



风浪流对绞吸船定位桩的冲击研究

季勇志¹, 吴秀艳², 吴小明¹

(1. 中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510221;

2. 机械工业第六设计研究院有限公司 天津分公司, 天津300392)

摘要: 在全面分析风浪流对绞吸船定位桩的冲击荷载的基础上, 对绞吸船施工中定位桩的动力响应提出了编程计算和有限元分析相结合的研究方法, 即: 通过编写程序计算定位桩在各种风浪流条件下的环境荷载, 通过有限元模拟求解出定位桩在风浪流作用下的动力响应。采用该方法得出的结果与实际较为符合, 对绞吸船的安全施工具有参考价值。

关键词: 风浪流; 绞吸船; 定位桩; 环境荷载; 动力响应

中图分类号: TV 139.2⁺

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0031-06

On spud impacted by wind, wave and current

Ji Yong-zhi¹, Wu Xiu-yan², Wu Xiao-ming¹

(1. CCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510221, China;

2. Tianjin Branch, No.6 Institute of Project Planning & Research of Machinery Industry Co., Ltd., Tianjin 300392, China)

Abstract: Based on the analysis of spud loads under the combined action of wind, wave and current, this paper puts forward the method which combines programming calculations with finite element analysis on the spud dynamic response in the wind, wave and current environment, i.e., gaining the spud loads under the combined action of wind, wave and current through programming calculation at first and then obtaining the dynamic response of the spud by finite element analysis. The results from this method agrees well with the real case, so it may serve as reference for safe construction of cutter suction dredger.

Key words: wind, wave and current; cutter suction dredger; spud; environment load, dynamic response

采用台车和双桩定位系统的绞吸式挖泥船(简称绞吸船)具有施工效率高、占用水域小、定位精度高等突出优点, 在疏浚工程中发挥了不可替代的重要作用。但由于一些风浪流情况和不科学施工, 使得绞吸船定位桩的损坏事故时有发生, 甚至造成水下断桩部分戳破船底的巨大危害。例如: 2009年10月, 在某粮食码头附近, 因为潮位变化和施工引起的土体塌方, 正在施工的绞吸船的主定位桩发生断裂破坏; 2010年8月, 由于受到当时的第4号热带风暴“电母”外围环流的影响, 在某工地停工避风浪的绞吸船, 仍然受到涌浪冲击, 发生了定位桩的变形和断裂事故。目

前, 绞吸船在近海环境中施工时受到的风浪流冲击的具体情况不是十分明确, 本文通过有限元分析和编程计算的方法对风浪流冲击作用下的7025型绞吸船定位桩的承载能力进行了较为系统的仿真研究。其研究成果可以扩展到其他类似结构的绞吸船, 并对绞吸船安全施工具有参考意义。

1 绞吸船定位桩受到的风浪流荷载

1.1 绞吸船结构简介

7025型绞吸船的主船体的长度为66.5 m, 型宽15.4 m, 型深4 m, 为船首和船尾均有凹槽的箱体结构。该型绞吸船的主要结构包括: 船体、桥

收稿日期: 2012-07-10

作者简介: 季勇志(1973—), 男, 博士, 工程师, 主要从事港口、海岸及近海工程的科研和管理工作。

梁和支架、台车和双定位桩系统、驾驶室、居住舱、起重装置及绞车装置等(图1)。其输泥管直径为700 mm,最大挖深25 m,生产能力为3 000 m³/h。

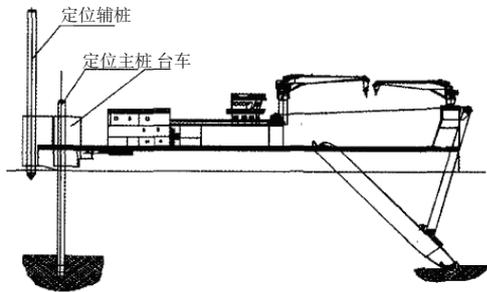


图1 绞吸船结构

1.2 定位桩几何参数

定位桩一般分为主桩和辅桩,多布置于绞吸船的船尾。其中,主桩装置在船尾台车上,可随台车相对于船体沿船体纵向中心线前后移动,从而改变施工位置;而辅桩固定在船尾的偏心位置上,起到换桩和辅助定位的作用。

