



高桩梁板式结构面板波浪浮托力计算 与模型试验

王 君¹, 王 涛², 黄宗伟¹

(1. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315040; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 离岸深水港透空式结构越来越多, 但波浪一般较大, 波浪力成为透空式码头、引桥结构设计的关键控制荷载, 其中面板浮托力对确定上部结构尤为关键。根据工程实例的两种顶面高程方案, 采用规范方法和周益人方法计算各种水位下的正向波浪作用面板浮托力, 并与试验结果进行对比, 分析不同计算方法的适用性。结果表明, 在实际工程计算中, 采用规范方法计算离岸码头、引桥上部结构的波浪浮托力, 并可参考周益人提出的计算公式进行复核。

关键词: 高桩梁板结构; 波浪浮托力; 物理模型试验

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0203-06

Calculation and model test of wave uplift force of high-pile beam-slab structure panel

WANG Jun¹, WANG Tao², HUANG Zong-wei¹

(1. Ningbo China Communications Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315040, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: There are more and more open-air structures in offshore deep-water ports, but the waves are generally large, and the wave action becomes the key control load in the design of open-air wharf and approach bridge structure, among which the panel uplift force is particularly critical for determining the superstructure. According to two top elevation schemes of the engineering examples, we use the standard method and Zhou Yiren's method to calculate the uplift force of the forward wave acting panel under various water levels, compare with the test results, and analyze the applicability of different calculation methods. The results show that in the actual engineering calculation, the wave uplift force of the offshore wharf and the superstructure of the approach bridge is calculated by the standard method, and can be checked with reference to the calculation formula proposed by Zhou Yiren.

Keywords: high-pile beam-slab structure; wave uplift force; physical model test

近年来, 我国港口建设越来越向外海深水发展。由于缺乏良好的掩护条件, 离岸深水港的波浪较大, 一直给码头建设带来挑战。在许多码头工程中波浪力为控制荷载, 为保证结构的安全、经济, 合理的波浪力计算是结构设计的重要基础。

对于高桩梁板式结构面板的波浪浮托力, 国内外学者做了大量研究, 提出一些经验公式。目

前工程设计中对高桩梁板式码头上部面板的波浪浮托力计算, 仍然以《港口与航道水文规范》^[1]推荐的公式为主要依据。周益人等^[2-4]通过详细的试验研究, 认为波浪上托力压强分为冲击型分布和均匀型分布, 并提出冲击型和均匀型上托力计算的方法。宋军营等^[5]通过工程实例和试验结果, 分析高桩墩台结构不同波浪总浮托力计算公式, 认为《海港工程设计手册》(中册)^[6]中波浪浮托力

计算公式不宜作为高桩墩台结构的波浪总浮托力计算的依据。施斌^[7]认为不同公式均有一定局限性,计算结果差别较大。本文对《港口与航道水文规范》推荐的波浪对高桩梁板式上部面板浮托力计算公式与周益人等在文献[4]中提出的计算方法(简称“周益人方法”)进行比较分析,并结合某工程实例的波浪物理模型试验结果,对有关计算公式的适用性进行探讨。

1 波浪对高桩梁板上部结构浮托力计算公式

1.1 《港口与航道水文规范》

1.1.1 波浪作用的浮托力

正向不规则波作用下,高桩梁板式码头面板底部纵向单位长度上的波浪最大总浮托力可按下列公式计算:

$$\frac{p_{1\%}}{\rho g x_{1\%} H_{1\%}} = K_1 \left(1 - \frac{\Delta h}{C \eta_{1\%}}\right)^{0.3} e^{-0.9 \left(\frac{\Delta h}{C \eta_{1\%}} - 0.75\right)^2} \quad (1)$$

$$\eta_{1\%} = \frac{H_{1\%}}{2} + \frac{\pi H_{1\%}^2}{2L_s} \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L_s}\right) \left(\operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L_s} + 2\right) / \left[4 \left(\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L_s}\right)^3\right] \quad (\eta_{1\%}/H_{1\%} \leq 0.7) \quad (2)$$

