



趸船-锚链体系非线性有限元分析

李亚, 程泽坤

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 提出便于工程设计应用的趸船-锚链体系非线性有限元模拟方法, 可考虑锚链的几何大变形特征以及锚链-泥面接触行为。根据拟静态分析方法, 给出具体计算流程, 可对水位变动、外荷载作用下趸船-锚链体系的受力和位移进行求解。通过对某海事局工程实例进行分析, 验证了计算方法的可行性和工程应用价值。

关键词: 趸船-锚链体系; 非线性有限元; 几何大变形; 接触; 拟静态

中图分类号: U 656.1⁺17

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)12-0064-04

Numerical analysis of pontoon-chain system based on nonlinear FEM

LI Ya, CHENG Ze-kun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The nonlinear Finite Element Method (FEM), which is convenient for engineering applications to the pontoon-chain system, is introduced to simulate the large deformation and contact behavior with mud plane for mooring chains. According to the calculation flow given, quasi-static analysis can be carried out to get the displacement and tensile force of pontoon-chain system under external load with water level variation. A practical case, a floating yard of the MSA somewhere, is analyzed to validate the applicability and practical value of the method presented.

Keywords: pontoon-chain system; nonlinear FEM; large deformation; contact; quasi-static

趸船-锚链体系为一种常见的浮码头形式。由于趸船-锚链体系为柔性张力结构, 趸船位置在水位变动或环境荷载作用下变幅较大, 而且锚链也会与泥面接触或脱离, 导致无法利用简化解析计算方法对结构体系进行求解。目前, 对于锚泊系统的研究主要集中在波浪作用下结构体系的响应问题^[1-3], 基本未考虑锚链-泥面接触这一强非线性特征; 对于实际中常见浮码头中的趸船, 趸船甲板上常建有两三层楼高的甲板室(用于生活或办公, 比如海事部门常用趸船), 风荷载作用较大, 仅对波浪作用情况进行分析过于局限; 当前多数研

究对于波浪力求解采用了较为简单的位势理论, 也难以从物理机制方面准确反映波浪与结构体系之间复杂的耦合作用。在实际工程设计中, 波浪力、风荷载等外荷载主要根据国家或行业规范公式进行计算, 规范公式是结合了工程经验或相关试验的半理论公式, 便于工程设计应用。本文基于非线性有限元理论, 提出趸船-锚链体系的有限元模拟方法, 通过考虑锚链的几何大变形和接触特性, 可对结构体系进行拟静态分析; 在依据规范公式给定外荷载的情况下, 可以计算得到水位变动情况下的锚链张力和趸船位移, 具有较高的工程应用价值。

收稿日期: 2015-05-22

作者简介: 李亚(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工结构与数值计算工作。

1 趸船-锚链体系有限元模拟方法

1.1 悬链线方程

趸船-锚链体系中锚链形状可根据悬链线理论确定, 悬链线方程为^[4-5]:

$$y = C \operatorname{ch} \frac{x}{C} - C \quad (1)$$

其中, C 为常数, 定义为:

$$C = T_0/q \quad (2)$$

悬链线的张力大小为:

$$T = T(x) = T_0 \sqrt{1 + y'^2} = T_0 + qy \quad (3)$$

式中: q 为悬链单位长度自重; T_0 为链上张力的水平分量。计算中, 锚链形态应满足悬链线方程。

1.2 非线性有限元建模

趸船-锚链体系为柔性张拉结构, 锚链在荷载作用下一般处于小应变、大变形状态, 呈现几何非线性特征。有限元模拟时应采用能够考虑几何大变形的杆单元对锚链进行结构离散^[6-7], 此类单元主要利用虚位移原理形成单元表达式, 平衡方程中考虑了单元内力引起的几何刚度, 即应力刚化 (stress stiffening) 现象。在几何大变形问题非线性数值求解中, 采用牛顿-拉普森迭代法来求解其增量方程。

锚链在运动过程中会与海底泥面发生接触或脱离, 通过设置接触单元 (contact element) 来模拟接触或脱离特性, 接触为强非线性特性。在有限元建模中, 对锚链有限元节点, 需使其满足一定的接触约束条件。图 1 中, π 平面为假想泥面, 点 Q 为锚链上某节点, Q' 为 Q 在海底泥面上的投影点, 点 Q 和 Q' 构成一组接触对 (contact pair), 点 Q 和 Q' 之间可以脱离或者接触, 两点之间的接触条件为: 法向接触刚度 $F_n = \infty$, 切向接触刚度 $F_t = 0$ 。

