

航速对四筒型基础海洋平台拖航影响的试验分析

丁红岩^{1,2,3}, 刘宪庆¹, 张浦阳^{1,3}, 刁景华⁴, 徐飞飞⁵

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
3. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;
4. 海军工程大学天津校区, 天津 300450;
5. 曹妃甸基础设施投资集团有限公司, 唐山 063200)

摘要: 以海军某四筒型基础平台为研究对象, 在吃水深度、波浪条件和水深一定的条件下, 在不同拖航速度下静水、顺浪和逆浪拖航, 通过模型试验测定筒型基础平台在横荡、纵荡和垂荡方向上的加速度、筒内气压力和筒底水压力以及拖航中的拖缆力。试验结果表明: 静水拖航中, 筒型基础平台的拖航速度存在一个上限; 拖航过程中的拖缆力随着拖航速度和水质点振荡速度的相对值以及纵荡加速度变化; 平台拖航过程遇到大浪情况下, 降低拖航速度是保证结构耐波性和稳性的有效方法。

关键词: 筒型基础; 拖航速度; 模型试验; 气浮结构

中图分类号: P752; TV321

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2012)01-0043-07

Test Research on Impact of Towing Speed on Towing of Ocean Platform with Four Bucket Foundations

DING Hong-yan^{1,2,3}, LIU Xian-qing¹, ZHANG Pu-yang^{1,3}, DIAO Jing-hua⁴, XU Fei-fei⁵

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;
4. Tianjin Branch Naval University of Engineering, Tianjin 300450, China;
5. Caofeidian Development Investment Group Company Limited, Tangshan 063200, China)

Abstract: Using a naval platform with four bucket foundations as the object of study, under the definite conditions of draught, incident wave and water depth, the acceleration of swaying, surging and heaving, the internal air pressure and bottom water pressure of the bucket and the towing power of platform were determined in still water, following wave and head wave with different towing speeds. It is shown that there is an upper limited speed in the towing of bucket foundation platform in still water; the tension in towing is related to the relative value between towing speed and oscillation speed of water particles and the changes of the surging acceleration; under the situation of encountering a wave with large height or large period, in order to assure the stability and sea-keeping, reducing the towing speed is an effective method.

Keywords: bucket foundation; towing speed; model test; air-floating structure

筒型基础是一种新型的海洋平台基础形式, 具有气浮拖航、负压下沉和重复利用性的优势。在浅海区水深不足、大型施工机具不能通过运输船送到指定地点时, 筒型基础平台可通过充气浮运用驳船拖到指定地点, 然后通过负压进行下沉^[1]。同传统打入桩基础

相比, 可以显著地减少海上施工的时间和费用, 并可以重复利用, 特别适合我国边际油田的开发。

目前, 国内外对于筒型基础的研究主要集中在静稳性的机理和分析上^[2-4], 而对波浪作用下筒型基础的运动以及拖航过程中的动稳性还缺乏试验依据和

收稿日期: 2010-12-31; 修回日期: 2011-05-06.

作者简介: 丁红岩 (1963—), 男, 博士, 教授, dhy_td@163.com.

通讯作者: 张浦阳, zpy_td@163.com.

矩相似^[12]。根据平台重量分布,模型配有一定重量的压载以模拟平台上的设备重量。图 2 为波浪控制系统,图 3 为试验模型,图 4 为模型入水图。

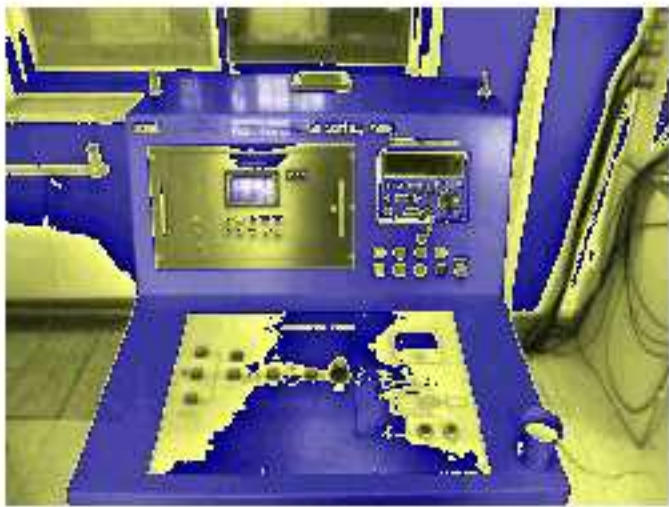


图 2 波浪控制系统
Fig.2 Wave control system



图 3 1:20 的试验模型
Fig.3 Experimental model of 1:20

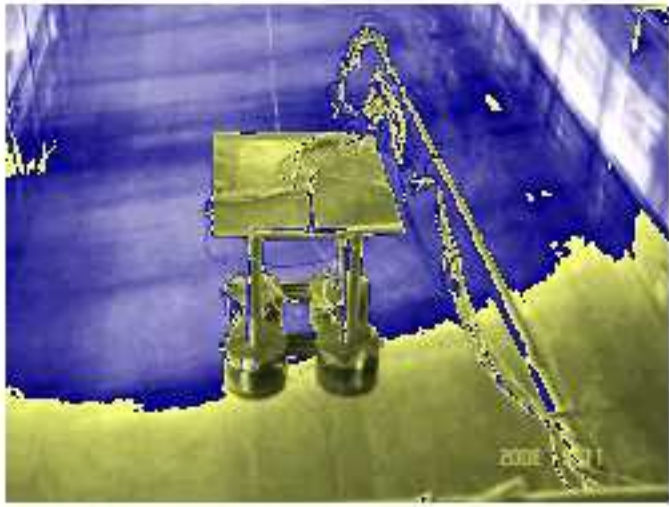


图 4 拖航模型入水
Fig.4 Model of towing in water

2.2 传感器布置

传感器包括拉力传感器、压力传感器(包括气压力和水压力传感器)和加速度传感器。拉力传感器固定于拖车上,作用点处安装有滑轮,拖缆绕过滑轮将结构模型与拉力传感器连接;气压压力传感器布置在筒内顶部,水压力传感器布置于筒底;加速度传感器固定于平台顶部中间位置。传感器布置如图 5 所示。在拖航过程中, x 方向为纵荡方向, y 方向为横荡方向, z 方向为垂荡方向。

