



防波堤越浪条件下高桩码头 面板波浪浮托力研究

朱永光, 毛志文, 杜冰茹

(广州打捞局, 广东 广州 510220)

摘要: 当越浪量超过临界值时, 产生的堤后次生波将对后方设施(如高桩码头)构成安全威胁。为保证越浪后高桩码头的结构安全, 有必要复核码头承受波浪力情况。同时, 针对目前次生波对高桩码头面板浮托力计算研究空白的问题, 进行越浪条件下高桩码头面板波浪浮托力研究。通过建立波浪物理模型试验, 研究入射波堤顶越浪产生堤后次生波与堤头绕射进入港内波浪叠加后港内波浪分布和码头承受波浪力情况, 并将物理模型试验结果与规范经验公式计算结果进行对比。通过分析越浪后的波列特征, 给出导致规范公式不适用及计算结果偏大的根本原因。结果表明, 越浪后次生波对高桩码头面板产生的最大总浮托力实测值约为规范经验公式计算结果的50%, 存在显著安全冗余; 建议计算越浪后的次生波最大总浮托力时, 在规范公式的基础上引入破碎波折减系数 β 且其值在0.5~0.7之间。

关键词: 越浪; 次生波; 波浪物理模型; 波浪浮托力

中图分类号: U 656.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0088-09

Wave-induced uplift forces of pile-supported wharf panels under breakwater wave overtopping conditions

ZHU Yongguang, MAO Zhiwen, DU Bingru

(Guangzhou Salvage Bureau, Guangzhou 510220, China)

Abstract: When the wave overtopping exceeds the critical value, the secondary waves generated behind the breakwater will pose a safety threat to the rear facilities (such as pile-supported wharves). To ensure the structural safety of pile-supported wharves under overtopping conditions, it is necessary to reassess the wave-induced forces acting on the wharf structure. In response to the problem of the current research gap concerning the calculation of uplift forces caused by secondary waves on panels of pile-supported wharves, the wave-induced uplift forces under overtopping conditions are investigated in this paper. A physical wave model test is established to examine the wave distribution within the harbor and the corresponding wave loads on the wharf, focusing on the combined effects of secondary waves generated by wave overtopping and diffracted waves entering the harbor around the breakwater head. The test results are compared with the calculation results by empirical formulas from design code. The fundamental reasons for the overestimation and limited applicability of the code formulas is identified by analyzing the characteristics of wave trains after overtopping. The results show that the measured maximum total uplift force on the wharf panel caused by secondary waves is approximately 50% of the value predicted by the empirical formulas, indicating significant safety redundancy. It is recommended that when calculating the maximum total uplift forces of secondary waves after overtopping, a breaking wave reduction coefficient of 0.5–0.7 should be introduced on the basis of the code formulas.

Keywords: overtopping; secondary wave; wave physical model; wave-induced uplift force

收稿日期: 2025-05-09 录用日期: 2025-07-25

作者简介: 朱永光(1975—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程研究。

随着我国港口建设向深水化发展,防波堤作为关键水工建筑物,其造价随水深而大幅增加,常成为工程投资的主要构成部分。在兼顾结构经济性与安全性的前提下,允许极端条件下堤顶发生适度越浪。然而,当越浪量超过临界值时,产生的堤后次生波将对后方设施(如高桩码头)构成安全威胁,其中次生波对码头上部结构产生的波浪浮托力尤为关键。因此,精确计算此类浮托力对协调码头结构安全性与工程经济性、提升港口建设综合效益具有重要意义。

目前,高桩码头上部结构的波浪浮托力计算主要依据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[1](简称规范)公式。国内外学者对此也开展了广泛研究,如宋军营等^[2]通过物理模型试验,对比正向浪作用下不同总浮托力计算公式的适用性;龚晓怡等^[3]系统分析国内外公式在不同水深与周期下的差异,强调超出规范适用范围须谨慎应用;王君等^[4]建议对离岸码头及引桥结构,以规范不规则波公式为主,辅以周益人方法^[5-7]进行复核;叶跃飞等^[8]针对斜向不规则波作用下离岸式高桩码头面板浮托力进行研究,给出斜向不规则波作用下的面板波浪浮托力的计算公式;吴国茂等^[9]深入探讨高桩码头浮托力的计算方法,通过对现有不同的浮托力公式进行对比分析,对总托力是否考虑静水压强下的影响进行探讨。然而,规范公式明确适用于波浪正向作用工况,对越浪后次生波引发的浮托力计算尚未规定。当前研究存在明显空白:波浪越过防波堤堤顶破碎后形成的次生波,其波形、周期及能量分布均发生显著变化。有研究^[10-11]表明:1)堤后次生波周期随相对堤顶水深增大而增大,总波能虽低于入射波,但波能透射系数与谱峰值折减系数随该水深值增加而增大;次生波谱峰值显著降低,谱峰频率与入射波基本一致,且在高、低频区均产生新的波浪成分。次生波的这些独特性质,导致其作用机制与规范针对的正向浪存在本质差异。为准确评估次生波