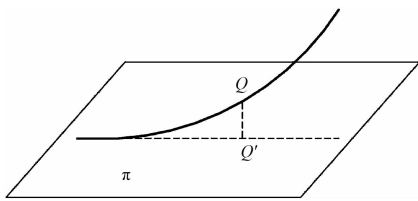
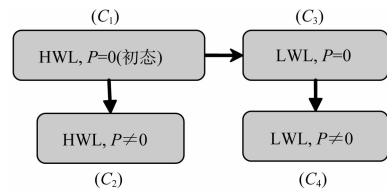


图 1 接触条件

1.3 拟静态有限元计算流程

趸船在设计高水位 (HWL) 时张拉就位, 形成初始张力状态; 水位降低时, 锚链位置、变形以及受力发生改变, 需要重新进行找形计算。本文采用拟静态方法模拟趸船位置随水位的变动, 首先利用刚体位移将相关模型牵引至目标水位, 然后释放多余约束并进行找形分析, 即可得到设计低水位 (LWL) 时锚链受力状态。计算流程见图 2, 包括 $C_1 \sim C_4$ 共 4 个计算步, 计算路径为两条: $C_1 \rightarrow C_2$, $C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$ 。如初态计算步 C_1 残余位移过大或最终计算步得到的锚链张力 (或趸船位移) 不满足相关规范要求, 应重新设定锚链预张力或重新布置锚链, 返回 C_1 再次迭代计算, 直至满足要求。



注: P 代表外荷载。

图 2 计算流程

2 工程实例

2.1 工程简介

沿海某海事局监管基地码头采用钢趸船浮码头形式。船型尺寸为: 船长 60 m、船宽 11 m、型深 2 m、吃水 0.85 m。水位条件为: 设计高水位 5.40 m、设计低水位 0.49 m。锚泊系统包括 1# ~ 6# 共 6 根锚链, 其中 3 根 (4# ~ 6#) 连接于岸侧固定式码头结构上, 另外 3 根 (1# ~ 3#) 通过置于海底的锚块系锚。锚链规格: M3 级、链径 56 mm, 拉断力为 2 430 kN, 单位长度的质量为 68.68 kg/m。锚链几何布置见图 3, 锚链初始状态参数见表 1。锚链初始张力值基于工程经验进行预先假定, 但是所设定的锚链初张力和角度必须使趸船处于初始受力平衡状态, 同时使得整个结构体系具有足够的刚度抵抗外荷载引起的结构变位, 如最终计算结果不能满足设计要求, 需要重新设定锚链初始参数再次计算。

表1 锚链初始状态参数

锚链编号	锚链末端锚固点高程 H/m	锚链平面投影长度 L_0/m	锚链方位角 $\theta/(^\circ)$	悬链最高与最低点高差 $\Delta h/m$	预设初张力 T/kN	张力水平分量 T_0/kN	悬链线辅助函数 C	悬起部分锚链曲线长度 L_s/m
1 [#]	-3.90	100.00	315.0	8.45	178.69	173.63	289.86	70.50
2 [#]	-3.90	100.00	0	8.45	155.06	150.00	250.42	65.60
3 [#]	-3.00	100.00	45.0	7.55	168.72	164.20	274.12	64.78
4 [#]	4.70	29.13	129.4	0.15	247.57	247.37	412.96	28.98
5 [#]	4.70	21.78	211.9	0.15	150.25	150.00	250.42	26.20
6 [#]	4.70	26.16	225.0	0.15	150.19	150.00	250.42	21.67

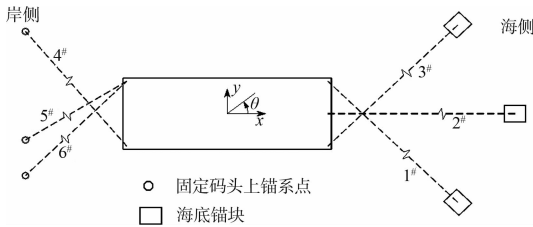


图3 锚链布置

2.2 设计荷载工况和 FEM 模型

根据使用要求,趸船-锚链体系应能承受强风、波浪和水流共同作用下的极端荷载。极端情况下,本工程所在海域波高 $H_w = 1.65\text{ m}$ 、流速 $v = 0.5\text{ m/s}$ 、最大风速 30 m/s ,作用于趸船的合力为:横向力 793 kN ,纵向力 249 kN 。本文主要验算此情况下趸船-锚链体系的受力情况。

