



# 异型群桩水流载荷遮掩效应受力分析

韩鹏鹏<sup>1,2</sup>, 林红星<sup>1,2,3</sup>, 仇正中<sup>1,3,4</sup>, 高宁波<sup>2,3,4</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;  
2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;  
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040;  
4. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 中马友谊大桥采用群桩基础, 洋流经过群桩时会产生纵向和横向位移。为了探索异型群桩水流载荷计算方法, 通过单向水槽模型试验测量单桩、双桩水流载荷, 提出异型群桩水流载荷公式, 并结合群桩水流载荷试验结果验证计算公式的合理性。结果表明, 并列双桩水流载荷随着桩心距增加而减小, 桩心距大于  $5D$  时, 双桩之间干扰效应消失; 串联双桩中后桩水流载荷随着桩心距增加而增加, 桩心距大于  $20D$  时, 双桩之间遮掩效应减弱; 随着流向角增加, 后桩受到的水流载荷呈正弦分布, 且随着桩心距变化出现不同趋势。

**关键词:** 水流载荷; 异型群桩; 桩心距; 遮掩系数

中图分类号: U 656; TV 13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0032-07

## Force analysis of isomerism pile group under flow load shielding effect

HAN Pengpeng<sup>1,2</sup>, LIN Hongxing<sup>1,2,3</sup>, CHOU Zhengzhong<sup>1,3,4</sup>, GAO Ningbo<sup>2,3,4</sup>

(1.CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China;  
2. Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;  
3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of  
Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;  
4. CCCC Highway Bridge Construction National Engineering Research Center Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** China-Maldives Friendship Bridge adopts a pile group foundation, and vertical and horizontal displacements appear when the ocean current passes the pile group. In order to explore the calculation method of the flow load of the isomerism pile group, this paper measures the flow load of single and double piles by a one-way tank model test, proposes a formula for the flow load of the isomerism pile group, and verifies the rationality of the formula according to the test results of flow load of pile group. The results show that the flow load of the parallel two piles decreases with the increase in the pile center distance, and the interference effect between the two piles disappears when the pile center distance is greater than  $5D$ . In addition, the flow load of the back pile of two piles in series increases with the increase in the pile center distance, and the shielding effect between the two piles weakens when the pile center distance is greater than  $20D$ . With the increase in the angle of current, the flow load of the back pile presents a sinusoidal distribution, and different trends appear with the change of pile center distance.

**Keywords:** flow load; isomerism pile group; pile center distance; shielding factor

外海桥梁多采用群桩基础, 传统群桩呈纵横排列, 洋流经过时, 在群桩周围形成复杂流场,

造成每根桩所受水流阻力均不相同。目前, 众多学者采用数值分析和模型试验等方法对单桩水流

收稿日期: 2022-07-14

作者简介: 韩鹏鹏 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事群桩受力及运动研究工作。

载荷绕流研究取得丰富的成果, 邓绍云等<sup>[1]</sup>通过物理模型试验测量单桩阻力系数  $C_D$  与雷诺数  $Re$  关系, 分析双桩横向、纵向以及流向角对群桩水流阻力影响。时健等<sup>[2]</sup>分析群桩中各桩水平阻力与环向压力, 后排桩受到前排桩遮掩效应阻力系数逐渐降低, 而前排桩受到后排桩干扰, 双桩之间流速有所减小。詹昊等<sup>[3]</sup>通过数值分析表明, 圆柱周围水流呈明显三维效应, 随着雷诺数增加, 漩涡主要在圆柱壁面产生。严建科等<sup>[4]</sup>采用观测水位和流速方法研究桩周围水流流态变化, 随着流速增加, 圆柱周围流速明显增加, 后部的扰动更加剧烈。Ball<sup>[5]</sup>对群桩绕流阻力进行分析, 得出群桩阻力系数随着桩的数量增加而减小, 随着流向角增加而增加的规律。陈志昌<sup>[6]</sup>对群桩物理模型试验方法进行总结和归纳, 为实际工程提供指导。翁松干等<sup>[7]</sup>对群桩遮掩系数与干扰系数进行研究, 提出群桩水流载荷计算公式, 为高桩码头水流载荷计算提供借鉴。Lam 等<sup>[8]</sup>研究不同桩排列下群桩周围流场分布, 分析了群桩产生阻力的原因。刘晓亮等<sup>[9]</sup>对深海环境群桩受力进行分析, 发现在群桩前部有明显下降水流, 水流能量消散没有形成明显的卡门涡街。邱远喜等<sup>[10]</sup>对恶劣水文条件以及珊瑚礁地质研究, 提出高承台群桩基础, 将钢护筒设计成永久结构以提高单桩水平承载力。周华兴等<sup>[11]</sup>通过模型试验研究圆形、方形、棱形墩柱阻力系数, 建立墩柱受到水流阻力与桩心距之间的关系, 完善和补充港口荷载规范。

