

· 施 工 ·



沉管隧道长大管节海上施工物理模型 试验思路与结果分析*

梁邦炎, 卢普伟

(中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510231)

摘要: 长大管节海上寄放、浮运和沉放过程中的受力和运动响应是沉管施工需要考虑的重要参数, 现有的结构力学和流体力学均无法精确计算。基于相似理论和相对运动概念, 在拖曳水池完成了沉管管节寄放、浮运和沉放系列水动力学试验, 得到了沉管管节在不同风浪流载荷组合作用下的管节受力和运动响应, 可为数值仿真分析提供关键参数取值依据, 也可为长大管节的施工提供借鉴。

关键词: 沉管; 寄放; 浮运; 沉放; 缆力; 运动响应

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0170-007

New thought of physic model test and result study on immersed tube tunnel element construction

LIANG Bang-yan, LU Pu-wei

(CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510231, China)

Abstract: The force and motion response of the immersed tube tunnel element aren't important parameters of immersed tunnel construction. The immersed tube tunnel element that deposit, float and sink to the sea bed is the world's longest and widest immersed tunnel. We can't calculate it accurately using the computational structural mechanics and the computational fluid dynamic. In order to study the hydrodynamic behaviors of element during its construction, we carry out a scaled model test to investigate the motion responses of the tunnel element in the immersion under wave and obtain current actions and tensions acting on the controlling cables of its immersing system based on the similarity theory, which may serve as a basis for the key parameters in the numerical simulation analysis, and a guidance to the construction of the immersed tunnel.

Key words: immersed tube tunnel; storage; floating; sinking; mooring force; motion response

近年来, 采用沉管法建造的水下隧道越来越多, 国内正在建造的沉管隧道有4条, 分别是港珠澳大桥、广州洲头嘴隧道、天津中央大道海河隧道、沈家门港海底隧道工程, 其中港珠澳大桥沉管隧道为目前世界上最长的、单节管体积最大的沉管隧道, 全长为5 990 m, 基槽设计底高程约-46 m, 隧道单节管长达180 m, 质量达74 000 t。港珠澳大桥管节寄放、浮运和沉放施工区域位于

珠江口外海台风频发地区, 施工周期长, 环境条件极为复杂。管节在施工过程中可能存在搁浅、应力破坏、操作失控等风险, 发生这些情况修复难度大, 后果严重, 因此针对长大管节海上寄放、浮运和沉放施工技术的研究一直备受关注^[1]。

国内多个隧道都开展过物理模型试验研究, 但相关的文献报道不多, 系统性的研究更少。在长大管节浮运和沉放施工技术方面, 以往对沉管管节

收稿日期: 2012-12-05

*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01)

作者简介: 梁邦炎(1981-), 男, 工程师, 从事港口航道工程、公路桥梁设计施工技术研发。

进行的水动力物理模型试验, 多是针对具体的工程项目进行的, 在经验数据积累和规律总结方面所做的工作不够, 对其他工程的借鉴意义不大^[2-4]。如何利用模型试验, 比较准确地预报隧道管节在海洋环境下的运动和受力问题显得十分重要。

1 物理模型试验目的

本文依托港珠澳大桥沉管隧道工程, 在采用数值模拟手段分析长大管节海上施工全过程的基础上, 提出了物理模型试验研究主要目的: 1) 针对不同工况, 测试和分析沉管管节在寄放、浮运和沉放过程中的运动特征及稳定性, 验证数值仿真分析结果; 2) 确定阻力系数、附加质量及阻尼系数等水动力学参数, 为数值模拟分析提供取值依据。

2 物理模型试验思路和结果分析

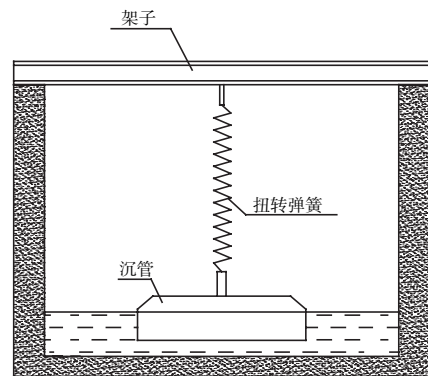
本试验基于相似理论和相对运动概念, 在拖曳水池完成了沉管管节系列水动力学试验, 主要包括管节静水状态、坞内寄放及出坞、管节浮运、管节定位系泊、管节压载沉放状态等5大类型试验。根据传统海洋工程水动力学试验经验和试验水池的条件, 模型试验需满足以下相似准则^[5]:

