

水中悬浮管道的结构形式及受力特征分析

卢召红¹,高珊珊¹,于慧敏²,计静¹,闫亮¹,刘迎春¹

(1.东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318;2.中国石油 大庆石化公司,黑龙江 大庆 163714)

摘要:针对水中悬浮管道,提出其建造方式,并给出计算模型和计算方法。利用 Morison 公式计算作用在管体上的波浪荷载,计算分析管道在波浪力和水流力作用下的内力。借助 ANSYS 软件建立水中悬浮管道的有限元计算模型,运用 Airy 线性波浪理论计算水质点的速度和加速度,在此方法上计算管体的荷载和内力,与公式计算结果进行对比分析。结果表明,两者计算结果基本吻合,其误差在 2% 范围之内。

关键词:水中悬浮管道;内力;波浪力;Morison 公式

中图分类号:TE973

文献标识码:A

Analysis of structure and mechanical characteristic of submerged floating pipeline

LU Zhaohong¹,GAO Shanshan¹,YU Huimin²,JI Jing¹,YAN Liang¹,LIU Yingchun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Daqing Petroleum Institute, Heilongjiang Daqing 163318, China;

2. China Petroleum Daqing Petrochemical Co, Heilongjiang Daqing 163714, China)

Abstract: The construction method of submerged floating pipeline was proposed and its the calculation model and calculation method were given. The wave loads on the tube were calculated by the Morison formula, and the internal force of the pipeline under the action of wave force and flow force was calculated and analyzed. With the aid of ANSYS software, the finite element calculation model of the submerged floating pipeline was established. The speed and acceleration of water quality point were calculated by using Airy linear wave theory, the load and internal force on the pipeline were calculated. Comparative results show that the calculation results are basically consistent, and the deviations are within the controllable range, which can provide reference for the subsequent research and application.

Key words: Submerged floating pipeline; internal force; wave force; Morison formula

油气输送管道在遇到江海湖泊时,其穿越方式多采用水底管道或水上架空等方式。然而,海底铺设管道施工难度大、工程造价高、易与水底脱离形成悬跨节段,水上架空管道受风及外界影响作用大,存在影响环境等诸多问题。许多学者对此类问题展开了大量的研究工作,曾晓辉、刘春阁等采用摄动法对铺管船铺管时管道的受力进行研究分析^[1],提出海底管道铺设时管体的受力计算方法;李春,沙秋等对海底管道悬空造成的失效原

因进行评估分析,并提出了相应的失效消减措施^[2];余建星,马勇健等考虑涡激振动影响,提出了海底管道最大悬空允许长度^[3],避免悬空管道失效破坏;张文福,巨秀丽等提出悬索跨越式管道并对其抗风性能进行分析研究^[4]。水中悬浮管道,与水底输送管道相比,水中悬浮管道不会因局部与河床或海床脱离悬空而造成安全隐患,并且工程造价低,施工方法简单,使用期间维修检测方便,利于监控等。在水中油、气等管道输送中,尤

收稿日期:2016-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578120);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541068);大庆市科技计划项目(szdfy-2015-06)

作者简介:卢召红(1976-),男,山东临沂人,硕士,副教授,从事组合结构、混凝土结构方面的研究。

其在深海采油外输工程领域中,该体系将会得到广泛的研究和应用^[5]。本文提出水中悬浮管道的结构形式,并对其受力特征进行分析研究,计算管体所受主要荷载,简化计算模型,计算分析管体应力状态,为后续的研究应用奠定基础。

1 水中悬浮管道结构形式

水中悬浮管道的组成构件包括:在水面以下一定深度的管道、锚索、连接装置、抗拔桩、水岸构筑物等。在水平面以下,当管道的浮重比大于1时,用拉索和主索连接管道,主索与抗拔桩的连接来平衡剩余的浮力,以保证各悬浮管道的平衡,如图1(a)所示;当悬浮管道所受的浮重比小于1时,采用悬浮筒和水的浮力共同拖住管道以防止其下沉,主索与悬浮筒相连,拉杆与管道和主索相连,悬浮筒用拉索和主索与抗拔桩相连,见图1(b)。

