

流速分布及锚链自身刚度对弹性单锚链系统变形和受力的影响

郝春玲¹, 张亦飞¹, 滕斌², 徐伟¹, 赵海涛¹

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在锚链系统中, 锚链本身的刚度和水流对其作用是影响锚链变形和受力的主要因素。应用分段外推的数值方法, 分别对不同刚度和同一弹性锚链在均匀流作用以及同一弹性锚链在不同流速分布(流速在水深方向呈抛物线分布、对数分布)的水流作用下的变形和受力进行了分析和计算, 得出了锚链自身的不同刚度及不同流速对锚链的变形及受力的影响情况。结果表明, 刚度对锚链受力及变形影响明显, 不同流速分布对锚链的偏移量几乎无影响, 但对锚链的受力影响较大, 选取抛物线型流速分布对锚链安全有利。

关键词: 锚链; 刚度; 流速分布

中图分类号: P751 **文献标识码:** A

近年来, 随着海洋资源开发的深入, 海上浮桥、浮码头、移动式海洋石油钻井采油平台等海上浮体结构物的应用日渐增多。这些浮体结构物的海上定位主要依靠锚链系统的约束作用, 因此, 对锚链系统的受力和变形特性的研究非常重要^[1]。

Reba 和 Hebert 等^[2]依据悬链线理论推导了单锚链在发生水平、垂直位移时锚链张力和位移之间的关系; 于定勇^[3]采用集中质量法对水下锚泊单锚链进行了系统动力分析。在锚链系统中, 锚链本身的刚度和水流力是影响锚链变形和受力的主要因素, 而水流力的大小又直接取决于流速分布。现有的一些研究大多将流速分布简化为均匀流或呈抛物线分布。而在实际海洋环境条件下, 流速分布比较复杂。因此, 研究锚链本身的刚度及不同流速分布对锚链变形及受力特性的影响具有实际工程意义。

1 基本方程的建立

考虑底端固定于海底、顶端与一漂浮体结构物相连的单锚链(图1)。当受到水流作用时, 浮体结构物将偏离平衡位置, 并对锚链施加一拉力。在锚链上任取一微段, 可得这一微段在工作状态时的受力图(图2)^[4]。

收稿日期: 2005-08-31

作者简介: 郝春玲(1973—), 女, 黑龙江甘南县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋工程规划、设计和研究工作。

建立静态平衡方程, 得:

$$(T+dT)\cos d\theta - T - Pds \sin\theta + F(1+\epsilon)ds = 0 \quad (1)$$

$$(T+dT)\sin d\theta - Pds \cos\theta - D(1+\epsilon)ds = 0 \quad (2)$$

式中: T 为锚链受到的拉力; P 为单位长度锚链的质量与浮力的差值; θ 为拉力 (T) 与水平方向的夹角; D 和 F 分别为单位长度上锚链所受的垂直和切向水流力; ds 为锚链微段的长度; dT 和 $d\theta$ 分别为拉力和角度的变化量; ϵ 为锚链单位长度的伸长量, 定义为

$$\epsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{T}{EA} \quad (3)$$

式中: S 为锚链的长度; ΔS 为锚链的伸长量; E 为锚链的弹性模量, A 为锚链的等效横截面积。

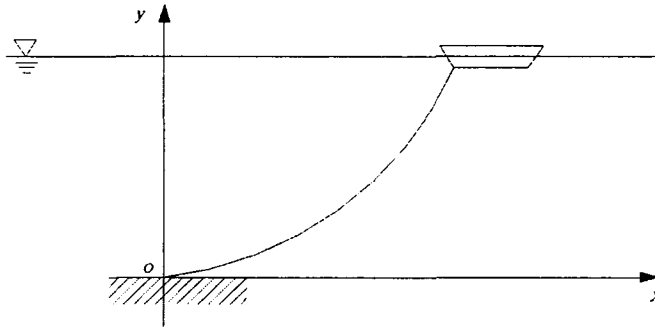


图 1 锚链示意图

Fig. 1 Sketch map of the mooring cable system

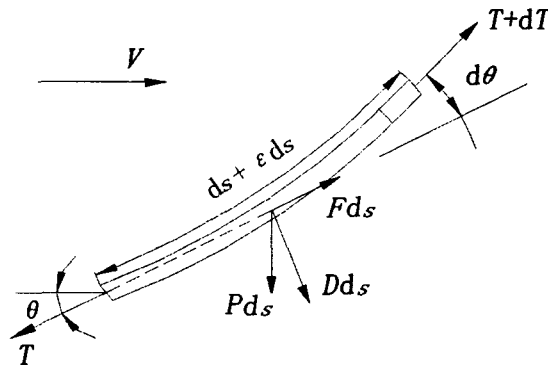


图 2 锚链上任意一微段 ds 的受力图

Fig. 2 Forces on a cable segment

忽略二阶小量后, (1)、(2) 式可写为

$$\frac{dT}{ds} = P \sin \theta - F(1 + \epsilon) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{T} [P \cos \theta + D(1 + \epsilon)] \quad (5)$$

