

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.022

## 沉管隧道管段系泊系统水动力学分析

皇浩<sup>1</sup>, 左伟<sup>2</sup>, 周凌宁<sup>1</sup>, 赵俊<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道集团三处有限公司, 广州 深圳 518052; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**沉管隧道管段系泊系统是管节在安装过程中抵抗水流作用力和提供准确定位的前提保障,而系泊系统下的整体结构运动响应和锚缆受力则影响着施工阶段的安全性和经济性。文章以广州市荔湾区如意坊沉管隧道工程为实例,采用基于势流理论的水动力学仿真软件 AQWA 进行计算分析。根据实际数据进行结构三维有限元建模,先对系泊系统进行频域分析,再增加时域耦合分析,并考虑 JONSWAP 波浪谱和水流的共同作用,研究波浪入射角、环境组合方式等因素对该系统下运动响应和锚缆受力的影响。结果表明:管段在低频区域波动较大,随着频率增加逐渐趋于稳定;有效波高对管段运动响应影响较大;该系统下波浪入射角为 90°时,锚缆张力出现最大值。

**关键词:**沉管隧道;不规则波;系泊系统;水动力学分析;运动响应

**中图分类号:**U459.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)11-1580-05

## Hydrodynamic analysis of mooring system of tube section of immersed tunnel

HUANG Hao<sup>1</sup>, ZUO Wei<sup>2</sup>, ZHOU Lingning<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>

(1. The 3rd Engineering Co., Ltd., China Railway Tunnel Group, Shenzhen 518052, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The mooring system of the tube section of immersed tunnel is the prerequisite guarantee to resist the force of water flow and provide accurate positioning during the installation of the tube section, while the overall structural motion response and anchor cable force under the mooring system affect the safety and economy of the construction phase. This paper takes the example of the immersed tunnel project in Ruyifang, Liwan District, Guangzhou City, and uses the hydrodynamic simulation software AQWA based on potential flow theory for calculation and analysis. According to the actual data for the three-dimensional finite element modeling of the structure, the mooring system was first analyzed in the frequency domain, and then the time-domain coupling analysis was added, and the joint effect of JONSWAP wave spectrum and water flow was considered to study the effect of wave incidence angle, environmental combination mode and other factors on the motion response and anchor cable force under this system. The calculation results show that the tube section fluctuates in the low frequency region, and gradually stabilizes with the increase of frequency; the effective wave height has a great influence on the motion response of the tube section; the maximum value of the anchor cable tension occurs when the wave incidence angle is 90° under this system.

**Key words:** immersed tunnel; irregular wave; mooring system; hydrodynamic analysis; motion response

沉管隧道工程是 20 世纪初才逐渐发展起来的一种新型的大型跨水交通工程,在我国多用于干

坞型沉管隧道,沉管管段在临时干坞内预制好,管节两头用端封墙进行密封,将干坞内注水使管段

收稿日期:2023-02-22;修回日期:2023-04-23

基金项目:中铁隧道科研资助项目(HYB20190156)

作者简介:皇浩(1981—),男,陕西汉中,中铁隧道集团三处有限公司工程师;

赵俊(1983—),男,安徽六安人,博士,安徽建筑大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:junzhao@ahjzu.edu.cn.

漂浮上升并滑移入水使其浮运至指定沉放地点,隧址水底预先挖好水下基槽,管段逐节沉放对接形成完整的水下隧道。由于浮运与沉放过程均在水中作业,环境较为复杂,一般需要考虑风、浪、流等荷载的综合作用,而沉放阶段需要保证管节的稳定性以及对接过程需要提供初步定位的精确性,因此对施工阶段系泊系统的分析研究是非常有必要的。

在沉管隧道水动力学研究方面,文献[1-2]的模型试验都是考虑流场和阻力对水中浮运的水动力学特性的研究;文献[3]在沉放过程中对规则波下结构的运动响应进行研究,但是对于较为复杂的水体环境仅考虑规则波并不能够满足;文献[4]给出了规则波与不规则波下的结构运动响应;文献[5-6]针对系泊系统下的缆索受力进行试验与研究。但是目前对于较为复杂环境下系泊系统运动响应与时域耦合分析锚缆受力的研究较少。