两根钢桩的结构完全一样,均为薄壁圆柱状结构,总长为36.5 m,其中上部桩身长35 m,其余为1.5 m的桩尖。桩身自顶向桩尖方向分为7段,具体尺寸见表1。桩身上部被台车上的抱箍包围。抱箍的最小内径为1.22 m,而定位桩的外径为1.20 m,因此两者之间沿径向有0.01 m的缝隙。这使得绞吸船相对定位桩有一个微小的活动范围,所以定位桩和台车是相对独立的构件。可以近似认为绞吸船在水平方向受到定位桩的约束(水平位移 $U_x=U_y=0$),但在竖直方向可以做垂荡运动(垂向位移 $U_z \neq 0$)。

表1 桩身分段尺寸 mm

分段	壁厚	长度
第1段	20	3 000
第2段	40	5 000
第3段	60	5 000
第4段	50	4 000
第5段	40	4 000
第6段	30	6 100
第7段	20	7 900

1.3 定位桩的环境荷载分析

绞吸船在施工过程中,围绕定位桩做扇形扫挖,挖宽约为80 m,摆角约为66°,如图2所示。

施工中,定位桩底部深埋于水底的土体中,桩身浸没在海水中,而其上部通过台车抱箍和船体相连。所以定位桩受到的环境荷载包括风压力、波浪力、水流力、绞刀切削反力、锚索拉力、水流对桩身的直接作用力、桩底土体的空间约束力等等。其中,风压力、水流力、波浪力、绞刀切削反力和锚索拉力均直接作用在绞吸船的船体上,并通过台车抱箍传递到定位桩上。

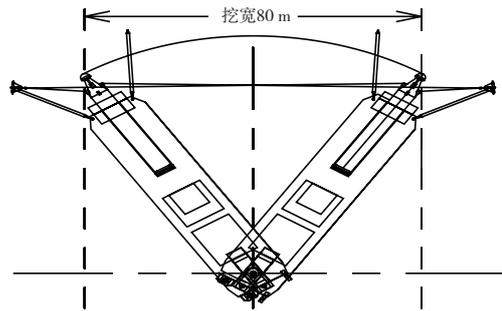


图2 绞吸船围绕定位桩施工

首先,建立绞吸船的平面坐标系。如图3所示,以定位桩中心点为坐标原点,以船艏向船艉方向为x轴,以定位桩中心点向左舷方向为y轴。从图3中可以看到定位桩、桥梁和主船体的相对位置关系。

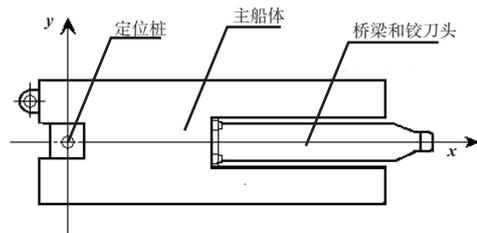


图3 绞吸船平面坐标系

1) 风压力^[1]:采用OCIMF(石油公司国际海事论坛)通过试验得出的计算公式和数据,如下:

$$F_{xw} = C_{xc} P_c v_c^2 D L/2 \quad (1)$$

$$F_{yw} = C_{yw} P_w v_w^2 A L/2 \quad (2)$$

$$M_{xyw} = C_{xyw} P_w v_w^2 A L \times L/2 \quad (3)$$

式中: F_{xw} , F_{yw} , M_{xyw} 依次为纵荡风压力、横荡风压力和首摇力矩。

2) 波浪力^[2]:采用压力直接积分法并结合Maruo(1960)公式推导得出平均波浪力为:

$$\bar{F}_i = \frac{\rho g \zeta_\alpha^2}{2} \int_{L_1} \sin^2(\theta + \beta) n_i dl \quad (4)$$

对船型结构物简化计算后可以得到:

$$\bar{F}_1 = \frac{2}{3} \rho g \xi_\alpha^2 r \cos \beta \quad (5)$$

$$\bar{F}_2 = \rho g \xi_\alpha^2 \left(\frac{2}{3} r \sin \beta + l \sin \beta |\sin \beta| \right) \quad (6)$$

$$\bar{F}_6 = -\frac{1}{3} \rho g \xi_\alpha^2 l r \sin(2\beta) \quad (7)$$

式中: \bar{F}_1 是平均波浪力在x方向上的分量; \bar{F}_2 是平均波浪力在y方向上的分量; \bar{F}_6 表示xoy面(海平面方向)内的艏摇力矩。