计算软件采用 Ansys13.0。锚链采用 Link180 单元进行离散,单元仅考虑受拉属性,并考虑其大变形特性;为减小计算量,仅在锚链末段可能与海底泥面接触部分设置接触单元来模拟其与泥面的分离或接触状态;由于趸船底部边界为水,采用弹簧单元建立底部约束。有限元模型见图4。

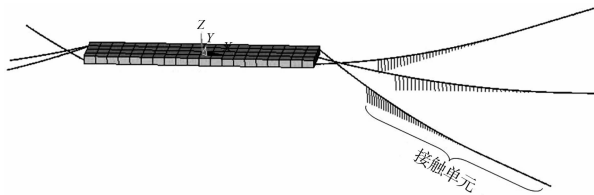


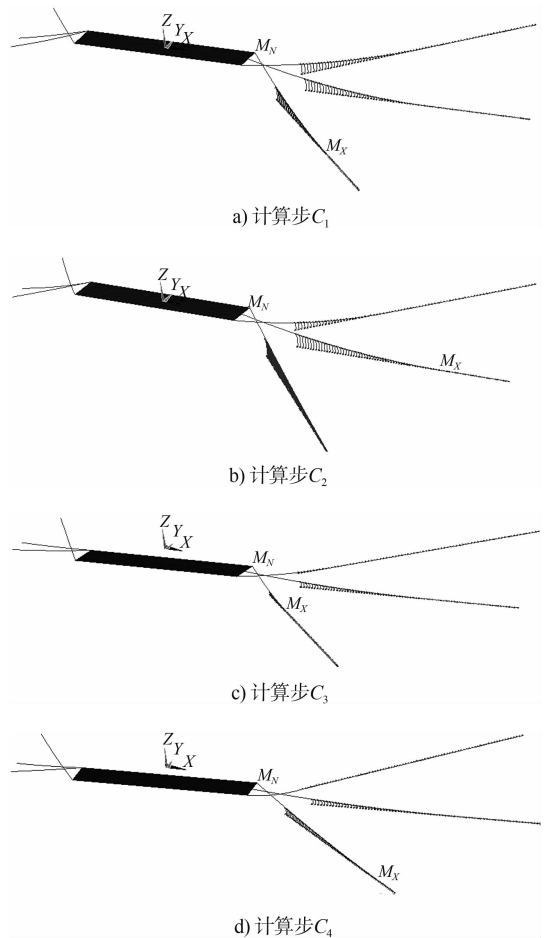
图4 有限元模型

2.3 FEM 计算结果

按照两条计算路径对 $C_1 \sim C_4$ 计算步进行有限元分析,得到锚链张力(表2),锚链接触状态见图5,趸船位移见图6。

表2 锚链张力计算结果

锚链编号	锚链张力/kN			
	计算步 C_1	计算步 C_2	计算步 C_3	计算步 C_4
1 [#]	166.90	658.70	124.21	600.60
2 [#]	146.92	198.20	366.92	393.30
3 [#]	158.23	97.80	112.06	34.40
4 [#]	231.55	44.50	351.02	116.40
5 [#]	139.90	552.80	212.46	553.10
6 [#]	142.22	67.10	215.75	172.40