受群桩内复杂流场影响, 异型群桩之间水流的阻力计算尚未形成系统研究, 本文依托中马友谊大桥群桩模型试验, 定量计算群桩中每根桩所受水流阻力, 以期对类似工程有所借鉴。

## 1 工程概况

中马友谊大桥是远洋深海无遮掩跨海大桥, 桥梁采用群桩基础, 桥位处水深为 30~60 m, 洋流流速为 0.75~4.33 m/s。群桩由 7 根直径为 3.2 m 钢护筒组成, 整体呈中心对称布置, 上部设置六边形承台, 平面尺寸 29.50 m×18.00 m, 见图 1。

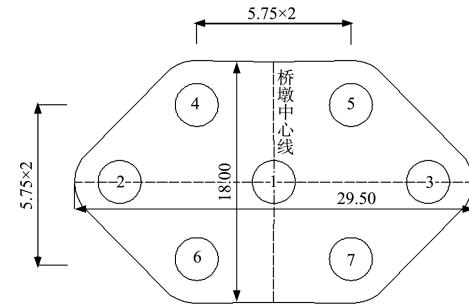
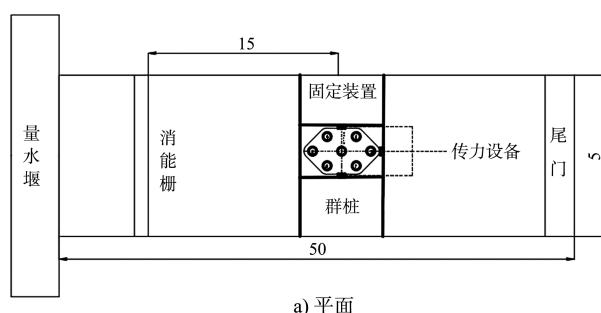


图 1 桩基平面布置 (单位: m)

## 2 试验概况

### 2.1 水槽布置

群桩受力试验水槽长 50 m、宽 5 m, 在左侧设置量水堰控制流量, 上游设置消能网使水流能够平稳经过群桩, 下游设置尾水堰调整水位, 见图 2。物理模型几何比尺为 60, 速度比尺为 7.746, 力的比尺为 216 000。采用拉压力传感器测量单桩所受水流阻力, 其精度为 1 mN, 采用三维流速测速仪测量群桩周围流速分布, 精度为 0.01 cm/s。受到水流脉动影响, 在水流阻力测量过程中单桩可能产生晃动, 每次数据测量具有一定波动, 对单桩水流阻力测量时间为 90 s, 取其均值作为单桩水流阻力实测值。试验模型比尺为 60, 桩基直径  $D$  为 5.3 cm。



a) 平面

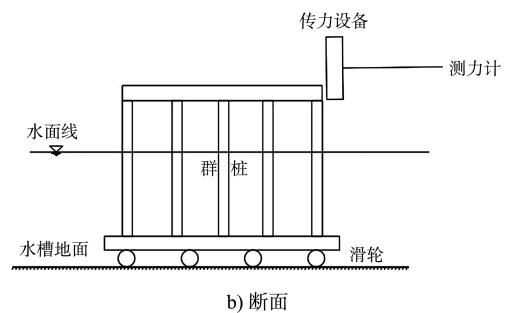


图 2 试验水槽布置 (单位: m)