本文采用 ANSYS 软件建立三维模型,导入基于势流理论的水动力学 AQWA<sup>[7-9]</sup> 模块进行计算,以广州市如意坊沉管施工系泊系统为参照,对较为复杂水况中沉管管段系泊系统下的运动响应和锚缆受力情况进行研究,给出相应的水动力特性分析,为实际工程设计提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 沉管管段模型

本文以如意坊放射线系统工程项目数据为依托,其中标准管节剖面的尺寸(长×宽×高)为 103.0 m×30.4 m×9.5 m,沉管隧道横截面如图 1 所示。

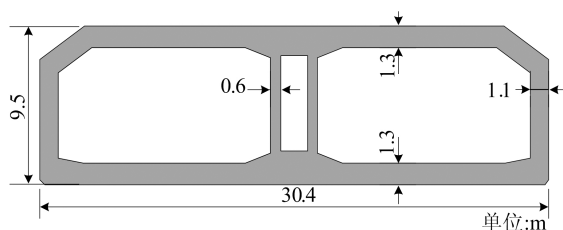


图 1 沉管隧道横断面

根据管节尺寸以及实际施工时管节两端用临时封墙封堵后再进行浮运,由此利用 ANSYS 有限元软件进行三维实体建模,设置相应的几何、物理属性,建模时针对水动力学分析模块采用板壳单元模拟,同时以较高精度的六面体网格形式进行网格划分,模型如图 2 所示,最后导入 AQWA 模块设置环境参数,进行水动力学分析计算。

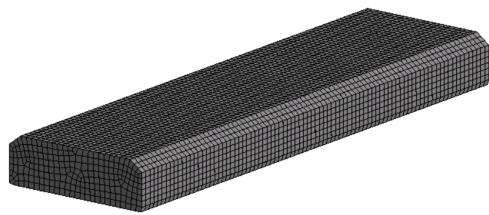


图 2 网格划分图

### 1.2 水流和风荷载

对于沉管管段这类大型浮体结构采用理论方法确定所受的水流荷载和风荷载具有较大难度,则需要利用经验公式进行简化计算。通常管段浮运现场施工会选择入水时间窗口,一般选择风平浪静条件下,并且沉管段大部分沉没水中,此时水流荷载较风荷载为主导因素。荷载大小可参考规范<sup>[10]</sup>根据经验公式计算,水流对管节阻力为:

$$F_w = C_w \rho v^2 A / 2 \quad (1)$$

其中: $F_w$  为水流力标准值; $C_w$  为水流阻力系数, $\rho$  为水密度; $v$  为水流设计流速; $A$  为迎流面积。阻力系数等选取受水深、水面宽度、水流流态和管段断面形式等因素影响,可根据试验确定或以往沉管隧道施工经验选择。

风荷载计算与水流荷载计算类似,只是相应的阻力系数、介质密度和流速等取值不同,但是在系泊状态下且沉管段没于水下其受风面积较小,风荷载的影响程度大大降低,因此可忽略风荷载对沉管管段的作用力。

### 1.3 波浪荷载

本文选择 JONSWAP 波浪谱<sup>[11]</sup>模拟不规则波,其表达式为:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^4\right] \gamma^{\exp\left[-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_m}{\sigma \omega_m}\right)^2\right]} \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_m; \\ 0.09, & \omega > \omega_m \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{5}{16} \left(\frac{H_s^2 \omega_m^4}{g^2}\right) (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (4)$$

其中: $\omega_m$  为谱峰频率; $g$  为重力加速度; $\alpha$  为能量尺度参数; $H_s$  为有效波高; $\sigma$  为谱宽参数; $\gamma$  为谱峰值。本文考虑  $H_s=0.8$  m, $\omega_m=1.4$  rad/s,波形参数  $\gamma$  按平均波谱取 3.3。

