

沉埋式海底隧道管段海上系泊水动力性能分析

彭泽宇, 刘祚秋

(中山大学工学院应用力学与工程学系, 广东 广州 510006)

摘要: 沉埋式海底隧道管段海上系泊阶段的结构运动响应及缆索受力, 影响其水上施工的安全性和经济性。以一管段系泊工程为例, 利用基于三维势流理论的水动力软件 AQWA 建立管段海上系泊数值仿真计算模型, 首先对系泊系统进行频域分析, 然后在时域内考虑 JONSWAP 波浪谱和水流联合作用, 研究环境载荷方向、环境载荷组合方式等因素对系统运动响应及缆索受力的影响。结果表明: 管段在高频区域内稳定性较好, 响应幅值很小; 水流对管段的运动响应影响很大; 当环境力以 60° 入射管段时, 管段的系泊缆张力最大。

关键词: 沉管管段; 海洋环境; 系泊状态; 水动力分析

中图分类号: U 459.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0037-05

Hydrodynamic performance of immersed subsea tunnel element under mooring condition

PENG Ze-yu, LIU Zuo-qiu

(College of Engineering, SunYat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The safety and economy of over-water construction are affected by the motion response and mooring performance of immersed subsea tunnel element on the sea. For a mooring project of tunnel element, we establish the numerical simulation model by hydrodynamics simulation software AQWA based on the 3-D potential flow theory and analyze the frequency responses of tunnel element. Considering the JONSWAP wave spectrum and current loads, we analyze the motion response and mooring performance in different directions of the environmental load and combined load. The result shows that the motion response of the immersed tunnel element is favorable in the high frequency region, and the response amplitude is small; the influence of currents for the element is enormous; the mooring force is more serious when the direction reaches 60 degrees. This study provides a theoretical basis for the design of mooring system design and construction.

Keywords: immersed tunnel element; sea condition; mooring condition; hydrodynamic analysis

沉管隧道是一种新型跨江跨海的水下交通结构, 因其在经济和技术上的独特优势, 得到了广泛的关注和应用。沉管管段在干船坞上预制好, 然后浮运至相应位置, 经过定位后沉放至事先挖好的水下基槽内。

由于海洋环境较内河而言更为复杂, 需要考虑风浪流等载荷对管段的综合作用, 再加上管段的高成本以及海底隧道工程的重要性, 所以在施工过程中必须等待最佳水文和气象条件。在系泊

等待阶段, 管段与浮驳通过支墩连接, 其在波浪流中的运动状态及控制缆索受力情况直接影响沉放初步定位的精确性和沉放的稳定性。因此对管段系泊状态下运动响应和缆索受力的研究, 在缆索的设计和管段系泊方案确定等方面具有很大的指导意义。

目前沉管隧道的相关研究主要集中在管段浮运沉放过程中的水动力分析、抗震分析、接头防水分析等方面。其中, Toshio Aono 等^[1]对日本那

收稿日期: 2014-06-06

作者简介: 彭泽宇 (1990—) 男, 硕士研究生, 研究方向为水运工程设计与优化。

霸沉管隧道沉放中管段在不同波浪条件下的稳定性进行了研究；Harkkaart^[2]对 Boston 沉管隧道管段浮运过程中波浪的作用进行了研究；陈智杰^[3-4]对沉管的沉放过程分别进行了时域分析和频域分析；此外，潘永仁^[5]、詹德新^[6]、周瑜^[7]等学者也分别针对不同工程，采用数值模拟或模型试验的方式进行了研究。但是现阶段对于复杂海况中沉管系泊状态下的响应分析研究较少，其中，邵忠安^[8]针对沉管管段系泊状态下缆绳受力进行了试验研究。

本文首先通过 ANSYS 软件建立数值模型，然后利用水动力计算模块 AQWA 对复杂海况中沉管管段系泊状态下的运动响应和缆索的受力情况进行研究，为工程实际中的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 沉管管段模型及坐标系定义

本文以韩国釜山-巨济沉管隧道工程数据为参考，选择典型管段尺寸为 $L \times W \times H = 180 \text{ m} \times 26.46 \text{ m} \times 9.97 \text{ m}$ ，其截面尺寸见图 1。