对高桩码头面板浮托力的作用机理,优化防波堤堤顶高程与码头结构高程设计(以期合理控制工程造价),本文开展波浪物理模型试验,模拟越浪后绕射浪与次生波叠加对码头面板的综合作用,并提出针对越浪后次生波作用下的高桩码头面板底部单位长度波浪最大总浮托力计算的修正建议,以反映次生波导致的浮托力实际衰减特性。研究结果可为堤后高桩码头的结构优化提供依据,减少工程投资。

1 工程概况及模型试验

1.1 工程概况

某工程位于海南岛东侧沿海海域,建设1个8万DWT重件泊位。工程海域海况恶劣,50a一遇波高可达10m以上。防波堤东南—南向布置,东防波堤长458m,南防波堤长242m,南防波堤水深约11m。码头与防波堤采用分离式布置。平面布置见图1。防波堤内外侧均为斜坡式结构,内外坡均采用坡度1:1.5,采用抛石斜坡堤结构。根据防护等级,防波堤按允许越浪标准,堤顶高程宜定在设计高水位以上不小于0.6倍设计波高值处,设计波高取50a一遇 $H_{13\%}$ 。堤顶高程按规范要求取6.5m。防波堤水工结构断面见图2。

码头结构采用高桩梁板式,断面结构见图3。码头结构长度272.1m,宽度为30m,平台顶面高程4.8m。码头分4个结构段,每个结构段长度为68m,排架间距8m,共计32跨36排。每樁排架基础由5根直径1.8m的灌注桩组成,持力层为中风化层,桩基需要嵌岩。码头上部结构由现浇横梁、预制靠船构件、预制纵梁、面板以及磨耗层构成。横梁下部高度1.63m、宽度2.4m;纵梁高度1.8m、宽度1.2m,两侧各设置边梁,边梁高度1.8m、宽0.8m。面板为叠合板,厚度0.6m,上部为磨耗层,厚度0.05~0.15m。极端高水位下,面板底部在静水面上的高度为1.70m。

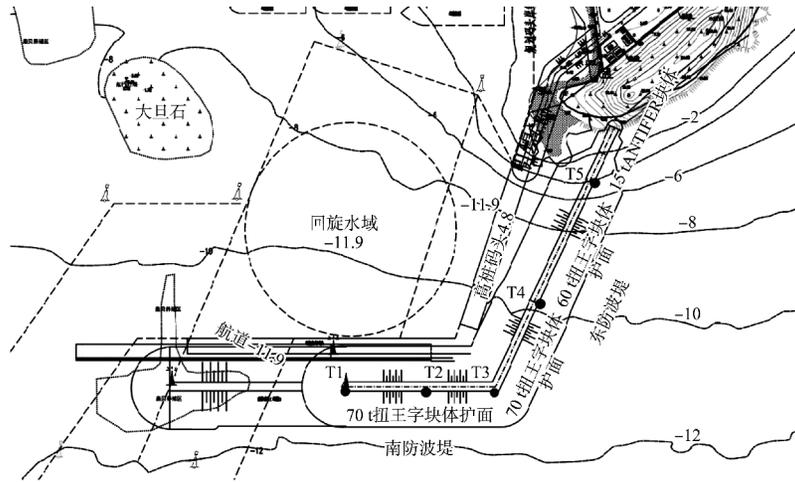


图 1 平面布置(单位:m)

Fig. 1 Planer layout(unit:m)

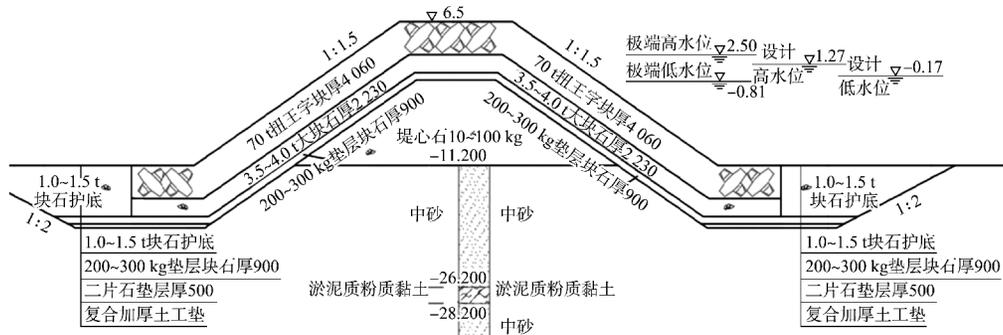


图 2 南堤—东堤 150 m 结构断面(尺寸:mm;高程:m)