式中: $p_{1\%}$ 为最大总浮托力(kN/m); ρ 为海水的密度(t/m^3),取 1.025 t/m^3 ; $H_{1\%}$ 为累积频率为1%的入射波波高(m); $x_{1\%}$ 为波浪作用宽度(m),即均布压强分布宽度,当 $x_{1\%} > B$ 时取 B , B 为沿波浪传播方向的面板宽度(m); K_1 为面板宽度影响系数; Δh 为面板底部在静水面以上的高度(m); C 为波浪反射影响系数; $\eta_{1\%}$ 为波高 $H_{1\%}$ 对应的波峰在静水面以上的高度(m); L_s 为有效波波长(m); d 为码头前沿水深(m)。

1.1.2 波浪作用的冲击力

正向不规则波作用下,码头面板底部波浪最大冲击压强可按下列公式计算:

$$\frac{p_{1\%}}{\rho g H_{1\%}} = 4.5 \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta_{1\%}}\right)^{0.3} e^{-0.9 \left(\frac{\Delta h}{\eta_{1\%}} - 0.75\right)^2} \quad (3)$$

$$p_0 = p_{1\%} x_0 \quad (4)$$

$$x_0 = \frac{x_{1\%}}{10} \quad (5)$$

式中: p_0 为单位长度上冲击总力(kN/m); x_0 为冲击压强分布宽度(m),当 $x_0 > B$ 时取 B 。

1.2 周益人方法

1.2.1 波浪作用的均匀型上托力计算方法

根据资料的包络值得出计算最大上托力公式:

$$\frac{p}{\rho g H B} = 1.4 \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta}\right)^{0.8} e^{-\left(\frac{\Delta h}{\eta} - 0.70\right)^2} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L_s} \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L_s}\right) \left(\operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L_s} + 2\right) / \left[4 \left(\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L_s}\right)^3\right] \quad (7)$$

式中: p 为水平板最大总上托力(kN/m); B 为水平板总宽(m); H 为入射波波高(m); η 为波高对应的波峰在静水面以上的高度(m)。按其定义,式(6)中最大总上托力与规范方法的最大总浮托力概念相同。

1.2.2 局部冲击型上托力计算方法

根据资料的包络值得出计算最大冲击压强公式:

$$\frac{p}{\rho g H} = 4 \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta}\right)^{0.6} e^{-1.4 \left(\frac{\Delta h}{\eta} - 0.55\right)^2} \quad (8)$$

$$p = \frac{p_0}{l_0} \quad (9)$$

$$l_0 = \frac{x}{20} \quad (10)$$

式中: p 为水平板下最大冲击压强(kPa); p_0 为水平板下局部冲击型上托力(kN/m); x 为面板底部的波浪作用宽度(m),即均布压强分布宽度。

2 案例分析

2.1 工程概况

本工程将新建1座7万吨级滚装、杂货码头及相应的配套工程,码头岸线长450 m、宽35 m,码头通过一座引桥与后方堆场相连接。引桥宽20 m,排架间距20 m,引桥面高程与码头高程相同为5.82 m(梅山港区理论最低潮面起算),泥面高程-8.16 m,引桥采用桩基梁板结构。

2.2 设计条件

工程设计极端高水位、设计高水位、设计低水位分别为5.70、4.23、0.27 m。根据引桥、码头面板底部的高度,分别在设计高水位和极端高水位之间增加5.0 m水位,在设计低水位和设计高水位之间增加3.40 m水位,以分析最不利水位。引桥处50 a一遇设计波要素见表1。

表 1 引桥设计波要素

设计水位/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	周期 $\bar{T}$ /s
极端高水位 5.70	2.98	2.04	5.6
设计特定水位 5.00	2.95	2.02	5.6
设计高水位 4.23	2.91	2.00	5.6
设计特定水位 3.40	2.66	1.85	5.6