拖航时筒体编号如图 6 所示,1 号筒和 3 号筒在前,2 号筒和 4 号筒拖航。

2.3 设计组合

试验采用多因素正交设计方法,利用正交组合表来安排试验组合。单个因素水平情况设置为 3 个;在吃水深度、倾斜角度、水深等一定的前提下,进行不

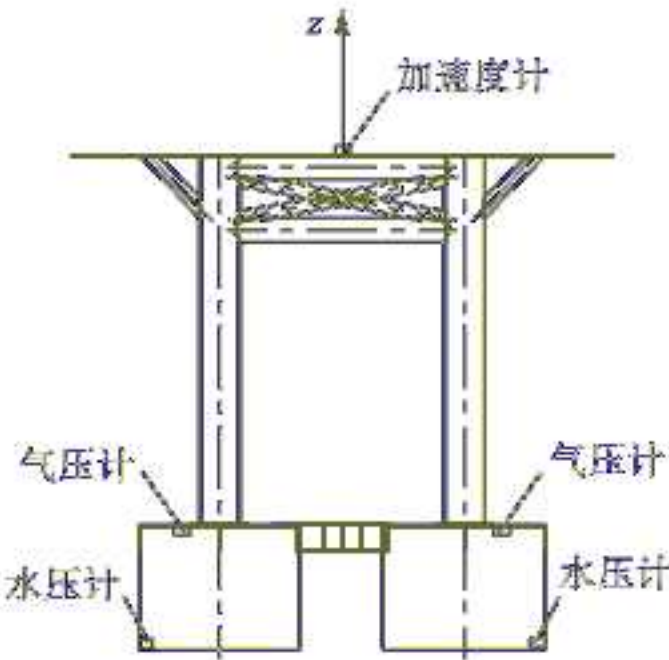


图 5 结构立面及传感器布置
Fig.5 Vertical structure and layout of sensors

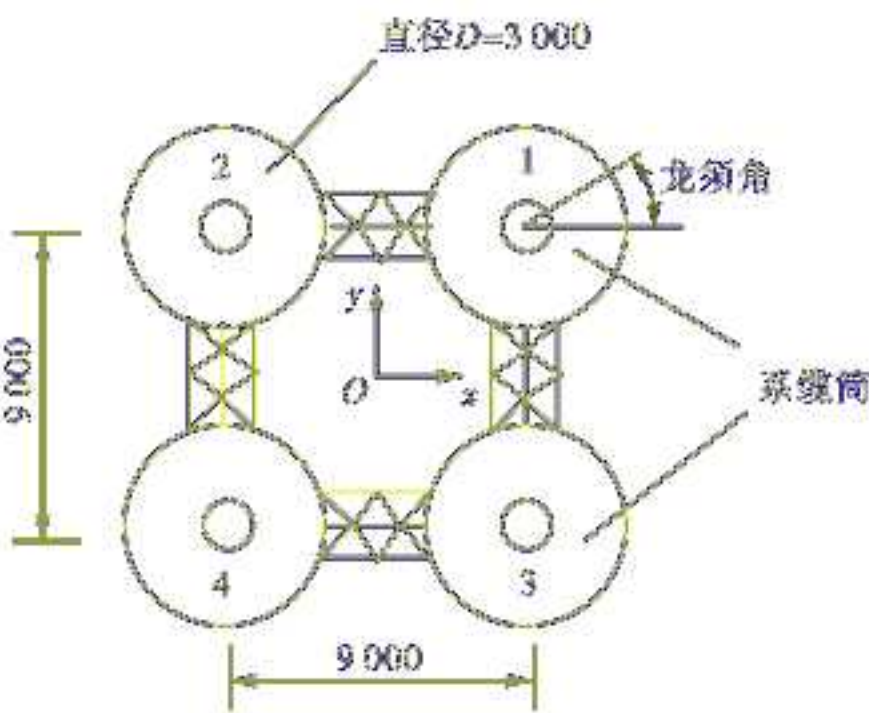


图 6 筒体编号
Fig.6 Numbers of cylinders

同拖航速度的静水拖航试验和规则波波高 1 m、波周期为 5 s 下拖航速度分别为 1 kn、2 kn 和 3 kn 拖航试验,以研究筒型基础平台的运动性能。波浪拖航组合如表 1 所示。

表 1 拖航组合
Tab.1 Combinations of towing

组合方式	水深/m	波高/m	周期/s	吃水深度/m	拖航速度/kn
组合 1	10	1	5	6	1
组合 2	10	1	5	6	2
组合 3	10	1	5	6	3

3 试验测试结果分析

试验中,水压力 and 气压力采用 DS-30 型数据采集处理系统采集,加速度通过 DAQ 数据采集系统采集。从图 6 可以看出,结构前后左右对称且筒底水压力和筒内气压力的变化趋势一致,所以选取系缆筒 1 号筒和非系缆筒 2 号筒的稳定阶段的筒底水压力数据进行分析比较。以下各图中数据均为由模型测试数据根据相似定律转化后的对应原型结构数据,分析中的峰值都采用测试参数 1/3 实测峰值进行分析讨论^[13-14]。

试验中采用的规则波波高 1 m、周期 5 s. 根据微幅波理论^[15]计算所得的波长为 38.87 m, 每个筒的直径为 6 m, 筒直径和波长的比值为 0.15 (属于小尺度构件), 采用 Morison 公式计算波浪力, 计算所得的阻力如表 2 所示.