## 2.2 试验工况

为研究群桩所受水流阻力, 共进行 92 组试验, 分析双桩横向间距、纵向间距以及流向角对水流载荷影响。在流速为 37.3 cm/s 时, 探究水深由 50 cm 变化至 91.7 cm 单桩所受水流阻力变化。当流速为 37.3 cm/s、水深 50 cm 时, 研究并列桩之间横向距离由 1D 变化至 6D 时, 并排两桩受到水流载荷变化; 研究串联桩之间纵向距离由 1D 变化至 20D 时, 前后两桩所受水流载荷变化; 当双桩之间距离为 2D、5D 时, 研究流向与双桩中轴线夹角由 0° 变化至 90° 时, 双桩所受水流载荷变化。推演不同排列形式双桩水流载荷计算公式后, 当水深由 50.0 cm 变化至 91.7 cm 时, 测量群桩中所受水流载荷以验证公式的适用性。

## 3 试验结果分析

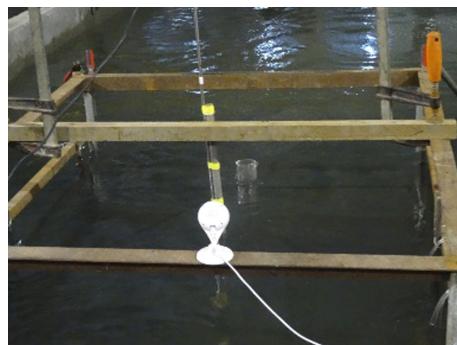
### 3.1 单桩水流阻力试验

首先研究单桩水流横向和纵向载荷分布规律。经过 20 s 后, 纵向载荷基本稳定在 1.37 N, 海洋环境中水深较大, 由于水流黏滞效用, 桩基受到横向洋流载荷产生周期性摇摆, 横向水流载荷范围为 -0.15~0.15 N, 约为 1/10 纵向水流载荷, 见图 3。

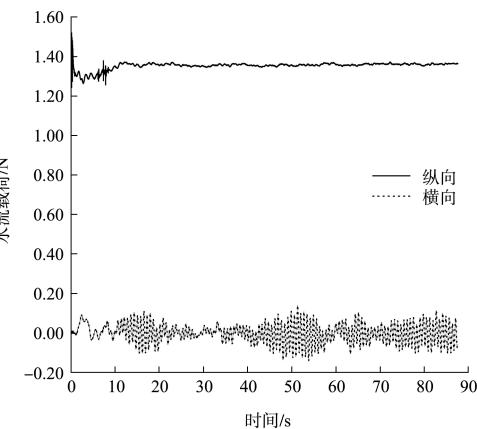
根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[12]</sup>中桩载荷  $F$  计算公式, 对比不同水深下公式计算结果与模型试验结果。如图 4 所示, 随着水深增加, 水流载荷呈线性增加。由于水工模型试验处于低雷诺数区, 而实际工程采用的规范公式计算处于高雷诺数区, 造成规范公式与试验值阻力系数的差异。规范公式计算值与模型试验最大差别在 5% 以内, 试验整体布置和测量设备能够满足群桩水流载荷测量需求。

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 D h \quad (1)$$

式中:  $C_D$  为水流阻力系数;  $D$  为桩基直径;  $h$  为桩基入水深度;  $v$  为行进流速;  $\rho$  为水的密度。



a) 单桩水流载荷测量



b) 单桩水流载荷历时演变

图 3 单桩水流载荷分析

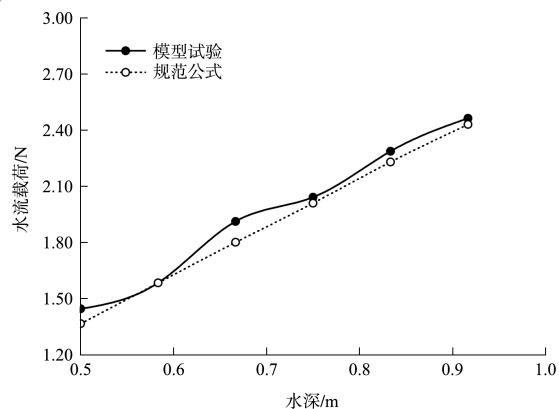


图 4 单桩水流载荷对比

### 3.2 并排桩干扰试验

为研究桩心距对并排双桩水流阻力影响, 引入双桩横向干扰系数  $K_h$ , 从图 5 可以看出, 水流经过并排双桩时, 流场在双桩中轴线呈对称分布, 在双桩中心距  $d$  较小时, 由于桩基存在对水流压缩作用, 使并排双桩之间的流速大于两侧流速。当并排桩心距为  $3D$  时, 双桩之间流速为  $0.50 \text{ m/s}$ , 为行进流速的 1.34 倍。在试验初期, 桩受到水流冲