3) 流压力^[1]: 采用OCIMF(石油公司国际海事论坛)试验得出的计算公式和数据。

$$F_{xc} = C_{xc} P_c v_c^2 DL/2 \quad (8)$$

$$F_{yc} = C_{yc} P_c v_c^2 DL/2 \quad (9)$$

$$M_{xyc} = C_{xyc} P_c v_c^2 DL^2/2 \quad (10)$$

式中: F_{xc} , F_{yc} , M_{xyc} 依次为沿x轴方向的流压力、沿y轴方向的流压力和流速引起的海平面内的艏摇力矩。

4) 绞刀切削反力^[3]: 绞吸船在施工时, 绞刀产生的切削反力为: 轴向反力 F_a , 水平方向的反力 F_h , 垂直于轴向及水平方向的反力 F_v 。绞刀切削反力通常采用如下近似公式计算:

$$\begin{cases} F_a = \frac{C_a M}{R} \\ F_h = \frac{C_h M}{R} \\ F_v = \frac{C_v M}{R} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C_a=0.4$; $C_h=1.0$; $C_v=0.9$; $M = \frac{9549P}{1000N}$ 为绞刀的扭矩, R 为绞刀头的半径, P 为绞刀传递轴的输出功率, N 为绞刀转速。

5) 锚索拉力^[4]: 绞吸船为了围绕定位点横移作业, 横移绞车必须具有足够的牵引力。以整个船舶为受力分析体, 所有外力和外力矩对定位桩的垂向中轴线应保持平衡。所以, 横移钢索拉力可按如下公式计算:

$$T = \frac{\sum F_j L_j + \sum M_i}{L} \quad (12)$$

6) 桥梁受到的水流量^[5]: 7025型绞吸船的桥梁外形为方柱状薄壁开孔结构。施工时, 桥梁淹没于水中, 可以参考《港口工程荷载规范》中关于方柱的计算求解水流量。桥梁水流量, 即桥梁通过船体传递到定位桩上的作用力, 计算公式为:

$$F_{w1} = C_{w1} \rho v_1^2 A_1/2 \quad (13)$$

式中: F_w 为水流量标准值(kN); C_w 为水流阻力系数; ρ 为水的密度, 海水取 1.025 t/m^3 ; v 为水流设计流速(m/s); A 为计算构件在与流向垂直平面上的投影面积(m^2)。

另外, 考虑到桥梁面板上有许多开孔, 使得实际的水流量减小, 所以选取水流力的折减系数为0.75。

7) 定位桩受到的水流量^[5]。根据《港口工程荷载规范》中的有关规定, 作用于定位桩上的水流量应按如下公式进行计算:

$$F_{w2} = C_{w2} \rho v_2^2 A_2/2 \quad (14)$$

需要注意, 此处计算的定位桩部分是指定位桩淹没于水中(自绞吸船船底以下)的部分。因定位桩其余部分或穿过绞吸船台车或暴露在空气中, 没有直接受到水流力的作用。

8) 土体对定位桩的约束作用: 定位桩底部深埋于海底土体中, 受到土体的约束。本文通过桩土相互作用的有限元分析, 模拟土体对定位桩底部的约束作用, 具体见后面的建模和分析。

9) 船体和定位桩的垂向受力简化: 当定位桩的弯曲变形在弹性变形的范围内时, 船体本身的自重和垂向瞬时力均可由浮力平衡, 所以, 可以忽略相关垂向力的相互作用。这样可以使问题大为简化, 并且结果是偏于合理的。

2 风浪流荷载的编程求解^[6]

上述定位桩受到的环境荷载比较复杂, 再加上绞吸船在施工中还会遇到不同水域或涨落潮引起的水深变化或挖深变化, 以及施工中风浪流的大小和角度的变化等等, 这些实际施工条件可以形成许多组合工况, 使得要研究的问题十分复杂。