根据引桥面高程和设计波要素计算可知,在设计高水位时引桥断面位置处 50 a 一遇波峰面高

于面板底部高程,在极端高水位情况下,波峰面已经高于面板顶面高程,结构所受波浪力较大。

2.3 计算结果

本工程引桥上部结构所受波浪力较大,直接影响到上部结构的形式。考虑不同引桥面高程的 2 个方案,按照上述 2 种计算方法,分别对引桥面板底部的浮托力及压强进行计算,结果见表 2、3。

表 2 引桥面板底波浪浮托力计算结果

引桥面高程/m	水位/m	《港口与航道水文规范》		周益人方法	
		最大总浮托力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	冲击总力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	均匀型上托力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	局部冲击型上托力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
5.82	设计特定水位 3.40	194	132	192.95	34
	设计高水位 4.23	259	232	526.25	89
	设计特定水位 5.00	140	168	336.32	62
	极端高水位 5.70	55	85	140.61	24
6.32	设计特定水位 3.40	7	5	0.12	0.05
	设计高水位 4.23	301	211	414.24	70
	设计特定水位 5.00	223	224	484.77	87
	极端高水位 5.70	113	146	276.72	51

表 3 引桥面板底波浪压强值计算结果

引桥面高程/m	水位/m	《港口与航道水文规范》		周益人方法	
		均布压强/kPa	冲击压强/kPa	均匀压强/kPa	冲击压强/kPa
5.82	设计特定水位 3.40	12.89	87.77	31.77	55.50
	设计高水位 4.23	12.95	87.31	52.63	82.87
	设计特定水位 5.00	7.00	46.85	33.63	43.19
	极端高水位 5.70	2.75	18.30	14.06	13.19
6.32	设计特定水位 3.40	3.67	24.98	0.33	1.49
	设计高水位 4.23	15.05	101.46	49.50	83.16
	设计特定水位 5.00	11.15	74.46	48.48	72.23
	极端高水位 5.70	5.65	37.50	27.67	32.96

3 波浪物理模型试验

本工程物理模型试验在 1 m 宽的波浪水槽中进行,水槽两端均设有消波装置,面板下部设置压力传感器测量面板底部所受波浪力,模型试验如图 1 所示,压力测点布置如图 2 所示。