表 2 拖航阻力
Tab.2 Drags of towing

拖航速度/ kn	拖航速度/ (m · s ⁻¹)	形状阻力/ kN	摩擦阻力/ kN	兴波阻力/ kN	总阻力/ kN
1	0.51	17.49	0.31	24.46	42.25
2	1.03	69.94	1.10	31.96	103.00
3	1.54	157.37	2.31	39.15	198.83

3.1 静水无波浪拖航分析

目前主要是通过经验公式和模型试验相结合的方法计算筒型基础海洋平台拖航阻力. 由于拖航是在室内进行, 所以不考虑拖航中风的影响. 静水拖航时, 在吃水确定的情况下, 重力、浮力和水阻力值也可以基本确定 (结构的倾斜会导致重力、浮力和阻力力矩产生小幅变动). 根据倾斜力矩和恢复力矩的平衡关系可知, 拖缆力有一极限值, 即航速存在上限. 本平台的无波浪拖航速度上限为 3.5 kn.

图 7 和图 8 是无波浪拖航下系缆筒和非系缆筒的水压力变化曲线, 图 9 为静水拖航的拖缆力变化时程.

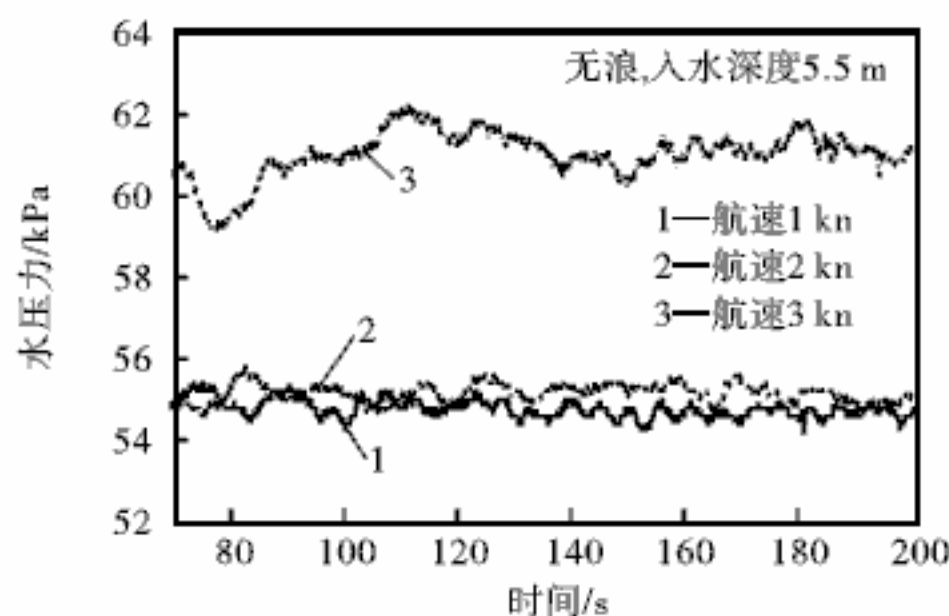


图 7 1号筒水压力

Fig.7 Water pressure of No.1 bucket

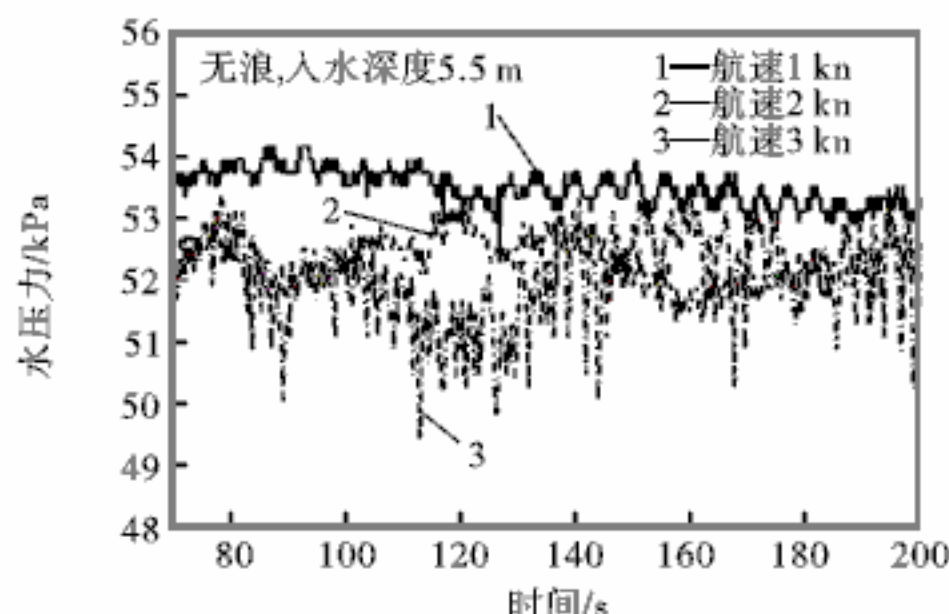


图 8 2号筒水压力

Fig.8 Water pressure of No.2 bucket

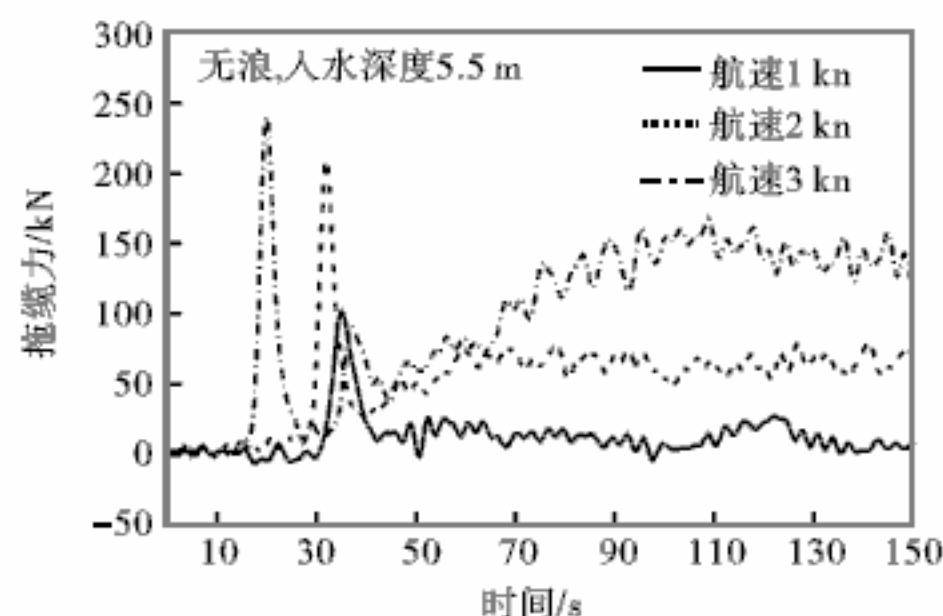


图 9 静水拖航的拖缆力变化时程

Fig.9 Time history of tension in still water

由图 7 和图 8 可以看出, 在静水拖航的稳定阶段, 系缆 1 号筒的水压力变化稳定且随着拖航速度的增加而增加, 非系缆 2 号筒的水压力变化不稳定且随拖航速度的增加而呈下降趋势. 当拖航速度在 2 kn 以内时, 1 号筒的筒底水压力变化不明显, 最大幅值变化为 0.61 kPa, 而拖航速度在从 2 kn 增加到 3 kn 的过程中, 1 号筒底水压力显著增大, 最大增幅为 8.76 kPa; 原因在于随着拖航速度的变大, 1 号筒沿着拖航方向倾斜, 且速度越大 1 号筒入水深度也就越大, 所以筒底水压力不断变大. 