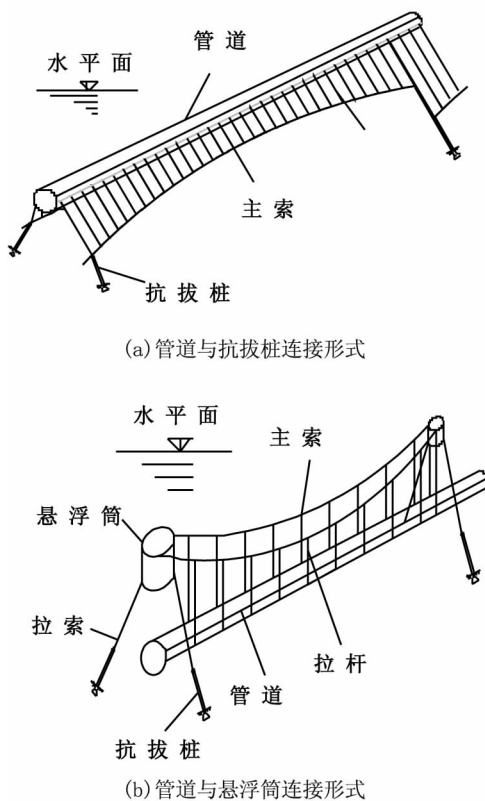


图1 水中悬浮管道结构形式

Fig.1 Structure composition of submerged floating pipeline

2 水中悬浮管道所受主要荷载计算方法

2.1 基本假定和计算模型

水中悬浮管道所处的环境比较复杂,主要受海流影响而产生的波浪力、水流力、涡流力及静水

压力等的共同作用^[6]。为简化计算分析作如下两点假定:(1)流体无粘性,不可压缩并且流动无旋转;(2)水流和波浪的作用相互独立,互不干扰^[7]。

根据悬浮管道在水中的布置情况,建立计算模型:每个管段上设有2对锚索,每对锚索共有2根,与管成约为15°角,如图2(a)所示。主缆(索)在延伸方向具有很大的刚性,且垂直于延伸方向,因刚度远小于管道的线刚度,故锚索与管道间的连接可简化为铰支座,将管道简化为简支梁,建立如图2(b)所示计算模型。

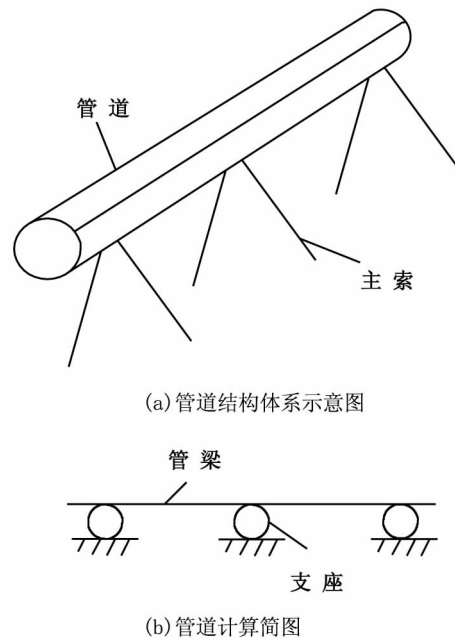


图2 悬浮管道计算模型

Fig.2 Calculation model of submerged floating pipeline

2.2 作用在管道上的波浪力计算

波浪力计算中常根据结构物的尺度与波长的比值分为小尺度波浪力计算和大尺度波浪力计算。当 $D/L \leq 0.2$ 时(其中 D 为外管道直径, L 为海水波长),称为小尺度物体;当 $D/L > 0.2$ 时为大尺度物体。本文提出的管径 D 一般不超过3 m,当在相对水深为 $d/L \geq 1/2$ 的深水区时,海水波长 L 为 $T^2g/2\pi$ m^[8-9]。作用在管道上的波浪力可按小尺度物体计算,因此采用 Morison 方程,总波浪水平力 $f(t)$ 可表示为拖拽力 f_1 和惯性力 F_D 之和^[10]:

$$f(t) = f_1(t) + f_D(t) = \frac{1}{4} C_M v \rho \pi D^2 + \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| \quad (1)$$

