

施工期深水桥墩在船行波激励下的振动研究

李敏慧, 吴长青, 何承宇, 葛煜, 胡甜, 何家浩

(湖南理工学院, 湖南 岳阳 414006)

摘要: 船行波是作用于深水桥墩的主要动力之一, 往往会引起桥墩出现明显振动而威胁其安全, 因此研究施工期深水桥墩在船行波激励下的振动特性具有重要意义。根据合适的经验公式确定了船行波的主要参数, 基于 Morison 方程推导了船行波浪力时程。基于 ANSYS 软件, 采用动力有限元方法研究了船行波作用下深水桥墩的振动特性。研究表明, 随着船速的增加, 船行波的波高、波长与波浪压力幅值均提高, 但波浪力频率降低。相比桩基淹没水位与正常蓄水位, 承台淹没水位时船行波引起的桥墩动力响应最大。当某一船速对应的船行波频率与桥墩固有频率接近时, 则会引起桥墩共振, 因此通过合理规划船速, 使船行波频率较大偏离结构固有频率即可显著降低桥墩动力响应。

关键词: 深水桥墩; 船行波; 波浪力; 动力响应; 有限元分析

中图分类号: U448.25; U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0291-04

Study on Vibration of Deep-water Bridge Piers during Construction under Excitation of Ship Traveling Waves

LI Minhui, WU Changqing, HE Chengyu, GE Yu, HU Tian, HE Jiahao

(Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract: The ship traveling wave is one of the main dynamic forces acting on the deep-water bridge piers, which frequently leads to obvious vibrations of bridge piers and threaten the safety of piers. Therefore, it is of great significance to study the vibration characteristics of deep-water bridge piers during the construction under excitation of ship traveling waves. The main parameters of ship traveling waves are determined according to the appropriate empirical formulas, and the time history of ship traveling wave forces are derived based on the Morison equation. Based on ANSYS software, the dynamic finite element method is adopted to study the vibration characteristics of deep-water bridge piers under the excitation of ship traveling waves. The study result shows that with the increase of ship speed, the wave height, wave length and the amplitude of wave force all increase, but the frequency of wave force decreases. Compared with the water level of submerging pile foundation and the normal water storage level, the dynamic responses of bridge pier induced by ship traveling waves are the largest for the water level of submerging the base slab. When the frequency of the ship traveling wave corresponding to a ship speed is close to the natural frequency of the pier, the pier resonance will be caused. Therefore, by reasonably planning the ship speed to make the frequency of ship traveling wave deviate significantly from the natural frequency of the structure, the dynamic response of piers can be significantly reduced.

Keywords: deep-water bridge pier; ship traveling wave; wave forces; dynamic response; finite element analysis

0 引言

随着国家桥梁建设事业的飞速发展, 许多跨越水域的大桥被修建, 很多大桥的桥墩处于深水区域,

其柔性较大, 对波浪与水流等动力作用十分敏感。由于通航需求, 深水桥墩附近经常有船舶通行, 船舶在水面航行时, 船体推挤和扰动周围水体会产生波浪即船行波。当船行波遇到水中桥墩时会把它携带的能量传至桥墩上, 进而引起桥墩振动, 尤其对于施工阶段的桥墩, 它们还未与上部结构形成整体, 其刚度较小, 船行波可能会引起桥墩产生显著的动力响应, 从而威胁桥墩结构的安全^[1]。

多年来, 许多学者针对船行波及其对水中结构的动力作用展开了广泛研究, 且取得了一系列重要

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 湖南省大学生创新创业训练计划项目(S202410543075); 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0645)

作者简介: 李敏慧(2004—), 女, 本科在读, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 吴长青(1987—), 男, 博士, 讲师, 从事桥梁抗风与结构振动控制工作。电子邮箱: wuchangqing@hnist.edu.cn

成果。Morison首次提出了计算作用在结构上的波浪力的Morison方程,且得到了广泛应用^[2-4],但该方程一般只适用于小尺度结构(结构特征长度与波长之比不大于0.2)波浪力的计算,对于大尺度结构(结构特征长度与波长之比大于0.2)波浪力计算,往往需要对Morison方程进行系数修正或采用绕射波理论^[5-6]。毛鸿飞等人探究了波浪参数和截面形状对柱体所受波浪力的影响,结果表明,柱体所受波浪力主要由惯性力主导,且很大程度取决于柱体的淹没体积^[7]。姜辉等人以某刚构-连续梁组合桥桥墩为例,基于ANSYS数值波浪水槽技术模拟了桥墩在船行波作用下的波浪力与动力响应^[8]。齐林基于物理模型试验和CFD数值模拟方法研究了跨海大桥下部结构在波浪力作用下的受力特点,结果表明,来波方向为顺桥向时下部结构所受的波浪力要比其他来波方向要大;桥墩与桩基的波浪力取决于速度力,而承台的波浪力取决于惯性力^[9],且波浪力随着迎浪侧结构尺寸的增大而增大。李杰等人基于ANSYS软件建立了4柱桩柱式框架墩-水耦合数值分析模型,计算了桥墩在波浪作用下的动力响应,结果显示,随着波高与水深的增大,波浪对桥墩的动力响应越显著^[10]。

