

高桩码头浮托力计算

吴国茂^{1,2}, 戴志峰^{1,2}

(1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200;
2. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200070)

摘要: 波浪浮托力是高桩码头、墩台结构设计的重要荷载之一, 通过对浮托力公式进行分析, 找到浮托力与水位、板底高程之间的关系以及最大浮托力出现的位置, 以便进行快捷计算。通过对现有不同的浮托力公式进行对比分析, 对总浮托力是否考虑静水压强下的影响进行探讨。

关键词: 浮托力; 波浪; 高桩码头; 静水压强

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0038-04

Calculation of wave uplift force on high-pile wharf

WU Guo-mao^{1,2}, DAI Zhi-feng^{1,2}

(1. Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo 315200, China;
2. CCCC Shanghai Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The wave uplift force is an important external load in high-pile wharf and piles. Based on the analysis of the formula system for the wave uplift force, we find the relationship between the uplift force and the water stage and bottom elevation, and the position of biggest uplift force appears, so as provide convenient and quick calculation. Comparing existing calculation formulae, we discuss whether the influence under the hydrostatic pressure shall be considered for the total wave uplift force.

Keywords: wave uplift force; wave; high-pile wharf; hydro-static pressure

现阶段, 国内浮托力的计算主要有两种公式, 一种是《海港工程设计手册》^[1]中的计算公式; 另一种是周益人等^[2]利用试验数据进行分析拟合, 进而演化得到《海港水文规范》^[3]中的公式, 但浮托力的公式复杂、影响因素较多, 而对浮托力分析的文献较少, 宋军营^[4]从工程角度进行分析, 未将公式进行系统研究。本文系统分析浮托力, 充分理解浮托力随变量的变化情况, 以便在工程计算中快速找到浮托力的最大值, 最后针对两种公式进行对比分析, 找到两个公式的特点。

我国《海港工程设计手册》中推荐的波浪上托力压强计算公式为:

$$p = \beta \rho g (\eta - \Delta h) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) + \frac{\pi H^2}{2L} \frac{\left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2 \right)}{4 \left(\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L} \right)^3} \cos(2kx) \quad (2)$$

式中: p 为波浪上托力压强; β 为压力反应系数, 当上部结构的宽度在 10 m 以下时, $\beta = 1.5$; 当上部结构的宽度较大时, 取 $\beta = 2.0$; Δh 为超高; η 为波峰在静水面以上的高度。

正向波作用下, 高桩码头面板底部纵向单位长度上的波浪最大总浮托力为:

$$\frac{P}{\rho g x H} = K_1 \left(1 - \frac{\Delta h}{1.1\eta} \right)^{0.3} e^{-b \left(\frac{\Delta h}{1.1\eta} - c \right)^2} \quad (3)$$

收稿日期: 2015-05-06

作者简介: 吴国茂 (1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口、航道设计与研究工作。

$$K_1 = d + ath\left(\frac{L}{2B} - 2\right) \tag{4}$$

式中系数见表 1。

表 1 波浪浮托力系数

波形态	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
规则波	0.25	0.80	0.80	0.75
不规则波	0.35	0.90	0.75	0.85

正向波作用下, 高桩码头面板底部纵向单位长度上的波浪最大均布压强公式为:

$$\frac{P}{\rho g H} = a \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta}\right)^{0.3} e^{-b\left(\frac{\Delta h}{1.1\eta} - c\right)^2} \tag{5}$$

式中系数见表 2。

表 2 波浪最大冲击压强系数

波形态	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
规则波	3.20	0.80	0.80
不规则波	4.50	0.90	0.75

式(5)中 η 为:

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L} \frac{\left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L}\right) \left(\operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2\right)}{4 \left(\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L}\right)^3} \tag{6}$$