针对这些复杂多变的施工工况, 笔者采用计算机编程的方法进行了多参数和人机交互的求解计算, 使多工况下的环境荷载的计算问题迎刃而解。

2.1 程序界面和使用

计算风浪流等环境荷载的程序初始界面如图4所示, 程序界面主要包括3大部分: 船舶结构参数、海洋环境参数和环境荷载。



图4 程序初始界面

在船舶结构参数区域，用户可以结合7025/8527型绞吸船的船体结构输入各项参数，如：船体尺寸和吃水、定位桩尺寸、桥梁数据、绞刀功率等等。所有参数都可以根据实际情况独立修改，从而准确反映施工时船体结构的具体情况。图5所示为7025型绞吸船各项结构参数。

在海洋环境参数区域，用户可以根据7025/8527型绞吸船施工所在水域的真实海况，输入风浪流的计算参数（包括浪高、风速、流速和遭遇角等），并可定义海水密度和空气密度的实际数值。

环境荷载区域为用户需要的计算结果。初始数据均为空白，在用户输入了实际工况参数后，通过计算得到定位桩的环境荷载。例如：当浪高1.5 m，遭遇角15°；风速15 m/s，风向角15°；流速2 m/s，流向角10°；计算得出施工中的7025型绞吸船的定位桩受到的环境荷载如图5所示。



图5 具体工况下风浪流荷载计算结果

使用程序时，用户只要根据施工时的实际工况条件输入具体的船舶结构参数和海洋环境参

数，点击“计算”按钮，即可得到定位桩受到的环境荷载。并且，通过调整风浪流等的各参数的具体取值，可以得到绞吸船在各种实际工况中的风浪流荷载。另外，还可以单击“复位”按钮，恢复到初始界面。点击“关闭”退出计算程序。

2.2 补充说明

在使用程序进行计算时，需要注意：1）输入的各项参数应根据实际施工工况进行取值，并与实际情况进行对照；2）各参数值的单位一般采用国际制单位，但也有例外，特殊情况已在程序说明中标明；3）该程序能够求解得到风浪流荷载的x向力、y向力和xoy面内的转矩；4）在求出环境荷载后，仍需结合有限元分析（见第3部分），才能得到定位桩的动力响应情况；5）程序具有可扩展性，即可以根据用户需要在原有程序的基础上增加其他功能。

3 有限元分析

当定位桩的变形属于弹性变形时，通过上述的荷载分析和程序计算，对于在不同工况条件下施工的绞吸船，其定位桩受到的环境荷载都可以一一计算出来。在此基础上，本文介绍定位桩的动力响应的有限元分析过程。

3.1 桩土模型

图6为本文建立的7025型绞吸船施工时的桩土数值模型。其中，定位桩分为7段（表1），材料为S355J2G3（欧洲标准），属于低合金高强度结构钢焊接件，建模中参考了7025型绞吸船定位桩的图纸尺寸。桩底土体为圆柱状，直径为18 m，厚度为15 m。定位桩在土体中的埋深取为3 m（可以根据具体情况改变）。在有限元分析中，土体简化为弹塑性模型。定位桩和桩底土体的材料参数见表2。

由于本文主要研究定位桩的承载能力，并且船体刚度远大于定位桩刚度，因此将绞吸船的主船体视为传力结构，不再建立船体模型；此外，

表2 桩土材料参数

结构	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比μ
定位桩	8 750	210	345	0.3
桩底土体	1 800	0.1	5	0.3