Fig. 2 150 m structural section of south breakwater-east breakwater(dimension ;mm ;elevation ;m)

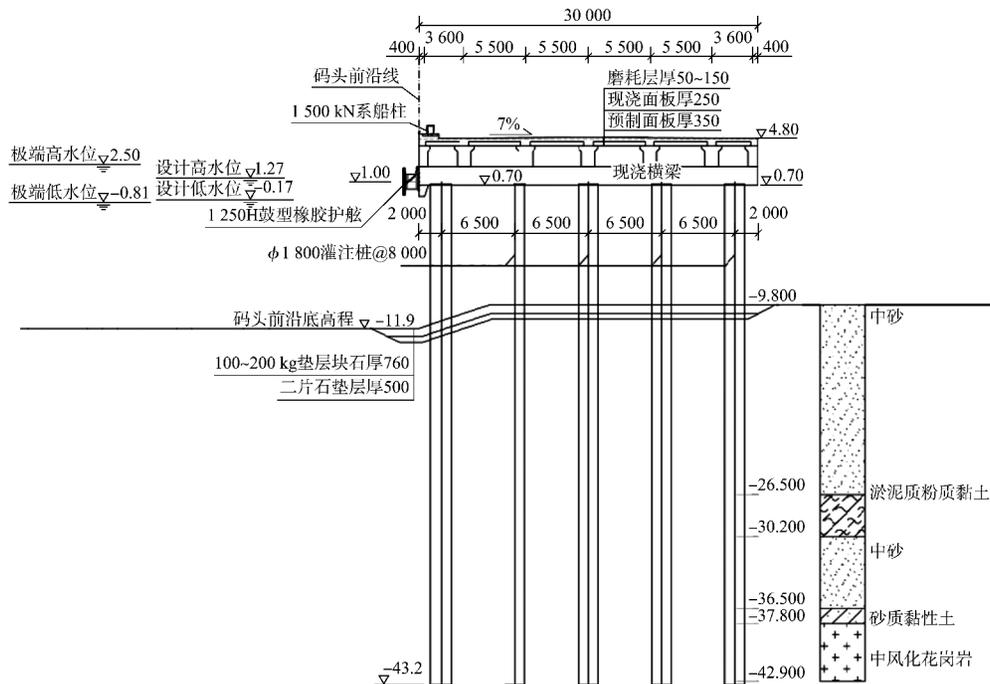


图 3 码头结构断面(尺寸:mm;高程:m)

Fig. 3 Wharf structural section(dimension ;mm ;elevation ;m)

1.2 设计水位(当地理论深度基准面起算)

设计高水位为 1.27 m, 设计低水位为 -0.17 m, 极端高水位为 2.50 m(50 a 一遇高潮位), 极端低水位为 -0.81 m(50 a 一遇低潮位)。

1.3 波浪物理模型试验

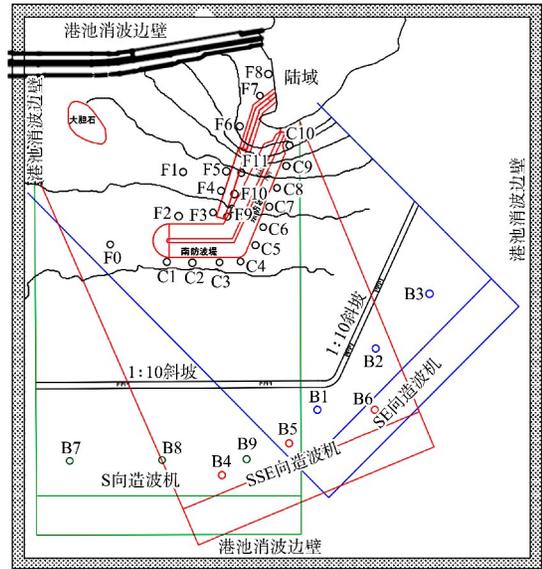
为研究入射波堤顶越浪产生堤后次生波与堤头绕射进入港内波浪叠加后港内波浪分布和码头承受波浪力情况, 开展波浪物理模型试验^[12]。试验在交通运输部天津水运工程科学研究所临港试验大厅中进行, 水池长 87 m、宽 42 m 和高 1 m, 试验有效区域长 40 m、宽 42 m 和高 1 m。波浪整体物理模型采用正态、定床模型, 模型设计满足几何相似、重力相似和其他相关比尺的要求。整体试验模拟几何比尺为 48, 即波高比尺也为 48, 周期比尺为 6.92。