### 1.4 系泊系统

根据现场施工方案采用 8 根锚缆进行系泊,系泊系统如图 3 所示。其中:1#、2#、3#、4# 缆为横调主锚缆,俯视平面上沿 Y 轴方向,直径为 72 mm;5#、6#、7#、8# 缆为纵调副锚缆,直径为

42 mm,波浪入射角方向定义为与 X 轴正方向夹角  $\theta$ 。建模时取管段上表面与水面齐平,吃水深度为 9.5 m,锚块安放在距离水面 22 m 的水底,在缆绳连接设置上采取常见的悬链线系泊单元 Catenary Section,并设置系泊缆属性为单一成分缆,材质为金属绳芯钢丝绳,水下锚块作为固定端和管段上对应的系缆桩以系泊缆 Cable 连接方式完成连接,本文分析该状态下的运动响应,为后续能够稳定安全的沉放施工提供保证。

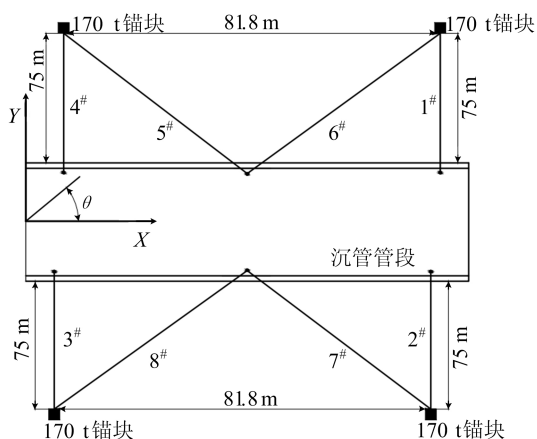


图 3 系泊系统

## 2 不规则波作用下频域分析

在进行沉管系泊分析之前需要运用势流理论,先考虑低频运动分析,获得沉管管段在不规则波作用下的运动响应。在系泊状态下的沉管管段低频响应动力方程<sup>[12]</sup>为:

$$[\mathbf{M}_s(\omega) + \mathbf{M}_a(\omega)]\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}'(\omega)\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_s(\omega)\mathbf{X} = \mathbf{F}_i(\omega) \quad (5)$$

其中: $\mathbf{M}_s$  为质量矩阵; $\mathbf{M}_a$  为低频附加质量矩阵; $\mathbf{B}'(\omega)$  为系泊状态下系统阻尼矩阵; $\mathbf{K}_s$  为系统刚度矩阵; $\mathbf{F}_i(\omega)$  为低频漂移力; $\mathbf{X}$  为运动幅值响应算子(response amplitude operator, RAO); $\omega$  为入射波频率。

系泊系统通常是指小阻尼低频共振系统, $\mathbf{F}_i(\omega)$ 一阶漂移力由波浪鼓励力与辐射力叠加得到,二阶波浪漂移力可通过近场方法对作用在管节湿表面上的压力进行积分得到,再将系泊系统刚度、管段质量等代入式(5)可获得管段附加质量、附加阻尼和 6 个自由度的 RAO 等。

管段附加质量曲线如图 4 所示。由图 4 可知,垂荡运动附加质量最大,其次是横荡与纵荡,主要是附加质量大小与物体自身形状和运动方向有关,而管段的垂向面积大于横向面积,更大于纵

向面积,故呈现出相同的大小关系排列。另外,管段的附加质量大小均基本随着波频的增大而减小,3 种运动方式减小的速度却各不相同,但在常见的波浪周期内即入射波频率在 0.8~1.2 rad/s 范围时,不同方向都存在不同程度的小波动。