综上,当前国内外学者就船行波对桥墩的动力作用进行了大量研究,但关于船行波对施工期深水桥墩动力作用的研究相对较少。因此,该文以某施工阶段的桥墩为例,开展如下研究:其一,确定桥址处水面常见客船在行驶过程中所形成船行波的主要参数,建立作用在桥墩上的船行波浪力时程;其二,研究不同水位与不同船速下桥墩在船行波浪力作用下的振动响应特性。

1 工程概况

大桥位于深水区域,主桥采用预应力混凝土刚构-连续梁组合体系,共6跨(75 m+4×130 m+75 m),立面布置见图1。7号、8号、9号桥墩与主梁刚接,其余桥墩及桥台与主梁通过盆式橡胶支座连接。6至10号桥墩的墩身均采用6.5 m×4 m的矩形截面,承台均采用10 m×10 m的矩形截面,承台高4.5 m,承台下布置了4根直径为2.5 m的圆柱桩基。

在桥墩施工过程中,施工人员发现当船舶经过桥墩附近水域时,能感觉到明显晃动,影响了施工的顺利进行与施工人员的安全。为了探明桥墩振动的原因,有必要研究船行波对深水桥墩的动力作用。

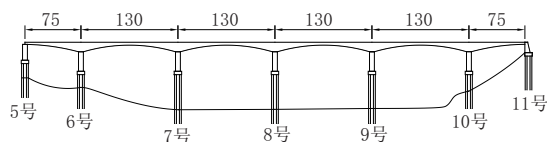


图1 全桥布置图(单位:m)

7~9号桥墩均位于深水区,且设计桩长远大于5号、6号与10号桥墩。为了简化且不失代表性,选择8号桥墩开展研究。8号桥墩的桩长为76 m,其中嵌入土层部分的长度为29.7 m,淹没桩基时水位为147.0 m,水深为46.3 m;淹没承台水位为151.5 m,水深为50.8 m;正常蓄水位为168.2 m,水深为67.5 m。

2 船行波浪力的确定

2.1 船行波参数

该水库航道通行的常见客船参数如下:船长16.30 m,船宽2.6 m,型深1.18 m,满载吃水深度0.6 m,满载排水量11.60 m³,最大船速不超过30 km/h。波高是波浪力的重要参数之一,国内外学者通过大量的实船观测、室内模型试验提出了一系列船行波波高经验公式,本文采用适合内河与运河的库斯科公式^[11],如式(1)所示:

$$H_s = 0.055 \sqrt{\frac{20}{s}} \frac{\sqrt{RV}}{2g} \quad (1)$$

式中: H_s 计算点处船行波的最大波高,m; s 为计算点处距船舷的距离,m; V 为船速,m/s; R 为船舶兴波阻力,N; g 为重力加速度,m/s²。

船行波分成散波和横波。在深水区域,横波衰减较快,而散波在很长传播距离内都不衰减,因此,散波是引起结构振动的主要动力^[11-12]。为了简化,只考虑散波作用,其波长计算公式如下:

$$\lambda = \frac{2 \times \pi \times V^2}{g} (\cos \varphi)^2 \quad (2)$$

式中: φ 为开尔文角,取19.467°。

由于客船航速不大而航道水深较大,可认为客轮航行所引起的船行波为深水波,其周期 T 与波数 k 的计算公式分别如下^[13]:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

由上述船舶参数与船行波参数计算的的经验公式,得到了不同船速下的船行波参数,见表1。由表1可知,随着船速的增大,船行波的波高与波长增加,但频率降低。

表 1 不同船速下的船行波参数

船速 $V /$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	波高 H / m	波长 λ / m	周期 T / s	频率 f / Hz	波数 k
10	0.117	4.393	1.677	0.596	1.430
14.5	0.169	9.237	2.432	0.411	0.680
15	0.175	9.885	2.516	0.397	0.636
20	0.233	17.573	3.355	0.298	0.358
25	0.291	27.457	4.194	0.238	0.229
30	0.349	39.538	5.032	0.199	0.159

某检测单位针对客船以 20 km/h 左右的船速航行时所引起的船行波进行了多点实测,测得 8 号桥墩各测点船行波最大波高范围为 0.19~0.23 m,最大波高对应的周期范围为 3.00~3.43 s,与表 1 同船速下的波高与周期相差接近,表明上述船行波参数计算的的经验公式满足工程要求,可用于后续船行波浪力计算。实测表明,船行波对桥墩的动力作用,主要集中在波高充分发展时段,大约 15 s,随后衰减,据此大致拟合出船行波的波形示意图,见图 2。