表1 水动力系数表

Tab.1 Table of hydrodynamic coefficient

Re	C_D	C_M	C_L
$< 5.0 \times 10^4$	1.3	2.0	1.5
$5.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$	1.3	2.0	1.5
$1.0 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^5$	$1.53 - Re/(3 \times 10^5)$	2.0	$1.2 - Re/(5 \times 10^5)$
$2.5 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$	0.7	$2.5 - Re/(3 \times 10^5)$	0.7
$< 5.0 \times 10^5$	0.7	1.5	0.7

波浪作用于管道上的垂直波浪力^[11]为:

$$f_L(t) = \frac{1}{2} C_L u^2 \rho D \quad (2)$$

式中: C_M 惯性力系数; v 为水质点的水平加速度, m/s^2 ; ρ 为海水密度, kg/m^3 ; D 为外管道的直径, m ; C_D 为阻力系数; u 为水质点的水平速度, m/s ; C_L 为浮托力系数。

在计算水平波浪力 $f(t)_{\max}$ 时, 因为 $f_1(t)$ 和 $f_D(t)$ 不在同一时间出现最大值, 可按以下方法进行计算。

当 $f_1(t)_{\max} < 2f_D(t)_{\max}$ 时:

$$f(t)_{\max} = f_D(t)_{\max} + f_1(t)_{\max} / (4f_D(t)_{\max}) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad f(t)_{\max} = f_D(t)_{\max} + f_1(t)_{\max} \quad (4)$$

取(3)式和(4)式中较小值, 当 $f_1(t)_{\max} \geq 2f_D(t)_{\max}$ 时:

$$f(t)_{\max} = f_1(t)_{\max} \quad (5)$$

系数 C_M 、 C_D 与雷诺数有关, 取值^[12]如表1, 表1中需要的雷诺数计算公式^[12]为:

$$Re = uD/r \quad (6)$$

式中: u 为水流的速度, m/s ; D 为外管道的直径, m ; R 为海水的运动粘度, 取 $1 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

2.3 作用在管道上的水动力计算

由于管道一般置于 30 m 以下, 水流可以近似看作一种稳定的平面流动, 因此可采用以下公式来计算作用在管道上的水动力值^[10]:

$$f_{DC} = \frac{1}{2} C_D \rho_w D v_{cmax}^2 \quad (7)$$

$$f_{LC} = \frac{1}{2} C_L \rho_w D v_{cmax}^2 \quad (8)$$

式中: f_{DC} 为水流引起的阻力; f_{LC} 为水流引起的浮托力; C_D 为阻力系数; ρ_w 为海水的密度, $1030 kg/m^3$; D 为圆形管的外直径, m ; V_{cmax} 为水流的最大可能速度, m/s ; C_L 为托浮力系数。

管道在水平方向和竖直方向总的受力分别为:

$$F_x = f_1(t) + f_{DC} \quad (9)$$

$$F_z = f_L(t) + f_{LC} + f - q \quad (10)$$

式中: f 为海水浮力; P 为管道单位长度重量。

2.4 计算弯曲应力

由于悬浮管道简化为简支梁, 可求出约束处的反力和管道各截面的内力, 根据各个截面上的内力可以计算出相应的应力值。先计算合弯矩值, 在计算弯曲应力值。

合弯矩计算公式:

$$M = \sqrt{M_z^2 + M_x^2} \quad (11)$$

最大弯曲应力:

$$\sigma = \left| \frac{M}{W} \right| \quad (12)$$

式中: W 为抗弯截面系数。

3 波流作用下悬浮管道的应力状态分析

借助 ANSYS 有限元数值分析方法, 建立悬浮管道的有限元计算模型, 并对其在波流作用下的应力进行计算, 将计算结果与简化模型应用理论公式计算的波流作用下应力状态结果对比分析。

3.1 有限元模型建立

pipe59 是一种可承受拉、压、弯作用的单元^[13-14], 单元的每个节点有 6 个自由度, 即沿 x 、 y 、 z 方向的线位移及绕 x 、 y 、 z 轴的角位移。Link10 是杆轴方向的拉压单元^[15], 单元的每个节点有 3 个自由度, 即沿 x 、 y 、 z 方向的平动。因此利用有限元软件 ANSYS 对悬浮管道建模进行受力分析, 采用 pipe59 单元模拟横截面相对长度很小的悬浮管道结构, 采用 Link10 单元模拟锚索与管道的铰接结构。这两种单元的结合能够模拟出海洋波浪和水流对管道的作用。Pipe59 单元使用参数如图 3。