模型试验的 3 个主要浪向为 SE(东南)、SSE(南—东南)和 S 向。在模型中布置 3 个方向造波机见图 4。造波机前 B1~B9 为深水波高率定点; C1~C10 为防波堤前 50% 波长位置测点; F1~F8 为港内波高测点, 用于测量波浪的绕射传播及得到码头前沿的波高; F9~F10 为港内波高测点, 用于测量防波堤越浪产生次生波与绕射波浪叠加后码头前沿的波高。经试验发现, S 向波浪作用下仅在南防波堤形成少量越浪, 越浪产生次生波不在港内波浪中占主导因素, 故不讨论 S 向波浪作用情况。试验采用波浪要素见表 1。

波压力的测定通过在码头底板布置点压力传感器完成, 模型采样时间间隔均为 0.01 s, 在不规则波作用下, 连续采集 100 个以上波作用的波压力过程。共布置 18 个测力点(P1~P18), 测点的总长度为 84.5 m, 总宽度为 30 m。模型波压力传感器布置见图 5。

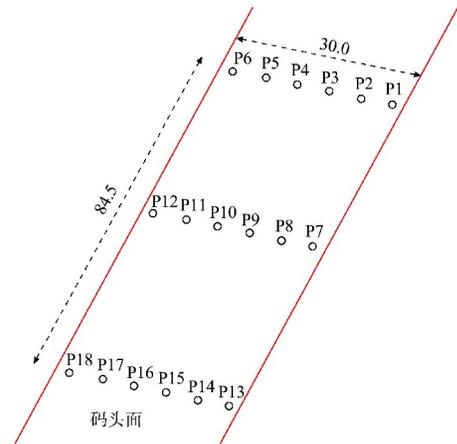
表 1 物理模型试验波浪要素

| 试验波向 | 水位 | 波况 | $H_{13\%}/m$ | 有效周期/s |
|------|-------|----------|--------------|--------|
| SE | 极端高水位 | 重现期 50 a | 9.60 | 13.75 |
| SSE | 极端高水位 | 重现期 50 a | 9.16 | 13.56 |



注: F0~F11 为港区测波点。

图 4 模型布置与波要素率定点的位置
Fig. 4 Model layout and location of wave parameter calibration points



注: P13~P18 断面距码头南端约 20 m。

图 5 码头区域的压力测点布置(单位:m)
Fig. 5 Pressure measurement points layout in wharf area (unit:m)

2 模型试验结果

2.1 港内波浪结果

2.1.1 SE 向浪

在 50 a 重现期极端高水位与 SE 向浪共同作用下, 波浪在东堤和转角区域全面越浪后引起码头全面上水见图 6, 上水高度最大出现在码头的南端测点 F9 处, 上水高度约为 1.4 m。波浪沿东防波

堤和南防波堤传播越浪现象显著。测得 F9 测点 $H_{1\%}$ 为 3.64 m。



图 6 重现期 50 a 极端高水位和 SE 向波浪作用在东堤形成全面越浪

Fig. 6 Full overtopping of east breakwater under SE waves and extreme high water level of 50-year return period

2.1.2 SSE 向浪

在 50 a 重现期极端高水位与 SSE 向浪共同作用下，波浪在南防波堤和转角区域发生局部的越浪现象，南防波堤全面越浪后引起码头局部区域的上水见图 7。上水的范围集中于码头南端 90 m 的范围内，码头的南端 F9 测点处，上水高度约为 1 m。测得 F9 测点 $H_{1\%}$ 为 3.33 m。码头前沿波高实测值见表 2。

表 2 码头前沿波高实测值

Tab. 2 Measured wave heights at wharf front

| 试验波向 | 测点 | $H_{1\%}/m$ | $H_{13\%}/m$ | T_s/s | d/m | $\beta/(^\circ)$ |
|------|-----|-------------|--------------|---------|-------|------------------|
| SE | F3 | 3.01 | 2.08 | 13.75 | 14.4 | 27.0 |
| | F4 | 2.53 | 1.74 | 13.75 | 14.4 | |
| | F5 | 2.46 | 1.69 | 13.75 | 14.4 | |
| | F9 | 3.64 | 2.54 | 13.75 | 14.4 | |
| | F10 | 3.37 | 2.34 | 13.75 | 14.4 | |
| | F11 | 2.55 | 1.75 | 13.75 | 14.4 | |
| SSE | F3 | 3.73 | 2.60 | 13.56 | 14.4 | 49.5 |
| | F4 | 2.24 | 1.77 | 13.56 | 14.4 | |
| | F5 | 2.65 | 1.82 | 13.56 | 14.4 | |
| | F9 | 3.33 | 2.31 | 13.56 | 14.4 | |
| | F10 | 1.78 | 1.22 | 13.56 | 14.4 | |
| | F11 | 2.00 | 1.36 | 13.56 | 14.4 | |