2 号筒在拖航速度从 1 kn 增加到 2 kn 再增加到 3 kn 的过程中, 水压力值不断降低且变化呈现不规则的振荡; 原因在于拖航时 2 号筒也沿着拖航方向倾斜, 筒吃水高度降低, 水压变小, 引起筒底水压力变化的主要原因是由于静水运动中的基础兴起波浪, 且拖航速度越大, 兴起的波浪越大, 处于尾部的 2 号筒振荡越明显, 兴波阻力也很快增长.

由图 9 可以看出, 随着拖航速度从 1 kn 顺次增加到 3 kn, 最大拖缆力都是发生在脉冲变化部分. 这个最大拖揽力是由于开始时结构速度小于拖车、随着拖缆被拉直拖车结构受到拖缆拉力产生的瞬时值, 此瞬时值也随着拖航速度的增大而增大; 拖航 80 s 以后的运动, 由于拖缆被拉直, 拖缆力处于稳定波动变化状态, 产生波动的原因是由于结构的兴波作用, 波动的幅度也随着航速增加而增加.

3.2 顺浪拖航分析

图 10 为顺浪拖航时不同航速下拖缆力的变化情况, 图 11 为纵荡方向即 x 方向的加速度时程曲线. 可见拖缆力的变化和拖航速度以及 x 方向加速度变化相关: 拖航速度越快, 拖缆力越大; 纵荡加速度越大, 拖缆力脉冲变化幅度就越大.

从图 10 可以看出, 拖航速度为 1 kn 时, 拖缆力变化稳定, 结构运动缓慢, 波浪推动结构运动. 从图 11 可以看出, 拖航速度为 1 kn 时, 纵荡方向的加速度

呈现规则的正弦运动,波浪带动基础运动;当拖航速度从 1 kn 变化到 2 kn、从 2 kn 变化到 3 kn 时,拖缆力的增幅分别为 848%和 47%,且纵荡加速度最大值分别达到 0.022 m/s^2 、 0.086 m/s^2 和 0.054 m/s^2 ,幅值先增后降.原因在于波浪对平台拖航时的作用力随着航速与水质点水平振荡速度的相对值而变化:当拖航速度为 1 kn 时,振荡速度大于航速,波浪对平台的作用力与拖航力方向一致,拖缆承受的力相对较小,波浪推动结构运动;当拖航速度为 2 kn 时,振荡速度小于航速,波浪对平台的作用力和拖航方向相反;当拖航速度为 3 kn 时,虽然波浪的作用力方向仍然和拖航方向相反,但是增加的幅度降低,所以纵荡加速度呈先增加后降低的趋势.