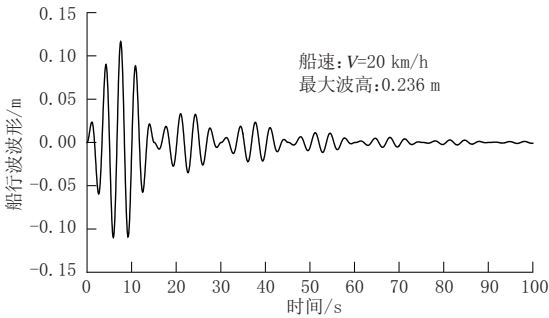


图 2 船行波波形示意图

2.2 波浪力计算

2.2.1 波浪力分布函数

对于小尺度构件($D/\lambda < 0.2$)与水深相对较大的大尺度构件($D/\lambda > 0.2$)的波浪力可采用 Morison 理论及方程计算^[15]。该理论假定柱体对波浪场的扰动相对较小,将波浪对柱体的作用简化为黏性力与惯性力两部分,则作用于水底面以上 z 处柱体全断面上与波向平行的波浪力分布 f 可按式计算:

$$\begin{aligned} f &= f_d + f_i = \frac{0.5\gamma}{g} C_D D v_x |v_x| + \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ &= \frac{0.5\gamma}{g} C_D D v_x |v_x| + \frac{\gamma}{g} C_M A \cdot a_x \end{aligned} \tag{5}$$

式中: f_d 与 f_i 分别为速度(黏性)分力与惯性分力分布, kN/m ; γ 为水的重度, kN/m^3 ; D 为柱体直径, m ; A 为柱体横断面面积, m^2 ; C_D 与 C_M 分别为黏性力系数与惯性力系数; x 为沿着波浪传播方向上的某点位置; v_x 与 a_x 分别为波浪水平速度与加速度,按式(6)与式(7)进行计算:

$$v_x = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\text{ch}(2\pi z/\lambda)}{\text{sh}(2\pi h/\lambda)} \cos(kx - \omega t) \tag{6}$$

$$a_x = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\text{ch}(2\pi z/\lambda)}{\text{sh}(2\pi h/\lambda)} \sin(kx - \omega t) \tag{7}$$

式中: H 、 T 、 λ 、 ω 与 k 为船行波的波高、周期、波长、圆频率与波数; h 为水深。由式(5)至式(7)可知,在水深一定时,桥墩同一位置的波浪力幅值随着船速的增加而增大。

8 号桥墩的水深相对波长较大,因此墩身、承台与桩基的波浪力均可采用式(5)计算,对于圆形桩基, C_D 与 C_M 分别取 1.2 与 2.0;对于方形承台与矩形墩身, C_D 与 C_M 分别取 2.0 与 2.2。

2.2.2 节点等效波浪力

对波浪力分布函数求积分即可计算桥墩各个单元所受的波浪力,图 3 所示为桥墩某一单元段所受波浪力的计算示意图。沿深度方向深度 z 处桥墩某一单元段 dz 的等效水平波浪力 F_z 为:

$$F_z = \int_z^{z+dz} \left(\frac{0.5\gamma}{g} C_D \cdot D \cdot v_x |v_x| + \frac{\gamma}{g} C_M \cdot A \cdot a_x \right) dz \tag{8}$$

式中: D 为柱体断面垂直于波向的尺寸,对于桩基, D 取桩径,对于墩身与承台, D 取矩形柱体断面垂直于波向的宽度。

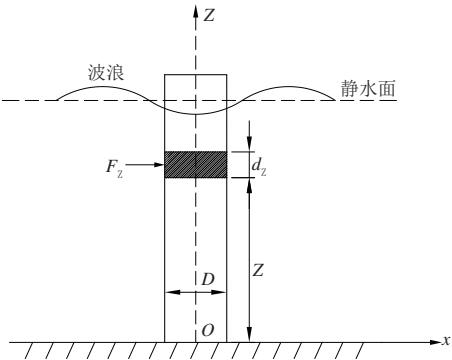


图 3 单元段波浪荷载计算的示意图

由于桩基直径 $D=2.5 \text{ m}$,桩的横向及纵向间距均为 $S=5.9 \text{ m}$,由于 $S/D=5.9/2.5=2.36 < 4$,因此计算桩基波浪力时应考虑群桩效应即乘以群桩系数 K ^[14], K 值参考《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)得到。针对此桥,垂直于波时 K 取 1.392,平行于波时 K 取 1.0。

