



沉管管节浮运过程中 波浪附加阻力的水动力学分析*

吕卫清¹, 应宗权², 苏林王², 林美鸿²

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 波浪引起的附加阻力是管节海上浮运过程中总阻力的重要组成。采用基于势流理论的水动力学软件AQWA计算了管节浮运过程中的波浪附加阻力。通过建立管节及附属结构的三维有限元模型, 确定管节的几何、物理性质, 建立湿表面模型进行水动力学分析。对影响附加阻力的各因素, 包括水深、航速、波浪谱及波浪要素等, 进行了参数敏感性分析。计算结果表明, 采用P-M谱的计算值较采用JONSWAP谱有所不同, 附加阻力随水深增加而减小, 阻力值与波浪周期及波浪入射角均有一定的关系, 与波浪高度的平方成正比, 且与拖航速度成正比。

关键词: 沉管管节; 不规则波; 附加阻力; 浮运; 水动力学分析

中图分类号: U 459.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0086-06

Hydrodynamic analysis of added resistance in waves of immersed tunnel elements during floating transportation

LV Wei-qing¹, YING Zong-quan², SU Lin-wang², LIN Mei-hong²

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The added resistance in waves is an important component of total resistance during floating transportation of immersed tunnel elements on the sea. The added resistance was calculated by hydrodynamics simulation software AQWA based on the potential flow theory. The geometrical and physical characteristics were decided by the 3D finite element model of the element and attachment structures, then a wetted surface model of the tunnel element was established to carry out the hydrodynamic analysis. Finally, the sensitivity analysis of parameters including depth of water, towing speed, wave spectrum and characteristics was made. The numerical results suggest that the added resistance when applying the P-M spectrum is greater than the results obtained from the JONSWAP spectrum, decreases with the increase of water depth, may be related to periods and directions of waves, is proportional to the square of wave height and proportional to towing speed as well.

Key words: immersed tunnel element; irregular waves; added resistance; floating transportation; hydrodynamics analysis

沉管隧道是由若干预制的管节, 分别浮运到现场, 一个接一个地沉放安装, 在水下将其互相

连接并正确定位在已经开挖的水下沟槽内, 其后辅以相关工程施工, 使这些管节组合体成为连接

收稿日期: 2011-10-11

*基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAG07B01)

作者简介: 吕卫清 (1966—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事水运工程设计与施工技术研究。

水体两端陆上交通的隧洞型交通运输载体。从沉管隧道建设的主要施工过程可以看出, 管节浮运是沉管隧道水上施工的关键环节之一, 因为管节预制干坞和隧道实际施工现场距离可能从几百米到几百千米不等, 所以大多数情况下都需要以水体(江河、海洋等)为介质进行隧道管节运输。浮运过程中, 分析管节及附属结构的拖航阻力及浮态测量, 并以试验数据推算推船或拖船的所需功率等, 这是沉管隧道设计和施工时需要重点考虑的部分^[1]。

管节在海上浮运时, 相对内河而言环境荷载较为复杂, 需要考虑风、浪、流等荷载的综合作用; 并且通常浮运距离较长, 经历的时间也较长, 由航道浮运到基槽浮运过程中, 水深、风浪流等环境条件的变化通常不可忽略。因此, 在进行海上长距离管节浮运前, 对其可能受到的拖曳阻力大小及影响因素进行分析, 从而确定合理的船机配置是非常必要的。本文采用基于势流理论的水动力学计算软件AQWA研究了沉管隧道管节浮运过程中的波浪的附加阻力及其影响因素。

1 浮运过程中管节阻力分析

假如是在水流荷载影响占绝对主导地位、波浪影响较小的内河或浅海进行水上浮运, 根据水流阻力经验公式, 是基本可以满足工程计算的需要的。如果浮运环境在波浪影响相对较大的近海或外海的话, 则应对浮运施工每个阶段风、浪、流荷载的综合作用及每个因素的影响大小进行全面考虑和评估。

1.1 流、风荷载

尽管水和空气具有不同的物理性质, 而且典型的流速和风速在量级也显著不同, 但分析平均风荷载和流荷载具有很多相似性。对于沉管隧道这类大型浮体结构, 用理论方法来确定流、风荷载是很困难的, 通常需要采用经验公式进行简化计算。