击作用产生附加质量力, 导致桩受到横向载荷出现大幅度变动, 10 s 后水流横向载荷趋于周期性振动。随着并列双桩距离逐渐增加, 每根桩受到干扰效应越来越小; 随着桩心距增加, 振动幅度逐渐减小。当并排双桩桩心距  $d$  为  $1D$  时, 横向水流振动范围为  $-0.20 \sim 0.20$  N; 当并排双桩桩心距  $d$  为  $5D$  时, 横向水流载荷振动范围为  $-0.10 \sim 0.10$  N, 如图 5 所示。

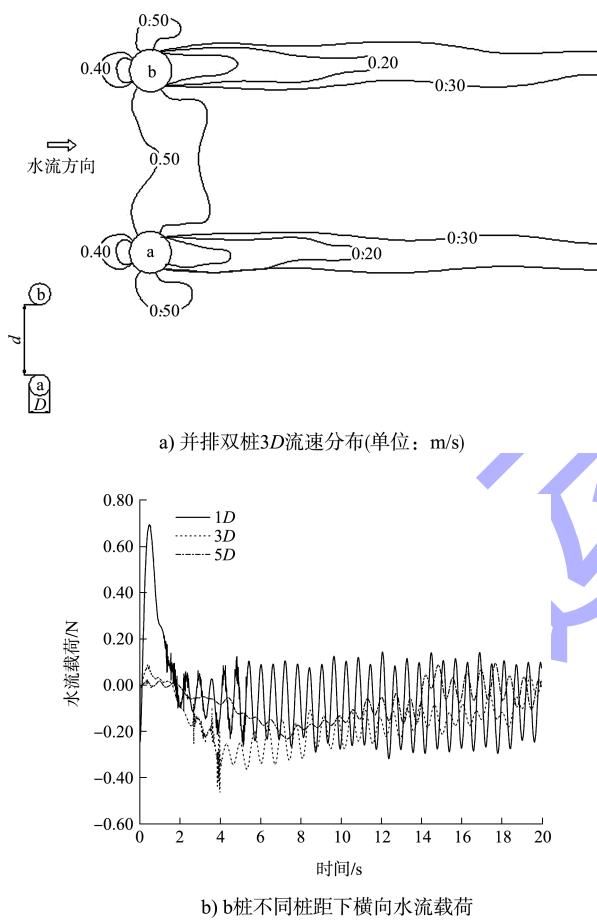


图 5 并排双桩流场分布与振动

并排桩中 a、b 桩的水流载荷大致相等, 见图 6。

当桩心距为  $1D$  时, a 桩受到水流载荷为 1.92 N, 约为单桩水流载荷的 1.4 倍。随着并排双桩桩心距增加, 桩受到的水流载荷逐渐降低。桩心距小于  $3D$  时, a 桩受到纵向水流载荷下降速率较大; 桩心距为  $5D$  时, a 桩受到水流载荷下降速率较为平缓, 水流载荷为 1.45 N, 约为单桩的 1.05 倍; 桩心距大于  $5D$  时, 双桩中每根桩与单桩受到的水

流阻力大致一样。分析双桩中每根桩所受水流阻力随桩心距的变化趋势, 可以得出横向干扰系数  $K_h$  与桩心距的对应关系, 采用 DoseResp 数学模型对其进行拟合, 进而推求出并排桩单桩所受水流阻力  $F_h$  表达式:

$$F_h = \frac{1}{2} \rho C_D K_h A v^2 \quad (2)$$

式中:  $A$  为桩与流向垂直平面上投影面积;  $K_h$  为

$$\text{干扰系数, } K_h = 1 + \frac{0.352}{1 + 10^{-1.12 \times (2.4 - d/D)}} \circ$$