- 1) 几何相似准则, 保证沉管、沉放吊驳及基槽按照同一比例缩小;
- 2) 运动和动力相似准则, 模型与实际尺度的速度关系要满足傅汝德数相同;
- 3) 系泊缆绳相似, 系泊缆绳模型应根据几何相似、质量力相似和弹性相似进行制作和模拟。

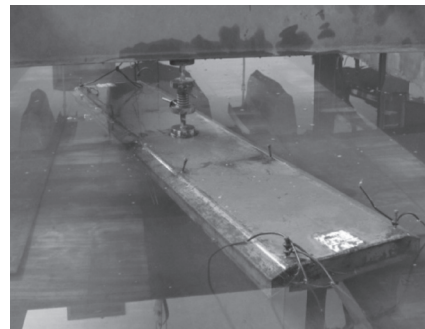
2.1 静水状态试验

静水状态试验中选实体与模型之间的线性尺度比为1:80。试验基于弹簧单自由度有阻尼自由振动系统特性, 通过测试管节在不同水深情况下6个自由度(横荡、纵荡、横摇、纵摇、垂荡、艏摇)运动下的加速度及频率, 确定附加水质量、阻尼等主要水动力学参数, 为后续试验、数值计算提供依据。其中静水状态试验(首摇)布置见图1。

在静水状态试验中, 附加水质量和阻尼均随着水深的增大而减小; 当水深增大某一深度(30 m



a) 示意图



b) 实体图

图1 静水状态试验布置(首摇)

左右)时, 附加水质量和阻尼基本保持不变, 说明沉管在浅水状态(20 m以内)时, 管节的运动特征受水深变化影响大; 此外试验还说明, 不同自由度下附加水质量和阻尼的大小不同, 从大到小依次是垂荡、横荡、纵荡(图2, 3)。

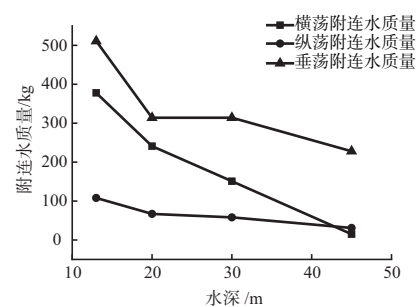


图2 附加水质量与水深的关系

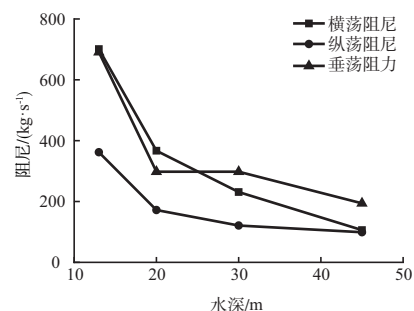


图3 阻尼与水深的关系

2.2 坞内寄放和出坞试验

管节制作完成后会存放在寄放区，时机成熟时通过钢丝绳绞移的方法浮运出坞。试验中为模拟寄放状态的过程，构造了13 m水深的平假底来模拟坞内水深。出坞试验时构造坞内外不同流场影响。出坞试验布置见图4。