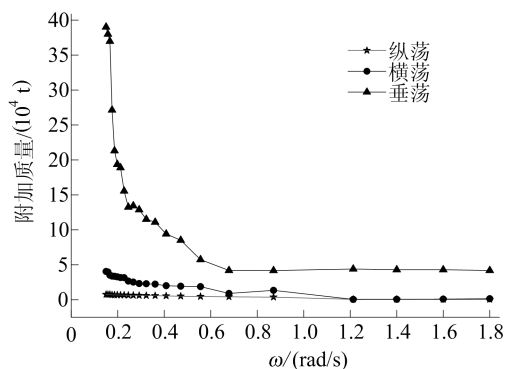
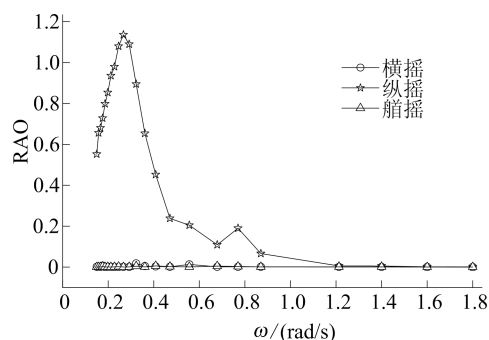
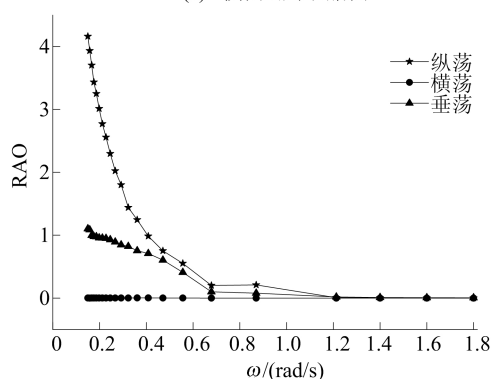


图 4 管段附加质量

在波浪入射角为 90° 条件下给出 6 种运动的 RAO 曲线如图 5 所示。



(a) 横摇、纵摇、艏摇



(b) 纵荡、横荡、垂荡

图 5 管段运动 RAO

RAO 含义是管段对应自由度运动幅度与波幅的比,是一个无量纲数,可以反映波浪作用下管段的运动响应特征。从图 5 可以看出,当波浪垂直管段入射时,纵荡、垂荡以及横摇较为明显,纵荡和垂荡在频率为 0.10~0.65 rad/s 范围内下降速度较

快,在频率为 0.65~0.80 rad/s 时出现小波动,其中纵荡出现小幅增加而后继续下降并最终趋于平稳。纵摇则是先增加后减小,频率为 0.30 rad/s 时出现最大值,同样在 0.65~0.80 rad/s 时出现小波动,在 1.2 rad/s 之后趋于稳定。

总体来说,管段在低频区域运动幅值响应较大,管段波动较大;在  $\omega \geq 0.80$  rad/s 的高频区域内,管段运动幅值明显降低,整体稳定性良好。

### 3 系泊状态时域耦合分析

处于波浪和水流作用下的管段及系泊系统所受到的荷载其本质上是相互影响、相互耦合的,为了更准确分析管段总体运动响应与系泊性能,考虑系泊缆与管段运动响应完全耦合的时域分析,分析起始时间为 0,时间步长为 0.1 s,共计模拟

10 800 s。通过计算求解可以得到管段运动响应情况、系泊缆张力历史记录,对结果进行统计分析获得相应极值。考虑管段与系泊系统的对称性,选取入射角  $0^\circ \sim 90^\circ$  的波浪进行计算,流速选择实际测量获得值 0.95 m/s。

不同环境力方向下 6 种 RAO 的计算数值见表 1 所列。从表 1 可以看出:在该系泊系统下沉管管段的纵荡最明显,其次是垂荡;主锚缆对横荡控制效果很好,当波浪与管段垂直入射时,纵荡和垂荡偏移量达到最大值;当波浪以  $30^\circ$  入射时,则是横荡偏移量达到最大。同时从整体数值来看,各方面运动响应幅值较小,由此可知该系泊系统对沉管管段整体的荡和摇晃控制得很好,能够提供较好的稳定性,为后续沉管管节对接安装提供保障。