出于安全和经济的考虑, 管节的浮运一般会在风平浪静时进行, 干舷值设置一般较小, 管节

的大部分都沉没在水中, 所受的荷载以水流力所占比例最大。荷载大小一般通过试验获得, 也可根据经验公式, 即在计算中, 将海流视为稳定的流动, 水流对管节的阻力大小为^[2]:

$$F_c = \frac{1}{2} C_{dc} \rho_w A_c v^2 \quad (1)$$

式中: F_c 为水流作用力; ρ_w 为海水密度; A_c 为迎流面积; v 为管节与水流的相对速度; C_{dc} 为水流阻力系数。

应用式(1)确定水流阻力, 关键在于阻力系数 C_{dc} 的选取, 该系数的取值主要受水面宽度、水深、管节断面形式及水流流态等因素影响。一般可由试验进行确定或依据类似工程经验进行选取。参考相关行业规范^[3]及其它相关文献^[4]来看, 对于管节的浮运水阻力系数其取值区间变化范围较大, 应经过充分的试验研究来确定阻力系数的取值。

浮运过程中的风荷载的计算方法与流荷载类似, 只是阻力系数、介质的密度及流动速度不同。由于管节干舷很小, 风荷载通常相对水流和波浪荷载来说要小得多, 因此在考虑拖曳阻力时可忽略风的影响。

1.2 波浪荷载

波浪对浮体产生的作用力通常可分解为一阶波浪力和二阶波浪力, 其中一阶波浪力的幅值虽较大, 但只是一个与波浪具有相同的频率的脉动力, 而二阶波浪力则是拖航系统设计和拖航阻力估算、浮体在波浪中阻力增加的计算、潜艇在近水面时的性能分析的主要考虑波浪荷载因素^[5]。由于二阶波浪漂移力对实际问题具有重要的意义, 因此人们很早就开展了这方面的研究, 取得了不少的研究成果^[6-7]。对于不规则波而言, 除了平均波浪漂移力和倍频波浪力, 还包括波浪慢漂力与各成分波频率之和的高频波浪力。

管节在风浪中拖航的阻力较静水时为大, 所增加的阻力称为波浪中的附加阻力或阻力增值, 又称汹涛阻力^[8]。波浪附加阻力问题相当复杂, 而与此有关的速度损失问题又涉及波浪中的推进和操纵性等问题, 因而近年来此类问题受到研究者们, 尤

其是造船工程相关研究人员的高度重视。管节在整个拖航过程中由于拖航距离大,遭遇的水深、波浪要素、拖航速度等均可能遭遇较大的变化。因此需要对管节拖航过程中可能遇到的阻力进行详细的分析并确定可影响因素的影响机理。

2 环境条件及管节模型

2.1 计算参数

2.1.1 管节几何参数

由于管节横截面对称,标准管节尺寸为 $L \times W \times H = 180 \text{ m} \times 37.95 \text{ m} \times 11.4 \text{ m}$,其1/2截面尺寸如图1所示。浮运过程中的管节干舷值为0.3 m,管节及压载质量为75 690 t。

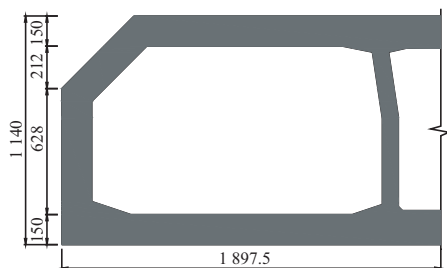


图1 管节1/2横截面(单位:cm)

2.1.2 水文气象环境参数

管节浮运过程中,施工设计水文、气象环境参数如下:水密度 $1\,025 \text{ kg/m}^3$,设计最大波高0.8 m,波浪周期6.0 s,最小水深14 m,设计最大流速1.0 m/s,频率范围0.3~2.0 rad/s。

2.2 分析模型的建立

AQWA是基于三维势流理论的水动力学分析软件,对于风、流力的计算需要根据试验或经验选取相关的系数,相应的受力面积等参数都包含在赋给的系数当中;波浪力的计算则与湿表面积相关,大型管节还要考虑绕射作用的影响,因此在建模时需要定义相应的水面线位置和绕射单元。

为了较精确地获得管节的几何、物理属性,采用大型通用有限元软件ANSYS建立管节的三维实体模型,模型的主要组成部分包括:管节本体、钢封门、压载混凝土、压载水箱、沉放方驳等,如图2所示。通过正确地建立管节几何模型并赋予相应的材料属性,并利用ANSYS软件基于单