注： d 为水深； T_s 为有效周期； β 为波浪入射角。



图 7 重现期 50 a 极端高水位和 SSE 向波浪作用在南堤形成全面越浪

Fig. 7 Full overtopping of south breakwater under SSE waves and extreme high water level of 50-year return period

2.2 浮托力试验结果

2.2.1 SE 向浪

在重现期 50 a 极端高水位和 SE 向累计频率为 1% 波浪共同作用下，观测区码头面板受到的最大浮托力 23 342.7 kN，相当于码头横断面单位长度受力为 276.2 kN/m，即码头单位面积受力为 9.2 kN/m²。码头面板加权平均的总压强历时曲线见图 8。

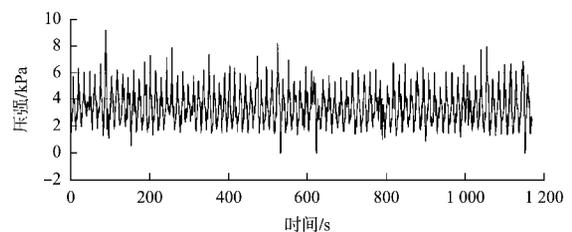


图 8 在重现期 50 a 极端高水位和 SE 向波浪共同作用下码头区域加权压强历时曲线

Fig. 8 Time history curve of weighted pressure in wharf area under SE waves and extreme high water level of 50-year return period

2.2.2 SSE 向浪

重现期 50 a 极端高水位和 SSE 向波浪共同作用下，观测区码头面板受到的最大浮托力 14 434.0 kN，相当于码头横断面单位长度受力为 170.8 kN/m，即码头单位面积受力为 5.7 kN/m²。码头面板加权平均的总压强历时曲线见图 9。各个测点的最大压强见表 3。

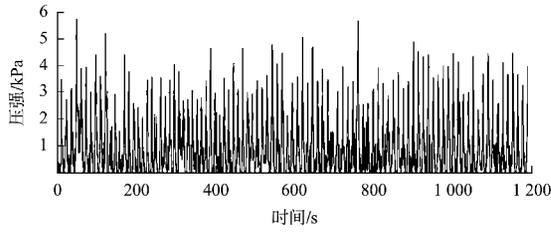


图 9 重现期 50 a 极端高水位和 SSE 向波浪作用下
码头区域加权压强历时曲线

Fig. 9 Time history curve of weighted pressure in
wharf area under SSE waves and extreme high
water level of 50-year return period

表 3 码头各压力测点的累计频率为 1% 对应压强

Tab. 3 Pressure corresponding to 1% cumulative frequency at
various pressure measurement points on wharf

| 测点 | 压强/kPa | |
|------|----------------------------|-----------------------------|
| | 重现期 50 a 极端 高水位和 SE 向波浪 | 重现期 50 a 极端 高水位和 SSE 向波浪 |
| P1 | 14.10 | 3.91 |
| P2 | 19.50 | 6.07 |
| P3 | 6.90 | 8.61 |
| P4 | 2.56 | 1.91 |
| P5 | 8.00 | 5.19 |
| P6 | 9.36 | 7.58 |
| P7 | 16.40 | 7.24 |
| P8 | 9.99 | 9.25 |
| P9 | 9.99 | 8.56 |
| P10 | 9.62 | 1.96 |
| P11 | 10.67 | 7.09 |
| P12 | 7.63 | 5.48 |
| P13 | 18.32 | 13.41 |
| P14 | 10.09 | 2.35 |
| P15 | 5.65 | 6.02 |
| P16 | 9.67 | 2.14 |
| P17 | 10.98 | 8.02 |
| P18 | 10.51 | 6.46 |
| 均布压强 | 9.21 | 5.70 |