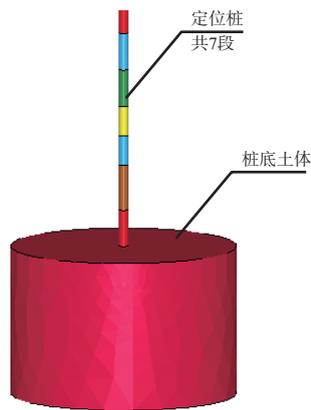


图6 桩土三维模型

海洋环境中的风、浪、流的作用均以荷载的形式由船体传递到定位桩上, 因此建模时也不需要建立水体和空气的模型。

3.2 设计工况施工分析

以绞吸船在设计工况中的施工为例进行计算说明。在7025型绞吸船的技术规格书中规定了允许施工的设计工况条件^[7](环境温度-15~45℃, 海水温度0~32℃, 湿度90%(35℃), 最大风速15 m/s, 最大潮流速度2 m/s, 最大浪高和周期为1.0 m和5 s, 最大挖深25 m)。在此工况条件下, 当7025型绞吸船x轴方向(图4)与风浪流来向一致且达到最大吃水2.6 m时, 首先将环境参数输入计算程序中, 得出定位桩受到的环境荷载, 其中包括: 由船体传递的x向分力为33.36 kN, 由船体传递的y向分力为15.52 kN, 桩身水流力为29.77 kN。然后, 通过有限元求解, 得出定位桩的冲击变形情况, 如图7和图8所示。

图7说明, 定位桩的桩身出现了明显的应力区, 其最大应力值为51.3 MPa, 远小于定位桩的屈服强度345 MPa。图8说明, 桩顶节点385的偏移情

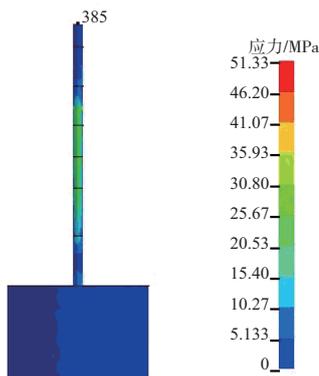


图7 桩土应力云图

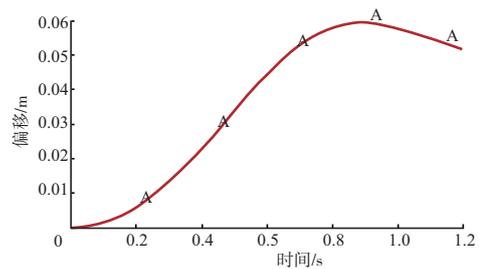


图8 风浪流冲击中桩顶节点385的偏移

况为先增大, 达到峰值后单调下降, 其峰值位移约为0.06 m。也就是说, 在设计工况施工时, 绞吸船几乎没有明显的晃动, 定位桩的强度和稳定性足够, 这与实际情况较为符合。

4 计算流程和超工况分析

4.1 计算流程

总结上述分析过程, 得出采用编程计算和有限元分析相结合的方法, 研究绞吸船定位桩在风浪流冲击中的动力响应的计算流程如图9所示。

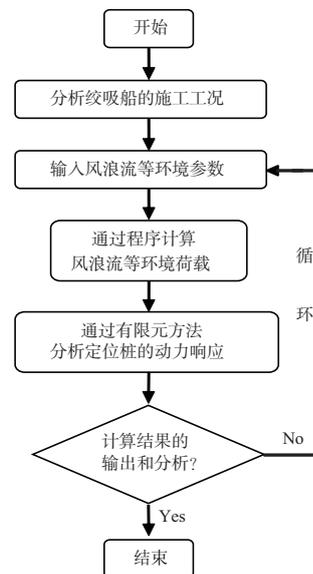


图9 风浪流冲击计算流程

4.2 超工况施工分析

超工况施工是指在超过设计工况给定的风浪流条件中施工。这种情况在实际施工中是经常遇到的。按照图9的计算流程, 本文对2种较为典型的超工况施工进行了分析。

1) 第1种情况: 风速15 m/s, 流速2.0 m/s, 浪高2.1 m, 波浪周期5 s, 风浪流的方向一致, 与船体夹角为30°, 挖深25 m, 吃水2.6 m。

将上述环境参数输入计算程序, 计算得出船体传递到定位桩上的作用力: x 向力436 kN, y 向力698 kN。此时, 定位桩受到的环境荷载的总合力不超过850 kN, 本文取850 kN作用在定位桩上, 得到的定位桩的动力响应变化如图10, 桩顶最大偏移不到14 cm, 绞吸船会有一些的晃动, 绞吸船仍具有施工能力, 但定位桩受损的可能性增加。这种情况, 在实际施工中的确出现过, 尽管绞吸船可以继续施工, 但存在较大的安全隐患。