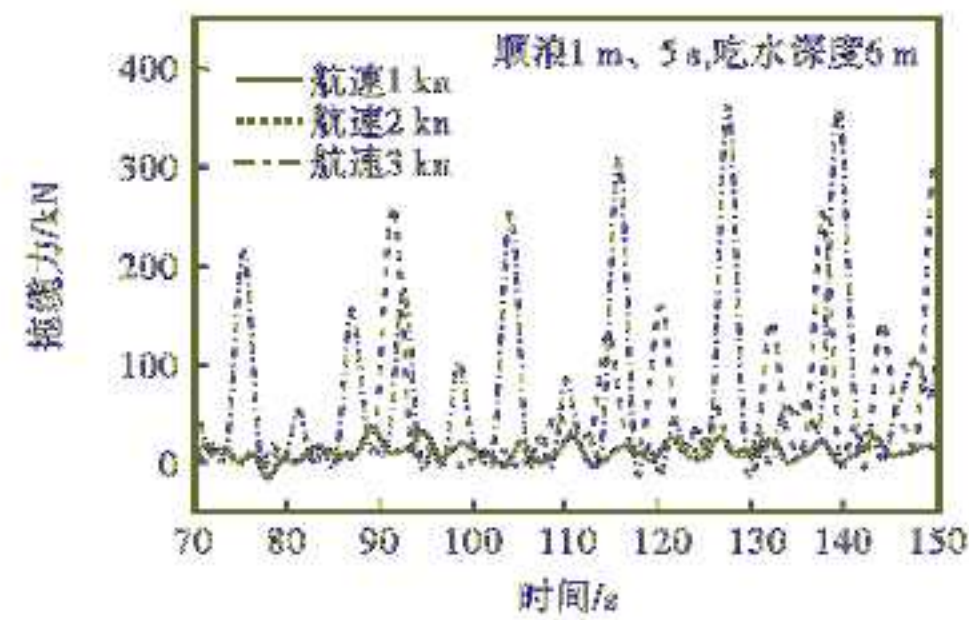


图 10 拖缆力时程(顺浪)
Fig.10 Time history of tension (following wave)

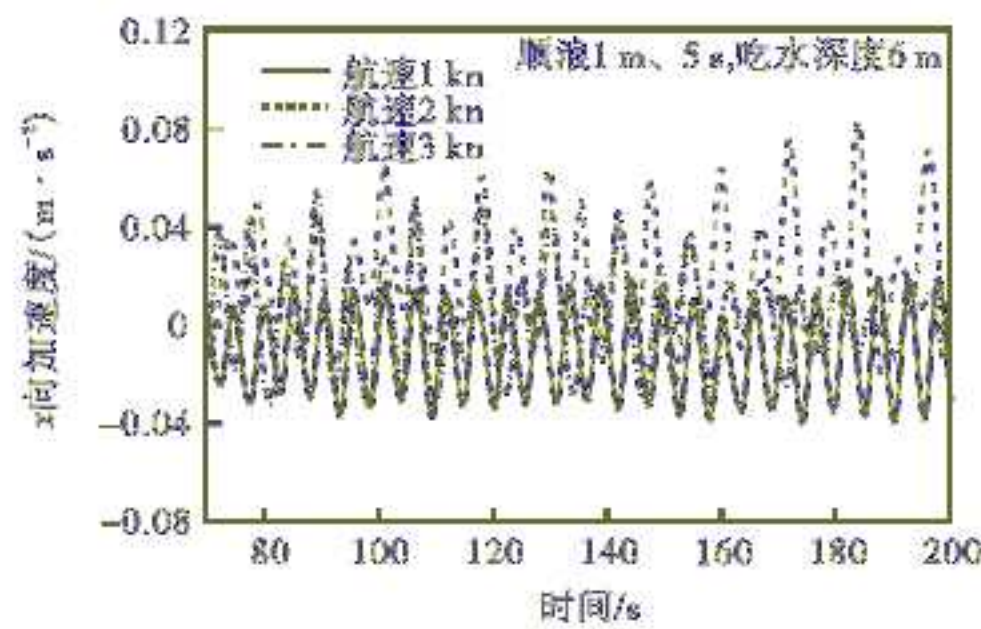


图 11 x 方向加速度时程(顺浪)
Fig.11 Time history of acceleration in x direction (following wave)

图 12 和图 13 为通过加速度传感器测得的顺浪、不同拖航速度下横荡和垂荡加速度时程变化.从图 12 可以看出,在拖航速度为 1 kn、2 kn 和 3 kn 时,在拖航横荡方向的加速度绝对值幅值分别为 0.037 m/s^2 、 0.068 m/s^2 和 0.040 m/s^2 ,加速度先增后减.从图 13 可以看出,拖航速度为 1 kn 时,垂荡加速度幅值和振荡幅度明显小于拖航速度为 2 kn 和 3 kn 时的幅值和振荡幅度,且拖航速度从 1 kn 顺次变化到 3 kn 时,加速度幅值也是先增后减,增幅为 146%,降幅为

17.4%.这是因为结构产生横荡与水质点水平振荡速度和拖航速度相对值有关:振荡速度大于航速时,相对值越大,横荡越大;振荡速度小于航速时,相对值越大,横荡越小.拖航速度为 1 kn 时,振荡速度大于航速,航速接近于振荡速度,横荡运动相对较小;拖航速度为 2 kn 时,振荡速度小于航速,幅度大于振荡速度和航速相对值较大时的 3 kn 拖航.结构垂荡是由于波浪变化引起的,随着航速的增加而增加;但是当航速达到一定限制时,增加的幅度将变得平缓.