3 模型与经验公式结果对比

3.1 规范与经验公式

高桩码头面板底部纵向单位长度上的波浪最大总浮托力主要采用规范第 10.5.5 条规定, 正向不规则波作用下按下式计算:

$$\frac{P_{1\%}}{\gamma x_{1\%} H_{1\%}} = K_1 \left(1 - \frac{\Delta h}{C\eta_{1\%}}\right)^{0.3} \exp\left[-0.9\left(\frac{\Delta h}{C\eta_{1\%}} - 0.75\right)^2\right] \quad (1)$$

$$K_1 = 0.85 + 0.35 \tanh\left(\frac{L_s}{2B} - 2\right) \quad (2)$$

$$\eta_{1\%} = \frac{H_{1\%}}{2} + \frac{\pi H_{1\%}^2}{2L_s} \frac{\cosh \frac{2\pi d}{L_s} \left(\cosh \frac{4\pi d}{L_s} + 2\right)}{4 \sinh^3 \frac{2\pi d}{L_s}}.$$

$$\left(\frac{\eta_{1\%}}{H_{1\%}} \leq 0.7\right) \quad (3)$$

$$x_{1\%} = \frac{L_s}{\pi} \arccos \frac{\Delta h}{C\eta_{1\%}} \quad (4)$$

$$L_s = \frac{gT_s^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L_s} \quad (5)$$

$$\bar{P}_{1\%} = \frac{P_{1\%}}{x_{1\%}} \quad (6)$$

式中: $P_{1\%}$ 为累积频率为 1% 的波高作用下面板底部纵向单位长度上的最大总浮托力, kN/m; γ 为水的重力密度, kN/m³; B 为沿波浪传播方向的面板宽度, m; $x_{1\%}$ 为面板底部的波浪作用宽度, m, 即均布压强分布宽度, 当 $x_{1\%} > B$ 时取 B ; $H_{1\%}$ 为累积频率为 1% 的入射波波高, 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, 对于面板下有纵横梁时取 $C=1.1$, 无纵横梁时取 $C=1.0$; $\eta_{1\%}$ 为 $H_{1\%}$ 波高对应的波峰在静水面以上的高度, m; L_s 为有效波长, m; d 为码头前沿水深, m; T_s 为有效波周期, s; $\bar{P}_{1\%}$ 为累积频率为 F 的波高作用下面板底部均布压强, kPa。

同时考虑到波浪入射角度不同, 不都是正向作用于码头, 参考合田良实^[13]提出的计算公式, 引入斜向波影响系数 K_β :

$$P_\beta = P_0 K_\beta \quad (7)$$

$$K_\beta = (1 + \cos\beta)/2 \quad (8)$$

式中: P_β 为斜向波作用下的码头面板总浮托力, kN/m; P_0 为正向波作用下的总浮托力, kN/m;

β 为波浪入射角(波向与码头面法线间的夹角),($^{\circ}$)。

3.2 结果对比

由于测力区位置介于 F3、F4、F9、F10 测点围成的范围,计算波高取 4 个测波点波高平均值。

SE 向计算波高 $H_{1\%}$ 取 2.93 m, SSE 向计算波高 $H_{1\%}$ 取 2.77 m。

码头底面波浪最大浮托力计算值及物理模型试验结果见表 4。

表 4 码头底面波浪最大浮托力计算值及物理模型试验结果

Tab. 4 Calculated maximum wave uplift force on wharf bottom and physical model test results

| 波向 | 纵向单位长度上的最大总浮托力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) | | | 面板底部均布压强/kPa | | |
|-------|--|-------------------|---------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| | 实测值加权平均 | 规范公式计算的 $P_{1\%}$ | 合田良实公式计算的 $P_{1\%}$ | 实测均布压强 | 规范公式计算的 $P_{1\%}$ | 合田良实公式计算的 $P_{1\%}$ |
| SE 向 | 276.2 | 530.74 | 501.82 | 9.21 | 17.88 | 16.90 |
| SSE 向 | 170.8 | 336.60 | 277.60 | 5.70 | 14.47 | 11.87 |

由以上结果可见,最大总浮托力实测值远小于考虑波浪正向入射的规范公式计算值,约为规范计算结果的 50%。实测值约为合田良实公式折减后结果的 55%~62%。

因此,对于越浪后的堤后次生波高桩码头面板底部单位长度上的波浪最大总浮托力计算,建议在规范公式 10.5.5-1 的基础上引入破碎波折减系数 β (在 0.5~0.7 之间)。

3.3 原因分析

3.3.1 次生波波面变化机制

根据式(3),计算得到 SE 向浪下 $\eta_{1\%} = 1.87 \text{ m}$, 可得 $\eta_{1\%}/H_{1\%} = 0.63 (<0.7)$; SSE 向浪下 $\eta_{1\%} = 1.74 \text{ m}$, 可得 $\eta_{1\%}/H_{1\%} = 0.63 (<0.7)$ 满足规范公式适用条件。为了更深入研究波浪越堤过程中波峰高度与波高比值的变化机制,对比 SSE 向入射浪下 B1(模型边界入射波)、C7(堤前波)、F9(码头后沿)3 个测点的波面过程,见图 10。

