_{ACC} 防腐层厚度; t_{CWC} 混凝土配重层厚度; ε_{CWC} 混凝土中间面的许用应变值。

根据表 1、表 2、表 3 中各参数值,分别计算三种不能壁厚混凝土配重层的许用弯矩值如下表 4 所示。

混凝土配重层厚度(mm)	混凝土许用应变值	许用弯矩(MNm)
70	-0.2%	13.39
80	-0.2%	14.11
110	-0.2%	16.44

 Table 4. Allowable bending moments based on liner elastic theory

 表 4. 基于线弹性理论的许用弯矩计算

4. 有限元建模及计算结果

4.1. 有限元网格划分及单元类型选取

由于海管具有轴对称性,文中有限元分析采用轴对称模型,取管道的 1/4 建模。约束对称面的法向 位移和旋转位移。 钢管采用二次壳单元,钢和防腐涂层采用分层壳单元,混凝土配重层采用独立壳单元,在90°扇形的圆周方向上布置10个节点,壳单元方向因子设置为2.0,有限元网格划分如图2所示。



Figure 2. FE mesh dividing 图 2. 有限元网格划分

4.2. 材料物理性能参数(表 5)

Table 5. Material properties 表 5. 材料属性

横截面	材料描述	材料本构模型	厚度上积分点数
钢	弹塑性	各向同性硬化的 Von-Mises 屈服准则	9
防腐层	弹性		3
混凝土	弹塑性	Drucker-pragerW/O 软化	9

4.3. 边界条件

采用刚性单元在管接头两端施加弯矩,不考虑其他负载。根据 DNV 标准 DNVGL-ST-F101,对于混凝 土配重层厚度大于 40 mm 的海管,当海底管道混凝土配重中间层压应变达到-0.2%时混凝土配重层破裂。

3LPP 防腐层与混凝土配重接触假定为粘结,允许混凝土配重层切向脱粘,且忽略混凝土滑动对海管 弯矩变化的影响。脱粘参数如下表 6 所示。

Table 6. Debonding properties 表 6. 脱粘参数

参数	值
最大法向接触应力	不考虑
完全脱粘时的接触间隙	不考虑
最大等效切向应力	0.5 MPa
完全脱粘时的切向滑动	1 mm
正压接触应力作用下的切向滑移	Included
稳定界面脱粘的人工阻尼系数	0.1

模型分析考虑材料非线性和脱粘效应。利用 ANSYS 进行模拟仿真。求解参数如表 7 所示。

参数	值				
大变形	Included				
载荷步大小	Automatic				
最大载荷步	0.01				

Table 7. FE solution parameter 表 7. 有限元求解参数

4.4. 有限元模拟结果与分析

Table 8	. Allowable bending moments based on non-linear FE simulations
表 8 . 基	于非线性有限元模拟的许用弯矩

混凝土 许用弯 的壁厚 矩 (mm) (MNm)	许田弯					压缩应变				
	钢			防腐涂层			混凝土配重层			
	(MNm)	内	中	外	内	中	外	内	中	外
70	11.7	-0.174	-0.179	-0.184	-0.184	-0.185	-0.186	-0.186	-0.2	-0.214
80	12.08	-0.172	-0.177	-0.182	-0.182	-0.183	-0.184	-0.184	-0.2	-0.216
110	13.25	-0.165	-0.171	-0.177	-0.177	-0.178	-0.179	-0.179	-0.2	-0.223

基于非线性有限元模拟的许用弯矩计算结果如上表 8 所示,结合表 4 中线弹性理论计算的结果进行 对比分析,知非线性有限元分析模拟计算的许用弯矩值低于线弹性理论计算的许用弯矩。许用弯矩应取 两者中的小者,故海管许用弯矩如表 8 中所示。

5. 结论及建议

结论:

本文基于混凝土配重层不发生压裂时的最大应变值这一边界条件建立有限元模型,分析了三种不同 壁厚的混凝土配重海管的许用弯矩,为海管施工中海管许用弯矩的参考依据。

建议:

施工中建议根据实际水深实时监控海管铺设张力,及时调整托管架的角度,增大铺管的半径,必要 时增加浮筒等设施,减少铺管的弯曲度,避免应力集中,对海管弯曲状态和实时弯矩值进行监控,防止 海管混凝土配重层产生裂纹甚至脱落。

参考文献

- [1] 杜中强,李昱坤,刘迟,等.海底管道混凝土配重层断裂原因分析及整改措施[J].石油工程建设,2006,32(1): 40-41.
- [2] 李昱坤. 海底管道混凝土配重涂敷设备与生产工艺[J]. 石油工程建设, 2005, 31(5): 26-28.
- [3] DNVGL-ST-F101: Submarine Pipeline Systems, Edition October 2017.
- [4] DNV 450 SAWL SDU.
- [5] BS EN 10204, Metallic Materials. Types of Inspection Documents.
- [6] DNV-RP-F106, Factory Applied External Pipeline Coatings for Corrosion Control.
- [7] ISO 21809-1, Petroleum and Natural Gas Industries-External Coatings for Buried or Submerged Pipelines Used in Pipeline Transportation Systems—Part 1: Polyolefin Coatings (3-Layer PE and 3-Layer PP).

- [8] DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems, October 2013.
- [9] ISO 21809-5 External Coatings for Buried or Submerged Pipelines Used in Pipeline Transportation Systems—Part 5: External Concrete Coatings.
- [10] DNVGL-RP-F105: Free Spanning Pipelines, Edition June 2017.