元层次计算的几何物理属性求解功能,可以比较精确地得到各方案的几何、物理属性。

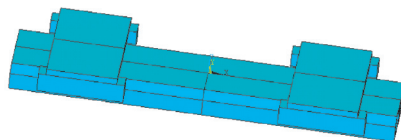


图2 实体模型

利用ANSYS强大的前后处理功能建立AQWA所需的计算模型,并导入AQWA中进行水动力学分析计算,相应的几何、物理属性也可从ANSYS中获取。考虑浮运方案,干舷值取为30 cm,其计算模型如图3所示,其中风浪流等环境条件参数的方向定义如图4所示。

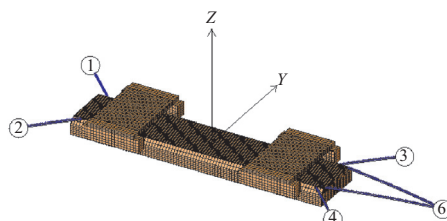


图3 管节拖航数值分析模型

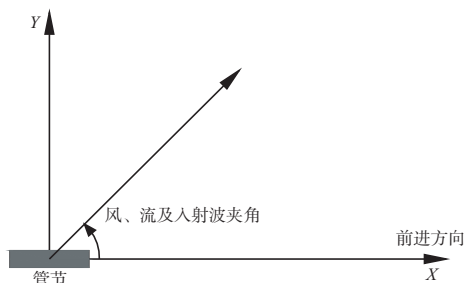


图4 环境条件夹角方向定义

3 波浪阻力分析

3.1 不规则波的描述

海面上的风浪时大时小,参差不齐地围绕着平均水平面上下伏动,成为不规则波。但大量的实测资料表明,海面波动可以看作是平稳的、各态历经的、具有高斯正态分布特征的随机过程,因而不规则波通常可采用海浪谱加以描述,其中以P-M及JONSWAP谱应用最为广泛。其中以有义波高及跨零周期表征的双参数P-M谱的表达式如下^[9]:

$$S(w) = \frac{1}{2\pi} \frac{H_s^2}{4\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{w} \right)^5 \exp \left[-\frac{1}{\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{w} \right)^4 \right] \quad (1)$$

式中: H_s 为有义波高, 是 1/3 最大波高的平均值; T_z 为跨零周期, 也成平均周期。JONSWAP 谱是“北海海浪联合计划”测量海浪分析整理得出的波谱, 其表达式为:

$$S(w) = \alpha H_s^2 T_p^4 w^{-5} \exp \left[-1.25 \left(T_p^4 w \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[- \left(T_p w^{-1} \right)^5 / (2\sigma^3) \right]} \quad (2)$$

式中: T_p 为谱峰周期, 一般地, $T_z/T_p = 0.76$; γ 为形状参数; σ 由下式确定:

$$\begin{cases} \sigma = 0.09 & w \leq w_p \\ \sigma = 0.07 & w > w_p \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)} \quad (4)$$

第十五届 ITTC (1978) 建议采用 JONSWAP 的平均波谱 ($\gamma = 3.3$) 作为有限风区的波谱。

3.2 不规则波浪作用下的波浪阻力时程曲线

根据浮运状态物理模型试验参数要素, 取计算水深 14 m, 波浪要素波高 0.8 m, 跨零周期 6 s, 计算时长为 3 200 s。采用 P-M 谱模拟的不规则波进行分析。入射角为 0° 时, 截取 500~1 500 s 时间段的波浪二阶漂移力时程曲线如图 5 所示。

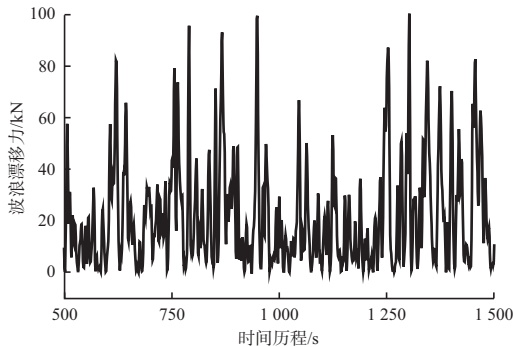


图5 二阶漂移力时程曲线

由图 5 可知, 对于不规则波而言, 波浪漂移力随时间变化较为明显, 其时程曲线具有明显的短暂峰值, 其极大值与计算时域的大小有关。因此, 本文将 1/3 最大二阶漂移力的平均值 (有义漂移力) 作为波浪的附加阻力, 以便为拖航的船机配置提供依据。