表 1 系泊状态下管段运动响应

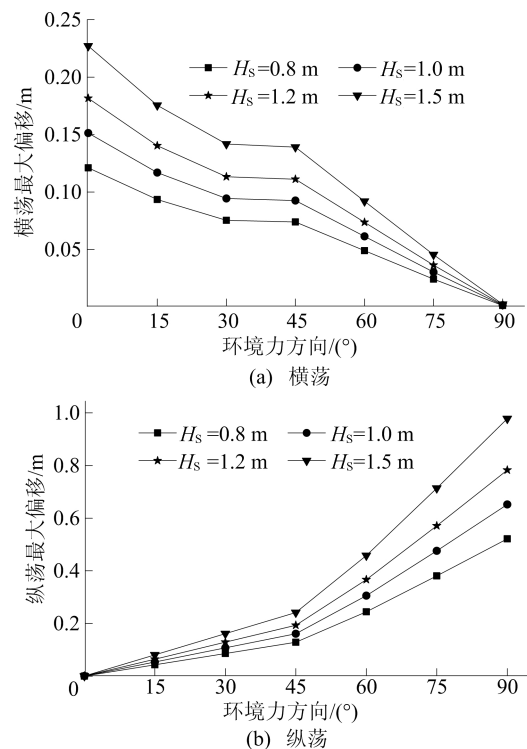
环境力方向/ $^\circ$	最大横荡/m	最大纵荡/m	最大垂荡/m	最大横摇/ $^\circ$	最大纵摇/ $^\circ$	最大艏摇/ $^\circ$
0	0.062 79	0.000 20	0.040 33	0.003 38	0.289 68	0.000 59
15	0.048 49	0.022 32	0.050 96	0.075 22	0.354 41	0.054 95
30	0.039 10	0.044 61	0.071 29	0.149 05	0.429 49	0.110 24
45	0.038 37	0.066 86	0.090 73	0.222 75	0.509 87	0.165 50
60	0.025 43	0.126 89	0.138 81	0.427 11	0.339 61	0.110 55
75	0.012 54	0.197 56	0.195 82	0.468 49	0.169 86	0.055 61
90	0.000 65	0.270 65	0.254 63	0.518 11	0.003 73	0.000 82

通过考虑不同有效波高  $H_s$  和不同环境力方向对管段偏移量进行计算分析,不同有效波高下管段最大偏移曲线如图 6 所示。有效波高即指波浪的高度,可反映环境中的波浪对沉管浮运的影响,也体现系统的抗浪能力。

从图 6 可以看出:随着有效波高的增加,横荡、纵荡以及垂荡均呈现明显增加的趋势,因此在实际沉管浮运阶段一定要选择好时机,在风平浪静的环境下可以大大减少管段的各方向偏移量,降低波浪带来的施工难度;随着环境力方向从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$ ,即从平行管段方向到垂直管段方向变化时,会发现横荡偏移量逐渐减小,而纵荡和垂荡的偏移量则是在一定合理范围内逐渐增加,这是由于该系泊系统主锚缆俯平面上垂直管段布置,主要起到横调管段作用,能够很好地抵抗该方向的力。按照施工方案的系泊方式,可以得出在不同波浪入射角的情况下,8 根锚缆所承受的最大缆绳张力,其中迎浪侧的锚缆张力要比背浪侧的大。

不同环境力方向状态下最大受力锚缆的编号、最大受力值及锚缆的平均受力值见表 2

所列。



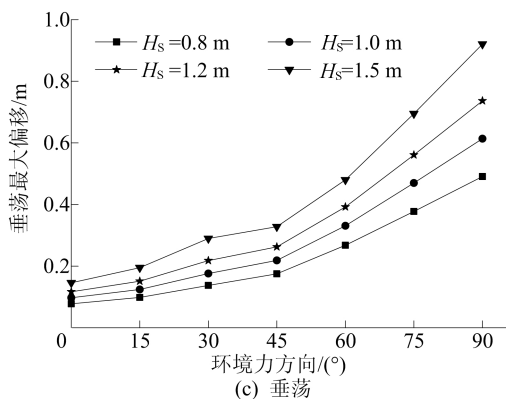


图 6 不同有效波高下管段最大偏移

从表 2 可以看出,当环境力方向为  $90^\circ$  时锚缆张力最大,主要由于在这个方向上迎浪面积最大,此时主要由 1# 和 4# 锚缆分担受力,且 4# 锚缆张力最大。同时可以发现最大受力只出现在 1#、2#、4# 主锚缆上,另外 5#~8# 副锚缆受力均较小,故表 2 中平均值给出 4 根主锚缆的平均受力情况。由此得出实际系泊施工时,根据对称性应注意主锚缆刚度的选择,副锚缆在安全性条件下考虑经济性可以不与主锚缆选择相同刚度。