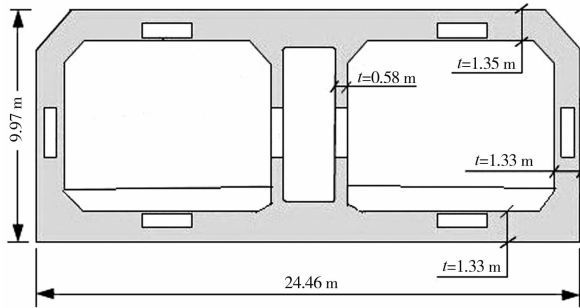


图 1 沉管管段横截面

利用有限元软件 ANSYS，建立沉管管段三维实体模型，同时赋予相应的几何、物理和材料属性，建模时采用模拟精度更高的板壳单元，并用四边形网格进行网格划分（图 2）。然后导入水动力分析模块 AQWA 中，设置相应环境参数后进行分析计算。

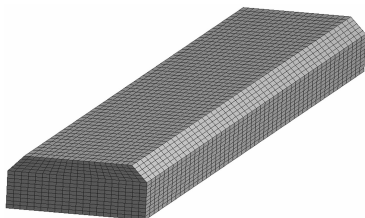


图 2 沉管管段实体模型

1.2 海洋环境条件

本文选择 JONSWAP 谱模拟不规则波^[9]，如下式所示：

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[-0.5\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right] \quad (1)$$

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

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

式中： ω_p 为谱峰频率； g 为重力加速度； α 为广义菲利普常数； H_s 为有义波高； σ 为谱宽参数； γ 为谱峰值参数。

考虑 $H_s = 0.8 \text{ m}$ ， $\omega_p = 1.4 \text{ rad/s}$ ， $\gamma = 3.3$ 。在外海区域主要是由风引起的流，具有表层流的性质，常假定水流不随深度变化而取某一平均水流速度。由于沉管管段系泊状态下受风面积很小，对风载荷不是很敏感，所以可忽略风载对管段的作用力。

1.3 系泊方案

选择如图 3 所示的 8 缆对称系泊，其中 1#、4#、5#、8# 缆与 Y 轴夹角为 10°，2#、3#、6#、7# 缆与 Y 轴夹角为 45°，环境力的入射方向定义为与 X 轴正向夹角 α 。

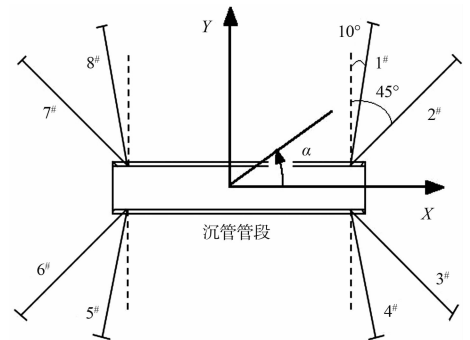


图 3 系泊方案

2 辐射/绕射频域分析

在对沉管管段及其系泊系统进行分析之前，需要应用三维势流理论，在频域内对其进行辐射/绕射频域分析，计算沉管管段在不同浪向角和频率的规则波作用下的响应，为后续在不规则波下的时域分析提供数据。

沉管管段运动方程为：

$$[\mathbf{M}_s(\omega) + \mathbf{M}_a(\omega)] \times \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(\omega) \times \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_s(\omega) \times \mathbf{x} = \mathbf{F}(\omega) \quad (4)$$

式中: \mathbf{M}_s 为结构质量矩阵; \mathbf{M}_a 为水动力附加质量矩阵; \mathbf{C} 为系统线性阻尼矩阵; \mathbf{K}_s 为系统总刚度矩阵; \mathbf{F} 为系统所受的波浪力; \mathbf{x} 为幅值响应算子 (RAO); ω 为入射规则波频率。

其中一阶波浪力 $\mathbf{F}(\omega)$ 由波浪激励力和辐射力叠加得到, 二阶波浪漂移力可通过近场方法直接积分作用在管段湿表面上的压力得到, 最后代入式(4)可以得到沉管管段的附加质量、附加阻尼、一阶波浪力和六自由度运动响应 RAO 等。