3.3 波浪阻力影响因素分析

3.3.1 波谱及迎浪角度影响分析

分别考虑 P-M 谱及 JONSWAP 谱 (取 $\gamma = 3.3$), 研究对于迎浪角度对波浪阻力的影响, 考虑管节

关于 X, Y 轴对称, 取入射角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的波浪进行分析计算。不同迎浪角度下管节所受横向及纵向波浪阻力如图 6 所示。

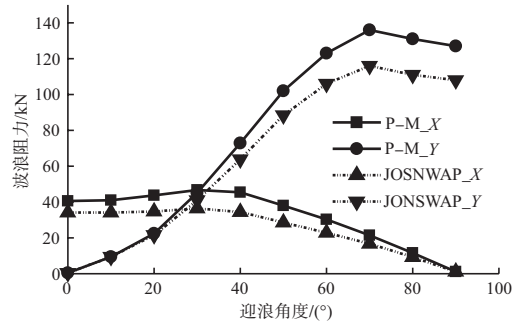


图6 两种波浪谱的波浪阻力随入射角度的变化情况

由图 6 还可以看出, 迎浪角为 0° 时的横向阻力 (X 方向) 约为迎浪角为 90° 的纵向阻力 (Y 方向) 的 1/3。对于横向力 (X 方向), 当迎浪角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时, 基本保持不变, 约为 40 kN, 随后随着角度的继续增大, 横向力逐渐减小; 而对于纵向力 (Y 方向), 其值随着迎浪角度的增加而增大, 当角度达到 70° 左右时最大, 90° 时略有降低。

对比 P-M 谱及 JONSWAP 谱的计算结果可以发现, 采用 P-M 谱计算得到的波浪阻力较 JONSWAP 谱的计算结果要大。下面对于波浪阻力的计算, 仅考虑采用 P-M 谱。

3.3.2 水深及波浪周期的影响分析

由于管节的浮运距离大, 整个浮运过程需要经历潮涨潮落, 导致航道水深发生变化; 而且波浪要素亦可能发生一定的变化。以波浪入射角为 180° 为例, 考虑水深为 13 m, 14 m, 15 m 及 20 m 条件下, 周期范围为 3~10 s, 管节波浪阻力的变化情况如图 7 所示。

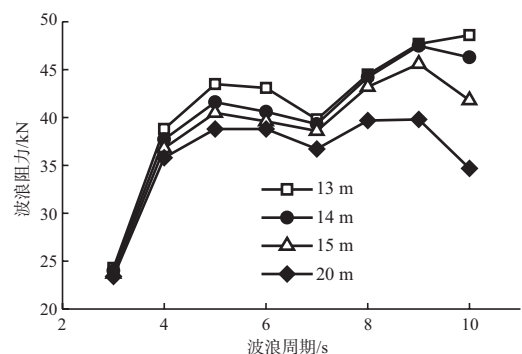


图7 不同水深条件下波浪阻力随周期的变化规律

由图7可以看出,对于所有讨论的波浪周期范围,波浪阻力随着航道水深的增大而减小,差距随着波浪周期的变化存在一定的不同;而波浪周期对于波浪阻力也具有较大影响,当波浪周期仅有3 s时,其波浪阻力明显小于其它周期的波浪。

3.3.3 波高的影响分析

由船舶工程经验可知,波高对浮体结构的波浪附加阻力存在重要影响,且大量的试验表明,波浪中的附加阻力与波高的平方成正比^[8]。为了研究波高对管节拖航过程中的附加阻力的影响,本文考虑满足P-M谱不规则波,波浪波浪入射角为180°,跨零周期为6 s,波高分别考虑0.3 m, 0.5 m, 0.8 m, 1.0 m, 1.3 m, 1.6 m及2.0 m情况,其波浪附加阻力计算结果如图8所示。