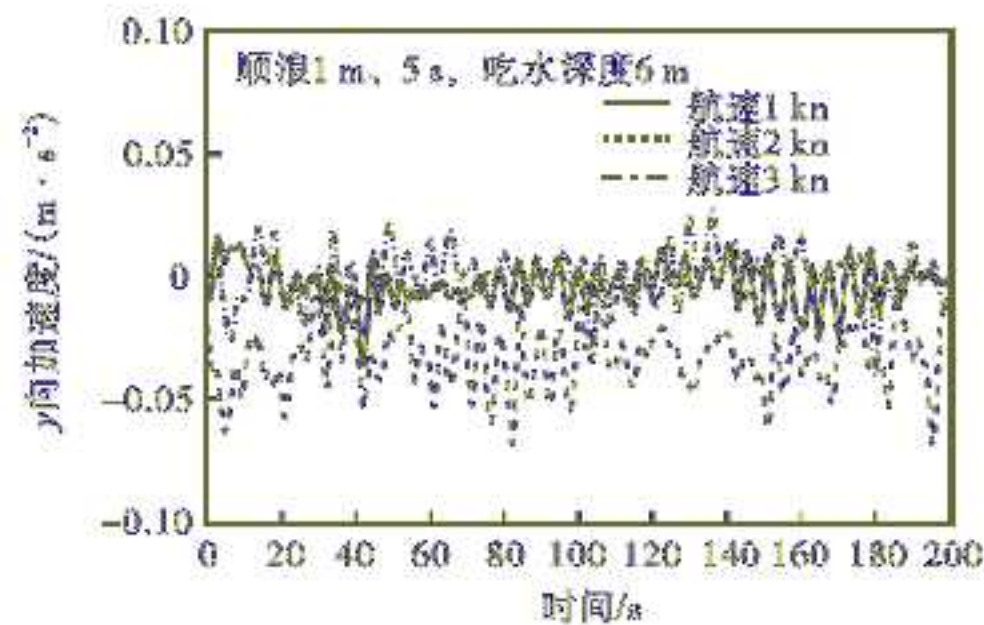


图 12 y 方向加速度时程(顺浪)
Fig.12 Time history of acceleration in y direction (following wave)

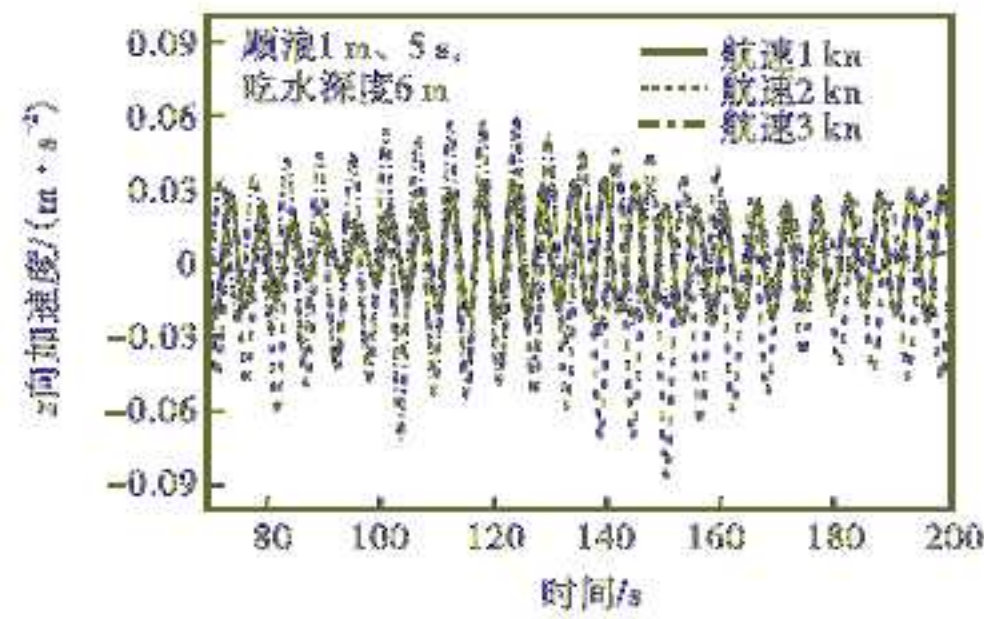


图 13 z 方向加速度时程(顺浪)
Fig.13 Time history of acceleration in z direction (following wave)

3.3 逆浪拖航分析

图 14 和图 15 为逆浪、不同航速下拖航的拖缆力和纵荡加速度时程变化曲线.可以看出,拖缆力随着拖航速度的增加而增加;在拖航速度小于 2 kn 时,拖缆力的脉冲幅度相对较小;在拖航速度大于 2 kn 时,拖缆力脉冲幅度较大;航速从 1 kn 增加到 2 kn、从 2 kn 增加到 3 kn 时,拖缆力增幅分别为 563%和 29%.原因在于逆浪拖航时,当拖航速度较小时,水质点水平振荡速度大于航速,拖航过程中的摩擦阻力和形状阻力相对较小,作用在结构上的力主要是波浪力;当拖航速度较大即大于振荡速度时,拖航过程中的形状阻力增加.从图 15 还可以看出,纵荡加速度随着拖航

速度的增大其幅度和幅值都呈增加的趋势,拖缆力脉冲的幅度和幅值都随着纵荡加速度的增加而增加。

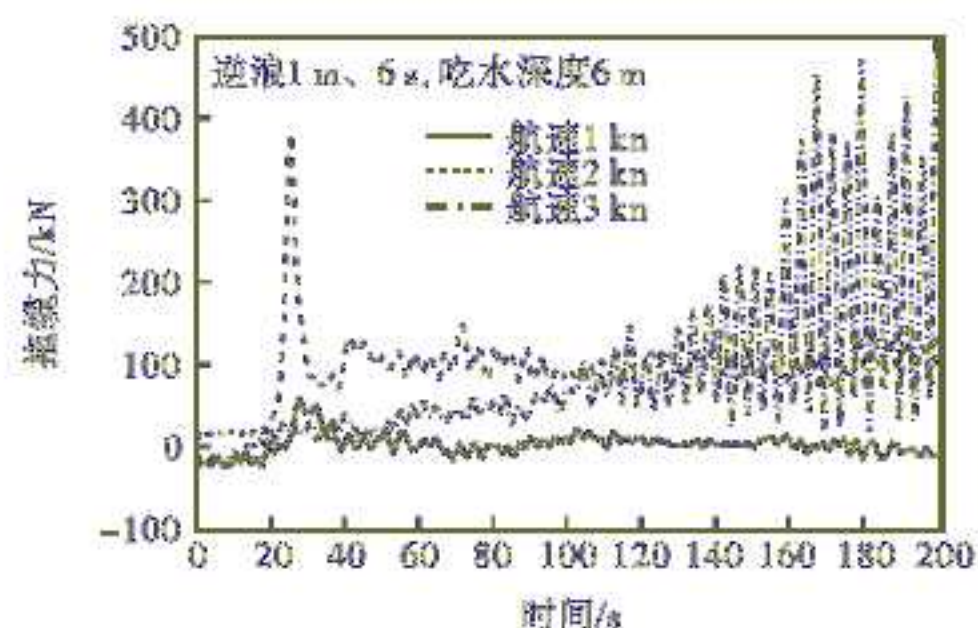


图 14 拖缆力时程(逆浪)