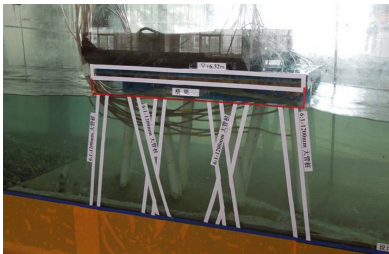


图 1 模型试验

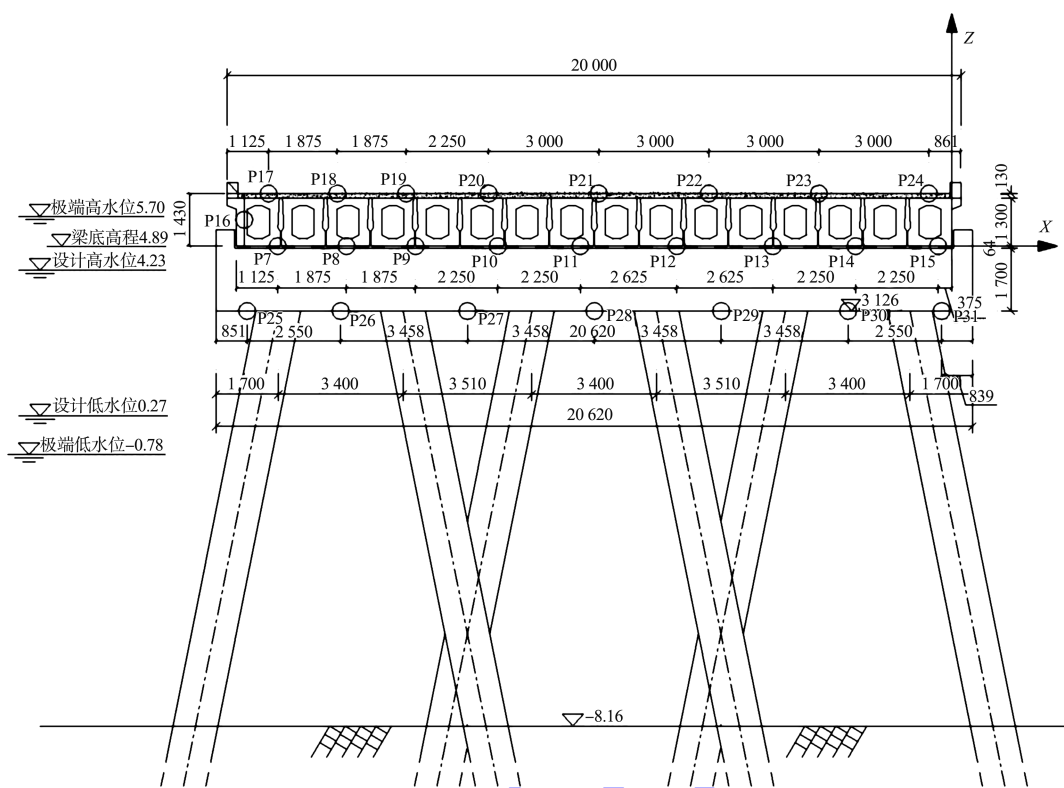


图 2 压力测点布置 (高程: m; 尺寸: mm)

引桥面板波浪的浮托力应计算各工况水位可能出现的最大总浮托力及对应的均布压强、最大冲击压强及对应的冲击总力，找准最不利水位是关键。模型试验考虑了 4 个水位、2 种面板顶高程条件下引桥面板的受力情况。物理模型与计算时采用的波浪资料一致。波浪对面板底部的最大浮托力及压强试验结果见表 4。

水位/m	表 4 引桥底面波浪最大总浮托力及压强值的物理模型试验结果			
	最大总浮托力/(kN·m ⁻¹)		均布压强值/kPa	
	引桥面 高程	引桥面 高程	引桥面 高程	引桥面 高程
	5.82 m	6.32 m	5.82 m	6.32 m
设计特定水位 3.40	345.76	264.72	17.29	13.24
设计高水位 4.23	476.93	426.57	23.85	21.32
设计特定水位 5.00	354.69	450.73	17.73	22.54
极端高水位 5.70	156.20	243.66	7.81	12.18

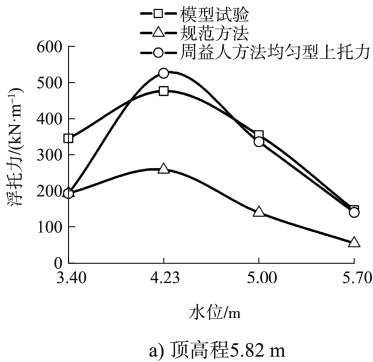
4 结果比较分析

4.1 结果比较

分析各水位条件下波浪对面部浮托力的计算

及模型试验结果。引桥面顶高程 5.82 m 时的总浮托力见图 3a)。可以看出，规范方法、周益人方法的计算结果与模型试验结果变化趋势总体一致：先随水位上升不断增大，在设计高水位 4.23 m 时最大，然后随水位上升不断减小。

引桥面顶高程为 6.32 m 时的总浮托力见图 3b)，计算与模型试验结果变化趋势总体一致：先随水位上升不断增大，在设计特定水位 5.00 m 时最大，然后随水位上升不断减小。但是规范方法计算最大总浮托力在设计高水位 4.23 m 时最大，然后随水位上升不断减小。