具体分析为:1)当波浪传播至防波堤附近时,水深迅速减小,部分大波在到达堤前提前发生破碎,部分波能转化为湍流动能和飞溅水体的动能,导致有效波高衰减。波浪发生破碎,波峰变陡,波谷变缓;部分波高到达堤前时发生浅水变形效应,波速降低,波长缩短,波峰变陡,波谷变缓。

从 B1 和 C7 测点的波面过程曲线可明显看出,波浪破碎和浅水变形均会导致波峰变陡,波峰面高度与波高比值较原来入射波一定程度上增大。2)越浪后,水体翻越堤顶形成冲击射流或紊动水流,激发次生波。次生波的波高通常低于原始波(能量部分耗散),但其波峰高度受冲击波及绕射波叠加影响,可能因局部聚焦效应短暂升高。从 F9 测点波面过程曲线可见,大部分波高均发生明显减小,个别大波波峰较陡,大部分波的波峰高度与波高比值均有所增加。

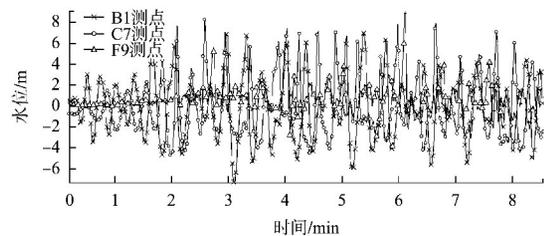


图 10 B1、C7、F9 测点的波面过程对比
Fig. 10 Comparison of wave surface processes at measurement points B1, C7, and F9

根据试验 100 个波过程,得到 3 组试验 $\eta_{1\%}/H_{1\%}$, 见表 5。可见,波浪越过防波堤后导致 $\eta_{1\%}/H_{1\%} > 0.7$, 这与式(3)计算结果不一致。可见,实际情况下次生波并不符合规范公式规定的适用条件。越浪后次生波对码头面的浮托力远小于规范公式计算结果。

表 5 SSE 向入射浪下 3 组试验参数
Tab. 5 Test parameters for three cases under SSE-incident wave conditions

| 试验 | $\eta_{1\%}/m$ | | | | $H_{1\%}/m$ | | | | $\eta_{1\%}/H_{1\%}$ | | | |
|-------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|----------------------|------|------|------|
| | F3 | F4 | F9 | F10 | F3 | F4 | F9 | F10 | F3 | F4 | F9 | F10 |
| 第 1 组 | 3.03 | 1.02 | 4.75 | 1.55 | 3.35 | 1.69 | 5.61 | 2.48 | 0.90 | 0.60 | 0.85 | 0.63 |
| 第 2 组 | 2.58 | 1.67 | 3.09 | 1.47 | 3.73 | 2.24 | 3.33 | 1.78 | 0.69 | 0.75 | 0.93 | 0.83 |
| 第 3 组 | 1.98 | 1.94 | 2.83 | 1.47 | 3.94 | 2.18 | 3.73 | 1.90 | 0.50 | 0.89 | 0.76 | 0.77 |

注: 灰色为 $\eta_{1\%}/H_{1\%} > 0.7$ 的结果。

3.3.2 总浮托力较规范公式小的原因分析

规范关于对总浮托力计算公式规定了限制条件 $\eta_{1\%}/H_{1\%} \leq 0.7$, 并做了解释: 二阶 Stokes 波波面高度 η 计算公式是合理的, 在波高接近破碎波高、波浪周期较大时, 波浪浅水变形严重, 波面高度计算值会超过波高值, 实际情况较少发生, 根据大量的试验结果, η/H 在 0.5~0.7 之间, 因此建议增加限制条件 $\eta/H \leq 0.7$ 。而规范对于 $\eta/H > 0.7$ 的少数情况, 未提出明确规定。

本文通过波浪物理模型试验, 得到堤后次生波不满足 $\eta/H \leq 0.7$, 且实测总浮托力远小于同等波高下规范公式计算结果。根据次生波的波动特性, 本文总结有以下 4 点原因: 1) 入射波在堤前和越堤时发生破碎, 部分波能转化为湍流动能和飞溅水体的动能, 导致有效波高衰减。尽管波峰相对静水面高度较高, 但破碎后波峰持续时间缩短, 整体浮托力积分值降低。2) 越浪后形成的次生波(如射流冲击和紊动水流)具有高频特性, 其作用时间短且分布不均。试验中观测到的波峰高度升高可能反映局部瞬时高压, 但总浮托力因能量分散而减小。3) 波浪破碎时空气被卷入水体, 形成气液混合流。规范公式假设水体为纯液相, 未考虑空气对水密度的折减效应。实测中混合流密度降低, 导致浮托力计算值偏高。4) 气液混合相可能引发空蚀现象, 削弱水体对面板的持续压力作用。此外, 射流冲击的瞬时高压区域较小, 难以覆盖整个面板面积, 总浮托力积分值因此减小。