根据桥墩有限元模型的单元与节点分布,首先根据式(8)计算得到每个单元的等效波浪力,然后按照线性分布的方式转换为单元节点上的等效集中力,便于后续直接在有限元模型的节点上加载等效集中力进行动力有限元计算。

3 桥墩振动响应分析

3.1 桥墩有限元模型

基于 ANSYS 软件建立 8 号桥墩的有限元模型,见图 4,桥墩的墩身、承台与桩基三部分均采用空间梁单元(Beam4)模拟,桩基在地面线处进行固结约束。基于 ANSYS 对有限元模型进行模态分析,得到桥墩横桥向与顺桥向的一阶振动频率分别为 0.415、0.416 Hz,与现场检测的 0.412、0.421 Hz 十分接近,符合实际,故建立的桥墩有限元模型满足工程要求。



图 4 8 号桥墩有限元模型

3.2 动力响应分析

由 2.2 节式(5)可知,桥墩所受的船行波浪力不仅与结构断面尺寸有关,还与水深等因素有关。因此,对于不同水位(水深),船行波对桥墩作用效应也存在差异。为寻找最不利水位(引起桥墩动力响应最大时的水位),采用 ANSYS 动力有限元法对桩基淹没水位、承台淹没水位与正常蓄水位 3 种不同水位下桥墩在船行波激励下的动力响应进行了计算。主要计算参数为:船速 V 为 20 km/h,时间步长取 0.05 s,阻尼比取 0.03。需要说明的是,由于桥墩横桥向与顺桥向的自振频率很接近,为了简化,本文只分析来波方向为横桥向的情形。动力有限元计算结果见表 2,可知,承台淹没水位时,墩顶横向最大位移与加速度均比其他两种水位要大得多。因此,承台淹没水位为最不利水位,后续分析均针对此水位进行。

表 2 3 种不同水位下船行波激励下墩顶横向最大动力响应			
水位	水深/m	最大位移/cm	最大加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)
桩基淹没水位	46.3	0.23	0.96
承台淹没水位	50.8	1.58	6.72
正常蓄水位	67.5	0.47	1.99

针对最不利水位,分别计算了 5 个船速对应的船行波激励下墩顶最大横向动力响应,计算结果汇总于表 3。由表 3 可知,船速 14.5 km/h 对应的墩顶最大横向位移与横向加速度明显高于其余船速,其原因是该船速下的船行波频率 0.411 Hz(见表 1)与桥墩第一阶横向自振频率 0.416 Hz 十分接近,从而引发了桥墩共振,而其余船速下的船行波频率明显偏离结构自振频率,振动响应显著降低。与船速 30 km/h 的情形相比,船速 14.5 km/h 时墩顶最大横向位移增大了近 2.24 倍,最大加速度增大了近 10 倍。工程概况中所描述的深水桥墩在船经过时出现的明显晃动是船行波引起的桥墩共振现象。

表 3 不同船速对应的船行波激励下墩顶最大横向动力响应

船速 $V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	30	25	20	14.5	10
最大位移/cm	1.13	1.17	1.58	3.66	0.17
最大加速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	2.23	3.18	6.72	24.9	2.27

4 结 语

以某深水桥墩为例,研究了深水环境下船行波参数的确定方法以及深水桥墩在船行波激励下的振动响应特性,研究结论如下。

- (1)船速对深水环境下的船行波浪参数的影响显著,随着船速的增大,船行波的波高与波长增加,但频率降低。
- (2)不同水位(水深)下的船行波对桥墩的动力效应相差较大。相比桩基淹没水位与正常蓄水位,承台淹没水位时的船行波引起的桥墩动力响应最大。
- (3)船行波频率对桥墩动力响应的影响显著。当船行波频率与结构固有频率相近时,会因共振效应使得桥墩的动力响应显著增大。因此,可通过合理调整船速,使船行波频率较大偏离结构自振频率即可显著降低桥墩振动响应。

参考文献:

[1] 张家瑞,魏凯,秦顺全.基于贝叶斯更新的深水桥墩波浪动力响应概率模型[J].工程力学,2018,35(8):138-143;171.
[2] 周远洲,遆子龙,张明金,等.跨海桥梁大尺度基础波浪荷载计算方法对比研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(2):387-394;404.
[3] 李建强,方聪.波浪力作用下桥梁设计以及安全性分析[J].城市道桥与防洪,2023(10):95-98;107.
[4] 鲁胜龙,朱金,蒋尚君,等.孤立波作用下圆柱桩波浪力计算方法研究[J].振动与冲击,2023,42(14):11-19.
[5] 刘章军,董心宇,张文远.大尺度群桩随机波浪力场的降维模拟[J].振动工程学报,2022,35(4):849-856.
[6] 陈文兴,余根祥,林桂,等.规则波浪作用下桩基础波浪力试验分

(下转第 304 页)