a) 顶高程 5.82 m

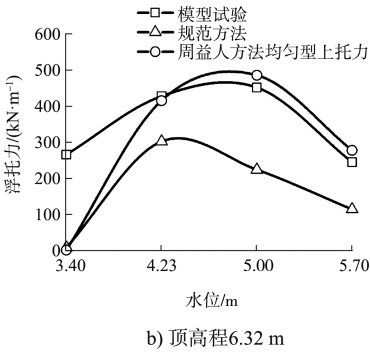
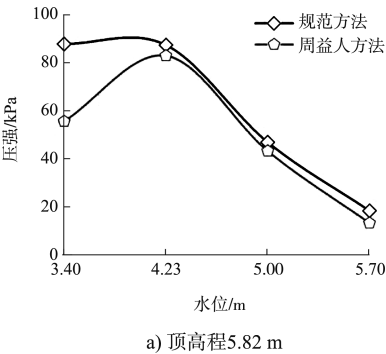


图 3 不同水位总浮托力对比

在设计特定水位 3.40 m 时规范方法与周益人方法计算的波浪浮托力均较小, 但是模型试验数据结果较大, 这主要是在对平板波浪上托力进行计算时, 相对超高因子对计算值比较敏感, 设计特定水位 3.40 m 时 $\Delta h/(C\eta)=0.99$, 故计算浮托力较小, 模型试验时由于不规则波的随机特性, 可能出现较大的浮托力。

引桥面顶高程为 5.82 m 时冲击压强见图 4a)。可以看出, 规范方法与周益人方法关于引桥面板波浪冲击压强总体变化趋势总体一致: 先随水位上升不断增大, 在设计高水位 4.32 m 时最大, 然后随水位上升不断减小。

引桥面顶高程为 6.32 m 时冲击压强见图 4b)。可以看出, 规范方法与周益人方法关于引桥面板波浪冲击压强总体变化趋势总体一致: 先随水位上升不断增大, 在设计高水位 4.32 m 时最大, 然后随水位上升不断减小。



a) 顶高程5.82 m

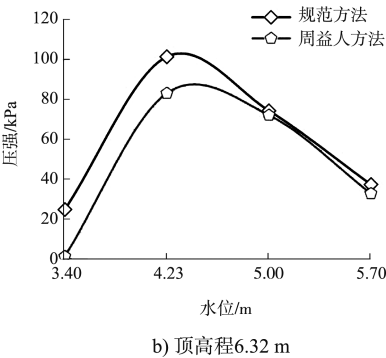


图 4 不同水位冲击压强值比较

为了进一步增加数据的可比性, 将两个引桥高程数据均换算为引桥面高程为 5.82 m, 按相对高程换算, 引桥面高程为 6.32 m 对应各水位换算为高程 5.82 m 后水位均减小 0.5 m, 统一引桥面高程为 5.82 m, 对应 8 个水位波浪浮托力如图 5 所示, 引桥面顶高程为 5.82 m, 规范方法、周益人方法计算的结果与模型试验结果关于引桥面板波浪总浮托力总体变化趋势总体一致: 先随水位上升不断增大, 在设计高水位 4.23 m 时最大, 然后随水位上升不断减小, 但是规范方法计算最大总浮托力在设计特定水位 3.73 m 时最大, 然后随水位上升不断减小。

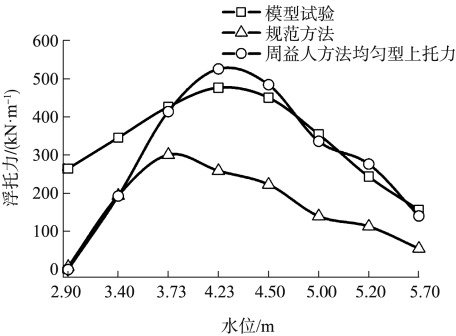


图 5 统一高程 5.82 m 后不同水位总浮托力比较

4.2 结果分析

1) 对于总浮托力, 《港口与航道水文规范》中的计算方法按不规则波计算, 波浪总浮托力计算结果较试验结果小。引桥面顶高程为 5.82 m, 对应的最不利水位相同, 均为设计高水位 4.32 m,