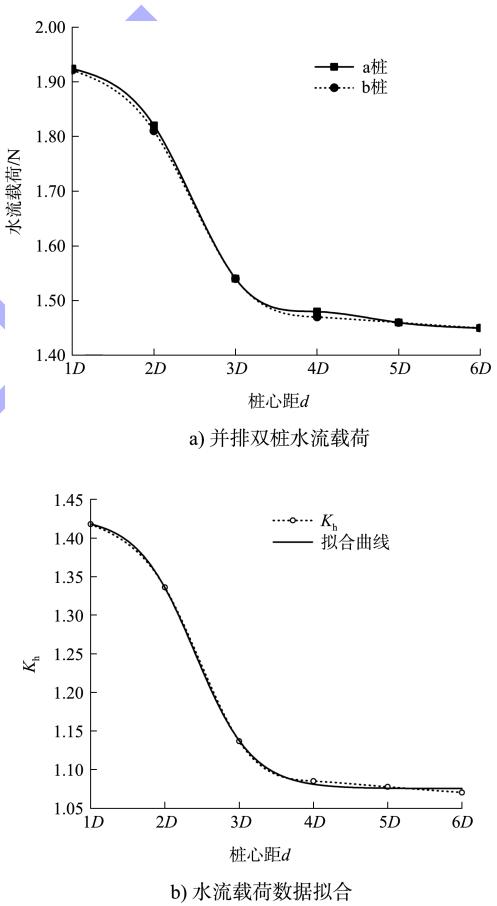


图 6 并排双桩所受水流载荷

### 3.3 串联桩遮掩效应试验

当水流经过串联双桩时, 由于 a 桩对 b 桩的遮掩效应, b 桩周围的行进流速有所降低, 造成 b 桩受到水流载荷较小。当串联双桩桩心距为  $2D$  时, 双桩之间流速为 0.1 m/s, 相当于行进流速的 26.8%。当水流经过 a 桩后, 脱落漩涡导致后桩产生横向力, 对后桩产生周期性振荡。在试验初期,

b 桩受到 a 桩遮掩效应, 周围流场处于静止状态, 所受水流横向载荷较小, 主要受水流黏滞效应和流速梯度影响; 10 s 后水流横向载荷趋于周期性振动。当桩心距  $d$  由  $1D$  增加至  $5D$  时, b 桩所受横向力逐渐增强; 桩心距由  $5D$  增加至  $20D$  时, b 桩所受横向力逐渐减弱。由图 7 可知, 当桩心距为  $5D$  时, b 桩所受水流横向载荷为  $-0.17 \sim 0.17$  N, 约为桩心距  $1D$ 、 $10D$  时横向水流载荷的 10 倍, 水流经过串联双桩时, 后桩容易与脱涡频率发生共振。

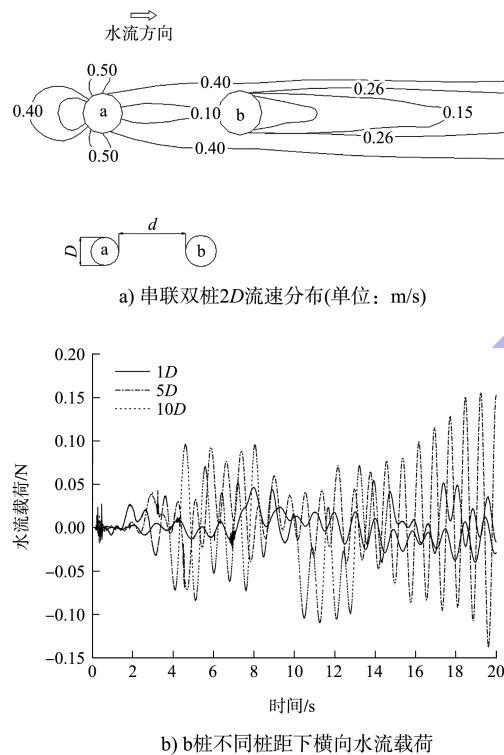


图 7 串联双桩流速分布与横向水流载荷

为研究桩心距对串联双桩水流阻力的影响, 引入后桩所受遮掩系数  $K_v = 1 - 0.75 \times 0.88^{d/D}$ 。从图 8 串联双桩受力曲线可知, 当串联双桩桩心距小于  $7D$  时, 由于 b 桩的存在导致 a 桩后方水逆压梯度减小, 与单桩相比, a 桩所受纵向水流载荷有所减小, 最小值为  $1.23$  N, 约为稳定值的  $92\%$ 。当串联双桩桩心距大于  $7D$  时, 前桩所受水流载荷不再受到后桩的影响。串联桩心距对后桩受到水流载荷影响较大, 桩心距与水流载荷呈对数分布。当桩心距在  $1D \sim 10D$  时, 后桩所受水流载荷随桩心