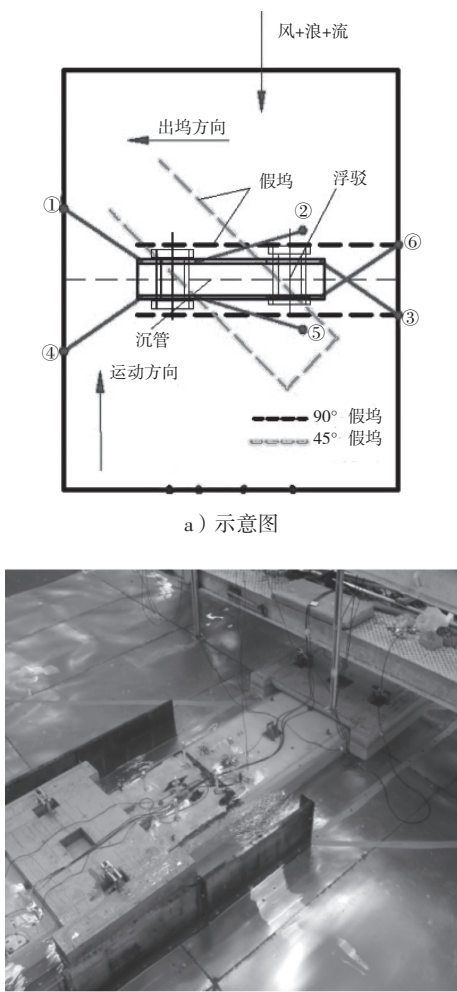


图4 出坞试验布置

在坞内寄放试验中，测试了在纯风（12级）作用下各缆绳的张力和管节的运动响应，结果表明：随着风向角增大，系泊缆绳缆力分配越发不均匀，最大值为261 kN。随着风向角增大，管节的运动响应增大，管节运动响应以横荡为主，最大值为0.071 m，测试结果如图5和6所示。

在出坞试验中，测试了在风浪流作用下各缆绳的张力和管节的运动响应，结果表明，缆绳受力分配不均，并且主要集中在①③⑥这三根缆绳。由于出坞时，管艏暴露在坞外浪流的作用下，所

以出坞的长度对首部缆绳受力影响较大，随着出坞长度的增加而增大；管节在出坞时以横荡为主，随着出坞长度增加而增大；在浪流作用角45°情况，最大缆绳力为5 520 kN，最大平动响应幅度为0.338 m。不同出坞长度情况各缆绳受力和运动响应见图7和8。

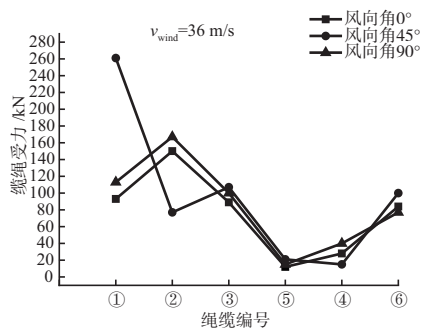


图5 不同风向角时坞内寄放各缆绳受力

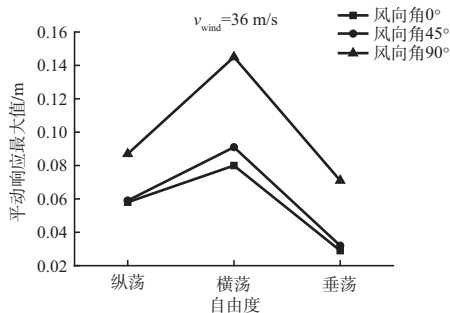


图6 不同风向角时管节平动响应最大幅值

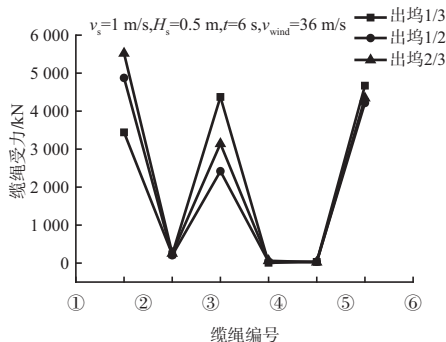


图7 风浪作用下不同出坞长度各缆绳受力

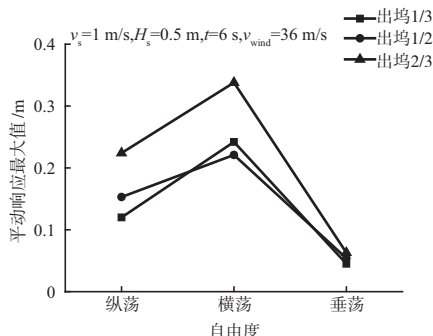
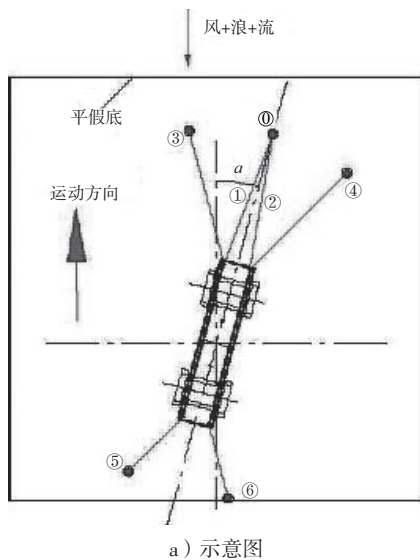