(1)、(2) 式中 D, F 按下列公式来计算:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_{DN} dV^2 \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho \gamma C_{DN} \pi dV^2 \cos^2 \theta \quad (7)$$

式中: V 为水流速度; C_{DN} 和 γC_{DN} 分别为法向和切向阻力系数; ρ 为水的密度。(4)、(5) 式为所要求解的控制方程。按几何关系可以得到:

$$dx = (1 + \epsilon) \cos \theta ds \quad (8)$$

$$dy = (1 + \epsilon) \sin \theta ds \quad (9)$$

根据 (8)、(9) 式可以求出锚链上任意一点的坐标值 (x, y) 。

2 微分方程的求解

对于静水中的锚链系统, 上述微分方程可采用解析方法求解。但当锚链受到水流的作用时, 解析解很难找到。本文采用分段外推的数值方法求解锚链在不同工况下的变形与受力特征。

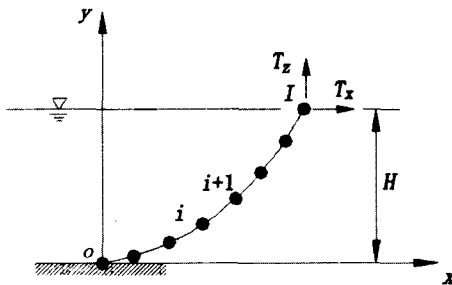


图 3 锚链划分单元图

Fig. 3 Chart of distribution of elements

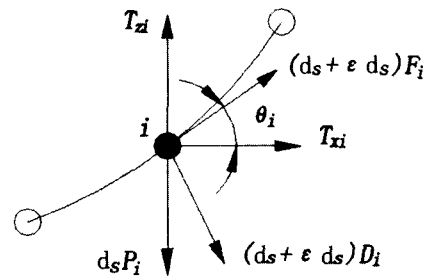


图 4 单元受力图

Fig. 4 Chart of force situation of elements

如图 3 所示, 取锚链和海底相交处为坐标原点 (O) , 并将锚链分成若干个单元, 各单元质量及外荷载均集中在单元的中心上, 作用于单元中心的外荷载有水流力和重力^[5]。对任意单元 i 进行受力分析 (图 4), 根据 (4)、(5) 式可得到单元 i 上有下面的平衡方程:

$$T_{xi+1} = T_{xi} - F_i \cos \theta_i (ds + \epsilon ds) - D_i \sin \theta_i (ds + \epsilon ds) \quad (10)$$

$$T_{zi+1} = T_{zi} - F_i \sin \theta_i (ds + \epsilon ds) + D_i \cos \theta_i (ds + \epsilon ds) + P_i ds \quad (11)$$

$$T_{i+1} = \sqrt{T_{xi+1}^2 + T_{zi+1}^2} \quad (12)$$

$$x_{i+1} = (ds + \epsilon ds) \cos \theta_i + x_i \quad (13)$$

$$y_{i+1} = (ds + \epsilon ds) \sin \theta_i + y_i \quad (14)$$

式中: T_{xi} 、 T_{xi+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 单元的水平张力; T_{zi} 、 T_{zi+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 单元的竖直张力; F_i 、 D_i 、 F_{i+1} 和 D_{i+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 单元的切向和垂向单位长度的水动力, 以上公式可以变换成下面的形式:

$$T_{xi} = Q_x - \sum_{k=1}^i F_{(x,k)} \quad (15)$$

$$T_{zi} = Q_z - \sum_{k=1}^i (F_{(z,k)} - P_k) \quad (16)$$

$$T_i = \sqrt{(Q_x - \sum_{k=1}^i F_{(x,k)})^2 + [Q_z - \sum_{k=1}^i (F_{(z,k)} - P_k)]^2} \quad (17)$$