距变大而变大, 随后增长趋势变缓。采用指数函数 Asyptoticl 数学模型对其进行拟合, 可以得出后桩受到水流载荷  $F_v$  与桩心距之间的关系:

$$F_v = \frac{1}{2} \rho C_D K_v A v^2 \quad (3)$$

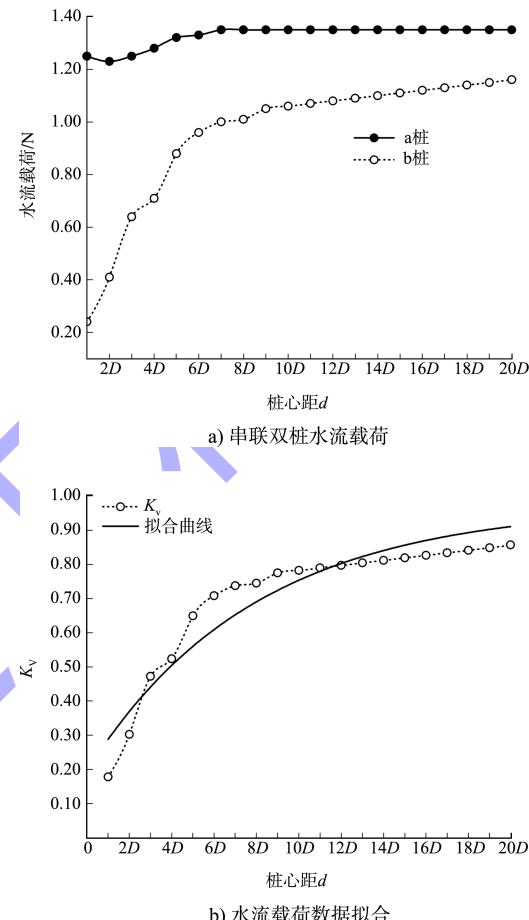


图 8 双桩所受纵向水流载荷

### 3.4 流向角对双桩遮掩效应分析

为分析流向角对群桩遮掩系数影响, 以双桩桩心距  $2D$  为例, 研究流向角  $0^\circ$  变化至  $90^\circ$  时 b 桩所受水流横向载荷变化。两桩中心线与水流流向夹角  $\theta = 0^\circ$ , 即为串联桩; 当  $\theta = 90^\circ$ , 即为并联桩。从图 9a) 可以看出, 水流经过 a 桩时造成两侧水流流速增加, 随后形成高速水流与 b 桩相遇, 造成 b 桩所受水流载荷迅速升高。从图 9b) 可以看出, 在试验初期, 由于 a 桩遮掩和干扰效应, b 桩所受水流冲击造成的横向载荷急剧性改变, 10 s 后水流横向载荷趋于周期性振动。随着流向角增

加, b 桩受到 a 桩尾部水流挤压, 横向载荷不再呈周期性振动, 出现先增加后减小趋势, 当流向角为 50° 时, b 桩所受横向载荷最大为 0.90 N, 为纵向水流载荷的 60%, 此时水流的横向载荷在设计过程中不能忽略, 施工过程应考虑后桩的横向偏移。