图8 风浪流作用不同出坞长度时管节平动响应最大幅值

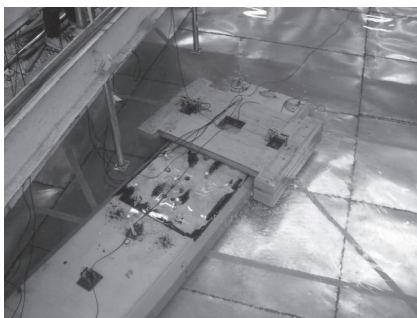
2.3 浮运状态物理模型试验

管节在外海拖运过程中受风浪流联合作用, 管节的稳性和可操作性尤为重要, 但是对大型钝体结构的水阻力计算问题, 目前尚无相关可依据的规范。因此, 通过浮运物理模型试验, 得到整个过程中管节系泊缆绳受力和管节运动响应。

试验前根据相似准则分别制作沉管管节模型、基槽模型、沉放吊驳模型, 将基槽模型固定在拖车上, 其它模型则根据实际布置形式固定在基槽上。试验时基槽模型随拖车按相应流速前行, 同时在船池另一端制造波浪和风载荷, 如图9所示。



a) 示意图



b) 实体图

图9 浮运试验布置

由于管节浮运过程中, 需要经过不同水深航道, 并且将会遭遇不同方向风浪流作用, 情况非常复杂, 本试验研究通过典型的工况试验总结规律, 为数值仿真提供验证。结果表明, 在管节浮运过程中, 管节迎流向缆绳为主要受力缆绳; 缆绳缆力波浪增阻较为明显, 在迎浪时最大增幅达

到96%, 如表1所示; 管节浮运的总阻力与航速近似指数增长关系, 并且在航速越大时, 增加越明显, 如图10所示; 在试验中测试缆绳的受力, 发现缆绳受力分配不均, 随着迎浪角度的增大, 缆力逐渐增大; 随着流速和波浪的增大, 管节的运动响应增大, 最大的平动响应为纵荡, 幅值为0.173 m; 最大的转运响应为横摇, 最大角度为0.846°。

表1 不同航速和角度下波浪增阻力百分比 %

H_s/m	迎浪角度/(°)	$V_s/(m \cdot s^{-1})$		
		1.0	1.5	2.5
0.8	0	96	76	61
	15	85	74	53
	30	72	62	49
1.0	0	90	75	63
	15	79	72	51
	30	66	60	61

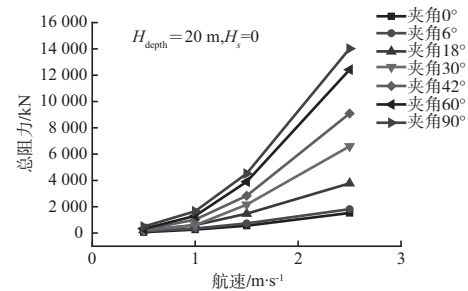


图10 浮运总阻力与航速关系

根据流体动力学原理, 水流对管节的阻力大小可以表示为^[6]:

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

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。

实际上应用上述公式, 关键在于阻力系数 C_w 的选取, 该系数的取值一般认为受水面宽度、水深、管节形状及水流流态等因素影响^[7]。由静水拖曳模型试验可以得到静水拖航的水阻力系数, 见图11和12。

在试验中, 水流阻力系数随着拖曳角的增大呈现先增大后减小、再增大的趋势, 随着水深的减小而增大, 特别是航速较大 ($> 1.5 \text{ m/s}$) 时, 浅水效应更加明显。

随着水深的减小, 沉管管节在下沉力和横倾力矩的作用下, 沉管艏部易上水, 有可能发生前

倾及触底。在13 m,14 m,15 m和20 m几个水深试验中,发生触底现象的临界条件如下:1)水流夹角大于42°时,管节相对于水流航速超过2.0 m/s就会发生触底现象;2)水流夹角大于60°时,管节相对于水流航速超过1.5 m/s就会发生触底现象;3)相对航速 ≤ 2.5 m/s,水深 ≥ 14 m时,管节无触底现象。