式中: Δh 为板底高程减去对应水位高度 (m); d 为水深 (m)。

由于公式(3)较为复杂, 不易看出浮托力与各变量之间的关系, 因此下面先对式(3)进行分析, 然后对式(1)、(3)进行对比分析。

1 公式分析

1.1 工程设计数据

以一个工程实例进行分析, 数据见表 3。

表 3 工程设计数据

波长 <i>L</i>	波高 <i>H</i> _{1%}	泥面高程 <i>h</i> ₀	设计低水位 <i>h</i> ₁	极高水位 <i>h</i> ₂
60	4	-10.00	-1.50	2.50

沿波浪传播方向板的宽度 $B = 15\text{ m}$ 下, 对板底高程 $h_3 = 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、4.6、4.7、4.8\text{ m}$ 进行分析。下面计算的浮托力为纵向单位长度下的浮托力。

1.2 公式(3)最大浮托力水位分析

这里先讨论最大浮托力下的 $\Delta h/\eta$ 比值, 为了

接近实际, 浮托力按不规则波计算, 结果见表 4。

表 4 公式(3)中最大浮托力下的 $\Delta h/\eta$ 比值

板底高程/m	最大浮托力下的水位/m	最大浮托力 <i>P</i> /(kN·m ⁻¹)	最大浮托力下的 η /m	$\Delta h/\eta$
0	-1.35	559.5	2.70	0.50
0.5	-0.82	559.5	2.62	0.50
1.0	-0.28	559.5	2.55	0.50
1.5	0.24	559.5	2.50	0.50
2.0	0.76	559.5	2.46	0.50
2.5	1.30	559.5	2.43	0.49
3.0	1.80	559.5	2.40	0.50
3.5	2.30	559.5	2.37	0.51
3.7	2.50	548.3	2.37	0.51
4.0	2.50	483.0	2.37	0.63
4.5	2.50	483.0	2.37	0.85
4.6	2.50	362.4	2.37	0.89
4.7	2.50	301.9	2.37	0.93
4.8	2.50	238.5	2.37	0.97

将表 4 的数据作图得到图 1, 从图 1 可以看出, 当 $\Delta h/\eta = 0.5$ 时, 随着板底高程的增加, 对应最大浮托力的水位也跟着线性增加; 当 $\Delta h/\eta > 0.5$ 时, 最大浮托力仅出现在极高水位, 不会随着板底高程的增加而增加, 这里可得出函数关系:

$$\begin{cases} y = x - 1.25 & (R^2 = 0.998) \quad x < 3.75 \\ y = 2.5 & x > 3.75 \end{cases} \tag{7}$$

式中: x 为板底高程; y 为对应最大浮托力的水位。

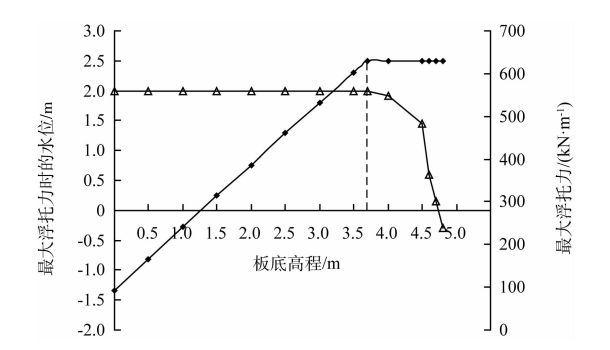


图 1 不同板底高程下最大浮托力对应的水位

设 η_1 为波峰在设计低水位下的高度, η_2 为波峰在极高水位下的高度, 有 $\bar{\eta} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}$, 可以得到式(7)的一个普遍性公式

$$\begin{cases} y = x - \frac{\bar{\eta}}{2} & x \leq h_2 + \frac{\bar{\eta}}{2} \\ y = h_2 & x > h_2 + \frac{\bar{\eta}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中： x 为板底高程； y 为对应最大浮托力的水位； h_2 为极高水位。 η 由二阶斯托克斯计算而来，因此可利用 $\bar{\eta} = (1.2 \sim 1.3) \frac{H}{2}$ 近似计算。对于本工程，根据 $\bar{\eta} = 2.5$ ，即得到公式(7)。因此当知道板底高程时，可以利用公式(8)快速找到最大浮托力对应水位的位置。