图 4 分别给出了管段纵荡、横荡、垂荡这 3 种运动的附加质量, 可以看出, 垂荡的附加质量大于横荡、大于纵荡, 这是由于管段的垂向面积大于管段的横向面积、大于纵向面积, 因而管段的垂荡附加质量最大, 纵荡附加质量最小。并且, 管段的附加质量基本是随波浪频率的增加而减小的, 在不同方向上减小的速度不同, 但是入射波频率为 0.8 ~ 1.2 rad/s 时, 即在常见的波浪周期内, 会出现一个小的波动。

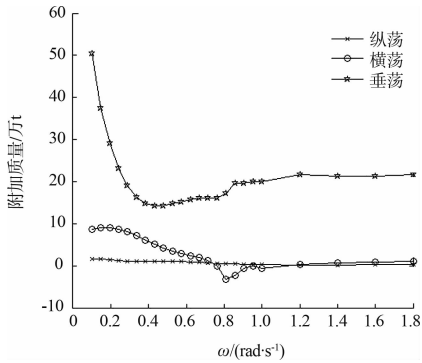


图 4 管段附加质量

图 5 分别给出了管段纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇这 6 种运动的幅值响应算子 (RAO), 其为一个无量纲数, 可用来考察管段的摇荡特性。从图 5 可以看出, 当规则波垂直管段入射时, 管段的纵荡、垂荡和纵摇是较为明显的。其中, 纵荡和垂荡都是在频率 0.1 ~ 0.4 rad/s 之间下降, 在 0.4 ~ 0.8 rad/s 之间出现一个小的波动, 并且在 0.6 rad/s 处出现峰值, 之后趋于平缓。纵摇则是先增加后减小, 峰值出现在 0.4 rad/s 处,

在 0.8 ~ 1.2 rad/s 之间出现一个小的波动, 之后趋于平缓。整体来说, 管段在高频区域内 ($\omega \geq 0.8$ rad/s) 响应幅值很小, 稳定性良好。

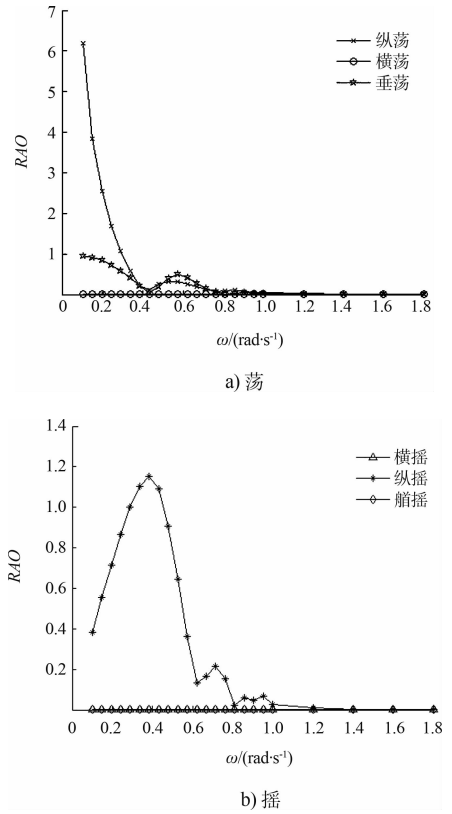


图 5 管段自由幅值响应算子

3 时域耦合分析及系泊性能研究

为了能够准确分析沉管管段的总体响应和系泊性能, 在时域内求解总体运动方程, 并且考虑系泊缆与管段是完全耦合的。计算时, 步长设为 0.4 s, 共取 20 000 步, 通过求解总体运动方程可以得到管段响应、系泊缆张力的历史记录, 其结果可以用来做统计分析并得到极值。