2.4 沉放状态物理模型试验

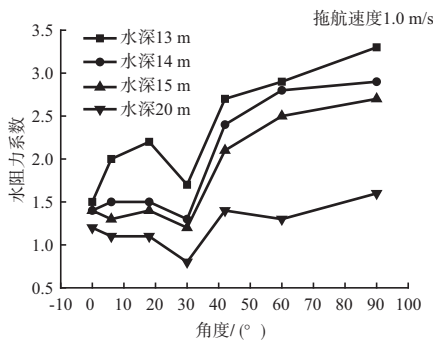


图11 水阻力系数与拖曳角关系

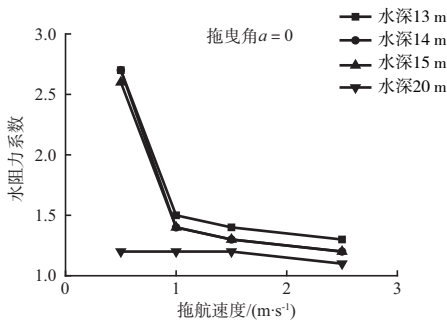
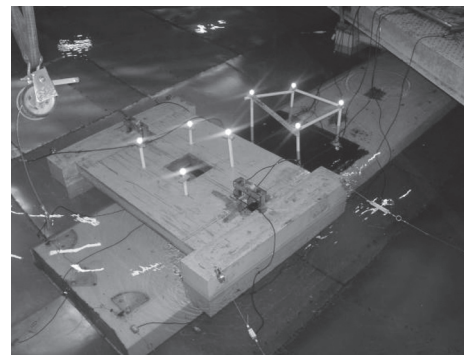
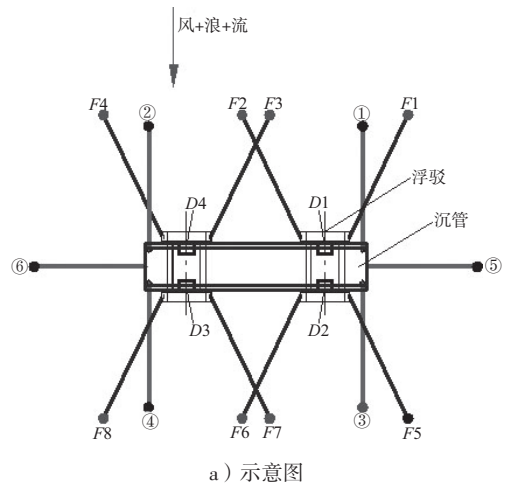


图12 水阻力系数与拖航速度关系

沉管管节在沉放阶段时,管节通过吊索与水面上的沉放驳连接,沉放驳在海面作业时受到风、浪、流的联合影响,情况复杂,需对整个沉放过程进行模拟试验。与浮运试验相似,不同的是在管节内部增加布置了6个与实型相似的水箱,且水箱上方布置了水密的注水管,便于在管节沉放过程中注水为管节提供足够的负浮力。将基槽模型固定在拖车上,其它模型则根据实际布置形式固定在基槽上,然后随拖车按相应流速前行,同时在船池另一端制造波浪和风载荷,整个过程中可以得到管节系泊沉放缆绳受力和管节运动响应,其试验布置如图13所示。

在相同风浪流载荷作用下,测试沉管管节在



b) 实体图

图13 沉放试验布置

有沉放吊驳连接和无沉放吊驳连接的两种情况中的运动受力情况。在同一负浮力、测试不同风浪流组合工况下吊缆力情况,试验结果表明:

1) 无沉放吊驳的单个管节横漂力明显比管节-沉放吊驳系统的横漂力要大,横漂力随着流速的增大而增大,近似线性关系,如图14所示。

2) 沉管系缆力随着流速和浪高增大而增大;沉管吊缆缆力在沉管刚浸没水面时缆力最大,而且受风浪流的影响较大;随着沉放深度的增加,沉管和吊驳系缆力逐渐减小,受风浪流的影响也越小;在同一浪高、不同流速工况情况下,随着流速的增加,缆力逐渐增大;在沉管系泊系统中,迎流面的1#和2#缆绳缆力最大,5#和6#缆绳缆力次之,背流面的3#和4#横调节缆力最小,如图15~17所示。