1.3 公式(2)最大浮托力值分析

对于公式(2)浮托力值进行探讨，设水位、波要素不变，当水位为某值时，可得到不同板底高程下纵向单宽长度下浮托力。

这里利用波要素及水位，仅列出当水位 $h = 1.5、2.5 \text{ m}$ 时，得到不同板底高程下的浮托力(图2)，从图2可以看出，随着板底高程的增加，浮托力先增加后减小，浮托力的增大速率较缓、减小速率较陡。同时通过大量数据对公式(3)分析，当板底高程 $h_3 = h + \frac{\eta}{2}$ 时，浮托力达到最大，即与公式(8)相吻合。此外，对于两个不同的水位，计算得到的浮托力波形形状基本相同，可通过进行左右平移两水位差值得到。

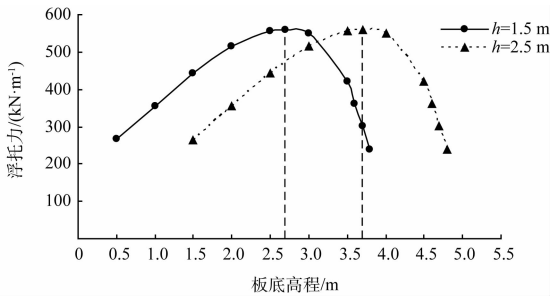
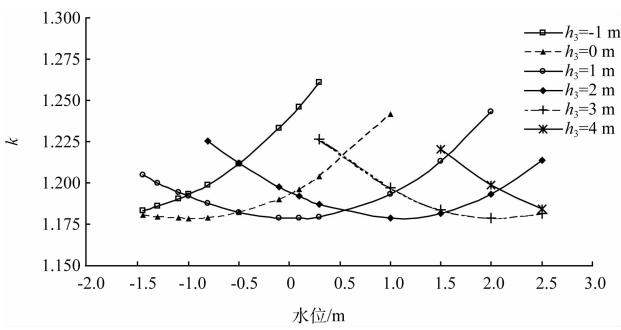


图2 某水位下不同板底高程对应的浮托力

1.4 公式(3)的规则波与不规则波的浮托力值分析

利用不规则波浮托力除以规则波下的浮托力得到其比值(图3)。

从图3中可以看出比值 $k = 1.15 \sim 1.3$ 。当不受两端水位影响时，两者的比值为抛物线关系，当水位 $h \approx h_3 - \frac{\eta}{2}$ 时相差最小。



注： h_3 为板底高程， k = 不规则波浮托力/规则波浮托力。

图3 不规则波与规则波的浮托力比值

2 公式(1)、(3)对比分析

将公式(1)、(3)进行对比分析，图4为极高水位 $h = 2.5 \text{ m}$ 下，浮托力与板底高程的关系，从图4可以看出，随着板底高程的增加，公式(1)线性减小，公式(3)先增大后减小。

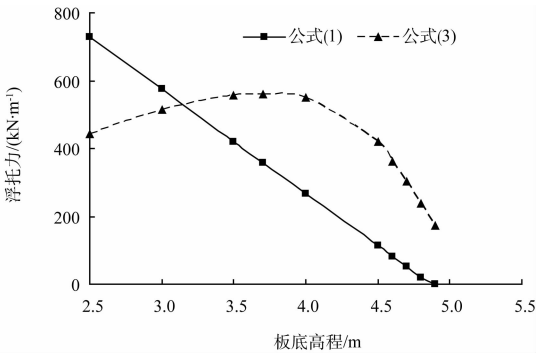


图4 水位为 2.5 m 时不同板底高程下的浮托力

选择文献[4]的数据来进行对比分析，文献[4]通过只变化水位而板底高程不变的方式来进行计算，为了方便比较，这里通过最终变化 Δh 来进行比较，以达到同样的效果(图5)。