考虑到管段和系泊方式的对称性, 分别选取入射角为 0° ~ 90° 的波浪流进行计算, 流速选择 1.07 m/s。

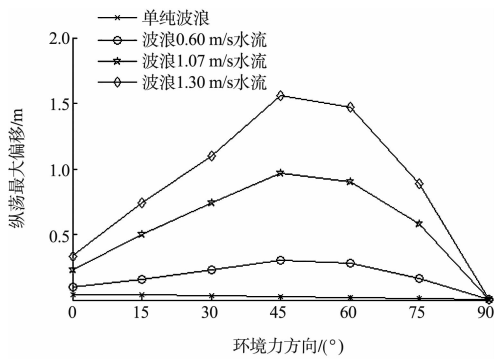
从表 1 可以看出该种系泊状态下的沉管管段纵荡运动最明显, 横荡次之, 缆索对垂荡的控制很好。当波浪流垂直入射管节时, 横荡和垂荡偏移达到最大, 当波浪流以 45° 入射时, 纵荡达到最大值。同时可以看出管段无论是横摇、纵摇还是艏摇的摇晃角度都很小, 说明该系泊方式对沉管管段整体的摇晃控制得很好。

表1 系泊状态下沉管管段运动响应

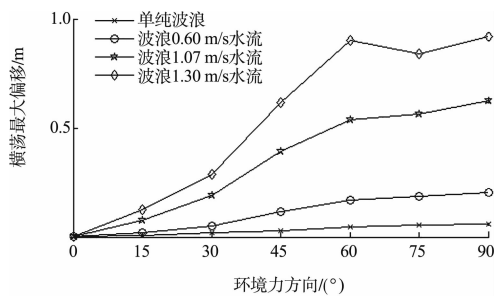
环境力方向/(°)	最大纵荡/m	最大横荡/m	最大垂荡/m	最大横摇/(°)	最大纵摇/(°)	最大艏摇/(°)
0	0.230 60	0.000 02	0.007 98	0.000 03	0.007 48	0.000 04
15	0.501 35	0.076 75	0.010 83	0.027 03	0.013 12	0.038 98
30	0.744 69	0.191 42	0.016 03	0.044 52	0.017 58	0.097 27
45	0.965 48	0.393 03	0.020 96	0.099 27	0.019 96	0.184 90
60	0.901 16	0.538 05	0.023 55	0.154 14	0.016 47	0.231 15
75	0.582 69	0.564 70	0.022 14	0.180 43	0.009 88	0.165 93
90	0.000 05	0.622 99	0.024 59	0.233 31	0.000 02	0.000 09

从图6可以看出,单纯波浪条件下沉管管段的运动响应是很小的,当波浪和水流共同作用时,纵荡、横荡、垂荡的最大偏移都增加,水流相较于波浪对管段运动的影响大得多,所以在设计系泊系统的时候一定要注意管段在大流速水流中的运动响应情况。

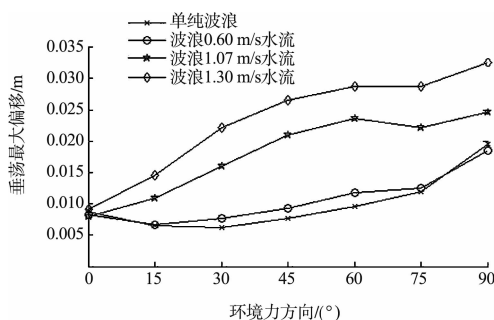
按照设计方案的系泊方式,可以得到不同波浪流入射角度情况下,8根缆索所承受的最大缆力,其中迎浪侧的缆索受力要比背浪侧大得多。从表2可以看出当环境力方向为60°时,管段的系泊缆张力最大,因为此方向上,管段迎浪和受流面积最大,所以其受到很大的环境载荷。管段的环境力主要由该方向上的6#系泊缆分担,由对称性可知2#、3#、6#、7#缆(即与Y轴成45°的4根缆绳)发生断裂的风险较高,在系泊系统设计时要注意其刚度的选择。



a) 纵荡



b) 横荡



c) 垂荡

图6 管段在波浪与不同水流流速下的最大偏移

表2 不同环境力方向下系泊缆张力情况

环境力方向/(°)	最大受力缆索编号	最大值/kN	平均值/kN
0	6/7	478	311
15	6	946	577
30	6	1 410	858
45	6	1 923	1 214
60	6	1 939	1 283
75	4	1 618	1 030
90	4/5	1 464	945