3) 沉管的响应随着浪高的增大而增大,并且以纵荡响应为主;在相同假底,不同沉放深度试验中,沉管响应随着沉放水深的增加而减小,如图18所示;浮驳的响应具有类似的规律,浮驳的

响应幅值比沉管的要大一些, 而且随着沉放深度的增加, 递减得更快, 如图19所示。

4) 由于负浮力的增加, 相当于增加了沉管的“实际有效重力”, 所以在相同作用力的情况下, 响应也会变小, 在同一沉放水深、浪高及流

速, 不同负浮力情况试验中, 可以得到此结论, 如图20所示。

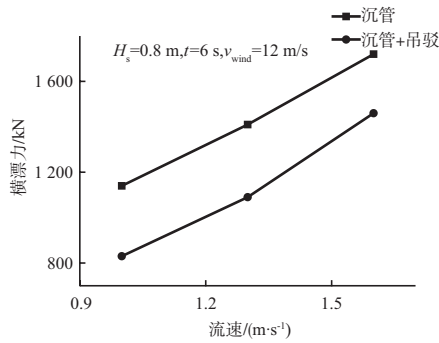


图14 沉管与沉放吊驳系统在风浪流作用下横漂力

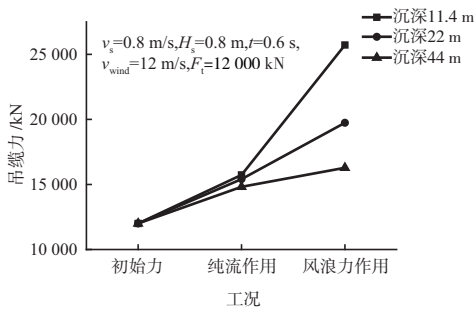


图15 不同沉放深度吊缆力

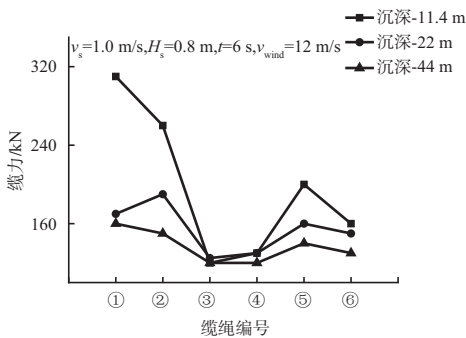


图16 不同沉放深度沉管缆力

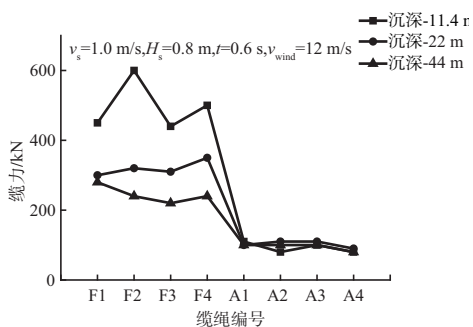


图17 不同沉放深度沉放吊驳缆力

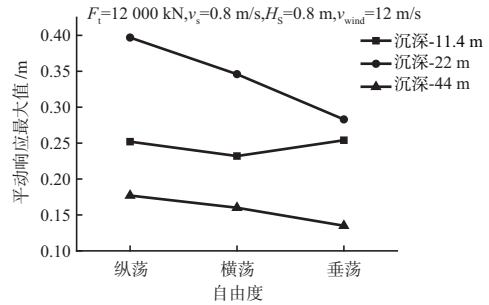


图18 不同沉放深度沉管平动响应

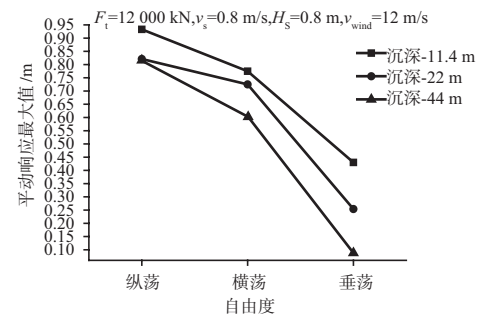


图19 不同沉放深度浮驳平动响应

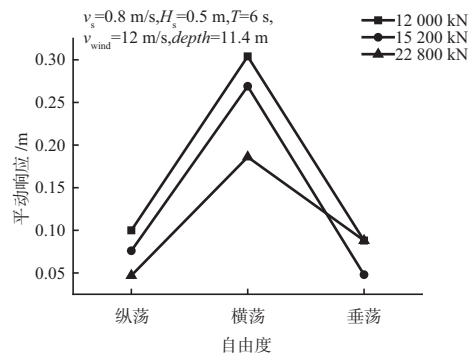


图20 不同负浮力沉管平动响应

3 结语

1) 管节出坞过程中, 由于环境外载荷变化(斜流)和出坞长度不同将造成首、中、尾部缆力分配不均, 导致单个缆力过大, 应及时调整锚机松紧程度, 使得迎流(风、浪)面的缆绳受力均匀, 防止单根缆绳受力过大; 管节即将完全出坞时管节系泊力和运动响应较大, 在施工中应重点关注。

2) 管节在小水深航道浮运过程时, 在较大航速及大浪高、大航向角情况下管节拖航过程中容易

发生触底，因此出运航道水深应疏浚至14 m以上。

3) 管节浮运过程中，管节转弯或者遭遇斜向来流和风浪时，缆绳缆力分配不均，所以应加强对环境载荷（流速、浪高等）、拖曳速度和拖航缆力的监控，做到提前降速，避免沉管触底和拖曳缆绳缆力过大，同时协调拖轮位置使得各拖轮及缆绳受力均衡。

4) 在管节系泊等待过程中，如遭遇斜流作用时，缆绳受力和沉管浮驳的运动响应比横流要大，需特别注意调整各系缆力张紧程度，尽量使迎流向缆绳受力均衡，从而避免单根缆绳缆力过大。

5) 在管节沉放施工时应严格按施工制定的气象窗口进行施工，波浪和流对管节系泊力的增加有明显作用，特别是波浪作用更明显。