表 2 不同环境力方向下系泊缆张力

环境力方向/ $^\circ$	最大受力锚缆编号	张力/kN	
		最大值	平均值
0	4#	181	152
15	1#	488	302
30	2#	912	708
45	4#	1 119	1 087
60	2#	818	685
75	1#	639	562
90	4#	1 892	927

## 4 结 论

1) 在不规则波荷载作用下对管段进行频域分析,得到管段在低频区域内波动较大,在  $\omega \geq 0.80$  rad/s 的高频区域内运动响应幅值很小,并在 1.20 rad/s 之后会趋向于平稳状态,此时管段整体稳定性良好。

2) 通过改变不同有效波高整理管段运动响应情况,可以发现有效波高越高,管段运动响应影响也会越大;在随着环境方向力由平行转变为垂直于管段施加的过程,发现不同有效波高条件下横荡偏移均大幅降低,在一定程度上反映了主锚缆在横荡上的控制效果,因此在系泊系统设计时

要考虑有效波高带来的影响及浮运施工前选择好窗口期降低风险性。

3) 时域分析中,考虑了荷载作用下的管段与系泊系统的耦合,两者互相影响,最终发现当环境力垂直管段施加时,管段的纵荡和垂荡偏移量达到最大,当波浪入射角为  $30^\circ$  作用管段时,横荡达到最大。从整体各项数值来看,认为本文采用的系泊系统对横荡和整体稳定性控制较好,但本文只研究了管段浮运系泊系统下的水动力响应,下一步将希望对沉放过程中系泊系统的运动响应与锚缆受力情况进行分析讨论。

4) 当波浪入射角为  $90^\circ$  (即垂直管段施加) 时,系泊锚缆张力最大,并且迎浪侧锚缆受力大于背浪侧,从对称角度来看 4 根主锚缆为主要受力对象,承受缆绳张力会较大,而副锚缆受力相比之下则小很多,因此在系泊系统初步设计时应首先注意主锚缆刚度。

## [参 考 文 献]

- [1] 朱升,毛军. 沉管隧道浮运水动力学性能的数值分析[J]. 北京交通大学学报,2010,34(1):25-29.
- [2] 周敏. 沉管隧道浮运水动力学的模型试验研究[D]. 北京: 北京交通大学,2015.
- [3] 杨璨,王永学. 锚碇沉管系统平台沉放的水动力特性试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2016,37(1):30-35.
- [4] 左卫广. 波浪力作用下驳船沉放方式沉管管段运动的研究[D]. 大连: 大连理工大学,2015.
- [5] 邵忠安. 沉管管段系泊状态下缆绳受力试验研究[D]. 大连: 大连理工大学,2011.
- [6] 熊正元,杨春山,陈凌伟,等. 沉管隧道变截面管段浮运与沉放水动力特性及方案评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):88-93.
- [7] 雷林,刘添宇,袁培银,等. 基于 AQWA 的大型游船码头系泊水动力性能分析[J]. 中国水运,2017(5):41-44.
- [8] 朱玲,胡金鹏. 基于 AQWA 的波浪观测浮标随波性能分析与优化研究[J]. 广东造船,2018,37(2):50-54,63.
- [9] 王世明,邹伟. 基于 AQWA 的漂浮式海洋装置载体锚泊系统耦合分析[J]. 海洋开发与管理,2016,33(8):55-59.
- [10] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司. 港口工程荷载规范:JTS144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司,2018:1-21.
- [11] MOLIN B. 海洋工程水动力学[M]. 刘水庚,译. 北京: 国防工业出版社,2012.
- [12] 高巍,董璐,黄晶,等. ANSYS AQWA 软件入门和提高[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2018.

(责任编辑 吴 亮)