4 结论

1) 通过频域分析,得到沉管管段在高频区域内($\omega \geq 0.8 \text{ rad/s}$)响应幅值很小、稳定性良好,在低频区域内会有一些波动。

2) 比起单纯的波浪作用,波浪和水流共同作用时的水平位移要大得多,水流相较于波浪对管段运动的影响大得多,所以在设计系泊系统的时候一定要注意管段在大流速水流中的运动响应情况。

3) 通过时域分析,发现当环境力以垂直方向施加时,管节的横荡和垂荡偏移达到最大,当波浪流以45°入射时,纵荡达到较大值。本文8缆系

泊方式对管段的垂荡和整体摇晃控制很好, 可为实际工程的系泊方案选择提供参考。

4) 当波浪流以 60° 入射管段时, 系泊缆张力最大, 而且迎浪侧的缆索受力要比背浪侧大得多, 该系泊方式主要受力缆是与 Y 轴成 45° 的 4 根缆索, 在初步设计时, 应注意这 4 根缆索的刚度。

参考文献:

- [1] Aono T, Sumida K, Fujiwara R, et al. Rapid stabilization of the immersed tunnel element[C]. Portland, Oregon: Proceedings of the Coastal Structures 2003 Conference, 2003.
- [2] Hakkaart C J A. Transport of tunnel elements from Baltimore to Boston, over the Atlantic Ocean[J]. Tunnelling and Undergroud Space Technology, 1996, 11(4): 479-483.
- [3] Chen Zhi-jie, Wang Yong-xue, Wang Guo-yu, et al. Frequency responses of immersing tunnel element under wave actions[J]. Journal of Marine Science and Application, 2009, 8 (1): 18-26.

- [4] Chen Zhi-jie, Wang Yong-xue, Wang Guo-yu. Time-domain responses of immersing tunnel element under wave actions [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21 (6): 739-749.
- [5] 潘永仁. 上海外环沉管隧道大型管段浮运方法[J]. 施工技术, 2004, 33(5): 52-54.
- [6] 詹德新, 张乐文, 赵成璧, 等. 大型管节水面浮运及沉放数值模拟和可视化实现[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工版, 2001, 25(1): 16-20.
- [7] Zhou Yu, Tan Jia-hua, Yang Jian-min, et al. Experimental investigation on element immersing process of immersed tube tunnel [J]. China Ocean Engineering, 2001, 15(4): 531-540.
- [8] 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.
- [9] Bernard Molin. 海洋工程水动力学[M]. 刘水庚, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 36 页)

6 结语

基于 ANSYS-DYNA 构建了耙齿土壤切削的三维数值计算模型, 说明 ALE 方法能有效地模拟耙齿切削土壤的工作过程。然后, 分析了不同切削深度以及不同切削速度下所得到的切削阻力, 并通过所建立的力学计算模型进行估算, 证实了 ALE 方法在处理切削大变形时的可靠性。

将修正的 Drucker-Prager 黏塑性本构模型作为土体的非线性有限元模型, 在切削过程中能反映土体的变形情况, 仿真结果与切削过程物理现象基本符合。

由于在实际作业过程中, 耙齿是在水下作业, 因此, 在边界条件和工作环境的处理上要充分考虑水压力等因素对于切削问题的影响, 这也是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 洪国军, 林风, 王健. 耙齿切削饱和硬质土的试验研究[J]. 水运工程, 2008 (8): 98-104.

- [2] Asaf Z, Rubinstein D, Shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92 (1-2): 227-242.
- [3] Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 61-73.
- [4] 丁峻宏, 金先龙, 郭毅之. 土壤切削大变形的三维数值仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 118-121.
- [5] 蒋建东, 高洁. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(25): 33-38.
- [6] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 广义塑性力学——岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] Lewis B A. Manual for LS-DYNA soil material model 147[R]. USA: Department of Transportation: Federal Highway Administration, 2004.
- [8] 崔国华, 王国强, 王继新, 等. 全断面盾构掘进机切削刀具的计算力学模型求解[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008(S2): 141-143.

(本文编辑 武亚庆)