式中: Q_x 、 Q_z 为锚链第一个单元受到的拉力在 x 、 y 方向的分量; F 为水动力。

在上述方程的求解过程中采用了迭代法计算, 具体计算步骤如下: (1) 已知锚链顶点高度 (H)、锚链顶端水平拉力 (T_x)、水流流速随水深的分布规律; (2) 把锚链分成若干个单元; (3) 假设锚链顶端切线与水平方向的夹角为 θ ; (4) 计算每个单元所受的重力和水动力; (5) 根据式 (13)、(14) 和 (17) 式求出锚链上各点的坐标值 (x , y) 和各段的受力 (T); (6) 最后验证水深边界条件 (也就是最后一点坐标 $y=H$, H 为水深), 如果满足这个边界条件, 则计算结束; 否则将返回步骤 (3), 调整锚链顶端切线与水平方向的夹角, 重复计算, 直到满足精度要求时结束计算。

3 算例及分析

利用以上的数值模型, 分别对以下两种情况锚链的受力及变形进行计算。

算例 1 锚链用于固定海洋浮体结构, 结构物给锚链施加的水平拉力 $T_x=15$ kN, 水深为 20 m, 均匀流, 流速 $V=1.2$ m/s, 垂向阻力系数 $C_{DN}=1.2$, 切向阻力系数 $\gamma C_{DN}=0.02 \times 1.2=0.024$, 锚链长 59.2 m, 锚链单位长度的质量与浮力的差值为 $P=7.796$ kg/m³, 锚链直径为 38 mm, 锚链的弹性模量 (E) 分别取 2×10^{11} Pa 和 2×10^8 Pa。

图 5 为锚链的受力及变形计算结果, 图 5 (a) 中横坐标为锚链的长度 (x), 纵坐标为水深 (y); 图 5 (b) 中横坐标为锚链长度 (x), 纵坐标为锚链受力 (T)。从图 5 中可以看出, 当锚链柔性较大时, 在水流的作用下锚链有明显的伸长, 也就是锚链的偏移量较大, 随着锚链柔性的增大锚链的张力减小。

算例 2 锚链用于固定海洋浮体结构, 结构物给锚链施加的水平拉力 $T_x=15$ kN, 水深为 20 m, 水流流速呈 3 种不同的分布: (1) 均匀流, 流速 $V=1.2$ m/s; (2) 抛物线分布, 即 $V=ky^2$, 平均流速 $V=1.2$ m/s; (3) 对数分布, 即 $V=k_1 \ln(\frac{y}{H}+1)$, 平均流速 $V=1.2$ m/s。垂向阻力系数 $C_{DN}=1.2$, 切向阻力系数 $\gamma C_{DN}=0.02 \times 1.2=0.024$, 锚链长为 59.2 m, 锚链单位长度的质量与浮力的差值为 $P=7.796$ kg/m³, 锚链直径为 38 mm, 锚链的弹性模量 (E) 取 2×10^8 Pa。

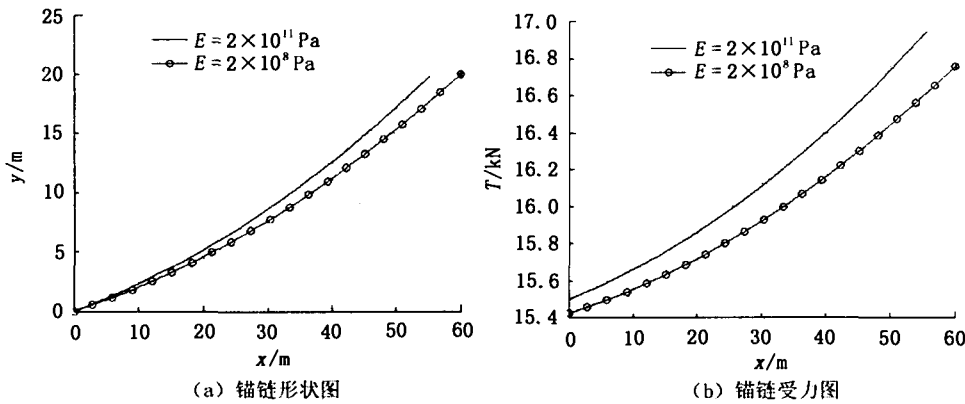


图5 锚链刚度不同时锚链形状及受力图 ($V=1.2\text{ m/s}$)

Fig. 5 Shapes and force situation of mooring lines of different stiffness ($V=1.2\text{ m/s}$)