Fig.14 Time history of tension (head wave)

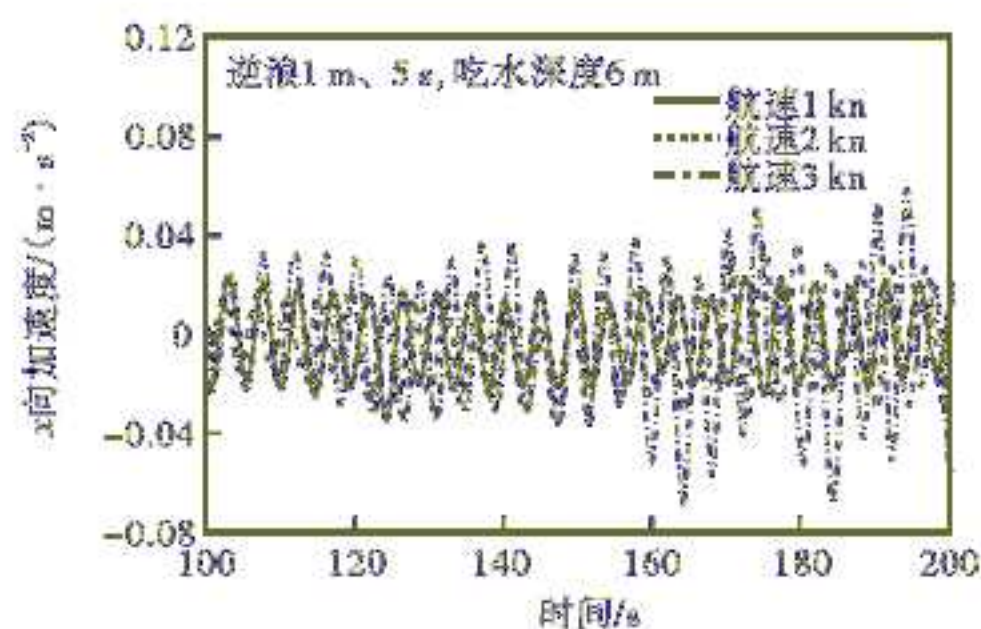


图 15 x 方向加速度时程(逆浪)

Fig.15 Time history of acceleration in x direction (head wave)

图 16 和图 17 为不同航速下逆浪拖航横荡和垂荡加速度变化曲线。从图 16 可以看出,逆浪拖航下,横荡加速度随着航速的增加而降低,在拖航的稳定阶段横荡也是稳定的,横荡加速度仅有小幅度的波动。从图 17 可以看出,结构垂荡运动在航速为 1 kn、2 kn 和 3 kn 的幅值降低,分别为 0.075 m/s^2 、 0.057 m/s^2 和 0.042 m/s^2 ,垂荡运动的幅度也随着航速增加而降低。

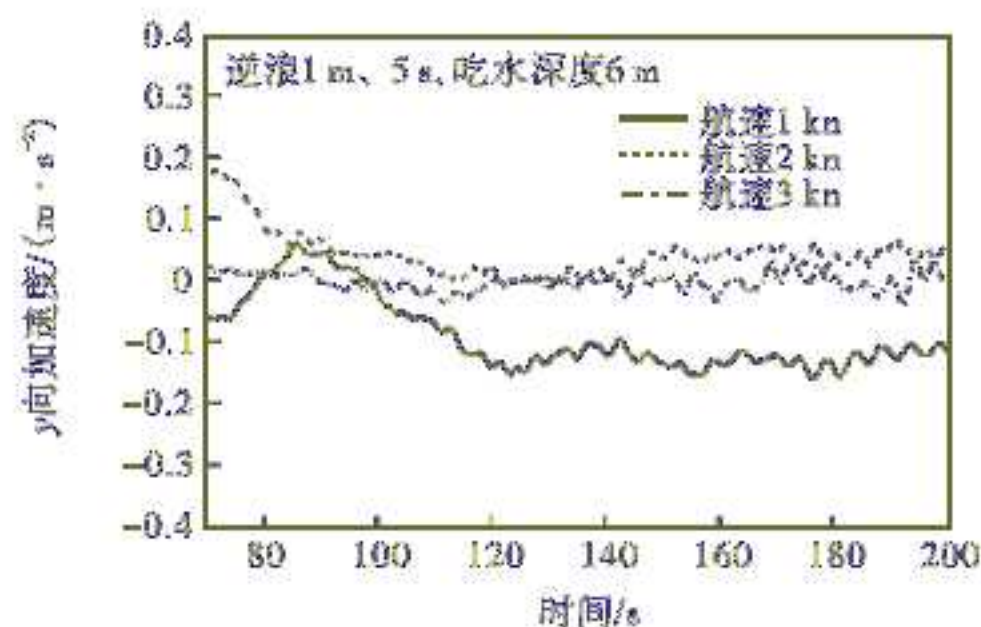


图 16 y 方向加速度时程(逆浪)

Fig.16 Time history of acceleration in y direction (head wave)