不同波浪理论的适用范围主要受波高 H 、波长 L (或波周期 T) 和水深 h 控制, Airy 线性波浪理论适用于波陡很小 $\delta = H/L \ll 1$ 情况下。利用有限元软件 ANSYS 分析悬浮管道在波浪荷载作用下的受力分析, 进行参数设置时, 波浪理论选取

表 2 有限元法与理论法计算结果比较

Tab.2 Comparison of the results of the finite element method and theoretical method

作用力	最大挠度 f/mm		最大合弯矩 $m_{max}/(kN \cdot m)$		最大应力 δ_{max}/MPa	
	有限元法	理论法	有限元法	理论法	有限元法	理论法
波浪力和水动力 共同作用下	4.76	4.8	1.506	1.539	77.290	78.984
水动力作用下	0.139	0.137	0.5477	0.542	28.108	27.812
波浪力作用下	4.73	4.72	0.998	0.997	51.219	51.167

Airy 线性波浪理论^[16] 计算水质点的速度和加速度。

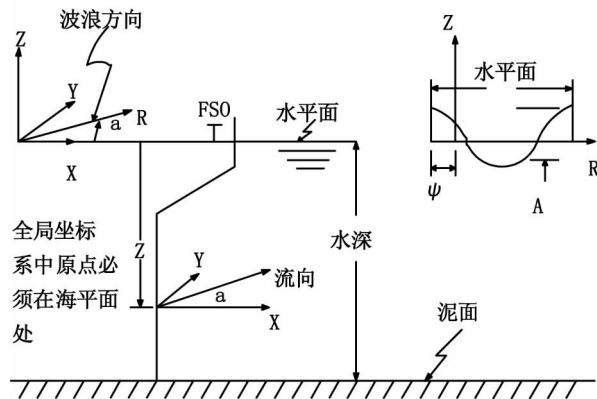


图3 pipe59单元使用参数

Fig.3 Parameter of pipe59

3.2 算例

某悬浮管道节间长 10 m, 钢构件, 钢管外直径 $D = 159 \text{ mm}$, 管壁厚度 $t_1 = 2 \text{ mm}$, 钢材屈服强 $f_y = 414 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比 $\nu = 0.29$, 密度 7850 kg/m^3 。

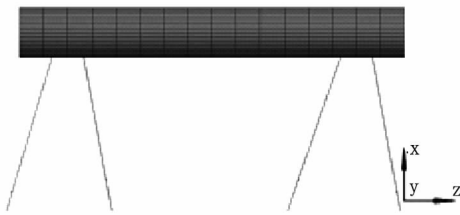


图4 悬浮管道的有限元模型

Fig.4 Finite element model of suspended floating pipeline

管道所处环境参数: 水深 40 m, 有效波高 5.2 m, 有效波周期 5.0 s, 海面流速 1.93 m/s, 中部流速 1.21 m/s, 底部流速 0.87 m/s, 海水密度为 1030 kg/m^3 , 波浪相位角取 57° 。由于管道直径相对于海水的深度很小, 可以忽略不计, 所以作用在管道上的海水流速取底部流速 0.87 m/s。悬浮管道有限元计算模型如图 4 所示, 用 pipe59 模拟管道和 link10 模拟索单元, 两者的连接是铰接, 索与

海洋底泥土连接为刚接。

用有限元法与理论公式法, 分别计算悬浮管道在波浪力与水动力共同作用下、水动力作用下和波浪力作用下的最大弯矩值、最大应力值和最大挠度值, 所得有限元法与理论法计算结果比较如表 2 所示。

从表 2 中看出管道在受到波浪力和水动力共同作用下的挠度、弯矩和应力值, 将有限元法计算结果与理论计算结果比较分析, 得出理论法计算结果与有限元法计算结果相对差异较大, 但符合工程需要。分析认为: 有限元计算时, 考虑到管道直径变化小时的速度变化和波浪力与水动力之间的相互影响, 将管道与拉杆(索)之间的连接简化为刚性铰支座, 忽略其竖向变形对计算结果都会带来较大误差。