4 结语

1) 本文通过建立波浪物理模型试验, 发现实测高桩码头面板最大总浮托力为规范经验公式计算结果的 55%~62%, 可见同等波高条件下, 次生波产生的总浮托力比正常入射波要小很多。建议针对越浪后的次生波最大总浮托力计算, 在规范公式 10.5.5-1 的基础上引入破碎波折减系数 β 且其值在 0.5~0.7 之间。

2) 通过深入研究波浪传播过程发现, 波浪破碎、浅水变形均导致波峰变陡, 波峰高度(相对于原静水面)与波高比值一定程度上变大, 并出现 $\eta_{1\%}/H_{1\%} > 0.7$ 的情况, 导致规范公式不适用。

参考文献:

- [1] 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.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [2] 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.
SONG J Y, LU H B. Calculation of total wave uplift force on offshore high-piered pier structure under forward waves[J]. Port & waterway engineering, 2014(3): 94-97.
- [3] 龚晓怡, 莫建新, 李存兴. 中外规范高桩结构波浪浮托力对比[J]. 水运工程, 2020(3): 43-49.
GONG X Y, MO J X, LI C X. Comparison of wave uplift forces for high-pile structures between Chinese and

- foreign codes [J]. Port & waterway engineering, 2020(3): 43-49.
- [4] 王君, 王涛, 黄宗伟. 高桩梁板式结构面板波浪浮托力计算与模型试验[J]. 水运工程, 2021(10): 203-208.
WANG J, WANG T, HUANG Z W. Calculation and model test of wave uplift force of high-pile beam-slab structure panel [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 203-208.
- [5] 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.
ZHOU Y R, CHEN G P, WANG D T. Calculation methods of uplift forces of waves on a horizontal plate[J]. The ocean engineering, 2004, 22(2): 26-30.
- [6] 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.
ZHOU Y R, CHEN G P, HUANG H L, et al. Distribution of uplift pressure along a horizontal plate of an open wharf under wave action [J]. The ocean engineering, 2003, 21(4): 41-47.
- [7] 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.
ZHOU Y R, CHEN G P, HUANG H L, et al. An experimental study on uplift impact pressure of waves on a horizontal plate of an open wharf [J]. The ocean engineering, 2004, 22(3): 30-40.
- [8] 叶跃飞, 尹涛, 陈国平. 斜向不规则波作用下离岸式高桩码头面板波浪浮托力研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(6): 267-268.
YE Y F, YIN T, CHEN G P. Study on wave uplift force on deck slabs of offshore high-pile wharves under oblique irregular waves [J]. China watertransport (the second half of the month), 2016, 16(6): 267-268.
- [9] 吴国茂, 戴志峰. 高桩码头浮托力计算[J]. 水运工程, 2015(11): 38-41.
WU G M, DAI Z F. Calculation of uplift force on high-pile wharves [J]. Port & waterway engineering, 2015(11): 38-41.
- [10] 戈龙仔, 迟杰, 张慈珩. 防波堤堤后次生波的试验研究[J]. 水道港口, 2010, 31(3): 204-209.
GE L Z, CHI J, ZHANG C H. Experimental research on secondary wave height over breakwater [J]. Journal of waterway and harbor, 2010, 31(3): 204-209.
- [11] 代英男, 常江. 斜坡堤堤后次生波频谱分析的试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(12): 245-246, 248.
DAI Y N, CHANG J. Experimental study on spectral analysis of secondary waves behind sloping breakwaters[J]. China water transport (the second half of the month), 2011, 11(12): 245-246, 248.
- [12] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 海南万宁抢险打捞综合基地项目波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2022.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Research report on wave overall physical model test for Hainan Wanning emergency rescue and salvage base project [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2022.
- [13] 合田良实. 港工建筑物的防浪设计[M]. 刘大中, 孙巨才, 译. 北京: 海洋出版社, 1983.
GODA Y. Wave forces on maritime structures[M]. LIU D Z, SUN J C, translate. Beijing: China Ocean Press, 1983.

(本文编辑 王璁)

征订通知

2026年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志官方网站 www.sygcc.com.cn 首页下载中心下载“2026年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部