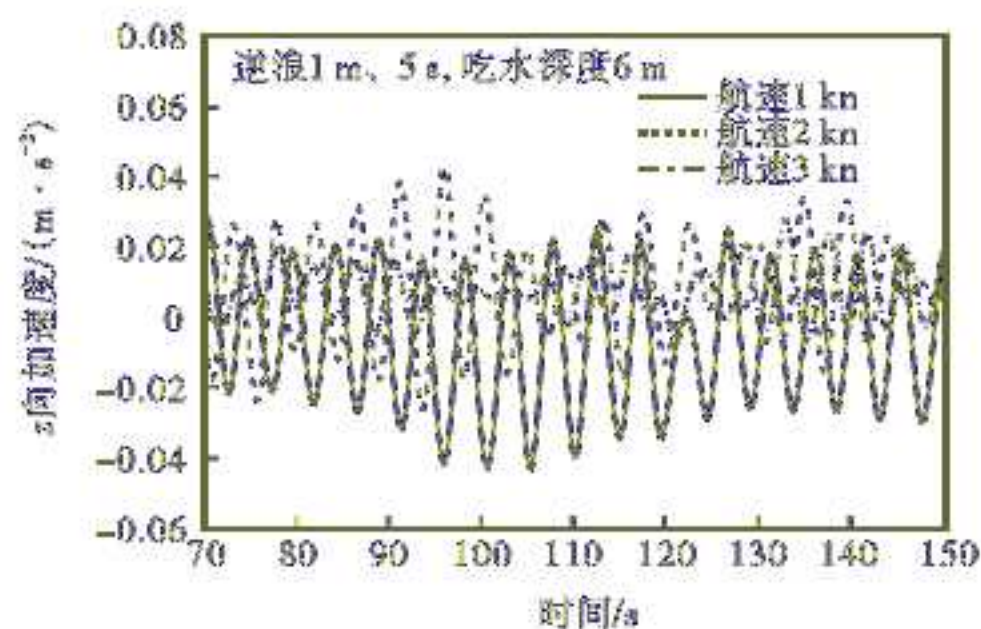


图 17 z 方向加速度时程(逆浪)

Fig.17 Time history of acceleration in z direction (head wave)

4 结 论

(1) 筒型基础在确定的条件下静水拖航时,拖航速度存在一个上限值,该平台的最大拖航速度为 3.5 kn。实际施工中,筒型基础平台必须进行静水拖航试验来确定此上限值。

(2) 拖缆力的变化主要受航速和水质点水平振荡速度的相对值、纵荡加速度的影响。航速小于振荡速度时,拖缆力较小;航速大于振荡速度时,振荡速度与航速相差越大,拖缆力越大,但是增加的幅度随相对值的增加而降低。

(3) 筒型基础的纵荡运动随着航速的增加而增加,拖缆力脉冲的幅度也随之增大。

(4) 随着航速的增加,顺浪拖航时垂荡运动增大,逆浪拖航时垂荡加速度降低,平台拖航时遇到大浪情况下,降低拖航速度是保证稳性行之有效的途径。

(5) 为了满足结构快速性、耐波性以及经济性的要求,在其他拖航条件一定的情况下,建议该结构的拖航速度为 2 kn。

参考文献:

- [1] Ding Hongyan, Zhang Puyang. Estimation of heights of soil plug inside bucket foundations during suction penetration by deformable discrete element modeling[J]. Transactions of Tianjin University, 2007, 13(4): 308-312.
- [2] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的静浮态分析[J]. 中国港湾建设, 2000(6): 18-23.
Bie She'an, Shi Zhongmin, Wang Lingyu. Floating state analysis of air float structure[J]. China Harbour Engineering, 2000(6): 18-23 (in Chinese).
- [3] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的小倾角浮稳性

- 分析[J]. 中国港湾建设, 2001(1): 31-36.
- Bie She'an, Shi Zhongmin, Wang Lingyu. Stability analysis of air float structures with small roll angle [J]. *China Harbour Engineering*, 2001(1): 31-36(in Chinese).
- [4] 别社安, 时忠民, 王翎羽. 气浮结构的运动特性研究[J]. 中国港湾建设, 2001(2): 18-21, 25.
- Bie She'an, Shi Zhongmin, Wang Lingyu. Study on kinetic properties of air float structures[J]. *China Harbour Engineering*, 2001(2): 18-21, 25(in Chinese).
- [5] Ding Hongyan, Qi Lan, Xu Jizu. The bucket foundation platforms installed in shallow and ice drifting area[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2001, 15(4): 211-218.
- [6] Hua Jianbo. Assessment of the course-keeping ability of a fast ship in following waves[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(6): 1-12.
- [7] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
- Li Zhongxian. *Test Technology and Theory of Engineering Structures*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004(in Chinese).
- [8] 姜次平, 邵世明. 船舶阻力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 3-63.
- Jiang Ciping, Shao Shiming. *Ship Resistance*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1985: 3-63(in Chinese).
- [9] 中国船级社. 移动式海洋平台入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 76-86.
- China Classification Society. *Rules and Regulations for Mobile Offshore Platform*[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 76-86(in Chinese).
- [10] 李玉成, 滕 斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 250-255.
- Li Yucheng, Teng Bin. *The Effects of Waves on Offshore Structures*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002: 250-255(in Chinese).
- [11] 苏兴翘. 船舶与海洋构筑物动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992: 102-105.
- Su Xingqiao. *Dynamics of Ship and Marine Installations*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1992: 102-105(in Chinese).
- [12] 夏国泽. 船舶流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003: 160-170.
- Xia Guoze. *Ship Hydrodynamics*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003: 160-170(in Chinese).
- [13] Clauss G F, Katja Stulz. Time-domain analysis of floating bodies with forward speed[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2002, 124(2): 66-73.
- [14] Irvine M J. *Towing Tank Tests for Surface Combatant for Coupled Pitch and Heave and Free Roll Decay Motions*[M]. Iowa: The University of Iowa Press, 2004: 89-170.
- [15] 李远林. 近海结构水动力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999: 92-103.
- Li Yuanlin. *Dynamics of Offshore Structures*[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1999: 92-103(in Chinese).