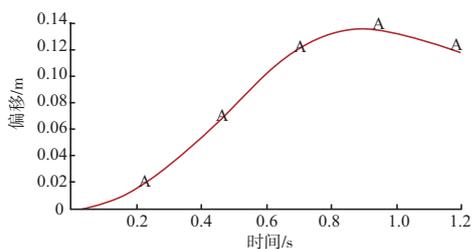


图10 浪高2.1 m时桩顶节点385的偏移

2) 第2种情况: 风速15 m/s, 流速2.0 m/s, 浪高3 m, 波浪周期5 s, 波速约为7.8 m/s, 风浪流的方向一致, 与船体夹角为 30° , 挖深和吃水同上。

将上述环境参数输入计算程序, 计算出船体传递到定位桩上的作用力: x 向力656 kN, y 向力1 089 kN, 定位桩受到的环境荷载的总合力超过1 200 kN, 本文取1 200 kN作用在定位桩上, 得到的定位桩的动力响应变化如图11, 桩顶最大位移约为20 cm, 同时, 船体的瞬时垂荡幅度也更大。

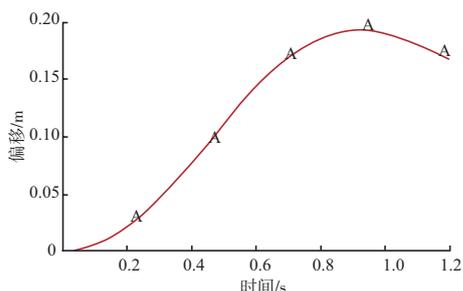


图11 浪高3 m时桩顶节点385的偏移

这种情况下, 尽管定位桩的桩身最大应力(小于200 MPa)未超过其屈服强度(345 MPa)和抗弯强度(310 MPa), 但考虑到绞吸船会发生明显的晃动, 将直接影响到作业精度, 故作业人员宜停止施工, 并视现场情况采取必要的防风浪措施。对于其他的风、浪、流情况和不同的挖深(∇ 25 m)、船舶吃水(1~2.6 m)等情况, 文中不再一一赘述。

5 结论

1) 绞吸船施工过程中, 风浪流对船体和定位桩的冲击作用非常复杂。本文通过分析简化, 较为全面地得出了风浪流作用下定位桩的主要荷载, 为工程研究和现场施工提供参考。

2) 通过编程, 实现了在不同工况下的风浪流等环境荷载的求解计算。该程序可以简便快捷地计算得出绞吸船在复杂多变的工况中进行施工时定位桩受到的风浪流等环境荷载。

3) 对设计工况的计算, 得出7025型绞吸船的定位桩具有一定的安全储备, 所以在超工况条件下, 绞吸船仍有继续施工的可能性。但不宜在较大的风浪流条件下进行施工, 否则容易使定位桩受损。

4) 本文采用的计算流程, 充分考虑了施工现场的风浪流变化、绞吸船吃水变化、挖深或水位或潮位变化、定位桩埋深变化等多种可能, 以及它们的组合工况, 可以较为系统地研究定位桩在施工过程中受到风浪流冲击时的强度和稳定性变化, 从而为操作人员进行安全施工提供参考, 并对防止风浪流冲击可能造成的定位桩受损亦有所帮助。

5) 如有条件, 宜通过物理模型实验对绞吸船定位桩在风浪流冲击下的动力响应进行更加精确的研究。但物模试验的成本非常高, 而且灵活性很差, 因此本文提出的计算方法和计算流程不失为一种有效的研究途径。

参考文献:

- [1] Oil Companies International Marine Forum. Prediction of wind and current loads on VLCCs[M]. 2nd edition. London: Witherby & Co. Ltd, 1994.
- [2] Faltinsen O M. 船舶与海洋工程环境荷载[M]. 杨建民, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [3] 张文宜. 绞吸式挖泥船主要载荷分析及计算软件开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 30-31.
- [4] 苗得雨. 绞吸式挖泥船定位桩系统受力分析[D]. 天津: 天津大学, 2008: 14-15.
- [5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [6] 刘维. 精通Matlab与C/C++混合程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [7] IHC.2 300 m³/h Stationary Cutter Suction Dredger "HENG LONG" Intact Stability Booklet[R]. Holland: IHC, 2007: 1-15.

(本文编辑 武亚庆)