计算结果较试验结果小 46%; 引桥面顶高程为 6.32 m, 对应的最不利水位不同, 计算对应最不利水位为设计高水位 4.32 m, 试验对应最不利水位为特定设计水位 5.00 m, 计算结果较试验结果小 33%。对于压强计算, 按不规则波计算, 两种引桥面顶高程分别为 5.82 和 6.32 m, 波浪均布压强结果较试验结果小, 但冲击压强结果较试验结果大。

2) 周益人方法对于总浮托力, 按均匀型上托力计算, 波浪总浮托力计算结果与试验结果较接近。引桥面顶高程为 5.82 m, 对应的最不利水位相同, 均为设计高水位 4.32 m, 计算结果较试验结果大 10%; 引桥面顶高程为 6.32 m, 对应的最不利水位相同, 均为特定设计水位 5.00 m, 计算结果较试验结果大 8%。对于压强计算, 两种引桥面顶高程分别为 5.82 和 6.32 m, 波浪均匀压强与冲击均较试验结果大, 且冲击压强结果较均布压强大, 但冲击压强计算结果与《港口与航道水文规范》计算的冲击压强较为接近。

3) 计算波浪对高桩梁板上部结构底部浮托力时, 计算结果对相对超高 $\Delta h/\eta$ 比较敏感。周益人等在文献[4]中认为在相对超高 $\Delta h/\eta=0.3$ 附近时计算结果对相对超高因子最敏感,《港口与航道水文规范》认为最大浮托力出现在 $\Delta h/\eta$ 为 0.4~0.6 附近。根据《港口与航道水文规范》中计算结果, 引桥面顶高程为 5.82、6.32 m 总浮托力最大值时, $\Delta h/\eta$ 分别为 0.10、0.41; 周益人方法的计算结果与试验结果总浮托力最大值时对应水位相同, 引桥面顶高程为 5.82、6.32 m 总浮托力最大值时, $\Delta h/\eta$ 分别为 0.10、-0.07。在实际工程设计时, 不是每个工程都进行波浪物理模型试验, 建议 $\Delta h/\eta$ 在 -0.1~0.6 时, 加强波浪力的计算, 除了采用《港口与航道水文规范》中公式计算外, 可以参考周益人方法的计算公式进行复核。

4) 本工程《港口与航道水文规范》计算结果中最大总浮托力与冲击总力较为接近, 但是最大总浮托力大于冲击总力。均布压强均小于冲击压强, 故在工程设计时对于整体计算要考虑最大总浮托力, 对于构件计算时由于冲击压强作用范围较小, 主要考虑均布压强并通过冲击压强进行复核。

5) 本工程试验结果表明, 引桥面顶高程为 5.82 和 6.32 m 总浮托力最大值较为接近, 但是引桥面顶高程为 6.32 m 较 5.82 m 的冲击压强大, 考虑到面板等构件计算须考虑冲击压强, 故推荐引桥面顶高程取 5.82 m, 此高程比 6.32 m 的上部结构所受波浪力更优。

5 结论

1) 在实际工程计算中, 对于离岸码头、引桥上部结构的波浪浮托力计算, 采用《港口与航道水文规范》中不规则波的计算公式, 并可参考周益人方法提出的计算公式进行复核。

2) 《港口与航道水文规范》与周益人方法的计算公式均对相对超高比较敏感, 在实际工程设计中, 须特别注意 $\Delta h/\eta$ 在 -0.1~0.6 的波浪浮托力计算。

3) 在工程设计中对码头或者引桥面顶高程确定时, 要充分考虑上部结构所受波浪力, 通常要求上部结构高于设计高水位时波浪的波峰面, 如果条件不允许, 则按上述方法计算上部结构底面的浮托力, 合理确定顶高程以避免较大的波浪浮托力。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力分布[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 41-47.
- [3] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 30-40.
- [4] 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.
- [5] 宋军营, 卢海斌. 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.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册(中册)[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [7] 施斌. 离岸透空式结构波浪上托力计算方法的探讨[J]. 水运工程, 2005(11): 20-24, 28.