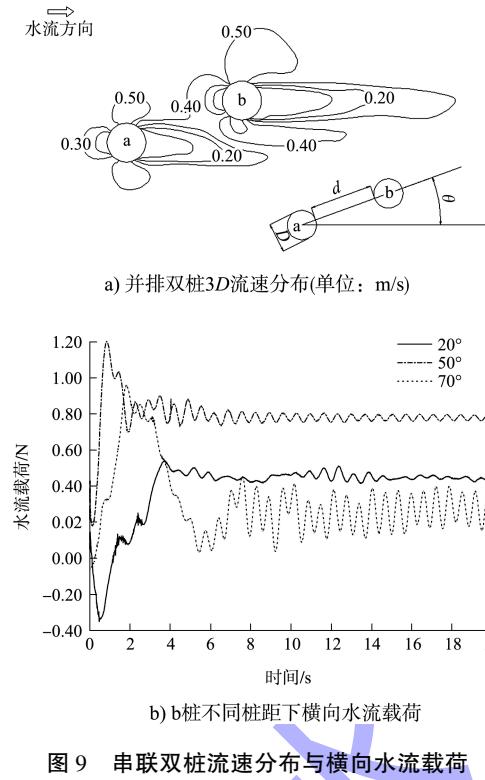


图 9 串联双桩流速分布与横向水流载荷

随着桩心距增加, 流向角对前桩纵向水流载荷的影响降低。如图 10a) 所示, 当桩心距为 2D 时, 随着流向角增加, 前桩所受纵向水流载荷呈线性增加, 流向角为 10° 时, a 桩横向载荷为 1.23 N; 流向角为 90° 时, a 桩横向载荷为 1.81 N, a 桩受到水平载荷增加 47%。因水流经过 a 桩后, 脱涡频率交替出现, 在流向角大于 30° 后, 造成 b 桩所受水流载荷与流向角呈正弦上升关系, 流向角为 80° 时, b 桩所受水流载荷为 2.25 N。

如图 10b) 所示, 当桩心距为 5D 时, 流向角的改变对前桩水流载荷影响较小。流向角为 10° 时, a 桩横向载荷为 1.34 N; 当流向角为 90° 时, a 桩横向载荷为 1.46 N, a 桩受到水平载荷增加 8%。b 桩所受水流载荷随着流向角呈正弦变换, 当流向角小于 60° 时, b 桩由遮掩状态渐变至干扰状态, 导致正弦变幅较大, 其中当流向角由 30° 增加至 40° 时, b 桩水流载荷增加 40%。

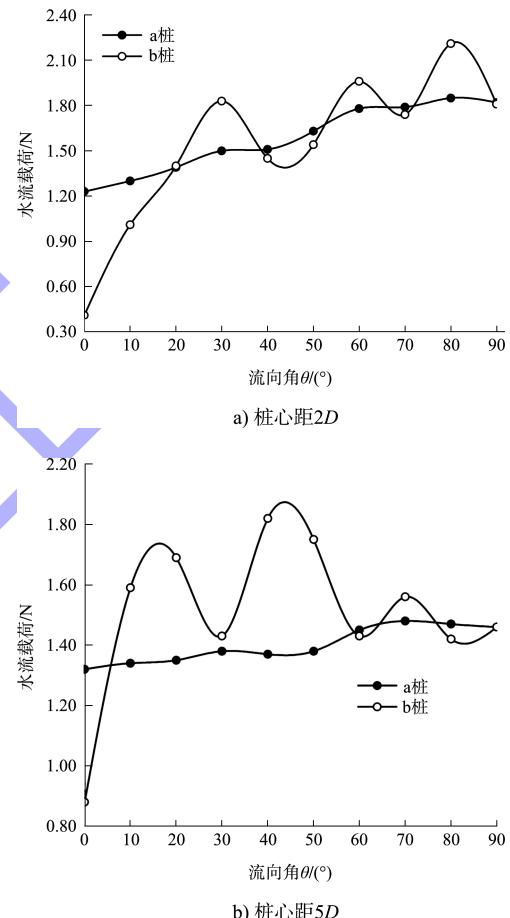


图 10 不同流向角时双桩所受纵向水流载荷

在计算出双桩遮掩系数的基础之上, 考虑流向角阻力系数  $K_\theta$  对前桩水流载荷的影响。前、后桩流向角阻力系数可按表 1 选用, 从而计算得出双桩受到水流载荷。

表 1 流向角阻力系数  $K_\theta$ 

桩心距	桩位	$K_\theta$									
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$d \leq 5D$	前桩	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5
	后桩	1.0	2.5	3.4	4.5	3.5	3.8	4.8	4.2	5.4	4.4
$d > 5D$	前桩	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
	后桩	1.0	1.8	1.9	1.6	2.1	2.0	1.6	1.8	1.6	1.7