注:锚链与泥面接触时,接触单元长度显示为零。

图5 锚链接触状态

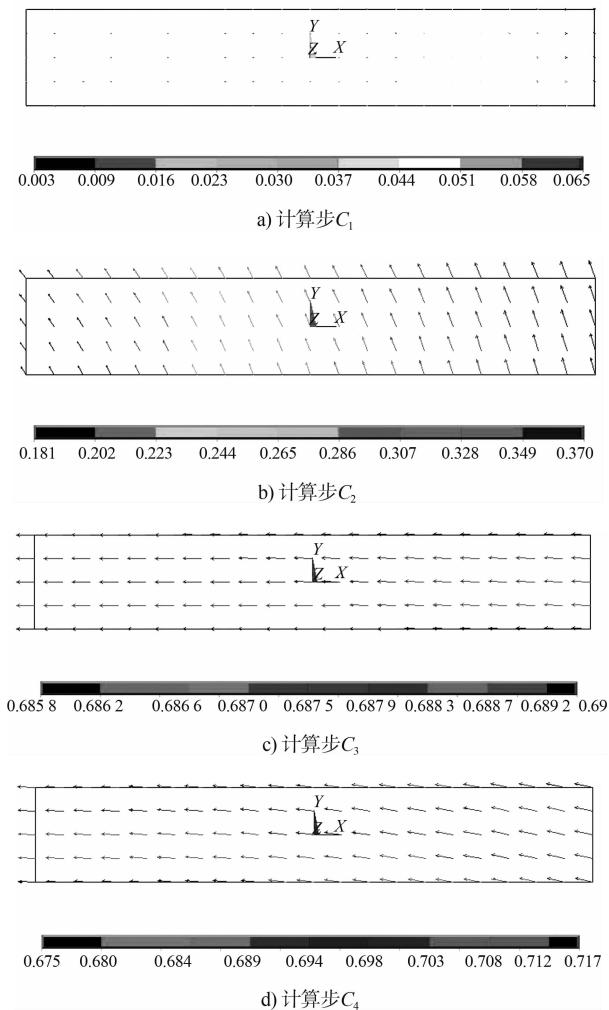


图 6 趸船位移矢量 (单位: m)

由图 6 发现, 计算步 C_1 位移最大值仅为 0.065 m, 接近于零, 满足工程精度要求; 这说明锚链预设初状态准确, 且有限元模型与目标模型的近似度高, 再对比锚链张力目标值 (预设值) 和 FEM 模拟值 (表 1 和 2), 发现两者最大误差约 6%, 两者差距较小, 进一步验证了模型可靠性。计算得到锚链最大张力为 658.7 kN, 发生在设计高水位时 1[#] 锚链; 趸船最大纵向位移为 0.69 m (设计低水位), 最大横向位移为 0.33 m (设计高水位)。当水位降低时 (计算步 $C_1 \rightarrow C_3$), 岸侧 4[#] ~ 6[#] 锚链和海侧 2[#] 锚链张力增大, 这与全部采用锚块进行锚系的趸船情况不同, 主要是因为 4[#] ~ 6[#] 为悬挂式锚链, 水位降低会加大其张力, 且相应的趸船纵向位移同时导致 2[#] 锚链的受力增加。本工程依据有限元分析结果进行锚链配置和设计,

浮码头建成后, 趸船位移一直处于容许范围内, 结构体系可靠, 浮码头运行状态良好。

3 结论

1) 本文提出趸船-锚链体系的非线性拟静态有限元分析方法, 能够较好地模拟锚链与泥面的接触特性, 同时考虑其几何大变形特征。依据本文给出的计算流程, 可分析水位变动、外荷载作用下趸船-锚链体系受力和位移, 工程实用性强。

2) 对某海事局浮码头工程实例进行分析, 计算得到本码头中采用锚块与固定点悬挂组合锚系的锚链体系的受力及接触状态, 给出了趸船位移, 验证了本文方法的可行性, 表明本方法适用于实际工程中复杂锚链体系的数值计算与设计。另外, 由于趸船姿态复杂且底边界为水, 锚链张力初始值的理论解难以获得, 如能精确评估及设定初始张力值, 可消减结构体系的张力误差, 提高计算精确度。

参考文献:

- [1] 肖越, 王言英. 浮体锚泊系统计算分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5): 682-686.
- [2] 张炳夫, 钱昆. 系泊浮体在浅水波浪中运动响应的计算研究[J]. 船海工程, 2010, 39(5): 32-39.
- [3] 刘应中, 缪国平, 李宜乐, 等. 系泊系统动力分析的时域方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(11): 7-12.
- [4] Vallabhan, C V Girija. Two-dimensional nonlinear analysis of long cables[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(8): 694-697.
- [5] Orgill Gary, Wilson J F. Static design of cable mooring arrays for offshore guyed towers [J]. Applied Ocean Research, 1985(3): 166-174.
- [6] Aamo O M, Fossen T I. Finite element modeling of mooring lines[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 53(4): 415-422.
- [7] 周焕廷, 袁健, 李国强. 索网结构找形分析及其在 ANSYS 中的实现[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(4): 19-21.