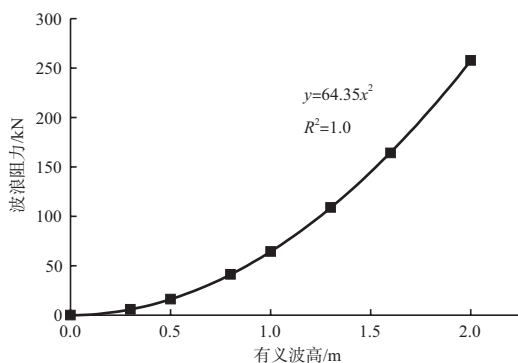


图8 波浪阻力随波高的变化

由图8可以发现,管节的波浪中的附加阻力随所遭遇波浪的波高增大而增加,且满足与波高的平方成正比的关系。

3.3.4 航速的影响分析

由于管节拖航距离大,管节拖航过程中必须达到一定的航速,以便管节在满足气象窗口条件的时间段内能够到达沉放区域。为确定管节不同拖航速度对波浪阻力的影响,考虑了拖航速度(相对水流)在0~4 m/s范围内变化时,管节所受波浪阻力的情况,如图9所示。

由图9可以看出,管节所受的波浪阻力随管节拖航速度增大而增大,就计算结果来看,满足与拖航速度成正比的关系。

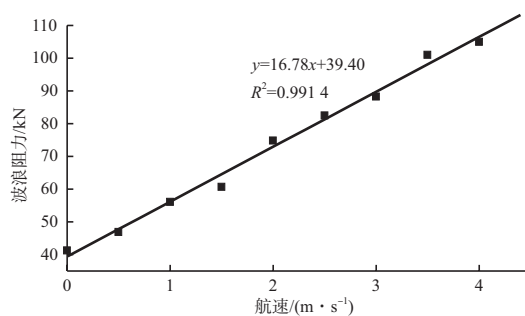


图9 波浪阻力随管节拖航速度的关系

4 结论

1) 对比P-M谱及JONSWAP谱的计算结果,采用P-M谱计算得到的波浪阻力较JONSWAP谱(取 $\gamma=3.3$)的计算结果要大。

2) 对不同波浪要素的影响分析发现,管节的波浪附加阻力为二阶波浪力,其值与波浪高度的平方成正比,并通过数据拟合建立了波浪阻力随波高变化的计算公式;波浪周期对于波浪阻力也具有一定的影响,当波浪周期仅有3 s时,其波浪阻力明显小于其它周期的波浪;对于横向力,当迎浪角0°~40°时,基本保持不变约为40 kN,随后随着角度的继续增大,横向力逐渐减小;而对于纵向力,其值随着迎浪角度的增加而增大,当角度达到70°左右时最大,90°时略有降低。

3) 对于所有讨论的波浪周期为3~10 s范围内,波浪阻力随着航道水深的增大而减小,差距随着波浪周期的变化存在一定的不同;对比不同的管节拖航速度,管节所受的波浪阻力随拖航速度增大而增大,满足与拖航速度成正比的关系。

参考文献:

- [1] 詹德新, 王兴权, 刘祖源, 等. 沉管隧道及其相关模型试验[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(5): 488-492.
- [2] 由际昆. 深水绷紧系泊系统设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [3] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [4] 陈绍章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研

- 究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [6] 孙伯起, 缪泉明, 杨显成, 等. 船舶在规则波中航行时附加阻力计算的数值方法[G]//朱德祥. 第十八届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2004: 394-405.
- [7] 何惠明, 董国祥. 运输船舶在不规则波中阻力增加的近似估算[G]//吴有生, 刘桦, 许唯临, 等. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [8] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [9] Faltinsen O M. 船舶与海洋工程环境荷载[M]. 杨建民, 肖龙飞, 葛春花, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- (本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

沉管管节浮运过程中, 波浪附加阻力的水动力影响尤为显著。目前国内外很多学者对该方面进行了研究, 都没有形成统一的成果。

文章介绍了波浪引起的附加阻力对海上沉管浮运过程中的影响, 通过国内外资料进行了深入分析计算, 并通过数模、物模等进行了验证, 找出了波浪对大型构件在海上浮运过程中的影响规律。为国内外相关研究提供了参考资料, 更为我国港珠澳大桥沉管隧道工程的建设作出了直接贡献, 理论上可作为我国海上大型构件浮运和波浪水动力等方面规范编制的参考依据。



2012年12月

评委简介:

张宝昌, 教高, 中交一航局第二工程有限公司副总工程师。

研究开发的主要成果有: 采用胶囊台车陆上顶升运移万吨级特大型沉箱施工技术、跨海大桥墩台混凝土套箱无封底施工技术、半圆体空中翻转技术、深水整平关键技术、沉管浮运安装成套关键技术、船行波近海作用关键技术等, 获得国际领先或国际先进及国内领先等多项技术成果; 获得专利20余项。