6) 在管节压载下沉过程中，需要特别关注沉管刚刚沉没水面和即将着床时的状态，在沉管刚浸没水面时缆力和运动响应最大；如果要使沉管运动响应较小，可以在缆绳及起重设备允许情况下适当增加负浮力，它对系泊系统水平方向的受力无明显影响，但是管节整体运动响应将减小。

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] 胡晓明. 南京长江沉管隧道管节顶推浮运系统操纵性模型试验研究[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(4): 397-401.

[3] Hans Cozijn, Jin Wook Heo. Analysis of the tunnel immersion for the Busan-geoje fixed link project through scale model tests and computer simulations[C]// Hawaii: Proc of 28th OMAE conf, 2009.

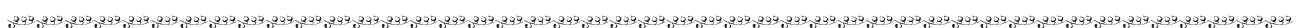
[4] 陈智杰, 王永学, 王国玉, 等. 波浪作用下沉管管段沉放过程运动响应的试验研究[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(2): 10-15.

[5] 陈硕. 沉管管节沉放系缆力试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

[6] 吕卫清, 应宗权, 苏林王, 等. 沉管管节浮运过程中波浪附加阻力的水动力学分析[J]. 水运工程, 2011(11): 1-5.

[7] 陈绍章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

港珠澳大桥海底隧道首节沉管成功安装

日前，由中国交建实施的港珠澳大桥岛隧工程首节沉管顺利完成浮运、沉放和安装任务，4.4万t超级沉管在12 m海底实现厘米级精确对接。这是中国首次在外海深水条件下安放沉管。港珠澳大桥沉管隧道由33条管节连接而成，本次沉放管节长112.5 m、宽37.95 m、高11.4 m，质量约4.4万t，水平面积堪比10个篮球场之大，体积相当于一艘航母，沉管与人工岛高潮位水力压接难度系数堪比‘天宫一号’的对接。

港珠澳大桥岛隧工程沉管精确安装共分为3步：沉管出坞、沉管浮运和沉管沉放对接。

未来的3年中，30多节8万t规格的沉管，将陆续在平均40 m的海底精确对接，贯通成一个6.5 km的海底隧道，然后连接2个已经筑起的人工岛，最后通过约30 km的跨海大桥，将香港、澳门、珠海连接在一起。

摘编自《中国交通新闻网》