4 结论

1) 与理论简化模型计算相比, 有限元计算时考虑到管道直径变化小时的速度变化和波浪力与水动力之间的相互作用影响, 导致两者之间结果存有误差; 此外, 理论简化方法将管道与拉杆(索)之间的连接简化为刚性铰支座, 与实际不完全相符, 也会导致计算结果存有误差。但最终两者计算结果误差较小, 满足工程需要。

2) 波浪力和水动力是作用在深水中悬浮管道的主要作用力, 其大小和作用方向对管道的应力状态有很多的影响, 水压力和涡流力对管道的影响较小, 可忽略不计。

参考文献:

[1] 曾晓辉, 刘春阁, 邢静忠. 海底管道铺设的力学分析[J]. 力学与实践, 2002, 24(2): 19-21.
 [2] 李春, 沙秋, 秦延龙, 等. 海底管道悬空风险及消减措施分析[J]. 中国造船, 2013(2): 406-412.
 [3] 余建星, 马勇健, 杨源, 等. 海底管道允许悬空长度计算研究[J]. 天津理工大学学报, 2014(1): 1-6.
 [4] 张文福, 巨秀丽, 张云峰, 等. 悬索跨越管道的风致疲劳损伤分析[C]// 崔京. 第 17 届全国结构工程学术会议

- 论文集.北京:工程力学杂志社,2008:591-592.
- [5]卢召红,闫亮,张光明,等.截面分层法计算不锈钢-混凝土-钢双壁管受弯承载力[J].河北工程大学学报:自然科学版,2015(4):11-14.
- [6]杨进,刘书杰,姜伟. ANSYS 在海洋石油工程中的应用[M].北京:石油工业出版社,2010.
- [7]麦继婷,杨显成,关宝树. 悬浮隧道在波流作用下的响应分析[J].铁道学报,2008(4):118-123.
- [8]景海泳. 平台式潮汐能发电结构水平波浪力工程计算[J].水利科技与经济,2012(12):21-24.
- [9]王广地,周晓军,高波. 水下悬浮隧道波流荷载分析研究[J].铁道建筑,2007(10):48-51.
- [10]哈勒姆. 海洋建筑物动力学[M].北京:海洋出版社,1981.
- [11]马良. 海底油气管道工程[M].北京:海洋出版社,1987.
- [12]仝兴华. 海底悬空管道的静力分析[J].油气储运,2006(1):21-26.
- [13]王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [14]于国有,林铺诗,杨源. 基于 ANSYS 深水海底管道铺设受力分析[J].中国造船,2012(5):145-152.
- [15]尚晓江,邱峰,赵海峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [16]张若京. Airy 方程的一个新解及其在流体线性稳定性分析中的应用[J].同济大学学报,1990(4):453-456.

(责任编辑 王利君)

(上接第 55 页)

表 4 中各段无应力长度,尚未考虑鞍座对主缆无应力长度影响等因素,为计算理论中的无应力长度。

4 小结

本文讨论了三塔自锚式悬索桥合理成桥状态的取得方法,明确了其主梁最小弯曲能量法的取值以及水平力相等时与刚性支承连续梁法的等价性,给出三塔自锚式悬索桥合理成桥状态的确定方法与步骤。然后,通过某实例三塔自锚式悬索桥,对该成桥状态确定方法进行验证,证明该方法能快速、合理地取得三塔自锚式悬索桥的合理成桥状态。

参考文献:

- [1]肖汝诚. 桥梁结构体系[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [2]逯东洋,肖汝诚,孙斌,等. 三塔自锚式悬索桥经济性研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2016,33(2):49-52.
- [3]张元凯,肖汝诚,金成棣. 自锚式悬索桥的概念设计[J].公路,2002(11):46-49.
- [4]GIMSING N J, GEORGAKIS C T. Cable supported bridges: concept and design[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [5]石磊,刘春城,张哲. 自锚式悬索桥挠度理论基础微分方程近似推导[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(12):1733-1735.
- [6]谭冬莲. 大跨径自锚式悬索桥合理成桥状态的确定方法[J].中国公路学报,2005(2):51-55.
- [7]胡建华. 大跨度自锚式悬索桥结构体系及静动力性能研究[D].长沙:湖南大学,2006.

(责任编辑 李军)