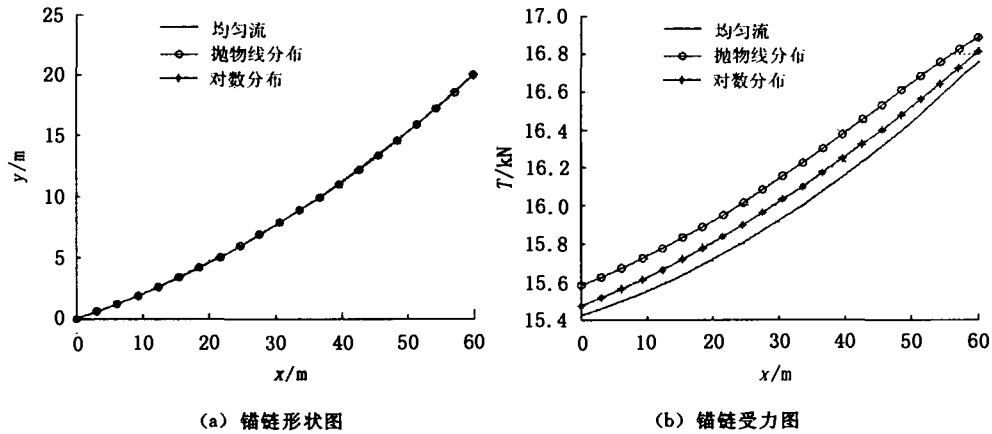


图6 不同流速分布形式的结果比较 ($E=2\times 10^8\text{ Pa}$ 时、质量均匀、已知锚链长)

Fig. 6 Shapes and force situations of mooring lines at various distribution of current velocity in y-direction ($E=2\times 10^8\text{ Pa}$, even cable and given length)

图6为锚链受力及变形计算结果,图6(a)中横坐标为锚链的长度(x),纵坐标为水深(y);图6(b)中横坐标为锚链的长度(x),纵坐标为锚链的受力(T)。从图6中可以看出,当锚链的刚度不变时,不同流速分布对锚链顶端偏移量几乎无影响,而锚链受力的影响则明显一些,流速呈抛物线分布时锚链受力最大,流速呈对数分布时锚链受力居中,而均匀流情况下锚链受力最小。

4 结语

本文应用分段外推法分别对不同刚度的锚链在均匀流作用下及弹性锚链在不同流速分布条件下进行了静力分析。通过数值计算得到如下规律,可供工程设计和进一步研究时参考。

(1) 刚度对锚链受力及变形影响明显, 伸长量随锚链自身刚度的增大而减小, 锚链受力随其刚度的增大而增大。

(2) 不同流速分布对锚链的偏移量几乎无影响。

(3) 不同流速分布对锚链的受力影响较大, 流速呈抛物线分布时锚链受力最大, 均匀流作用下锚链受力最小, 流速呈对数分布时锚链受力居于两者之间。

通过以上计算可知, 流速分布对锚链的受力影响较大; 在进行锚链受力计算时, 选取抛物线型流速分布对锚链安全较有利。

参考文献:

- [1] 陈徐军, 崔维成, 沈庆. 对称式布置锚链系统的线性化处理 [J]. 海洋工程, 2002, 20 (1): 75~79.
- [2] Korkut M D, Hebert E J. Some Notes on Static Anchor Chain Curves [M]. OTC 1160, 1970.
- [3] 于定勇. 水下锚泊系统计算 [J]. 青岛海洋大学学报, 1995, (增刊): 100~105.
- [4] 滕斌, 郝春玲, 韩凌. Chebyshev 多项式在锚链分析中的应用 [J]. 中国工程科学, 2005, 7 (1): 21~26.
- [5] 郝春玲, 滕斌. 不均匀可拉伸单锚链系统的静力分析 [J]. 中国海洋平台, 2003, 18 (4): 18~21, 33.

Analysis of elastic single mooring cable system with different elasticity and velocity distribution

HAO Chun-ling¹, ZHANG Yi-fei¹, TENG Bin², XU Wei¹, ZHAO Hai-tao¹

(1. *Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China*; 2. *The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: The elasticity of mooring cable and velocity distribution of the flow are two main factors to affect the behaviors of mooring cable system in marine environment. The piecewise extrapolating method is employed to solve the equation of elastic mooring cable for the different elasticity with the same current velocity distribution and the same elasticity with the different current velocity distribution including uniform current, parabola and logarithm velocity distribution etc. And some corresponding results are obtained by analysis. The results show that the elasticity of the cable has obvious effect on its force and distortion. The change of velocity distribution of the flow has little effect on the excursion of the cable, but affects the force of the cable obviously. Considering the safety of the cable, it's better to use logarithm velocity distribution in computation.

Key words: mooring cable system; elasticity; velocity distribution