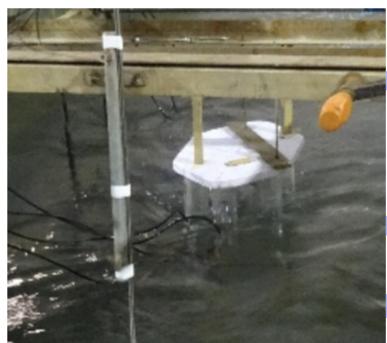
#### 4 异型群桩水流总作用力推求与验证

中马友谊大桥桥梁基础有 7 根桩组成,首先根据水深、流速、桩径计算出迎水面中心处 2# 桩所受水流载荷,根据试验规律推求出后桩 1# 桩的水流阻力  $F_{\text{后}}$ ,通过迭代计算出各桩所受水流载荷,从而得出异型群桩水流载荷  $F_{\text{群}}$ :

$$F_{\text{后}} = F_{\text{前}} K_{\theta} K_v = \frac{1}{2} \rho A v^2 K_{\theta} K_v C_D \quad (4)$$

$$F_{\text{群}} = \sum_{i=1}^n f_i = \frac{1}{2} \rho A v^2 \sum K_{\theta} K_v \quad (5)$$

为验证群桩水流载荷计算公式的合理性,当水深由 0.5 m 增大至 0.9 m 时,在水槽中测量群桩中所受水流阻力,并与式(5)计算值进行对比。从图 11 看出,因异型群桩水流载荷计算公式是在原有单桩水流载荷计算公式上建立起来的,群桩水流载荷与水深呈线性关系,对比公式计算值与模型实测值,两者之差小于 5%,基本吻合。



a) 群桩水流载荷测量仪器

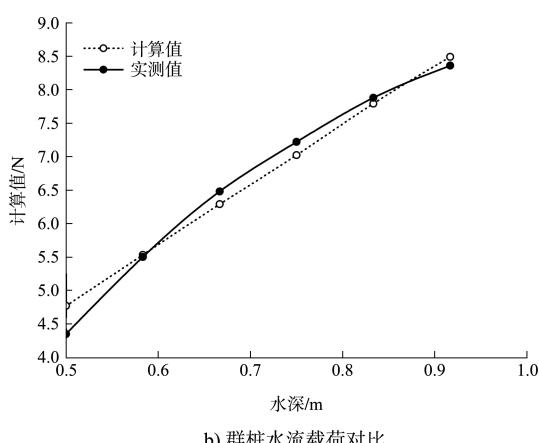


图 11 群桩水流载荷对比

#### 5 结论

1) 随着水深增加,单桩水流载荷呈线性增加,单桩受到的横向载荷呈周期性分布,最大值约为顺流向载荷的 1/10。

2) 并排双桩受到水流载荷随桩心距增加而减小,桩心距大于 5D 时,双桩之间干扰效应消失;串联双桩中,后桩水流载荷随着桩心距增加而增加,桩心距大于 20D 时,双桩之间遮掩效应减弱;随着流向角增加,后桩所受水流载荷呈正弦分布,且随着桩心距变化出现不同趋势,当流向角较小时,由于前桩对水流压缩效应,造成后桩所受水流载荷比前桩水流载荷还要大。

3) 通过总结双桩在不同桩心距、流向角时的水流载荷分布,提出群桩水流载荷计算公式,采用物理模型试验验证群桩水流载荷计算公式的合理性,为相似工程水流载荷计算提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 邓绍云,张嘉利. 桩群阻力测试的研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(2): 86-90.
- [2] 时健,蒋宗南,孔德森. 水流荷载作用下海洋群桩受力特性研究[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(3): 63-71.
- [3] 詹昊,李万平,方秦汉,等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129-132.
- [4] 严建科,焦臣,龙涛,等. 单圆柱桥墩绕流场试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(6): 779-785.
- [5] BALL D J. Simulation of piers in hydraulic models[J]. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division, 1974, 100(1): 23-34.
- [6] 陈志昌. 杨林口石油勘探码头模型试验报告[R]. 南京:南京水利科学研究院, 1982.
- [7] 翁松干,钱钧,翟铎,等. 高桩码头桩群水流阻力近似计算方法[J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 116-119.
- [8] LAM K, ZOU L. Three-dimensional numerical simulations of cross flow around four cylinders in an inline square configuration[J]. Journal of fluids and structures, 2010, 26(3): 482-502.

(下转第 90 页)