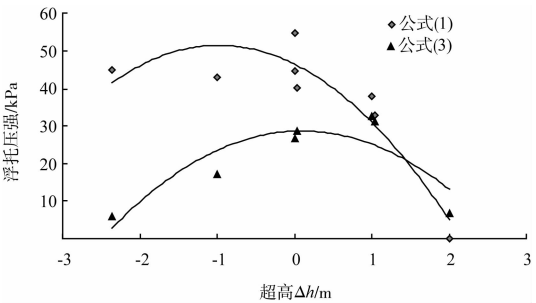


图5 公式(1)、(3)对比分析

从图5可以看出，当 $\Delta h < 1.4$ 时，公式(1)计算的结果比公式(3)大， $\Delta h > 1.4$ 时，即 $\Delta h/\eta > 0.5$

左右, 公式(1)计算的结果才会小于公式(3)。

公式(1)按静水压强分析原理得到, 而公式(3)按动水压强原理得到, 当 $0 < \Delta h/\eta < 1$ 时, 水位未达到面板或墩台, 没有静水浮托力; 当 $-0.5 < \Delta h/\eta < 0$ 时, 面板或墩台受到静水压强的影响, 公式(1)考虑了静水压强, 因此不需要考虑静水压强的影响。

公式(3)没有考虑静水下水对板的浮托力压强的影响, 因此需加上静水下的浮托力, 静水下的浮托力公式为:

$$\begin{cases} F_1 = -\rho g A \Delta h & \Delta h < 0 \\ F_1 = 0 & \Delta h \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

因此按公式(3)计算的总浮托力为

$$F = P + F_1 \quad (10)$$

式中: F 为总的浮托力; F_1 为静水下的浮托力; A 为计算底板的面积; Δh 为板底高程减去对应水位高度(m)。图 5 的总浮托压强见图 6。

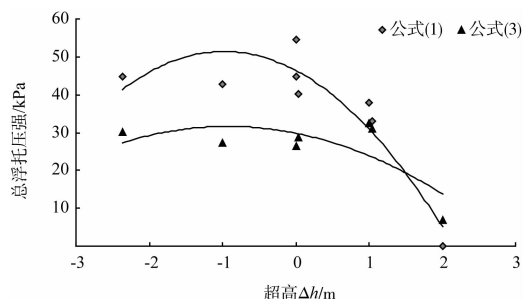


图 6 总浮托力对比分析

3 结语

在波要素不变的情况下, 通过对公式(3)进行分析得出:

1) 当 $\Delta h/\eta = 0.5$ 时, 随着板底高程的增加, 对应最大浮托力的水位也跟着线性增加, 最大浮托力值不变; 当 $\Delta h/\eta > 0.5$ 时, 最大浮托力仅出

现在极高水位位置, 而不会随着板底高程的增加而增加, 此时的最大浮托力值不断减小。最后得到一个快速计算最大浮托力对应水位的普遍性公式, 为工程是否计算除极高水位以外的浮托力提供判断。

2) 随着板底高程的增加, 浮托力先增加后减小, 浮托力的增大速率较缓, 减小速率较陡。当板底高程 $h_3 = h + \frac{\eta}{2}$ 时, 计算得到浮托力达到最大。

3) 得到不规则波与规则波下的浮托力比值在 1.15 ~ 1.3。

通过对公式(1)、(3)进行对比分析, 得到随着板底高程的增加, 公式(1)呈线性减小, 公式(3)先增大后减小。公式(1)按静水压强分析原理得到, 而公式(3)按动水压强原理得到。因此公式(1)计算得到浮托力为总的浮托力, 而公式(3)得到浮托力需加上静水下的浮托力为总的浮托力。

公式仅仅利用斯托克斯波的表达式来代替其他一些特殊的波, 实际工程中可能会有不同波之间的叠加、变形等复杂的自然因素, 因此对于大型重要的工程, 仍需要以模型试验来加以分析判断。

参考文献:

- [1] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册 (中册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [2] 周益人, 陈国平, 王登婷. 透空式水平板波浪上托力计算方法[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 26-30.
- [3] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].
- [4] 宋军营. 正向浪作用下离岸高桩墩台结构波浪总浮托力计算[J]. 水运工程, 2014(3): 94-97.

(本文编辑 武亚庆)